

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

Université de Tébessa



Faculté des Sciences Exactes
Et des Sciences de la Nature
Et de la Vie

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Science

Option : Hydrogéologie appliquée

Par

Mlle: **Ghalmi Samira**

**Impact des sites miniers abandonnés sur
l'environnement. Cas de la région Nord de Tébessa.
(Extrême est Algérien)**

Date de soutenance : 16/07/2019

Devant le jury

Gouaidia layachi	Président	Professeur	U. de Tébessa
Fehdi Chemseddine	Directeur de thèse	Professeur	U. de Tébessa
Baali Fethi	Co-directeur de thèse	Professeur	U. de Tébessa
Defafliia Nabil	Examineur	MCA	U. de Tébessa
Maoui Ammar	Examineur	Professeur	U. de Guelma
Kachi Slimane	Examineur	Professeur	U. de Guelma

Remerciements

Au terme de la rédaction de ce manuscrit, il m'est très agréable d'exprimer ma gratitude envers toutes personnes ayant rendu ce travail possible.

Je souhaite d'abord, remercier tout particulièrement mon directeur de thèse Monsieur Chemseddine Fehdi, Professeur à l'Université de Tébessa qui m'a permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions. Je tiens encore à le remercier pour ses riches conseils et enseignements scientifiques, pour sa disponibilité permanente et pour toutes les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir.

Je fais part de toute ma gratitude à mon co-directeur de thèse, Monsieur Ammar Baali, Professeur à l'Université de Tébessa et directeur de laboratoire de recherche -Eau et Environnement- qui a bien voulu codiriger ce travail et aussi pour tous les moyens qui ont été mis à ma disposition. Je voudrais non seulement le remercier pour ses précieux conseils et sa grande disponibilité tout au long de mon travail, mais également pour sa gentillesse et son soutien, qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance aux membres de jury qui ont accepté spontanément d'évaluer le résultat de mes travaux :

Monsieur Abderrahmene Boumezbeur, Professeur à l'Université de Tébessa qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je suis très reconnaissante à Mr. Ammar Maoui et Mr. Slimane Kachi Professeurs à l'Université de Guelma pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté la tâche d'examineurs et juger ce travail. Je vous adresse mes sincères remerciements pour la confiance que vous m'avez ainsi témoignée.

Monsieur Layachi Gouaidia Professeur à l'Université de Tébessa d'avoir bien voulu consacrer son temps à donner leurs remarques quant au manuscrit soumis à son jugement.

Monsieur Nabil Defaflia Maître de conférences -A- à l'Université de Tébessa, de bien vouloir accepter d'examiner mon travail et apporter son avis et ses critiques.

Je vous remercie chaleureusement tous les personnels du laboratoire de Djbel-Onk, Bir El Ater –Tébessa-, pour leurs disponibilité, gentillesse, et leurs très large ouverture d'esprit.

Enfin, comment terminer ces remerciements sans associer ma famille pour son encouragement, son soutien et sa patience.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé à finir ce travail de près ou du loin.

Résumé

La région de Morsott-El Aouinet située à l'extrémité Nord-est de la wilaya de Tébessa, elle appartient au domaine de l'Atlas saharien oriental, à quelques kilomètres de la frontière algéro-tunisienne. Cette région est caractérisée par la présence de plusieurs sites miniers abandonnés et en activité. L'étroite relation qui existe entre la géologie et les facteurs anthropiques, influe d'une manière directe sur le chimisme de l'eau. Cela nous a amené à faire une étude hydrochimique et géochimique des eaux souterraines et de sol dans la zone d'étude.

Les échantillons acquis ont été analysés sous différents paramètres: physico-chimiques, éléments majeurs et éléments traces (métaux lourds).

L'étude hydrochimique a montré que ces eaux ont deux faciès: *Chlorurée-bicarbonaté et calcique-magnésien* et le deuxième c'est *Chlorurée-sulfaté et sodique-calcique*.

En effet, l'évaporation à l'intérieur des roches triasiques pourrait être le principal facteur de salinisation des eaux souterraines.

Les zones de forte minéralisation des éléments majeurs sont localisées dans la partie centrale et les bordures de cette région, qui est due à l'influence des formations riche en halite (diapir de Boukhadra et Mesloula). La cartographie des métaux lourds dans le sol et les eaux souterraines, a démontré une forte concentration de Cadmium, Cyanure et Manganèse, qui dépassent les normes de l'OMS (2006). Elles sont localisées dans la partie centrale plus précisément dans la rive gauche de Oued Chabro et et à la frontière ouest de la zone d'étude. Les valeurs de zinc, de cuivre et de fer restent dans les normes.

-Les résultats obtenus de l'indice de pollution des eaux souterraines varient entre "0,59 à 7.07". Les valeurs les plus basses sont obtenues en amont à l'Est du bassin versant, cette station est éloignée de tous les apports anthropiques, domestiques et industriels, tandis que la zone la plus polluée est située dans la partie centrale. Dans cette zone, l'indice de pollution varie entre "1,45 et 7.07" avec une moyenne égale à 5.34. Les eaux souterraines de cette région sont associées au chlorure, cela indique que la qualité de l'eau souterraine dans la zone d'étude est principalement influencée par la source d'origine géogénique.

-L'analyse XRF montre que les résidus de traitement sont majoritairement composés d'oxyde de calcium et oxyde de silicium. La présence de l'oxyde de Magnésium, de Fe, de soufre et de potassium, est minoritaire.

Cette thèse montre la nécessité d'une approche multidisciplinaire pour limiter le risque de contamination des eaux souterraines, les eaux de surface et le sol.

Mots clés: eaux souterraines, lixiviats du sol, contamination métallique, salinité, zone semi-aride.

Abstract

Morsott-El Aouinet is located at the north-eastern part of Tebessa, belonging to the Atlas of the Eastern Desert, a few kilometers from the Algerian-Tunisian border. This area is characterized by several active and abandoned mining sites. The close relationship between geology and human factors has a direct impact on the chemistry of water. This led to a geochemical study of groundwater and soils in the study area.

The samples acquired were analyzed according to various criteria: physical and chemical, the main elements and the trace elements (heavy metals).

The hydrochemical study has shown that these waters have two facies: chlorinated-bicarbonate and calcium-magnesium the other being, chlorinated-sulphated and sodium-calcium.

In fact, evaporation inside Triassic rocks could be the main factor of salinization of groundwater.

The areas of high mineralization of the major elements are located in the central part and the edges of this area, which is due to the influence of formations rich in halite (Boukhadra and Mesloula diapir). The mapping of heavy metals concerning the different soil and groundwater samples, has demonstrated a high concentration of Cadmium, Cyanide and Manganese, which exceed the standards of WHO (2006). They are located in the central part, more precisely in the left bank of Oued Chabro and in the western border of the study area. The values of Zinc, Copper and Iron remain in the norms.

The results obtained from the pollution index of the groundwater vary between "0.59 to 7.07". The lowest values are obtained upstream to the east of the watershed; this station is far from all anthropic, domestic and industrial inputs, while the most polluted zone is located in the central part. In this zone, the pollution index varies between "1.45 and 7.07" with a mean equal to 5.34. The groundwater in this area is associated with chloride, indicating that the groundwater quality in the study area is primarily influenced by geogenic origin.

XRF analysis shows that the treatment residues are mainly composed of calcium oxide and silicon oxide. The presence of magnesium oxide, Fe, sulfur and potassium is minor.

This thesis demonstrates the need for a multidisciplinary approach to limit the risks of contamination of groundwater, surface water and soils.

Key words: groundwater, soil leachates, metal contamination, salinity, semi-arid zone.

ملخص

تقع منطقة مرسط-العوينات في الطرف الشمالي الشرقي لولاية تبسة، وهي تنتمي إلى منطقة أطلس الصحراء الشرقية، على بعد بضعة كيلومترات من الحدود الجزائرية التونسية. تتميز هذه المنطقة بوجود عدة مواقع تعدين مهجورة ونشطة. العلاقة الوثيقة بين الجيولوجيا والعوامل البشرية لها تأثير مباشر على كيمياء الماء، أدى ذلك إلى دراسة هيدروكيميائية وجيوكيميائية للمياه الجوفية والتربة في منطقة الدراسة.

وقد تم تحليل العينات المكتسبة تحت معايير مختلفة: الفيزيائية والكيميائية، والعناصر الرئيسية والعناصر النزرة (المعادن الثقيلة).

في الواقع، قد يكون التبخر داخل صخور الترياسي هو العامل الرئيسي في تملح المياه الجوفية.

تقع مناطق تمعدن عالية من العناصر الرئيسية في الجزء الأوسط وفي حدود هذه المنطقة، والذي يرجع إلى تأثير تشكيلات الهاليت الغنية (ديابير بوخضرة و مسلولة). أظهر تخطيط المعادن الثقيلة في التربة والمياه الجوفية وجود تركيز عالٍ من الكاديوم والسيانيد والمنغنيز، وهو ما يتجاوز معايير منظمة الصحة العالمية (2006). حيث تقع في الجزء المركزي بشكل أكثر دقة في الضفة اليسرى من وادي شابرو وعلى الحدود الغربية لمنطقة الدراسة، فيما بقيت قيم الزنك والنحاس والحديد في الحدود المسموحة.

النتائج التي تم الحصول عليها من مؤشر تلوث المياه الجوفية تتراوح بين "0,59 إلى 7,07" إذ تم تسجيل أدنى القيم شرق المنبع من مستجمعات المياه، هذه المحطة بعيدة كل البعد عن جميع النشاطات البشرية والمحلية والصناعية، في حين أن المنطقة الأكثر تلوثاً تقع في الجزء المركزي في هذه المنطقة، يتراوح مؤشر التلوث بين "1,45 و 7,07" بمتوسط يساوي 5,34. ترتبط المياه الجوفية في هذه المنطقة بالكوريد، مما يدل على أن جودة المياه الجوفية في منطقة الدراسة تتأثر بشكل أساسي بمصدر المنشأ الجيولوجي.

يظهر تحليل فلورية الأشعة السينية (XRF) أن مخلفات المعالجة تتكون بشكل أساسي من أكسيد الكالسيوم وأكسيد السيليسيوم، أما وجود أكسيد المغنيسيوم، الحديد، والكبريت والبتواسيوم فوجد بنسب طفيفة.

توضح هذه الرسالة الحاجة إلى اتباع نهج متعدد التخصصات للحد من مخاطر تلوث المياه الجوفية والمياه السطحية والتربة.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، ترسبات التربة، تلوث المعادن، الملوحة، المنطقة شبه القاحلة.

Table des matières

Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE.....	2

Chapitre I : Recherches bibliographiques sur les métaux lourds

I. Introduction.....	5
II. Définition et origine	5
III. Différentes sources de métaux lourds	6
III.1. Les sources naturelles.....	6
III.2. Les sources anthropiques.....	6
IV. Répartition des métaux lourds dans l'environnement	7
IV.1. Contamination des sols	7
IV.1.1. Le processus de transfert	7
IV.1.2. Répartition des métaux lourds dans les sols.....	7
IV.2. Contamination de l'air	8
IV.3. Contamination de l'eau	9
V. Impact toxicologique.....	9
V.1. Exposition.....	9
V.2. Effets des métaux lourds sur le milieu aquatique	10
V.3. Effets sur la santé.....	10
VI. Normes et réglementation	11
VII. Les éléments traces métalliques.....	12
VII.1. Cadmium.....	12
VII.2. Chrome.....	13
VII.3. Cuivre.....	13
VII.4. Plomb	14
VII.5. Zinc	14
VII.6. Manganèse	15
VII.7. Cyanure.....	16
VII.8. Fer	17
VIII. Recherches bibliographiques sur les mines abandonnées	17

Chapitre II : Milieu physique et aperçu géologique

I. Milieu physique	21
I.1. Situation géographique et topographique	21
I.2. Le couvert végétal et le climat de la région d'étude	22
I.3. L'hydrographie de la région d'étude.....	23
I.4. Contexte socio-économique.....	24
II. Aperçu Géologique	25
II.1. Introduction	25
II.2. Stratigraphie du nord de l'Algérie	25
II.2.1. LE PALEOZOIQUE.....	25
II.2.1.1. Paléozoïque inférieur	25
II.2.1.2. Dévonien.....	26
II.2.1.3. Carbonifère	26
II.2.2. LE MESOZOIQUE	28
II.2.2.1. Trias	28
II.2.2.2. Jurassique.....	28
II.2.2.2.1. <i>Lias</i>	28
II.2.2.2.2. <i>Dogger</i>	29
II.2.2.2.3. <i>Malm</i>	30
II.2.2.3. Crétacé.....	30
II.2.2.3.1. Néocomien-Barrémien.....	30
II.2.2.3.2. Aptien	30
II.2.2.3.3. Albien	30
II.2.2.3.4. Cénomanién	31
II.2.2.3.5. Turonien.....	31
II.2.2.3.6. Sénonien	31
II.2.3. LE CENOZOIQUE	31
II.2.3.1. Eocène.....	31
II.2.3.2. Oligocène-Miocène.....	31
II.2.3.3. LE PLIOCENE ET LE QUATERNAIRE	32
II.3. Géologie du nord de l'Algérie.....	32
II.3.1. Ensembles métallogéniques du Nord de l'Algérie.....	32
II.3.1.1. Au nord, la sous-province tellienne :	32
II.3.1.2. Au sud, la sous-province méridionale ou saharienne.....	33

II.4. Géologie de la région d'étude.....	35
II.4.1. Introduction.....	35
II.4.2. Stratigraphie.....	37
II.4.2.1. Formations Continentales Quaternaires.....	39
II.4.2.2. Formation continentale Néogène.....	39
II.4.2.3. Formations Marines cénozoïques et mésozoïques.....	40
II.4.2.3.1. Les formations calcaires de L'Eocène et du Paléocène supérieur.....	40
II.4.2.3.2. Crétacé.....	40
II.4.2.3.3. Le Trias.....	42
II.4.3. Les diapirs dans la région d'étude.....	45
II.4.4. Aspect paléogéographique.....	45
a- La subsidence.....	45
b- Manifestation du Trias dans le sud-est Constantinois.....	46
c-Relation Diapirs/Encaissant.....	46
II.5. La tectonique de la région d'étude.....	47
1. La Phase des plissements.....	48
2. Les fossés tectoniques.....	49
3. Le comportement tectonique du Trias.....	49
II.6. Minéralisations.....	50
II.6.1. Minéralisations de Hameimat Nord.....	52
II.6.2. Minéralisations de Hameimat Sud.....	53
II.6.3. Les minéralisations de Meslouloula.....	55
Le complexe barytique.....	57
Conclusion partielle sur la géologie.....	58

Chapitre III: Aperçu hydro-climatologique, géophysique et hydrogéologique

I. Aperçu hydro-climatologique.....	61
I.1. Introduction.....	61
I.2. Étude des paramètres climatiques.....	61
I.2.1. Température.....	61
I.2.1.1. Variation des températures moyennes mensuelles.....	62
I.2.1.2. Variation des températures moyennes annuelles.....	62
I.2.2. Précipitation.....	63
I.2.2.1. Variation des précipitations moyennes mensuelle.....	64
I.2.2.2. Variation des précipitations moyennes annuelles.....	64

I.2.2.2.1. Distribution inter annuelle des précipitations (92/93-2011/2012)	64
I.2.2.2.2. Répartition saisonnière des précipitations.....	65
I.2.3. L'humidité	67
I.2.4. Le vent.....	68
I.3. Diagramme pluviométrique « station d'El-Aouinet» sur une période de 44 ans (67/68-2011/2012).....	69
I.4. Détermination du type du climat.....	69
I.4.1. Indice d'aridité (Indice De Martonne)	70
I.4.2. Continentalité pluviale moyenne.....	70
I.5. Détermination des paramètres du bilan hydrique	70
I.5.1. Etude de l'évapotranspiration	72
I.5.2. Estimation des réserves facilement utilisées R.F.U	72
I.5.3. Elaboration du bilan hydrique.....	73
a-Estimation du ruissellement	74
b-Estimation de l'infiltration	75
c-Interprétation du Bilan hydrique	75
II. Aperçu géophysique.....	76
1. Introduction	76
2. Prospection électrique.....	76
2.1. Interprétation.....	77
2.1.1. Commentaires des coupes géoélectriques	77
2.1.2. Interprétation des cartes de résistivité	81
2.1.2.1. Carte en ligne AB = 500 m.....	81
2.1.2.2. Carte en ligne AB = 800 m.....	82
2.1.2.3. Carte en ligne AB = 1000 m.....	83
2.2. Conséquences hydrogéologique et conclusion.....	84
3. Gravimétrie.....	85
4. Expression magnétique des diapirs de la région d'étude	86
5. Conclusion partielle de la géophysique	87
III. Aperçu hydrogéologique	88
1. Géométrie et épaisseur de l'aquifère Plio-quadernaire.....	88
2. Piézométrie	88
2.1. Inventaire des points d'eau.....	88
2.2. Evolution temporelle.....	89
2.3. L'évolution spatiale de la piézométrie	93

Chapitre IV : Caractérisation géochimique des eaux souterraines

I. Matériels et méthodes.....	96
I.1. Choix de site.....	96
I.1.1. Présentation des mines présentes dans la région d'étude.....	96
I.2. Site d'échantillonnage.....	98
I.3. Technique d'analyse.....	99
I.3.1. les échantillons eau et sol.....	99
I.3.2. Indice de pollution des eaux souterraines.....	101
II. Caractérisation géochimique des eaux souterraines dans la région d'étude.....	103
II.1. Introduction.....	103
II.2. Signification des faciès chimiques dans les eaux souterraines.....	104
II.2.1. Le Diagramme de Piper.....	104
II.2.2. Le diagramme de Schöeller-Berkaloff.....	106
II.3. Analyse statistique «corrélation inter-éléments».....	107

Chapitre V : Impact des sites miniers abandonnés sur la région d'étude

I. Etude de l'eau.....	113
I.1. Caractéristique physico-chimique et concentration de métaux lourds dans les eaux souterraines	113
I.1.1. Paramètres physiques.....	113
I.1.2. Les cations majeurs.....	115
a- Calcium (Ca^{+2}).....	115
b- Magnésium (Mg^{+2}).....	116
c- Potassium (K^+) et le Sodium (Na^+).....	117
I.1.3. Les anions majeurs.....	119
a- Bicarbonates (HCO_3^-).....	119
b- Les sulfates (SO_4^{-2}).....	120
c- Les nitrates (NO_3^-).....	122
d- Les chlorures (Cl^-).....	122
I.1.4. Evaluation du degré de contamination métallique des eaux souterraines.....	123
a- Cadmium (Cd^{+2}).....	123
b- Cuivre (Cu^{+2}).....	124
c- Zinc (Zn^{+2}).....	125
d- Fer.....	126
e- Cyanure (CN^-).....	127
f- Manganèse.....	128
I.4. Indice de pollution des eaux souterraines.....	129
II. Etude de sol.....	131

II.1. Caractéristique physico-chimique et concentration de métaux lourds dans le sol.....	131
II.1.1. Paramètres physique.....	131
II.1.2. Cations.....	132
II.1.2.1. Sodium et Potassium.....	133
II.1.2.2. Calcium et Magnésium.....	134
II.1.3. Anions.....	135
II.1.3.1. Chlorures et Bicarbonates.....	136
II.1.3.2. Nitrates et Sulfates.....	137
II.1.4. Evaluation du degré de contamination métallique des sédiments.....	138
II.2. Résultats de l'analyse XRF.....	139

Chapitre VI : Etude d'impact des anciennes mines sur l'environnement

I. Introduction.....	142
II. Evaluation d'Impacts environnementaux et sociaux de l'exploitation minière.....	142
1. Impacts sur les ressources en eau.....	142
1.1. Types de pollution de l'eau causée par l'extraction minière.....	143
1.1.1. Drainage minier acide.....	143
1.1.2. Contamination par le métal et filtration.....	143
1.1.3. Pollution par les produits chimiques.....	144
1.1.4. L'érosion et la sédimentation.....	144
2. Impacts sur la qualité de l'air.....	144
3. Impacts sur la faune.....	145
4. Impacts sur la qualité du sol.....	145
5. Impacts sur la santé publique.....	145
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	147
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	153

Liste des figures

N°	Titre	Pages
01	Localisation de la zone d'étude et une vue topographique.....	21
02	Photo satellitaire présentant le réseau hydrographique de la région d'étude (Source Google earth 2018).....	23
03	Carte géologique du Nord Est Algérien (Extrait de la carte géologique au 1 : 500 000).....	26
04	Stratigraphie synthétique du Nord-est de l'Algérie.....	27
05	Stratigraphie de la province orientale.....	29
06	carte géologique de confins algéro-tunisiens (D'après la carte géologique au/ de Meskiana, Morsott, El Ouinet, Boukhadra, Oued Kébarit et Ouenza).....	37
07	Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (in Sami 2004 : d'après : Dubourdiu 1956, 1959 ; David 1956; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000).....	38
08	Colonne litho-stratigraphique d'un sondage dans la région d'étude (D'après ORGM, 1987, simplifiée).....	44
09	Délimitation des trois domaines triasiques dans les cofins algéro-tunisiens (vila et al, 1993-2000).....	47
10	Carte structurale et tectonique de la région d'étude.....	48
11	Inventaire des indices minéralisés des confins algéro-tunisiens Selon classification d'Aoudjhane (1991).....	51
12	Carte géologique de Hameimat Nord (ORGM, 1998 et travaux de terrain).....	52
13	Carte géologique de Hameimat Sud (ORGM, 1998 et travaux de terrain).....	55
14	Carte géologique du Djebel Mesloula (Dubourdiu, 1959 modifiée).....	56
15	Répartition mensuelle des températures de Tébessa (80/81 à 2013/2014).....	62
16	Températures interannuelles de la région de Tébessa (80/81-2013/2014).....	63
17	Températures interannuelles de la région de Tébessa (80/81-2013/2014).....	63
18	Précipitations moyennes mensuelles en (mm) sur une période de 44 ans (67/68-2011/2012).....	64
19	Variation du coefficient pluviométrique avec les précipitations annuelles (90/91-2011/2012).....	67
20	Répartition saisonnière des précipitations (67/68-2011/2012).....	68
21	Diagramme pluviométrique -station d'El-Aouinet- (67/68-2011/2012).....	69
22	Carte de position des sondages électriques.....	77
23	Coupes géoélectriques transversale 1,2 et 3.....	79
24	Coupes géoélectriques transversale 4,5 et 6.....	81
25	Carte de résistivité en ligne AB=500m (D'après C. Fehdi).....	82

26	Carte d'iso-résistivité AB=800m (D'après C. Fehdi).....	83
27	Carte de résistivité en ligne AB=1000m (D'après C. Fehdi).....	84
28	Carte gravimétrique résiduelle de la région d'étude (en mgal).....	86
29	Carte aéromagnétique du Nord Est Algérien (in Boubaaya 2005).....	87
30	Coupe hydrogéologique A A'.....	88
31	Carte d'inventaire des points d'eau (Fehdi. C).....	89
32	Evolution temporelle de la piézométrie dans les puits 03, 10 et 14.....	90
33	Evolution temporelle de la piézométrie dans les puits 01, 11 et 13.....	91
34	Evolution temporelle de la piézométrie dans le puits 09.....	92
35	Carte de réactions piézométriques (en cercle plein bleu: réaction rapide, cercle creux rouge: réaction retardée, en triangle vert: réaction douteuse).....	92
36	Carte piézométrique. Mars 2005 (Fehdi. C).....	93
37	Photos de la mine de Mesloula (Mine abandonnée de Pb-Zn).....	96
38	Photos de la mine de Boukhadra (Mine de Fer -en activité-).....	97
39	Carte d'échantillonnage de la zone d'étude.....	99
40	Diagramme de Piper de la chimie de l'eau dans la zone d'étude.....	106
41	Diagramme de scholler-Berkaloff des eaux souterraines (Mars-Avril 2014).....	107
42a	Corrélation entre les valeurs de CE et les différentes valeurs des éléments majeurs (R : Coefficient de corrélation).....	108
42b	Corrélation entre les valeurs de quelques paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.....	109
42c	Corrélation entre les valeurs de quelques paramètres de métaux lourds entre eux et entre quelques éléments majeurs.....	111
43	Evolution des valeurs de pH dans les points d'eau échantillonnés.....	114
44	Concentrations de la CE dans les échantillons d'eau souterraine.....	114
45	Concentrations de salinité dans les échantillons d'eau souterraine.....	115
46	Evolution de la concentration de Calcium dans les puits de la région d'étude.....	116
47	Evolution de la concentration de magnésium dans les puits de la région d'étude.....	117
48	Evolution des teneurs de potassium dans les puits de la région d'étude.....	118
49	Evolution des teneurs de sodium dans les puits de la région d'étude.....	119
50	Evolution de Bicarbonates dans les puits de la région d'étude.....	120
51	Evolution de sulfates dans les puits de la région d'étude.....	121
52	Evolution de nitrates dans les puits de la région d'étude.....	122
53	Evolution de chlorures dans les puits de la région d'étude.....	123
54	Carte de contour du cadmium dans les échantillons d'eau souterraine.....	124
55	Carte de contour du Cuivre dans les échantillons d'eau souterraine.....	125

56	Carte de contour du Zinc dans les échantillons d'eau souterraine.....	126
57	Carte des contours du Fer dans les échantillons d'eau souterraine.....	127
58	Carte des contours du Cyanure dans les échantillons d'eau souterraine.....	128
59	Carte des contours du Manganèse dans les échantillons d'eau souterraine.....	129
60	Distribution des valeurs de l'indice de pollution dans tous les points d'échantillonnage.....	130
61	Le taux de contamination dans les différentes stations de la région d'étude.....	130
62	Concentrations de la CE dans les lixiviats.....	132
63	Concentrations de la salinité et de la TDS dans les lixiviats.....	132
64	Concentrations des cations dans les lixiviats.....	133
65	Concentration de Na ⁺ et K ⁺ dans les lixiviats.....	133
66	Le cycle de potassium dans le sol (Tisdale et al 1993).....	134
67	Concentration de Ca ⁺² et Mg ⁺² dans les lixiviats.....	135
68	Concentrations des anions dans les lixiviats.....	136
69	Concentrations de Cl ⁻ et HCO ₃ ⁻ dans les lixiviats.....	136
70	Concentrations de NO ₃ ⁻² et SO ₄ ⁻² dans les lixiviats.....	137
71	Le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991).....	137
72	Cycle biologique de sulfure dans le sol (Trudinger et Sawain, 1979).....	138
73	Concentrations de métaux lourds dans les lixiviats.....	139

Liste des tableaux

N°	Titre	Pages
01	Rapport du flux lié à l'activité humaine et le flux naturel des métaux lourds.....	06
02	Principaux effets des métaux lourds.....	11
03	Concentrations en métaux et métalloïdes définissant les limites de qualité d'une eau potable (Législation Française, OMS).....	11
04	Normes des métaux lourds.....	12
05	Les coordonnées Lambert des stations de mesures [ANRH-TEBESSA].....	61
06	Températures moyennes mensuelles de la région de Tébessa (80/81 à 2013/2014).....	62
07	Précipitations moyennes mensuelles en (mm) sur une période de 44 ans (67/68-2011/2012).....	64
08	Distribution inter annuelle des précipitations (92/93-2011/2012).....	65
09	Coefficient pluviométrique.....	66
10	Répartition saisonnière des précipitations dans la station d'El-Aouinet (67/68-2011/2012).....	67
11	Humidité moyenne mensuelle en %.....	68
12	Données du diagramme ombrothermique sur une période de 44ans (67/68-2011/2012).....	69
13	Coefficient pluviométrique de la région d'El-Aouinet.....	71
14	Bilan hydrique de la période (67/68-2011/2012).....	74
15	Paramètres mesurés et leur poids relatif et normes standards de qualité de l'eau potable.....	102
16	Résultats physico-chimiques des eaux souterraines.....	105
17	Résultats des métaux lourds des eaux souterraines.....	110
18	Les résultats obtenus de l'analyse XRF.....	140

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie est un pays caractérisé par un contexte structurale et géologique très varié qui a donné lieu à une richesse minière diversifiée (phosphates, métaux de base, métaux précieux...). L'exploitation minière a généré un volume très important de rejets miniers sans valeur commerciale. Ces derniers peuvent présenter des risques pour l'environnement selon leur état, leur composition et leur mode d'entreposage. La région de Tébessa, située au Nord-est de l'Algérie, est caractérisée par la présence de plusieurs sites miniers abandonnés et en activité. Parmi les mines abandonnées qui ont suscité une attention particulière c'est la mine de Mesloula, abandonnée depuis 1962 sans projet de réhabilitation. L'abandon de cette mine a entraîné un risque de contamination des eaux souterraines et de sol par les métaux lourds; qui a des effets néfastes sur la faune et la santé publique.

Pour répondre aux différents objectifs visés et de caractériser et de comprendre l'évolution de la contamination par les métaux lourds au sein de sol et des eaux souterraines dans la nappe aquifère, nous avons adopté une démarche pluridisciplinaire qui fait appel au travail de terrain (campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines et de sol), ainsi que des analyses géochimiques et XRF au laboratoire.

Les résultats des analyses physico-chimiques et des métaux lourds effectuées ont été étudiés par approche statistique afin de déterminer l'évolution spatiale de la qualité des eaux souterraines et de comprendre les processus physico-chimiques qui en sont responsables.

La pluridisciplinarité de ce travail impose la présentation de la méthodologie propre à chaque chapitre séparément encadrées par une Introduction générale et une Conclusion Générale.

Dans l'Introduction générale, il a été resitué le thème retenu dans une problématique globale, défini les objectifs de l'étude et la méthodologie d'approche.

Une étude bibliographique sur les métaux lourds et des recherches scientifiques qui ont été faites sur les mines abandonnés à travers le monde ont été présentées dans le premier chapitre.

Le deuxième chapitre comprend le milieu physique et un aperçu géologique.

Le troisième chapitre de cette thèse est consacré à un aperçu hydro-climatologique, géophysique et hydrogéologique. L'hydro-climatologie pour définir le type de climat d'une part et la compréhension des mécanismes d'alimentation et de la circulation des eaux

naturelles d'autre part, la géophysique a pour but de définir les différentes nappes existantes dans l'aquifère Morsott-El Aouinet et en fin une aperçu hydrogéologique pour déterminer le sens d'écoulement.

Dans le quatrième chapitre, nous identifions les différentes stations d'échantillonnage, les paramètres étudiés et les analyses effectuées ainsi que, une caractérisation géochimique des eaux souterraine (diagramme Piper, Scholler-Berkaloff, Analyse statistique et évaluation de l'indice de contamination).

Les résultats des études faites et leur croisement sont présentés au niveau du cinquième chapitre. Dans ce chapitre nous détaillons l'importance et l'effet de chaque élément (physico chimique et métaux lourds), dans les eaux souterraines et dans le sol avec une présentation graphique spatiale. Ainsi une évaluation de taux de contamination à travers le calcul de l'indice de pollution des eaux souterraines d'une part et une évaluation faite par l'analyse XRF pour le sol d'autre part.

Pour clôturer, une étude d'impact des mines abandonnées sur l'environnement a été abordée.

Dans la conclusion générale une synthèse de tous les résultats obtenus a été présentée avec des recommandations et perspectives.

Chapitre: I

Recherches bibliographiques sur les métaux lourds

I. Introduction

Les éléments métalliques sont, sous différentes formes, toujours présents au sein de l'environnement. A l'état de traces, ils sont nécessaires voire indispensables aux êtres vivants. A concentration élevée, en revanche, ils présentent une toxicité plus ou moins forte. La présence de métaux lourds dans l'environnement résulte de causes naturelles et des activités humaines. Elle pose un problème particulier, car les métaux lourds s'accumulent et ils ne sont pas biodégradables dans l'environnement. Ces métaux lourds ne présentent pas tous les mêmes risques en raison de leurs effets sur les organismes, leurs propriétés chimiques, physico-chimiques et biologiques. Leur toxicité est très variable et leur impact sur l'environnement très différent.

II. Définition et origine

Les éléments traces métalliques sont généralement définis comme des métaux lourds. On appelle métaux lourds tout élément métallique naturel dont la masse volumique dépasse 5g/cm^3 . Ils englobent l'ensemble des métaux et métalloïdes présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement. Les métaux lourds les plus souvent considérés comme toxique pour l'homme sont : le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. D'autres comme le cuivre, le zinc, le chrome, pourtant nécessaires à l'organisme en petites quantités, peuvent devenir toxiques à doses plus importantes. Dans le cadre de chimie, les métaux lourds sont généralement définis sur la base de leurs propriétés physico-chimiques. En science du sol, il est convenu de parler "d'éléments trace métalliques" qui désignent des composés minérales présents à très faible concentration. En toxicologie, ils peuvent être définis comme des métaux à caractère cumulatif (souvent dans les tissus biologiques) ayant essentiellement des effets très néfastes sur les organismes vivants. En nutrition et en agronomie, ils peuvent même être assimilés à des oligo-éléments indispensables à certains organismes, en particulier par leur action catalytique au niveau du métabolisme.

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : *l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn) et le zinc (Zn).*

Les métaux lourds sont redistribués naturellement dans l'environnement par les processus géologiques et les cycles biologiques.

Les activités industrielles et technologiques diminuent cependant le temps de résidence des métaux dans les roches, ils forment de nouveaux composés métalliques, introduisent les métaux dans l'atmosphère par la combustion de produits fossilifères. Il faut différencier la part qui résulte de la contamination d'origine humaine (anthropogénie) et la part naturelle (géogénie).

III. Différentes sources de métaux lourds

III.1. Les sources naturelles

Parmi les importantes sources naturelles, citons l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émissions volumineuses dues à une activité explosive, ou d'émissions continues de faible volume, résultant notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma. Le **(tableau.1)** montre le rapport entre le flux lié à l'activité humaine et le flux naturel.

Tableau 01. Rapport du flux lié à l'activité humaine et le flux naturel des métaux lourds

Elément	Flux lié à l'homme / Flux naturel (%)
Cadmium	1,897
Mercure	27, 500
Chrome	1,610
Arsenic	2, 786
Plomb	34, 583

III.2. Les sources anthropiques

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait, des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes. Les sources anthropogènes sont les suivantes:

- ✚ Activités pétrochimiques
- ✚ Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment....).
- ✚ Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations).
- ✚ Incinération de déchets

- ✚ Produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents).
- ✚ Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles

IV. Répartition des métaux lourds dans l'environnement

IV.1. Contamination des sols

Tous les sols contiennent naturellement des éléments traces métalliques. On parle de contamination d'un sol lorsque sa teneur en élément trace est supérieure à la concentration naturelle, mais sans influence sur la qualité du sol. La concentration naturelle de l'élément trace dans le sol résulte de son évolution à partir de la roche initiale. On parle de pollution des sols par un élément trace lorsque l'élément trace est présent à une dose constituant une menace pour l'activité biologique ou les fonctions du sol. Les contaminations diffuses, qui affectent les niveaux superficiels des sols, résultent de phénomènes naturels tels que les retombées atmosphériques d'aérosols d'origine volcanique, ou d'actions anthropiques intentionnelles ou non : poussières et dépôts atmosphériques, fertilisants minéraux (cuivre contenu dans les phosphates), pesticides, lisiers et fumiers, boues de stations d'épuration, activités minières, déchets industriels (bâtiments) ou urbains, transports, etc.

IV.1.1. Le processus de transfert

Les précipitations et l'irrigation sont les principales sources d'eau des sols. Une partie est évacuée par évaporation ou ruissellement de surface. Une partie pénètre dans le sol et se dirige alors soit vers les racines des plantes, soit, par gravité, vers les horizons profonds et les nappes phréatiques. Au cours de ces transports, l'eau se charge en éléments en traces dissous.

IV.1.2. Répartition des métaux lourds dans les sols

L'étude de la répartition d'un élément trace métallique entre les composants solides s'appelle la spéciation appréhendée par une technique qui porte le nom « d'extraction séquentielle ». La variable déterminante de cette répartition est le degré de solubilité du métal.

- ✚ Si le métal est soluble, il va passer dans les nappes ou dans la plante.
- ✚ S'il est insoluble, il va rester dans le sol. La solubilité va dépendre de plusieurs facteurs, le plus important est l'acidité du sol.
- ✚ Un sol acide facilite la mobilisation. Les métaux lourds ne s'accumulent pas. Ils sont transférés vers les nappes phréatiques et les fleuves ou absorbés par les plantes et présentent alors un risque pour la santé.

✚ Un sol calcaire contribue à l'immobilisation de certains métaux (certains éléments réagissent différemment, notamment l'arsenic, plus mobile dans un sol calcaire). Il n'y a donc pas de risque immédiat pour la santé. Mais le sol est contaminé durablement et la concentration en métaux lourds augmente avec les années. Ces derniers sont susceptibles d'être relargués quand l'environnement est modifié. Au niveau des sols, les risques sont divers (transfert vers les nappes phréatiques, biodisponibilité, écotoxicité), et dépendent principalement de la spéciation (degré d'oxydation, mode de complexation avec les macromolécules organiques et les constituants minéraux du sol).

Nature des apports anthropiques:

- a. retombées atmosphériques
- b. épandages boues de station d'épuration
- c. activités industrielles
- d. activités urbaines et trafic routier
- e. activités agricoles
- f. activités minières

IV.2. Contamination de l'air

Les métaux lourds se dispersent dans les hautes couches de l'atmosphère et retombent ailleurs, après un transport sur de très longues distances. On estime qu'une particule de mercure dans l'atmosphère reste un an dans celui-ci, avant de retomber. Les métaux lourds dans l'air peuvent se trouver principalement sous deux formes:

- ✚ soit sous forme gazeuse pour certains composés métalliques volatiles ou dont la pression de vapeur saturante est élevée;
- ✚ soit sous forme de composés métalliques solides, déposés sur les très fines particules ou poussières formées lors des phénomènes de combustion. Les principales sources de métaux dans l'air sont des sources fixes. Les métaux lourds sont transportés par des particules atmosphériques provenant de combustions à haute température, de fusions métallurgiques, véhicules.

Les effets biologiques, physiques et chimiques de ces particules sont fonction de la taille des particules, de leur concentration et de leur composition, le paramètre le plus effectif sur l'environnement étant la taille de ces particules. Dans l'air

ambiant, on trouve de nombreux éléments, comme le plomb, le cadmium, le zinc, le cuivre, etc., dont la concentration est d'autant plus élevée que les particules sont fines.

IV.3. Contamination de l'eau

Les métaux présents dans l'eau peuvent exister sous forme de complexes, de particules ou en solutions. Les principaux processus qui gouvernent la distribution et la répartition des métaux lourds sont la dilution, la dispersion, la sédimentation et l'adsorption/désorption. Certains processus chimiques peuvent néanmoins intervenir également. C'est ainsi que la spéciation selon les diverses formes solubles est régie par les constantes d'instabilité des différents complexes, et par les propriétés physico-chimiques de l'eau (pH, ions dissous, et température).

Les métaux lourds subissent de nombreuses transformations: réduction par processus biochimique, méthylation, déméthylation et oxydation d'espèces de métaux isolées des réactions redox peuvent aussi faciliter certaines transformations. Les processus biochimiques sont effectués par des micro-organismes et par des algues. Les principales sources de contamination de l'eau sont les suivantes :

- ✚ Les eaux usées domestiques et industrielles,
- ✚ La production agricole,
- ✚ Les polluants atmosphériques,
- ✚ Les anciennes décharges.

V. Impact toxicologique

V.1. Exposition

Les hommes sont exposés par inhalation des polluants aériens, la consommation d'eau contaminée, l'exposition à des sols contaminés de déchets industriels. Les métaux peuvent être absorbés sous la forme inorganique ou sous la forme organique. Pour certains éléments, comme l'arsenic et le cuivre, la forme inorganique est la plus toxique. Pour d'autres, comme Hg, Sn et Pb, les formes organiques sont les plus toxiques. La quantité de métaux absorbée par un homme influe directement sur sa santé. Elle peut présenter une toxicité aiguë (pic de pollution dans l'air ou l'eau), ou une toxicité due à un effet cumulatif (par une exposition continue au milieu pollué ou parce que l'homme est en bout de chaîne alimentaire). Les métaux lourds s'accumulent dans les organismes vivants et perturbent les équilibres et

mécanismes biologiques, provoquant des effets toxiques. Ils peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques, respiratoires,...

V.2. Effets des métaux lourds sur le milieu aquatique

A de faibles concentrations, beaucoup de métaux lourds, dont Hg, Cd, Pb, As et Cu inhibent la photosynthèse et la croissance du phytoplancton. Les effets observés à des niveaux trophiques supérieurs se manifestent notamment par un retard du développement des embryons, des malformations et une moins bonne croissance des adultes chez les poissons, les mollusques et les crustacés. En outre, tout au long de la chaîne alimentaire, certains se concentrent dans les organismes vivants. Ils peuvent ainsi atteindre des taux très élevés dans certaines espèces consommées par l'homme, comme les poissons. Cette " bioaccumulation " explique leur très forte toxicité.

V.3. Effets sur la santé

En fait, le risque sur la santé humaine est d'abord associé aux propriétés des métaux lourds à polluer les eaux, l'atmosphère, les aliments et les sols. Et dépendent également de l'état chimique de leur forme chimique, de leur concentration, du contexte environnemental, de la possibilité de passage dans la chaîne du vivant. Quelques métaux lourds, comme Zn, Cu, Mn et Fe, sont indispensables à la croissance et au bien-être des organismes vivants. On peut néanmoins s'attendre à ce qu'ils aient des effets toxiques quand les organismes sont exposés à des niveaux de concentration supérieurs à ceux qu'ils requièrent normalement. D'autres éléments, comme Pb, Hg et Cd, ne sont pas indispensables aux activités métaboliques et manifestent des propriétés toxiques.

Les effets toxicologiques en matière de santé publique pour le cadmium, le mercure et le plomb ont été largement mis en évidence par des travaux antérieurs. En effet, la toxicité du plomb vis-à-vis du système nerveux et des reins a été soulignée en 1999. Le saturnisme a été la première maladie professionnelle reconnue. La toxicité du cadmium résulte principalement de l'inhibition des enzymes thiols ainsi que de son affinité pour les hydroxyles et les carboxyles. Il est également l'agent étiologique de la maladie qui se manifeste par des troubles osseux et l'augmentation du taux de phosphatase alcaline. L'exposition chronique à de faibles doses en cadmium provoque des dommages aux tubules rénaux, suivis de protéinurie, lésions pulmonaires, hypertension artérielle.

Tableau 02. Principaux effets des métaux lourds

Eléments	Effets
As	Toxique, possible cancérigène
Cd	Hypertension, dommage sur le foie
Cr	Cancérigène sous forme de Cr (VI)
Cu	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Hg	Toxicité chronique et aigue
Ni	Allergies de peau, maladie respiratoire possible cancérigène
Pb	Toxique
Se	Essentielle à faible dose, toxique à doses élevées
Zn	Toxique pour les végétaux à fortes teneurs

VI. Normes et réglementation

Les normes sont des valeurs limites fixées par la loi et établies en vertu de compromis entre demandes concurrentes. L'établissement de normes des métaux lourds présente un intérêt particulier. Ceci s'explique par le fait que leurs effets sur l'homme et l'environnement ne cessent d'être mis en lumière, voire prouvés pour certains. Pour ce qui concerne la qualité des eaux, il existe deux types de normes: les normes de qualité des eaux, qui définissent les caractéristiques que doit présenter une masse d'eau selon son utilisation principale, et les normes concernant les effluents, qui fixent les charges polluantes limites qui peuvent être rejetées ponctuellement dans les eaux réceptrices.

Tableau 03. Concentrations en métaux et métalloïdes définissant les limites de qualité d'une eau potable (Législation Française, OMS)

Elément	Décret n°2001-1220	Recommandations OMS
As	10 µg/l	10 µg/l
Cd	5,0 µg/l	3,0 µg/l
Cr	50 µg/l	50 µg/l (chrome total)
Cu	2,0 mg/l	2,0 mg/l
Hg	1,0 µg/l (mercure total)	1,0 µg/l (mercure total)
Ni	20 µg/l	20 µg/l
Pb	10 µg/l	10 µg/l
Se	10 µg/l	10 µg/l

Du fait de leurs Propriétés physiques intéressantes, les métaux sont très largement utilisés par l'homme. Cette utilisation modifie très significativement leur répartition et les formes chimiques sous lesquels ils sont présents dans les différents compartiments de l'environnement. Ils favorisent les

risques continus sur l'environnement et la santé humaine à cause de leur toxicité surtout pour le plomb, le mercure, et le cadmium.

Tableau 04. Normes des métaux lourds

Composé toxique	Unitée	Valeur limites
Cadmium(Cd)	mg/l	0,003
Zinc(Zn)	mg/l	3
Cuivre (Cu ²⁺)	mg/l	2
Manganèse (Mn ⁺²)	mg/l	0,4
Zinc (Zn ⁺²)	mg/l	3
Cyanure (CN ⁻)	mg/l	0.07
Fer(Fe)		Pas de valeur guide

VII. Les éléments traces métalliques

VII.1. Cadmium

Dans les systèmes naturels, le cadmium est majoritairement présent sous forme de CdS (en conditions réductrices) ou de CdCO₃ (en conditions oxydantes), (GWRTAC, 1997). En conditions neutre et basique, il est principalement présent sous forme solide de carbonate (CdCO₃) et d'hydroxyde (Cd(OH)₂), alors que la forme cationique Cd²⁺ et les espèces de sulfates aqueux sont prédominantes à un pH inférieur à 8 (EPA, 1992).

Le cadmium présente un comportement relativement mobile étant donné son aptitude à former des complexes avec des ligands organiques tels les acides humiques. En conditions acides, le cadmium peut également se complexer avec des ligands inorganiques, tel le chlorure (Cl⁻) ou le groupe fonctionnel « sulfate ». À des pH supérieurs à 6, sa mobilité peut être amoindrie par des mécanismes d'adsorption ou, dans une moindre mesure, par la précipitation (i.e. majoritairement avec des carbonates, des phosphates et des hydroxydes) (GWRTAC, 1997); (EPA, 1992). L'adsorption du cadmium est particulièrement sensible à la présence des oxydes de fer et de manganèse.

En outre, les minéraux argileux, les carbonates et la matière organique jouent également un rôle important dans la capacité d'échange cationique (CEC) du cadmium dans les phénomènes d'adsorption (i.e. de rétention). L'effet cationique peut également entraîner la remise en solution (i.e. inhibition de l'adsorption) du cadmium en présence de calcium (Ca), de cobalt (Co), de chrome (Cr), de cuivre (Cu), de nickel (Ni) et de plomb (Pb) (Alloway, 1990). Enfin, mentionnons qu'un sol riche en CaCO₃ peut adsorber efficacement le cadmium

présent en faible concentration via le remplacement du calcium (Ca^{2+}) par le cadmium (Cd^{2+}) et réduire ainsi sa biodisponibilité.

VII.2. Chrome

La contamination des sols par le chrome (Cr) peut être attribuable aux industries des alliages métalliques, du placage électronique, de textiles, du cuir (tannerie) ou de la pigmentation (EPA, 1997) (Alloway, 1990). Dans les sites contaminés, le chrome se retrouve principalement sous l'état hexavalent (Cr^{6+}); (GWRTAC, 1997). Il s'agit en fait de la forme rencontrée dans un système sous conditions oxydantes (i. e. milieu perméable, peu profond et oxygéné). Les espèces majeures de chrome hexavalent (Cr^{6+}) sont le chromate (CrO_4^{2-}) et le dichromate ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). Celles-ci peuvent précipiter en présence d'espèces cationiques telles que le baryum (Ba^{2+}), le plomb (Pb^{2+}) et l'argent (Ag^{2+}), et s'adsorber sur des surfaces solides dont les oxydes de fer et d'aluminium, plus particulièrement. La CEC, le pourcentage de minéraux argileux et la surface spécifique n'entraînent pratiquement pas de modification dans le comportement du chrome hexavalent (EPA, 1992). Ce dernier représente d'ailleurs le seul ML ayant une mobilité élevée dans un sol basique.

Lorsque le pH est inférieur à 4, le chrome trivalent (Cr^{3+}), lequel possède une mobilité et une toxicité moindres que la forme hexavalente (Cr^{6+}), devient la forme prédominante. Celui-ci a alors tendance à former des complexes avec divers ligands organiques et inorganiques (NH_3 , OH^- , Cl^- , CN^- , SO_4^{2-}) dont des oxydes/hydroxydes majoritairement. La mobilité du chrome trivalent peut également être amoindrie par son adsorption à la surface d'oxydes et de minéraux argileux lorsque le pH du système est inférieur à 5, ainsi que par sa faible solubilité causée par la formation des complexes oxydés ($\text{Cr}(\text{OH})_3(\text{s})$) lorsque le pH est supérieur à 5.

VII.3. Cuivre

La production industrielle du cuivre (Cu) est principalement associée à la fabrication de fils métalliques ainsi qu'à la production d'alliages de bronze et de laiton.

Selon EPA (1992), le cuivre représente l'espèce cationique la plus retenue (i.e. la moins mobile) dans les sols après le plomb. En ce qui concerne sa distribution géochimique, le cuivre est préférentiellement associé avec la matière organique, les oxydes de fer et de manganèse ainsi qu'aux carbonates (Alloway, 1990). De nombreuses études soulignent d'ailleurs l'affinité prononcée du cuivre pour la matière organique (GWRTAC, 1997).

Dans les sols carbonatés, l'adsorption spécifique du cuivre sur le CaCO_3 représente un mécanisme d'interaction majeur (EPA, 1992), alors que dans les sols pauvres en carbonates, sa rétention est principalement attribuable à des échanges cationiques avec les minéraux

argileux. Sous des conditions aérobies (i.e. oxydantes) et suffisamment basiques, le cuivre peut prendre les formes suivantes : Cu^{2+} , CuOH^+ , $\text{Cu}(\text{OH})_2$ et CuCO_3 . Cette dernière représente d'ailleurs l'espèce dominante, tandis que le $\text{CuS}(\text{s})$ devient la forme majeure sous des conditions anaérobies (i.e. réductrices). Il est à noter que les précipités de cuivre sont généralement instables par rapport à des concentrations en cuivre normalement rencontrées dans les sols. Enfin, la mobilité du cuivre peut s'accroître par la complexation avec des ligands organiques solubles telles les acides humiques (GWRTAC, 1997; EPA, 1992).

VII.4. Plomb

Les sources de contamination associées au plomb (Pb) sont nombreuses et diversifiées (EPA, 1997). Mentionnons, à titre d'exemple, l'utilisation de plomb dans la fabrication de batteries (alliage Pb-Sb), d'encre, et autrefois, de peintures et d'additifs dans les carburants telle l'essence. Le plomb présent dans les sols est dominé par la forme Pb^{2+} (Alloway, 1990). De plus, il est également retenu par les phases solides, dont notamment des oxydes/hydroxydes et carbonates (GWRTAC, 1997). Alloway (1990) reconnaît que le pH et la CEC sont les paramètres de contrôle principaux impliqués dans la rétention du plomb dans les sols. En fait, lorsque le pH d'un système donné est supérieur à 6, le plomb a tendance à s'adsorber à la surface des minéraux argileux ou à former des précipités de carbonates (EPA, 1992). La mobilité du plomb peut être aussi favorisée par la compétition cationique du milieu, ou encore par la formation de complexes avec des ligands inorganiques (Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) et organiques (acides humiques et fulviques). Ces derniers présentent d'ailleurs une forte affinité avec le plomb. En conditions réductrices (i.e. anaérobies), le plomb forme généralement un complexe avec des groupes fonctionnels « sulfures » pour former les complexes PbS.

VII.5. Zinc

Le zinc (Zn) est principalement utilisé dans l'industrie comme revêtement anticorrosif sur des pièces métalliques en fer et en acier. Le zinc n'existe pas sous sa forme élémentaire dans un système naturel et il est généralement présent sous sa forme Zn^{2+} (GWRTAC, 1997). De plus, il a tendance à s'adsorber à la surface des minéraux argileux et de la matière organique, ainsi qu'à se complexer avec des carbonates et des oxydes hydratés de fer et de manganèse (EPA, 1992) (Alloway, 1990); ce dernier rapporte que deux mécanismes d'adsorption semblent survenir distinctement selon les conditions de pH. Sous un pH acide, le zinc semble être retenu par des sites d'échanges cationiques, alors que sous conditions basiques, il présente une rétention davantage attribuable à des phénomènes de « chemisorption ».

Le phénomène d'échange cationique s'effectue de manière réversible, tandis que l'incorporation à l'intérieur de la structure cristalline des minéraux argileux respecte une mécanique davantage irréversible. Les résultats de plusieurs études cités dans EPA (1992) indiquent que la majorité du zinc détecté dans un échantillon de sol contaminé est associé avec les fractions des oxydes de fer et de manganèse. Sous des conditions réductrices et oxydantes, le zinc forme respectivement des précipités solides tels que $Zn(OH)_2(s)$ et $ZnCO_3(s)$ ainsi que $ZnS(s)$ et $Zn(CN)(s)$ (GWRTAC, 1997). Toutefois, étant donné que le zinc possède une solubilité relativement élevée en conditions neutres et acides, le mécanisme de précipitation présente une incidence moindre sur sa rétention dans un sol naturel, en excluant les cas de sites contaminés où les concentrations en zinc peuvent être exceptionnellement élevées (EPA, 1992). Enfin, le zinc peut également former des complexes avec des ligands inorganiques et organiques, sous conditions basiques (Alloway, 1990).

VII.6. Manganèse

Le manganèse se trouve dans la nature principalement sous forme de minerais. Il existe plus de 250 minerais contenant du manganèse, sous forme d'oxydes, de carbonates ou de silicates. Les plus importants sont la pyrolusite (MnO_2), la rhodocrosite ($MnCO_3$), la romanéchite (mélange d'oxydes de barium et de manganèse hydratés), le manganite ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$) et l'hausmannite (Mn_3O_4).

D'autre part, on trouve aussi le manganèse à de très faibles concentrations dans l'eau, les plantes, les animaux et le corps humain. Le manganèse est un élément qui a la particularité de se présenter sous plusieurs degrés d'oxydation de -3 à +7, ce qui permet l'existence de nombreux composés inorganiques et organométalliques qui sont produits soit à partir des minerais, soit à partir du manganèse métallique.

Les principaux composés inorganiques sont le chlorure de manganèse, le sulfate de manganèse, le tétr oxyde de manganèse, le dioxyde de manganèse et le permanganate de potassium ou de sodium. Parmi les principaux composés organométalliques, citons: le méthyl cyclopentadiényle tricarbonyle de manganèse (MMT), un additif antidétonant de l'essence, le manébe et le mancozèbe, des pesticides utilisés en agriculture.

Sur le plan industriel, le manganèse est indispensable à l'industrie de l'acier, principalement sous forme de ferroalliages. Comme additif d'alliage, le manganèse confère à l'acier une dureté accrue et améliore plusieurs de ses propriétés mécaniques. Les alliages non ferreux, tel que l'aluminium et certains alliages de cuivre bénéficient aussi de l'ajout de manganèse pour améliorer leurs propriétés. Lors de la préparation des aciers, il est aussi

employé comme agent de raffinement, pour se combiner au soufre résiduel du fer ou pour augmenter l'effet désoxydant de l'aluminium ou de la silice.

En milieu de travail, le manganèse peut être émis sous formes de poudres, poussières ou de fumées, dans les secteurs tels que :

- ✚ l'exploitation minière des minerais concernés
- ✚ les fonderies, notamment celles de ferromanganèse et la production d'acier, que ce soit lors de la manipulation des matières premières où il peut y avoir émission de poudres et de poussières ou lors de la préparation des alliages où il peut y avoir émission de fumées
- ✚ la métallurgie, lors des opérations d'usinage, de meulage ou de polissage, qui émettent des particules et lors des opérations de soudage ou de coupage qui émettent des fumées de manganèse.

VII.7. Cyanure

L'ion cyanure, quand il se rencontre à l'état gazeux sous forme de cyanure d'hydrogène (formule HCN) ou comme sel d'une solution aqueuse d'acide cyanhydrique, est un poison extrêmement toxique. Le sel de cet acide cyanhydrique, le cyanure de potassium ou de sodium (formule KCN), est ce que l'on appelle couramment « cyanure ».

Les ions cyanure peuvent se lier au fer présent dans certaines enzymes, comme les cytochromes C oxydases mitochondriales. Ceci provoque alors un blocage de la respiration cellulaire.

Le sel de cobalt est un antidote au cyanure : il agit comme agent chélateur, en se liant à l'ion cyanure pour former un composé éliminé par les reins.

Le cyanure est présent dans certains fruits, comme l'amande, les noyaux de pêche, prune, cerise et abricot. Dans l'Antiquité, les noyaux de pêche et d'amande étaient broyés pour obtenir du cyanure. Ce poison peut être détecté par son odeur caractéristique d'amande amère.

L'ingestion d'une dose peu élevée de cyanure provoque maux de tête, vertiges, vomissements et palpitations. L'intoxication par une forte dose conduit à une mort rapide, qui ne passe pas nécessairement par toutes ces étapes. Elle entraîne des convulsions, une baisse de la tension et du rythme cardiaque, et des troubles respiratoires. Puis, la perte de connaissance conduit au coma, et au décès.

VII.8. Fer

Le fer est le matériau le plus utilisé. Il est employé pour construire des maisons, des bateaux, des voitures, des machines, des outils, etc., souvent dans des alliages en tant qu'acier allié au chrome, au silicium, au nickel, au manganèse, au carbone, au tungstène, etc...

Le Fer (III)-O-arsénite, penta-hydrate peut être dangereux pour l'environnement. Une attention particulière devrait être portée aux plantes, à l'air et à l'eau. Il est fortement conseillé de ne pas laisser entrer le produit chimique dans l'environnement parce qu'il persiste dans l'environnement.

VIII. Recherches bibliographiques sur les mines abandonnées

Plusieurs études à travers le monde ont étudié l'impact des mines sur la qualité des eaux superficielles et souterraines. [Denimal et al.2002](#) ont étudié la contamination d'un aquifère par les sulfates issues d'une mine abandonnée au Nord-Pas-de-Calais ; les résultats montrent que l'acidité est neutralisée durant l'infiltration. L'étude faite par [Gemici 2004](#) a porté sur l'impact d'une mine abandonnée de mercure sur la qualité des eaux souterraines et de surface. [El Adnani et al.2007](#) ont étudié l'impact des rejets miniers sur la qualité physico-chimique et biologique des eaux souterraines d'une zone minière de la région de Marrakech ; les résultats obtenus montrent que les rejets miniers présentent un risque potentiel sur l'environnement notamment au niveau de la partie aval des rejets. L'étude faite par [Gilchrist 2008](#) a porté sur l'impact du DMA sur la qualité des eaux d'une rivière à proximité de New York ; la variation saisonnière de la concentration en métaux est attribuée aux processus de dissolution précipitation. [Neves and Matias 2008](#) ont étudié l'impact d'une mine abandonnée sur la qualité des eaux souterraines ; les résultats montrent que la situation s'aggrave en période sèche et que les eaux sont alors de mauvaise qualité. [Luís et al.2009](#) ont étudié l'impact du DMA sur la qualité des eaux d'une rivière au Portugal, les résultats obtenus ont montré que la variation spatiale des éléments chimiques dépend de la variation saisonnière. [Delgado et al.2009](#) ont étudié l'impact environnemental d'une activité minière au Portugal ; les résultats obtenus montrent que le degré d'impact au niveau d'une rivière varie en fonction des saisons et s'atténue en fonction de la distance par rapport à la source. Le même objectif a été visé par [Akabzaa et al.2009](#), [Cidu et al.2009](#) ont montré la dégradation de la qualité des eaux souterraines par des fortes concentrations en sulfates. L'étude faite par [Sarmiento et al.2009](#) a porté sur la caractérisation hydrochimique et l'influence saisonnière de la pollution par le DMA sur une rivière au Sud- Ouest d'Espagne ; ils ont remarqué que le degré de contamination diminue lorsque les précipitations pluviales augmentent. [Cidu 2010](#) a étudié la

mobilité des contaminants dans les eaux souterraines au niveau d'une mine abandonnée ; les résultats obtenus ont contribué à la réduction du coût des risques environnemental et de remédiation. [Oinam et al.2012](#) ont essayé de comprendre le processus géochimique et de caractériser la qualité des eaux souterraines en utilisant une approche statistique au niveau d'un discret minéralisé en Inde. L'étude faite par [Bhattacharya et al.2012](#) a porté sur une étude hydrogéochimique de la contamination des ressources en eau dans une région minière à l'Ouest de la Guinée ; les résultats obtenus ont montré l'existence d'un sérieux impact à l'échelle régionale. [Sadek 2012](#) a démontré les réactions chimiques qui contrôlent l'évolution géochimique des eaux souterraines dans une zone minéralisée au Sud de la Chine. L'étude faite par [Olías et al.2012](#) a porté sur l'étude de l'évolution de la contamination des eaux souterraines ; cette étude a permis de localiser les zones de potentielle contamination.

[Lee et al.2005](#) ont évalué le potentiel de contamination des eaux souterraines par des métaux toxiques dans et autour d'une mine de zinc abandonnée, en Corée ; ils ont constaté que les niveaux d'eau dans la décharge de la mine indiquaient la présence d'un ruisseau perdant, pendant la période de pointe du courant résultant du ruissellement de la fonte des neiges, qui menaçait la pollution des eaux souterraines. [Bouamar et al.2009](#) ont évalué la contamination et les changements de la qualité de l'eau à proximité d'une mine de plomb abandonnée ; ils ont montré que les eaux souterraines sont caractérisées par une salinité variable globale significative, alors qu'une charge minérale élevée en métaux lourds est apparue dans la plupart des puits. L'état de la qualité de l'eau pour les zones humides a également été évalué par [Jessica et al. 2011](#) dans le district de Mehsana (Inde), où 19 paramètres ont été analysés, alors que peu de sites ont montré la présence d'oxygène biochimique élevé qui pourrait avoir un impact sur la biodiversité. [Prasad et al.2008](#), ont utilisé la concentration d'échantillons d'eau souterraine, prélevés à un demi-kilomètre de la périphérie de la mine remplie de cendres et à l'intérieur de la mine elle-même. Les pH, TDS, TH, Ca, Mg, Cl, S0₄, F, K, Cu, Cd, Cr, Fe, Pb, Zn, Mn et Ni ont été trouvés avec une concentration significative de Fe et Mn. La qualité de l'eau souterraine et son aptitude à la consommation ont été étudiées dans les aquifères côtiers urbains du Tamil Nadu, en Inde, par [Krishna Kumar et al.2014](#) ; les échantillons montrent que la majorité des points d'échantillonnage se sont regroupés sur le faciès Na-Cl et mélangé Ca-Mg-Cl du diagramme trilinéaire du piper. Les résultats extraits de la matrice de corrélation et de l'analyse géochimique suggèrent que les ions dominants des eaux souterraines (Na⁺², Ca⁺², K⁺, Cl⁻ et SO₄⁻²) étaient dérivés du processus d'intrusion d'eau de mer et de dissolution du gypse, et la concentration en nitrates provient le plus souvent de sources anthropiques.

Pratiquement la même méthodologie a été adoptée par [Ya Wu et al.2014](#) et par [Youning Hu et al.2014](#), respectivement. Ils ont étudié la salinité du sol à travers sa géochimie à l'échelle régionale et la contamination par les métaux lourds de la couche arable urbaine. [Ben Bouih et al.2005](#), [Laghlimi et al. V2, 2015](#) et [Laghlimi et al. V3, 2015](#) ont examiné la contamination par des métaux traces dans les sédiments du lac Fouarat et la contamination du sol par les métaux lourds dans la mine abandonnée de Zaida (Maroc), respectivement. Les résultats ont montré que les sols de la zone étudiée présentent des niveaux moyens à faibles par rapport aux niveaux normaux de sol non contaminé, sauf à proximité des parcs à résidus et du centre minier où les niveaux enregistrés sont relativement élevés. La contamination des sols de la décharge d'Ahfir-Saidia (Maroc) non contrôlée par les métaux lourds a été évaluée par [Nhari et al.2014](#), le Pb, le Zn, le Ni, le Cr, l'As et le Co ont révélé des quantités importantes, mais les concentrations de Cd étaient très faibles. Les propriétés physico-chimiques et minéralogiques de l'horizon alluvial plus profond (> 1 m de profondeur) ont été évaluées à Sonapur-Bazar (Inde) par [Kumar et al.2012](#) afin de déterminer les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des sols alluviaux 10 m de profondeur. L'étude a révélé que le sol alluvial avait une taille de pores moyenne de 51% dans la nature et une capacité de rétention d'eau d'environ 41,6%.

De manière générale, les sols pollués en métaux lourds provenant de zones minières en Chine ont été résumés par [Zhiyuan et al.2014](#) dans le compte rendu (2005-2012), où la plupart des travaux ont montré que les risques élevés de cancérogénicité et non cancérogène du sol métaux lourds crée des défis environnementaux pour le public, en particulier pour les enfants. Une revue de la littérature sur la chimie et les risques biologiques potentiels a été rassemblée par [Raymond et al.2011](#), alors que; nombre de métaux lourds: plomb, chrome, arsenic, zinc, cadmium, cuivre, mercure et nickel couramment présents dans les sols contaminés. En conséquence, le lavage des sols et la phytoremédiation ont été considérés comme les meilleures techniques fréquemment utilisées pour nettoyer les sites contaminés par des métaux lourds. En effet, les eaux souterraines constituent la colonne vertébrale de l'approvisionnement en eau, en particulier dans les zones arides et semi-arides, telles qu'elles sont adoptées dans les hautes terres du Sahara algérien ([MEM 2009](#)). L'exploitation de ces sources est encouragée par la qualité de son eau douce et de sa qualité; où environ 60% de la quantité totale d'eau utilisée provient de sources souterraines.

Chapitre: II

Milieu physique et aperçu géologique

I. Milieu physique

I.1. Situation géographique et topographique

La zone de Morsott-El Aouinet fait partie des régions semi-arides du Sud-est Algérien à quelques kilomètres de la frontière algéro-tunisienne. Cette zone se trouve à une cinquantaine de km au Nord de Tébessa et elle s'étend sur une superficie de 140 km² depuis Morsott au Sud à El Aouinet au Nord (fig.01).

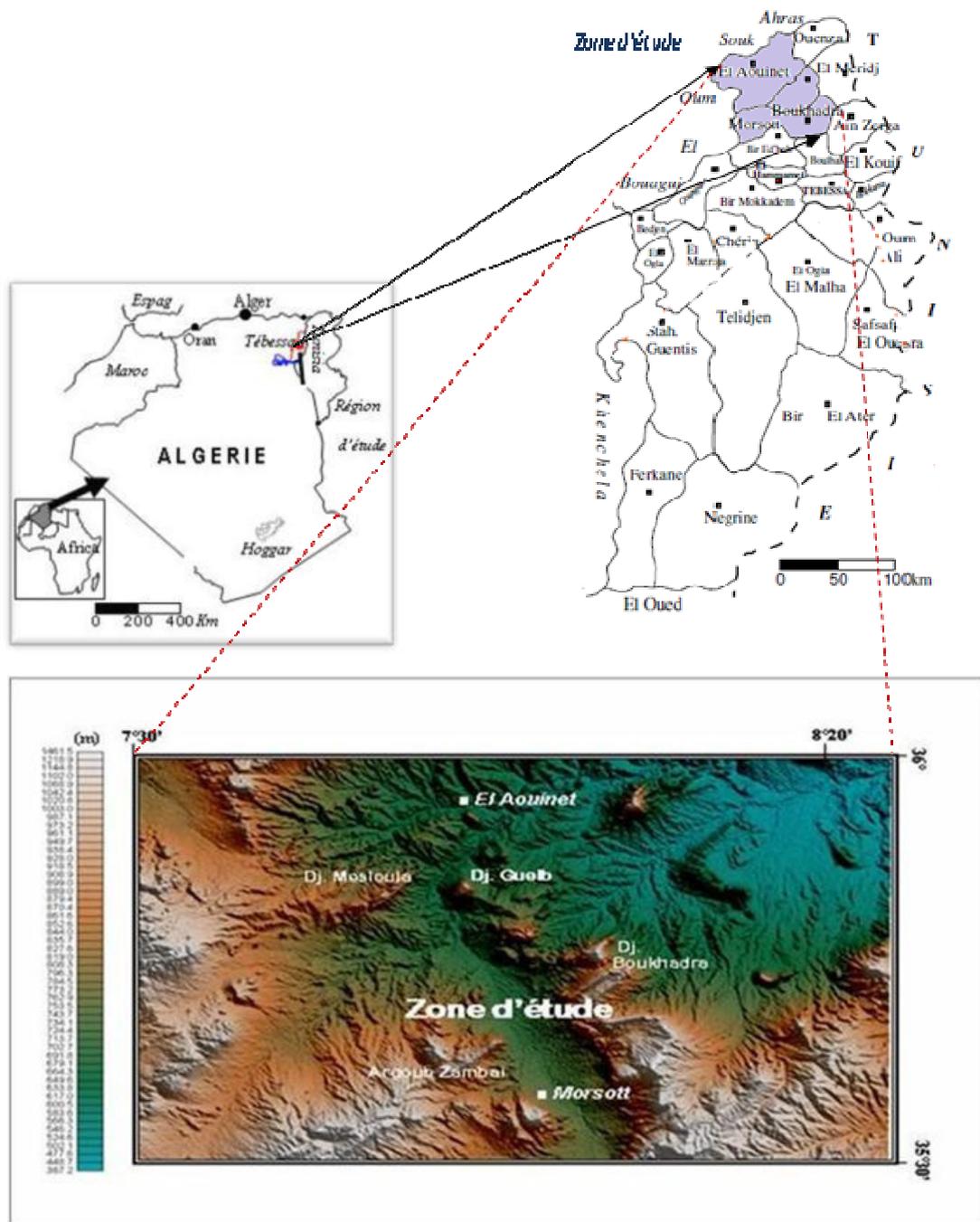


Figure 01: Localisation de la zone d'étude et une vue topographique

Géographiquement la zone étudiée est située à l'extrême Nord-est de l'Atlas saharien, entre les coordonnées suivantes : 7° 45'- 8° 00 E de longitude et 35 °- 45 ° N de latitude. Elle est délimitée par Djebel Mesloula, Djebel Boukhadra à l'Ouest et à l'Est, et par Djebel Guelb et El Gountas au Nord et une frontière administrative au Sud,

La région d'étude présente l'allure d'une dépression sous forme d'une cuvette. Son altitude varie entre 690m (au centre de la cuvette) et 1400m vers le Sud de la région étudiée (le sommet le plus haut de la région est le Djebel Boukhadra situé à l'Est et qui présente une altitude de 1402m).

La partie centrale de la région est constituée d'un fossé tectonique enserré par des montagnes escarpées à l'Est et à l'Ouest.

Les reliefs se caractérisent, du Nord au Sud, par leur organisation en éléments quasiment parallèles, que l'hydrographie a souvent entrecoupés de façon perpendiculaire.

I.2. Le couvert végétal et le climat de la région d'étude

Les différents types de végétation sont présentés comme suit :

La partie septentrionale de la région d'étude est relativement humide et par conséquent les forêts sont un peu denses ; mais les parties cultivables sont souvent basses et plus sèches.

La ligne de crête appelée souvent la haute chaîne est marquée souvent par une pluviométrie moins importante, les forêts sont à base de pin d'Alep, de dis, de lentisques et les chaînes vertes épineux constituant un véritable maquis surtout à Djebel Boukhadra, Hod Seghir et Hod Kebir.

La région de Tébessa étant une zone de transition météorologique est considérée comme une zone agro-pastorale avec une présence d'un nombre important de phénomènes (gelée, grêle crue, vent violent).

La Wilaya de Tébessa se distingue par quatre (04) étages bioclimatiques.

* Le Sub- humide (400 à 500 mm/an), très peu étendu il couvre que quelques îlots limités aux sommets de quelques reliefs (Djebel-Serdies et Djebel-Bouroumane).

* Le Semi-aride (300 à 400 mm/an), représenté par les sous étages frais et froid couvre toute la partie Nord de la Wilaya.

* Le Sub-aride (200 à 300 mm/an), couvre les plateaux steppiques de Oum-Ali – Saf-Saf-El-Ouesra – Thlidjene et Bir El-Ater.

* L'aride ou saharien doux (-200 mm/an), commence et s'étend au-delà de l'Atlas saharien et couvre les plateaux de Negrine et Ferkane.

Notre région d'étude appartient au deuxième étage qu'est caractérisé par un climat semis aride.

I.3. L'hydrographie de la région d'étude

Le réseau hydrographique est bien développé et représenté avec des petits cours d'eau temporaires aux larges vallées bien élaborées, se déversant dans des grands oueds dont les plus importants sont oued Mellègue et Oued Chabro (**fig.02**).

L'Oued Chabro coule le long de la partie d'étude, il a un écoulement pérenne, il est soutenu principalement par le système aquifère de la zone d'étude, son écoulement est lié aussi aux précipitations, notamment orageuses, qui coïncident avec la fin du printemps et de l'été.

Tous les affluents ont un écoulement temporaire très limité, à la suite de fortes précipitations orageuses. L'écoulement du système hydrographique se fait du Sud vers le Nord, caractère typique des oueds de la région.



Figure 02: Photo satellitaire présentant le réseau hydrographique de la région d'étude (Source Google earth 2018)

L'apport de Oued Chabro est très faible où on note un accroissement de la lame d'eau d'amont en aval.

Les fortes valeurs de débit ont été enregistrées au niveau de la station d'El Aouinet, Cela est dû à la contribution des eaux d'Oued Meskiana qui constitue un apport supplémentaire où sa jonction avec Oued Chabro donne naissance très en aval à l'Oued Mellègue.

L'évolution des débits mensuels interannuels et les précipitations montrent une incohérence très nette où seul le mois de décembre semble présenter des chroniques de précipitations et de débits cohérentes.

En général les écoulements à travers la région d'étude présentent des particularités à système pluvial orageux dans son ensemble, régis par des modes d'alimentation, et des conditions de rétention restitution qui sont à l'origine des écarts entre les impulsions de débits et les hauteurs de pluies.

I.4. Contexte socio-économique

La zone d'étude est située dans la zone intermédiaire entre la ville de Tébessa située au Sud et la partie Nord de la wilaya (riche par ses ressources minières). Elle se caractérise par une occupation de l'espace plutôt lâche avec une dotation naturelle relativement modeste.

Cette différence de potentiel entre cette zone intermédiaire et l'espace Sud et Nord de la région explique les mouvements de populations agricoles et pastorales en direction de ce pôle de concentration par un comblement progressif des espaces sous occupés.

L'économie de la région repose principalement sur les activités agricoles et les activités urbaines situées en amont et en aval de l'agriculture. Elle est en effet à forte vocation pastorale et a d'ailleurs constitué une zone de parcours et de transhumance des troupeaux ovins, jusqu'au milieu des années 90. Depuis cette époque, la région connaît une activité agricole très importante et grande consommatrice d'eau, avec une très grande variété de cultures, céréalières, maraîchères et arboricoles.

II. Aperçu Géologique

II.1. Introduction

Le Nord de l'Algérie est constitué de reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. Il est délimité au Sud, par l'Atlas saharien (chaîne alpine) et au centre, par des plates-formes (Meseta oranaise à l'Ouest et môle d'Aïn Regada à l'Est). Dans la partie septentrionale, l'atlas tellien (Jurassique à Miocène) est une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur. Des bassins néogènes tardifs, comme le Chélif et le Hodna, se sont installés sur ces nappes. Le plateau continental est réduit ; les dépôts Tertiaires et Quaternaires (1000 à 3500m) reposant sur un socle métamorphique.

La plateforme saharienne appartient au Craton Nord-Africain. Elle est constituée d'un socle précambrien recouvert en discordance par une puissante couverture sédimentaire transgressive phanérozoïque, structurée au Paléozoïque en plusieurs bassins séparés par des zones hautes (Bassins de Tindouf, Reggane, Bechar, etc.).

II.2. Stratigraphie du nord de l'Algérie

La stratigraphie du Nord algérien fait partie du bassin mésogéen. Quatre ensembles paléogéographiques sont distingués : la meseta oranaise, l'atlas saharien, le SE constantinois et le domaine tellien.

Basant sur la carte géologique du Nord-est de l'Algérie (**fig.03**) et la colonne stratigraphique du Nord-est de l'Algérie (**fig.04**), la succession stratigraphique peut se résumer ainsi :

II.2.1. LE PALEOZOIQUE

Il n'affleure essentiellement que dans la partie septentrionale (Monts de Ghar-Rouban, Tiffrit, Traras, Chenoua et Kabylie). Il est constitué de gneiss, de micaschistes, de grès et de quartzites, datés par endroits (Ordovicien, Dévonien, Carbonifère, Permien).

II.2.1.1. Paléozoïque inférieur

Il existe peu de données sur le Paléozoïque inférieur. Un certain nombre d'affleurements, en petite Kabylie par exemple, montre un cristallophyllien visible sur 4000 à 5000 m. Ce socle est recouvert d'un conglomérat de base suivi de schistes à Graptolites et de calcaires à Tentaculites et Orthocères permettant d'attribuer un âge anté-silurien à ce métamorphisme.

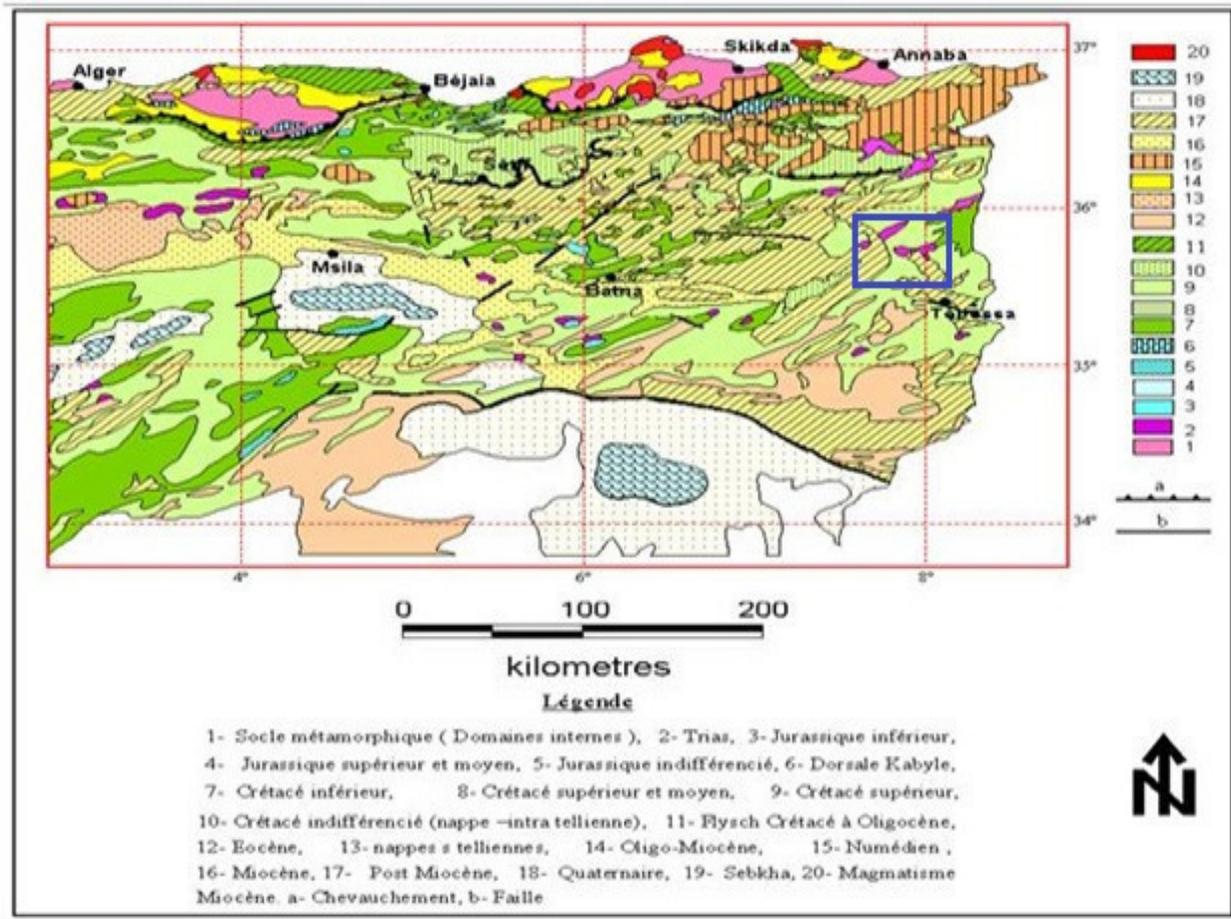


Figure 03: Carte géologique du Nord-est Algérien (Extrait de la carte géologique au 1 : 500 000)

II.2.1.2. Dévonien

Il débute par des éléments bréchiques et se poursuit par un ensemble schisto-gréseux dans lequel apparaissent des calcaires récifaux (Ghar-Rouban). Des flysch se déposent dans les sillons.

II.2.1.3. Carbonifère

Il n'est pas présent partout. Dans le Djurdjura, il n'est connu que sous des faciès essentiellement continentaux. Dans les régions de Ghar-Rouban, de Tlemcen, etc., le Viséen est représenté par des schistes, localement des conglomérats ainsi que des séquences éruptives inter-stratifiées. Les autres séries du Carbonifère semblent aussi être présentes dans le Chenoua.

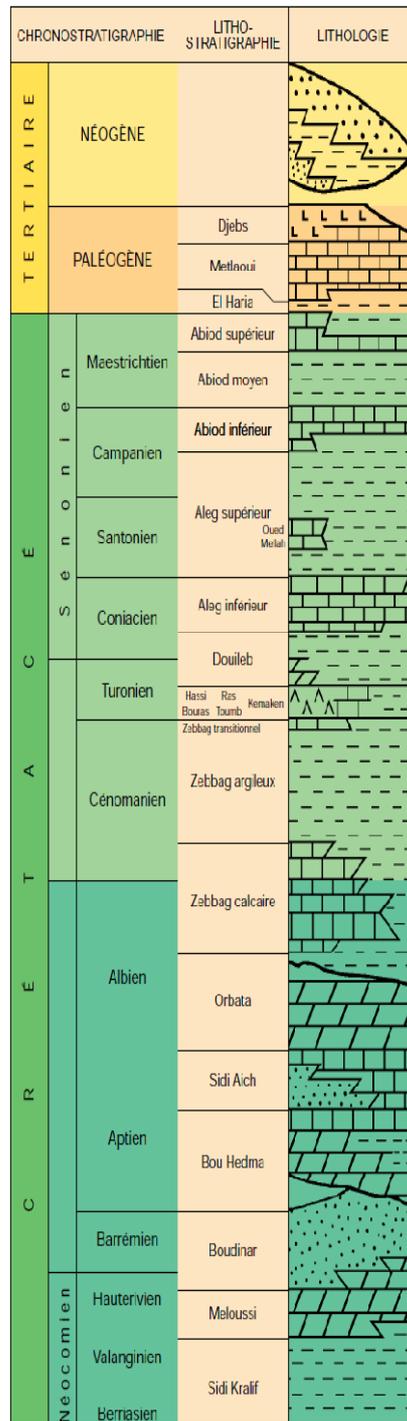


Figure 04: Stratigraphie synthétique du Nord-est de l'Algérie

II.2.2. LE MESOZOÏQUE

II.2.2.1. Trias

Il n'est connu in-situ que dans quelques forages où il consiste en une série gréseuse à la base suivie d'une puissante série évaporitique comprenant des passées calcaro-dolomitiques et des intercalations volcaniques basiques au sommet. En grande Kabylie, le Trias inférieur,

probablement en partie Permien, est représenté par des grès rouges auxquels succèdent les calcaires du Muschelkalk, en bancs épais ou en plaquettes, eux-mêmes suivis de grès rouges parfois intercalés de roches doléritiques. Plus au sud, dans la région des Babors, le Muschelkalk est surmonté par les formations salifères et gypsifères du Keuper. Le régime lagunaire des Babors s'étend dans toute la zone tellienne. A l'Est, le Trias lagunaire essentiellement argilo-détritique, comprend cependant des séquences sommitales carbonatées attribuées au Muschelkalk. Dans le Hodna et le Constantinois, des argiles bariolées s'intercalent dans ces mêmes séquences. A la fin du Trias, à l'exception de quelques zones stables (Doui Zaccar, Beni Snassene, etc.), les faciès évaporitiques se généralisent.

II.2.2.2. Jurassique

Dans la majeure partie du Nord de l'Algérie, il débute par un Lias transgressif (**fig.05**).

II.2.2.2.1. Lias

Après l'épisode évaporitique du Trias supérieur, le caractère marin s'accroît durant le Lias. Le faciès calcaro-dolomitique évolue progressivement vers les marnes du Lias supérieur. Le caractère marin du Lias s'affirme par l'apparition de calcaires dolomitiques et oolithiques indiquant un milieu ouvert aux influences pélagiques sans pour autant être très profond.

Le Lias débute par un niveau carbonaté qui coiffe les séquences évaporitiques du Keuper. En divers points de l'Atlas saharien, ce niveau est d'âge Rhétien. Dans les zones méridionales de la chaîne, Hodna et Boussaâda, les dépôts essentiellement carbonatés comblent la fosse atlasique. La zone tellienne occidentale et la Plate-forme Saharienne voient la sédimentation carbonatée se poursuivre avec un Hettangien-Sinémurien calcaire qui atteint, par endroits, 200 m. A l'Hettangien-Pliensbachien, la transgression atteint son maximum avec des calcaires à silex, des calcaires rouges à Ammonites, des calcaires à polypiers, des algues et enfin des dolomies calcaires (200 m). Au Domérien, l'Algérie est entièrement sous environnement marin. Les faciès ammonitico-rosso apparaissent dans le Djurdjura.

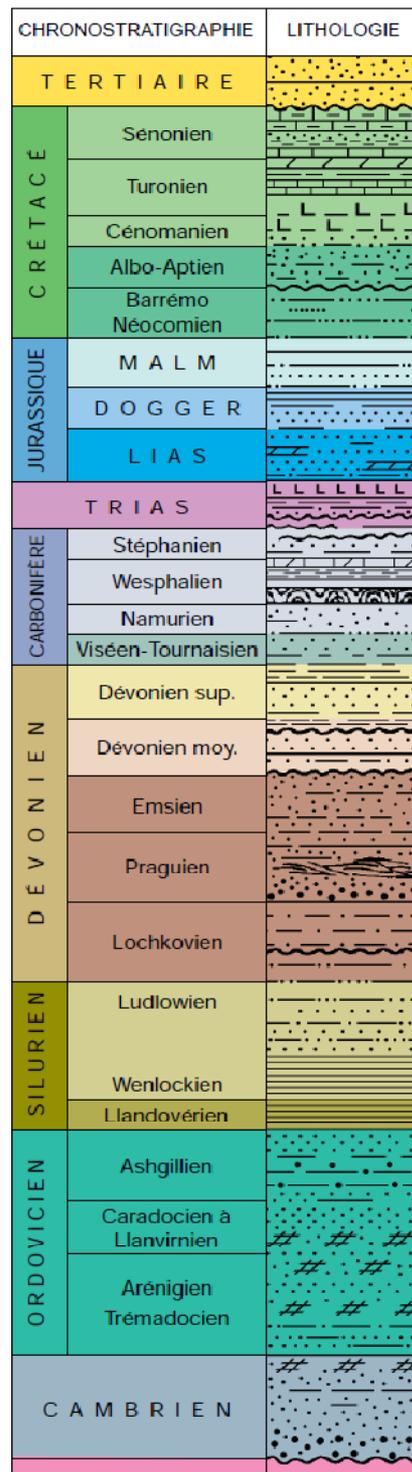


Figure 05: Stratigraphie de la province orientale du Nord de l'Algérie

II.2.2.2.2. Dogger

Il est réparti, du Nord au Sud, en différents domaines paléogéographiques. Le domaine kabyle à dépôts carbonatés réduits, suivi par la zone tellienne à sédimentation argilo-carbonatée relativement épaisse, par les hauts plateaux et le môle constantinois à dépôts surtout carbonatés et enfin par la fosse atlasique, à faciès argilo-gréseux dépassant souvent 2000 m

d'épaisseur. Dans la partie sud des hauts plateaux oranais et de l'Atlas saharien occidental, on relève au Bajocien supérieur, les traces d'une sédimentation détritique qui traduit la proximité d'une activité fluvio-deltaïque.

II.2.2.2.3. Malm

L'extension des faciès gréseux vers le Nord montre que la régression, amorcée dans la fosse atlasique à la fin du Dogger, s'accroît. Durant cette période, s'opposent les domaines marins au Nord et les domaines continentaux ou deltaïques au Sud. Dans ces derniers, on relève cependant dans les hauts plateaux et la fosse atlasique, des faciès d'influence marine sous forme de sables et grès, d'argiles et de calcaires. A l'Est du méridien passant par Sedrata-Laghouat, un milieu marin franc sans apport détritique persiste durant tout le Jurassique supérieur.

II.2.2.3. Crétacé

Il affleure dans l'Atlas saharien. Ses sédiments détritiques et siliceux connaissent leur plus grand développement dans l'Atlas saharien occidental avec des épaisseurs de 1200 m.

II.2.2.3.1. Néocomien-Barrémien

Cette période est caractérisée par une régression maximum au Barrémien avec un retrait de la mer de l'Atlas tellien, du môle constantinois et du NE de la fosse atlasique. Les faciès présentent le plus souvent des alternances d'épisodes argilo-gréseux et de niveaux carbonatés.

II.2.2.3.2. Aptien

Dans le Hodna et les Aurès, c'est un bref épisode marin transgressif à carbonates et récifs. Vers le Sud et l'Ouest, les faciès gréseux dominent et traduisent un régime fluvio-deltaïque. Cependant, dans la fosse atlasique, rien ne permet de distinguer l'Aptien de l'Albien, sauf dans la région de Laghouat où des dépôts calcaires ont été retrouvés.

II.2.2.3.3. Albien

Deux ensembles lithologiques se distinguent. Dans l'Atlas Saharien, l'Albien gréseux à la base, évolue vers des faciès flysch vers le Sud. Dans le Tell, il est représenté par un faciès argilo-gréseux et enfin dans le Sud-est Constantinois, là où la transgression est déjà amorcée, l'Albien est carbonaté. Dans l'Albien supérieur, des dépôts de marnes et de calcaires succédant

aux faciès gréseux du Tell et de l'Hodna, annoncent la transgression majeure du Crétacé supérieur.

II.2.2.3.4. Cénomanién

Après la transgression albiennne, la mer se stabilise. Dans le Sud, une diminution de la tranche d'eau entraîne une sédimentation évaporitique. Ailleurs, la tendance est nettement marine. Dans l'Atlas tellien, les dépôts sont des marnes (1000m) à faune pélagique. Le Cénomanién est néritique dans les régions du Telagh et de Tiaret et carbonaté (300 à 400 m) dans les Monts du Hodna.

II.2.2.3.5. Turonien

A l'exception de certaines zones des hauts plateaux et du Constantinois, la mer recouvre tout le Nord de l'Algérie et le Sahara. Les faciès cénomaniens sont remplacés par des marnes à lamellibranches et échinodermes.

II.2.2.3.6. Sénonien

Il s'agit d'une sédimentation marno-calcaire à lumachelles. La paléogéographie précédente persiste jusqu'au Sénonien supérieur, avec un léger approfondissement marin et, à nouveau, une microfaune pélagique abondante.

II.2.3. LE CENOZOIQUE

II.2.3.1. Eocène

En Algérie, les formations éocènes sont très importantes tant par leurs surfaces que par leurs épaisseurs. Dans le Tell, l'Eocène comprend des marnes riches en microfaune, des calcaires et des argiles. Le Lutétien et le Thanétien sont représentés par les niveaux à nummulites classiques dans ces régions. Au Sud du Hodna, l'Eocène inférieur est composé de marnes à gypse, de calcaires phosphatés et de calcaires à silex. Le Lutétien se présente sous un faciès de marnes à huîtres.

II.2.3.2. Oligocène-Miocène

- **Oligocène**: il est caractérisé par des apports importants de matériel essentiellement gréseux.

- **Miocène inférieur**: il est le siège d'une vaste transgression prenant en écharpe, suivant une ligne sensiblement E-O, tout le domaine Algérien de la région de Tlemcen à la dépression saharienne de Biskra. Il est constitué d'une épaisse série de marnes bleues (plus de 1000m) passant latéralement à des grès argileux marins. Au sein de cette immense zone immergée, s'individualisent des bassins, la Tafna, le bas et le moyen Chelif, le Hodna, les Sébaou, etc.
- **Miocène supérieur**: la régression du Burdigalien est suivie d'une transgression progressive à l'échelle du Chelif. Le Miocène supérieur comprend des faciès divers (marnes noires ou bleues, sables, grès, calcaires, diatomites et gypse).

II.2.3.3. LE PLIOCENE ET LE QUATERNAIRE

Au Pliocène, dans le Chelif et la Mitidja la mer dépose des marnes bleues à intercalations gréseuses (1000m). Dans le reste de l'Algérie, le Pliocène est lagunaire et passe vers le haut aux formations quaternaires continentales.

II.3. Géologie du nord de l'Algérie

Le Nord de l'Algérie appartient à la province alpine mésogéenne, qui couvre la chaîne bétique du sud de l'Espagne et le Nord du Maroc. Cette province présente un très grand nombre de minéralisations Pb-Zn et polymétalliques. En Algérie du Nord, un socle ancien (Hercynien) affleure dans les Massifs de la Grande et Petite Kabylie, de l'Edough, et au cœur des horsts du domaine des Hauts Plateaux. Les principales minéralisations sont stratiformes de type Mississippi Valley (Pb-Zn), filoniennes.

II.3.1. Ensembles métallogéniques du Nord de l'Algérie

La province maghrébine Zn-Pb, en bordure septentrionale de la plateforme saharienne, est composée de deux sous provinces:

II.3.1.1. Au nord, la sous-province tellienne : de type base de marge continentale, comprenant les massifs Kabyles, avec manifestations volcaniques au Tertiaire. Cette sous-province recèle environ 47% des gisements et 40% du potentiel Pb-Zn. Les gisements sont essentiellement filoniens, avec association minérale complexe : Pb, Zn, Cu, pyrite, F, Ba (As, Sb, Hg, Ni, Ag, In), dans des encaissants plutôt siliceux (gneiss, schistes, marnes, grès). Les

filons, amas et disséminations se rencontrent aussi bien dans le socle métamorphique que dans les séries de couverture, jusque dans le Miocène post-nappes ;

A-Domaine des massifs primaires kabyles : ces massifs cristallins affleurent le long de la côte méditerranéenne. Ils ont été le siège de lacunes sédimentaires au Trias et au Secondaire, avec d'importantes manifestations volcaniques de l'Oligocène au Pliocène et principalement au Miocène. Les minéralisations sont de type filonien polymétallique, épithermal à mésothermal, porphyry, skarn et MVT (Pb-Zn);

B-Domaine tellien autochtone : c'est le plus septentrional avec celui des massifs primaires qu'il entoure. Il a été fortement disloqué au Crétacé avec écaillages et déversements vers le Sud. Les minéralisations polymétalliques (Pb-Zn-Cu-Hg) sont de type filonien, épithermaux ou mésothermaux (Oued El Kebir, etc.).

C-Domaine intra-tellien : c'est la partie centrale du sillon tellien, largement recouvert par les nappes et affecté par des plis E-O. Les minéralisations à Pb-Zn, de type filonien, se concentrent surtout dans les calcaires néritiques ;

D-Domaine allochtone tellien : constitué des nappes à semelle triasique, il est plutôt dépourvu de dépôts Pb-Zn.

II.3.1.2. Au sud, la sous-province méridionale ou saharienne : à sédimentation de type plateforme continentale, plissée ou tabulaire, où le volcanisme est absent. Elle recèle environ 53% des gisements et 60% du potentiel Pb-Zn. Les gisements, de type MVT, sont à dominante stratiforme, ou en remplissage de fractures, avec une paragenèse simple : Zn-Pb (Cd, Ga, Ge, pyrite, rare Cu, Sb, Hg). Les encaissants sont carbonatés. Leur âge décroît d'Ouest (Lias près d'Oran) en Est (Crétacé supérieur à Ain M'Lila Miocène dans l'Est constantinois.

A-Domaine pré-saharien de la Meseta oranaise: cette zone tabulaire jurassique, reposant sur un substratum primaire, a été légèrement plissée par la phase alpine. On y trouve les dépôts stratiforme de type MVT dans les dolomies du Lias (El Abed, .etc.);

B-Domaine pré-saharien intermédiaire du môle d'Aïn M'Lila et de sa bordure: il présente des faciès néritiques au Crétacé inférieur et les minéralisations Pb-Zn, essentiellement de type MVT, se localisent sur la bordure du môle (Kherzet Youssef);

C-Domaine pré-saharien de l'Atlas oriental: il est affecté par deux directions tectoniques (NO-SE et OSO-ENE), avec diapirisme du Trias et Mio-Pliocène. Les hauts-fonds du Crétacé inférieur récifal recèlent l'essentiel de la minéralisation au voisinage des diapirs triasiques (Mesloula).

La richesse du potentiel métallique de cette province nord Maghrébine tient à plusieurs facteurs:

•Dans le socle métamorphique

- ❖ Présence de minéralisations intimement associées au socle métamorphique, en relation avec une ou plusieurs époques métallogéniques anté-alpines (probablement hercyniennes). Comprenant des niveaux stratoïdes à :
 - Sulfures polymétalliques ;
 - Magnétites±Sb, ±Au ;
 - Skarn ;
 - Lentilles de chromites dans méta-périodites ;
 - Méta-greisen à Sn, W, Li.

•Dans la couverture post-paléozoïque

- ❖ Existence de roches -mères- et -magasins- pour métaux de base (Pb-Zn essentiellement) dans les séries de couverture, en contexte de bassin d'arrière arc, peu profond. Ces roches sont localisées à plusieurs niveaux stratigraphiques; on distingue:

Des marnes noires ; milieu anoxique favorable au piégeage des métaux. Elles sont intercalées entre les carbonates, dolomies, à plusieurs niveaux stratigraphiques - Jurassique (Bathonien, Oxfordien) ; Crétacé (Albien, Cénomaniens, Lutétien), Oligocène, etc. Ces faciès sont les précurseurs du pétrole et constituent un des termes classiques des séquences régressives - dolomies, évaporites. Ils jouent également un rôle d'écran pour les fluides libérés par la compaction des sédiments et l'empilement tectonique lors des compressions alpines. Ils peuvent produire des concentrations importantes de métaux de base, métaux précieux (Au, EGP) bien décrites dans les Kupfer schiefers polonais et germaniques, mais peu décrites en Algérie. La présence de kérogènes et de chlorures dans les fluides associés est favorable à la migration des métaux ;

Des dolomies ; roche magasin facilement imprégnée par des sulfures et/ou des carbonates de fer. Outre ces réservoirs potentiels, l'instabilité structurale du bâti hercynien au Jurassique, au Crétacé et au Miocène, et les phénomènes liés à l'halocinèse et aux grands accidents des nappes telliennes, renforcent l'intérêt de cette zone pour l'exploration grâce à :

Des paléorifts ; précédant la transgression marine du Trias. Ces paléorifts créent des structures favorables aux dépôts de minéralisations soit stratiformes, à proximité des hauts fonds, soit sécantes, en pseudo-morphoses de zones broyées ou filoniennes ;

Des paléokarsts ; en relation avec plusieurs surfaces d'émersion (Aaléno-Bajocien, Bathonien, Aptien-Albien, Cénomaniens...). Ceci a permis la mise en place de concentrations en Pb-Zn de type MVT (Mississippi Valley Type) dans les carbonates et un enrichissement secondaire des minerais dans la zone oxydée (Mn, Cu oxydé) ;

Des structures en dôme ; dues à la montée des diapirs du Trias, accentuées par la tectonique alpine. Ce sont des métallotectes privilégiés pour le développement de gisements à :

-**Sulfures Pb-Zn stratiforme ou en amas** : exemple de la formation Bahloul Cénomaniens-Turonienne qui encaisse le gisement de Bou Grine en Tunisie ;

- **Barytine, fluorine, célestine, strontianite** dans les cavités de **dissolution**;

- **Sidérie** (Ouenza), si l'activité sulfurée est plus faible.

- ❖ l'existence d'une activité volcanique liée au fonctionnement d'un arc insulaire au Miocène avec un magmatisme hypo-volcanique calco-alcalin. Ce magmatisme ouvre de belles perspectives pour la recherche de minéralisations de type porphyry Cu-Au-Mo, skarn W-Mo, épithermal Au-Sb-Hg.

II.4. Géologie de la région d'étude

II.4.1. Introduction

Une synthèse globale sur la géologie et la tectonique de la région d'étude «l'aquifère Morsott-El Aouinet» a été donnée et résumé par **Fehdi. C (2008)**.

La région d'étude fait partie du secteur oriental de l'ensemble autochtone d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. C'est une région qui englobe les monts de Morsott et de

Mellègue. Il s'agit d'une vaste zone d'anticlinaux et synclinaux orientés SW-NE injectés ou percés par des diapirs d'évaporites triasiques.

Ces diapirs qui auraient joués dès le Barrémien ont déterminé la formation des masses récifales et de minéralisations péri-diapiriques. La forme des affleurements des diapirs vus en plan varie assez rapidement du Sud vers le Nord : forme d'ellipse régulière pour le diapir le plus méridional (Boukhadra-Metloug), forme d'ellipse aplatie pour les diapirs les plus septentrionaux de Meslouloua-Oued-Kebarit et d'Ouenza.

La région d'étude est constituée en majeure partie par des terrains crétacés (**fig.06**), la série stratigraphique se présente sous forme d'alternance de formations carbonatées de calcaires, des marno-calcaires et des marnes argileuses.

Les terrains Plio-quadernaires et Quadernaires occupent la partie centrale séparant ainsi les terrains triasiques de Boukhadra et d'Argoub Zembai. Ils sont constitués par des alluvions actuelles et récentes, des poudingues, des grés et de graviers.

Notons la présence de terrains miocènes discordants au niveau de Koudiat Marouane, constitués de conglomérats, de grés et de marnes argileuses.

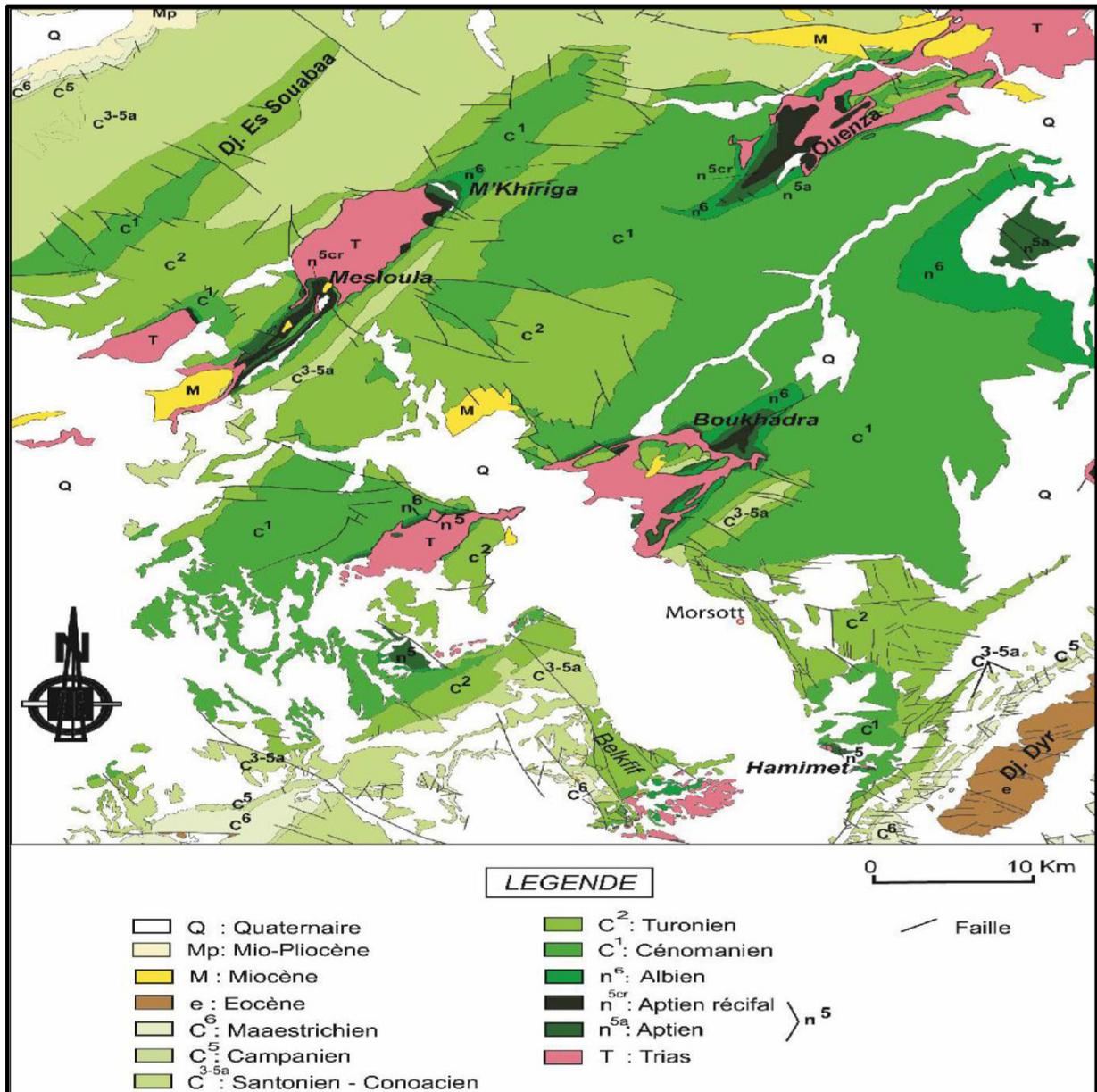


Figure 06: carte géologique de confins algéro-tunisiens (D'après la carte géologique au /de Meskiana, Morsott, El Aouinet, Boukhadra, Oued Kébarit et Ouenza)

II.4.2. Stratigraphie

Basant sur la carte géologique confins algéro-tunisiens (fig.06) et la Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue (fig.07), la succession stratigraphique peut se résumer comme suit :

		Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique		
CENOZOIQUE	Quaternaire		⑥ 10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.		
	Paléogène	Miocène		⑤ 10-150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaire sableux avec intercalations d'argilites.	
		Eocène		200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.	
	MÉSOZOIQUE	CRAI	Maest.		250-300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
			Camp.		500-600	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
		CRAI	Con-Sant.		④ 500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.
			Turo		180-250	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
		CRAI	Cénom.		③ 900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.
			Vracon.		② 500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.
		CRAI	Albien		480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
Clans				100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.	
Aptien				① 300-600	1- Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2- Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.	
MÉSOZOIQUE		Barrém.		< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloulia).	
	Jurassique		?			
PRÉHISTORIQUE	Trias		< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.		

Figure 07 : Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellège (in Sami 2004 : d'après : Dubourdiou 1956, 1959; David 1956; Madre 1969; Fleury 1969; Thibieroz et Madre 1976; Chikhi, 1980; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al. 2000)

II.4.2.1. Formations Continentales Quaternaires

Les formations quaternaires, toutes d'origine continentale, occupent d'importantes surfaces dans la région de Morsott et El Aouinet. Principalement dans les plaines et aux pieds des montagnes.

Eboulis actuels et récents

D'importants éboulis continentaux viennent de se former sur les pentes et aux pieds de tous les reliefs calcaires.

a. Cailloutis actuels

Des épandages de cailloutis, peu fournis, se forment au pied du montage et aux bordures de la plaine.

b. Alluvions actuelles et récentes

Les alluvions actuelles et récentes sont peu importantes. Elles sont constituées de cailloutis calcaires.

c. Limons actuels et récents

Ce sont des formations limoneuses remplissant le lit majeur de l'Oued Chabro, de couleur allant de brun ocre ou gris sombre. Ces limons fins sont souvent associés à des niveaux de cailloutis argileux se déposant dans toutes les régions basses.

d. Croûte Calcaire

Il s'agit d'une formation calcaire blanchâtre, parfois rosée souvent d'aspect « concrétionné », cimentant des éléments calcaires bréchiés. Son épaisseur avoisine souvent 1 m, mais elle est parfois beaucoup plus importante.

e. Formations conglomératiques « Plio-Villafrenchienne »

Près des grandes fractures d'effondrement récent, on peut observer des formations conglomératiques, dont les éléments sont arrondis et cimentés par des argiles brun-rouges.

II.4.2.2. Formation continentale Néogène :***a. Miocène continental***

Ce complexe détritique, marneux ou carbonaté repose en discordance sur les différents termes du Crétacé et de l'Eocène. Dans la feuille d'El Aouinet, il affleure à Rémila, Sidi yahia, Meslough, Mesloula et à Argoub Menchar.

Il est surtout conglomératique à la base et gréseux, marneux ou carbonaté vers la partie supérieure.

II.4.2.3. Formations Marines cénozoïques et mésozoïques :

II.4.2.3.1. Les formations calcaires de L'Eocène et du Paléocène supérieur

Ces formations, de près de 200 m d'épaisseur ont été subdivisées en deux ensembles :

a. Lutétien inférieur- Yprésien

Environ 150 m de bancs épais de calcaires, massif à gros silex, huîtres et lumachelles de Nummulites, alternant avec des niveaux de calcaire plus tendre.

b. Thanétien « Paléocène supérieur »

Environ 20 m en moyenne de calcaires argileux en petits bancs souvent noduleux, à silex.

II.4.2.3.2. Crétacé

Crétacé supérieur

Les roches du Crétacé supérieur se développent pratiquement dans toute la région d'étude. Seuls le Campanien et le Mæstrichtien y manquent leur absence est marquée dans presque toute la région d'étude.

a. Emschérien (300 m environ)

Ce sont des marnes grises à intercalation de bancs calcaires renfermant de nombreux filons de calcite, qui caractérisent la partie inférieure du Coniacien.

La supérieure de l'Emschérien ou « Santonien » représente toujours une série marneuse où s'individualise un banc de calcaire lumachéllique. Cet étage affleure surtout au Nord-ouest de la région d'étude.

b. Turonien (700 m)

Il est très puissant, il affleure dans la majeure partie de la région d'étude surtout au Nord-est et au Nord. C'est une série nettement plus calcaire que le Cénomaniens.

b.1. Turonien inférieur

Ces formations, d'environ 300 m d'épaisseur, sont constituées de corniches de calcaires en gros bancs, gris-clair à patine rousse, souvent, sub-lithographiques, à grands gastéropodes alternant avec des niveaux de calcaires plus argileux en bancs moins épais, à surfaces ondulées et de marnes grises assez calcaires.

b.2. Turonien moyen

Il se distingue par une assise constante et massive d'environ 150 m d'épaisseur de calcaire beige et rose. Ces calcaires constituent une sorte de corniche comme à Dj Bel Kfif, Djebel Guelb et presque dans toute la région Nord-est de la zone d'étude.

b.3. Turonien Supérieur

Il est représenté par environ 250 m de marnes argileuses, marnes et marno-calcaires à intercalations lumachelliques.

Les marnes du Turonien supérieur ont un caractère gypseux et surtout à couleur noire qui les différencie des marnes de l'Emschérien.

c. Cénomaniens

C'est une puissante série marneuse de 600 à 700 m d'épaisseur, représentée par deux termes qui affleurent dans la majeure partie de la région d'étude.

c.1. Cénomaniens inférieur (300 m)

Il est présenté par une importante série de marnes argileuses brunes ou verdâtres en plaquettes renfermant de la calcite fibreuse et des intercalations de marno-calcaires et calcaire en minces lits.

c.2. Cénomaniens supérieur (350 m)

Il est représenté par des marnes grises verdâtres très fossilifères à intercalation de nombreuses passées calcaires lumachelliques qui sont attribués au terme supérieur.

Crétacé inférieur

a. Albien

Il affleure à Djebel Mesloula et au Sud-est de la région d'étude.

a.1. Albien inférieur et moyen:

Ils se composent de marnes argileuses noires et de calcaires gréseux à bélemnites. Ces formations renferment des restes de mollusques (Bivalve, Brachiopodes et Gastéropodes) et d'Echinodermes.

a.2. Albien Supérieur:

Il se compose de marnes argileuses noires à intercalations de calcaires marneux, et il possède une abondance d'un reste faunique surtout présenté par des Ammonites et Bélemnites.

b. Aptien

Il est représenté par environ 100 à 150 m de gros bancs massifs et épais de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques à Orbitolines, de dolomies fixes, de calcaires gréseux et de grés fins à ciment calcaires argileux.

Les calcaires récifaux représentent une grande partie de cet étage aux environs de Mesloula.

c. Barrémien (100 m)

Les formations de barrémien sont composées de grés de marnes argileuses et de calcaires à Orbitolines, le Barrémien affleure dans la région Sud-ouest de Djebel Mesloula sous forme de deux bandes de direction Nord-est Sud-ouest (Oued El Botma, Djebel Assa et Djebel Bardo). Ces formations sont partiellement couvertes par des éboulis.

II.4.2.3.3. Le Trias

Le Trias affleure sous forme de diapir à la faveur des contacts anormaux, en repassant les terrains Aptiens qui constituent la roche encaissante provoquant ainsi leur redressement à la verticale. Les affleurements attribués au Trias, s'observent en trois régions :

Celle qui comporte les affleurements les plus étendus dans l'angle Sud-ouest de la feuille d'El Aouinet, connu sous le nom de diapir d'Argoub Zembai.

Une autre au Nord et ne correspond qu'à des pointements au milieu de l'anticlinal de Djebel Mesloula.

En fin dans l'angle Sud-ouest de région d'étude, des affleurements d'extension réduite se raccordent à l'anticlinal diapir du Djebel Boukhadra (feuille de Boukhadra).

Lithologie du Trias

Ces Formation présentent les faciès typique des affleurements attribués au Trias en Afrique du nord (**fig.09**).

La description par ordre chrono stratigraphique est difficile à établir étant donné la complexité structurale. On distingue :

Les argiles et les marnes bariolées

C'est la formation dominante, aux teintes noires ou vives vertes, violacées, jaunâtres et rougeâtres. Les argiles noires sont souvent gypsifères, faiblement gréseuses. Elles renferment aussi des cristaux de quartz bipyramides.

Les Cargneules

Elles sont généralement brunes ou jaunâtre, en bancs désordonnés de différentes épaisseurs. Le degré de dissolution de ces roches calcaro-dolomitiques est variable.

Les calcaires et les dolomies

Leur aspect évoque beaucoup les calcaires jurassiques formés de bancs mal stratifiés épais, durs à la cassure.

Le gypse et le sel gemme

On trouve le gypse dans les argiles ; il est généralement saccharoïde, d'environ 2 à 5 cm d'épaisseur, en ce qui concerne le sel gemme, sauf en période de sécheresse, on ne le trouve pas en surface, sa présence est attestée principalement par l'existence des sources ou des cours d'eau salés.

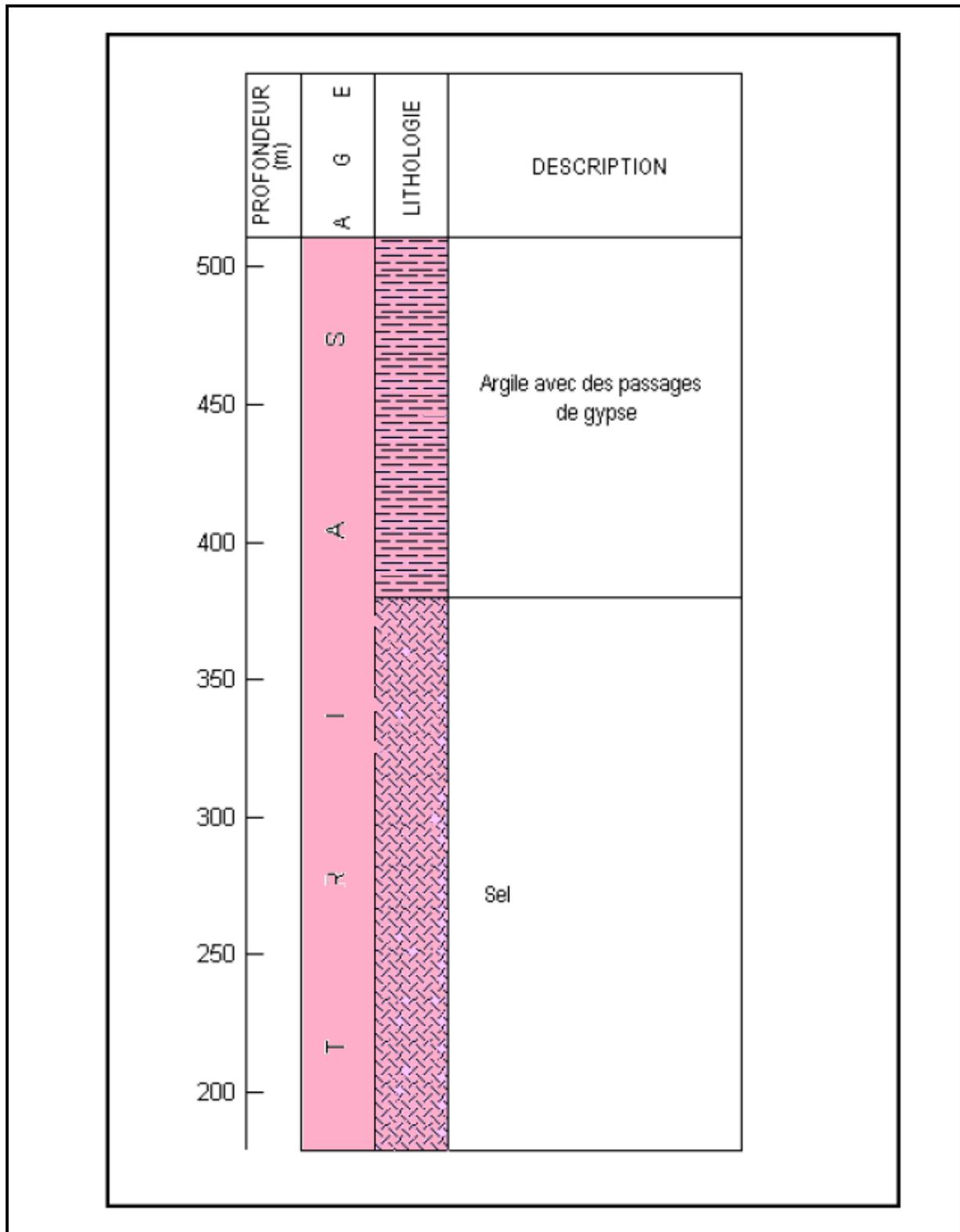


Figure 08: Colonne litho-stratigraphique d'un sondage dans la région d'étude (D'après ORGM, 1987, simplifiée)

II.4.3. Les diapirs dans la région d'étude

Les nombreux diapirs de Trias évaporitique présentent deux types morphologiques principaux des corps de section elliptique, parfois très étirés de direction NE-SW et des corps à contours quasi-circulaires, de faibles dimensions, souvent en relation avec les fractures.

Il est probable que les deux types d'appareils ont été édifiés à partir de la même série triasique constituée par un ensemble salifère épais à la base, puis un ensemble principalement détritique et carbonaté.

Les pointements triasiques sont considérés comme diapiriques pour certains auteurs comme [Dubourdieu \(1956 et 1959\)](#), [Thiébéroz et al. \(1976\)](#), [Bouzenoune \(1993\)](#) et [Bouzenoune et al. \(1995\)](#).

Plus récemment, une nouvelle interprétation a été donnée à ces pointements triasiques. En effet, [J. M Villa \(1993\)](#) et ses collaborateurs interprètent une partie de ces derniers comme étant des glaciers de sel sous-marin à matériel triasique resédimenté.

Cependant, [Kowalski et Hamimed \(2000\)](#) ont réfuté cette théorie de « glaciers de sel » et suggèrent pour les régions situées entre Tébessa et Ouenza, un diapirisme polyphasé, lié aux distensions Albo-aptienne et Mio-plio-quatenaire. Ceci, est argumenté par les observations de terrain :

- Réduction des sédiments Albo-Aptiens,
- Contacts verticaux et intrusifs avec des séries plus anciennes que l'Albien (Barrémien) ou plus jeune que celui-ci (Cénomaniens, Turonien et Miocène d'Ouenza).

II.4.4. Aspect paléogéographique

Aspect paléogéographique et structural

a- La subsidence

Dans la région des monts du Mellègue, les dépôts post-triasiques et anté Barrémiens sont inconnus à l'affleurement. Cette lacune d'observation est interprétée par la grande puissance des séries anté-Aptiennes, résultat d'une subsidence importante qui caractérise le sillon Aurès Kef ([Beghoul 1974](#)). Dans ce sillon, l'épaisseur du Trias est évaluée à 1000 m par [Alièu et al.1971](#) et par [Busson et al.1989](#). La puissance des formations post triasiques, incluant celles du Jurassique, peut dépasser 6000 m selon [Alièu et al.1971](#), [Vila 1980](#), ont évalués les dépôts

crétacés à plus de 5000 m. Dès l'Aptien des perturbations dans la sédimentation sont enregistrés en relation avec l'activité diapirique, qui commence à s'opérer à cette époque. Elle se traduit par la formation de haut fond sur lequel se développe une sédimentation à caractère récifale (Dubourdiou 1956, Masse et al. 1982 et Bouzenoune 1993).

b- Manifestation du Trias dans le sud-est Constantinois

Toutes les études effectuées dans le bassin du Sud-est constantinois révèlent la présence d'indices d'activité diapirique au cours du Crétacé et du Tertiaire et même du Quaternaire.

Ces pointements triasiques affleurent sur une bande de 80 Km selon une direction NE-SW. Récemment ces pointements triasiques ont été l'objet d'une controverse. En effet, ils sont considérés comme diapirique par certains auteurs comme Dubourdiou (1956 et 1959), Thiébéroz et al. 1976, Bouzenoune 1993, et Bouzenoune et al. 1995 et pour d'autres Vila et al. 1993 comme étant des glaciers de sel sous-marin à matériel triasique resédimenté. Dans cette région du Sud-est Constantinois, l'étude de terrain et la synthèse des coupes géologiques, montrent une permanence de l'activité triasique, 06 occurrences ont été dénombrées (Sami 2004), depuis l'Aptien jusqu'à l'actuel (Villafranchien).

c- Relation Diapirs/Encaissant

Les formations triasiques des confins algéro-tunisiens sont ceinturées par des séries de calcaires récifaux d'âges aptien. Ces formations présentent un synchronisme d'Est en Ouest et un diachronisme du Nord vers le Sud (Dubourdiou 1956, Masse et al. 1979). Ces calcaires sont datés du Gargasien à l'Ouenza et à Mesloula par Dubourdiou (1956, 1959) et du Clansaysien à Boukhadra par Masse et al. 1979 et à M'Zouzia par Otmanine 1987. Le contact Trias-encaissant est généralement visible mais difficilement interprétable (Bouzenoune 1993). Ce contact apparaît sous deux aspects :

-Il peut être souligné par des laminages tectoniques ce qui a provoqué la disparition de tranches de terrains: du Barrémien à Mesloula (Dubourdiou 1959), et de l'Aptien à l'Ouenza (Bouzenoune 1993).

-Sédimentaire, souligné par des conglomérats à éléments triasiques comme celui de l'Ouenza et Mesloula (Dubourdiou 1956, 1959, Bouzenoune 1993). Cette disposition du contact Trias-encaissant a amené Vila 1993 à reprendre l'étude du Trias des confins algéro-tunisiens.

Il distingue trois domaines distincts (fig.10), du Nord vers le Sud, selon les conditions d’affleurement du Trias. En plus de ces renversements de série observés au contact Trias-encaissant, comme à Djebel Slata (Smati 1986, Perthuisot et al.1988), à Boukhadra et à M’Zouzia (Otmanine 1987) et à M’Khiriga (Dubourdieu 1959, Sami 2004), ainsi que les données gravimétriques apportées par Zerdazi 1990, réinterprétés par Sami 2004, montrent bien que le Trias de Djebel Mesloula affleure en position diapirique, alors que pour Vila 1993, ce Djebel de Mesloula fait partie intégrante du domaine des glaciers de sel.

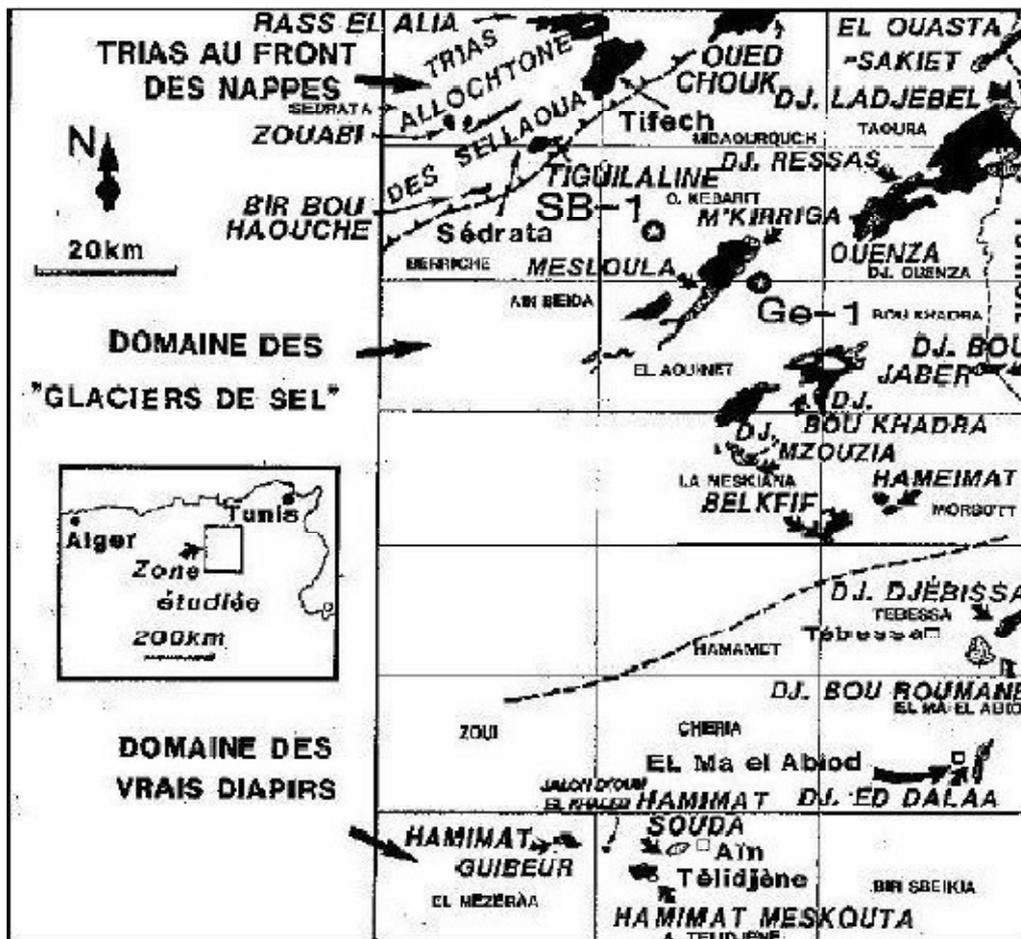


Figure 09: Délimitation des trois domaines triasiques dans les cofins algéro-tunisiens (Vila et al., 1993-2000)

II.5. La tectonique de la région d’étude

L’histoire tectonique de cette partie de l’atlas saharien correspond à une série d’événement dont chacun a laissé sa trace sur la physionomie actuelle de région (fig.10).

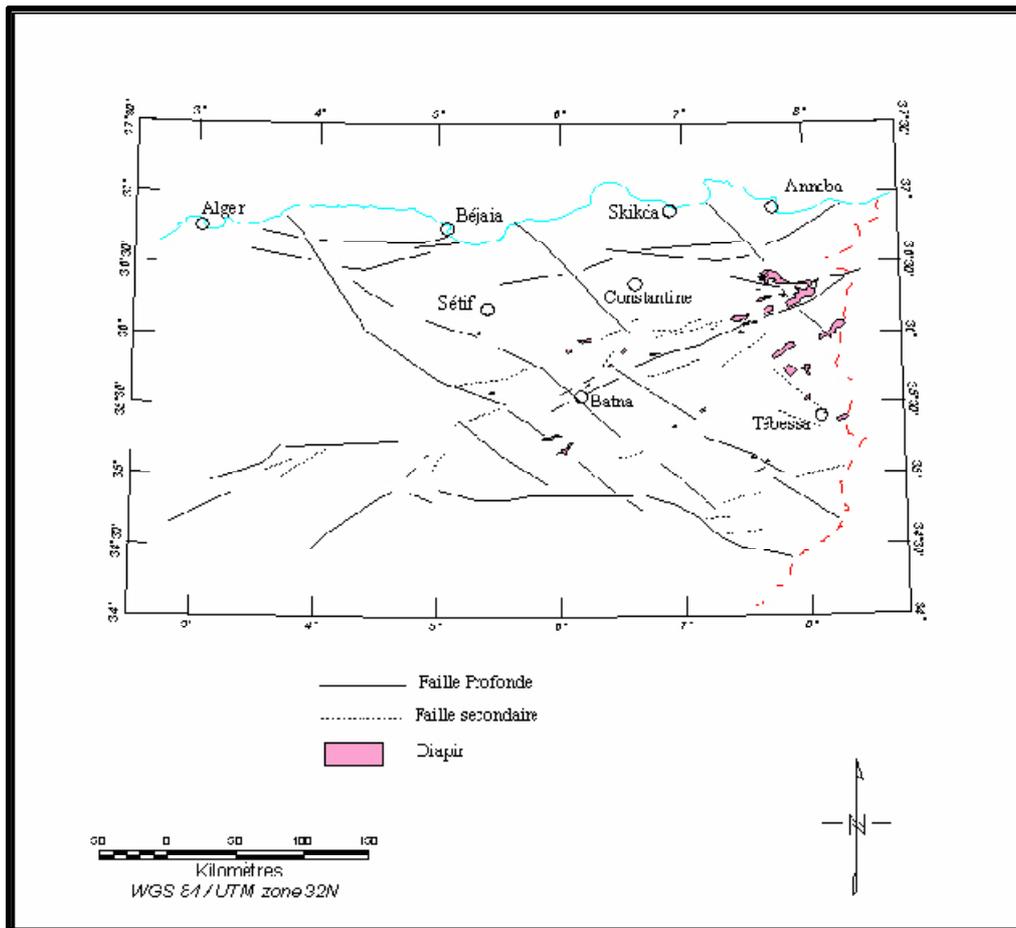


Figure 10: Carte structurale et tectonique de la région d'étude

1. La Phase des plissements

A/ Les plis

Les niveaux compétents calcaires de l'Aptien, du Turonien et de l'Eocène, permettent de distinguer rapidement les structures suivantes du Nord-ouest au Sud-est :

- Synclinal du Djebel Mesloula
- Synclinal d'Essechioum
- Anticlinal de Djebel Guelb
- Synclinal Bled El Gontas
- Anticlinal de Boukhadra.

Ces plis ont une orientation moyenne NE-SW qui peut varier de NNE-SSW à ENE-WSW, par suite probablement, de l'influence des directions structurales préexistantes, ils sont de type concentrique et de nombreux joints de cisaillements à fentes de tension les accompagnent.

Le plissement de la région est postérieur au Lutétien inférieur et antérieur au Miocène et se trouve sans doute responsable de l'émergence de la région à l'Eocène moyen (G. Dubourdiou 1951, 1956 et 1959).

B/ Les failles

L'ancienne fracturation n'a pas un impact sérieux du point de vue orographie, mais elle a joué une grande influence sur l'érosion depuis l'éocène.

Ce sont ces mêmes failles accompagnant les plissements qui ont aussi facilité la dégradation des charnières anticlinales.

Au contraire la tectonique post-Miocène avait un effet grandiose sur l'orographie, les structures atlasiques orthogonales aux grandes familles à rejets importants, d'orientation NW-SE peuvent être considérés comme le résultat de la dite phase.

2. Les fossés tectoniques

Le fossé tectonique de Morsott, d'orientation générale NNW-SSE s'étend sur presque toute la région d'étude, il s'articule avec celui de Tébessa dont l'orientation est WNW-ESE (G. Dubourdiou et G. Durozy 1950).

Les sédiments Plio-Villafranchiens comblent les parties basses du fossé tectonique et ne s'observent jamais sur les reliefs environnants. Le fossé a commencé donc à s'individualiser avant le dépôt du Plio-Villafranchien.

L'individualisation du fossé, postérieur à l'élaboration de la surface d'érosion post-Miocène, a donc commencé avant le Plio-Villafranchien, mais le jeu de failles bordières a dû continuer jusqu'à une époque récente.

3. Le comportement tectonique du Trias

Les terrains salifères attribués au Trias ont dû jouer le rôle de dissociation entre la couverture plissée et un socle inconnu à l'affleurement.

Pendant les plissements le Trias a « bourré » dans certains anticlinaux qui constituent ainsi des « plis diapirs », la tectonique diapirique se manifeste au contact Trias-roches encaissantes par un redressement à la verticale des calcaires Aptiens (Djebel Boukhadra, Djebel Mesloul).

Ainsi le Trias affleure sous forme de diapirs à la faveur des contacts anormaux, les montées diapiriques se sont poursuivies durant la constitution du fossé tectonique de Morsott.

II.6. Minéralisations

Dans cette région frontalière des confins algéro-tunisiens, les minéralisations à Pb-Zn, F, Ba et Fe sont contrôlées par des dispositifs diapiriques, près des croisements diapirs-fossés.

Du côté algérien, [Aoudjehane 1991](#), reconnaît quatre types morphologiques (**fig.11**) comme en Tunisie où ils ont déjà été décrits ([Rouvier et al. 1985](#)). Il s'agit de :

- (1)- filons distaux par rapport aux extrusions évaporitiques.
- (2)- amas d'imprégnation et remplissage de cavités au contact diapir/couverture.
- (3)- amas d'imprégnation et remplissage de fissures dans les marno-calcaires et dans les zones dolomitisées du Crétacé près des extrusions du Trias.
- (4)- amas d'imprégnation et remplissage de vides et fractures dans les calcaires néritiques, plus ou moins silicifiés et dolomitisés de l'Aptien supérieur, de l'Albien inférieur, sous l'inconformité Vraconienne. Cependant, l'analyse géométrique de ces minéralisations montre en fait 02 types morphologiques distincts:

- (1)- sous forme filonienne (veines et fractures), distantes ou juste à proximité des extrusions triasiques;
- (2)- sous forme d'amas d'imprégnation et de remplissage de cavités au contact diapir/couverture.

L'étude minéralogique des 05 indices sélectionnés (Hameimat et Mesloula), montrent une paragenèse minérale complexe à dolomite, calcite, quartz, dickite, célestine, barytine, fluorine, pyrite, marcasite, chalcoppyrite, sphalérite, galène, hématite et cuivre gris. Les textures observées au niveau de tous ces secteurs sont de type, rubanée, bréchique et géodique.



LEGENDE	
Quaternaire	Faille
Mio-Pliocène	Axe anticlinal
Miocène et Oligo-Miocène	Axe synclinal
Crétacé et Eocène	Graben
Trias	Amas d'imprégnations et remplissage de cavités au contact Diapir/l'ouverture
Filon minéralisé	Amas d'imprégnations et remplissage de vides dans les calcaires Aptiens, Albiens
Amas d'imprégnations et remplissage des fissures dans les marno-calcaires du crétacé sup.	

1.HameimatNord ;2.HameimatSud ;3.KteElAlia ;4.M'Zouzia ;5.Boudjaber;6.Boukhadra ;7.M'Zeita ;8.Mesloula ;9.kefRakhma ;10.Boudjabeur ;11.M'khiriga ;12.EsSouabaa ;13.KteKhakouh ;14.Ouenza ;15Ressas ;16.harraba ;17.Dj Ledjebel ;18.Chegguet ;19.Medjene ;20.Remed ;21.Ouasta.

Figure 11: Inventaire des indices minéralisés des confins algéro-tunisiens Selon classification d'Aoudjhane (1991)

Les minéralisations de la région de Hameimat sont encaissées dans deux massifs distincts, distants l'un de l'autre de près de 2Km (Hameimat Nord et Hameimat Sud). Les anciens géologues désignaient ces petits massifs sous l'appellation de Hameimat, El Gueblia et Ed Dahra. Ces massifs présentent la même géologie, ils en diffèrent par leurs minéralisations et par leur contenu minéralogique. Hameimat Nord est à Fluorine Barytine et accessoirement galène, alors que Hameimat Sud est à Galène, Barytine où la Fluorine y est absente.

II.6.1. Minéralisations de Hameimat Nord

Hameimat Nord est un chaînon de 1700 m de long sur 600 m de large, orienté NW-SE. Il est situé à 17 Km au NNW de la ville de Tébessa et à 13Km au Sud du village de Morsott. Les terrains sédimentaires qui affleurent dans ce massif sont d'âges crétacés et triasiques. Ils sont constitués essentiellement de calcaires récifaux et de marnes en frite qui sont en contact avec les marnes bariolées du Trias au flanc Sud du massif (**fig.12**).

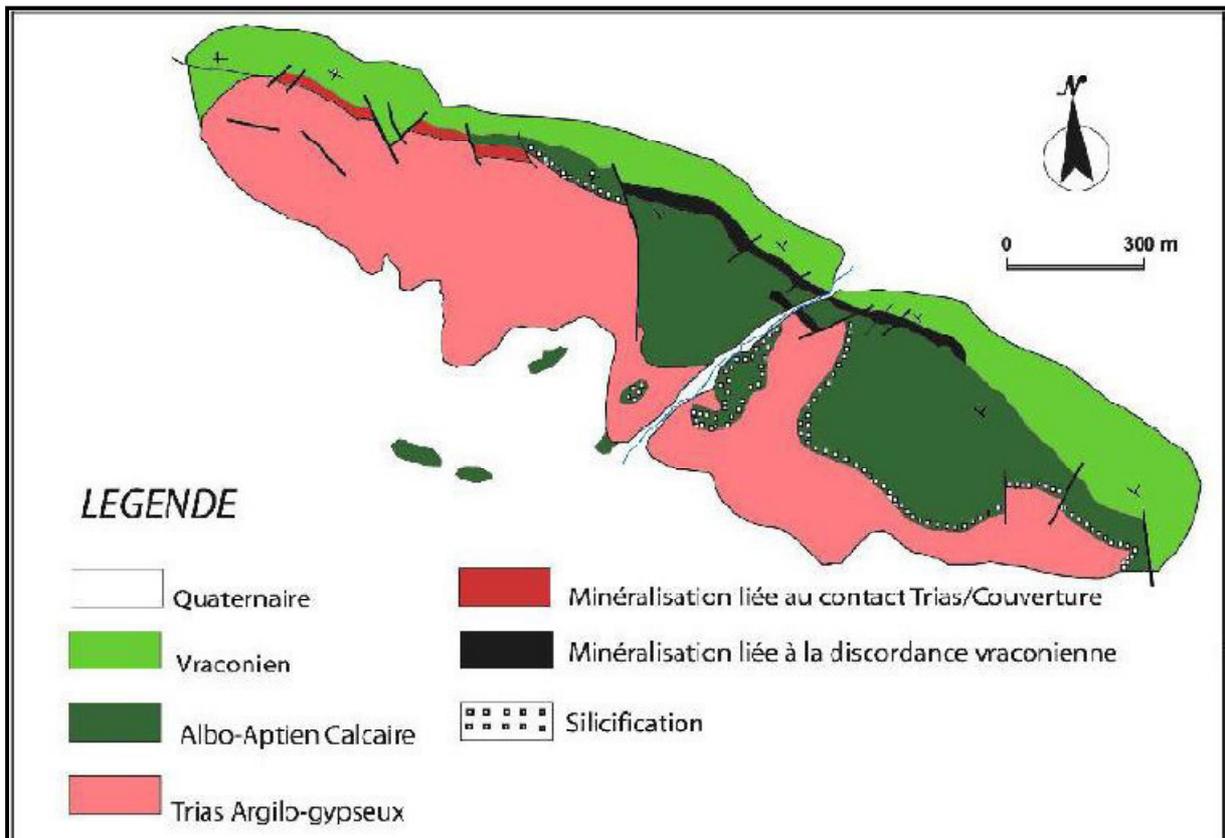


Figure 12: Carte géologique de Hameimat Nord (ORGM, 1998 et travaux de terrain)

Le Trias affleure au flanc Sud du massif où il repose sur le Vraconien et l'Albo-Aptien. Il est constitué par un ensemble chaotique composé de brèches à éléments de dolomies litées très silicifiées, de cargneules et parfois de petits fragments de roches éruptive qui sont probablement ramenés à la surface lors de l'ascension du diapir. Le contact Trias-Vraconien est bien visible à l'extrémité NW du massif où il est marqué par des brèches minéralisées essentiellement en barytine, fluorine et galène.

Du point de vue structural, Hameimat Nord se divise en deux parties:

a- une partie orientale : à pendage normal qui s'étend de l'extrémité SE de la structure jusqu'à environ 350 m au NW de l'Oued au contact d'une faille orientée N160°. Les dolomies béchiques du Trias apparaissent sur le flanc sud du massif en contact avec les formations Albo-aptiennes. Le principal corps minéralisé à Fluorite, Barytine et Galène affleure dans le contact entre l'Albo-aptien et le Vraconien.

b- une partie occidentale: à pendage renversé, qui s'étend depuis la faille décrochant N160° jusqu'à l'extrémité Ouest du massif. Les bancs de calcaire Albo-aptien ainsi que les dolomies triasiques vont chevaucher le contact Albo-Aptien-Vraconien masquant ainsi le corps minéralisé. En allant vers le NW, les calcaires Albo-Aptiens disparaissent, le contact entre le Vraconien et le Trias occupe tout le flanc Ouest. Le Vraconien réapparaît au bas de ce flanc sous forme de conglomérat avec des niveaux argileux. Au flanc Ouest du massif, on distingue une faille de direction N140° sub-vertical à remplissage de calcite pino-coïdale, de strontianite et de quartz, le contact Trias–Vraconien est affecté par plusieurs failles normales ou inverses.

Ces failles sont postminérales, elles morcellent le corps minéralisé en plusieurs blocs. La minéralisation affleure sur quelques centaines de mètres de long, selon une direction NW-SE. Elle comprend essentiellement de la fluorine, de la barytine et de la galène.

L'observation détaillée, montre qu'il existe deux types de minéralisation:

- Une minéralisation de type 1 (**fig.12**) à aspect béchique riche en barytine, fluorite et accessoirement en galène. Elle affleure dans la partie occidentale du massif. Elle est liée au contact Trias-couverture.
- Une minéralisation de type 2 (**fig.12**), filonienne qui affleure dans la partie orientale du massif, dans le contact anormal entre l'Albo-Aptien et le Vraconien. Cette zone minéralisée est orientée NW-SE et elle s'étend sur quelques centaines de mètres de longueur et quelques mètres de large.

II.6.2. Minéralisations de Hameimat Sud

Le massif de Hameimat Sud présente une forme en croissant avec une direction dominante E-W. Son ossature est constituée essentiellement de terrain Albo-Aptien constitué par des calcaires récifaux et de marnes en frites recoupés par les formations diapirique du Trias (**fig.13**).

Du point de vue structural, Hameimat Sud est affecté par deux familles de failles, l'une de direction dominante NW-SE au centre et à l'extrémité Ouest et l'autre NE-SW à l'extrémité Est. Elles sont bien visibles au contact diapirique Trias-Albo-Aptien où elles décalent les bancs de calcaire. La barre calcaire est marquée par des fentes de tension à remplissage de calcite, indiquant un régime tectonique compressif. Un accident de direction N140° à jeu décrochant dextre divise ce massif en deux parties: une partie orientale de structure monoclinale et une partie occidentale légèrement en voûte.

A-Dans la partie orientale : les bancs de calcaire et grès Albo-Aptiens de pendage 40 à 50° SSE reposent sur les dolomies triasiques. Dans cette partie, le massif est limité à son extrémité Est par des failles de direction N140° à N160° qui remontent des dolomies triasiques.

B-Dans la partie occidentale : au flanc Nord, les bancs de calcaire Albo-Aptien ont un pendage de 30°W et ils sont en contact diapirique avec le Trias, tandis qu'au flanc Sud, le pendage est plutôt vers le SW à S. Tout comme Hameimat Nord, ce massif est affecté par une importante silicification qui se traduit par l'abondance de quartz (**fig.13**).

L'étude minéralogique sommaire montre une paragenèse simple constituée par de la calcite, du quartz de la barytine ainsi que de la galène. La barytine est généralement associée à une brèche de faille. L'étude microscopique montre la présence de la dickite qui se présente en plages xénomorphes en mosaïque, ou en veinules qui recoupe la barytine. Cette dickite renferme fréquemment des petits cristaux de quartz. Les minéraux métalliques sont représentés essentiellement par de la galène qui constitue le minéral le plus abondant.

Cette galène a fait l'objet d'une exploitation jadis. On la trouve souvent sous forme de placage dans les calcaires aptiens. Cette galène renferme fréquemment des inclusions des petits grains de pyrite. Cette galène est toujours postérieure à la barytine. Il est à noter qu'au niveau de Hameimat Sud la fluorite n'a pas été observée.

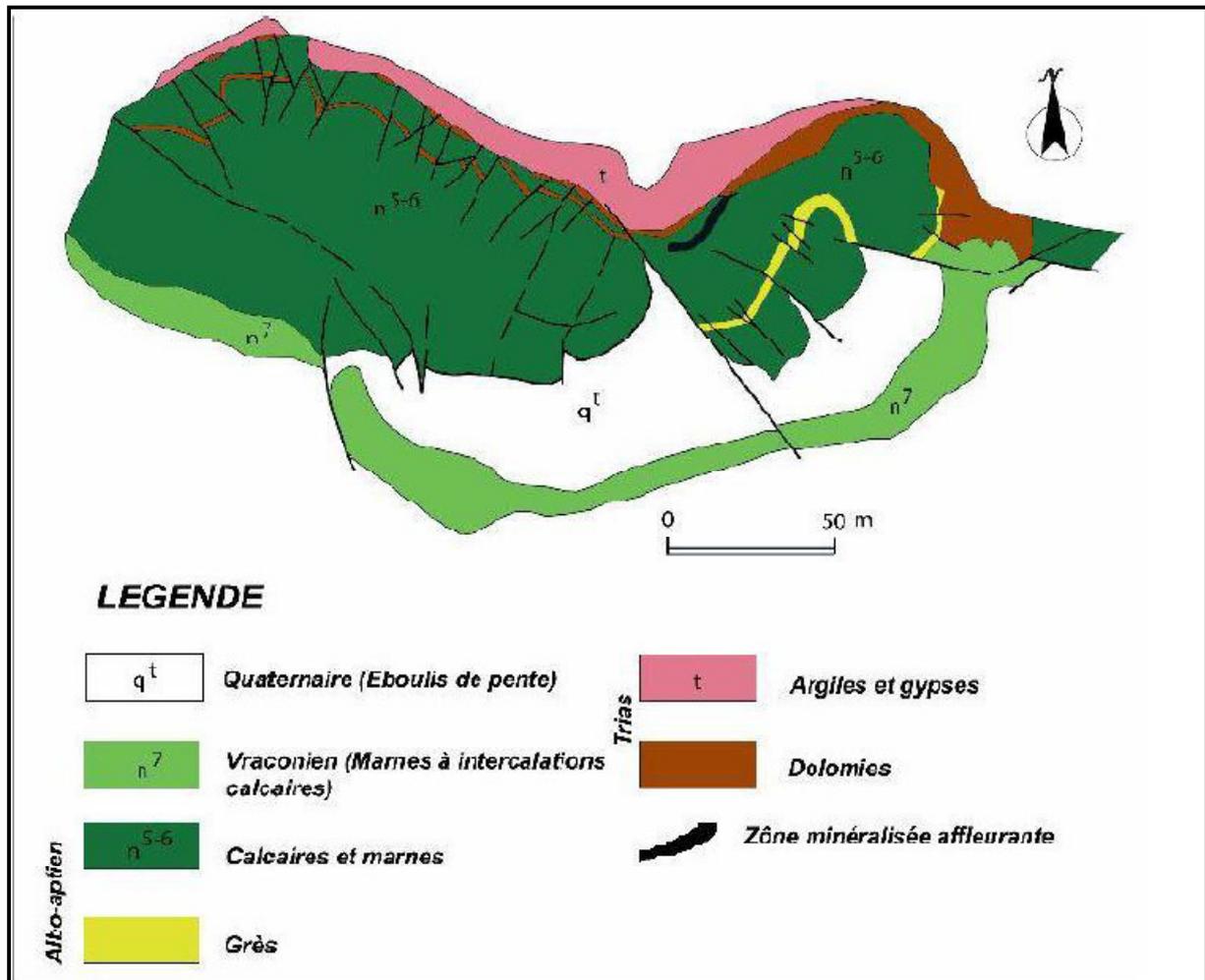


Figure 13: Carte géologique de Hameimat Sud (ORGM, 1998 et travaux de terrain)

II.6.3. Minéralisations de Mesloulou

Le Djebel Mesloulou est situé au NW du fossé d'effondrement Morsott, à environ 8Km d'El Aouinet. Il s'agit d'un anticlinal allongé suivant la direction atlasique NE-SW, sur une longueur qui dépasse 15Km. Ce massif de Mesloulou a été délimité en 12 panneaux (**fig.14**).

Il est constitué par des séries sédimentaires du Crétacé, dont le cœur est occupé par le Trias diapirique. Du point de vue tectonique, le Djebel Mesloulou est bordé par deux accidents, celui de Barbo au NW et celui de Mesloulou au SE, qui s'étendent dans la même direction.

La structure actuelle de Djebel Mesloulou est le résultat de l'interaction dans le temps de la compression SE-NW, de la poussée triasique ainsi que de la tectonique cassante. [Dubourdieu 1959](#), suppose que cette tectonique est contrôlée par une certaine zone tectonique instable qui existait déjà, et était active par intermittence. La direction de cette zone représente la direction de l'axe de déformation NE-SW.

Les difficultés d'interprétation du complexe structural dérive de la structure compliquée de l'anticlinal, ainsi les plissements qui datent de l'Eo-Miocène marin (Dubourdiu et al.1950, Dubourdiu 1956, 1959,Blès et al.1969, Vila 1980, Kazi-Tani 1986) auraient affecté l'anticlinal naissant par une tectonique cassante longitudinale et auraient à l'aide du diapirisme fait basculer dans un mouvement dextre la partie centrale de la structure, qui s'est individualisée pour donner le Selakh.

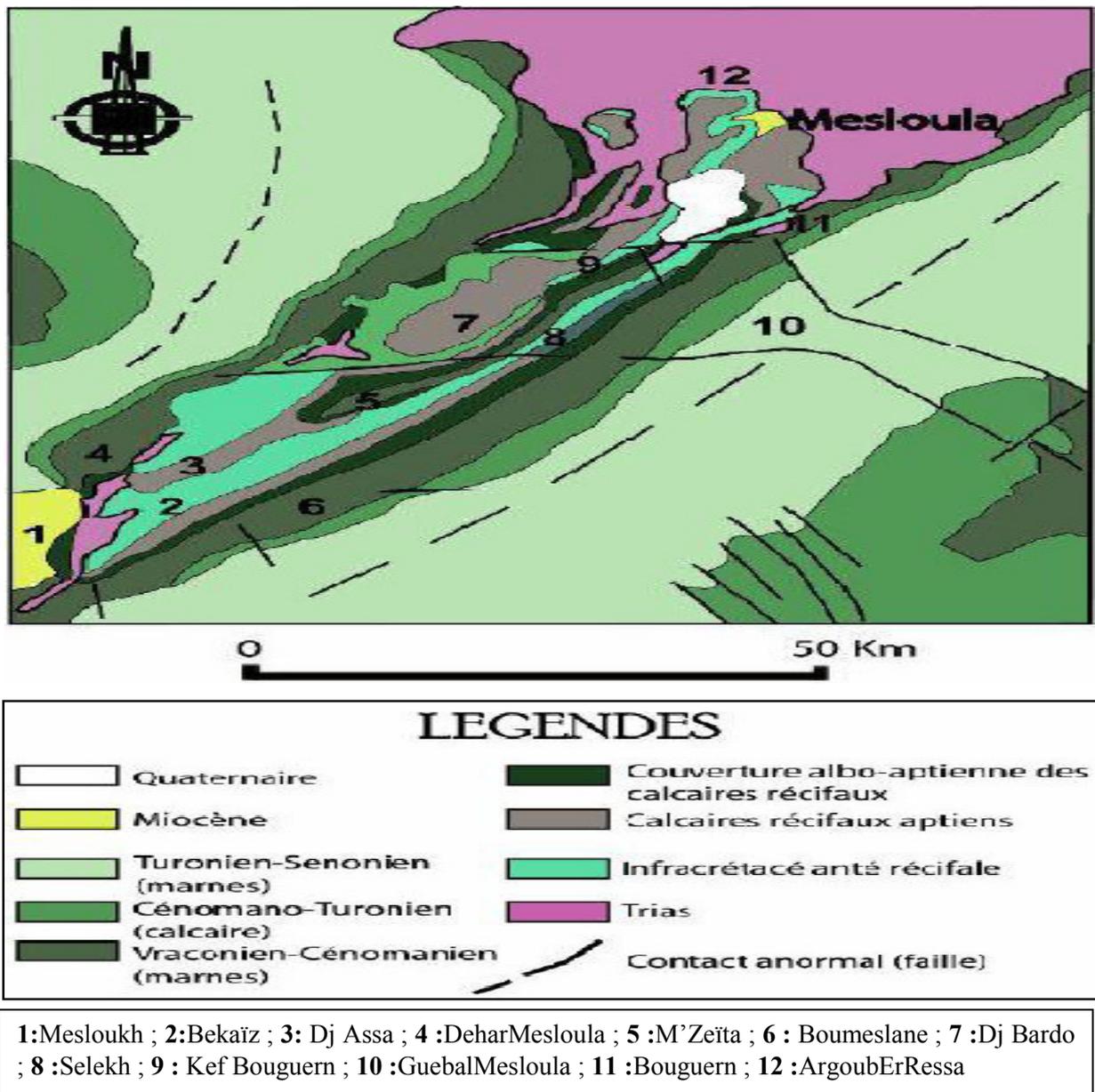


Figure 14: Carte géologique du Djebel Mesloulou (Dubourdiu, 1959 modifiée)

Le resserrement de la structure accentue cette rotation et pousse la masse plastique triasique dans la charnière anticlinale. La poussée du Trias provoque alors la cassure de la couche

récifale en deux blocs distincts, actuellement représentée par M'Zeïta et son prolongement NE et le Djebel Bardo-Bouguern.

- Le panneau Selekh : en position monoclinale, sub-verticale au SW, se redresse progressivement vers le NE sous l'effet de la poussée triasique, s'affaisse puis disparaît sous les épanchements triasiques.
- Le panneau Assa-M'Zeïta et son prolongement NE, coupé du Selekh par l'accident SE de Mesloula, il ne présente plus une structure monoclinale. Il est cisailé par des accidents longitudinaux secondaires en compartiments qui évoluent au gré des poussées triasiques.
- Le panneau Bardo-Bouguern : représente le membre le plus occidental de la barrière Aptienne, dans cette partie centrale de la structure de Mesloula. Ce panneau occupait donc au début du Miocène une position plus basse et ce n'est que plus tard qu'il occupe le sommet de l'édifice.

Les minéralisations du Djebel Mesloula comprennent le gîte principal (Pb-Zn et Cu), les indices de Argoub Er Rerras (Pb), le petit mamelon (Pb-Zn et Cu), Ben Aouied (Pb-Zn), Kef Bouguern (Ba et Cu), Bardo (Pb-Zn), Selekh (Pb-Zn), Assa et M'Zeïta (Pb-Zn et Cu).

Toutes ces minéralisations à galène, sphalérite, barytine et cuivre gris sont portées par les calcaires Aptiens dolomités et fortement silicifiés. Elles se présentent en amas ou sous forme de petites disséminations dans le calcaire ou encore en remplissage de fractures et de cavités.

Le complexe barytique : se trouve dans la terminaison NE de l'anticlinal Mesloula. Il apparaît sous la forme d'un arc convexe vers l'Ouest. Il présente de faibles dimensions et il est affecté par des accidents transversaux à très faibles rejets et un réseau de diaclases, les unes transversales et les autres longitudinales. Ce complexe est encaissé par les formations Aptiennes qui sont très morcelées et flottent sur le Trias diapirique. Vers le Sud, il se termine par un biseutage à la faveur d'un accident transversal WSW-ENE qui disparaît brutalement vers le Nord.

La minéralisation barytique de ce complexe a fait l'objet de plusieurs travaux de prospection par l'EREM, ORGM et ce depuis les années 1980. Vers les années 2000 ce complexe barytique a fait l'objet d'une concession et le permis a été cédé à l'ENOF (SOMIBAR) qui a entamé des travaux d'évaluation et de mise en valeur qui ont donné des résultats

apparemment insuffisants puisque ce chantier a été abandonné à ce jour. La minéralisation de ce complexe est essentiellement barytique. Elle se localise dans les fractures et au sein des brèches (tectoniques ou intra-formationnelles qui pourraient être hydrauliques).

Elle est constituée essentiellement de la barytine avec un peu de galène et du cuivre gris. La morphologie de la minéralisation se présente sous plusieurs aspects : sous forme de poches irrégulières, sous forme de veinules et en disséminations dans les calcaires dolomités et silicifiés. Macroscopiquement, la silification apparaît sous forme de grains de quartz fumés automorphes de taille pouvant aller de quelques millimètres jusqu'à 1 centimètres.

Conclusion partielle sur la géologie

Lors de cette étude géologique, quelques remarques, se rapportant à ce contexte, ont pu comme même être retenues :

- La région d'étude présente l'allure d'une dépression épousant la forme d'une cuvette.
- Ce bassin d'effondrement est constitué par des terrains créacés formant une série d'anticlinaux et synclinaux souvent déversés.
- Une alternance de formations carbonatées de calcaire, de marno-calcaire et des marnes argileuses sera présentée dans la série stratigraphique.
- La partie centrale de la région est constituée d'un fossé tectonique enserré par des montagnes escarpées à l'est et à l'ouest ; occupée par des formations Plio-quaternaire et Quaternaires qu'est constituée par des alluvions actuelles et récentes, des poudingues des grés et de graviers.
- L'étude géologique des massifs de Hameimat Nord et Sud montre que ces deux petits massifs sont constitués essentiellement des terrains d'âge Albo-Aptiens. Ils sont constitués de calcaires récifaux fortement dolomités et silicifiés et de marnes. Ces formations du Crétacé sont en contact avec les formations kaotiques du Trias diapirique qui caractérise le paysage des monts de Mellègue. Le contact anormal entre les formations Albo-aptiennes et celles du Vraconien (dénommée par les anciens auteurs par discordance Vraconienne), contrôle la minéralisation à F, Ba et Pb, qui apparaît sous divers aspects :

- au contact diapir-couverture et au niveau du contact albien Vraconien à Hameimat Nord.

- sous forme de remplissage de veinules, poches à Hameimat Sud. Cette minéralisation révèle une paragenèse simple. Elle est composée essentiellement de fluorine, barytine, galène et accessoirement de pyrite. Elle montre une certaine zonalité. Au Nord, la fluorine est très abondante alors qu'au Sud c'est essentiellement de la Galène.

-Le Djebel Mesloulou constitue l'un des meilleurs exemples des pièges des concentrations minérales situées dans les formations calcaires d'âge Aptien. Ces formations sont des calcaires récifaux qui ont subi une silicification hydrothermale intense et une dolomitisation.

Du point de vue structural, le Djebel Mesloulou constitue l'une des structures atlasiques à cœur triasique. C'est un anticlinal à structure très compliquée. Il est marqué par des accidents majeurs de direction NE-SW à jeux variés.

Chapitre: III

*Aperçu hydro-climatologique, géophysique et
hydrogéologique*

I. Aperçu hydro-climatologique

I.1. Introduction

L'étude des caractéristiques hydro-climatologiques joue un rôle primordial dans la connaissance des comportements des cours d'eau, les variations des réserves, la compréhension des mécanismes d'alimentation et de la circulation des eaux naturelles. Elle permet également d'identifier les termes du bilan hydrique notamment les précipitations, les températures, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

C'est à cet effet que nous tenterons dans ce chapitre de déterminer ces paramètres hydro climatologiques et surtout ceux intervenant directement ou indirectement dans l'évaluation du bilan hydrique, Où nous s'attacherons plus particulièrement à la détermination des apports d'eau dans la zone d'étude en mettant l'accent sur les quantités des eaux reçues par précipitation et les quantités des eaux perdues par évaporation.

Notre étude est basée sur des données recueillies au niveau des deux stations météorologiques, la station de Tébessa (données de température) et la station d'El Aouinet (données de précipitation). Notant que la station de Morsott n'est pas en service.

Le tableau suivant présente les coordonnées Lambert des deux stations :

Tableau 05. Les coordonnées Lambert des stations de mesures [ANRH-TEBESSA]

Station	X(Km)	Y(Km)	Z(Km)	Période d'observation
Tébessa	991.9	247.2	890	1980-2014
El-Aouinet	968.2	297.55	660	1967-2012

I.2. Étude des paramètres climatiques

I.2.1. Température

Le paramètre de la température est indispensable à la climatologie, vu qu'il rend compte de son apport d'énergie à la végétation, de son pouvoir évaporateur qu'il exerce sur les surfaces mouillées, Elle joue un rôle très important pour la détermination du bilan hydrique, et enfin, qu'il est à l'origine du bon fonctionnement du cycle de l'eau.

Les valeurs des températures sont obtenues à partir de la station de Tébessa tout en supposant que les conditions climatiques sont comparables entre Tébessa et El Aouinet.

I.2.1.1. Variation des températures moyennes mensuelles

L'histogramme de variation des températures moyennes mensuelles (**fig.15**), sur une période de 33 ans (80/81-2013/2014), montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (juin-septembre) avec des températures allant de **22.73°C** à **28.04°C**, avec un maximum pendant le mois de juillet (**28.04°C**). Les valeurs les plus basses qui varient de **6.74°C** à **11°C**, sont observées durant la période hivernale (décembre-mars), avec un minimum pendant le mois de janvier (**6.74°C**).

Tableau 06. Températures moyennes mensuelles de la région de Tébessa (80/81 à 2013/2014)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Moy
T (°C)	22.73	18.13	12.19	8.15	6.74	7.88	11	14.43	19.53	24.61	28.04	27.95	16.78

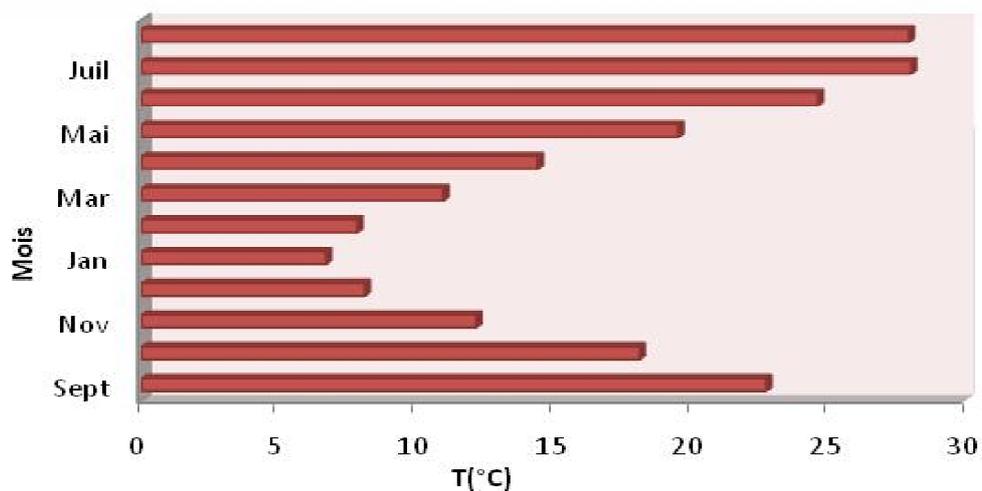


Figure 15: Répartition mensuelle des températures de Tébessa (80/81 à 2013/2014)

I.2.1.2. Variation des températures moyennes annuelles

L'analyse de la courbe de variation des températures moyennes annuelles (**fig.16**), sur une période de 33 ans (80/81- 2013/2014), montre que l'année la plus chaude est l'année 2001 avec une moyenne de **19.1°C**, et l'année la plus froide est l'année 1992 avec une moyenne de **14.5°C**, la valeur moyenne de la série est de **16,10 °C**. Presque les mêmes valeurs trouvées dans une série de 13 ans (2000/2001-2013/2014) (**fig.17**), 2001 reste toujours l'année la plus chaude ; et 2009 est l'année la plus froide avec une valeur de **14.51°C**.

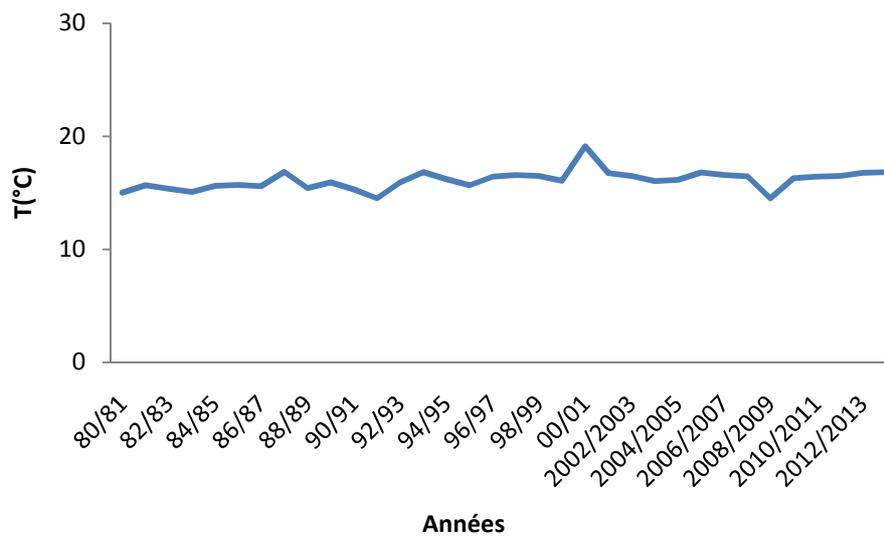


Figure 16: Températures interannuelles de la région de Tébessa (80/81-2013/2014)

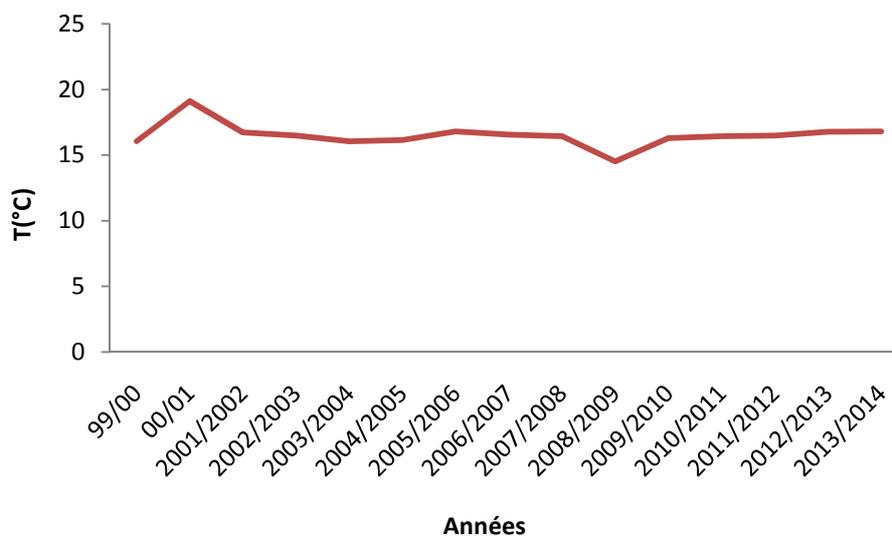


Figure 17: Températures interannuelles de la région de Tébessa (99/00-2013/2014)

I.2.2. Précipitation

Les précipitations sont les quantités d'eau météoriques, totales, liquides ou solides qui tombent sur une surface horizontale déterminée, appelée "section pluviométrique". La pluie est un facteur climatique très important conditionnant l'écoulement saisonnier et par conséquent le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes.

La pluie augmente avec l'altitude, elle est également plus importante sur les versants exposés aux vents. Elle diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des versants et de la mer.

I.2.2.1. Variation des précipitations moyennes mensuelle

Les données recueillies à la station d’El Aouinet, sont récapitulées dans le tableau ci-dessous

Tableau 07. Précipitations moyennes mensuelles en (mm) sur une période de 44 ans (67/68-2011/2012)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
P(mm)	30.66	25.98	27.08	16.98	27.56	26.69	29.17	34.8	40.04	24.4	8.46	15.74

Ce tableau montre la variation des précipitations d’un mois à l’autre des moyennes mensuelles des hauteurs pluviométriques enregistrées dans la station d’El Aouinet (**fig.18**); avec un maximum de l’ordre de **40.04 mm** qui s’observe au mois de mai, et un minimum au mois de juillet de l’ordre de **8.46 mm**.

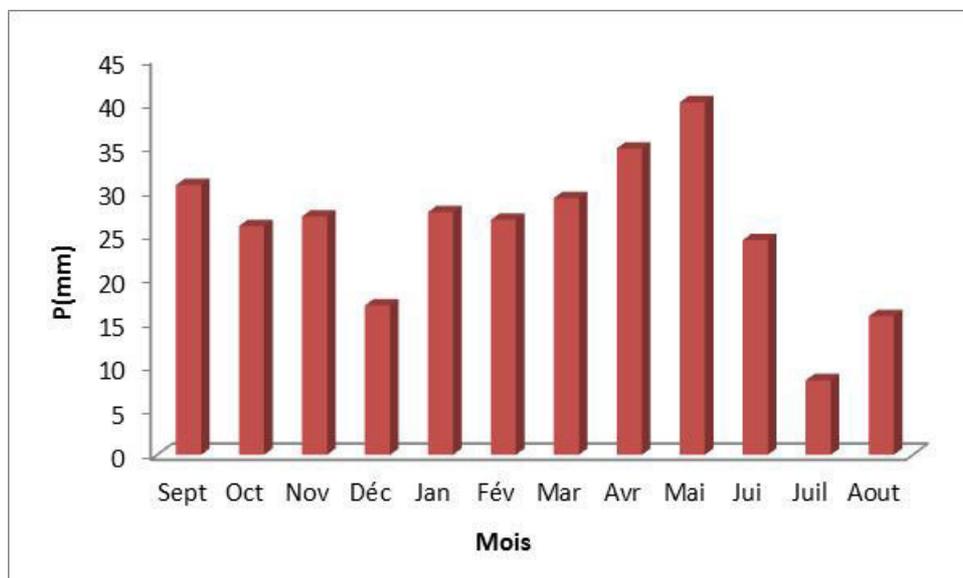


Figure 18: Précipitations moyennes mensuelles en (mm) sur une période de 44 ans (67/68-2011/2012)

I.2.2.2. Variation des précipitations moyennes annuelles

I.2.2.2.1. Distribution inter annuelle des précipitations (92/93-2011/2012)

L’étude des variations des précipitations en fonction du temps de la station d’El Aouinet montre un grand contraste entre l’année la plus arrosée (2008/2009) avec **524,5 mm/an** et l’année la plus sèche (1999/2000) avec **77.8 mm/an**.

La moyenne de précipitation dans la station d’El Aouinet et leur maximum et minimum sont représentées dans le **tableau n°08**.

Tableau 08. Distribution inter annuelle des précipitations (92/93-2011/2012)

Stations	Période d'observation	Min	Année d'observation	Max	Année d'observation	Moyenne (mm)
El-Aouinet	1992/2012	77.8	2007/2008	524.5	2008/2009	224.63

Variabilité des précipitations inter annuelles

❖ Coefficient pluviométrique (H)

Ce coefficient permet de déterminer pour une station donnée si l'année est excédentaire ou déficitaire, il est défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année à la pluviométrie moyenne \bar{P} pour une période de n années:

$$\text{Avec : } H = \frac{P}{\bar{P}}$$

H : Coefficient pluviométrique.

P : Hauteur annuelle des pluies en mm.

\bar{P} : Pluviométrie moyenne en mm.

L'année est d'autant plus excédentaire que H est supérieur à l'unité ($H > 1$) et si ($H < 1$) l'année est dite déficitaire. Dans notre cas : $\bar{P} = 224.63$

Le **tableau n°09**, montre les variations de H au cours des années d'observation.

Tableau 09. Coefficient pluviométrique

Station de Hammamet			
Année hydrogéologique	Hauteur annuelle des pluies P (mm)	Coefficient pluviométrique H	
1992/1993	130.1	0.58	D
	183.3	0.82	D
1993/1994			
1994/1995	302.4	1.35	E
1995/1996	111.4	0.49	D
1996/1997	190.4	0.85	D
1997/1998	193.5	0.86	D
1998/1999	307.7	1.37	E
1999/2000	77.8	0.35	D
2000/2001	121.3	0.54	D
2001/2002	78.6	0.35	D
2002/2003	94.9	0.42	D
2003/2004	343.9	1.53	E
2004/2005	278.0	1.24	E
2005/2006	274.5	1.22	E
2006/2007	312,7	1.39	E
2007/2008	171,6	0.76	D
2008/2009	524,5	2.33	E
2009/2010	276,7	1.23	E
2010/2011	316.6	1.41	E
2011/2012	202.7	0.90	D

Où : Ex =>année excédentaire

Def =>année déficitaire.

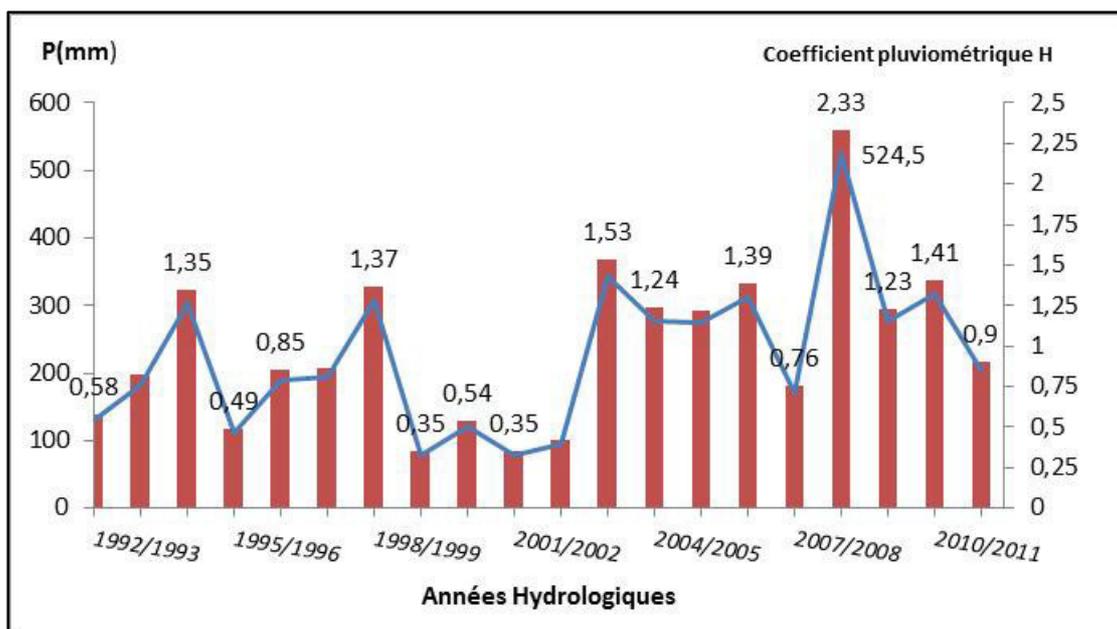


Figure 19: Variation du coefficient pluviométrique avec les précipitations annuelles (90/91-2011/2012)

D’après le tableau n°09 et la figure n°19, on remarque que l’année 1999/2000 est la plus sèche; alors que l’année la plus arrosée c’est l’année 2008/2009.

1.2.2.2.Répartition saisonnière des précipitations

La subdivision des pluies de l’année pour chaque saison est faite suivant les saisons agricoles (automne : S O N/ l’hiver : D J F/ printemps : M A M/ été : J J A).

Le but de ces détails c’est de visualiser les saisons pour lesquelles les sources reçoivent des entrées efficaces.

Tableau 10. Répartition saisonnière des précipitations dans la station d’El-Aouinet (67/68-2011/2012)

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Mois												
Station	Mm	%		Mm	%		Mm	%		Mm	%	
El-Aouinet	83.72	27.22		71.23	23.16		104.01	33.81		48.6		15.80

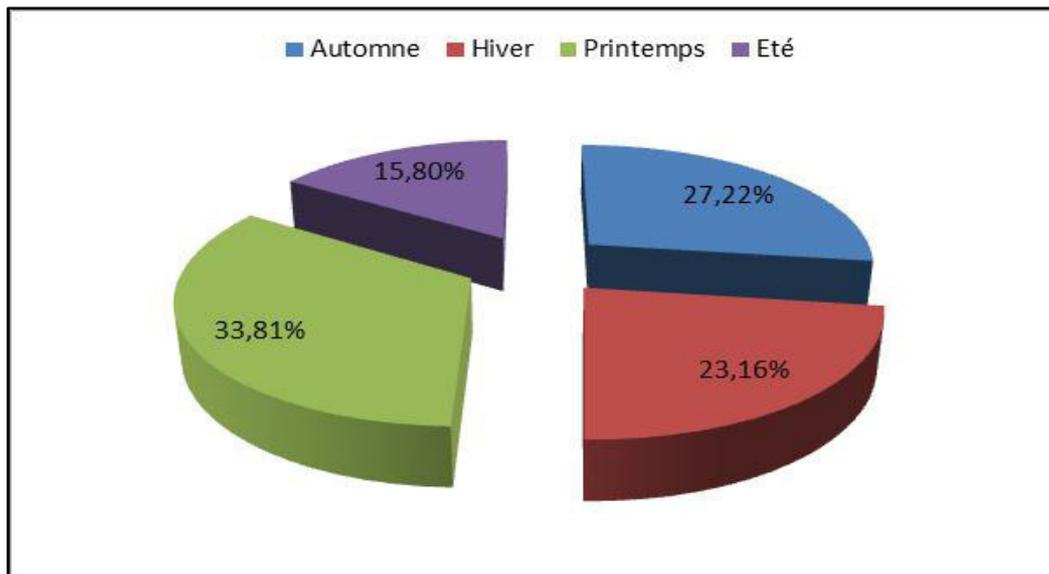


Figure 20: Répartition saisonnière des précipitations (67/68-2011/2012)

- ✚ Une forte précipitation saisonnière est enregistrée pendant le printemps avec une valeur de 104.01 mm qui représente 33.81%.
- ✚ Une faible précipitation saisonnière est enregistrée pendant l’été avec une valeur de 48.6 mm; ce qui représente 15.80%.

I.2.3. L'humidité

L'humidité représente la quantité d’eau retenue dans l’air, en considérant que les conditions climatiques sont semblables entre la région de Tébessa ville, El Aouinet et Morsott.

Il a été pris en considération une série de 14 ans (2000/2001 à 2013/2014).

D’après cette série, le mois de juillet étant le mois le plus sec avec un pourcentage de **49.2 %** et le mois le plus humide c’est le mois de décembre avec un pourcentage maximal égal à **74.5%**.

Tableau 11. Humidité moyenne mensuelle en %

mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Moy
H%	63.2	63.4	70.0	73.0	74.5	70.1	65.2	62.4	58.5	49.2	43.4	46.3	61.6

I.2.4. Le vent

Les vents sont caractérisés par leur vitesse et leur intensité. Les vents prédominant sont de direction Sud-est, Nord-ouest et jouent un rôle important dans les précipitations en Hiver. Les vents du Nord-ouest sont souvent secs et froids. En été les vents du Sud sont fréquents (le sirocco) qui peuvent être chaud et sec d'où l'augmentation de l'évaporation, et une sécheresse qui diminue l'humidité et augmente le déficit d'écoulement.

I.3. Diagramme pluviométrique « station d'El-Aouinet » sur une période de 44 ans (67/68-2011/2012)

D'après Gaussen et Bouchots, les diagrammes pluviométriques dessinent les précipitations et les températures mensuelles. Ainsi, à partir de deux échelles différentes (P en mm et T en (°C)), on peut visualiser facilement le nombre des mois secs.

Tableau 12. Données du diagramme ombrothermique sur une période de 44ans (67/68-2011/2012)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
T(°C)	22.73	18.13	12.19	8.15	6.74	7.88	11	14.43	19.53	24.61	28.04	27.95
P(mm)	30,66	25,98	27,08	16,98	27,56	26,69	29,17	34,8	40,04	24,4	8,46	15,74

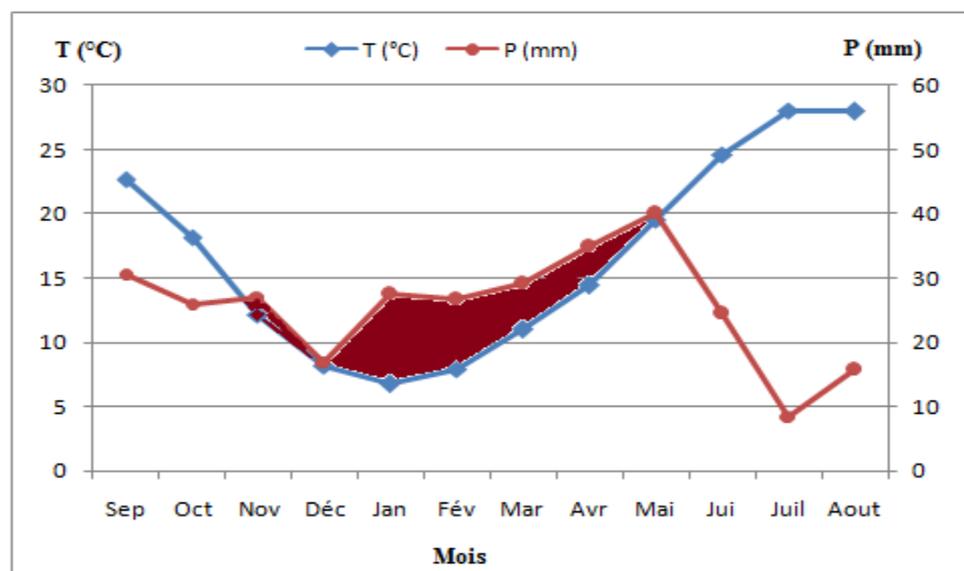


Figure 21: Diagramme pluviométrique «station d'El Aouinet» (67/68-2011/2012)

Le diagramme montre que la période humide commence du mois de novembre jusqu'au mois de mai. Tandis que la période sèche, débute du mois de juin jusqu'au mois d'octobre.

I.4. Détermination du type du climat

I.4.1. Indice d'aridité (Indice De Martonne)

Pour la détermination du type de climat, De Martonne (1925) a proposé une formule climatologique appelée indice d'aridité qui est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles :

$$A = P / (T + 10)$$

Avec :

A: indice d'aridité annuelle

P: précipitations moyennes interannuelles en mm.

T: températures moyennes interannuelles en °C.

Dans le cas de notre région : $P=307.56$ mm et $T = 16.78^{\circ}\text{C}$; donc : $A = 11.48$.

Selon De Martonne :

$A < 5$: le climat est hyper aride.

$5 < A < 10$: le climat est très sec.

$10 < A < 20$: le climat est sec.

$20 < A < 30$: le climat est tempéré.

$A > 30$: le climat est humide (écoulement abondant).

Les résultats de l'indice d'aridité trouvés pour la station de El Aouinet montrent que le climat de notre zone d'étude est sec caractérisé par deux saisons l'une humide et froide et l'autre sèche et chaude.

I.4.2. Continentalité pluviale moyenne

La continentalité pluviale moyenne permet de définir le type de climat continental, elle s'exprime par le rapport (R) de la somme des coefficients pluviométriques relatifs mensuels des mois les plus chauds et la somme des mois les plus froids, on a alors la classification suivante :

Si : $1 < R < 1.75$ *climat semi continentale*

R<1 *climat continentale*

CALCUL DES COEFFICIENTS PLUVIOMETRIQUES

$$C_p = 365P_i / Pn_i$$

Avec :

P : précipitations moyenne mensuelles en mm.

P_i : précipitation du mois de rang en mm.

n_i : nombre de jours du mois

C_p : exprime le caractère plus au moins pluviaux du mois considéré dans l'ensemble de l'année.

$$C_p = 365/n_i * P_i / P = KP_i / P$$

$$\Rightarrow C_p = KP_i / P$$

Où:

K : c'est le coefficient dépendant du nombre de jours du mois considéré.

$$\text{Si } n_i = 31 \text{ jours } K = 365/31 = 11.77$$

$$\text{SI } n_i = 30 \text{ jours } K = 365/30 = 12.16$$

Pour le mois de février 28 jours chaque 3 ans, et une fois 29 jours

$$K = 365 / (28 * 3 + 29)^{1/4} = 12.92$$

Pour la station de El Aouinet: P=307.56 mm.

Tableau 13. Coefficient pluviométrique de la région d'El-Aouinet

MOIS	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
K	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77
P _i	30.66	25.98	27.08	16.98	27.56	26.69	29.17	34.8	40.04	24.4	8.46	15.74
C _p	1.21	0.99	1.07	0.65	1.05	1.12	1.12	1.37	1.53	0.96	0.32	0.60

$$R = \frac{\sum C_p \text{ mois humides}}{\sum C_p \text{ mois sèches}}$$

$$R=7.59 / 4.62=1.64 \quad \Rightarrow R=1.64$$

D'après la classification ci-dessus on peut dire que le climat de cette région est de type semi continental.

I.5. Détermination des paramètres du bilan hydrique

I.5.1. Etude de l'évapotranspiration

Dans les études hydrogéologiques, les deux éléments principaux du bilan, évaporation et transpiration sont réunis en un seul : l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration ou l'évaporation totale (ET) est l'ensemble des phénomènes d'évaporation (processus physique) et de transpiration (phénomène biologique).

On distingue :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP)
- L'évapotranspiration réelle (ETR)

➤ L'évapotranspiration potentielle (ETP)

On appelle évapotranspiration potentielle (ETP), exprimé en hauteur de lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nous avons utilisé la formule de *Thornthwaite* qui a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

$$ETP_{(c)} = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a k$$

$$i = \left[\frac{T}{5} \right]^{1.514} \quad ; \quad I = \sum_1^{12} i \quad ; \quad a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

Avec: ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

T : Température moyenne mensuelle en °C.

i : Indice thermique mensuel.

I : Indice thermique annuel.

K : Coefficient d'ajustement.

➤ **L'évapotranspiration réelle (ETR)**

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

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR), nous avons utilisé la méthode de Thornthwaite où on distingue deux cas principaux :

Si : $P - ETP > 0$; c'est-à-dire $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

Si : $P - ETP < 0$; c'est-à-dire $P < ETP$; ce cas est subdivisé en deux cas :

➤ Si : $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

➤ Si : $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

I.5.2. Estimation des réserves facilement utilisées R.F.U

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol donnée par la formule de J.Richard1979.

$$R.F.U = I/3(Da. He. P)$$

Où: R.F.U : Réserve facilement utilisable.

Da : Densité apparente du sol.

He : L'humidité équivalente du sol (capacité de rétention).

P : Profondeur de la couche de la terre par couriez par les racines en (mm).

• *Application numérique :*

$$Da = 14 \quad He = 0.25 \quad P = 25 \text{ mm.}$$

$$D'où: \quad RFU = I/3 (14. 0.25) = 29.0 \text{ mm}$$

I.5.3. Elaboration du bilan hydrique

Dans le **tableau^o14**, on a récapitulé tous les paramètres de bilan hydrique.

Tableau 14. Bilan hydrique de la période (67/68-2011/2012)

MOIS	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Tot
T (°C)	22,73	18,13	12,19	8,15	6,74	7,88	11	14,43	19,53	24,61	28,04	27,95	Moy=16,78
i	9,9	7,03	3,85	2,09	1,57	1,99	3,3	4,98	7,87	11,17	13,6	13,54	
I	80,89												
A	1,79												
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	
P (mm)	30,66	25,98	27,08	16,98	27,56	26,69	29,17	34,8	40,04	24,4	8,46	15,74	307,56
ETP _{nc} (mm)	101,76	67,68	33,6	16,32	11,52	15,2	27,68	44,96	77,28	117,12	148,32	146,88	
ETPc	104,81	65,65	28,9	13,87	10,02	12,92	28,51	49,01	93,51	141,71	182,43	170,38	901,72
P-ETP	-74,15	-39,67	-1,82	3,11	17,54	13,77	0,66	-14,21	-53,47	-117,31	-173,97	-154,64	
ETR (mm)	30,66	25,98	27,08	13,87	10,02	12,92	28,51	49,01	54,83	24,4	8,46	15,74	301,48
RFU (29 mm)	0	0	0	3,11	20,65	29	29	14,79	0	0	0	0	
EXE	0	0	0	0	0	5,42	0,66	0	0	0	0	0	6,08
Da	74,15	39,67	1,82	0	0	0	0	0	38,68	117,31	173,97	154,64	600,24

Vérification du bilan :

$$\sum P = \sum ETR + \sum EXE \quad \Rightarrow \quad 307.56 = 301.48 + 6.08$$

$$\sum ETP = \sum ETR + \sum Da \quad \Rightarrow \quad 901.72 = 301.48 + 600.24$$

Nous constatons que les résultats issus du bilan hydrique sont vérifiés.

a-Estimation du ruissellement

On peut calculer le ruissellement à partir de la précipitation moyenne annuelle et l'évapotranspiration potentielle.

$$R^3 = P^3 / 3(ETP)^2 \quad \text{alors : } R^3 = (307.56)^3 / 3(901.72)^2$$

R= 2.04mm

b-Estimation de l'infiltration

-Selon la méthode de *Thornthwaite*

$$EXE=R+I \Rightarrow I=EXE-R$$

$$I=6.08-2.04=4.04$$

I= 4.04 mm

-Selon la méthode rationnelle:

$$P= ETR+R+I \Rightarrow I=P-(ETR+R)$$

$$I = 307.56-(301.48+2.04) = 4.04$$

I= 4.04 mm

c- Interprétation du Bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique a pour but, de connaître des différents paramètres (ETP, ETR, RFU, Da, Ex), qui nous aide à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrauliques de surface.

On observe que :

Les réserves facilement utilisables se constituent à partir du mois de Décembre et s'étalent jusqu' au mois d'Avril.

* La saturation de ces dernières est atteinte durant les mois de Février et Mars.

* L'excédent est enregistré au mois de Février et Mars.

* Le déficit agricole est enregistré durant la période qui s'étale entre le mois de Septembre et le mois de Novembre ; et à partir le mois de Mai jusqu' au mois d'Août.

Le ruissellement calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff est égale à **2.04 mm.**

L'infiltration est évaluée par la méthode rationnelle, elle est estimée avec une valeur égale à **4.04 mm.**

II. Aperçu géophysique

1. Introduction

Les principales investigations géophysiques menées sur cette région ont été exécutées par plusieurs sociétés à savoir la compagnie l'ORGM (Ex SONAREM, EREM), l'entreprise Nationale de Géophysique « E.NA.GEO » 1987 et la compagnie CGG en 1970.

Dans le domaine de la gravimétrie, les études les plus importants sont les travaux de la SONAREM (1971 à 1974), la SONATRACH et la plus récente est celle de [Zerdazi, A. \(1990\)](#).

2. Prospection électrique

Dans le cadre de l'étude hydrogéologique de la région d'El Aouinet (Wilaya de Tébessa), l'entreprise nationale de géophysique « E.NA.GEO » a effectué pour le compte de l'agence nationale des ressources hydrauliques «A.N.R.H», une campagne de prospection géophysique par sondages électriques, vingt neuf (29) profils orientés SW-NE ont été ainsi réalisés et comportent 191 sondage électrique en ligne AB = 1000 m, 34 sondage électrique en ligne AB = 2000 m et 04 sondage électrique multidirectionnelles en AB = 3000 m (**fig.22**).

L'objectif de l'étude est :

- de rechercher la géométrie et la fissuration des calcaires du Turonien, au dessous du remplissage Quaternaire;
- de déterminer l'épaisseur de ces calcaires;
- de mettre en évidence les zones tectonisées;
- de donner une idée globale sur la structure géologique de toute la région;
- d'indiquer les zones les plus favorables à l'implantation d'ouvrage de captage des eaux souterraines.

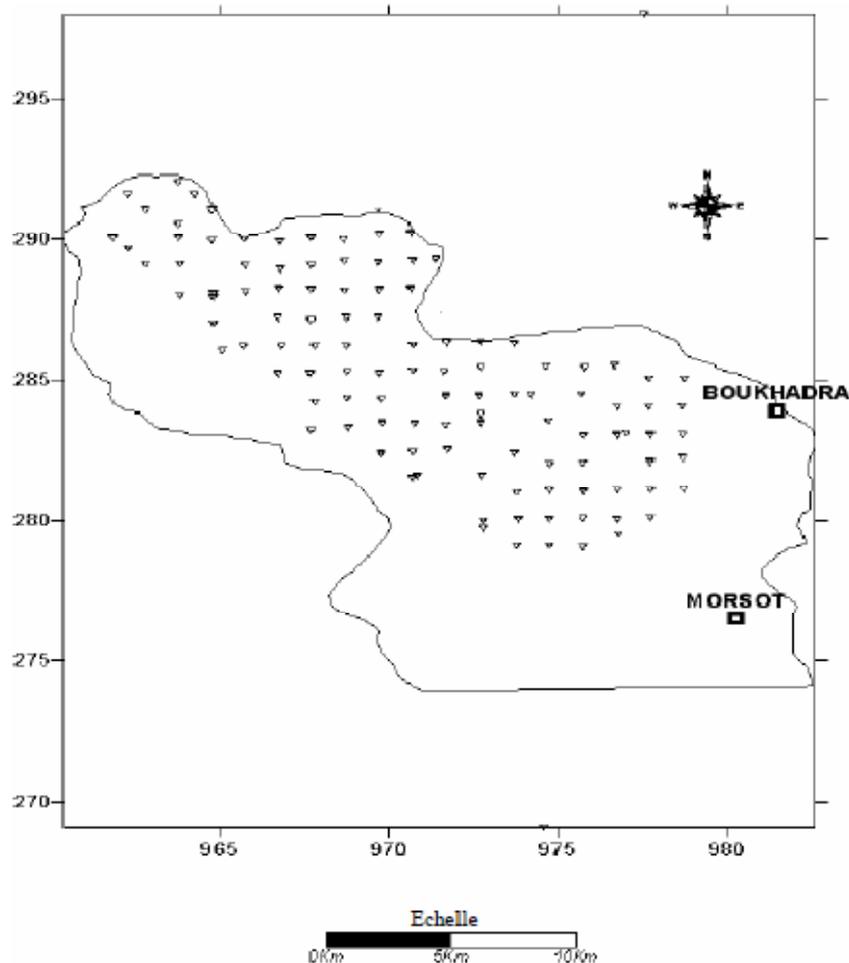


Figure 22: Carte de position des sondages électriques

2.1. Interprétation

Les sondages électriques verticaux réalisés sont disposés suivant des profils parallèles d'orientation SW-NE. Les profils sont espacés de 750 à 1000 m et les points de mesure (sondages électriques) ont une équidistance de 1500 m. Trois cartes en equirésistivités apparentes ont été tracées pour trois valeurs différentes de ligne AB (500, 800 et 1000 m).

L'interprétation en résistivités réelles a conduit à tracés des coupes géoélectriques verticale suivant les profils.

2.1.1. Commentaires des coupes géoélectriques

Les coupes géoélectriques et les corrélations entre les sondages électriques ont été faites de la manière suivante :

- Trois (03) coupes d'orientation Ouest-Est ;
- Une (01) coupe d'orientation NW-SE ;

Chapitre III *Aperçu hydro-climatologique, géophysique et hydrogéologique*

- Une (01) coupe d'orientation Nord-sud ;
- Une (01) coupe d'orientation SW-NE.

Nous avons donc choisi (06) coupes géoélectriques d'orientation différentes passant par la région d'étude.

- **Profil 1 à 3**

Ces profils se situent au Sud de la région d'étude traversant le fossé d'effondrement de Morsott, mettent en évidence à l'Ouest une succession de terrains conducteurs caractérisés par les résistivités inférieures à 25 ohm-mètre. Plus à l'Est, nous remarquons l'apparition d'un terrain résistant qui affleure à la faveur d'un contact anormal. Ce dernier admet des résistivités allant de 60 ohm-mètre au sondage électrique Y5, à 900 ohm-mètre au sondage électrique W6. En récapitulatif, nous pouvons dire que les 03 profils mettent en évidence les terrains suivant:

- Un terrain conducteur se présentant sous forme de deux niveaux de résistivité différente à savoir un niveau marneux (la résistivité inférieure à 10 ohm-mètre), et un niveau marno-calcaire (la résistivité > 10 ohm mètres), ce terrain a été attribué au Turonien supérieur.
- Un niveau relativement résistant et parfois conducteur, selon le pourcentage de marne et calcaire, attribué au calcaire et marno-calcaire du Turonien inférieur.
- Un niveau très résistant se présentant sous forme de différents niveaux, attribué au Trias et celui ci étant mis en évidence, au niveau de l'anticlinal de Boukhadra.
- Un niveau de résistivité variable, dépendant de la composante lithologique, attribué au Miocène.
- Enfin des niveaux conducteurs dans le bassin d'effondrement de Morsott, d'épaisseur relativement importante.

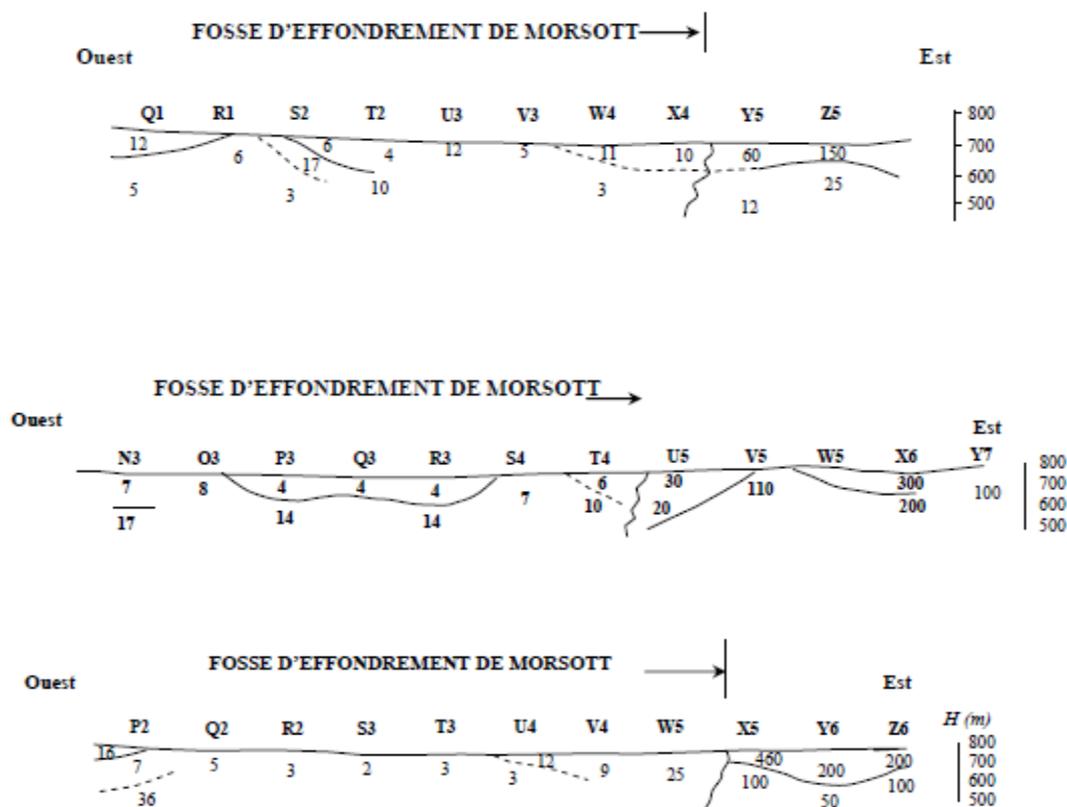


Figure 23: Coupes géoélectriques transversale 1,2 et 3

- **Profil 4**

Ce profil d'orientation Nord-Sud, traverse le fossé d'effondrement de Morsott, la prospection géophysique a mis en évidence une succession de formations très conductrices, avec des résistivités allant de 2 ohm-mètre à 20 ohm-mètre, l'épaisseur de ces différents niveaux et relativement importante.

Au nord du fossé d'effondrement, nous remarquons toujours comme précédemment la succession de terrains déjà décrits, à savoir un premier terrain de faible épaisseur et de résistivité variable allant de 30 à 150 ohm-mètre appartenant au Miocène continental, ensuite le Turonien supérieur avec ces deux niveaux et enfin le Turonien inférieur.

- **Profil 5**

Ce profil est d'orientation NW-SE traversant dans sa grande partie le fossé d'effondrement de Morsott. Au Nord-ouest, la prospection électrique a mis en évidence une structure synclinale dont le cœur est occupé par un terrain conducteur attribué aux marnes argileuses, puis en

Chapitre III **Aperçu hydro-climatologique, géophysique et hydrogéologique**

dessous on a les marnes et marno-calcaires du Turonien (les résistivités sont inférieure à 20 ohm-mètre). Au niveau du fossé d'effondrement, nous remarquons toujours une succession de niveaux conducteurs, avec apparition d'un horizon résistant au niveau du sondage électrique K1, ce dernier pourrait être attribué à un lambeau de terrain du Turonien inférieur.

- **Profil 6**

Ce profil d'orientation SW- NE, montre la succession de formation suivante :

-Une formation de faible épaisseur et de résistivité allant de 20 à 25 ohm-mètre attribués aux marnes argileuses.

-Le Turonien supérieur représenté par les différents niveaux de résistivité faible inférieurs à 20 ohm-mètre.

-Le toit de Turonien inférieure; une résistivité de l'ordre de 50 ohm-mètre. Sur la bordure Nord-est, on a un affleurement du Turonien inférieur de résistivité allant de 65 à 160 ohm-mètre.

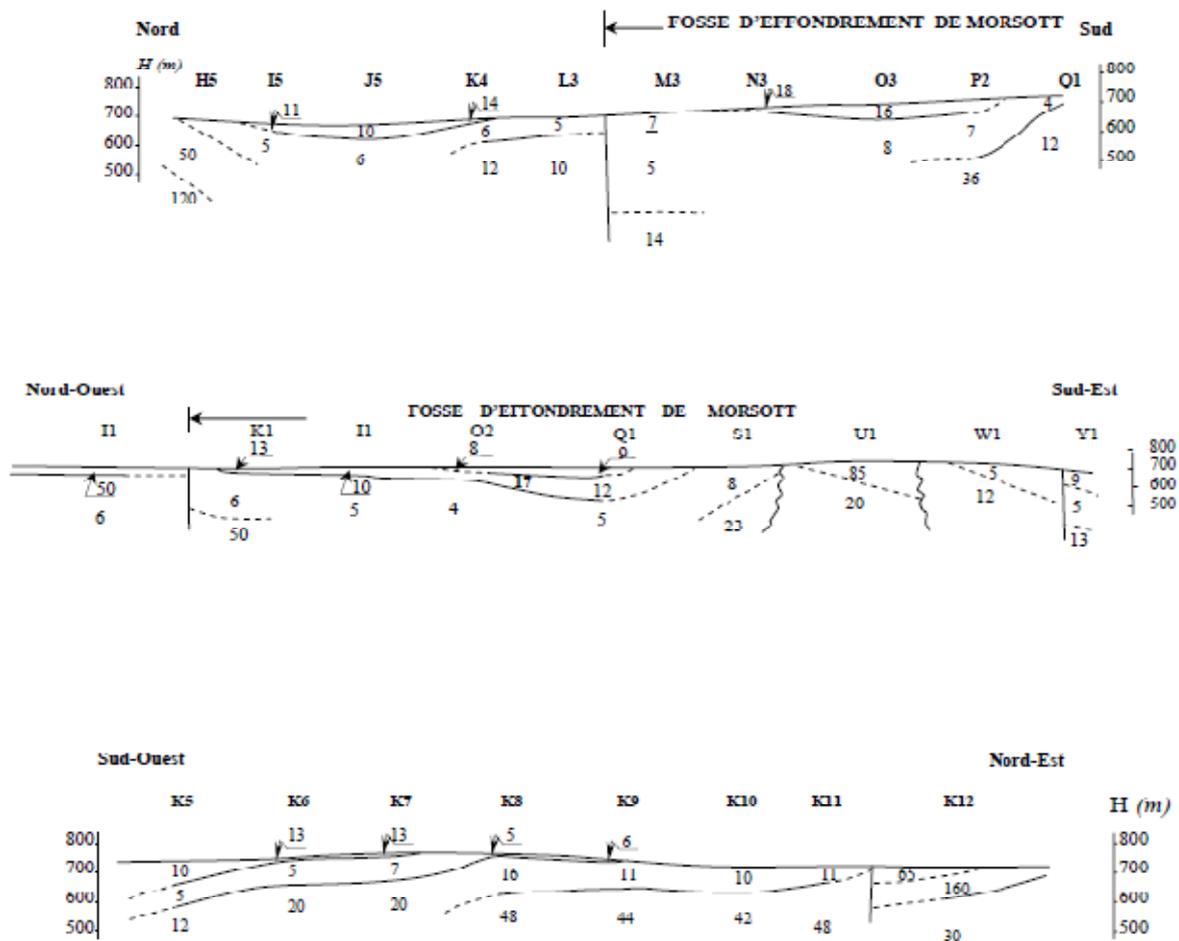


Figure 24: Coupes géoélectriques transversale 4,5 et 6

2.1.2. Interprétation des cartes de résistivité

D’après l’examen des coupes géoélectriques deux formations sont bien marquées par des résistivités assez différentes.

A fin de faire ressortir ces formations, **Fehdi. C** dans sa thèse de doctorat, a établi trois cartes de résistivité apparentes pour les allongements $AB = 500$ m, $AB = 800$ m et $AB = 1000$ m.

Pour chaque longueur AB , les indications électriques données par la carte correspondent à une profondeur allant de $L = AB/10$ à $AB/4$.

2.1.2.1. Carte en ligne $AB = 500$ m

Cette carte correspond à une profondeur d’investigation allant de 50 m à 125 m.

L’analyse de cette carte (**fig.25**), nous montre que l’on est en présence de terrains conducteurs renfermant quelques plages résistantes d’extension réduite sises sur les bordures. Au Nord-est

de la zone d'étude, on remarque une plage résistante (la résistivité apparente de 80 à 100 ohm-mètre), correspondant à des marno-calcaires du Turonien inférieur.

A l'Est du côté de Boukhadra, une plage résistante (la résistivité apparente > 100 ohm-mètre) correspondant aux calcaires aux dolomies du Trias.

En fin, notons que les plus faibles valeurs de résistivités sont enregistrées au niveau du fossé d'effondrement.

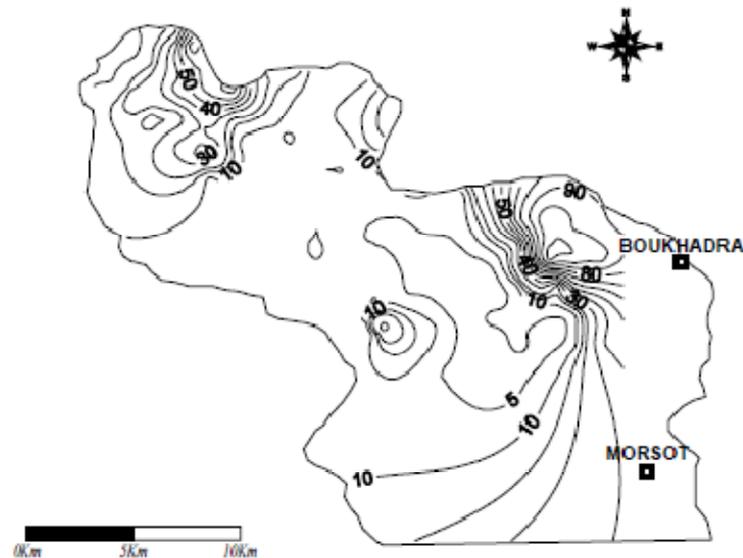


Figure 25 : Carte de résistivité en ligne AB=500m (D'après C. Fehdi)

2.1.2.2. Carte en ligne AB = 800 m

L'examen de la carte de résistivité (**fig.26**), a mis en évidence la prédominance de terrains conducteurs sur les presque totalité de la zone étudiée, toute fois nous remarquons l'existence de zones résistantes localisées au Nord et au Sud-est de la région d'étude. Ces zones résistantes correspondraient respectivement aux marno-calcaires du Turonien inférieur (synclinal El-Gountas) et aux calcaires et dolomies du Trias de l'anticlinal de Boukhadra.

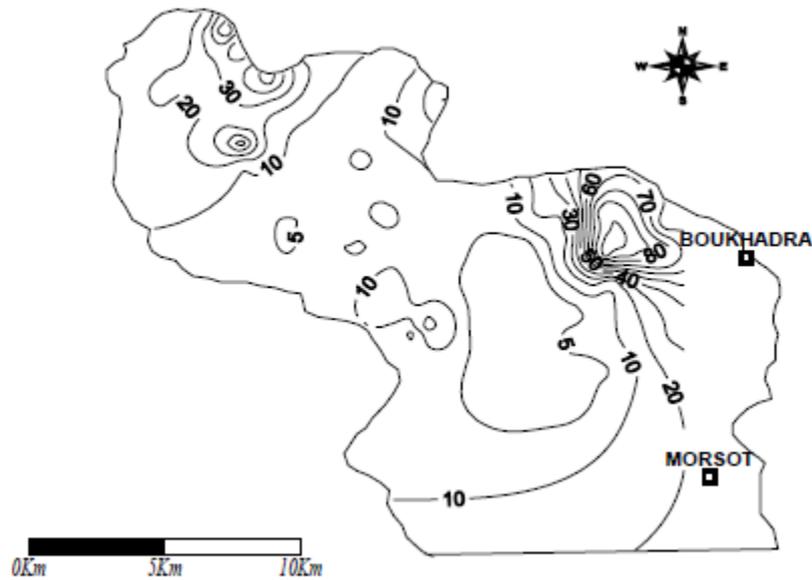


Figure 26: Carte d'iso-résistivité AB=800m (D'après C. Fehdi)

2.1.2.3. Carte en ligne AB = 1000 m

Cette carte correspond à une profondeur d'investigation moyenne de 100 à 250 m.

L'analyse de la carte (**fig.27**) nous montre comme les précédentes que l'on est en présence d'une plage conductrice d'extension importante renfermant des plages résistantes (la résistivité apparente supérieure à 50 ohm-mètre).

Ces plages résistantes se situent sur les bordures du synclinal d'El Gountas au Nord-est, au niveau de l'anticlinal de Boukhadra à l'Est. Celles-ci correspondraient aux calcaires, marno-calcaires du Turonien inférieur aux calcaires et aux dolomies du Trias. Notons que les plus faibles valeurs de résistivités sont toujours enregistrées au niveau du fossé d'effondrement de Morsott avec des résistivités de l'ordre de 10 à 15 ohm-mètre.

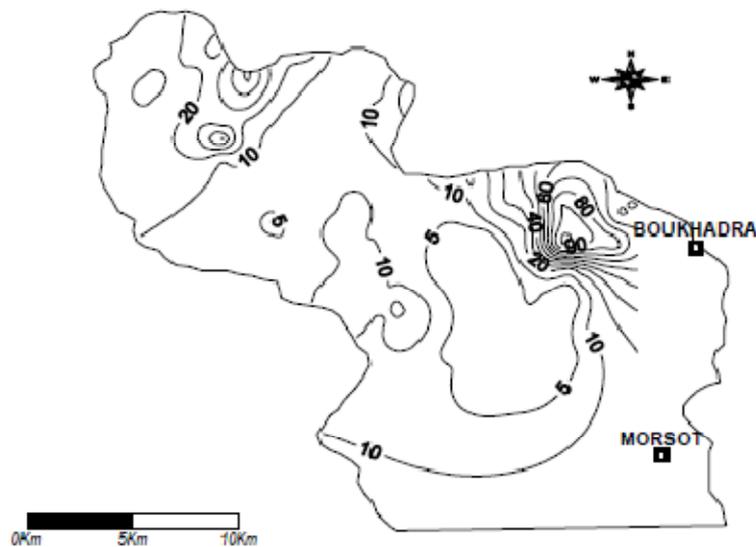


Figure 27: Carte de résistivité en ligne AB=1000m (D'après C. Fehdi)

2.2. Conséquences hydrogéologique et conclusion

L'étude géophysique de la région d'étude nous amène aux conclusions suivantes :

L'analyse des coupes géoélectriques a abouti à l'élaboration d'une échelle de résistivité:

➤ *Terrains plio-quadernaires du fossé d'effondrement*

Niveau conducteur de résistivité inférieur à 5 ohm-mètre.

Niveau conducteur de résistivité variable 5 à 10 ohm-mètre.

➤ *Miocène*

Conglomérats et grès : 50 à 200 ohm-mètre.

Marnes argileuses à schisteuses : 10 à 50 ohm-mètre.

➤ *Turonien supérieur*

Niveau supérieur marneux de résistivité inférieur à 10 ohm-mètre.

Niveau inférieur marno-calcaire de résistivité 10 à 30 ohm-mètre.

➤ *Turonien inférieur*

Formé par des calcaires et marno-calcaires de résistivité variable allant de 50 à 130 ohm-mètre.

➤ *Trias*

Formé par deux niveaux l'un conducteur, l'autre résistant

- le niveau conducteur a une résistivité allant de 10 à 30 ohm-mètre.

- le niveau résistant a une résistivité supérieure à 100 ohm-mètre.

-En général, mis a part sur les bordures, les faibles lances AB = 1000 et AB 2000 m, n'ont pas permis d'atteindre les calcaires du Turonien dans l'axe du synclinal, c'est pour ce manque d'information que nous n'avons pas pu tracer les cartes de la géométrie de l'aquifère.

-Le fossé d'effondrement de Morsott est limité à l'Est comme l'Ouest par deux grandes failles d'orientation NW-SE, il est représenté par des terrains d'épaisseur importante (souvent supérieure à 200m) de faibles résistivités et d'importance hydrogéologique moyenne.

3. Gravimétrie

Les données gravimétriques utilisées sont extraites du levé gravimétrique réalisé par [A. Zerdazi \(1990\)](#) et concernent la feuille d'El Aouinet au 1/50000.

La carte gravimétrique résiduelle (**fig.28**), établie pour une densité moyenne de 2.67g/cm^3 est dominée par une anomalie négative d'une intensité variant entre -32 mgal et -60mgal.

L'anomalie importante à une forme ovale et elle atteint son minimum au Sud-est de la région d'étude correspondant au fossé tectonique de Morsott. Une autre anomalie de l'ordre de -58 mgal de forme circulaire située au Nord-ouest de la zone d'étude avec un prolongement dans un axe d'orientation SW-NE, le long du massif de Djebel Mesloula. Ces anomalies correspondent surtout aux roches évaporitiques du Trias représenté en grande partie en profondeur par les sels.

Les maximums de l'anomalie de Bouguer sont observés sur les affleurements de formations carbonatés du Crétacé (Djebel Guelb).

Notons enfin la bonne corrélation entre la gravimétrie et les sondages électriques.

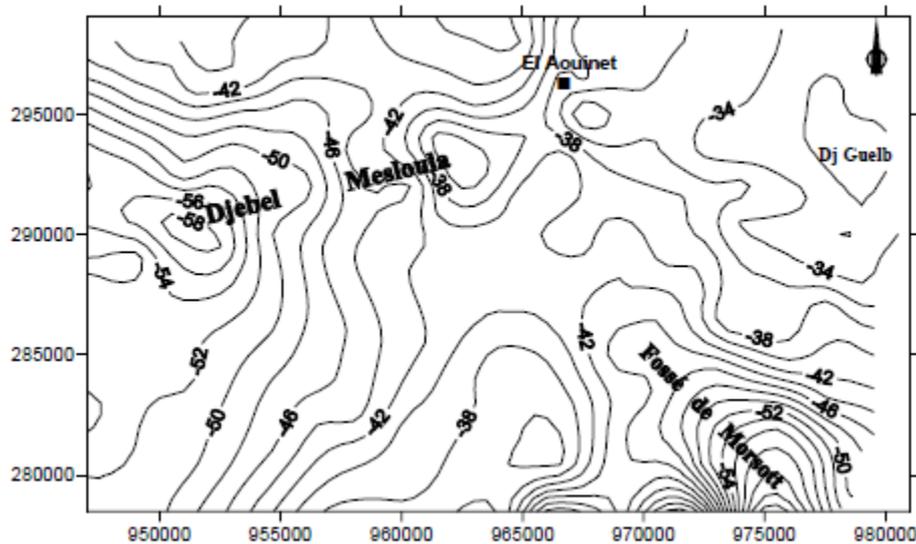


Figure 28: Carte gravimétrique résiduelle de la région d'étude (en mgal)

4. Expression magnétique des diapirs de la région d'étude

Les données magnétiques sont extraites du levé aéromagnétique réalisé par aéroservice corporation pour le compte de la SONAREM.

Un regard attentif à la carte du champ magnétique (**fig.29**), permet de constater que les structures magnétiques sont en bonne corrélation avec la tectonique de l'atlas tellien et de l'atlas saharien.

Le champ des anomalies magnétiques de la région d'étude est très complexe, il varie entre un minimum de -10nT et un maximum de 20nT . Cette anomalie négative correspond probablement aux roches d'âge triasique.

Notons enfin que la mine de fer de Boukhadra est caractérisée par un minimum du champ magnétique puisque c'est de l'hématite qu'il s'agit.

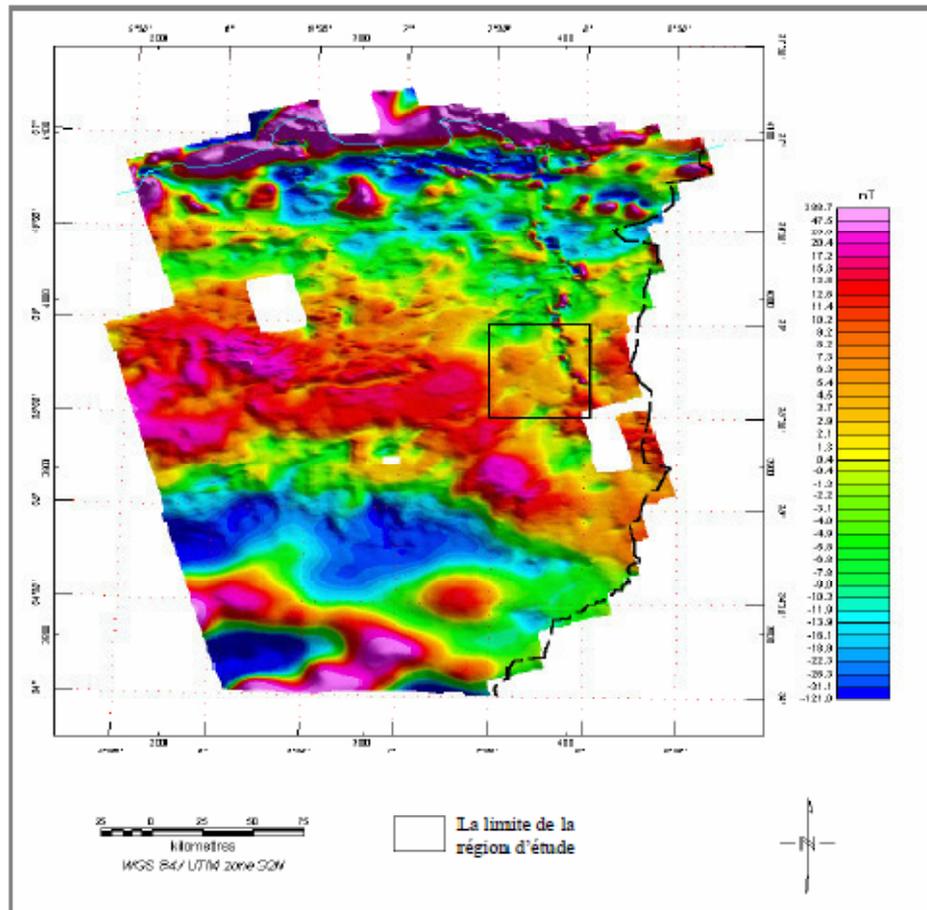


Figure 29: Carte aéromagnétique du Nord-est Algérien (in Boubaya 2005)

5. Conclusion partielle de la géophysique

On peut conclure les résultats suivants :

Les horizons géoélectriques recoupent clairement les formations lithologiques rencontrées par les forages.

L'interprétation révèle la présence de trois nappes aquifères superposées :

- La nappe Mio-Plio-Quaternaires du fossé d'effondrement
- Une nappe formée dans les calcaires du Turonien.
- Une nappe formée dans le Trias.

L'examen des coupes a mis en évidence la présence de deux grandes failles d'orientation NW-SE, qui bordent le bassin d'effondrement de Morsott qui est souvent recouvert par des terrains d'épaisseur importante (supérieur à 200m) de faibles résistivités et d'importance hydrogéologique moyenne.

III. Aperçu hydrogéologique

Une étude hydrogéologique détaillée a été réalisée dans l'aquifère de Morsott-El Aouinet par **Fehdi. C (2008)**. Dans ce souche chapitre je présente l'essentiel de cette étude.

1. Géométrie et épaisseur de l'aquifère Plio-Quaternaire

L'examen de la coupe hydrogéologique AA' (**fig.30**), de direction Est-ouest, établie à partir des logs stratigraphiques des puits P7 et P13 et les données de la campagne géophysique effectuée dans la région d'étude en 1987 par l'E.NA.GEO (entreprise nationale de géophysique), a mis en évidence la présence d'un remplissage Plio-Quaternaire, constituée par des dépôts très variés correspondant aux alluvions, limons, croûte calcaire ...etc, d'épaisseur allant jusqu'à 100 m, reposant sur un substratum imperméable formé de marnes et marno-calcaires d'âge Turonien supérieur.

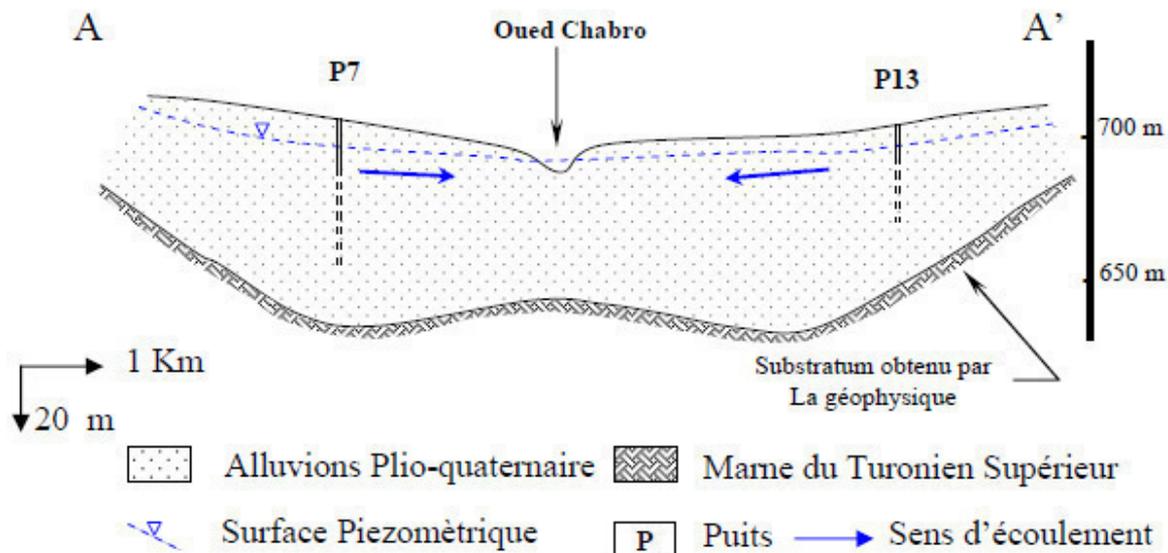


Figure 30: Coupe hydrogéologique A A'

2. Piézométrie

2.1. Inventaire des points d'eau

Dans la région d'étude, un réseau piézométrique couvrant une bonne partie du bassin d'effondrement de Morsott, formé d'une trentaine de puits est suivi pour la plus part depuis mars 2004. Mais le manque de nivellement adéquat ne permet pas l'établissement d'une bonne piézométrie, nécessaire à une meilleure planification de l'exploitation des ressources en eau souterraine. L'utilisation des indications comme la carte topographique au 1/50000è (avec des équidistances de 10 mètres) est nécessaire.

La figure ci-dessous représente la répartition des points d'eau échantillonnés dans la région d'étude.

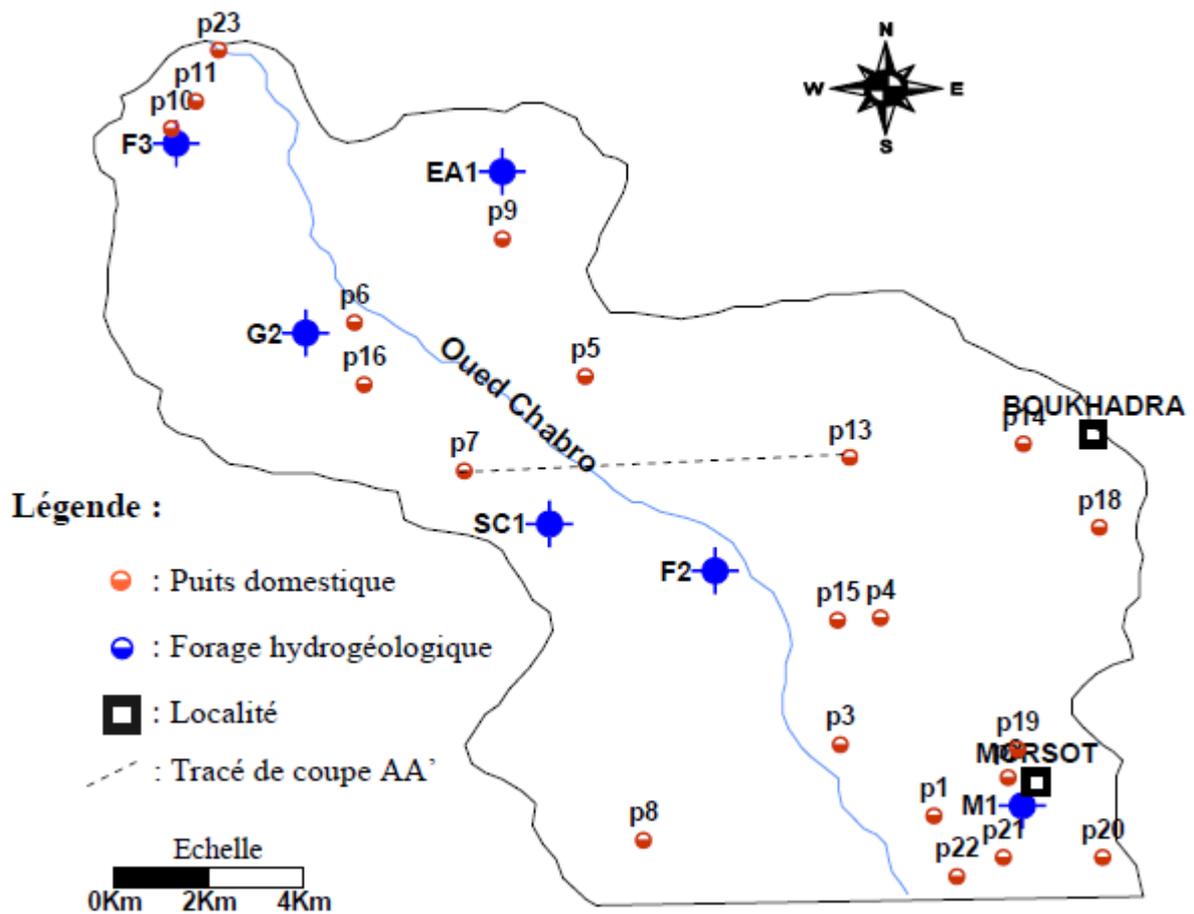


Figure 31: Carte d'inventaire des points d'eau (C. Fehdi., 2008)

2.2. Evolution temporelle

L'examen de l'évolution temporelle du niveau piézométrique pour un certain nombre de puits domestiques; qui captent l'aquifère Plio-Quaternaire a été donné trois types de réactions qui sont:

- Réaction « rapide » sensible à la recharge directe par la pluie; est observé au niveau les puits: P03, P10 et P14.

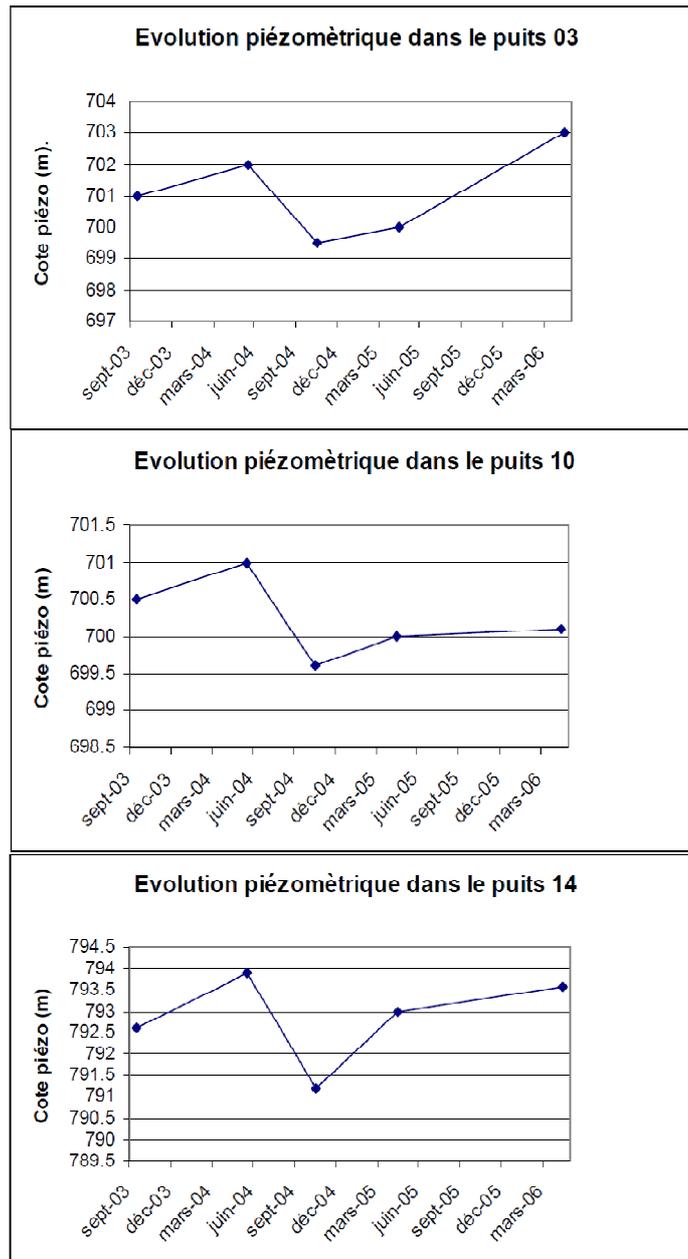


Figure 32: Evolution temporelle de la piézométrie dans les puits 03, 10 et 14

- Réactions « retardée », les puits de ce groupe ne sont pas sensibles aux précipitations ; aucune fluctuation n'est donc enregistrée mais la baisse de la nappe est continue. Ce phénomène est surtout observé au niveau des puits 01, 11 et 13 où la recharge par les pluies, si elle existe, ne semble pas compenser les pompages d'eau.

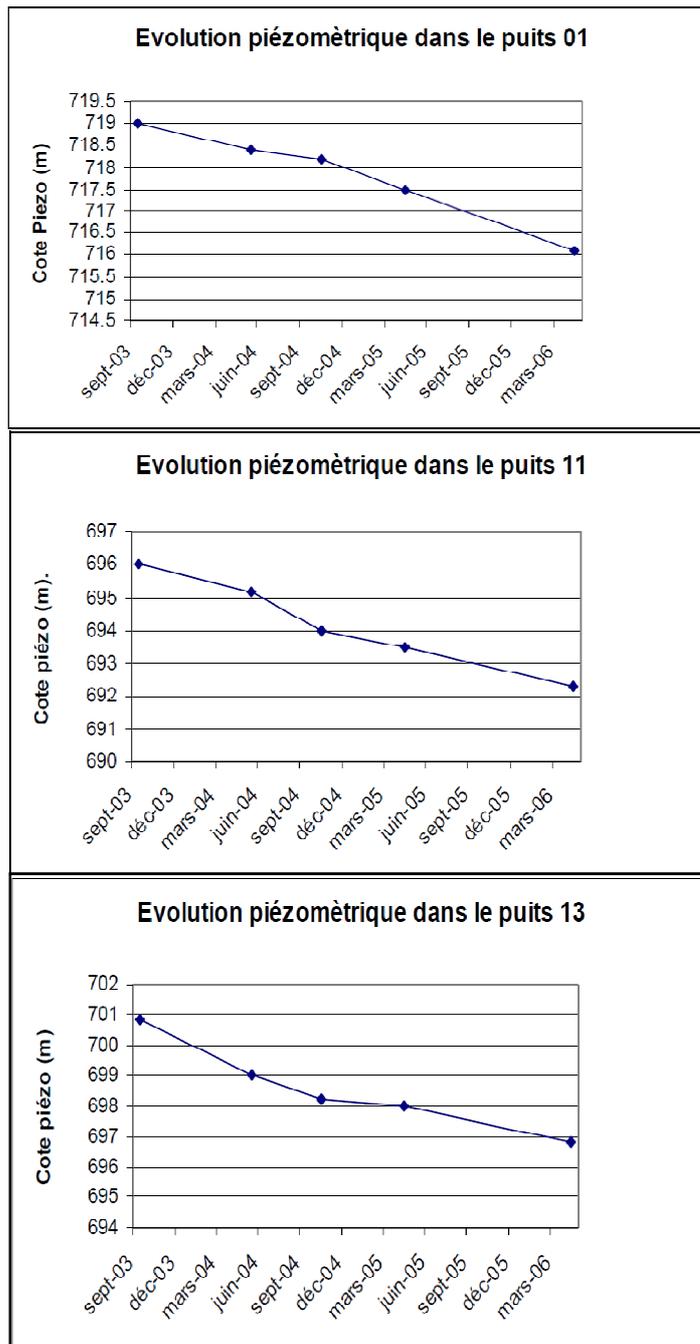


Figure 33: Evolution temporelle de la piézométrie dans les puits 01, 11 et 13

- Réaction « douteuse » ou perturbée par des pompages : on ne note pas de grande variation de la nappe, ou on constate que celle-ci fluctue énormément sans commune mesure avec une éventuelle recharge directe, exemple P09.

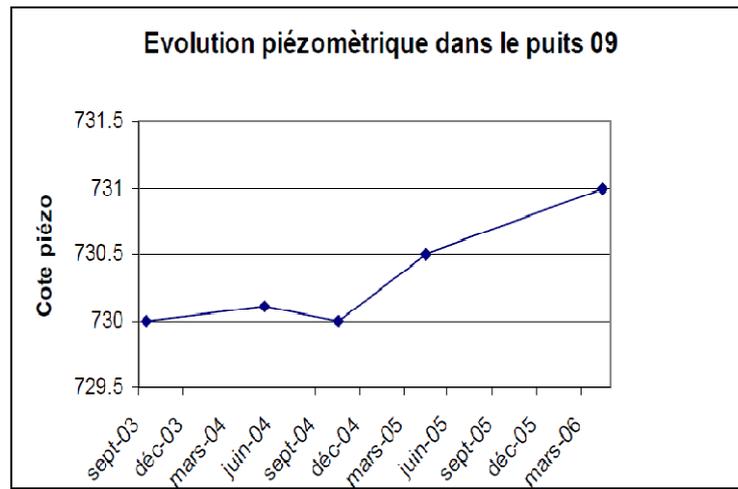


Figure 34: Evolution temporelle de la piézométrie dans le puits 09

La carte ci-dessous (fig.35), résume le type de réaction des piézométriques. Les réactions dites « retardées » ou « douteuses », se rencontrent surtout dans les régions à forte activité agricole.

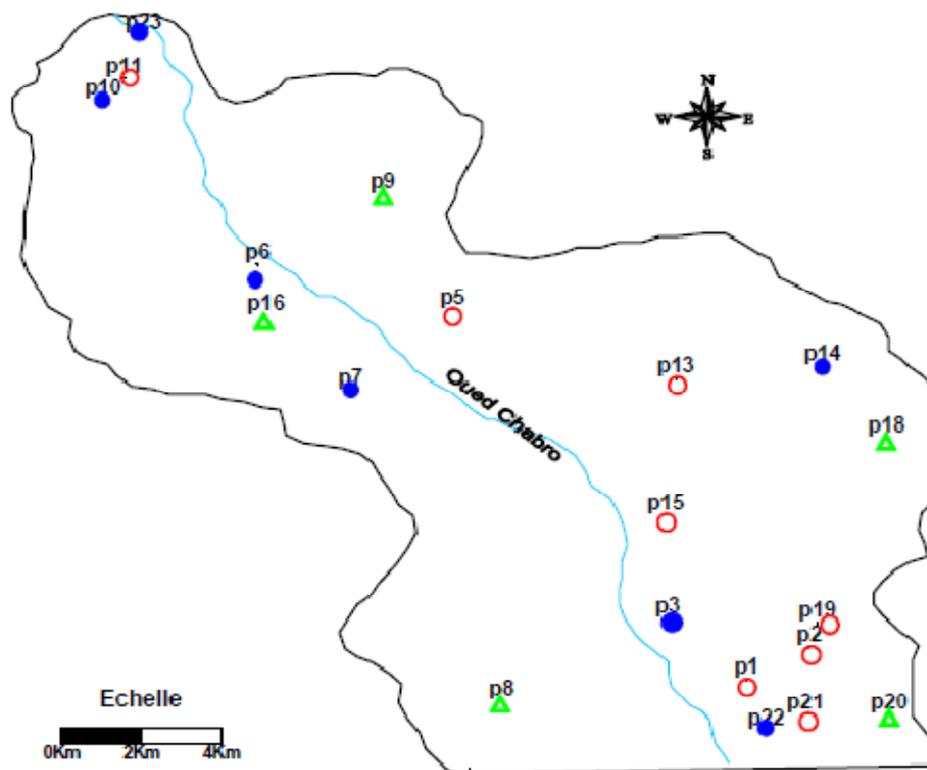


Figure 35: Carte de réactions piézométriques (en cercle plein bleu: réaction rapide, cercle creux rouge: réaction retardée, en triangle vert: réaction douteuse)

2.3. L'évolution spatiale de la piézométrie

Dans un territoire couvrant 180 Km² de surface, 120 valeurs de niveaux piézométriques, réparties à raison de 2/3 dans la région de Morsott et 1/3 dans la région d'El Aouinet a été illustré dans la carte piézométrique ci dessous.

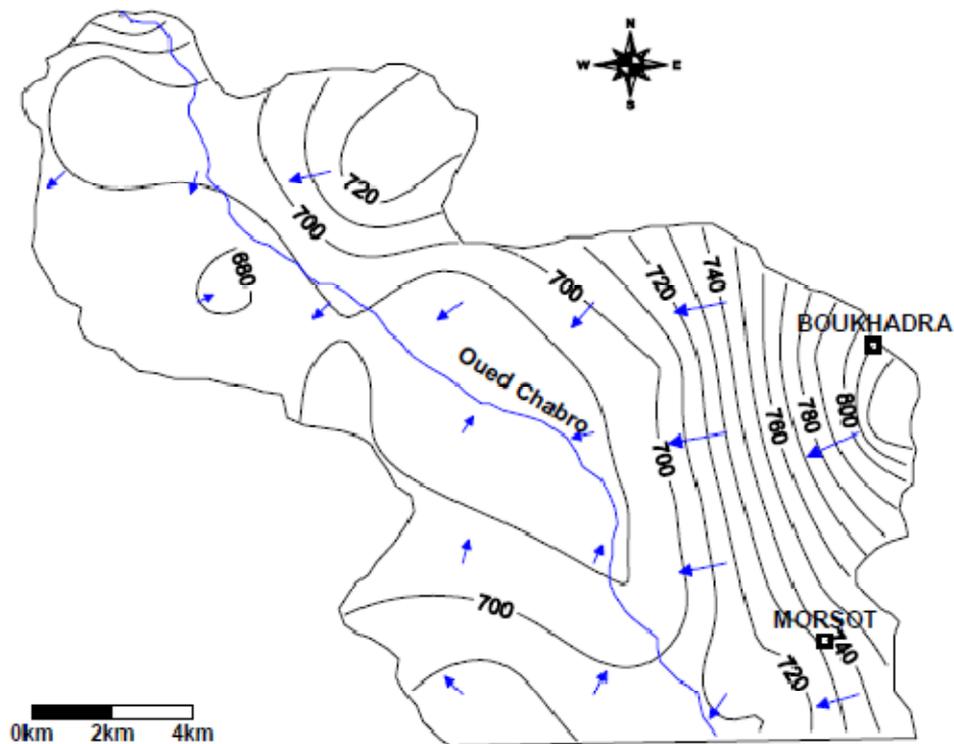


Figure 36: Carte piézométrique. Mars 2005 (Fehdi. C)

Le tracé d'une carte piézométrique régionale permet de mettre en évidence et d'attribuer des limites de nature hydraulique à un système aquifère dont on puisse envisager une représentation cohérente.

Ces limites sont bien entendu à l'Est et au Sud celles de Djebel Boukhadra, R'mila et Djebel Guelb, à l'Ouest et au Nord, on peut hydrauliquement délimiter le système aquifère à l'aide des affleurements du substratum constitué de marnes d'âge Turonien sup.

L'allure des courbes piézométriques offre par ailleurs de bonnes indications pour l'identification des zones d'alimentation, des axes d'écoulement et des exutoires naturels. Ainsi les aires principales d'alimentation de la nappe, semblent en première lecture, être constituées essentiellement par ces affleurements des terrains créacés en bordure Est et Sud-est.

Chapitre III Aperçu hydro-climatologique, géophysique et hydrogéologique

On peut voir deux pôles d'alimentations correspondant au massif de Djebel Boukhadra à l'Est et aux sables de la région de R'mila au Nord-est. Ce qui semble indiquer que ces deux zones constituent des pôles d'infiltration des eaux souterraines.

Les isopièzes sont serrés dans les parties Est et Sud-est, elles sont presque parallèles à la bordure, traduisant une zone d'alimentation. Le rapprochement des courbes isopièzes donne un gradient hydraulique plus au moins fort.

Dans la partie centre et Nord, les courbes isopièzes deviennent espacées ce qui traduit un faible gradient hydraulique suite à la présence d'un terrain plus perméable que les terrains se trouvant à l'Est.

Le sens d'écoulement général est de deux sens opposés convergeant au centre vers l'Oued Chabro, ce qui inique une alimentation de ce dernier par la nappe Plio-Quaternaire à l'exception de la limite Nord-ouest où on assiste à une alimentation des eaux souterraines par les eaux de surface.

Chapitre: IV

Caractérisation géochimique des eaux souterraines

I. Matériels et méthodes**I.1. Choix de site**

La partie nord du bassin d'effondrement Tébessa-Morsott située entre deux communes (Morsott et El Aouinet), est caractérisée par une forte dynamique démographique et agricole. L'essentiel des besoins en eau proviennent et continueront de provenir des eaux souterraines. La couverture végétale dégradée indique que le sol est hétérogène. Les propriétés des sédiments et des eaux diffèrent fortement suivant la composition chimique et la concentration des sels présents.

Pour évaluer le niveau de contamination métallique des eaux souterraines et des sédiments et étudier l'évolution de ces éléments; un échantillonnage sur le terrain a été effectué durant la période de hautes eaux (Mars et Avril 2014) où cette période est caractérisée par une précipitation très faible.

I.1.1. Présentation des mines présentes dans la région d'étude

- ❖ **La mine de Mesloul** : appartient à la région de Mesloul, qui se situe à 5 km du chef-lieu de la commune, comporte environ 6000 habitants. Elle est pourvue d'une antenne APC et d'une mosquée. Elle possède une ancienne mine de plomb et de zinc (**fig.37**), qui a arrêté leurs activités depuis 1962.



Figure 37: Photos de la mine de Mesloul (Mine abandonnée de Pb-Zn)

- ❖ **La mine de Boukhadra** : Le massif de Boukhadra se trouve à 44 Km au Nord de la ville de Tébessa, à 200 Km au Sud d'Annaba, 20 Km à l'Ouest du massif de Boujaber et à 13 Km de

la frontière algéro-tunisienne (**fig.38**). Son importance réside dans le gisement de fer qu'il recèle qui est considéré comme la deuxième source de minerai de fer après celle de la mine de l'Ouenza; alimentant le complexe sidérurgique d'El Hadjar (wilaya d'Annaba). Le Djebel Boukhadra est un anticlinal qui s'étend sur 7 à 8 Km du SW au NE, il constitue le massif le plus élevé dans la région et culmine 1463 m d'altitude. De point de vu géophysique, la mine de fer de Boukhadra est caractérisée par un minimum du champ magnétique puisque c'est de l'hématite qu'il s'agit.



Figure 38: Photos de la mine de Boukhadra (Mine de Fer-en activité-)

I.2. Site d'échantillonnage

Quatorze échantillons d'eau captant l'aquifère Plio-Quaternaire et dix échantillons de sol ont été prélevés dans la zone d'étude et analysés en vue d'une caractérisation physico-chimique et concentration en métaux lourds (**fig.39**).

Le puits P14 pris comme témoin se situe dans la partie extrême Sud de la zone d'étude loin de toute source de contamination (anthropique et minérale) et renseigne sur la qualité physico-chimique des eaux de la zone d'étude. Les autres échantillons sont répartis comme suit :

Station 1: située en aval du bassin de Morsott-El Aouinet, non loin de la mine abandonnée de Mesloul: (P1, P2, S1, S2).

Station 2: située dans la partie Est de la zone d'étude, près du village de Boukhadra, tandis que la mine de Boukhadra est située dans le site voisin, où cette mine est toujours en production: (P11, P12, P13, S8, S9).

Station 3: située dans la partie centrale de la zone d'étude où les points de prélèvement sont répartis dans les deux côtés de l'Oued Chabro: (P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, S3, S4, S5, S6).

Station 4: située en amont, au Sud-ouest de ce bassin versant: (P10, S7).

Station 5: elle est choisie comme station de référence loin des apports anthropiques domestiques et industriels, située à 12 km de la mine de Boukhadra: (P14)

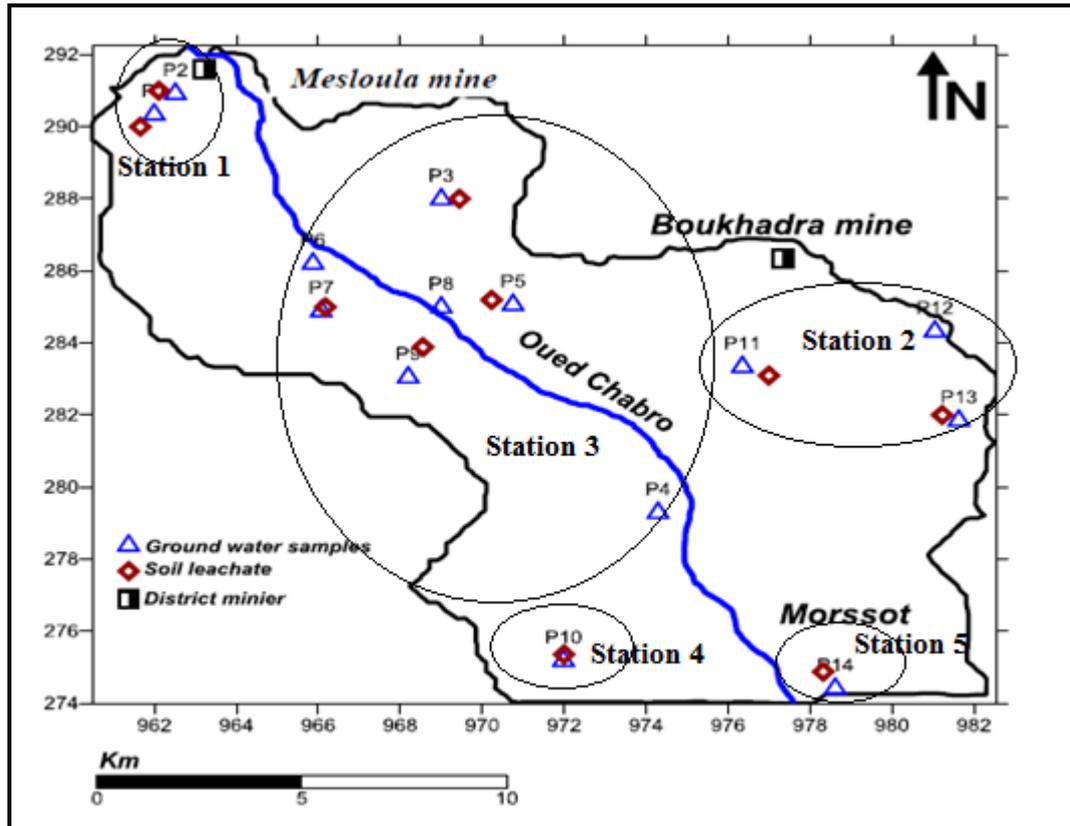


Figure 39: Carte d'échantillonnage de la zone d'étude

I.3. Technique d'analyse

I.3.1. les échantillons eau et sol

Les échantillons d'eau: ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène préalablement rincées avec l'eau de puits et conservés à 4°C jusqu'au moment des analyses.

Au laboratoire: chaque échantillon a été divisé en deux, le volume nécessaire pour la détermination de la concentration en métal total a été acidifié par ajout d'acide nitrique (HNO₃) à 1% et le volume restant a été conservé pour la détermination des paramètres physico-chimiques.

Au moment de l'échantillonnage d'eau nous avons pris des mesures de température, du pH et de la conductivité électrique à l'aide des appareils de mesure portable, pH-mètre et conductimètre respectivement.

Les concentrations en Fe, Mn, Cd, Zn et Cu dans l'eau ont été mesurés par ICP-AES (Inductively Coupled-Plasma/Atomic-Emission-Spectrometry) au laboratoire de SEMIPHOS (Djbel Onk- Bir El Ater-Tébessa).

Les concentrations en NO_3^{-2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{-2} et CN^- ont été mesurés par un spectrophotomètre de type DR2700 au niveau de laboratoire de recherche -Eau et Environnement- Université de Tébessa.

Les concentrations en Na^+ et K^+ par un photomètre à flamme au laboratoire de SEMIPHOS (Djbel Onk- Bir El Ater-Tébessa).

Les échantillons de sol; destinés aux analyses ont été prélevés au niveau de la couche superficielle à l'aide d'une benne à main; ces échantillons ont été recueillis dans des sacs en plastique.

Au laboratoire chaque échantillon a été subdivisé en deux :

➤ **-La première partie est conservée pour l'analyse XRF :**

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF): est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière.

Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X; la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X : c'est la fluorescence X.

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

Préparation de la pastille:

Une pastille est obtenue en mélangeant 9g de l'échantillon séché à 105 °C et 1g de l'acide borique qui assure sa tenue mécanique. Après le broyage mécanique du mélange à 140 µm pour minimiser l'effet de la granulométrie, le mélange est pressé par une masse hydraulique égale à 40t/cm². Ceci permet ensuite de conserver pendant plusieurs mois (voire années) les échantillons pastillés.

Pour l'analyse, les échantillons sont placés dans un passeur automatique du spectromètre XRF (PAN alytical de marque PHILIPS), où les analyses ont été effectuées au niveau de la cimenterie d'El Maa Labiod-Tébessa- (SCT).

➤ **-La deuxième partie est réservée pour la caractérisation physico-chimique:** pour déterminer les différents éléments nous avons eu à des tests de lixiviations simples.

Test de lixiviation simple : test reposant sur l'utilisation de l'eau désionisé comme agent de lixiviation pendant trois jours avec un ratio de solution sol/eau fixé à 1/5 c'est à dire 10 g de sol dans 50 ml d'eau distillée, et sous une agitation magnétique. Les paramètres étudiés sont :

- paramètre de salinité : CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$), TDS (mg/l) et Salinité sont mesurés par un conductimètre.
- Le dosage de (Na^+ et K^+) en (mg/L) par un photomètre à flamme et (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et HCO_3^-) en (mg/L) par la méthode volumétrique par titration, ces analyses sont effectuées au niveau de laboratoire pédagogique de l'université de Tébessa.
- Les concentrations en Fe, Cd, Zn et Cu dans les sédiments ont été mesurés par ICP-AES (Inductively Coupled-Plasma /Atomic-Emission-Spectrometry) au laboratoire de SEMIPHOS (Djbel Onk- Bir El Ater-Tébessa).

I.3.2. Indice de pollution des eaux souterraines

L'indice de pollution des eaux souterraines est une échelle numérique permettant de quantifier l'étendue de la contamination. Il reflète une influence composite des mesures individuelles de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau de l'aquifère. L'algorithme pour calculer l'indice de pollution des eaux souterraines est donné comme suit:

Le calcul de l'indice de pollution des eaux souterraines est basé sur les normes suggérées pour les utilisations, dans lesquelles 11 paramètres de qualité de l'eau ont été choisis (pH, CE, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-).

La première étape : les poids relatifs (P_R) ont été attribués à chaque paramètre en fonction de leur importance relative dans la qualité globale de l'eau utilisée à des fins de consommation. Le poids maximal de 5 a été attribué à des paramètres tels que pH, TDS, CE, NO_3^- et SO_4^{2-} en raison de leur importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau, et le poids minimal de 1 a été attribué au K^+ car il joue un rôle moins important dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Subba Rao 2012, Armar et Parmar 2010, Gibrilla et al. 2011, Ravikumar et Somashekar 2012, Bouderbala et al. 2016), (tableau 15).

Tableau 15. Paramètres mesurés et leur poids relatif et normes standards de qualité de l'eau potable

Paramètres de mesure	Unités	Poids relatif (P _{Ri})	Norme standards de qualité de l'eau potable (OMS 2006)
Ph		5	8.5
TDS	mg/l	5	1000
Ca ⁺²	mg/l	2	100
Mg ⁺²	mg/l	2	75
Na ⁺	mg/l	4	150
K ⁺	mg/l	1	12
HCO ₃ ⁻	mg/l	3	300
Cl ⁻	mg/l	4	250
SO ₄ ⁻	mg/l	5	200
NO ₃ ⁻	mg/l	5	50
EC	µs/cm	5	1500
Somme ΣP _{Ri}		41	

La deuxième étape: le paramètre de poids (Pp) pour chaque mesure de la qualité de l'eau est calculé par l'équation 1; pour obtenir la part relative de chaque mesure de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau. C'est le rapport entre le P_{Ri} de chaque mesure de la qualité de l'eau et la somme de tous les poids relatifs (ΣP_R).

$$Pp = P_{Ri} / \sum P_R \dots \dots \dots (1)$$

La troisième étape: le statut de concentration Sc pour chaque paramètre a été attribué en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par sa norme standard de qualité de l'eau potable selon l'organisation mondiale de la santé (OMS 2006); [équation 2].

$$Sc = C / Ds \dots \dots \dots (2)$$

La quatrième étape: la qualité globale de l'eau (Q_e), est mesurée par la multiplication de paramètre de poids (Pp) de chaque mesure de qualité de l'eau par son statut de concentration (Sc) [équation 3]. Il reflète combien de fois Pp est augmenté par rapport à la concentration de chaque mesure de qualité de l'eau.

$$Qe = Pp * Sc \dots \dots \dots (3)$$

La cinquième étape: l'indice de pollution des eaux souterraines (Ip), est calculé en additionnant toutes les valeurs de Qe calculées par toutes les mesures de la qualité de l'eau de chaque échantillon d'eau [équation (4)].

$$Ip = \sum Qe \dots \dots \dots (4)$$

La sixième étape: Classification de l'indice de pollution

Si $IPS < 1.0$ \Rightarrow Pollution insignifiante

Si $1.0 < IPS < 1.5$ \Rightarrow Faible pollution

Si $1.5 < IPS < 2.0$ \Rightarrow Pollution modérée

Si $2.0 < IPS < 2.5$ \Rightarrow Forte pollution

Si $IPS > 2.5$ \Rightarrow Très forte pollution

II. Caractérisation géochimique des eaux souterraines dans la région d'étude

II.1. Introduction

La chimie des eaux a eu un intérêt capital ; ceci en raison de la nécessité constante de mettre à la disposition des usagers une eau répondant aux normes requises de qualité. L'eau souterraine est d'une importance primordiale dans la plupart des régions du monde et particulièrement dans les zones sous climat aride et semi-aride.

Le chimisme des eaux souterraines est régi par plusieurs facteurs :

- La nature des roches avec lesquelles elles se mettent en contact ;
- L'augmentation de la salinité des eaux souterraines surtout pour les aquifères superficiels; résultant le phénomène de l'évaporation (Drever 1997 et Mazor 1994);
- L'activités anthropique, c'est un facteur très significatif dans la dégradation de la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface ;
- La contamination par les métaux lourds constitue une source de pollution qui engendre de sérieux problèmes environnementaux et qui a fait l'objet de nombreux travaux et recherches à travers le monde.

La lutte contre cette contamination est devenue une préoccupation majeure, ainsi beaucoup de chercheurs et scientifiques se sont intéressés à la caractérisation des phénomènes et processus qui régissent le comportement et la migration des métaux lourds dans les sols et dans les eaux souterraines ainsi qu'à la prédiction de l'évolution spatiale de cette contamination.

L'objectif principal de cette étude c'est l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines et l'estimation de l'indice de contamination des métaux lourds; en exploitant tous les résultats obtenus des analyses physico-chimiques et des métaux lourds des échantillons prélevés (eau et sédiments) dans la région d'étude.

II.2. Signification des faciès chimiques dans les eaux souterraines

Les faciès chimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. La nécessité d'une comparaison aisée voire une classification des eaux naturelles nécessite l'utilisation des représentations graphiques. De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées; parmi eux seules deux représentations graphiques qui ont été retenues et utilisées dans notre étude ; le diagramme de Piper et le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff.

II.2.1. Le Diagramme de Piper

C'est l'une des représentations les plus classiques pour comparer les compositions chimiques des eaux naturelles. Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. Le diagramme de Piper permet également :

- D'illustrer l'évolution chimique d'une eau dans un aquifère ainsi que les mélanges d'eaux de minéralisations différentes.
- D'avoir une idée sur la lithologie à partir des analyses chimiques.
- D'avoir une relation entre le chimisme de l'eau et la nature lithologique de l'encaissant.
- La projection de plusieurs échantillons en même temps :
 - Pour suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace.
 - Pour les comparer.
 - Pour avoir une idée sur la notion de mélange.
- De suivre les propriétés physico-chimiques au cours de leur évolution spatiotemporelle.

Tous les résultats obtenus de l'analyse physico-chimiques des eaux souterraines de la région d'études sont récapitulés dans le **tableau n°16**.

Les cations et les anions majeurs tels que le Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- ont été tracés sur le diagramme de Piper (Piper 1994) pour évaluer l'hydrochimie des eaux souterraines de l'aquifère de Morsott-El Aouinet.

Tableau 16. Résultats physico-chimiques des eaux souterraines

Puits	PH	Cond	sal	TDS	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺²	Mg ⁺²	k ⁺	Na ⁺	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻
P1	7.8	3970	2.3	2708	454.4	150	267.73	491.83	26	76.3	7.58	5.6
P2	7.6	6090	3.7	2964	937.2	114	488.97	637.63	16.4	110.6	48.66	7.2
P3	7.4	872	0.3	4097	120.7	194	139.47	26.24	4	40.1	155.61	2
P4	7.6	37000	26.2	912	17750	94	682.96	371.79	32.8	3250	155.61	2.4
P5	7.5	22000	15	1000	7597	14	109.82	280.66	17.9	1990	167.8	3.2
P6	7.8	7930	5	1200	1846	314	126.65	174.96	8.8	1075	225	3.5
P7	7.9	5080	3	980	894.6	282	234.06	213.84	5.4	160.4	280	1.7
P8	7.4	8030	5.1	3100	1846	38	317.43	233.28	9.8	1987	293	3.2
P9	7.6	5280	3.2	2800	710	510	569.13	287.71	5.4	288	358	2
P10	7.2	13910	9.1	2500	3777.2	22	384.76	315.9	20.7	1800	368	4.5
P11	7.4	4860	2.9	2218	710	14	697.39	398.52	26.8	81.5	481.2	5.2
P12	7.1	3460	1.9	1957	724.2	242	513.02	57.34	7.8	97.9	525	7.5
P13	7.6	4820	2.9	1464	497	26	718.23	288.68	17.8	102.4	550	3.6
P14	7.5	981	0.3	558	142	266	172.34	13.6	1.2	38.8	575	4.2

Basé sur la concentration ionique, le calcium et le chlorure sont le cation et l'anion dominant respectivement. Généralement, le calcium et le bicarbonate sont généralement les principaux ions de l'eau douce (Hem.D.J 1985), tandis que le sodium et le chlorure dominent le contenu ionique de l'eau de mer.

Selon la concentration cationique, **35.71%** des échantillons d'eau souterraine sont de type [Ca> Mg> Na> K] suivi de [Na> Ca> Mg> K] (**21.43%**), ainsi qu'une contribution mineure de [Mg> Ca> Na > K], [Na> Mg> Ca> K] et [Ca> Na> Mg> K] avec un taux de liaison de **14.28%**. Et selon la concentration anionique, **50%** des échantillons d'eau souterraine ont un [Cl⁻> HCO₃⁻> SO₄⁻²] et **35.71%** d'échantillons d'eau souterraine appartiennent au type [Cl⁻>SO₄⁻²>HCO₃⁻], alors que **14.28%** des échantillons appartiennent à [HCO₃⁻>Cl⁻>SO₄⁻²].

La concentration anionique indique que le chlorure (**85.71%**) est l'ion dominant, suivi par le bicarbonate et le sulfate.

A la base de cette classification, on observe que les échantillons des eaux souterraines présentent deux faciès dominants ; le premier c'est : *Chlorurée-sulfaté et calcique magnésien* et le deuxième c'est : *Chlorurée- bicarbonaté et sodique potassique*, (fig.40).

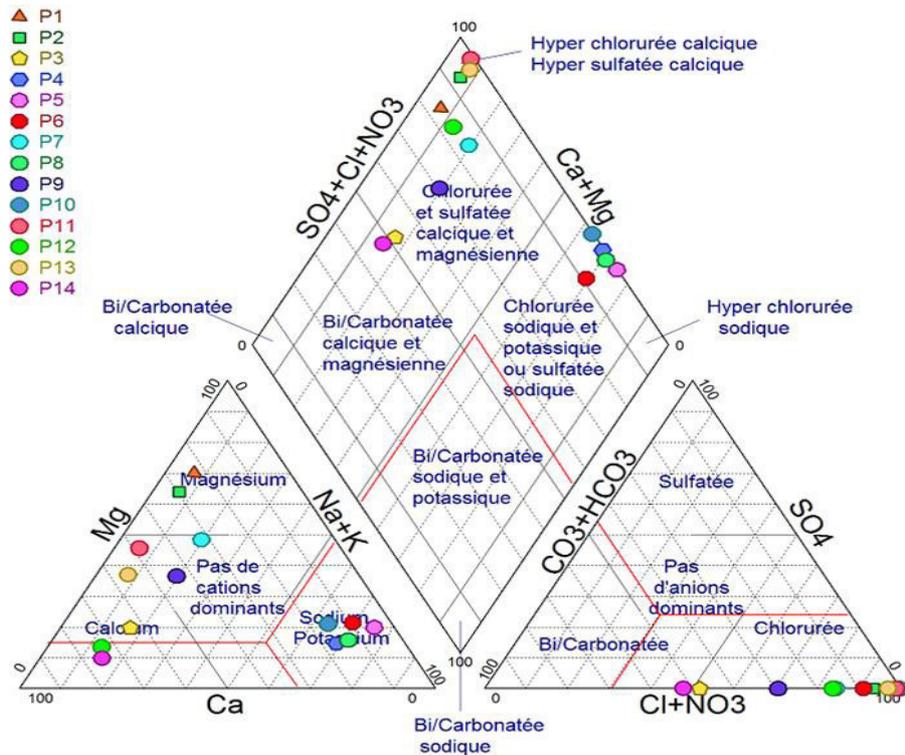


Figure 40: Diagramme de Piper de la chimie de l'eau dans la zone d'étude

II.2.2. Le diagramme de Schöeller-Berkaloff

C'est une représentation graphique semi-logarithmique sur laquelle les différents ions sont représentés sur l'axe des abscisses et la teneur réelle en mg/L sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique permet de visualiser le faciès des eaux analysées. Cette représentation permet aussi la détermination du faciès d'une eau. En effet, le diagramme de Schöeller-Berkaloff indique pour chaque eau analysée la teneur moyenne (mg/L) en éléments majeurs de ces eaux, de comparer des éléments en traces et d'établir les faibles variations entre les éléments chimiques.

La **figure 41**, présente le diagramme de scholler-Berkaloff tracé pour la période de mars-avril 2014, qui confirme principalement deux faciès; *Chlorurée-sulfaté et calcique magnésien* et *Chlorurée-bicarbonaté et sodique potassique*; permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl^- , HCO_3^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} et Na^+ .

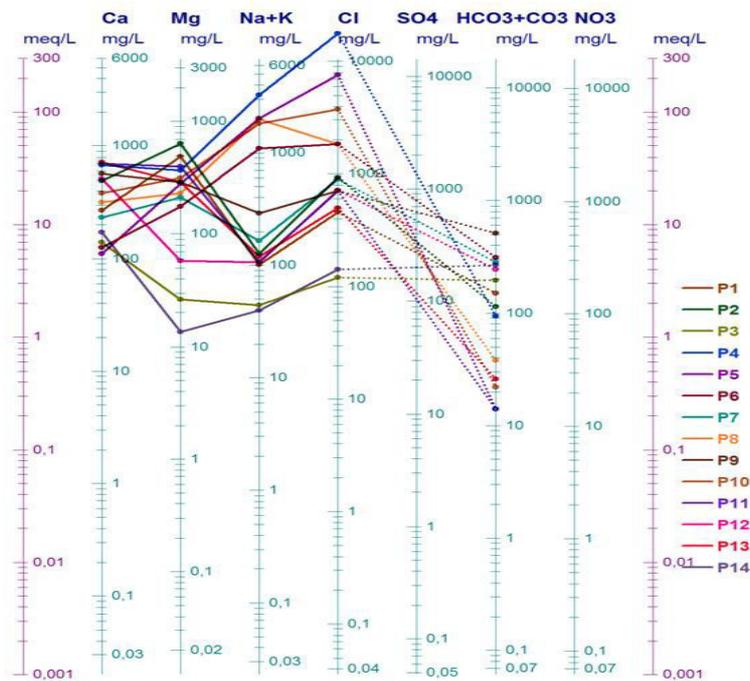


Figure 41: Diagramme de Scholler-Berkaloff des eaux souterraines (Mars-Avril 2014)

II.3. Analyse statistique «corrélation inter-éléments»

L'analyse statistique a été adoptée afin d'avoir les relations possibles (corrélations) qui existent entre tous les éléments (anions majeurs, cations majeurs, pH, conductivité et éléments en trace), durant toute la période d'investigation.

Les analyses des corrélations aboutissent aux interprétations suivantes :

Une analyse élevée de corrélation (près de +1 ou de -1) signifie un bon rapport entre deux variables (positivement ou négativement corrélées) et une valeur autour de zéro, signifie aucun rapport entre elles. Une corrélation $R > 0.7$ correspond à des données fortement corrélées tandis qu'une corrélation R entre 0.5 et 0.7 qui correspond à des données modérément corrélées (Kumar and Muttan 2006).

Dans les figures 42a, 42b et 42c, nous avons reporté les courbes de corrélation appliquée aux 14 points des eaux souterraines de l'aquifère Plio-Quaternaire. Au regard de ces courbes, plusieurs remarques s'imposent :

- La conductivité électrique est bien corrélée avec le sodium et le chlorure et modérément corrélée avec le potassium.

- la conductivité est faiblement corrélée avec les autres éléments chimiques (Ca^{+2} , Mg^{+2} et SO_4^{-2}), (0.20, 0.27 et 0.38) respectivement.

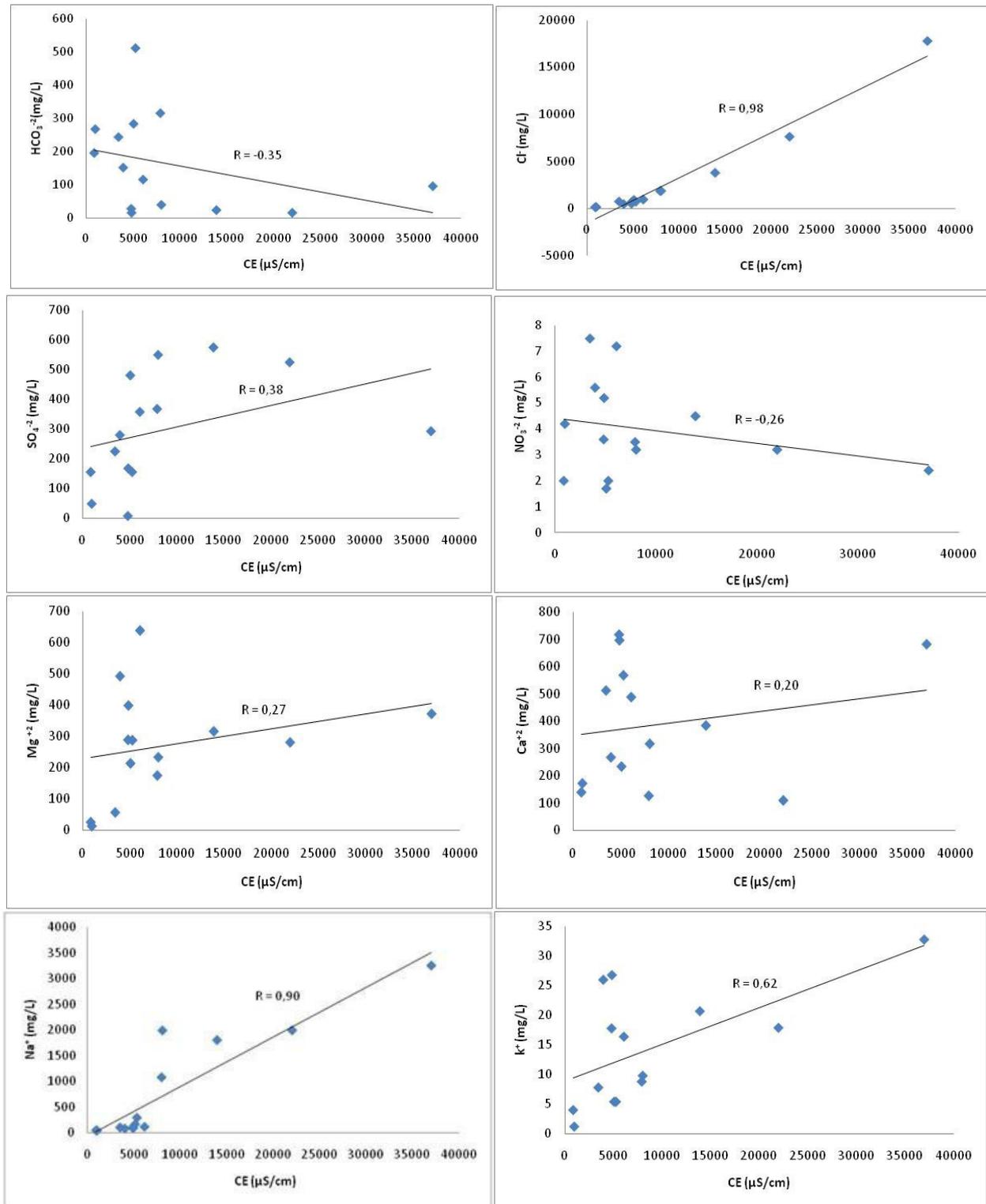


Figure 42a : Corrélation entre les valeurs de CE et les différentes valeurs des éléments majeurs (R : Coefficient de corrélation)

-La relation inverse entre le NO_3^{-2} et le HCO_3^{-} par rapport au CE (R entre -0.26 et -0.35) respectivement, peut être attribué à la diminution de la concentration de ces deux ions avec l'augmentation des valeurs de CE, cela est peut être due à la précipitation de la calcite.

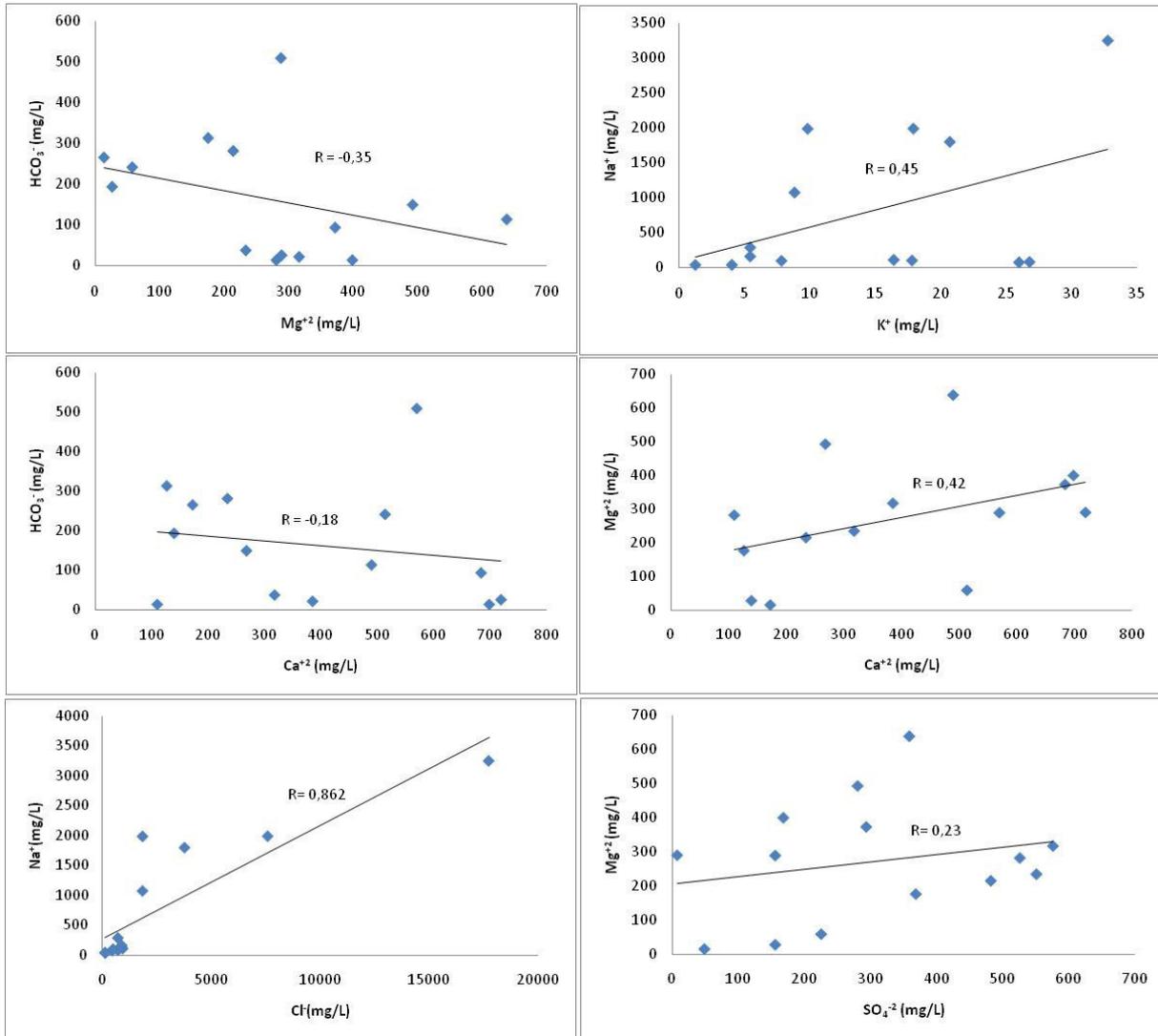


Figure 42b: Corrélation entre les valeurs de quelques paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

-Une mauvaise corrélation entre les ions de Ca^{2+} , Mg^{2+} et les bicarbonates. Cela traduit que la dissolution des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite...) sont responsables de l'augmentation du calcium dans les eaux souterraines. En fait, l'oxydation de la pyrite a produit l'acidité ce qui favorise la dissolution des minéraux carbonatés. Ce qui explique l'augmentation des concentrations en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} et les valeurs neutres du pH (Cidu 2010).

-La répartition des teneurs des chlorures se corrèle bien avec celles de sodium (0.862), ce qui confirme l'origine salifère de ces deux éléments. Le sodium est associé à une forte concentration de chlorure; ce qui entraîne une salinité. On peut s'attendre à une concentration plus élevée de sodium comparée à la contribution du calcium aux cations totaux en raison de l'influence de l'échange d'ions (Hem.D.J 1985).

-Une corrélation positive entre le Mg^{2+} et le SO_4^{-2} (0.23).

La **figure 42c**, illustre les corrélations qui existent entre quelques paramètres de métaux lourds et entre quelques éléments majeurs.

Le tableau n°17, représente tous les résultats de métaux lourds des échantillons d'eau.

Tableau 17. Résultats des métaux lourds des eaux souterraines

Puits	Fe	Zn	Cd	Cu+2	Mn	Cyan
P1	0,114	0,038	0,047	0,033	3,7	88
P2	0,114	0,017	0,035	0,05	-	38
P3	0,047	0,026	0,041	0,002	0,4	2
P4	0,279	0,032	0,095	0,047	0,1	3
P5	17,3	0,07	0,069	0,036	-	-
P6	0,199	0,033	0,041	0,015	0,5	9
P7	0,131	0,027	0,049	0,023	-	-
P8	0,121	0,026	0,049	0,015	-	-
P9	0,134	0,028	0,045	0,024	14,1	160
P10	0,133	0,026	0,056	0,027	0,2	10
P11	0,123	0,025	0,045	0,02	2,5	49
P12	0,084	0,281	0,036	0,013	0,5	44
P13	0,164	0,036	0,043	0,028	1	9
P14	0,074	0,02	0,031	0,005	0,5	7

- Valeur non défini

-Il existe une forte corrélation entre le Mn^{+2} et le CN^{-} (0.94).

-Le Cd^{+2} et le Cu^{+2} se corrèle modérément (0.554).

-Une corrélation inverse qui existe entre (Cd^{+2} et Zn^{+2}), (Zn^{+2} et Cu^{+2}) et (Cu^{+2} et HCO_3^{-}), (-0.134, - 0.176 et - 0.331) respectivement.

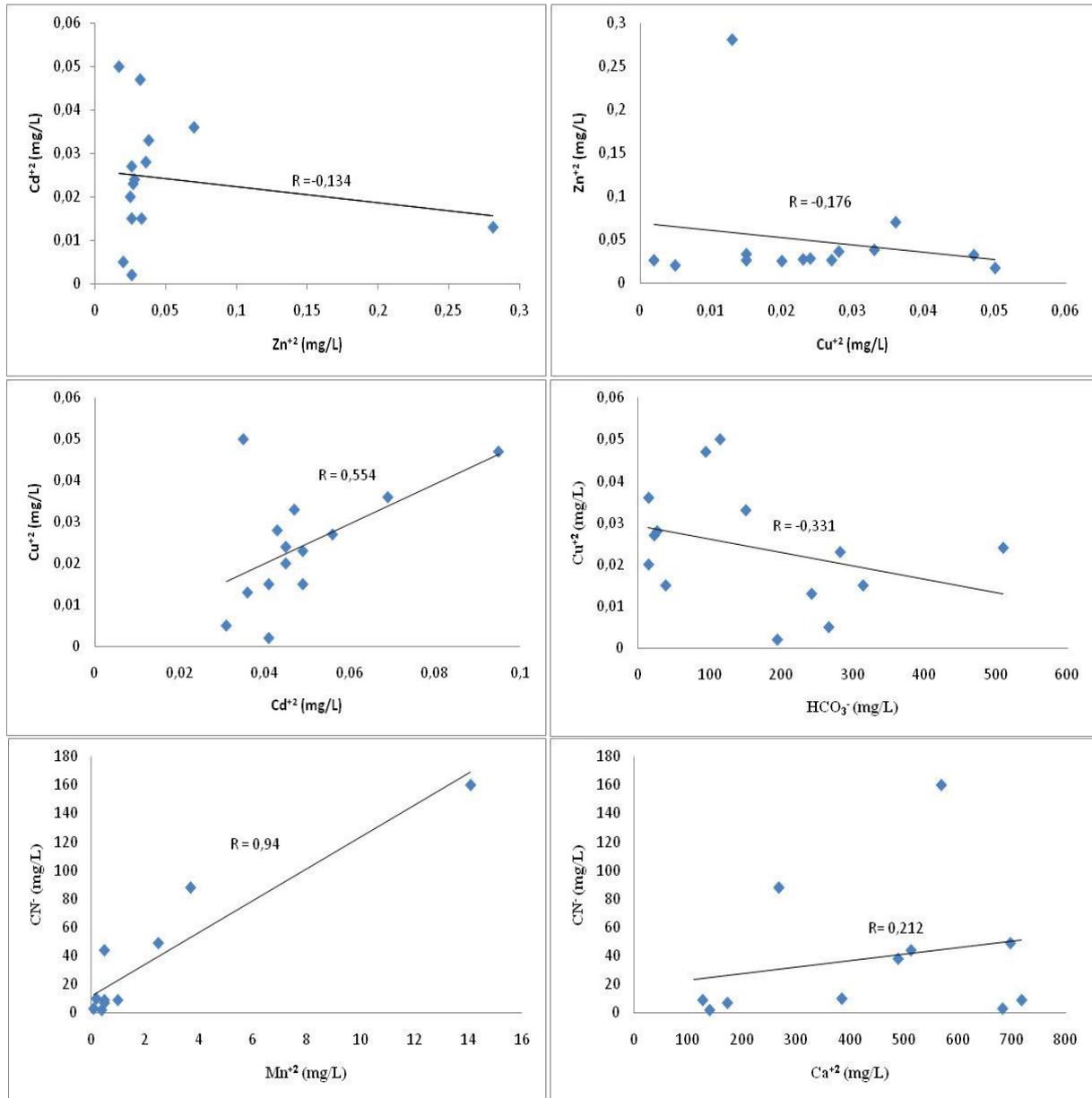


Figure 42c : Corrélation entre les valeurs de quelques paramètres de métaux lourds entre eux et entre quelques éléments majeurs

Chapitre: V

Impact des sites miniers abandonnés sur la région d'étude

I. Etude de l'eau**I.1. Caractéristique physico-chimique et concentration de métaux lourds dans les eaux souterraines****I.1.1. Paramètres physiques****a-Température**

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et la nature des écoulements de l'eau souterraine.

La température des eaux de l'aquifère Plio-Quaternaire varie entre **20 et 27°C**, pendant les mois d'été et entre **18 et 22°C** pendant les mois d'hiver.

b- pH

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure l'activité en ions H_3O^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples dont la température et l'origine de l'eau.

La figure ci-dessous, présente l'évolution des valeurs de pH, mesurés au niveau des points d'eau échantillonnés dans la région d'étude, ce pH est légèrement basique et varie entre **7.2** et **7.8** avec une moyenne de **7.44**; où on remarque une hétérogénéité sur presque toute la région d'étude, cette variation est due essentiellement au changement du faciès géologique qui varie d'un endroit à un autre, aussi on peut attribuer cette variation au CO_2 qui charge les eaux d'infiltration et aussi à l'importance de la zone saturée qui isole l'aquifère du contact avec l'air.

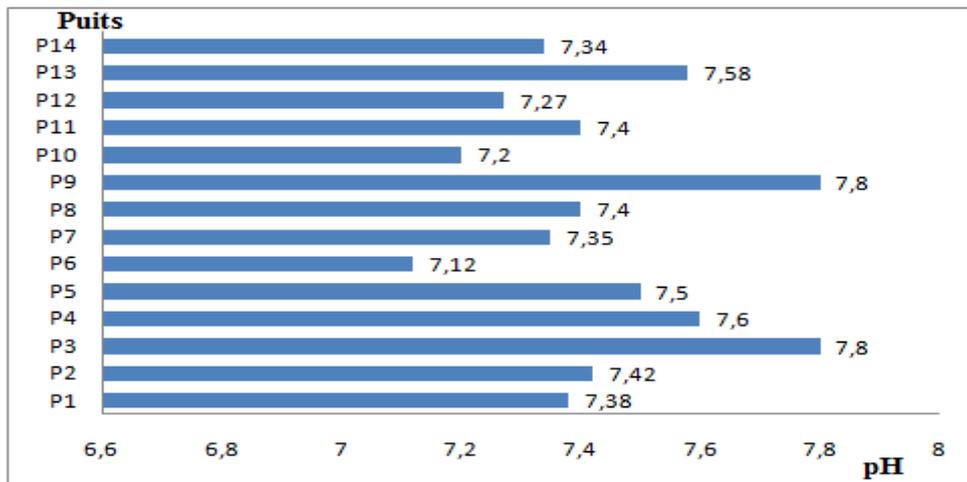


Figure 43: Evolution des valeurs de pH dans les points d'eau échantillonnés

c- Conductivité électrique et salinité

La conductivité électrique mesure l'aptitude de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau et par suite donner une idée sur la minéralisation totale d'une eau.

Les résultats enregistrés fournissent une forte concentration de conductivité électrique et de salinité qui dépassent la norme recommandée pour les eaux d'alimentation en eau potable, ils sont variés entre (872 et 37000 µS/cm) et (300 et 26200 mg/L), respectivement, (fig.44 et fig.45).

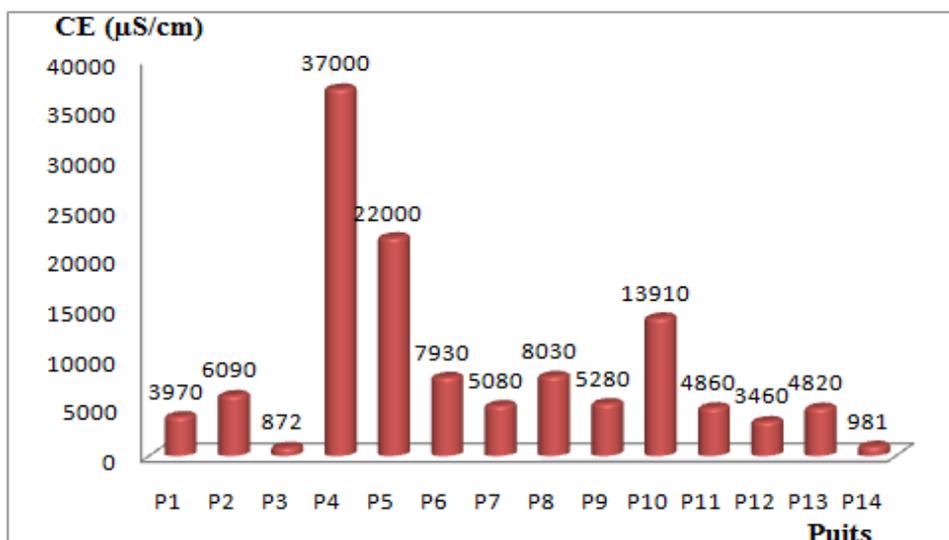


Figure 44: Concentrations de la CE dans les échantillons d'eau souterraine

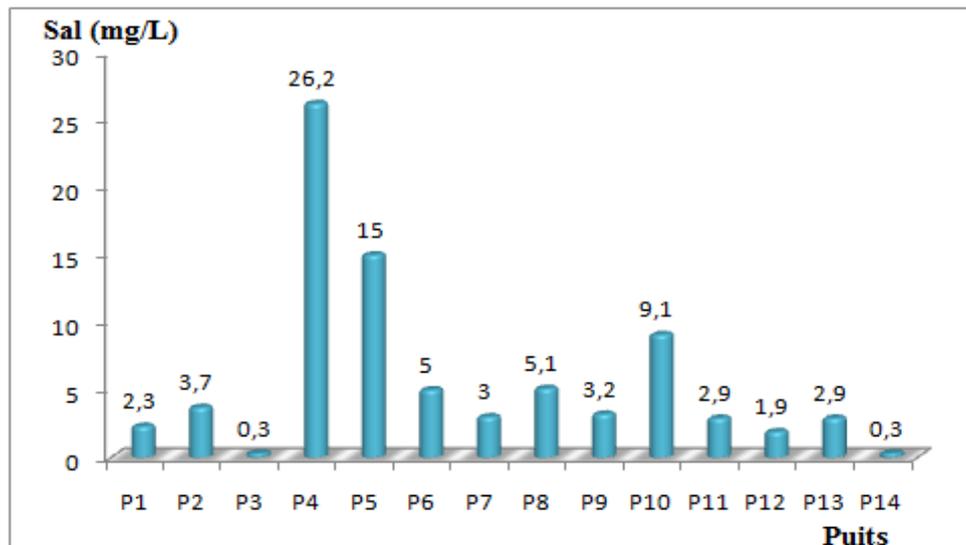


Figure 45: Concentrations de salinité dans les échantillons d'eau souterraine

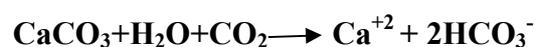
Suite à l'examen de la conductivité électrique, les eaux souterraines testées peuvent être classées en deux catégories; eau douce (<1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et eau salée (>3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Kumar et al.2015). Dans notre région d'étude, environ de 86% des échantillons analysés, ont été trouvés dans la deuxième catégorie c'est de l'eau salée et près de 14% des échantillons restants ont indiqué une qualité d'eau douce.

On peut observer que les zones de haute minéralisation sont principalement localisées dans toutes les stations de la zone d'étude, en particulier dans la partie centrale, au Sud-ouest et la partie nord (Djebel Belkfik et Djebel Mesloula), (P4, P5 et P10); où ils indiquent des signes d'influence des formations carbonatées ainsi que des formations marneuses du Cénomaniens et du Turonien (riches en gypse). Cependant, les valeurs de minéralisation diminuées sont localisées dans la cinquième station (région de Morsott), où l'influence des formations triasiques diminue.

I.1.2. Les cations majeurs

a- Calcium (Ca^{+2})

C'est un élément de la dureté totale. Son origine naturelle provient essentiellement de l'attaque des formations carbonatées par le gaz carbonique.



Le calcium est un élément essentiel des minéraux constituant les roches ignées, spécialement les silicates (pyroxène, amphibole et feldspaths).

Dans les roches sédimentaires, il se présente sous forme de carbonates (calcite, dolomite et aragonite), comme il fait parti de quelques minéraux évaporitiques à savoir le gypse et l'anhydrite et aussi dans les minéraux argileux sous forme de Ca-montmorillonite (Hem, 1985).

Dans la région d'étude, les valeurs enregistrées sont variés entre **109.82 mg/L** à **718.23 mg/L** avec une moyenne de **387.28mg/L**.

La figure ci-dessous montre que les valeurs les plus élevés ont été enregistrés dans la partie Est, Nord-ouest et dans la rive gauche de Oued Chabro dans la région d'étude, tandis que les faibles teneurs ont été observés dans la rive droite de Oued Chabro et au sud de la zone d'étude, notamment près de la ville de Morsott.

Selon l'OMS, tous les valeurs sont dépassées la norme recommandée pour l'eau potable (**100 mg/L**).

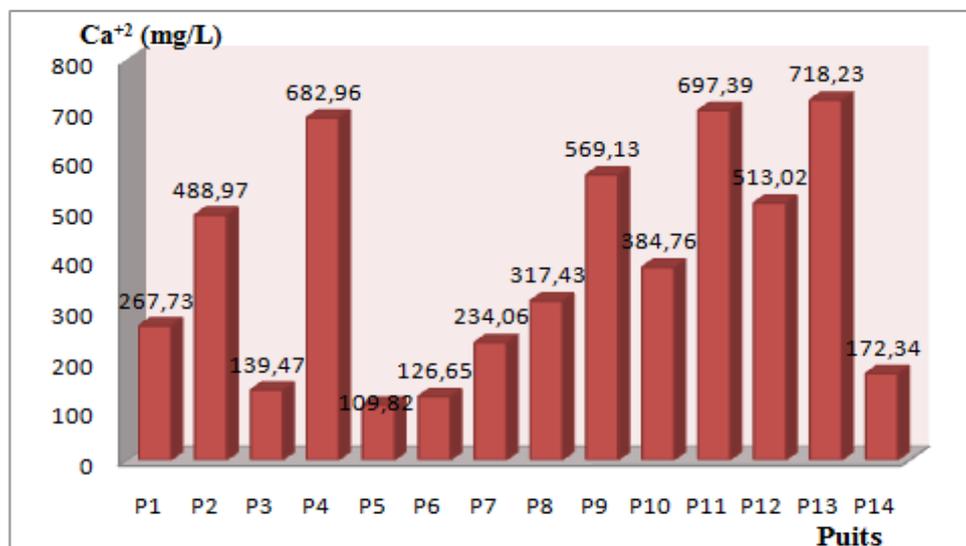


Figure 46: Evolution de la concentration de Calcium dans les puits de la région d'étude

La plus grande valeur a été enregistrée dans le Puits P13; cette valeur est probablement attribuée à l'influence de roches carbonatées (calcite et dolomite), qui caractérisent le substratum formées essentiellement de marno-calcaires d'âge Turonien.

b- Magnésium (Mg⁺²)

Le magnésium est un élément très répandu dans la nature (2.1% de l'écorce terrestre). C'est un constituant essentiel de différentes roches ignées noires ferromagnésiennes. Dans les roches sédimentaires, ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la

dissolution des formations dolomitiques en présence du gaz carbonique (CO₂) et de la dissolution des roches magnésiennes et aussi de la dissolution des formations gypsifères et argileuses. Sa dissolution est beaucoup plus longue que celle du calcium.

Un grand écart entre les grandes et les faibles valeurs de la concentration de magnésium. Elles sont variées entre **13.6 mg/L** et **637.63 mg/L**, avec une valeur moyenne égale à **270.85 mg/L**.

La figure 47, présente l'évolution de magnésium dans les puits de la région d'étude; qui sont identique à celle du calcium.

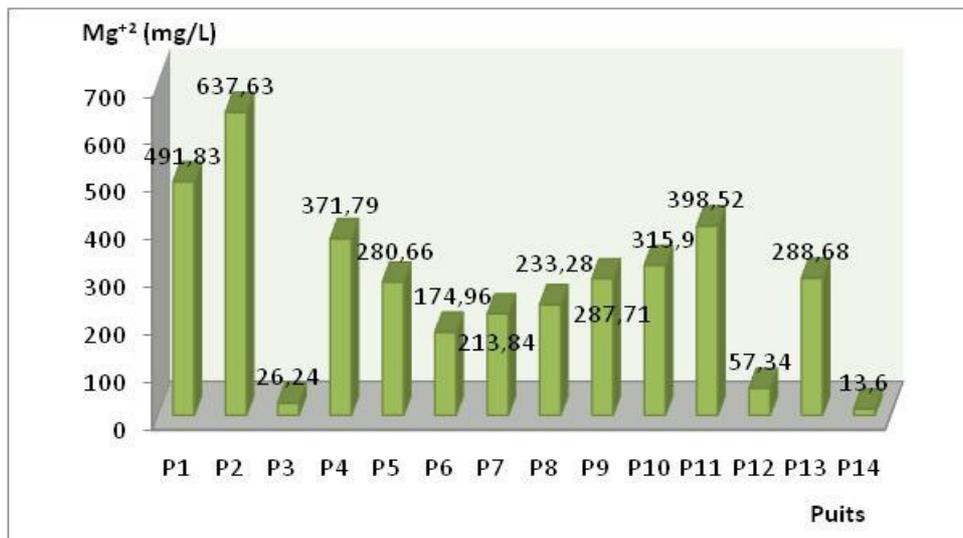


Figure 47: Evolution de la concentration de magnésium dans les puits de la région d'étude

Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans la partie centrale, Nord-ouest et Est de la région d'étude. Ces fortes concentrations peuvent être attribuées au contact direct de ces eaux avec le substratum marneux riche en gypse, halite et en brucite. Une autre source de magnésium peut provenir également des eaux salées dans cette région qui favorisent les conditions de la dolomitisation de la calcite. [Fehdi.C \(2008\)](#); a prouvé cette probabilité par le ratio des indices de saturations entre la dolomite et la calcite (*ISDol/ISCal*), qui varie entre **1.83 et 2.37**.

La faible valeur a été observée dans la partie sud de l'air d'étude près de la ville de Morsott (P14), ce qui peut être attribué au faible processus de la dolomitisation (*un faible indice de saturation, C. Fehdi 2008*).

c- Potassium (K⁺) et le Sodium (Na⁺)

Le Sodium est beaucoup plus abondant que le potassium. Il est toujours présent dans les eaux naturelles avec des teneurs variables. Ces ions sont généralement peu abondants dans les

terrains carbonatés. Leur présence n'est pas généralement associée à Cl^- , mais comme constituants des minéraux silicatés (argiles et marnes, qui sont souvent intercalées dans les calcaires), excepté dans certaines conditions particulières de gisement (diapir triasique).

A l'état solide, ces ions sont souvent associés et constituent les évaporites (NaCl , KCl) possédant un réseau cristallin que l'eau peut difficilement détruire. Ces ions existent en faible quantité dans les eaux de pluies qui lessivent les poussières atmosphériques.

Dans notre air d'étude, les concentrations de potassium et sodium varient entre (**1.2 mg/L et 32.8 mg/L**, avec une moyenne de **14.34 mg/L**), et (**38.8 mg/L et 3250 mg/L**, avec une moyenne de **792.71 mg/L**) respectivement.

La variation spatiale de ces éléments est représentée dans les figures 48 et 49, où on observe un grand écart entre les grands et les faibles valeurs.

Pour le potassium et le sodium, 85.72% et 50% d'échantillons, respectivement, sont dépassés la norme standard de l'eau potable.

Les plus fortes concentrations de potassium se localisent dans le secteur Est et Nord-est de la région d'étude surtout au niveau des points d'eau P1, P4, P10 et P11. La plus forte concentration a été enregistrée dans le puits P4 avec une valeur de **32.8 mg/L**. Cette forte teneur est peut être attribuée à la dissolution des roches évaporitiques du Trias (sels potassiques KCl). Au Sud et à l'Ouest de la zone d'étude les teneurs de K^+ diminuent pour atteindre un minimum de **1.2 mg/L** au niveau du point d'eau P14.

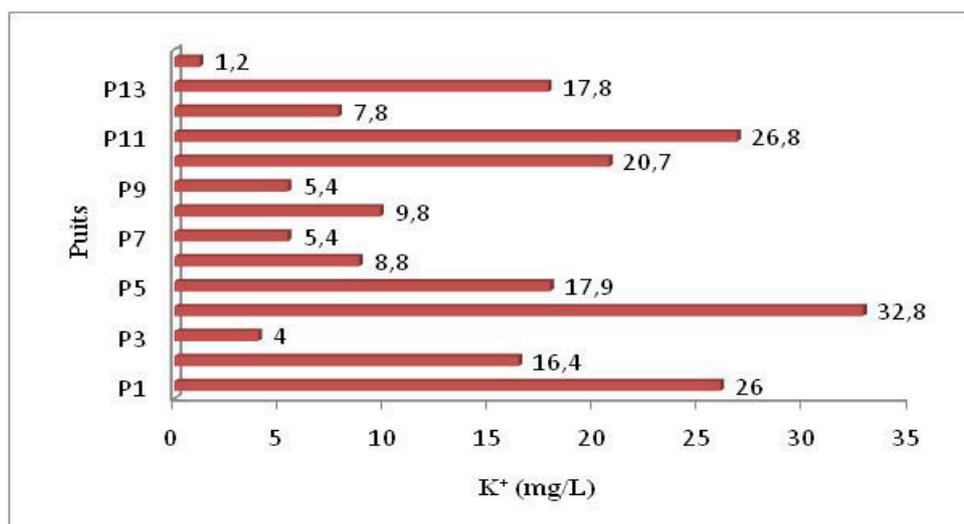


Figure 48: Evolution des teneurs de potassium dans les puits de la région d'étude

En ce qui concerne le sodium, la partie centrale (station 3) et la partie Sud-ouest (station 4) enregistrent les fortes valeurs de concentration; ces fortes teneurs sont attribuées à l'influence du Trias évaporitique qui constitue les bordures Est et Nord-est de la région d'étude (Trias de Boukhadra, Masloula). Dans les autres stations on a observé des faibles valeurs.

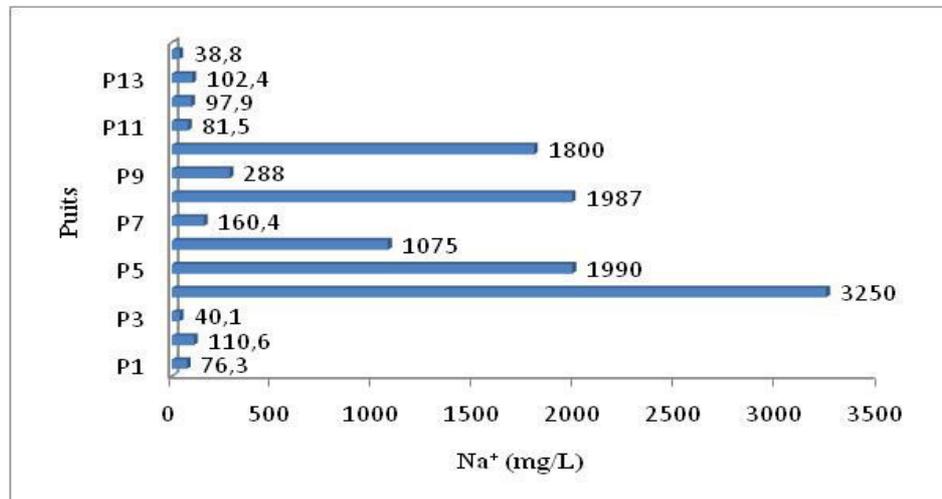


Figure 49: Evolution des teneurs de sodium dans les puits de la région d'étude

I.1.3. Les anions majeurs

a- Bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates de calcium et de magnésium sont des sels peu solubles. Cependant, ils occupent une part importante dans la minéralisation des eaux souterraines.

Leur mise en solution fait intervenir trois phases :

- ✓ Une phase solide bicarbonatée (roche).
- ✓ Une phase liquide (eau).
- ✓ Une phase gazeuse (CO_2) qui accroît considérablement les possibilités de mise en solution.

La dissolution ou la précipitation d'un carbonate fait intervenir une longue chaîne de réactions chimiques entre les différentes phases.

Des expériences théoriques réalisées sur des roches carbonatées ([Bakalowics 1979](#)), montrent que la vitesse de mise en équilibre entre la phase liquide et la phase solide est très lente devant celle de la dissolution du CO_2 . Le temps de réalisation des 90% de l'équilibre est de l'ordre de quelques jours (5 à 10 jours). Ce système $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-HCO}_3$ permet de mettre en évidence des

eaux à vitesse de transit rapide, se déplaçant en quelques heures ou quelques jours dans l'aquifère.

Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées, ainsi leur concentration dans l'eau est fonction de:

- ✓ La nature des terrains traversés ;
- ✓ La température de l'eau ;
- ✓ La pression de CO₂ dissout.

Les concentrations des bicarbonates dans les différents échantillons analysés de l'aquifère Plio-Quaternaire, varient entre un minimum de **14 mg/L** et un maximum de **510 mg/L** avec une moyenne égale à **162.86 mg/L**. La **figure 51**, montre que les concentrations les plus élevées se localisent dans la partie Est, la rive gauche de Oued Chabro et à l'Ouest de la région d'étude, où le puits P9 enregistre la valeur la plus élevée (**510 mg/L**); ces fortes valeurs sont attribuées probablement à l'influence des formations carbonatées d'âge Aptien, constituant le massif de Djebel Boukhadra et Mesloula.

Quand en allant vers le centre de la région d'étude, les concentrations de HCO₃⁻ diminuent pour atteindre la plus faible teneur au niveau de point d'eau P5 et P11 (**14 mg/L**).

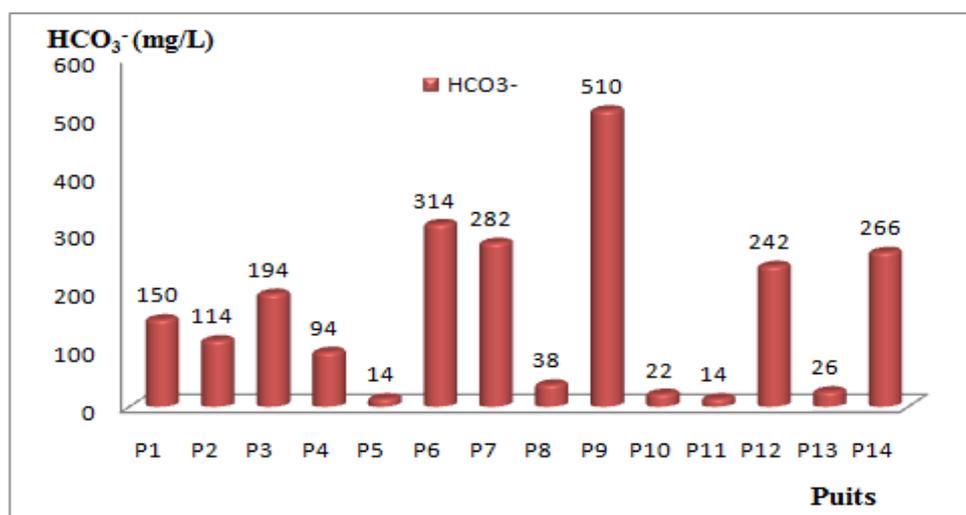


Figure 50: Evolution de Bicarbonates dans les puits de la région d'étude

b- Les sulfates (SO₄⁻²)

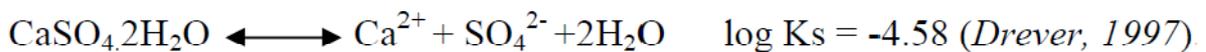
La concentration des eaux naturelles en sulfates est très variable. Ils résultent de :

- ✓ La solubilité des gypses (CaSO₄, 2H₂O);
- ✓ L'utilisation des engrais chimiques;

- ✓ Des eaux de pluie où le soufre présent dans l'atmosphère subit une oxydation ;
- ✓ Du lessivage des terrains argileux et marneux.

Par contre, la faible concentration en sulfate suggère un long séjour de ces eaux dans des formations carbonatées minéralisées (en PbS et ZnS) et argileuse qui doivent être à l'origine.

L'origine des sulfates, dans la région d'étude est attribuée au lessivage de gypses (CaSO₄, 2H₂O) et d'anhydrite (CaSO₄). Ces deux minéraux se dissolvent très rapidement en contacte avec l'eau, la réaction de dissolution de gypse est représentée par l'équation suivante (Freeze et Cheery, 1979) :



Le lessivage de gypse n'est pas la seule source de sulfates; l'autre source probable c'est le minerai sulfaté (Sphalérite ZnS, Galène PbS, Baryte BaSO₄, Pyrite FeS₂).

Les sulfures en présence d'eau s'oxydent en donnant les sulfates. Les réactions de dissolution de sulfure peuvent résumer de la façon suivante :



Un grand écart entre les valeurs de sulfates dans notre région d'étude, elles varient entre **7.58 mg/L** et **575 mg/L** avec une moyenne égale à **381.08 mg/L**.

Les fortes concentrations sont enregistrées dans la partie Nord et centre de la région d'étude (P1, P2, P4, P5, P6, P7, P8, P10 et P12), et sont dépassés les normes de potabilités (<200mg/L) avec un pourcentage de **64.29%**. Les faibles valeurs indiquées dans les puits P3, P9, 13 et P14 (**35.71%**), sont enregistrées dans la partie Sud et Est de notre air d'étude.

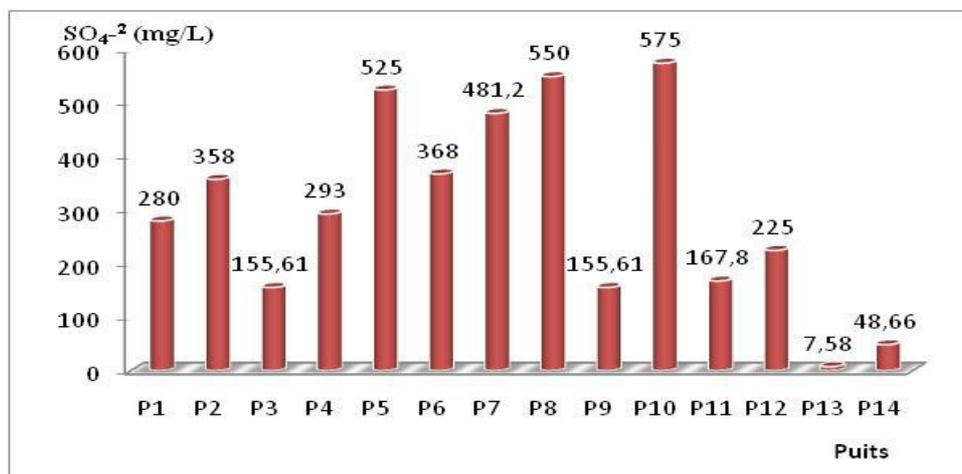


Figure 51: Evolution de sulfates dans les puits de la région d'étude

c- Les nitrates (NO_3^-)

Les nitrates constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique, ils sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et dans les plantes (nécessaires à la synthèse des végétaux). Les nitrates sont soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface.

Les sources d'azote peuvent être :

- La matière organique du sol par la minéralisation ;
- Les amendements organiques comme le fumier et les autres déchets ;
- Les engrais azotés.

La répartition spatiale de nitrates dans la zone d'étude (**fig.52**), montre que les concentrations se varient entre **2 mg/L** et **7.5 mg/L**, ces teneurs sont très faibles et dans la norme de potabilité (**> 50 mg/L**).

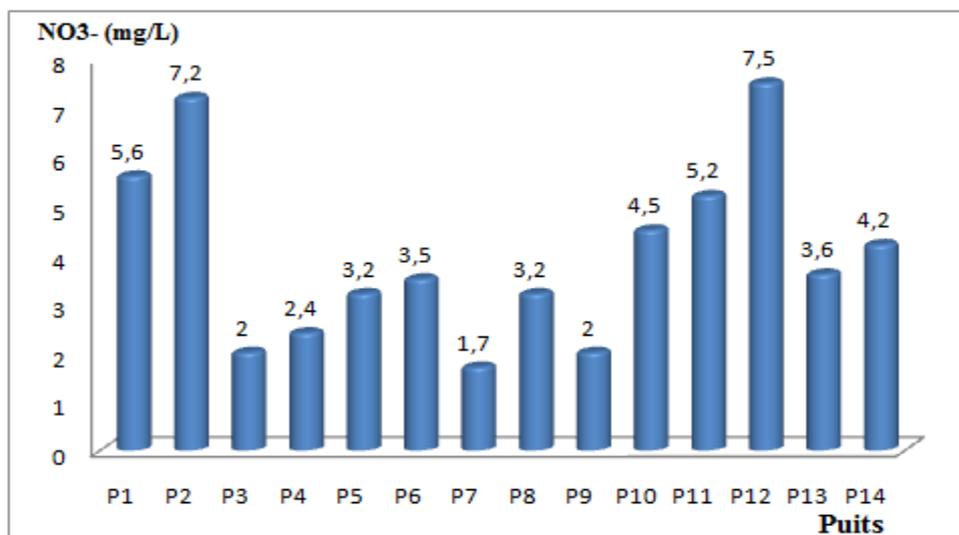


Figure 52: Evolution de nitrates dans les puits de la région d'étude

d-Les chlorures (Cl^-)

Très répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium (CaCl_2). Les ions chlorures (Cl^-), dans la grande partie se trouve dans les océans, constituent environ de 0.05 % de la lithosphère. De façon générale, l'ion chlorure est présent dans toutes les eaux à des concentrations différentes. Dans les eaux souterraines, les teneurs en ions chlorures peuvent atteindre quelques grammes par litre au contact de certaines formations géologiques.

Les teneurs en chlorures dans les eaux de l'aquifère Plio-Quaternaire enregistrées pendant toute la période d'investigation, montrent un écart important entre les différents points d'eau analysés (fig.53). Ces teneurs varient entre un minimum de **120,7mg/L** et un maximum de **17750 mg/L**, avec une valeur moyenne de **2714.74 mg/L**. Selon l'OMS (2006), la limite maximale admissible de chlorure dans les eaux souterraines est de 600 mg/L. Sur la base de cette limite, **28,57%** des échantillons d'eau souterraine sont dans la limite permise, tandis que le reste dépasse cette limite (**71.43%**).

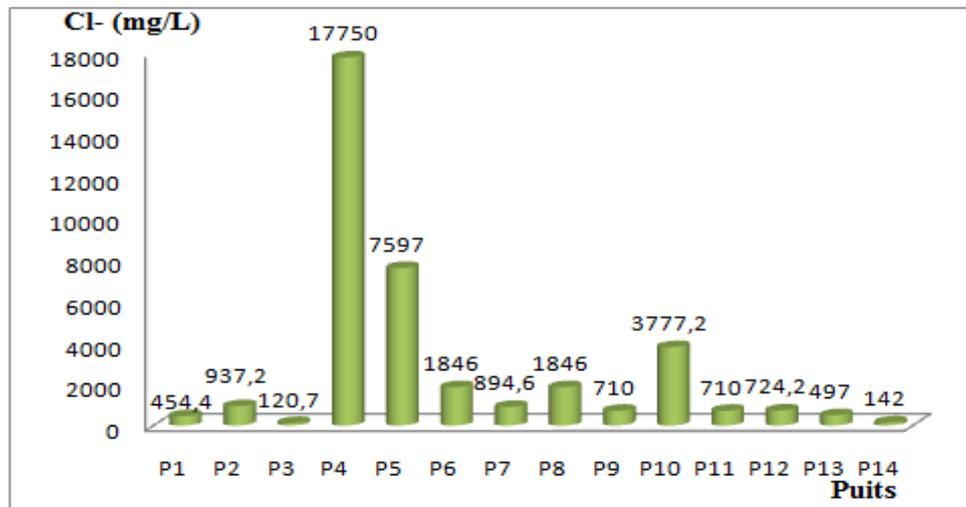


Figure 53: Evolution de chlorures dans les puits de la région d'étude

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie centrale (P4, P5) et au Sud-ouest (P10), tandis que les concentrations les plus faibles sont observées au point P3 et P14 (**120.7mg/L** et **142mg/L**) respectivement.

La répartition des teneurs des chlorures se corrèle bien avec celles de sodium, ce qui confirme l'origine salifère de ces deux éléments.

I.1.4. Evaluation du degré de contamination métallique des eaux souterraines

a- Cadmium (Cd^{+2})

Dans la région d'étude, les concentrations de cadmium se varient entre **0.031 mg/L** et **0.095 mg/L** avec une valeur moyenne égale à **0.058 mg/L**.

Toutes les valeurs mesurées dans les puits de la région d'étude sont dépassées la norme standard de l'eau potable (OMS 2006).

La figure 54, présente la variation spatiale de cadmium au cours de la période d'investigation. Les fortes valeurs augmentent quand allant vers le centre, où on a enregistré la grande valeur dans le puits P4.

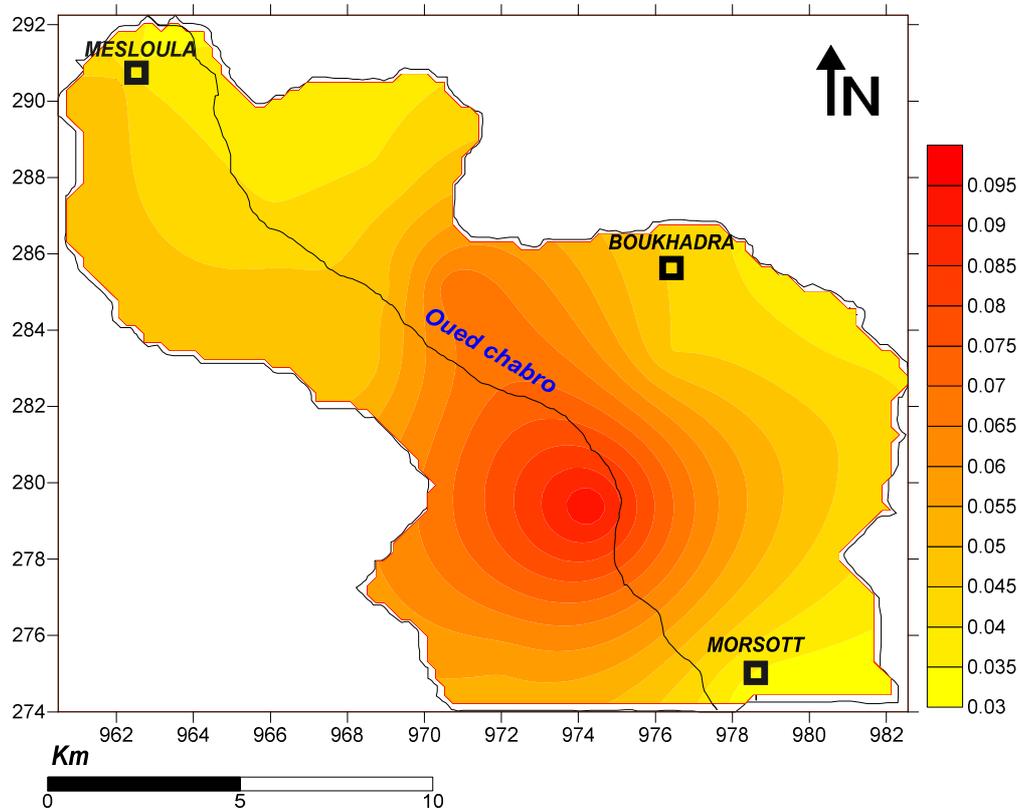


Figure 54: Carte de contour du cadmium dans les échantillons d'eau souterraine

Ces fortes teneurs peuvent être dues au lessivage des formations de bordures de l'aquifère Plio-Quaternaire, où il existe des gisements minières; la mine de Mesloula au Nord et la mine de Boukhadra à l'Est. Les teneurs en Cadmium évoluent avec le sens d'écoulement qui se dirige vers Oued Chabro, d'où on a enregistré des teneurs très chargés par le Cadmium.

b- Cuivre (Cu^{+2})

Toutes les valeurs enregistrées de cuivre sont dans les normes standards de potabilités, elles sont variées entre **0.002 mg/L** et **0.05 mg/L** avec une moyenne de **0.024 mg/L**.

La distribution spatiale (fig.55), montre que les fortes concentrations sont observées dans la partie Nord et la partie centre dans notre air d'étude.

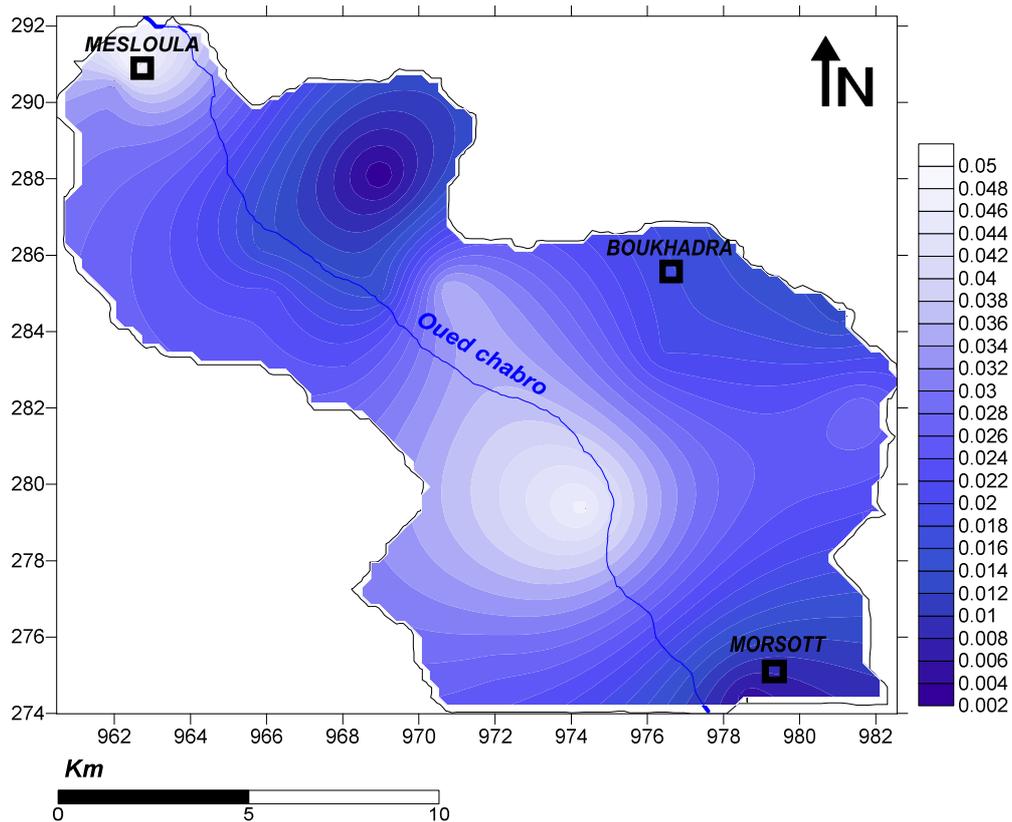


Figure 55: Carte de contour du Cuivre dans les échantillons d'eau souterraine

c- Zinc (Zn^{+2})

Les valeurs enregistrées de Zinc sont variées entre **0.017 mg/L** et **0.281 mg/L** avec une moyenne égale à **0.048mg/L**.

Selon l'OMS, ces teneurs sont dans les normes standards de l'eau potable (**3 mg/L**).

On observe que la partie Est indique les fortes valeurs de concentration (P12), qui peuvent être attribuées au gisement de Boukhadra.

Les concentrations de Zinc diminuent en s'éloignant de la région de Boukhadra, où on enregistre des faibles valeurs dans la partie extrême Nord et dans le Sud-est de l'aquifère Plio-Quaternaire.

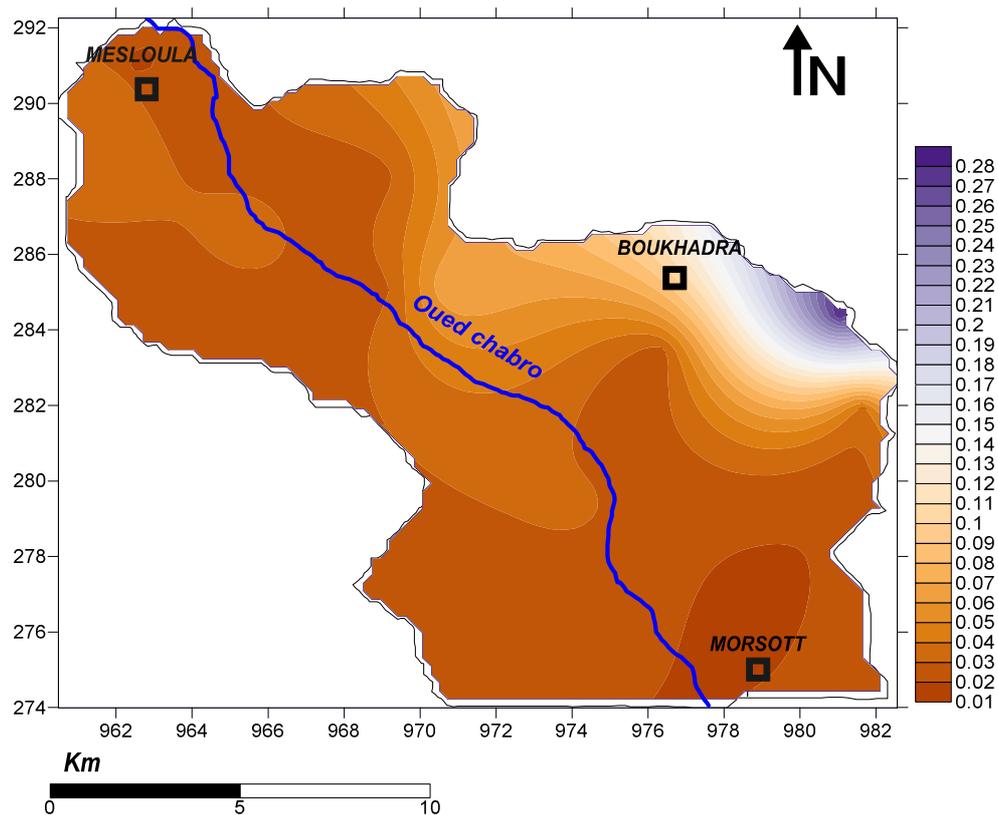


Figure 56: Carte de contour du Zinc dans les échantillons d'eau souterraine

d- Fer

La distribution spatiale de fer (**fig.57**), durant la période d'investigation montre que la concentration de cet élément augmente dans la partie Est et Nord-est de la région d'étude. Ces valeurs sont variées entre un minimum égale à **0.047 mg/L** et un maximum de **17.3 mg/L**, avec une moyenne de **1.36 mg/L**.

On a enregistré la valeur la plus élevée dans le puits P5 (**17.3 mg/L**). Ces fortes teneurs peuvent être attribuées au lessivage de terrains avec dissolution des minerais spécialement le Fer à partir de la mine de Fer de Boukhadra qui constitue la bordure est de notre terrain d'étude. Une autre source de Fer peut être liée à l'oxydation de la pyrite contenue dans les sédiments par les eaux d'infiltration qui sont riches en oxygène et par l'effet de bactéries « *Thiobacillus ferroxidans* » ([Forstner and Wittmann, 1983](#)).

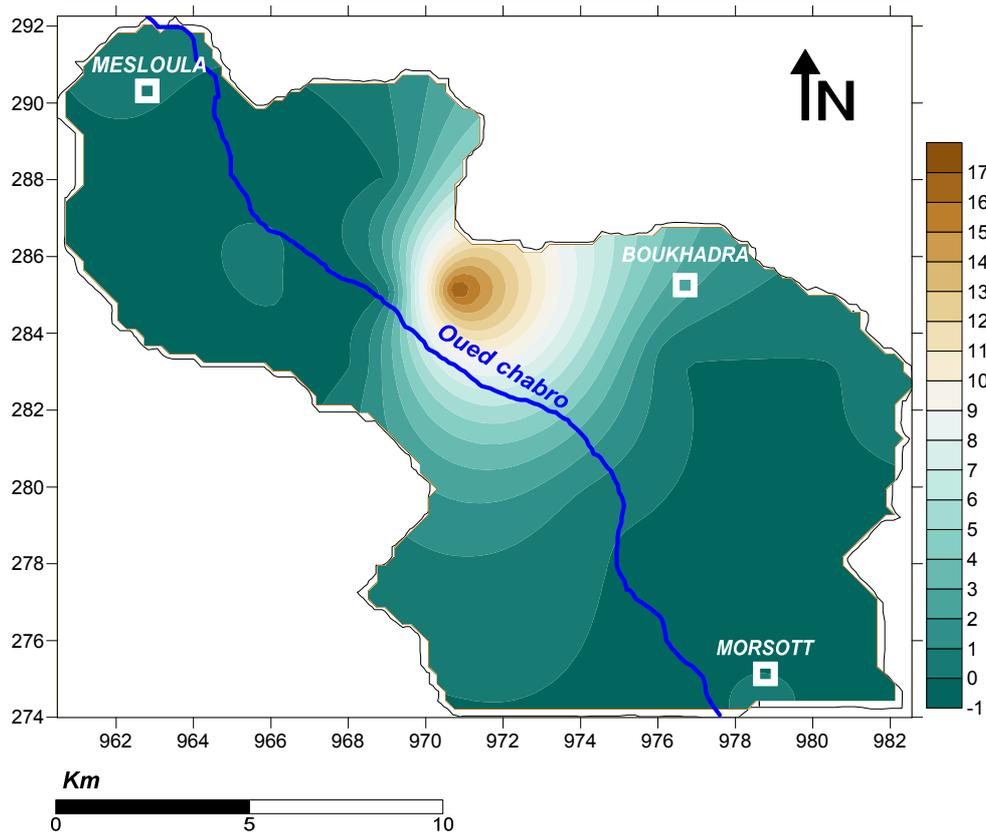


Figure 57: Carte des contours du Fer dans les échantillons d'eau souterraine

e- Cyanure (CN⁻)

Les teneurs en Cyanure dans les eaux de l'aquifère Plio-Quaternaire enregistrées pendant toute la période d'investigation, sont variées entre **2 mg/L** et **160 mg/L** avec une valeur moyenne égale à **38.09 mg/L**.

Ces valeurs sont très élevées et dépassent les normes standards de l'eau potable (**0.07 mg/L**).

La carte de distribution de cyanure (**fig.58**), montre que les teneurs élevées se concentrent dans la partie centrale plus précisément dans la rive gauche de Oued Chabro et dans la bordure Ouest de la zone d'étude.

Les faibles valeurs sont enregistrées dans la partie Nord-est (P3) et la partie Sud (P4 et P14).

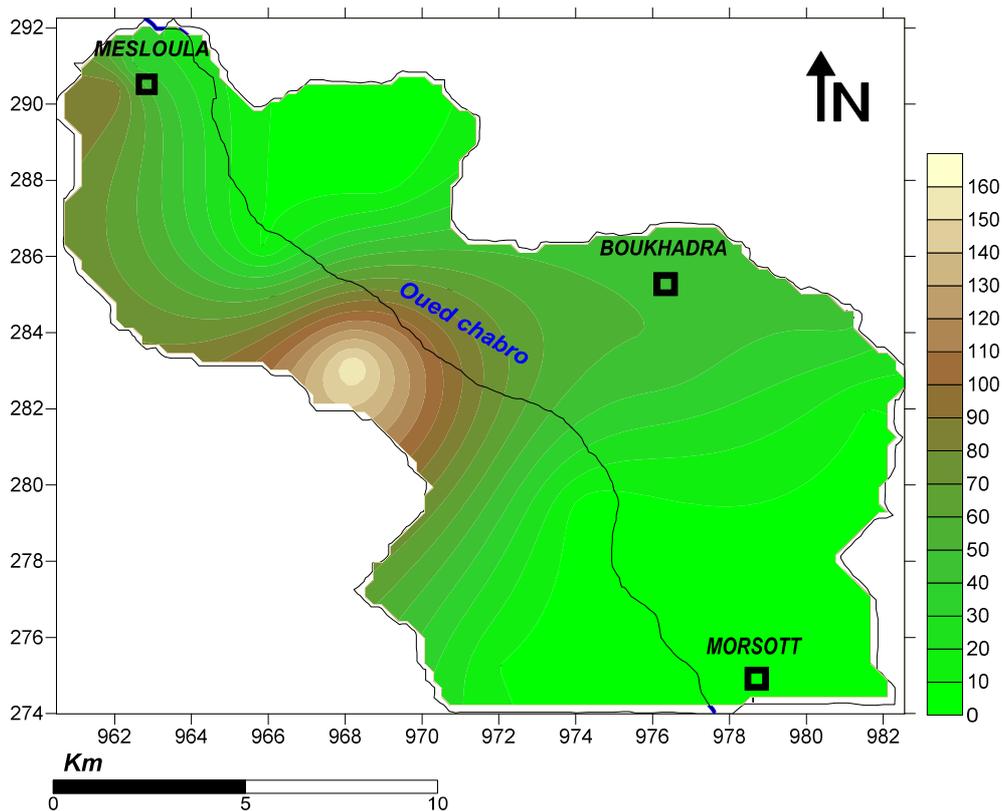


Figure 58: Carte des contours du Cyanure dans les échantillons d'eau souterraine

f- Manganèse

Les concentrations de Manganèse mesurées dans les puits de l'aquifère de Morsott-El Aouinet vont de **0.1 mg/L** et **14.1 mg/L** avec une moyenne de **2.35 mg/L**.

78.57% d'échantillons sont enregistrées des concentrations en manganèse dépassent la norme standard de l'eau potable (**0.4 mg/L**) selon l'OMS 2006.

La distribution spatiale de Manganèse (**fig.59**), montre que les concentrations de Manganèse se suivent le même sens de distribution de Cyanure.

Le puits P9, indique la plus forte valeur (**14.1 mg/L**), tandis que le puits P4 enregistre la valeur la plus faible dans la région d'étude.

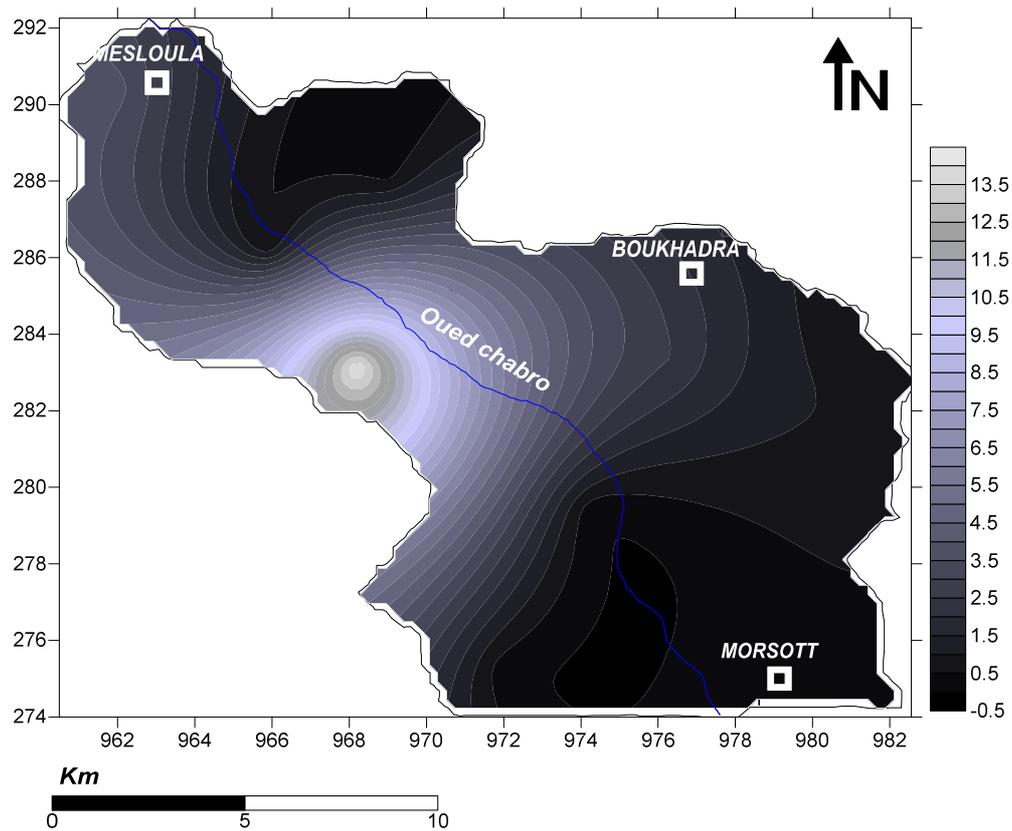


Figure 59: Carte des contours du Manganèse dans les échantillons d'eau souterraine

I.4. Indice de pollution des eaux souterraines

On rappelle que l'indice de pollution des eaux souterraines est une échelle numérique, quantifiant l'étendue de la contamination. Il reflète une influence composite des mesures individuelles de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau de l'aquifère.

La **figure 60**, représente la distribution des valeurs de l'indice de pollution dans tous les points d'échantillonnage, où les résultats ont été obtenus se varie entre "**0,59 à 7,07**".

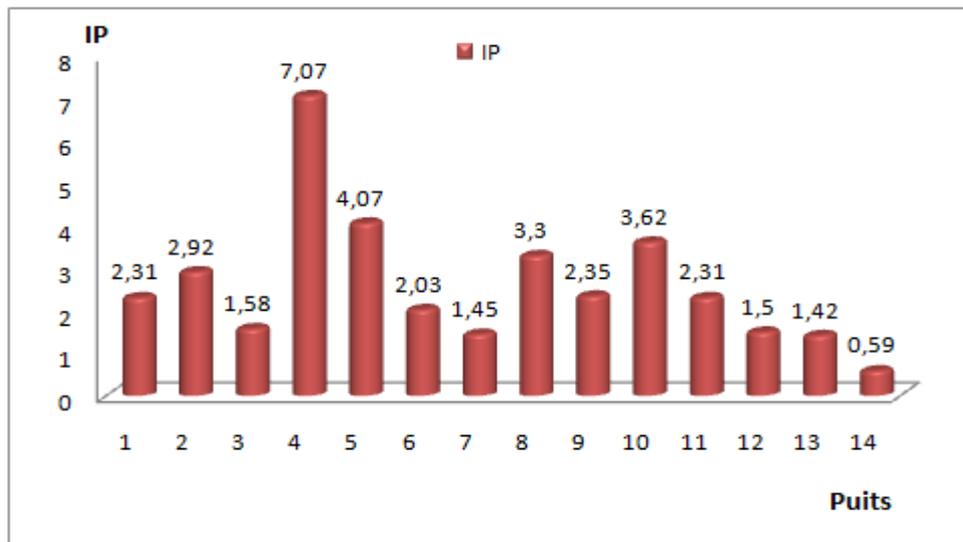


Figure 60: Distribution des valeurs de l'indice de pollution dans tous les points d'échantillonnage

La figure ci-dessous illustre le taux de contamination dans les différentes stations de la région d'étude où les résultats se varient entre 0.59 et 5.34

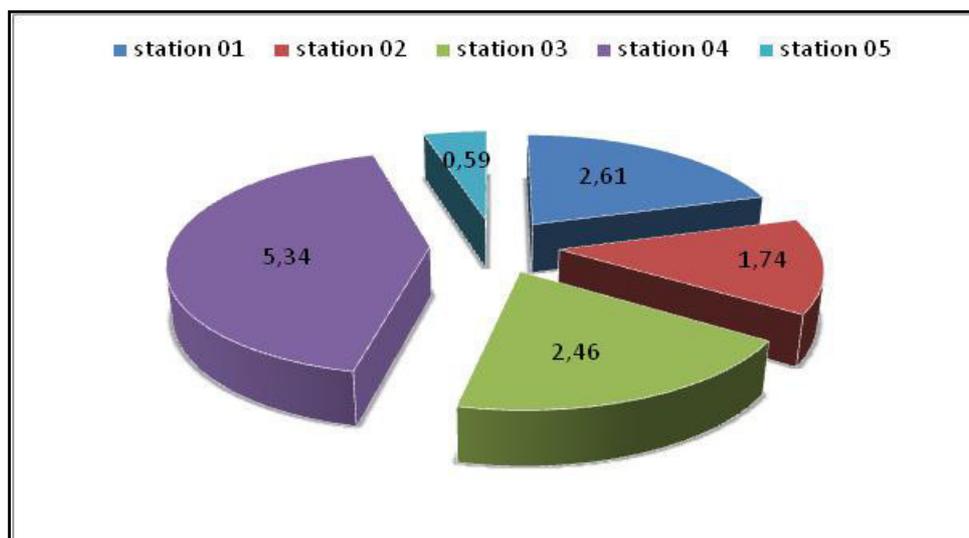


Figure 61: Le taux de contamination dans les différentes stations de la région d'étude

A la base de cette indice, la zone d'étude peut être subdivisée en cinq classes: pollution insignifiante ($IP < 1,0$), faible ($IP: 1,0 \text{ à } 1,5$), modérée ($IP: 1,5 \text{ à } 2,0$), élevée ($IP: 2,0 \text{ à } 2,5$) et très élevée ($IP > 2,5$). Les valeurs les plus basses sont obtenues en amont à l'Est de ce bassin versant, cette station (**station 5**) est éloignée de tous les apports anthropiques domestiques et industriels. La zone la plus polluée est située dans la partie centrale où les points de prélèvement sont répartis des deux côtés d'Oued Chabro. Dans cette zone (**station 3**), l'indice de pollution se varie entre 1,45 et 7.07 avec une moyenne égale à 5.34.

Dans les autres stations (station 1, station 2 et station 4), l'indice de pollutions mesuré est égale à **1.74**, **2.46** et **2.61** respectivement, ces stations sont modérément à très polluées. Les eaux souterraines de cette région sont associées au chlorure, cela indique que la qualité de l'eau souterraine dans la zone d'étude est principalement influencée par la source d'origine géogénique.

II. Etude de sol

II.1. Caractéristique physico-chimique et concentration de métaux lourds dans le sol

II.1.1. Paramètres physique

La mesure des paramètres de salinité c'est une étape très importante dans l'identification de la qualité de sol.

Dans la région d'étude, les concentrations de conductivité électrique (**fig.62**), de sels dissous et de la salinité (**fig.63**), se varient entre **153 à 5200 μ S/cm**, **268 à 2964 mg/L** et de **0 à 1500 mg/L**, respectivement.

Les zones de forte minéralisation sont localisées dans la partie Nord (près de la mine abandonnée de Mesloula), Nord-est et la partie Est, où se trouve la mine de Boukhadra.

Pour la conductivité électrique et la salinité, **90%** d'échantillons sont dépassées la norme standard de l'eau potable (l'OMS 2006) et **50%** pour le TDS. L'échantillon S2 est marqué la valeur la plus élevée dans les trois paramètres (**5200 μ S/cm**, **1500** et **2964 mg/L** respectivement). Ces fortes valeurs sont probablement dues à l'influence des terrains triasiques salifères riches en Halites.

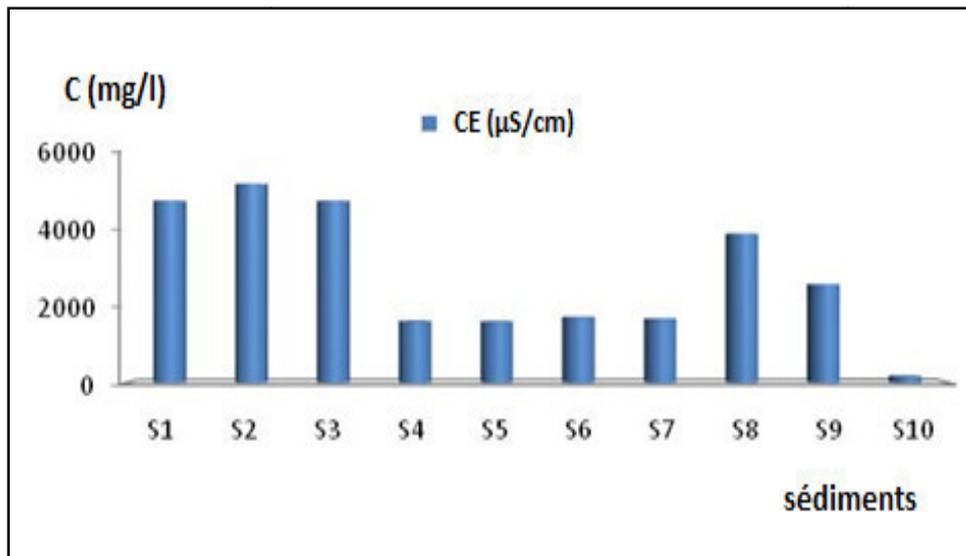


Figure 62: Concentrations de la CE dans les lixiviats

Les faibles valeurs de minéralisation sont enregistrées dans la partie Sud de la région d'étude pratiquement près de la région de Morsott. L'influence du Trias s'amortit, la minéralisation globale diminue. L'échantillon S10 enregistre la valeur la plus basse dans tous les paramètres physiques mesurés.

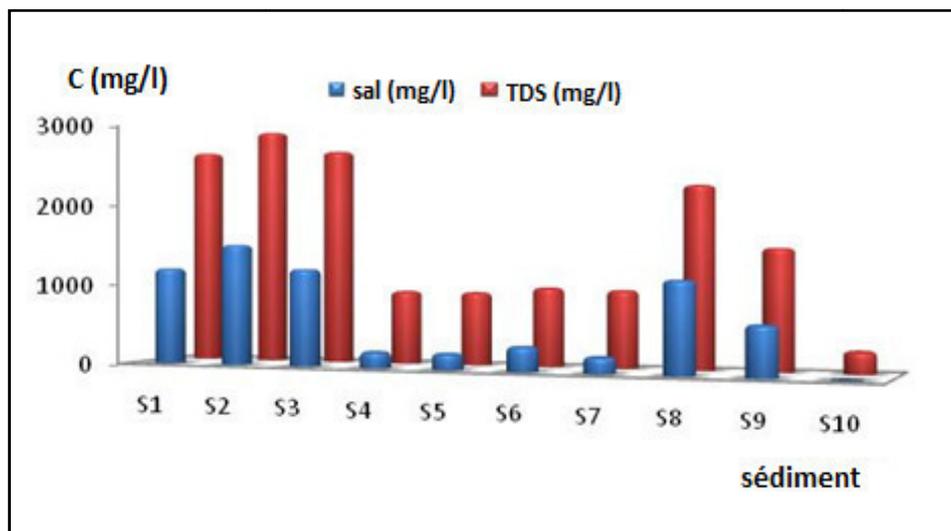


Figure 63: Concentrations de la salinité et de la TDS dans les lixiviats

II.1.2. Cations

Tous les résultats des cations mesurés dans les lixiviats sont représentés dans la figure ci-dessous.

Les analyses faites sur les échantillons de sol (lixiviats), indiquent que plus de 70% d'échantillons sont dépassé la norme standard pour le Ca^{+2} et Mg^{+2} . En ce qui concerne le K^{+} , 10% d'échantillon a été dépassé la norme standard. Toutes les valeurs de Na^{+} restent dans la limite admissible.

Un grand écart a été enregistré entre les faibles et les fortes valeurs de Na^{+} et K^{+} , elles sont variées entre (17.2mg/L à 40.6mg/L et 3mg/L à 25.2mg/L), respectivement.

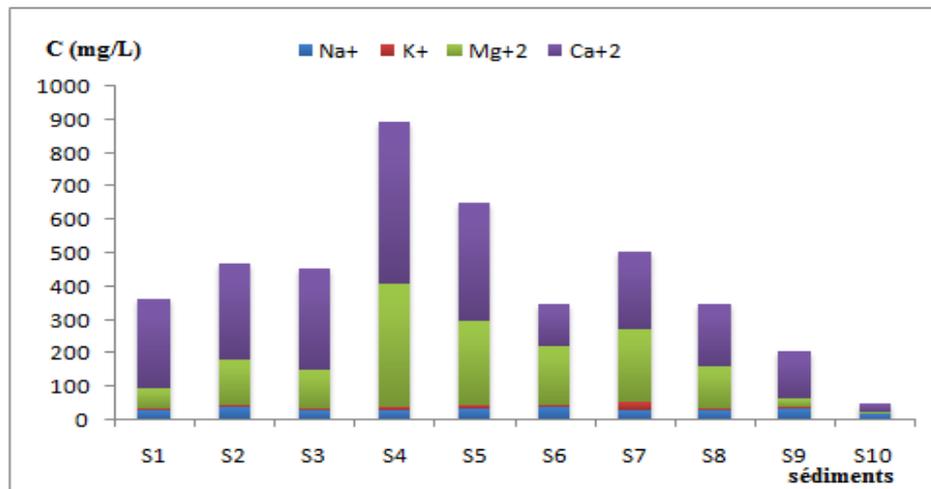


Figure 64: Concentrations des cations dans les lixiviats

Une grande homogénéité dans la répartition des concentrations de Ca^{+2} . Le parcours de Mg^{+2} suit la même distribution que celle de Ca^{+2} .

II.1.2.1. Sodium et Potassium

La distribution spatiale de Na^{+} et K^{+} a été illustrés dans la figure 65.

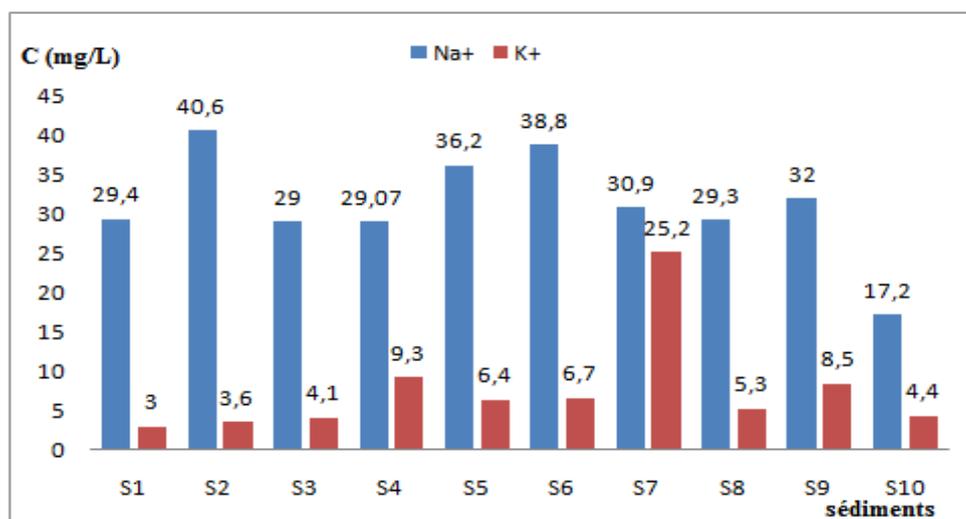


Figure 65: Concentration de Na^{+} et K^{+} dans les lixiviats

a/ Sodium

Les grandes valeurs de sodium sont observées dans la partie amont et centrale de l'aquifère Plio-Quaternaire. Les échantillons S2 et S6 enregistrent les fortes concentrations (**40.6 mg/L** et **38.8 mg/L**, respectivement).

La plus faible valeur a été enregistrée dans la partie sud-est de l'air d'étude (la rive droite d'Oued Chabro), avec une valeur égale à **17.2 mg/L**.

b/ Potassium

Dans les sédiments, le potassium se trouve essentiellement dans les feldspaths altérés, dans les particules des micas ou dans les minéraux argileux sous forme de cation d'inter couches, comme c'est le cas pour l'illite, la vermiculite, le chlorite, le mica hydraté et la montmorillonite. Cependant les sols riches en vermiculite et en montmorillonite produisent plus de potassium que les sols qui sont dominant en kaolinite. Les transformations, les relations et les différentes formes de K^+ sont résumés dans la **figure 67**:

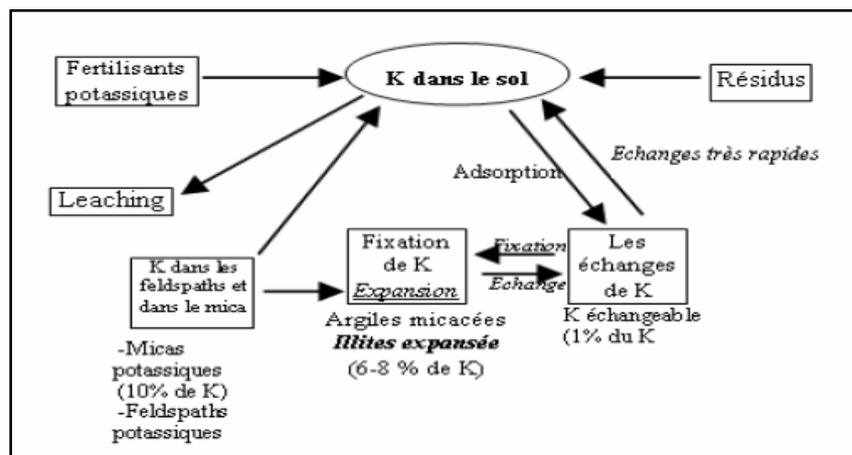


Figure 66: Le cycle de potassium dans le sol (Tisdale et al 1993)

Les valeurs de K^+ augmentent qu'on va vers la partie aval pour atteindre un maximum égale à **25.2 mg/L (S7)**. Cette augmentation brutale peut être du à la présence des sols argileux dominant cette partie de la zone d'étude.

II.1.2.2. Calcium et Magnésium

La figure ci-dessous représente la distribution des concentrations de Mg^{+2} et Ca^{+2} dans la région d'étude durant la campagne d'investigation.

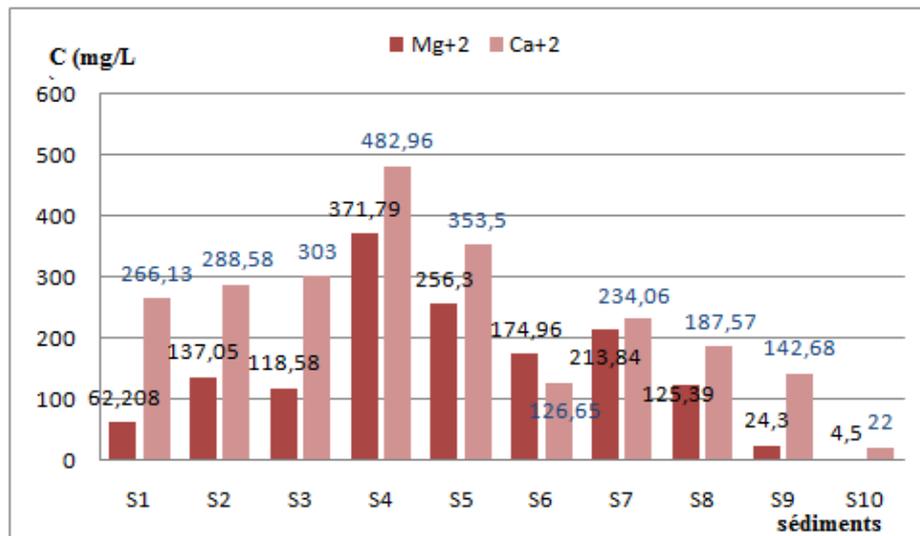


Figure 67: Concentration de Ca⁺² et Mg⁺² dans les lixiviats

a/ Calcium

La concentration en calcium est marquée par des valeurs élevées en aval et dans la partie centrale de l'aquifère Plio-Quaternaire. Il suit pratiquement la même évolution que la conductivité électrique. Les valeurs mesurées se varient entre un maximum égal à **482.96 mg/L** et un minimum égal à **22 mg/L**, avec une valeur moyenne de **240.71 mg/L**.

b/ Magnésium

Les concentrations de Mg⁺² se varient entre **4.5 mg/L** et **371.79 mg/L** avec une moyenne égale à **148.89 mg/L**. Les concentrations de Mg⁺² s'augmentent en allant vers le centre ; il atteint une concentration maximale égale à **371.79 mg/L** dans l'échantillon S4 et une concentration minimale égale à **4.5 mg/L** mesuré dans l'échantillon S10.

II.1.3. Anions

La variation de nitrates, de chlorures, de sulfates et de bicarbonates sont illustrés dans la **figure 68**.

Dans la majorité des échantillons de sol analysés le chlorure est le minérale le plus dominant suivi de bicarbonate.

Les sulfates et les nitrates sont présents avec des concentrations dans les normes standards de potabilités.

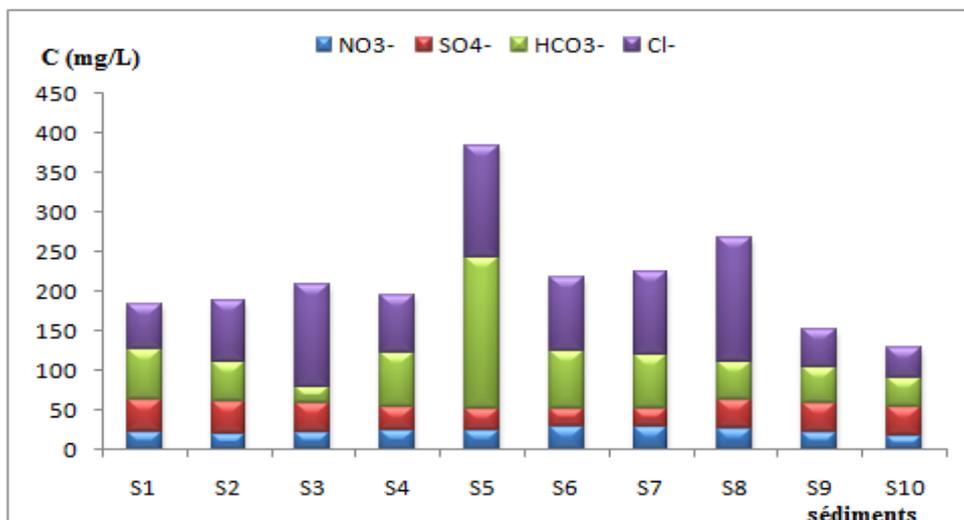


Figure 68: Concentrations des anions dans les lixiviats

II.1.3.1. Chlorures et Bicarbonates

Les concentrations de chlorures se varient entre **38 mg/L** et **156.2 mg/L** avec une moyenne égale à **91.84 mg/L (fig.70)**, alors que les concentrations de bicarbonates se varient entre **19 mg/L** et **191 mg/L** avec une moyenne égale à **64.6 mg/L (fig.69)**.

Toutes les valeurs de HCO₃⁻ et Cl⁻ sont dans les normes standards (l'OMS 2006).

Les fortes valeurs de chlorure sont enregistrées dans les échantillons S3, S5, S7 et S8 et dans l'échantillon S5 pour le bicarbonate.

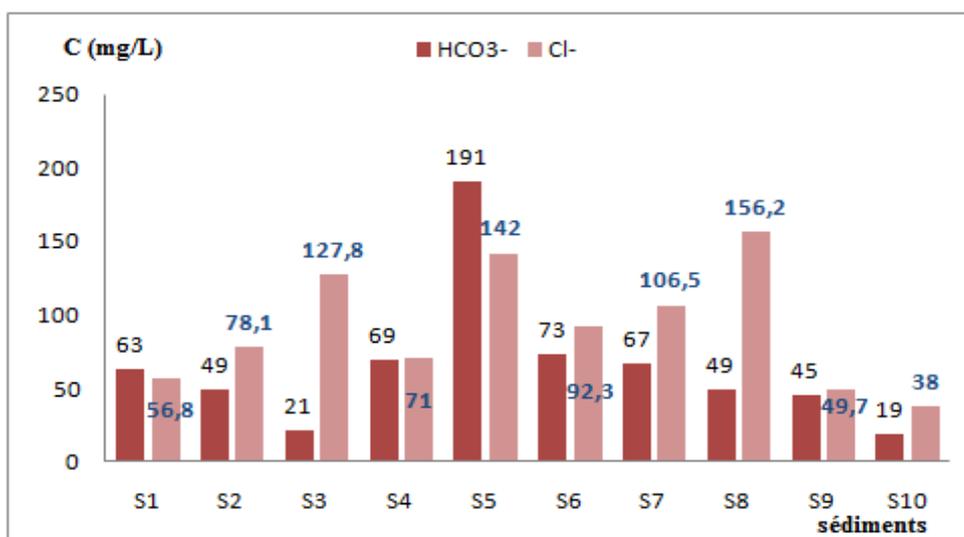


Figure 69: Concentrations de Cl⁻ et HCO₃⁻ dans les lixiviats

II.1.3.2. Nitrates et Sulfates

La variation spatiale de nitrates et sulfates dans les lixiviats a été illustrée dans la **figure 70**.

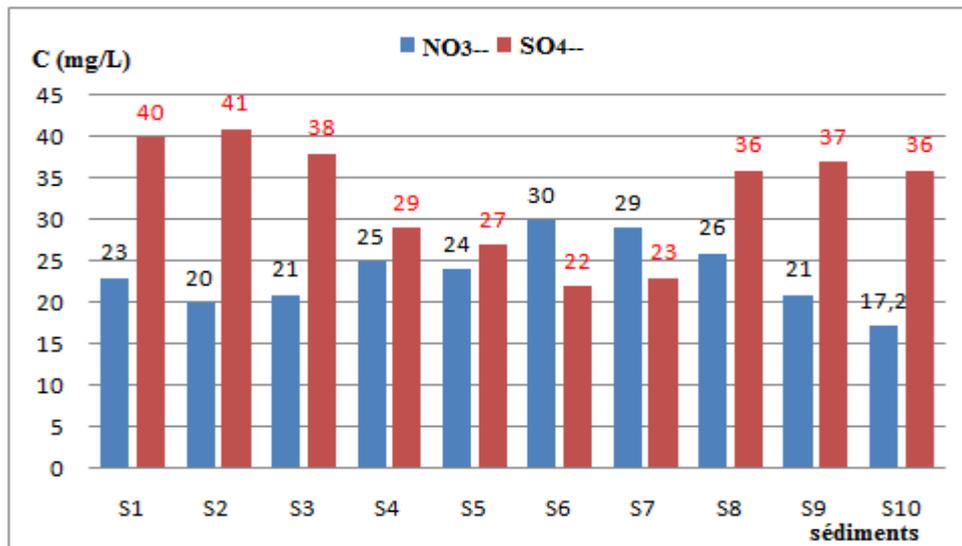


Figure 70: Concentrations de NO₃⁻² et SO₄⁻² dans les lixiviats

Toutes les valeurs mesurées de NO₃⁻² et SO₄⁻² sont dans les limites admissibles.

a/ Nitrates

La constitution du stock d'azote minéral dans le sol est issue des apports d'engrais de synthèse, sous forme d'ammonium, de nitrates et d'urée, le cycle de l'azote dans le sol est très complexe, il est représenté sous forme simplifiée dans la figure ci-dessous.

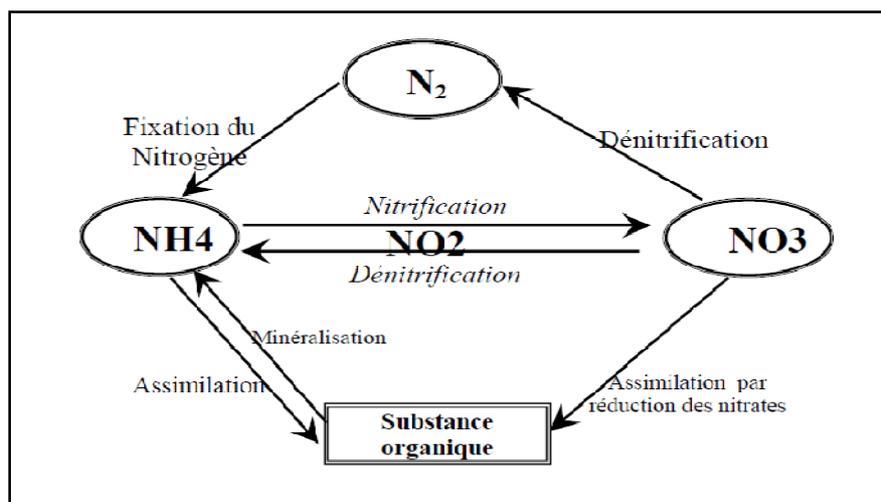


Figure 71: Le cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991)

Dans l'air d'étude, les concentrations de nitrates se varient entre **17.2 mg/L** et **30 mg/L** avec une moyenne égale à **23.62 mg/L** (fig.71). On remarque une stabilisation de ce paramètre dans toute la région d'étude.

b/ Sulfates

Le sulfure est présent dans le sol sous forme organique et inorganique, les formes inorganiques sont : SO_4^{-2} soluble, le SO_4^{-2} adsorbé, le SO_4^{-2} insoluble et le sulfure réducteur inorganique. Notant que le SO_4^{-2} soluble et le SO_4^{-2} adsorbé sont les plus utilisés par les plantes (Tisdale et al.1993). Le cycle biologique de sulfure dans le sol est représenté dans la figure 72.

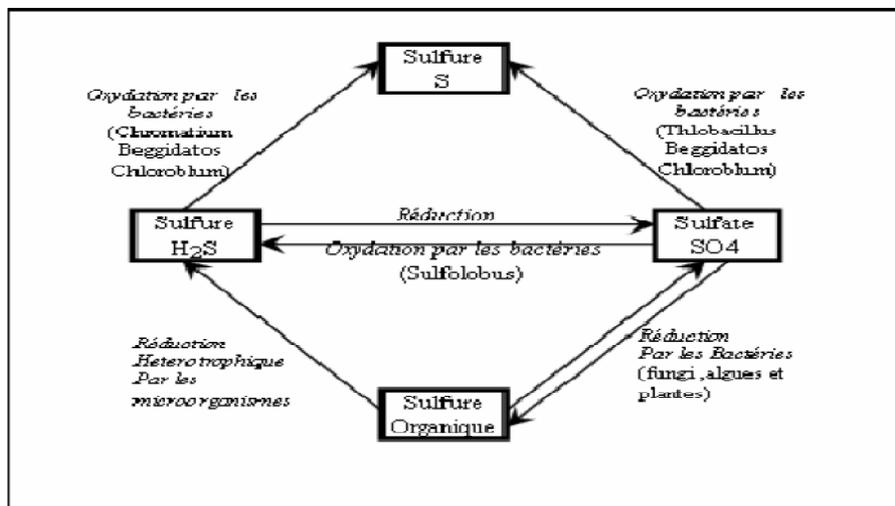


Figure 72: Cycle biologique de sulfure dans le sol (Trudinger et Sawain, 1979)

Les concentrations de sulfates se varient entre **22 mg/L** et **41 mg/L** avec une moyenne égale à **32.9 mg/L** (fig.70).

Les fortes valeurs se concentrent dans la partie amont et aval de l'aquifère Plio-Quaternaire ; tandis que les faibles concentrations ont été trouvées dans le centre (S4, S5, S6 et S7).

II.1.4. Evaluation du degré de contamination métallique des sédiments

Les différents paramètres des éléments traces analysés ont été représentés dans la figure 73.

Le Fer c'est le minéral le plus dominant dans tous les échantillons analysés. Un grand écart entre la plus faible et la plus grande valeur, il se varie entre **0.049 mg/L** et **0.13 mg/L** avec une moyenne de **0.11 mg/L**.

Les concentrations en Cadmium se varient entre **0.033 mg/L** et **0.046 mg/L** avec une moyenne de **0.037 mg/L**. Selon l'OMS tous les valeurs sont dépassés les limites admissibles de l'eau potable (**0.003 mg/L**).

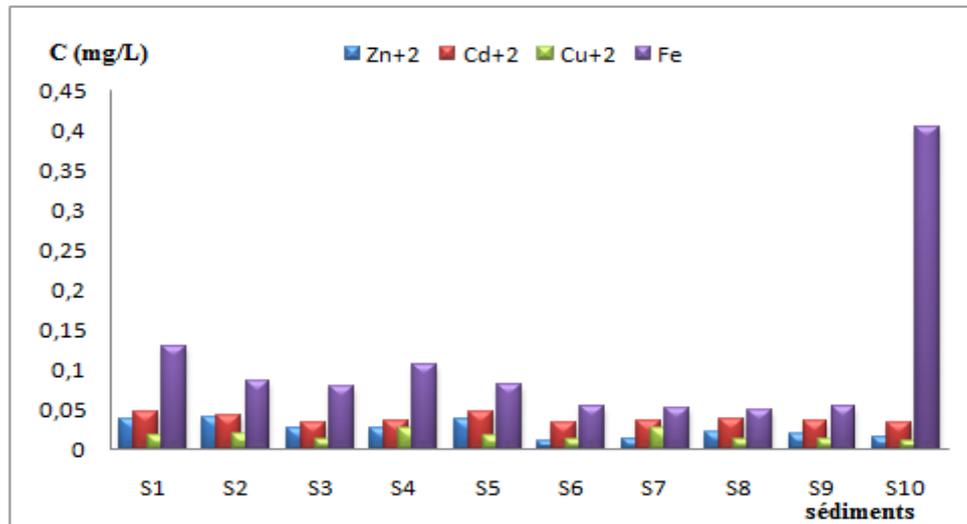


Figure 73: Concentrations de métaux lourds dans les lixiviats

Concernant le Cuivre et le Zinc, les concentrations enregistrées dans tous les échantillons analysés sont dans les normes standards, elles sont varient entre (**0.011 mg/L** à **0.027 mg/L**) et (**0.011 mg/L** à **0.041 mg/L**) respectivement.

II.2. Résultats de l'analyse XRF

Le **tableau n°18** représente les résultats obtenus de l'analyse XRF.

L'examen de ces résultats montre que les résidus de traitement sont majoritairement composés de **CaO%** (**9.94** à **29.02**) et **SiO₂%** (**12.13** à **68.02**). Les teneurs en **MgO%** (**0.18** à **3.42**), **Fe₂O₃%** (**0.71** à **5.65**), **SO₃%** (**-0.10** à **26.49**) et **K₂O%** (**0.28** à **2.98**), sont minoritaires. Les autres éléments **Na₂O%** (**0.03** à **0.38**) et **Cl%** (**0.028** à **0.01**) ne sont que faiblement représenté (**<0.4%**).

Tableau 18. Les résultats obtenus de l'analyse XRF

Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
01	28,71	10,16	5,65	21,21	0,75	0,48	0,38	-0,10	0,030
02	68,02	1,19	0,71	10,01	0,18	0,28	0,04	0,04	0,01
03	25,65	2,70	2,72	29,02	3,42	1,19	0,32	0,41	0,029
04	19,59	3,79	2,75	20,26	2,42	1,36	0,21	9,68	0,031
05	17,95	5,16	3,02	19,76	0,67	2,98	0,13	20,75	0,029
06	12,13	2,48	2,38	19,69	1,92	2,13	0,12	26,49	0,028
07	35,67	4,51	4,23	24,51	0,45	0,51	0,32	0,27	0,028
08	47,35	13,56	5,42	9,94	0,78	2,11	0,03	0,46	0,028
09	24,77	6,75	3,30	27,77	0,66	1,63	0,31	0,08	0,029
10	31,28	7,37	3,60	23,80	0,79	1,05	0,27	-0,08	0,028

Chapitre: VI

Etude d'impact des anciennes mines sur l'environnement

I. Introduction

En raison de sa structure géologique très variée, le sous-sol Algérien renferme de nombreux gisements miniers qui font l'objet d'exploitation et de valorisation à grande échelle (phosphates, métaux de base, métaux précieux, substances utiles,...), conférant à ce secteur un rôle important dans l'économie nationale.

La ville de Tébessa est considérée comme une ville minière à cause de leur richesse de mines. Cependant, l'exploitation de ces richesses n'est pas sans effets néfastes sur l'environnement et la santé des populations, vivant dans les environs de ces sites. En effet, l'activité minière peut déséquilibrer les milieux naturels de plusieurs manières; par la transformation des paysages, le dépôt de déchets solides et le rejet d'effluents liquides et atmosphériques. Ce qui peut inévitablement porter préjudice à l'environnement et au cadre de vie des populations avoisinantes.

II. Evaluation d'Impacts environnementaux et sociaux de l'exploitation minière**1. Impacts sur les ressources en eau**

L'exploitation minière affecte les bassins d'eau douce par l'utilisation d'eau pour le traitement du minerai et par la pollution faite lors des décharges d'effluent des mines. De plus en plus de mines menacent les sources d'eau sur laquelle nous dépendons tous. Les effets sur la qualité de l'eau et de la disponibilité des ressources en eau dans la zone du projet constituent peut-être l'impact le plus important d'un projet d'exploitation minière. Les questions clés sont de savoir si les fournitures en eau de surface et en eaux souterraines resteront appropriées à la consommation humaine, et si la qualité des eaux de surface dans la zone du projet restera adéquate pour supporter la vie.

L'eau est considérée comme un élément majeur et sensible dans la vie, il est impératif de présenter l'aspect de la contamination de ce précieux élément. La composition des eaux souterraines évolue géo chimiquement par le biais de phénomènes d'ordre hydrodynamique, qui contrôlent la circulation des eaux souterraines dans divers environnements. Plusieurs phénomènes hydro chimiques interviennent, notamment d'ordre minéralogique : dissolution des minéraux et libération d'éléments chimiques dans les eaux, précipitation de minéraux secondaires et remobilisation d'éléments à partir de la solution.

Dans le cas d'un site d'entreposage de rejets miniers, les processus responsables de l'évolution hydrogéochimique suivent généralement le profil suivant. En surface les rejets miniers sont exposés aux facteurs météoriques, la zone vadose, l'infiltration des eaux et d'oxygène provoque une oxydation des sulfures et donc une génération d'acidité suivie d'un dégagement des sulfates. Les eaux des pores sont caractérisées par un pH bas, ainsi qu'une concentration élevée en métaux dissous, métalloïdes et en sulfates. Au niveau de la frange capillaire, se produit la neutralisation d'acidité ainsi que la précipitation des minéraux secondaires et une accumulation en métaux.

1.1. Types de pollution de l'eau causée par l'extraction minière

D'après des spécialités de l'environnement quatre types d'impacts provenant de l'exploitation minière qui affecte la qualité de l'eau.

1.1.1. Drainage minier acide

Le Drainage Rocheux Acide (DRA) est un processus naturel où l'acide sulfurique est produit lorsque le sulfure dans les roches est exposé à l'air et l'eau. Le Drainage Minier Acide (DMA) est pratiquement le même processus mais amplifié. Quand de grande quantité de roche contenant du sulfure sont creusée dans des fosses ouvertes, les roches réagissent avec l'eau et l'oxygène ce qui crée l'acide sulfurique. Lorsque l'eau atteint un certain niveau d'acidité un type naturel de bactérie *Thiobacillus ferroxi* peut aider le processus d'oxydation et d'acidification filtrant plus de métaux dans les déchets. L'acide filtrera tant que la roche sera exposée à l'air et l'eau jusqu'à temps que le sulfure soit entièrement filtré dans la roche. Ce processus peut durer des centaines même des milliers d'années. L'acide se déplace hors des sites des mines grâce à l'eau de pluie ou le drainage et s'infiltrer dans cours d'eaux, oueds et eau souterraine.

1.1.2. Contamination par le métal et filtration

La contamination par les métaux est causée par l'arsenic, le cobalt, le cuivre, le cadmium, le plomb, l'argent et le zinc contenu dans la roche exposée dans des mines souterraines lorsqu'elles sont en contact avec l'eau. Les métaux sont filtrés et l'eau qui se déplace pendant les ruissellements nettoie le dessus des roches. Les métaux peuvent devenir stables lorsque le taux de pH est neutre. Par contre, le processus de filtration est accéléré lorsque le taux de pH est bas comme lors du drainage minier acide.

1.1.3. Pollution par les produits chimiques

Ce type de pollution arrive quand les agents chimiques comme l'acide sulfurique est utilisés pour séparer le minéral du minerai, se déversent ou se filtre dans des étendues d'eau voisine. Ces produits chimiques peuvent être très toxiques pour la nappe d'eau.

1.1.4. L'érosion et la sédimentation

Le développement minéral dérange la roche et le sol au cours de la construction et le maintien des routes, des fosses ouvertes et dans les déchets miniers. Sans prévention adéquate et stratégie de contrôle, l'érosion de la terre peut entraîner un déversement dans les cours d'eau, les oueds. Le déversement excessif de sédiment peut bloquer des ravins et des ravineaux, étouffer la végétation, détruire la faune.

2. Impacts sur la qualité de l'air

Les émissions atmosphériques se produisent à chaque étape du cycle de la mine, mais surtout pendant l'exploration, le développement, la construction et les activités opérationnelles. Les opérations minières mobilisent de grandes quantités de matières, et des déchets de piles contenant des particules de petite taille sont facilement dispersés par le vent. Les plus importantes sources de pollution atmosphérique dans les opérations minières sont:

-Les particules de matières transportées par le vent, à la suite de fouilles d'abattages par explosion, de transport de matériaux, de l'érosion par le vent (plus fréquente dans les mines, des poussières fugitives provenant des installations de résidus, des stations de culbutage, des décharges de résidus et des routes de pénétration. Les émissions de gaz d'échappement provenant de sources mobiles voitures, camions, équipements lourds augmentent ces niveaux de particules.

-Les émissions de gaz provenant de la combustion de carburants dans des sources fixes et mobiles, explosions et traitement des minéraux.

Les grandes exploitations minières ont le potentiel de contribuer de manière significative à la pollution atmosphérique, en particulier dans la phase d'opération. Toutes les activités pendant l'extraction de minerai, le traitement, la manutention et le transport dépendent des équipements, des générateurs, des processus et des matériels qui génèrent des dangereux polluants atmosphériques tels que les matières sous forme de particules, les métaux lourds, le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote.

3. Impacts sur la faune

La faune est un terme général qui fait référence à toutes les plantes et tous les animaux ou d'autres organismes qui ne sont pas domestiqués. L'exploitation minière a une incidence sur l'environnement et les biotes associés par le biais de la suppression de la végétation ainsi que le sol de couverture, le déplacement de la faune, le dégagement de polluants et la génération de bruit.

D'une manière générale, l'effet le plus direct sur la faune est la destruction ou le déplacement des espèces dans les zones d'excavation et d'accumulation des déchets miniers. Les espèces mobiles de la faune, comme, les oiseaux et les prédateurs, quittent ces zones. Les animaux plus sédentaires, comme les invertébrés, de nombreux reptiles, les rongeurs fouisseurs et les petits mammifères, peuvent être plus sévèrement affectés.

4. Impacts sur la qualité du sol

L'exploitation minière peut contaminer les sols sur de vastes zones. Les activités agricoles proches d'un projet d'exploitation minière peuvent être particulièrement touchées, dont ces opérations minières modifient régulièrement le paysage environnant en exposant des sols qui étaient précédemment intacts. L'érosion des sols exposés, les minerais extraits, les terrils et les matériaux fins dans les tas de déchets de roches peuvent entraîner des charges substantielles de sédiments dans les eaux de surface et les voies de drainage des eaux. En outre, les déversements et fuites de matières dangereuses et les dépôts de poussières contaminées fouettées par le vent peuvent conduire à la contamination du sol.

5. Impacts sur la santé publique

Les programmes d'études d'impacts des projets miniers sous-estiment souvent les risques sanitaires potentiels des projets miniers. Les substances dangereuses et les déchets dans l'eau, l'air et le sol peuvent avoir des répercussions graves, négatives sur la santé publique. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) définit la santé comme un état de complet bien-être physique, mental et social et pas seulement en l'absence de maladie ou d'infirmité. En raison de la quantité, de la concentration ou des caractéristiques physiques, chimiques ou infectieuses, les substances dangereuses peuvent causer ou contribuer à une augmentation de la mortalité ou d'une augmentation de graves maladies irréversibles ou incapacitantes; ou constituer un risque substantiel présent ou potentiel pour la santé humaine ou l'environnement si elles sont improprement traitées, stockées, transportées, éliminées ou gérées autrement.

**CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

I. CONCLUSIONS GENERALES

Les principaux résultats obtenus seront brièvement résumés.

-Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de Morsott-El Aouinet, indiquent qu'il s'agit d'un bassin d'une allure de dépression épousant la forme d'une cuvette. Elle se trouve à des altitudes comprises entre 690 m et 1400 m.

-La géologie de la région d'étude est caractérisée par des dépôts allant du Mésozoïque inférieur au Quaternaire avec une alternance de formations carbonatées de calcaire, de marno-calcaire et des marnes argileuses. Concernant le Djebel Mesloula, constitue l'une des structures atlasiques à cœur Triasique. Le bassin d'effondrement est constitué par des terrains crétacés formant une série d'anticlinaux et synclinaux souvent déversées. L'anticlinal de Mesloula à une structure très compliquée. Il est marqué par des accidents majeurs de direction NE-SW à jeux variés. La partie centrale de la région est constituée d'un fossé tectonique enserré par des montagnes escarpées à l'est et à l'ouest, occupée par des formations Plio-Quaternaires et Quaternaires qu'est constituée par des alluvions actuelles et récentes, des poudingues des grés et de graviers.

-L'analyse des séries chronologiques de précipitations montre une forte fluctuation spatio-temporelle de la pluviométrie. La moyenne annuelle des précipitations à l'échelle du bassin versant est de l'ordre de **224.63 mm**. Le diagramme pluviométrique nous a permis de distinguer une période humide qui s'étale du mois de novembre au mois mai et une autre sèche de juin à octobre. Les températures moyennes, du mois le plus chaud et celui le plus froid, sont respectivement de **27.95 °C** (mois d'août) et **6.74°C** (mois de janvier). La température moyenne annuelle est de **16,10 °C**. L'utilisation des différentes méthodes mettant en relation les données de précipitations et températures, nous indiquent que le climat dans la région d'étude est de type semi-aride, caractérisé par deux saisons l'une humide et froide et l'autre sèche et chaude. Le calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite montre que l'évapotranspiration réelle est de l'ordre de **301.48 mm**, alors que l'écoulement n'est que de **6.08 mm**. Cette lame d'eau écoulée se répartie entre le ruissellement avec **2.04 mm** et l'infiltration **4.04 mm**, où chaque frange représente **0.66%** et **1.31%**, respectivement de la lame d'eau précipitée.

-L'interprétation des coupes géoélectriques, révèle la présence de trois nappes aquifères superposées :

- La nappe Mio-Plio-Quaternaires du fossé d'effondrement
- Une nappe formée dans les calcaires du Turonien.
- Une nappe formée dans le Trias.

L'examen de ces coupes a mis en évidence la présence de deux grandes failles d'orientation NW-SE, qui bordent le bassin d'effondrement de Morsott, qui est souvent recouvert par des terrains d'épaisseur importante (supérieur à 200 m) de faibles résistivités et d'importance hydrogéologique moyenne.

L'allure des courbes piézométriques offre par ailleurs de bonnes indications pour l'identification des zones d'alimentation, des axes d'écoulement et des exutoires naturels. Ainsi les aires principales d'alimentation de la nappe, semblent en première lecture, être constituées essentiellement par ces affleurements des terrains crétacés en bordure Est et Sud-est. On peut voir deux pôles d'alimentations correspondant au massif de Djebel Boukhadra à l'Est et aux sables de la région de R'mila au Nord-est. Ce qui semble indiquer que ces deux zones constituent des pôles d'infiltration des eaux souterraines. Le sens d'écoulement général est de deux sens opposés convergeant au centre vers l'Oued Chabro, ce qui indique une alimentation de ce dernier par la nappe Plio-Quaternaire à l'exception de la limite Nord-ouest où on assiste à une alimentation des eaux souterraines par les eaux de surface.

-Dans la région d'étude deux faciès chimiques dominants : ***Chlorurée-bicarbonaté et calcique-magnésien suivant la séquence*** [Ca > Mg > Na > K] et [Cl > HCO₃⁻ > SO₄⁻²] et ***Chlorurée-sulfaté et sodique-calcique suivant la séquence*** [Na > Ca > Mg > K] et [Cl > SO₄⁻² > HCO₃⁻].

-l'analyse statistique indique une bonne corrélation de la conductivité électrique avec le sodium et le chlorure et modérément à faible avec les autres éléments chimiques. La répartition des teneurs des chlorures se corrèle bien avec celles de sodium, ce qui confirme l'origine salifère de ces deux éléments. Une mauvaise corrélation entre les ions de calcium, magnésium et les bicarbonates. Cela traduit que la dissolution des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite...) sont responsables de l'augmentation du calcium dans les eaux souterraines. Une bonne corrélation entre le Manganèse et le Cyanure, et les autres éléments de métaux lourds se corrèlent inversement entre eux.

-Les résultats des analyses géochimiques montrent que la qualité des eaux souterraines du bassin versant de Morsott-El Aouinet est influencée par plusieurs facteurs naturels et anthropiques, (faible pluviométrie, lithologie de terrain aquifère, surexploitation de l'aquifère Plio-quadernaire et la présence des mines). Ces facteurs semblent avoir un effet direct sur les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines.

-Une forte concentration de la conductivité électrique et de la salinité a été enregistrée dans tous les échantillons des eaux souterraines et du sol, localisées dans toutes les stations de prélèvement de la zone d'étude, en particulier dans la partie centrale, au sud-ouest et la partie nord (Djebel Belkfik et Djebel Mesloul), où ils indiquent des signes d'influence des formations carbonatées ainsi que des formations marneuses du Cénomane et du Turonien (riches en gypse).

Les zones de forte minéralisation des éléments majeurs sont localisées dans la partie centrale et les bordures de cette région, qui est due à l'influence des formations riches en halite (diapir de Boukhadra et Mesloul), par contre les faibles valeurs sont localisées dans la partie sud-est où l'influence des terrains triasiques est faible.

-La cartographie des métaux lourds dans le sol et les eaux souterraines, a démontré une forte concentration de Cadmium, Cyanure et Manganèse, qui dépassent les normes de l'OMS (2006). Elles sont localisées dans la partie centrale plus précisément dans la rive gauche de Oued Chabro et dans la bordure ouest de la zone d'étude. Les valeurs de Zinc, Cuivre et le Fer restent dans les normes.

-L'indice de pollution des eaux souterraines a été mesuré pour définir les différentes zones de pollution. Les résultats obtenus varient entre **0,59 à 7.07**. Les valeurs les plus basses sont obtenues en amont à l'Est du bassin versant, cette station (**station 5**) est éloignée de tous les apports anthropiques domestiques et industriels. La zone la plus polluée est située dans la partie centrale où les points de prélèvement sont répartis des deux côtés d'Oued Chabro. Dans cette zone (**station 3**), l'indice de pollution varie entre **1,45 et 7.07** avec une moyenne égale à **5.34**. Dans les autres stations (station 1, station 2 et station 4), l'indice de pollution mesuré est égal à **1.74, 2.46 et 2.61** respectivement, ces stations sont modérément à très polluées. Les eaux souterraines de cette région sont associées au chlorure, cela indique que la qualité de l'eau souterraine dans la zone d'étude est principalement influencée par la source d'origine géogénique.

-L'analyse XRF montre que les résidus de traitement sont majoritairement composés d'oxyde de calcium et oxyde de silicium. La présence de l'oxyde de Magnésium, de Fe, de soufre et de potassium, sont minoritaires.

II. PERSPECTIVES

Actuellement, et concernant notre étude, l'investigation sur les impacts environnementaux de l'ancienne mine de zinc et de plomb à Mesloulou d'une part et l'impact de la mine de Boukhadra qui est toujours en activité d'autre part, a pour but d'évaluer un plan de recommandation envisagé pour limiter le risque de contamination des eaux souterraines, les eaux de surface et le sol. De ce fait nous recommandons :

-Faire un plan de réhabilitation et de fermeture de la mine de Mesloulou.

-des essais de pompages sont nécessaires pour avoir une idée sur les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère superficiel.

-Il faut également mettre en place un réseau de piézomètres pour le suivi continu des variations du niveau piézométrique et de la qualité des eaux de cette nappe.

-Multiplier les campagnes d'échantillonnages et d'analyses à partir des puits et forages, captant les différents aquifères dans le secteur d'étude, ce qui nous permettra de affiner les résultats de la qualité des eaux souterraines.

-De consolider la banque des données acquises et continuer à développer les réflexions sur le sujet étudié. L'élaboration d'un guide de bonnes pratiques, basé sur les résultats de l'approche multidisciplinaire abordée (géologique, hydrogéologique, géophysique...), pour des applications sur des sites pollués équivalents sera fortement utile.

-Il serait très intéressant de réaliser une campagne de prospection géophysique par la méthode électrique (Tomographie 2D et 3D) qui renseigne sur la nature des terrains, leur caractère plus ou moins argileux ou plus ou moins humide avec des effets très différents selon la teneur de l'eau en sels dissous.

-Réaliser une étude de modélisation des écoulements souterrains pour connaître les mécanismes de transfert des polluants, ce qui pourra aider à la protection de la nappe contre la pollution.

-Procéder à un phyotraitement des sols de la région d'étude, en implantant des espèces végétales comme les *Atriplex (Nummularia et halimus)*, qui ont un pouvoir primordial dans l'absorption de la salinité.

- Vu que les méthodes physico-chimiques sont très coûteuses, il est fortement recommandé d'utiliser des techniques les plus adéquates pour restauration des sites de la mine de Mesloula (surtout sols pollués): phytoremédiation par *Vetiver-grass*. C'est une technique simple, pratique et peu coûteuse;

Grace à cette espèce qui présente une forte tolérance aux métaux lourds et aux conditions défavorables (sécheresse, inondation, températures extrêmes) et vue sa bonne capacité d'adaptation et son pouvoir de se développer en quantité importante, elle permet grâce à son système racinaire de limiter la dispersion des éléments métalliques par érosion éolienne ou par l'eau et leurs percolation aux eaux souterraines; plantée en haie elle favorise le ralentissement et l'étalement de l'écoulement. Aussi le système racinaire très profond permet la stabilisation des pentes raides

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Armon R, Kitty. (1994):** The health dimension of groundwater contamination. In Holler (ed). Groundwater contamination and control. *New York: USA. Marcel Dekker, INC, P (71-85).*
- Babiker I.S, Mohamed A.M, Hiyama T. (2007):** Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resource Manage, 21(4): 699 –715.*
- Bellouche M.A. (2018) :** Les eaux des mines de la région d'Ain Azel (Sud sétifien). Caractéristiques hydrodynamiques, hydrochimiques et impact sur l'environnement. *Thèse de doctorat. Université de Constantine.*
- Ben Bouih H, Nassali H, Leblans M, Srhiri A. (2005):** Contamination en métaux traces des sédiments du lac Fouarat (Maroc). *Afrique Science 01(1) 109 – 125.*
- Benhammedi H. (2016):** Effets de la variabilité climatique sur les ressources en eau d'un aquifère karstique -cas du plateau de cheria. *Thèse de doctorat. Université d'Annaba.*
- Bles J.L, Fleury J.J. (1970) :** Carte géologique de l'Algérie au 1/50000, feuille n°178, Morsott, avec notice explicative détaillée. Service de cartes Géologique et Sonatrach, Division d'hydrocarbure. *Direction des explorations, Alger, Algérie.*
- Bouamar B, Naimi M, Bouabdli A, Sonnet Ph, Garcia A.C, Bounakhla M, Inigo Inigo A.C. (2009):** Evaluation de la contamination et évolution de la qualité des eaux au voisinage d'une mine abandonnée d'extraction de Plomb (Zaida-Haute-Moulouya-Maroc). *12^{ème} conférence inter-régional, Envio-water. Marrakech.*
- Bouderbala A. (2017):** Assessment of groundwater quality and its suitability for domestic and agricultural uses in Low-Isser plain, Boumedres, Algeria. *Arab J Geosci (2017) 10:333 DOI 10.1007/s12517-017-3119-5.*
- CASTANY G. (1963) :** Traité pratique des eaux souterraines. *Dunod Edit. Paris, 641p.*
- CASTANY G. (1968) :** Prospection et exploitation des eaux souterraines. *Ed. Dunod Paris France 683p.*
- Djabri L, Ghorreib L, Hani A, LamourouxCh, Mudry J, Sharour I. (2009):** Contamination des eaux souterraines par les métaux lourds d'une mine de fer abandonnée : Cas de la région de Bekkaria (Tébessa). *Déchets sciences et techniques N°53.*
- Drever J.F. (1997):** The geochemistry of natural waters. *3rd ed. New York – Prentice-Hall INC. 1997; PP 379.*
- DUROZOY G. (1956) :** Carte géologique au 1/50 000 de Tébessa feuille 206, et ça notice explicative.
- El Kharmouz M, Sbaa M, Chafi A, Saadi S. (2013):** L'étude de l'impact des lixiviats de l'ancienne décharge publique de la ville d'oujda (Maroc oriental) sur la qualité physicochimique des eaux souterraines et superficielles. *Larhyss Journal, Vol 16, pp. 105-119.*
- EPA. (1992) :** Environmental Protection Agency. *Act 1992.N 07.*
- Fehdi C. (2008):** Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott- el Aouinet (N.E. Algérien). *Thèse de doctorat. Université d'Annaba.*
- FehdiCh, Boudoukha A, Rouabhia A.E.K, Salameh E. (2009):** Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-El Aouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-est algérien). *Afrique Science Journal, 05(2) 217-231.*

FehdiCh, Rouabhia A.E.K, Baali F. (2009): The Hydrogeochemical characterization of Morsott-El Aouinet aquifer, Northeastern Algeria. *Environ Geol*, 58:1611–1620.

Forstner and Wittmann. (1983): Metal pollution in the aquatic environment. *FOLIA GEOBOTANICA ET PHYTOTAXONOMICA*.

FREEZE A.R and CHERRY A. J. (1979):Groundwater. Englewood Cliffs, NJ, *Prentice-Hall*, 590 pp.; USA.

Ghalmi S. (2012):Relation et fonctionnement des sources issues de la corniche calcaire de djebel Bouziane Gaagaa. Région de Hammamet-Gaagaa. *Mémoire de Magister. Université de Tébessa*.

Gouaidia L. (2008):Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de meskianaNord-est Algérien.*Thèse de doctorat. Université d'Annaba*.

Ground-Water Management in Alegria.(2009): Draft Synthesis Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).Roma.

GuerradCh, Fehdi Ch. (2018): Management and Arrangement of Water Resources in Semi-arid Region of WadiMellegue in Algeria. *International Journal of Ecology & Development*.Vol 33(3).

GWRTAC. (1997): Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater. TechnologyEvaluation Report.

Roches H. (1976):La chimie des roches présentée et interprétée d'après la structure de leur faciès mineral dans l'espace des variables chimiques : Fonctions spécifiques et diagrammes qui s'en déduisent- Application aux roches ignées.*Chemicalgeology*, 21 (1978) 63-87.

Hallouche B. (2017): Bassin versant de la haute Mekker (NW Algerien): hydrology, géochimie et pollution. *Thèse de doctorat. Université de Tlemcen*.

Hem J.D. (1985): Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3rd Edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, *University of Virginia, Charlottes ville*, 263 p.

HILL M. (1991): Nitrates and nitrites in food and water. *Ellis Horwood*, 194 pp.; *New York*.

Hussain-Koorimanni, Abdussalam A.K, Ratheesh-Chandra P, Nabeesa-Salim. (2010): Bio-accumulation of heavy metals in *BacopaMonnieri* (L.) Pennell, Growing under different habit. *International Journal of Ecology & Development*.Vol 15(1).

Jessica P, Karia, Kauresh D, Vachhrajani, PranavPandya. (2011): An Analysis of Water Quality of Thol Bird Sanctuary, Inland Wetlands. *International Journal of Ecology & Development*.Vol 18(1).

Kanmani S, Gandhimathi R. (2013): Investigation of physicochemical characteristics and heavy metal distribution profile in groundwater system around the open dump site. *Appl Water Sci*, Vol 3, 387–399.

Krishna K.S, Bharani R, Magesh N.S, Prince S, Godson N, Chandrasekar. (2014): Hydro geochemistry and groundwater quality appraisal of part of south Chennai coastal aquifers, Tamil Nadu, India using WQI and fuzzy logic method. *Appl Water Sci- DOI 10.1007/s13201-013-0148-4*.

Kumar G,Prabakaran K, Selvam G. (2015):Assessment of groundwater quality for Veppanthattailuk, Perambalur district, Tamil Nadu using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Recent Scientific Research*.Vol. 6, Issue, 3, pp.3142-3146.

Kumar S, Chaudhuri S, Maiti S.K. (2012): Assessment of Physico-Chemical and Mineralogical Properties of Alluvial Soil. *International Journal of Ecology & Development*.Vol 23(3).

Laghlimi M, Baghdad B, Moussadak R, ElHadi H, Bouabdli A, Bouaziz S. (2015):Characterization of soil Heavy Metal Contamination in the Abandoned mine of Zaida (High Moulouya, Morocco). *International Research Journal of Earth Sciences, Vol. 3(3), 1-3.*

Laghlimi M, Bouamar B, El Hadi H, Moussadak R, Taoufik M. (2015): Assessment of Heavy Metals Soil Contamination in the Abandoned Pb-mine of Zaida (Morocco). *European Journal of Scientific Research Vol. 129 No 2, pp 167 – 178.*

LeeJ.Y, Choi J.C, Yi M.J, Kim J.W, Cheon J.Y, Choi Y.K, Choi M.J, Lee K.K. (2005): Potential groundwater contamination with toxic metals in and around an abandoned Zn mine, Korea. *Water, Air, and Soil Pollution, 165: 167–185.*

Lghoul M, Maqsoud A, Hakkou R, Kchikach A. (2013):Hydrogeochemical behavior around the abandoned Kettara mine site, Morocco. *Journal of Geochemical Exploration. V 144, Part C, September 2014, pages 456-467.*

Lghoul M. (2015) :Apport de la géophysique, de l'hydrogéochimie et de la modélisation du transfert en DMA : projet de réhabilitation de la mine abandonnée de Kettara (région de Marrakech, Maroc).*Thèse de doctorat. Université de Marrakech.*

Lgoul M, Kchikach A, Hakkou R, Zouhri L, Guerin R, Bendjoudi H, Texido T, Pena J.A, Enriqu  L, Jaffal M, Hanich L. (2012): Etude géophysique et hydrogéologique du site minier abandonné de Kettara (Région de Marrakech, Maroc): Contribution au projet de réhabilitation. *Hydrological Science Journal- Journal des Sciences Hydrologique, 57(2).*

Linhua S, Herong G. (2014): Hydro-chemical evolution of groundwater and mixing between aquifers: a statistical approach based on major ions. *Appl Water Sci. DOI 10.1007/s13201-014-0169-7.*

MagaliR, Dominique G. (2017) :Conséquences environnementales et gestion des mines abandonnées et dispersées dans les Alpes françaises.

Makhoukh M, Sbaa M, Berrahou A, Vanclooster M. (2011): Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc. *Afrique Science 07(3), 33-48.*

MARSILY DE G. (2004) : Cours d'hydrogéologie. *Université pierre & marie curie. 226p.*

Mazor .1994:Stagnant aquifer concept Part 1. Large-scale artesian systems - Great Artesian Basin, Australia.*Journal of Hydrology 173 (1995) 2 19 -240.*

Minerals yearbook, V3 (2008): Area reports- (Ministry of Energy and Mining 2009).

Naili S, Nait M, D n s G, Merazig H, Lakehal A (2016):Détermination des teneurs en éléments traces métalliques des sols cultivés dans la région de Constantine par spectrométrie XRF. *ICEMAEP2016 October30-31, Constantine, Algeria*

Nhari F, Sbaa M, Vassel J.L, Fekhaoui M, El Morhit M. (2014): Contamination des sols d'une décharge non contrôlée par les métaux lourds: cas de la décharge Ahfir- Saidia (Maroc oriental) [Soil contamination of the landfilluncontrolled by heavymetals: case of the landfill of Ahfir-Saidia (EasternMorocco)]. *J. Mater. Environ Sci. 5 (5), 1477-1484.*

-Ouldsid'ahmed.L.E.K, OuldMohamed.M.S. (2017): Etude gravimétrique de la région de Mesloula. Mémoire de master.*Université de Tébessa .*

Piper A.M. (1994): A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union, 25, 914-928.*

Prasad B, Mondal K.K. (2008): The impact of filling an abandoned open cast mine with fly ash on groundwater quality: a case study. *Mine Water Environ*, 27:40–45.

Raymond A, Felix E. (2011): Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks, and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Network. Article ID 402647, 20pages.*

RODIER J. (1996) : L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. *8e édition Dunod, Paris.*

Sami L. (2004): Contribution à l'étude géologique et gîtologique des minéralisations à Pb-Zn, Ba et F dans la région de Mésiana : Exemple des indices d'Es Souabaa et de M'Khiriga, (Atlas Saharien oriental). *Thèse Magister, FSTGA. USTHB Bab Ezzouar Alger.*

SCHOELLER H. (1962) : Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. *Editions, 642 pages.*

Subba R N. (2012): PIG: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones. *HYDROLOGICAL PROCESSES Hydrol. Process. 26, 3344–3350 (2012) DOI: 10.1002/hyp.8456.*

TISDALE S. L., NELSON W. L and HAVLIN J. L. (1993): Soil fertility and fertilizers. *5th. Ed. Macmillan Publishing Company, 634p; New York.*

VILA J.M (1980): La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiers. *Thèse de Doctorat- es -sciences, Université Pierre et Marie curie, Paris VI.*

WHO. (2006): Guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva.

WILCOX L (1948): The quality of water for agricultural use. *US Dept Agriculture Tech Bull 962, Washington DC.*

Wu Y, Wang Y. (2014): Spatial occurrence and geochemistry of soil salinity in Datong basin, northern China. *J Soils Sediments, 14:1445–1455.*

Youning H, Wang D, Wei L, Song B. (2014): Heavy metal contamination of urban topsoils in a typical region of Loess Plateau, China. *J Soils Sediments, 14:928–935.*

Zerdazi A. (1990): Etude gravimétrique du Môle de Ain M'lila et de l'Atlas Saharien septentrional (NE de l'Algérie). *Thèse Doct. ès Sciences, Suisse.*

Zhiyuan L, Zongwei M, Tsering J, Zengwei Y, Lei H.A. (2014): Review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment 468–469, 843–853.*