



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Larbi Tébessi –Tébessa-



Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT (LMD)

Option: Hydrogéologie

La ressource hydrique et ses conséquences sur
l'alimentation en eau potable dans la région Nord
du bassin d'effondrement Tébessa-Morsott NE
Algérien

par

ABDESLAM Ilhem

DIRECTEUR DE THESE **Mr FEHDI Chemeddine** Professeur Univ de Tébessa

Devant le jury composé de :

Président **Mr BOUMAZBEUR A** Professeur Univ de Tébessa

Examineurs **Mr BAALI Fethi** Professeur Univ de Tébessa

Mr DJABRI Larbi Professeur Univ de Annaba

Mr CHAFAI Hicham Professeur Univ de Annaba

A mon père et ma mère guides et lumière de mon parcours à l'infinie, sans eux je ne serai capable de rien.

A mes sœurs soutien indéfectible

A mes beaux frères

A mes nièces, Maya et Elena

A mes neveux, Yanis et Mahdi

A ma chère amie intime 9999

A mes amies Radhia, Meriem, Sara, Rabaa, Noussaiba

A mes collègues de la DSA

A mon entourage immédiat

Remerciements

Quatre années durant, je me suis consacrée et concentrée pour donner le meilleur de moi-même afin que ce travail puisse servir à l'avenir de support scientifique dans les recherches hydrogéologiques.

A cet effet je remercie tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin en m'orientant et conseillant.

En premier lieu, je tiens à remercier vivement le professeur FEHDI Chemseddine, mon directeur de thèse qui m'a suggéré le sujet et qui a suivi l'élaboration de cette étude avec grand soin c'est grâce à ses hautes compétences, ses larges connaissances de la région, et ses encouragements que cette étude a été bien menée. Je lui exprime mon entière reconnaissance.

Je remercie chaleureusement le professeur BOUMAZBEUR Abderahmane qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Mes remerciements les plus précieux s'adressent également à Monsieur DJABRI Larbi, professeur à l'université Badji Mokhtar-Annaba, d'accepter lire et critiquer mon manuscrit et de faire partie des membres du jury, Merci mon cousin.

Je remercie également les professeurs BAALI Fethi et CHEFFAI Hicham et, d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail, mes sincères remerciements.

A ceux qui ont m'encouragé et m'aidé à réaliser ce travail, en particulier :

Dr HADJI Rihab pour son aide à réaliser mes cartes avec l'outil SIG, merci Monsieur.

De la même manière, je souhaite faire part de mes remerciements à mes enseignants et ceux du personnel du département des sciences de la terre à l'université de Tébessa.

Abstract

Vulnerability assessment is a useful tool for the prevention and control of groundwater pollution. The present study demonstrates the integrated approach with the GIS and DRASTIC model as well as the sensitivity analysis to evaluate the effect of each DRASTIC parameter on the final vulnerability map, also the mapping of a second method (GOD).

The comparison between these two last is recommended since the vulnerability grows according to the interaction between various parameters.

This work was carried out in an alluvial aquifer Morsott, Boukhadra and El-Aouinet, NE of Algeria, in a semi-arid environment, which suffered from increasing salinity towards the northern part of the basin. Seven hydrogeological factors were used in the DRASTIC model to produce a vulnerability map to groundwater pollution, these hydrogeological factors used to calculate the DRASTIC vulnerability index (DVI), as the sum of assessment products and weights. Assigned to each parameter. Examination of the vulnerability map allowed us to determine three classes ranging from very low to very high. The northern part of the plain has the highest vulnerability class, indicating that it is the most vulnerable to external contamination. The moderate class is dispersed in the South and East as well as in the North-West, the vulnerability of the lower class occupies most of the plain which will guarantee a satisfactory sanitation in the space and the time, in case of pollution accidental.

A sensitivity analysis applied in this study suggests that the impact of the vadose zone, aquifers and hydraulic conductivity are the key factors determining vulnerability.

The comparison between the GOD and DRASTIC method gave us different results in the areas occupied by the vulnerability classes, this difference is due to the number of parametric maps and the number of classes determined in the parametric maps.

Key words: *Sensitivity analysis, Groundwater vulnerability, Morsott-El Aouinet, GIS, DRASTIC, GOD.*

Résumé:

L'évaluation de la vulnérabilité est un outil utile pour la prévention et le contrôle de la pollution des eaux souterraines. La présente étude démontre l'approche intégrée avec le modèle GIS et DRASTIC ainsi que l'analyse de sensibilité pour évaluer l'effet de chaque paramètre DRASTIC sur la carte de vulnérabilité finale, aussi la cartographie d'une seconde méthode (GOD).

La comparaison entre ces deux dernières est recommandée puisque la vulnérabilité croît en fonction de l'interaction entre divers paramètres.

Ce travail a été réalisé dans un aquifère alluvial Morsott, Boukhadra et El-Aouinet, NE d'Algérie, dans un environnement semi-aride, qui a souffert d'une salinité croissante vers la partie nord du bassin. Sept facteurs hydrogéologiques ont été utilisés dans le modèle DRASTIC pour produire une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, ces facteurs hydrogéologiques utilisés afin de calculer l'indice de vulnérabilité DRASTIC (DVI), comme la somme des produits des évaluations et des poids attribués à chacun des paramètres. L'examen de la carte de vulnérabilité nous a permis de déterminer trois classes allant de très faible à très élevée. La partie Nord de la plaine montre la classe de vulnérabilité la plus élevée, ce qui indique qu'elle est la plus vulnérable à la contamination externe. La classe modérée est dispersée dans le Sud et l'Est aussi dans le Nord-Ouest, la vulnérabilité de la classe basse occupe la majeure partie de la plaine ce qui garantira un assainissement satisfaisant dans l'espace et le temps, en cas de pollution accidentelle.

Une analyse de sensibilité appliquée dans cette étude suggère que, l'impact de la zone vadose, des milieux aquifères et de la conductivité hydraulique sont les facteurs clés déterminant la vulnérabilité.

La comparaison entre la méthode GOD et DRASTIC nous a donné des résultats différents dans les superficies occupées par les classes de vulnérabilité, cette différence est due aux nombres de cartes paramétriques et aux nombre de classes déterminées dans les cartes paramétriques.

Mots clés: *Analyse de sensibilité, Vulnérabilité des eaux souterraines, Morsott-El Aouinet, GIS, DRASTIC, GOD.*

ملخص:

تقييم الضعف هو أداة مفيدة للوقاية من تلوث المياه الجوفية ومكافحتها. توضح هذه الدراسة المنهج المتكامل مع نموذج GIS و DRASTIC بالإضافة إلى تحليل الحساسية لتقييم تأثير كل معلمة DRASTIC على خريطة الثغرة النهائية ، وكذلك تخطيط طريقة ثانية (GOD).

ينصح المقارنة بين هذين الماخذين لأن الثغرة تنمو وفقا للتفاعل بين مختلف المعلمات.

وقد تم تنفيذ هذا العمل في طبقة المياه الجوفية الرسوبية في مرسط ، بوخضرة والعيونات ، شمال شرق الجزائر ، في بيئة شبه جافة، عانت من زيادة الملوحة في جزئها الشمالي. تم استخدام سبعة عوامل هيدروجيولوجية في نموذج DRASTIC لإنتاج خريطة الضعف لتلوث المياه الجوفية ، وهذه العوامل الهيدروجيولوجية المستخدمة لحساب مؤشر الضعف DRASTIC، كمجموع منتجات التقييم والأوزان. معين لكل معلمة. سمح لنا فحص خريطة الضعف بتحديد ثلاث فئات تتراوح من منخفضة جدًا إلى عالية جدًا. الجزء الشمالي من السهل يحتوي على أعلى درجة من الضعف ، مما يشير إلى أنه الأكثر عرضة للتلوث الخارجي. أما الطبقة المعتدلة متناثرة في الجنوب والشرق وكذلك في الشمال الغربي ، أما الفئة الأقل حساسية تحتل معظم السهل. الذي سيضمن الصرف الصحي المرضي في المكان والزمان، في حالة التلوث العرضي.

يشير تحليل الحساسية المطبق في هذه الدراسة إلى أن تأثير منطقة ما فوق المائدة المائية وطبقات المياه الجوفية والناقلية الهيدروليكية هي العوامل الرئيسية التي تحدد الضعف.

أعطتنا المقارنة بين طريقة GOD و DRASTIC نتائج مختلفة في المناطق التي تشغلها فئات الضعف ، ويرجع هذا الاختلاف إلى عدد الخرائط البارامترية وعدد الفئات المحددة في الخرائط البارامترية.

الكلمات الدالة: تحليل الحساسية ، ضعف المياه الجوفية ، مرسط العيونات ، نظام المعلومات الجغرافية

GOD،DRASTIC،

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I VULNERABILITE ET RISQUE DE CONTAMINATION : DEFINITION DES CONCEPTS, HISTORIQUE ET METHODES D'EVALUATION ET DE VALIDATION

I.	La vulnérabilité:	3
II.	Apparition du concept de vulnérabilité :.....	3
III.	Intérêt de la cartographie de vulnérabilité :	4
A.	Types de vulnérabilité :	5
1.	Critères de vulnérabilité intrinsèque :	5
a)	Sol et zone non saturée	5
b)	La zone saturée :	6
c)	Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée	6
2.	Critères de vulnérabilité spécifique :	7
a)	Nature du polluant	7
b)	Capacités dispersives et épuratoires des sols :	7
c)	Qualité des eaux du réseau hydrographique :	7
d)	Typologie de l'occupation du sol :	8
e)	Points sensibles :	8
IV.	Méthodes et techniques d'évaluation de la vulnérabilité :	8
A.	Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	8
1.	Méthodes de vulnérabilité intrinsèque	8
a)	Les méthodes cartographiques :	10
b)	Les méthodes numériques	11
c)	Les méthodes paramétriques	11
d)	Méthode à simple ponctuation ou système de classe :	12
e)	Méthodes à ponctuation et poids :	13
f)	Les méthodes statistiques	17
V.	Outils d'évaluation de la vulnérabilité	18
A.	Les Systèmes d'information géographique :	18
B.	Historique et fonctions de base des SIG :	18
C.	Intérêt des SIG dans la cartographie de la vulnérabilité :	18
VI.	Conclusion :	20

CHAPITRE II
CADRE GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

I.	Situation géographique :	21
II.	Caractéristiques générales de la zone d'étude :	22
A.	Particularités démographiques et économiques :	22
B.	Cadre climatique et hydrologique :	23
1.	Précipitation et Température :	23
2.	L'évaporation :	23
3.	Réseau hydrographique :	24

CHAPITRE III
APERÇU GEOLOGIQUE

I.	Introduction :	25
II.	Historique des travaux :	26
III.	Aspects structuraux de l'Atlas Saharien :	28
A.	L'Atlas Saharien Oriental, limites et structuration.....	29
1.	Les accidents majeurs.....	29
2.	Les plissements.....	29
3.	Les structures extensives :	30
4.	Les phases orogéniques :	31
a)	Au Mésozoïque.....	31
b)	Au Cénozoïque.....	32
IV.	Stratigraphie régionale :	35
A.	Mésozoïque :	35
1.	Le Trias	35
2.	Le Jurassique	35
3.	Le Crétacé	35
a)	Le Crétacé inférieur	35
b)	Le Crétacé supérieur	37
4.	Cénozoïque - Quaternaire	38
a)	Le Miocène (Néogène)	38
b)	Le Plio-Quaternaire	38
B.	Contexte paléogéographique des dépôts.....	40
1.	Au Barrémien	40
2.	L'Aptien	40
3.	A l'Albien.....	42
4.	Au Cénomanién supérieur	43

5. Au Turonien inferieur et moyen	44
V. Géologie de la région d'étude :	46
A. Introduction	46
B. Les diapirs dans la région d'étude	46
C. Lithologie du Trias	49
VI. Stratigraphie de la zone d'étude :	51
A. Formations Continentales Quaternaires :	51
1. Eboulis actuels et récents	51
2. Formation continentale Néogène	51
3. Formations Marines cénozoïques et mésozoïques	52
a) Les formations calcaires de L'Eocène et du Paléocène supérieur	52
b) Crétacé supérieur	52
c) Crétacé inférieur	53
4. Le Trias	54
VII. Partie structurale	55
A. Etude des données de surface	55
1. Analyse de la carte structurale régionale des confins Algéro-tunisiens (Fig. 17).....	55
a) Différents axes diapiriques	55
b) Plissements	55
B. Aspect structural de la région d'El Aouinet	58
1. Plissements	58
2. Les diapirs	59
C. Fossés d'effondrements	61
D. Les failles	61

CHAPITRE IV

GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

I. Introduction	62
II. Prospection électrique	62
A. Interprétation :	64
B. Commentaires des coupes géoélectriques	64
C. Interprétation des cartes de résistivité.	68
1. Carte en ligne AB = 500 m	68
2. Carte en ligne AB = 800 m	69
3. Carte en ligne AB = 1000 m	69
III. Prospection sismique :	71
A. Documents utilisés	71

B.	Choix des profils sismiques	71
C.	Interprétation des sections sismiques :	72
IV.	Gravimétrie	76
A.	Modélisation gravimétrique	77
V.	Expression magnétique des diapirs de la région d'étude	78
VI.	Conclusion	79

CHAPITRE V HYDROCLIMATOLOGIE

Partie 1: Climatologie

I.	Introduction :	80
II.	Choix des stations :	80
III.	Caractéristiques climatiques de la région	81
A.	Les précipitations :	82
1.	Variation de la pluviométrie annuelle :	82
2.	Variations annuelles des précipitations :	83
a)	Station de Tébessa :	83
b)	Station d'El Aouinet :	84
a)	Station de Morsott :	85
3.	Calcul du coefficient pluviométrique :	87
4.	Analyse pour chaque station :	88
B.	Etude des températures :	88
1.	Les températures annuelles :	89
2.	Températures moyennes mensuelles :	90
C.	Les indices thermiques :	90
1.	Indice de Martonne :	90
2.	Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls :	92
D.	Evaporation :	92
E.	Evapotranspiration :	93
1.	Evapotranspiration potentielle ETP :	93
a)	Formule de Thornthwaite :	93
2.	Evapotranspiration réelle ETR :	93
a)	Formule de Turc	94
b)	Formule de Contagne	94
c)	Formule de Thornthwaite	94
F.	Bilan hydrologique :	99
1.	Ruissellements superficiels :	99

Partie 1: Hydrologie

I.	Introduction :	100
II.	Le bassin hydrographique constantinois-Seybouse -Mellegue :	100
A.	Caractéristiques du bassin versant de l'Oued Mellegue :	100
III.	Contexte hydrologique régional :	101
IV.	Etude des débits.....	101
A.	Etude des variations annuelles des débits	102
B.	Variation des débits moyens mensuels interannuels en relation avec les précipitations	104
V.	Conclusion :	106

CHAPITRE VI HYDROGEOLOGIE

I.	Introduction	107
II.	Le contexte hydrogéologique de la région d'étude	107
A.	Les caractéristiques hydrogéologiques par formation.....	107
III.	Piézométrie.....	109
A.	Introduction	109
B.	Inventaire des points d'eau	109
C.	Interprétation de la carte piézométrique (Novembre 2016)	110
D.	L'évolution spatiale de la piézométrie	111
IV.	Détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Plio-quaternaire.	112
A.	Introduction	112
B.	Répartition des paramètres hydrodynamiques	112
1.	Carte des transmissivités :	113
2.	Carte des perméabilités.....	113
V.	Conclusion	114

CHAPITRE VII HYDROCHIMIE

I.	Introduction	116
II.	Les données disponibles	116
III.	Matériels et moyens d'analyse.....	117
IV.	Caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère Plio-quaternaire	117
A.	La conductivité électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	117
B.	Potentiel d'Hydrogène (PH) :	118
C.	Les cations majeurs	118
D.	Les anions majeurs	118

E.	Cartographie hydrochimique :	119
1.	La conductivité électrique.....	119
2.	La température et le pH	120
3.	Ion Calcium	121
4.	Ion Magnésium.....	122
5.	Ion Sodium	124
6.	Ion Potassium	125
7.	Ion Bicarbonates.....	127
8.	Ion Chlorures :.....	128
9.	Ion Sulfate:	129
10.	Les nitrates :	130
V.	Détermination des faciès hydrochimiques :	132
A.	Interprétation par le diagramme de PIPER	132
B.	Interprétation par le diagramme de SCHOELLER-BERKALLOF.....	134
C.	Evaluation du risque de salinité (diagramme de Riverside) :	135
VI.	Conclusion.....	137

CHAPITRE VIII
APPLICATION DES METHODES DE VULNERABILITE

I.	Présentation de la méthode DRASTIC.	138
II.	Application de la méthode DRASTIC	140
A.	Description de la méthode :	140
B.	Définition des paramètres	141
1.	Profondeur à la nappe d'eau	141
2.	Infiltration efficace	141
3.	Nature du milieu aquifère	141
4.	Nature du sol	142
5.	Pente du terrain.....	142
6.	Impact de la zone vadose.....	142
7.	Conductivité hydraulique	142
C.	Indice de vulnérabilité :	143
D.	Interaction entre les paramètres	143
E.	Application de la méthode DRASTIC à l'aquifère Morsott-Boukhadra-El Aouinet :.....	144
1.	Carte de la profondeur à la nappe d'eau	144
2.	Carte de la recharge :.....	145
3.	Nature du milieu aquifère	146
4.	Carte du type de sol	147

5.	Carte de la pente de terrain	149
6.	Carte de l'impact de la zone vadose	150
7.	Carte de la conductivité hydraulique	150
8.	Carte de vulnérabilité selon DRASTIC	151
III.	Etude de validité de la méthode DRASTIC :	154
A.	Modèle de validation :	154
1.	Validation par les nitrates:	154
2.	Validation par des méthodes statistiques:	155
a)	Test de sensibilité par suppression de carte	155
b)	Sensibilité de chaque paramètre :	155
c)	Application du test de sensibilité à l'indice de vulnérabilité DRASTIC :	155
IV.	Présentation de la méthode GOD.....	159
A.	Application de la méthode GOD à l'aquifère :	160
1.	Carte de type d'aquifère :	160
2.	Carte de la lithologie de la zone vadose :	160
3.	Carte de la profondeur à la nappe :	162
4.	Carte de vulnérabilité selon la méthode GOD	163
V.	Analyse comparative des deux méthodes utilisées	164
VI.	Conclusion :	166

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Principales méthodes et données relatives pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution (Michaud et al, 2003 modifié).	9
Tableau 2: Classes d'indice de vulnérabilité AVI (Van Stempvoort et al., 1992).	11
Tableau 3: Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes correspondantes (Murat et al., 2003).....	13
Tableau 4: Critères d'évaluation des degrés de vulnérabilité DRASTIC selon Engel et al. (1996).	14
Tableau 5: Classes de vulnérabilité selon la méthode GALDIT (Chachadi et al., 2003).	17
Tableau 6: Caractéristiques des trois stations.....	80
Tableau 7: Moyennes pluviométriques interannuelles des stations de la zone d'étude	82
Tableau 8: Coefficient pluviométrique des stations de Tebessa, Morsott et El Aouinet.	87
Tableau 9: Températures moyennes mensuelles et annuelles	90
Tableau 10: Indice d'aridité annuel de De Martonne	91
Tableau 11: Moyennes mensuelles de l'évaporation à la station de Tébessa : période 1971-2006.	92
Tableau 12: bilan hydrique de la station de Tébessa (1987-2016).....	96
Tableau 13: bilan hydrique de la station d'El aouinet (1987-2012).....	97
Tableau 14: valeurs de ruissellement superficiel Période (1987-2016).	99
Tableau 15: Caractéristiques du bassin versant de l'Oued Mallegue (STAMBOUL.Med 2017).....	101
Tableau 16: Moyennes annuelles et mensuelles interannuelles des débits en m ³ /s (1982/1983 – 2005/2006)	102
Tableau 17 : Classification hydrogéologique simplifiée de quelques formations géologiques de la région d'étude (Fehdi.ch 2008).....	107
Tableau 18 : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques points d'eau (DRE Tébessa) .	112
Tableau 19: Intervalles et cotation des différents paramètres de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987).....	139
Tableau 20: Statistique des paramètres de l'indice DRASTIC	155
Tableau 21: Statistique du test de sensibilité par suppression d'une carte de l'indice DRASTIC.....	156
Tableau 22: Statistique du test de sensibilité par suppression d'une ou plusieurs cartes de l'indice.....	157
Tableau 23: Analyse statistique du test de sensibilité à paramètre unique de l'indice DRASTIC.....	158
Tableau 24: Cotation des différents paramètres de la méthode GOD (Foster et al., 2002) ...	160

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation de la zone d'étude	21
Figure 2: Carte topographique de la zone d'étude	22
Figure 3: Carte du réseau hydrographique	24
Figure 4: Carte géologique du Nord Est Algérien (Extrait de la carte géologique au 1 : 500 000) (FEHDI 2008)	26
Figure 5: Schéma structural du Nord de l'Algérie (Bracène et al., 2002).....	30
Figure 6: structural simplifié du Sud Est Constantinois (Kheidri.L.H, 2001,).....	31
Figure 7 : Log tectonique de l'Atlas Saharien (établi à partir des travaux antérieurs).....	34
Figure 8: Log synthétique des monts du Mellègue (D'après: Dubourdieu., 1956- 1959; David., 1956; Madre., 1969; Fleury., 1969; Thibieroz et Madre., 1976; Chikhi., 1980; Otmanine., 1987; Bouzenoune., 1993 et Vila et al., 2000) in L.,Sami. 2003	39
Figure 9: Paléogéographie au Barrémien (F. Belfar, 2005)	40
Figure 10: Paléogéographie a l'Aptien (F. Belfar, 2005).....	41
Figure 11: Paléogéographie a l'Albien inférieur (F. Belfar, 2005)	42
Figure 12: Paléogéographie à l'Albien supérieur (F. Belfar, 2005).....	43
Figure 13: Paléogéographie au Cénomani (F. Belfar, 2005).....	44
Figure 14: Paléogéographie au Turonien inférieur et moyen (F. Belfar, 2005).....	45
Figure 15: Esquisse tectonique au 1/300 000 de la région d'El Aouinet (extraite de la carte géologique au 1/50 000)	48
Figure 16: Colonne litho-stratigraphique d'un sondage dans la région d'étude (Bouaya 2005)	50
Figure 17: Schéma structural des confins Algéro-tunisiens (extrait de la carte géologique de Souk Ahras 1/200 000).....	57
Figure 18: Coupe géologique NW-SE extraite de la carte géologique au 1/50 000 d'El Aouinet (A. Chacha 2011)	60
Figure 20: Carte de position des sondages (FEHDI.Ch 2008)	63
Figure 21: Coupes géoélectriques transversale 1,2 et 3 (In FEHDI.Ch 2008).....	65
Figure 22: Coupes géoélectriques transversale 4,5 et 6 (In FEHDI.Ch 2008).....	67
Figure 23: Carte de résistivité en ligne AB=500m (In FEHDI.Ch 2008)	68
Figure 24: Carte d'isorésistivité AB=800m (In FEHDI.Ch 2008).....	69
Figure 25: Carte de résistivité en ligne AB=1000m (In FEHDI.Ch 2008)	70
Figure 26: Plan de position des sections sismiques (Document Sonatrach)	72
Figure 27: Section sismique montrant le diapir d'Oued Mellah en surface et de Boukhadra en profondeur	73
Figure 28: Section sismique montrant le diapir de Boukhadra	74
Figure 29: Section sismique montrant le diapir de Mesloula	75
Figure 30: Carte gravimétrique résiduelle de la région d'étude (en mgal) (ZERDAZI.A 1990)	76
Figure 31: Schéma montrant une interprétation possible à 2 D de l'anomalie gravimétrique négative dans la région d'étude (d'après Boubaya 2005)	77

Figure 32: Carte aéromagnétique du Nord Est Algérien (Boubaya 2005)	78
Figure 33: Carte bioclimatique de l'Algérie (Cote M., 1998).....	81
Figure 34: Précipitations moyennes annuelles de la station de Tébessa pour la période (1987/2016).....	83
Figure 35: Contribution de la pluviométrie mensuelle moyenne au niveau de la station de Tébessa.....	84
Figure 36: Pluviométrie annuelle dans la station d'El Aouinet (1987-2012).....	84
Figure 37: Contribution de la pluviométrie mensuelle moyenne au niveau de la station d'El Aouinet.....	85
Figure 38: Pluviométrie annuelle dans la station de Mosott (1987-2012).....	86
Figure 39: Contribution de la pluviométrie mensuelle moyenne au niveau de la station de Morsott....	86
Figure 40: Températures moyennes annuelles de la station de Tébessa pour la période (1987/2016) ..	89
Figure 41: Températures moyennes mensuelle de la station de Tébessa pour la période (1987-2016).....	90
Figure 42: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne	91
Figure 43: Courbe pluviothermique de la station de Tébessa pour la période (1987-2016).....	92
Figure 44: Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station de tebessa (1987-2016).....	96
Figure 45 : Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station d'El aouinet (1987-2012).....	97
Figure 46 : Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station de Morsott (1987-2012).....	98
Figure 47: Evolution des débits annuelles à la station de Morsott (1984-2005) (ANRH Tebessa)	103
Figure 48: Evolution des débits annuels à la station d'El Aouinet (1984-2005).....	104
Figure 49: Evolution des débits mensuels interannuels et des précipitations (Station de Morsott 1984-2005).....	105
Figure 50: Evolution des débits mensuels interannuels et des précipitations (Station d'El Aouinet 1984-2005).....	105
Figure 51: Carte d'inventaire des points d'eau.....	109
Figure 52: Carte piézométrique. Novembre 2016.....	110
Figure 53: carte piézométrique, Mars 2005 (Fehdi 2008).....	111
Figure 54: carte piézométrique, Septembre 2003 (Fehdi 2008).....	111
Figure 55: carte des transmissivités en $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	113
Figure 56: carte des perméabilités en 10^{-5} m/s	114
Figure 57: Variation spatiale de conductivité	120
Figure 58: Carte de calcium (mg/l).....	122
Figure 59: Carte de magnésium (mg/l).....	123
Figure 60: Carte de sodium (mg/l).....	125
Figure 61: Carte de potassium (mg/l)	126
Figure 62: Carte des bicarbonates (mg/l).....	127
Figure 63: Carte des chlorures (mg/l)	129
Figure 64: Carte des sulfates (mg/l)	130
Figure 65: Carte des Nitrates (mg/l)	131
Figure 66: Diagramme de pipper.....	133
Figure 67: Diagramme de Scholler-Berkalof.....	134
Figure 68: Diagramme de Richard	136
Figure 69: Profondeur de la nappe d'eau, dans la zone d'étude.....	145

Figure 70: Carte représentative de la recharge nette dans la zone d'étude	146
Figure 71: Carte de la nature de la zone saturée.	147
Figure 72: Carte de la nature du sol dans la zone d'étude	148
Figure 73: Carte de pente de terrain	149
Figure 74: Carte d'impact de la zone non saturée.....	150
Figure 75: Carte de la conductivité hydraulique dans la zone d'étude	151
Figure 76: Carte finale selon la méthode DRASTIC (Novembre 2016)	152
Figure 77: Variation de l'indice de vulnérabilité avec la concentration de NO_3^-	154
Figure 78: Carte du type d'aquifère	161
Figure 79: Carte de la lithologie de zone non saturée	161
Figure 80: Carte de la profondeur à la nappe.....	162
Figure 81: Carte de vulnérabilité selon la méthode GOD.....	163
Figure 82: Comparaison des deux méthodes utilisées	164

INTRODUCTION GENERALE

Aucune forme de vie ne peut se développer sans présence d'eau, d'autant plus, aucun progrès économique ne peut exister en absence d'une gestion efficace et rationnelle capable de garantir la qualité et la durabilité de cette ressource.

La politique d'eau doit parvenir au maintien de l'équilibre délicat existant entre la satisfaction de la demande croissante, en raison de l'augmentation de la population et de l'activité économique et la préservation des sources d'alimentation exposées à la contamination et à la surexploitation. La capacité d'approvisionnement n'est pas infinie, surtout en périodes de sécheresses. L'eau disponible doit être répartie entre divers types d'usages, principalement domestiques, agricoles et industriels.

La ressource en eau est incluse dans un monde en évolution constante et soumis à des pressions diverses. La situation est plus critique pour les pays à ressources en eaux limitées, comme le cas de notre zone d'étude. En effet, à côté des activités anthropiques affectant la nappe, s'ajoute la forte salinité qui est due par la présence des formations triasiques qui constituent un facteur supplémentaire de dégradation de qualité des systèmes aquifères en particulier la partie Nord de la zone objet de la présente étude.

C'est dans ce contexte, que l'engagement des actions sur la connaissance et sur la protection des ressources en eaux, constitue un besoin immédiat pour un développement durable. Face aux difficultés liées aux techniques de dépollution qui nécessitent souvent des coûts inabornables. La protection des nappes phréatiques impose en premier lieu des mesures préventives qui consistent d'abord dans la délimitation des zones susceptibles d'être atteintes par la pollution que l'on qualifiera de vulnérables ou à risques.

Dans ces conditions, on a tenté d'élaborer des cartes de vulnérabilité à la pollution et à risque de dégradation qui constituent des documents d'aide à la décision et qui permettent de subdiviser la zone d'étude en classes selon le degré de sensibilité à toute sorte de dégradation. Pour ce faire, on a consulté les données multidisciplinaires existantes (géologiques, structurales, géophysiques, hydrogéologiques et hydrochimiques) concernant la zone d'étude, complétées et actualisées par des données de terrain. Le traitement de ces dernières par le logiciel Arc GIS 10.5 permet d'établir des couches d'informations géographiques spatialisées. Ces couches constituent un document de base des méthodes de la cartographie de la vulnérabilité et du risque de contamination.

Le présent travail est structuré de la façon suivante :

- une première partie consacrée à la présentation des concepts de vulnérabilité à la pollution et du risque de contamination, des méthodes paramétriques DRASTIC et GODetc, ainsi qu'à la présentation de l'outil ou la technique qui a facilité leur application à savoir les différents composants et logiciels des systèmes d'informations géographiques (SIG). Cette partie englobe aussi la présentation du contexte général de la zone d'étude (contexte géographique géologique, structural, climatique et hydrogéologique).
- Une deuxième partie est destinée à l'application de deux méthodes de vulnérabilité (DRASTIC et GOD) dans notre zone et l'étude de la validité de la méthode DRASTIC par les tests de sensibilité et par les comparaisons de la répartition des nitrates dans la nappe étudiée avec la répartition des classes de vulnérabilité.

Des conclusions générales et des recommandations suite à cette étude ont été présentées au terme de ce travail. Cette partie ouvre sur des propositions de futurs axes de recherches.

Objectif de travail

Ce travail, consiste à étudier la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère de Morsott-El Aouinet dans le but de contribuer à la protection et au sauvegarde des ressources hydriques souterraines dans leur gisement avant qu'elles ne soient contaminées.

Ce document pourra donc être utilisé dans la planification et l'aménagement d'un territoire en conseillant l'installation des activités humaines à risques à des endroits où le potentiel de détérioration de l'environnement est le plus faible. En effet cette problématique pourra être abordée depuis plusieurs points de vue, cependant on a choisi une approximation basée sur l'étude des techniques d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Traditionnellement, ce type de techniques se classent en trois catégories ; les méthodes basées sur des processus de simulations d'ordinateurs (process based computer simulations), les méthodes analytiques statistiques (statistical analyses) et les méthodes d'indexation et de superposition cartographique (index and overlay methods). Chacune des catégories a ces avantages et ces inconvénients, pourtant la troisième catégorie fournit universellement les meilleurs résultats et, par conséquent, étant celle qui a été servit de base pour notre étude. Une tendance récente pour la cartographie de la vulnérabilité des aquifères à la pollution consiste en l'évaluation quantitative et qualitative du risque de contamination.

CHAPITRE I :

VULNERABILITE ET RISQUE DE CONTAMINATION :

DEFINITION DES CONCEPTS, HISTORIQUE ET METHODES D'EVALUATION ET DE VALIDATION

CHAPITRE I

VULNERABILITE ET RISQUE DE CONTAMINATION : DEFINITION DES CONCEPTS, HISTORIQUE ET METHODES D'EVALUATION ET DE VALIDATION

I. La vulnérabilité:

Premier sujet abordé, et cœur de la présente thèse, les méthodes d'estimation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux contaminations font l'objet de la présente section. Domaine scientifique extrêmement vaste, il est évidemment très difficile de faire une présentation exhaustive de toutes les méthodes existantes sans diluer le propos dans une information trop abondante et au final peu pertinente.

Le terme vulnérable provient du latin « vulnerabilis » et il se réfère à une entité qui se trouve en une situation où elle risque d'être blessée, atteinte ou infectée. Le terme vulnérabilité (attesté en 1836, chez Balzac au sens général) a été introduit dans la littérature hydrogéologique par [J. Margat en 1968](#). Il est aujourd'hui couramment utilisé, y compris dans sa version anglaise (vulnerability) ([Foster et al., 2003](#)). Emprunté au langage courant (en parlant surtout du corps humain), ce terme, appliqué d'abord aux eaux souterraines, permettait de sensibiliser les citoyens que les eaux souterraines ne sont pas à l'abri des pollutions, malgré l'idée de pureté naturelle qui leur est communément attachée. Ensuite, ce terme signale que la variabilité des conditions naturelles rend ces eaux inégalement protégées ; d'où divers degrés de vulnérabilité à identifier et à cartographier.

II. Apparition du concept de vulnérabilité :

L'attrait principal des eaux souterraines est leur bonne qualité, laquelle permet une exploitation à des coûts relativement faibles. En raison de leur importance écologique et économique, on doit s'assurer de préserver leur qualité et leur renouvellement ([Beaudet, 1999](#)). Etant donné que la présence et la distribution des eaux souterraines n'est pas l'effet du hasard mais la conséquence de facteurs climatiques, hydrologiques, géologiques et topographiques, tous ces facteurs interagissent pour créer un système d'écoulement dynamique et souvent complexe ([Lefebvre et al., 2003](#)). La composition des eaux souterraines dépend des réactions d'échange entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. Ainsi elle peut varier suite à un échange naturel de matière ou à une introduction de matière exogène d'origine anthropique, il se produit donc une perturbation de la composition des eaux souterraines, ce qui limite ainsi son usage. Donc, l'identification des facteurs susceptibles de modifier les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des eaux souterraines devient nécessaire afin d'assurer la préservation et la pérennité d'une ressource de qualité.

L'étude de la vulnérabilité à la pollution constitue un outil de base pour caractériser le degré de risque encourus par les eaux souterraines. En effet, il s'agit d'une classification, en différents degrés, en adoptant une gradation ordinale et une différenciation en fonction des principales sources de pollution : suivant l'origine (surface du sol - source de pollution ponctuelle ou diffuse) et suivant la durée (pollution accidentelle ou chronique) (Michaud et al, 2003). Par conséquent, l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution d'une nappe correspond à une sorte de remède préventif.

Récemment, plusieurs études d'évaluation de la vulnérabilité ont été établies sur différentes régions du monde en tant que stratégie essentielle de protection des eaux (Lindstrom, 2005). De ce fait se dégage l'importance de la cartographie de la vulnérabilité dans la gestion des ressources en eaux, et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution (BRGM, 2005).

III. Intérêt de la cartographie de vulnérabilité :

En effet, le développement du concept de vulnérabilité des eaux souterraines a été généré grâce à l'inquiétude mondiale croissante au sujet de leur contamination. La question de la qualité des eaux souterraines reçoit une attention de plus en plus importante, et l'information hydrogéologique reste essentielle pour la protection efficace et la gestion de la qualité de ces ressources. La protection efficace doit viser la prévention des problèmes à l'origine et doit exiger une base d'information continue et fiable afin de déterminer les problèmes de la qualité des eaux souterraines qui existent et ceux qui peuvent survenir dans le futur. Les cartes de vulnérabilité de l'eau souterraine sont utilisées comme un guide pour l'emplacement de futurs projets de développement dans une région dans la finalité de minimiser l'impact que portera le développement projeté sur les ressources hydriques environnantes (Foster et al., 1991). Ce sont des cartes schématiques réalisées dans le but d'aider la prise de décision pour l'aménagement du territoire. Elles peuvent combler des besoins d'inventaire et guider les organismes de réglementation qui doivent assurer une gestion globale de l'ensemble de la ressource en eau souterraine du territoire.

Quatre objectifs principaux sont à dégager (Foster et al., 1991) :

- Faciliter les analyses politiques et le développement à l'échelle local et régional ;
- Appuyer les programmes de gestion du territoire ;
- Guider les décisions concernant l'occupation du sol (planification) ;

- Contribuer à l'éducation et à l'amélioration de la conscience vis-à-vis des ressources hydriques d'une région donnée.

A. Types de vulnérabilité :

Deux types de vulnérabilités ont été distinguées (Foster et al., 2000): une vulnérabilité intrinsèque qui ne dépend que des propriétés du système aquifère et une vulnérabilité spécifique où les propriétés intrinsèques sont référencées à un type particulier de contaminant ou d'activité humaine.

1. Critères de vulnérabilité intrinsèque :

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque sont beaucoup plus nombreuses puisqu'elles offrent l'avantage de prendre en compte toutes les activités potentiellement contaminants (avec leur divers produits polluants) qui existent à la surface du sol et les représentées cartographiquement par la suite, ce qui permet, d'orienter les plans d'occupation du sol, d'installer des réglementations ou d'autres contrôles. Ces méthodes peuvent définir la vulnérabilité à la pollution d'un aquifère comme étant une fonction des caractéristiques intrinsèques des strates.

a) Sol et zone non saturée

La zone non saturée contient de l'air, de l'eau de rétention et de l'eau gravitaire en transit; Sa base est imprégnée d'eau provenant de la remontée capillaire à partir de la zone saturée. Le transit des eaux de surface permet l'alimentation de la zone non saturée mais également peut provoquer sa pollution. Cette zone est d'épaisseur variable, allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. La surface comporte généralement de la végétation.

En effet, l'épaisseur de la zone non saturée conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc la possibilité de dégradation des micropolluants en cours de transfert (BRGM, 2005). En plus de l'épaisseur, la perméabilité et le degré de fissuration de la zone vadose jouent un rôle important dans le transfert des polluants vers la nappe.

Le sol joue le rôle d'accumulateur grâce à ses propriétés d'adsorption et d'échange qui sont dues à la présence de colloïdes minéraux et organiques. Ainsi, le sol peut retenir des particules diverses de point de vue taille, charge électrique, structure, solubilité...etc. Le sol joue également un rôle d'épurateur biologique grâce à la microflore et microfaune actives qui assurent la dégradation de certains micropolluants (Livet, 2004).

b) La zone saturée :

Le type de nappe, qu'elle soit libre, semi captive ou captive, joue un rôle prépondérant dans la vulnérabilité. En effet, l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des couches imperméables (Hamza, 2007). De plus, les paramètres hydrodynamiques conditionnent la dilution, la dégradation et la fixation des polluants dans une nappe. Parmi ces paramètres on peut citer la transmissivité (T), la perméabilité (K), le coefficient d'emménagement (S) et le gradient hydraulique (i). Ils déterminent essentiellement la vitesse de migration des polluants du sol vers la nappe. La vitesse de transfert est lente dans un aquifère poreux homogène, rapide en milieu karstique et au niveau des limites amont et aval. Ce transfert peut demander plusieurs années dans un aquifère alluvial et quelques jours dans un aquifère très fissuré.

c) Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone Saturée

Parmi les critères on peut signaler :

- **la fracturation (directions et densité)**: des discontinuités verticales (les failles...) peuvent, dans certaines conditions, jouer le rôle de drain et augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration des contaminants depuis la surface vers la nappe (Bézégues et Dougaparsard, 2002).
- **la recharge**: il s'agit de la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (évapotranspiration, précipitations), mais également de la pente du terrain et de la nature des formations. Elle constitue un facteur important de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

L'inconvénient de l'utilisation de ces méthodes réside dans le fait qu'elles apprécient la vulnérabilité en se basant sur les caractéristiques de l'agent de pollution universel ; l'eau. Par conséquent, l'état de la vulnérabilité pourra varier tellement en relation avec le type, les propriétés et le potentiel d'atténuation d'un polluant particulier. Pour ceci, certains suggèrent que la cartographie de vulnérabilité aura plus de valeur si on traite les contaminants individuellement pour ressortir les scénarios éventuels de pollution spécifique à chacun d'eux. Cependant, dans le cas d'insuffisance des informations sur la qualité et la quantité des possibles polluants, les précautions qui seront prises suite à l'étude de la vulnérabilité (en considérant l'eau comme agent et/ou transporteur de contamination) seront également valables pour tout autre agent de pollution puisque la vitesse de percolation de l'eau est la

plus élevée et, en conséquence, les cartes qui se basent sur cet élément offriront le degré maximal de protection.

2. Critères de vulnérabilité spécifique :

a) *Nature du polluant*

Le transfert du polluant à travers le sol et la zone non saturée, dépend d'une part de la vitesse et de la direction d'écoulement et d'autre part, de la nature du polluant selon ses différentes caractéristiques, comme:

- **La Solubilité :**

Il existe une large variété de polluants de comportements différents. En effet, certains sont miscibles à l'eau d'autres non. Tel est le cas des chlorures, nitrates et des sulfates qui sont très solubles et difficilement retenus dans les sols. Le lessivage des sols en période hivernale, peut affecter l'azote et atteindre la nappe. A noter que la solubilité des métaux est contrôlée par celle des hydroxydes, mais également par le pH et le potentiel d'oxydoréduction (Eh). En outre, cette solubilité peut être modifiée par la formation de complexes avec de substances organiques ou de colloïdes. Ces dernières peuvent être précipitées par modification de pH ou de la température. C'est le cas du Cu, Pb et Zn qui peuvent précipiter avec les hydroxydes de Fer et de Manganèse. Reste à signaler que certains produits (benzène et hydrocarbures chlorés) diffusent du sol vers l'atmosphère. Il existe aussi certains hydrocarbures non miscibles à l'eau.

- **La viscosité:**

La viscosité joue un rôle déterminant dans la vitesse de déplacement de l'eau. Prenons le cas des hydrocarbures : lorsque la viscosité est supérieure à celle de l'eau, ils seront charriés et se déplaceront vers l'aval (Livet, 2004).

- **La densité :**

Si les polluants sont plus denses que l'eau, ils s'infiltreront et traverseront l'aquifère pour se poser sur le substratum soit ils stagnent dans les dépressions, soit ils sont entraînés vers l'aval.

b) *Capacités dispersives et épuratoires des sols :*

En cas d'une pollution, les sols ont des propriétés épuratoires plus ou moins développées qui dépendent étroitement de la nature du polluant.

c) *Qualité des eaux du réseau hydrographique :*

La nature des eaux du réseau hydrographique peut affecter la qualité des eaux souterraines selon sa qualité, sa densité et le degré d'entretien... etc.

d) Typologie de l'occupation du sol :

L'occupation du sol constitue un paramètre important dans l'évaluation de la vulnérabilité des nappes. En effet, certaines zones sont sujettes à des activités anthropiques apportant des modifications aux caractéristiques du milieu naturel à savoir :

- les activités agricoles ;
- l'urbanisme ;
- le développement industriel, touristique, ... etc.

e) Points sensibles :

Certains sites comme les zones d'activités agricoles, de décharges, d'épandage de margines... augmentent significativement la vulnérabilité de la nappe.

IV. Méthodes et techniques d'évaluation de la vulnérabilité :**A. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité****1. Méthodes de vulnérabilité intrinsèque**

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde (Stiger et al., 2006). Cette multiplicité des méthodes provient à la fois de la diversité des besoins, donc des objectifs visés et du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode pour une utilisation spécifique à leur pays, province ou Etat (Michaud et al, 2003). Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories nommées (Stiger et al., 2006), méthodes hydrogéologiques ou cartographiques, méthodes paramétriques et modèles numériques (Vrba and Zoporozec, 1994). Selon (Canter 1997) et la communauté des techniques d'évaluation de la vulnérabilité des ressources en eau (1993), les méthodes statistiques doivent être appliquées afin de valider les autres méthodes de vulnérabilité (Tableau 1).

Tableau 1: Principales méthodes et données relatives pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution (Michaud et al, 2003 modifié).

Type de méthode	Paramètre	Paramètre																											
		Méthode	Précipitation/composition chimique	Végétation/occupation du sol	T°	Topographie	Densité du réseau d'écoulement	Épaisseur/texture	Matières organiques	Porosité	Saturation	Perméabilité	Propriétés physique et chimique	Densité	Lien aquifère / eau de surface	Différenciation par couche	Fluctuation du niveau de la nappe	Recharge	Caractéristique zones non saturée	Profondeur à la nappe	Caractéristiques Hydrogéol. Z.S	Conductivité hydraulique	Différenciation aquifère captif	Puits de captage	Distance horizontal. au contaminant	Solubilité dans l'eau	Coefficient de partition	Taux de dégradation	Coefficient de dispersion
Méthodes paramétriques	DRASTIC (Aller et al., 1987)				*		*										*	*	*	*	*	*							
	GOD (Foster et al., 1987)						*											*	*	*									
	VULPEST (Villeneuve et al., 1987)	*					*	*	*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	*			*	*		
	SCAM (Zaporozec, 1985)						*	*			*	*	*	*				*	*	*	*	*	*				*	*	
	AQUIPRO (Passera et al., 1988)						*											*	*	*	*	*	*						
	SINTACS (Civita, 1990)				*	*	*							*				*	*	*	*	*	*						
	PESTANS								*	*	*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	PRZM									*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	GALDIT (Chachadi et al., 2005)							*											*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	SI (Ribero, 2000)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Méthodes cartographiques	AVI						*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Minnesota (GSPW, 1990)						*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	USGS (RC Berg et al., 1984)			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Méthode numérique	EVARISK (Banton et al., 1997)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	WSAP, (Cates et al., 1990)						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	MD,trojan, J.A. Perry (1988)	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	WGWSP (WDNR, 1987)						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	WISM (Shmidt, 1987)						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Seepage (JS Moore et al., 1988)			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

a) Les méthodes cartographiques :

Elles sont appelées par (Vrba et Zaporozec, 1994) les méthodes cartographiques ou bien méthodes par aires homogènes utilisées essentiellement pour des aires d'étude très étendues de point de vue géologique et géomorphologique. Cette méthode de superposition permet d'aboutir à des cartes thématiques, chacune étant relative à un paramètre donné (Vrba et Zaporozec, 1994). Parmi les méthodes cartographiques on cite "**Minnesota**", développée par le département des ressources naturelles de Minnesota (2003). Elle se base sur l'utilisation de trois niveaux dont le premier donne une idée générale sur la vulnérabilité des ressources d'eau souterraines en utilisant la carte pédologique, la carte du deuxième niveau se base sur l'utilisation des données de forage pour déterminer les zones de faibles ou moyenne perméabilité, la profondeur du plan d'eau et le type de matériau de l'aquifère, cette carte sert à affiner les résultats de celle des premiers niveaux là où les informations sont abondantes.

Quant à la carte du troisième niveau, elle traite les zones confinées, si elles existent, à partir des données de puits ou des cartes géologiques.

La carte de vulnérabilité de la zone, selon la méthode de Minnesota, résulte de la superposition de trois cartes suivantes : la carte pédologique, la carte de perméabilité et la carte de la profondeur du plan d'eau. La classification de vulnérabilité selon cette méthode se fait en quatre degrés de la plus faible au plus fort (Michaud et al, 2003).

La méthode cartographique la plus facile et la plus rapide, dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque est la méthode AVI (Van Stempvoort et al., 1992) .

Elle utilise la conductivité hydraulique verticale (k) et l'épaisseur des couches non saturées surmontant l'aquifère (b) afin d'estimer la résistance hydraulique (c) par l'intermédiaire de la formule suivante:

$$C = \Sigma bi / ki$$

Cet indice détermine la vulnérabilité par le biais de la résistance hydraulique. En effet, la résistance hydraulique représente une estimation du temps de traversée moyenne des polluants à partir de la surface du sol jusqu'à la profondeur du plan d'eau (Tableau 2).

Tableau 2: Classes d'indice de vulnérabilité AVI (Van Stempvoort et al., 1992).

Classe de vulnérabilité	Indice AVI exprimé en jours	Indice AVI (log c)
Vulnérabilité très faible	> 200	> 2,3
Vulnérabilité faible	100 – 200	2 – 2,3
Vulnérabilité moyenne	50 – 100	1,69 - 2
Vulnérabilité élevée	10 – 50	1– 1,69
Vulnérabilité très élevée	< 10	< 1

b) Les méthodes numériques

Elles constituent des outils jugés pertinents, mais sont surtout préconisées en cas de masse importante de données (Stiger et al., 2006). Elles sont basées sur des lois mathématiques et des principes analogiques simples ou complexes. Ces méthodes sont souvent développées pour l'estimation de la vulnérabilité spécifique à un polluant ou une source diffuse (Margat, 1991; in Michaud et al; , 2003).

L'estimation de la vulnérabilité ainsi que son indice varient en fonction du processus analytique utilisé. D'après Marcolongo et Pretto (1987) l'indice de vulnérabilité est défini comme suit :

$$I_v = [K (Q_i / S_i)] / MS$$

Avec : I_v : Indice de vulnérabilité; K : Conductivité hydraulique;

Q_i : Quantité d'information; S_i : Epaisseur de la couche non saturée; MS : Rétention spécifique du sol.

La vulnérabilité est estimée aussi par la méthode **EVARISK** qui est un logiciel conçu en 1997 par l'INRS – Eau ; il est défini comme un outil d'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines par les sources diffuses à l'échelle régionale. **EVARISK** est défini comme un logiciel simple d'utilisation dont la plupart des informations sont incorporées comme une base de données. Ainsi, il permet de simuler différentes composantes comme le transport de sels de déglacage, la transformation et migration des hydrocarbures miscibles, le mouvement des pesticides et des fertilisants azotés dans un contexte de gestion à l'échelle régionale. Il est conçu pour étudier les processus d'atténuation et d'écoulement au niveau des premiers mètres sous la surface. L'objectif principal de la méthode est d'estimer la recharge nette de la nappe.

c) Les méthodes paramétriques

Ce type de méthodes repose sur la sélection de paramètres ou critères considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une eau souterraine (BRGM, 2005). Chaque

paramètre présente une gamme de variations naturelles subdivisées en intervalles. Il est aussi affecté par un index reflétant le degré de sensibilité à une telle contamination.

- *Le système matriciel*

Ce système est adapté à une utilisation locale (petite échelle d'étude). Il se base sur un nombre limité de paramètres. On procède à une combinaison de trois paramètres : le type d'aquifère, le type de sol et la profondeur du plan d'eau pour définir de façon descriptive le degré de vulnérabilité des aquifères.

- *Système d'évaluation de l'impact sur l'environnement*

Un impact sur l'environnement peut se définir comme l'effet pendant un temps donné et sur un espace défini d'une activité humaine sur une composante de l'environnement. C'est à partir de 1972 qu'on a assisté aux premières études d'impact sur l'environnement à partir de la conférence des nations unies sur l'environnement humain de Stockholm. Parmi les méthodes utilisées dans l'évaluation de l'impact sur l'environnement, on peut citer les listes de contrôle, les matrices d'impact, les réseaux, les superpositions cartographiques, les modèles, les systèmes d'information géographique, les méthodes d'aide à la décision et les systèmes d'expert (André et al. 1999).

Les méthodes d'évaluation de l'impact sur l'environnement permettent d'étudier les polluants et leur incidence sur les eaux souterraines. Ces problèmes sont couramment traités par des systèmes similaires aux méthodes à simple ponctuation (RS) « **R**ating **S**ystem » ou méthodes à ponctuation et à poids (PCSM) « **P**oint **C**ount **S**ystem **M**odel ».

d) Méthode à simple ponctuation ou système de classe :

Cette méthode a été appliquée par Foster (1987) en Grande Bretagne (Civita, 1994).

Elle est adaptée pour une échelle moyenne d'étude et ne considère pas l'importance relative des critères de vulnérabilité (BRGM, 2005).

On définit un intervalle pour chaque paramètre jugé nécessaire pour la détermination de la vulnérabilité. Par la suite, on affecte à chaque paramètre une pondération selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité.

GOD est l'une des méthodes paramétriques développée par Foster en 1987. C'est une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée (Murat et al., 2003). La spécificité de cette méthode c'est qu'elle étudie la vulnérabilité de l'aquifère face au transfert vertical de contaminants à travers la zone vadose et ne tient pas compte des migrations latérales. Trois critères sont considérés dans cette méthode (Foster, 1987 ; Murat et al., 2003):

- type de nappe (**G**roundwater occurrence);
- type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class);
- profondeur de la nappe (**D**epth to Groundwater).

L'indice de vulnérabilité est calculé comme suit :

$$I = CA * CL * CD$$

Avec : **CA** : cote du type d'aquifère (0 à 1) ;

CL : cote de la lithologie (0,4 à 1);

CD : cote de la profondeur du plan d'eau (0,4 à 1).

Les valeurs possibles de l'indice GOD sont subdivisées en six classes (Tableau 3) :

Tableau 3: Intervalles des valeurs de l'indice GOD et classes correspondantes (Murat et al., 2003).

Intervalle	Classe GOD
0	aucune vulnérabilité
0 à 0,1	vulnérabilité très faible
0,1 à 0,3	vulnérabilité faible
0,3 à 0,5	vulnérabilité modérée
0,5 à 0,7	vulnérabilité forte
0,7	vulnérabilité extrême

e) Méthodes à ponctuation et poids :

Ces méthodes attribuent pour chaque paramètre une pondération selon son importance dans l'évaluation de la vulnérabilité. La méthode **DRASTIC** qui fait partie de ce groupe a été développée par the « U.S. Environmental Protection Agency (**US.EPA**) » et le « National Water Well Association (**NWWA**) » en 1987, comme moyen pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (Aller et al., 1987). Bien qu'il ne soit pas initialement conçu pour les systèmes d'informations géographiques, ce modèle repose sur une analyse spatiale classique et largement connue dans le SIG. DRASTIC génère un indice ou "score" pour le potentiel de pollution des ressources en eaux souterraines.

L'indice DRASTIC, est la somme des indices obtenus pour chacun des sept paramètres, pondérés par les poids respectifs de ces derniers. Il en résulte un indice de vulnérabilité :

$$\text{DRASTIC indice} = DR DW + RR RW + AR AW + SR SW + TR TW + IR IW + CR CW$$

avec : D, R, A, S, T, I, C pour désigner respectivement :

- 1- Profondeur du plan d'eau ou **D**epth to Water, noté "**D**";
- 2- Recharge nette ou Net **R**echarge, noté "**R**";
- 3- Milieu aquifère (caractéristiques géologiques) ou **A**quifer media noté "**A**";
- 4- Type de Sol (texture) ou **S**oil media (texture) noté "**S**";

- 5- La Topographie- pente du terrain ou Topography (slope) noté "T";
 6- L'impact de la zone non saturée (zone vadose) ou Impact of the vadose zone, noté "I";
 7- La conductivité hydraulique ou perméabilité de la zone saturée ou Hydraulic Conductivity, noté "C".

Avec **R**: notation ou score ;

W: poids

Les valeurs de l'indice DRASTIC, varient entre 23 à 226 dans le cas de la version standard. Les intervalles des indices de vulnérabilité utilisés pour déterminer le degré de vulnérabilité dans la présente étude, sont ceux proposés par Engel et al. en 1996, suite à une étude de la vulnérabilité à la pollution effectuée dans différents aquifères de la zone semi aride aux USA (Tableau 4).

Tableau 4: Critères d'évaluation des degrés de vulnérabilité DRASTIC selon Engel et al. (1996).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	1 - 100
Moyen	101 - 140
Elevé	141 - 200
très élevé	> 200

Une autre méthode qui a été largement appliquée dans différents cas d'étude, c'est la méthode SINTACS. Développée par Civita (1994), cette méthode de vulnérabilité intrinsèque est inspirée de la méthode DRASTIC. La seule différence se situe au niveau des poids attribués pour chaque paramètre.

L'indice de vulnérabilité SINTACS noté « I » est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des sept paramètres correspondants :

$$I = Sp * Sc + Ip * Ic + Np * Nc + Tp * Tc + Ap * Ac + Cp * Cc + Sp * Sc$$

Où **S** : soggiacenza, ou la profondeur du plan d'eau

I : infiltrazione ou la recharge efficace de l'aquifère

N : effecto di autoepurazione del non saturo, ou l'effet de l'autoépuration de la zone vadose

T : tipologia della copertura, ou type de sol

A : caratteristiche idrogeologiche dell'aquifero, ou lithologie de l'aquifère

C : conductibilità dell'acquifero), ou la conductivité hydraulique de l'aquifère

S : l'acclivita della superficie topografica, ou la pente topographique

p et **c** : sont respectivement le poids du paramètre et la cote associés.

La spécificité de la méthode SINTACS consiste à mettre en jeu cinq scénarios différents de vulnérabilité à la pollution. Dans chaque scénario, les notes sont subdivisées en intervalles

variant de 1-10, les notes sélectionnées pour chaque intervalle sont multipliées par les poids appropriés (Civita et De Maio, 2003).

- *Le scénario « Impact Normal »* : il est conçu pour les aquifères constitués par des sédiments non consolidés, avec une profondeur du plan d'eau relativement faible, et qui sont localisés dans des aires à sols épais. Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions où les activités anthropiques sont rares avec existence ou non de terres cultivées ;

- *Le scénario « Impact Sévère »* : il diffère du scénario 'Impact normal' dans la mesure où il s'intéresse de plus aux régions avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts de déchets liquides et solides;

- *Le scénario « Drainage important à partir d'un réseau superficiel »* : il s'applique essentiellement aux aires à forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau, telles que les zones inondées et les zones marécageuses. Dans ce scénario, la profondeur du plan d'eau est pratiquement nulle et les capacités d'atténuation relatives au sol et à la zone vadose sont faibles, et par conséquent de fortes concentrations de contaminants peuvent librement atteindre l'aquifère. Les caractéristiques de l'aquifère (exemple : Conductivité hydraulique, perméabilité...) sont à considérer ;

- *Le scénario « terrain très karstifié »* : il est adapté aux aires à forte karstification. Dans un tel scénario, le temps de parcours sera limité et la recharge nette sera égale à la précipitation efficace. On note aussi que la zone non saturée joue un rôle négligeable ;

- *Le scénario « Terrain fissuré »* : il est adapté aux aires formées par des roches endurcies et dont la perméabilité élevée est en relation avec une forte fracturation. Dans de tel scénario, la conductivité hydraulique et la lithologie de l'aquifère jouent un rôle très important. Le sol, s'il existe, ainsi que la pente topographique règlent le ruissellement et par conséquent la capacité d'ingestion du système.

Certaines méthodes ont été développées par des organismes pour une utilisation spécifique à leur pays, province ou Etat comme la méthode **GALDIT**. Cette méthode a été développée pour la première fois lors du projet "EU- India INCO-DEV COASTIN" (Michaud et al. 2003) et dont l'objectif était de déterminer la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine (Chachadi et Labo-Ferreira, 2005). Cette méthode se base sur les caractéristiques hydrogéologiques (profondeur du plan d'eau, épaisseur de l'aquifère), morphologiques (distance à la côte), hydrodynamiques (Transmissivité) et hydrochimiques (impact des intrusions marines). Les paramètres de cette méthode se basent sur les caractéristiques

physiques qui peuvent affecter l'intrusion marine (Agarwadkar, 2005). En effet, GALDIT tire son nom des paramètres suivants :

- Type de l'aquifère ou **Groundwater occurrence** : l'aquifère peut être confiné, semi confiné ou libre. Ainsi, la vulnérabilité à l'intrusion marine dépend du type d'aquifère. Naturellement l'aquifère libre est exposé plus à l'intrusion marine à cause de l'absence de toit imperméable comparé à l'aquifère confiné et semi confiné. Mais en présence de surexploitation, le pompage excessif peut engendrer un cône de dépression et fait appel à l'eau de mer et génère donc du front salé. Ceci se voit plus nettement au niveau de l'aquifère confiné que pour les autres types d'aquifères. Donc, la note la plus élevée est attribuée à l'aquifère confiné. Pour ces raisons, il faut voir l'état de confinement de tout d'aquifère avant d'attribuer les différentes notes pour le paramètre en question.
- Conductivité hydraulique (**Aquifer hydraulic conductivity**) : ce paramètre est utilisé pour mesurer la vitesse d'écoulement dans la nappe et par la suite vers la mer. Le biseau salé est influencé par la conductivité hydraulique. En effet, pour le même taux d'exploitation, la vitesse d'avancement du front salé est étroitement liée à la conductivité hydraulique.
- Profondeur du plan d'eau (**Depth of groundwater Level above sea**) : c'est la profondeur du plan d'eau par rapport au zéro de la mer. C'est un facteur déterminant dans l'évaluation de l'intrusion marine puisqu'il détermine la pression hydraulique capable de pousser le front salé. Dans l'attribution des notes pour le paramètre « **L** » de GALDIT, il faut considérer la variation du niveau du plan d'eau (pour une longue période). Généralement, on considère surtout les valeurs du plan d'eau les plus faibles du fait qu'elles fournissent une vulnérabilité élevée.
- Distance par rapport à la côte (**Distance from the coastline**): elle est mesurée perpendiculairement au rivage, noté "**D**". La distance à la côte est mesurée perpendiculairement par rapport à la côte pour des points d'eau situés au niveau d'une image Landsat géoréférencés par le logiciel « Arc Gis ».
- Impact de l'état d'intrusion marine existante (**Impact of existing status of seawater intrusion**) : la zone d'étude est stressée et ceci influence l'équilibre entre l'eau douce et le front salé. Chachadi et Labo-Ferreira (2001) ont proposé le rapport $Cl^- / (HCO_3^{1-} + CO_3^{-2})$ comme autre critère d'évaluation de l'intrusion marine au niveau des nappes côtières.

Toutefois, d'autres rapports peuvent être utilisés, citons par exemple $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}$ (Tellam et al., 1986; Pulido-Leboeuf et al., 2003; Trabelsi et al., 2005).

- L'épaisseur de l'aquifère (Thickness of the aquifer), noté "T". Chaque paramètre de GALDIT est affecté par un poids relatif de 1 à 4 et des notes variant de 1 à 10, dépendant des conditions locales (Agarwadkar, 2005).

L'indice GALDIT est la somme des indices obtenus pour chacun des six paramètres, pondérés par les poids respectifs de ces derniers. Il est calculé par la formule suivante :

$$\text{GALDIT} = (1 \times G) + (3 \times A) + (4 \times L) + (2 \times D) + (1 \times I) + (2 \times T)$$

avec G, A, L, D, I, T représentent les 6 paramètres de GALDIT déjà évoqués.

L'indice de vulnérabilité GALDIT varie entre 13 et 130 et peut être classé en quatre classes selon le tableau 5.

Tableau 5: Classes de vulnérabilité selon la méthode GALDIT (Chachadi et al., 2003).

Indice GALDIT	Classe de vulnérabilité
< 30	Non vulnérable (absente)
50 – 70	Vulnérabilité faible
70 – 90	Vulnérabilité moyenne
> 90	Vulnérabilité élevée

f) Les méthodes statistiques

Les méthodes statistiques représentent la dernière catégorie des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité, utilisées ces dernières années à travers le monde. De plus les études statistiques sont utilisées pour tester les autres méthodes telles que le krigeage, utilisé souvent dans la description des paramètres qualitatives de l'eau (Lindstrom, 2005). Elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination (Antonakos et Lambrakis, 2007). Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. De ce fait, plus la probabilité de contamination est importante plus la vulnérabilité est élevée. La méthode la plus utilisée est celle de l'étude de la sensibilité d'analyse appliquée aux méthodes utilisant un grand nombre de paramètres.

Comme exemples d'applications, la sensibilité d'analyse appliquée au niveau du Japon (Raj Pathak et al., 2008), au niveau d'Iran (Babiker et al., 2005).

Citons d'autres exemples d'application : Teso et al. (1996) a utilisé le modèle de régression logistique pour prévoir la vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis des pesticides. Un exemple de méthode statistique CALVUL (Troiano et al., 1999) est utilisé pour déterminer la vulnérabilité des eaux souterraines à la diffusion des pesticides en Californie.

Au niveau de Texas, un autre exemple a été développé par [Evans et Maidment \(1995\)](#) qui se base sur la distribution des nitrates comme paramètre de délimitation des zones vulnérables.

V. Outils d'évaluation de la vulnérabilité

A. Les Systèmes d'information géographique :

Un système d'information géographique (SIG) est par définition un système permettant de stocker, de consulter, de traiter et d'afficher de l'information géographique. Les SIG doivent répondre aux besoins des décideurs en matière de gestion et d'aménagement des territoires ([Minivelle et Souiah, 2003](#)).

B. Historique et fonctions de base des SIG :

Les systèmes d'information géographique sont nés de la rencontre entre la gestion de l'information graphique et le dessin assisté par ordinateur (DAO) sous Autocad. Les premiers SIG ont fait leur apparition au Canada et aux USA vers les années 1964-1965 dès qu'il fut possible d'établir un lien entre la géométrie des objets (lignes, points et surfaces) et les informations qui leur sont associées ([Minivelle et Souiah, 2003](#)). C'est ainsi que les premières versions du logiciel Arc Info voient le jour ; En effet, l'outil SIG permet de gérer et de traiter l'information liée aux objets géographiquement localisés. Il met à la disposition de l'utilisateur de multiples fonctionnalités dont on cite : acquisition et gestion des données, interrogation des données par des requêtes, le traitement, la mise à jour et la représentation graphique.

Dans le cas d'une situation complexe (exp. pollution accidentelle) où le volume d'information est important, et les délais de décision sont courts, les SIG sont quasi indispensables ([Pornon, 1995](#)). En effet, ils aident à :

- accéder à des informations localisées et les mettre en relation ;
- améliorer la productivité et la gestion des activités ;
- faciliter la prise de décision et la communication ;
- créer de nouveaux produits, acquérir de nouvelles aptitudes, assurer de nouveaux services...

C'est un outil de gestion, d'analyse, de synthèse, d'aide à la décision et de communication interne et externe.

C. Intérêt des SIG dans la cartographie de la vulnérabilité :

- **Saisie :**

Avant d'utiliser des données papier dans un SIG, il est nécessaire de les convertir en format numérique. Cette étape essentielle, depuis le papier vers l'ordinateur, s'appelle digitalisation. Cette dernière est faite avec l'Arc Map de l'Arc GIS 10.3. Pour cette fin, on peut utiliser la digitalisation manuelle (table à digitaliser). Dans des cas, certaines données géographiques

sont disponibles dans des formats standards lisibles par les SIG et peuvent être directement intégrées à un SIG.

- **Manipulations :**

Les sources d'informations peuvent être d'origines très diverses. Il est donc nécessaire de les harmoniser afin de pouvoir les exploiter conjointement (c'est le cas des échelles, du niveau de détail, des conventions de représentation...) Les SIG intègrent de nombreux outils permettant de manipuler toutes les données pour les rendre cohérentes et ne garder que celles qui sont essentielles à la cartographie des différentes couches indispensables pour l'obtention de la carte de vulnérabilité.

- **Gestion, Interrogation et analyses :**

Disposant d'un SIG et de données, on peut poser des questions pour mieux gérer les données afin de répondre aux besoins de la cartographie de la vulnérabilité. En effet, on peut interroger une base de données relativement consistante, par l'intermédiaire de requêtes attributaires, spatiale et topologique (zones tampons) qui fournissent une réponse à certaines questions, comme :

- ❖ Quels sont les piézomètres disposant des données concernant les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité...)?
- ❖ Quels sont les points d'eau destinés à la surveillance de la nappe (Nitrate et salinité)?

Les SIG procurent à la fois des outils simples d'interrogation et de puissantes solutions d'analyses accessibles à tout utilisateur.

Les SIG modernes disposent de nombreux et puissants outils d'analyse, tels que l'analyse de proximité et l'analyse spatiale.

- **L'analyse de proximité :**

Ce type d'analyse est utilisé lors de l'établissement du maillage. En effet, ce dernier a été créé par la fonction polygone de Thiessen de l'extension Spatial Analyst de l'Arc Map. Le maillage correspond à un découpage de la zone d'étude en une grille de pixels de même taille et sert comme support pour les différents paramètres de la méthode utilisée dans l'évaluation de la vulnérabilité (Saidi et al., 2010).

- **L'analyse spatiale :**

L'intégration de données au travers des différentes couches d'information permet d'effectuer une analyse spatiale rigoureuse. Ce croisement d'information, si elle peut s'effectuer visuellement (à l'identique de calques superposés les uns aux autres) nécessite souvent le croisement avec des informations alphanumériques. Selon la méthode de vulnérabilité utilisée

un nombre de couches est croisé afin d'obtenir la carte finale et ceci par l'intermédiaire des différentes fonctions de l'extension Spatial Analyst de l'Arc Map.

- **Visualisation :**

Pour de nombreuses opérations géographiques, la finalité consiste à bien visualiser des cartes et des graphes. Une carte vaut mieux qu'un long discours. En effet, la carte est un formidable outil de synthèse et de présentation de l'information. Les SIG offrent à la cartographie moderne de nouveaux modes d'expression à l'aide de vues 3D par l'intermédiaire de l'extension 3D analyst de l'Arc Map ou à l'aide de l'Arc Scène de l'Arc Gis 10.3, permettant d'accroître de façon significative leurs rôles dans l'intégration et la manipulation de masse importante de données.

VI. Conclusion :

En conclusion, le choix des méthodes adéquates pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution d'un aquifère donné doit se baser sur les quatre points suivants :

- L'objectif à atteindre ;
- L'échelle de la carte à élaborer ;
- La disponibilité des données de base ;
- La possibilité de l'interprétation et de combinaison des différents paramètres retenus dans la méthode.

CHAPITRE II :
CADRE GENERAL DE
LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE II CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

I. Situation géographique :

Faisant partie au bassin versant saharien, caractérisée par un climat semi-aride avec des précipitations inférieures à 350 mm/an.

La région d'étude est située à une cinquantaine de kilomètres au Nord de la ville de Tébessa et à 260 Km de la mer Méditerranée, à la limite de la frontière Algéro-Tunisienne, elle appartient entièrement au bassin versant saharien et fait partie intégrante des hauts plateaux, qui constituent un réseau serré de montagnes de moyenne à forte altitude plus ou moins séparées par des dépressions. Elle s'étend sur environ 240 Km² depuis Morsott au Sud jusqu'à El Aouinet au Nord.

Géographiquement la zone étudiée est située à l'extrême Nord-Est de l'Atlas saharien, entre les coordonnées suivantes : 390000 - 420000 X; et 3940000 - 3970000 Y (WGS 1984 UTM Zone 32N), cette zone est limitée au Nord par la ville d'El Aouinet, au Sud se trouve le bassin d'effondrement Tébessa-Morsott, à l'Est cette zone d'étude est limitée par la commune de Boukhadra et à la Ouest par le bassin de la Meskiana (figure.1).

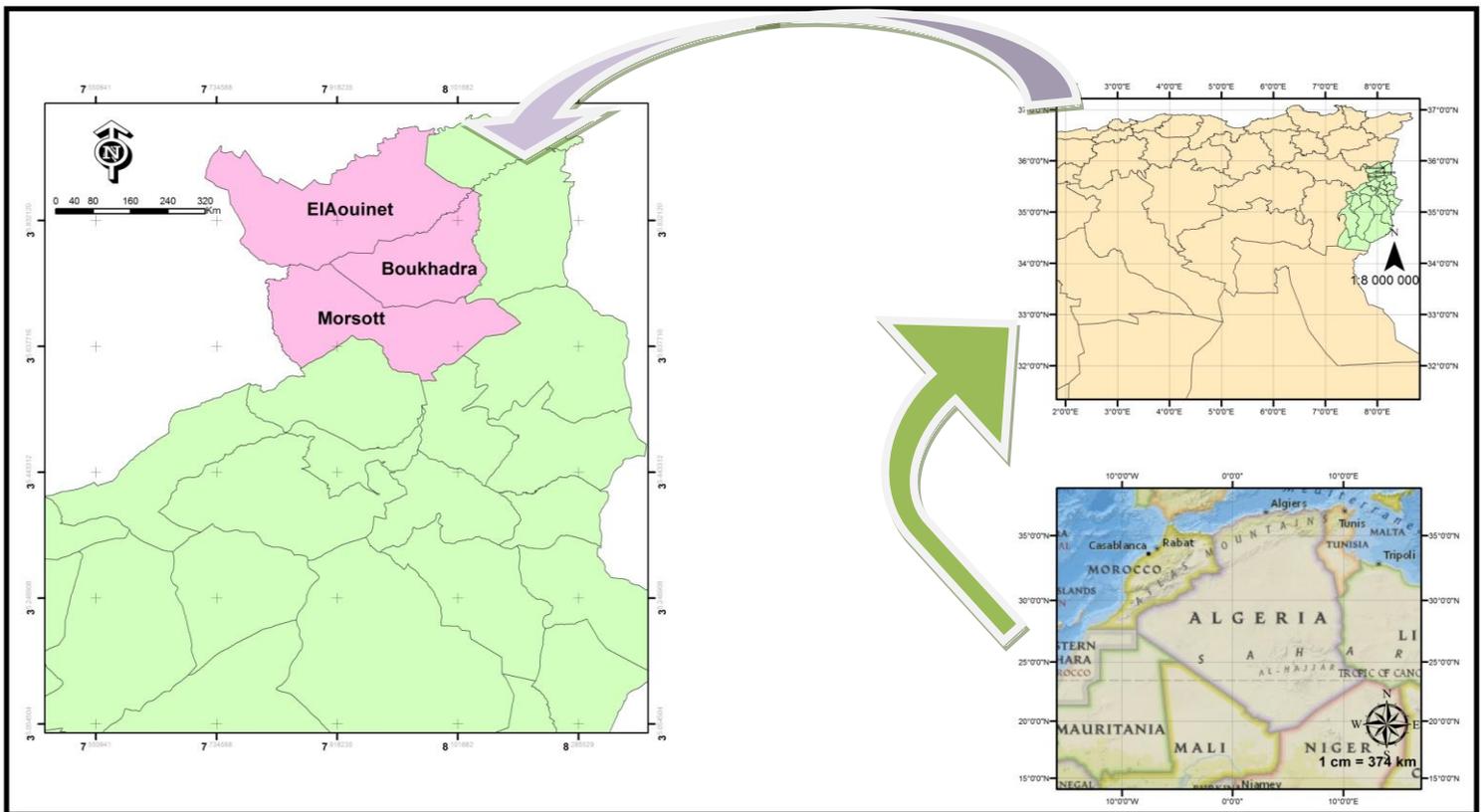


Figure 1: Situation de la zone d'étude

La région d'étude couvre le fossé tectonique Plio-quaternaire de Morsott qu'emprunte sur tout son cours, le lit de l'Oued Chabro. Ce fossé sépare à l'Ouest par le diapir d'Argoub Zembai du diapir de Boukhadra à l'Est. Ce large fossé d'effondrement est entouré par des massifs calcaires. Au Nord on trouve, Djebel Mesloul, à l'Est Djebel Guelb, El Gounatas et Djebel Boukhadra, Belkif et Argoub Zembai constituent le reste des limites (figure 2).

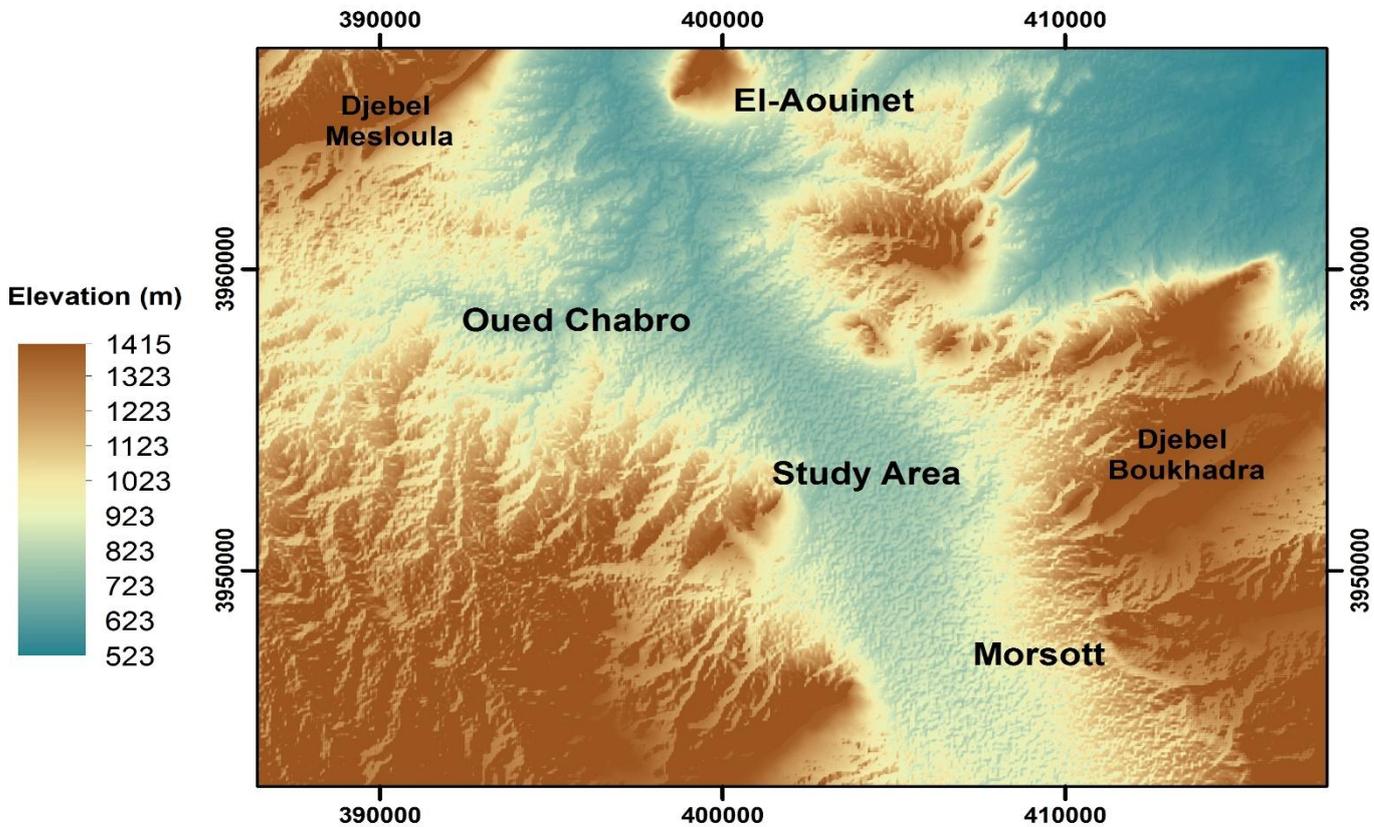


Figure 2: Carte topographique de la zone d'étude

II. Caractéristiques générales de la zone d'étude :

A. Particularités démographiques et économiques :

L'évaluation des caractéristiques démographiques et des conditions socio-économiques du secteur d'étude contribue à la valorisation des ressources humaines et naturelles en vue d'une exploitation meilleure pour un développement durable adapté aux particularités de la région.

L'eau et sa valorisation sont un facteur primordial de développement, et la stratégie de son exploitation et de sa gestion doit absolument s'intégrer de façon cohérente au développement global de la région.

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.

B. Cadre climatique et hydrologique :

1. Précipitation et Température :

La pluviométrie est une composante essentielle du cycle hydrologique. En hydrogéologie, et en particulier pour les nappes phréatiques, elle conditionne l'alimentation et représente le premier facteur de recharge.

Afin de caractériser cette composante climatique au niveau de la région d'étude, trois stations pluviométriques ont été considérées.

Ces stations sont la station de Morsott et El Aouinet (concernant les précipitations de l'année 1987 jusqu'au 2012) et la station de Tébessa à partir de 1987 jusqu'au 2016. Elles présentent une bonne base de données s'étalant sur des périodes d'enregistrement longues.

En ce qui concerne les températures, les données disponibles sont relatives à la période 1987-2016 (Station de Tébessa).

2. L'évaporation :

Le taux d'évaporation dépend de différents facteurs dont les plus importants sont:

- le pouvoir évaporant de l'atmosphère qui dépend à son tour du déficit hygrométrique de l'air (différence entre la tension de vapeur saturante et la tension de vapeur effective de l'air), de la température de l'eau et de l'air, de la vitesse du vent, de la pression atmosphérique et de la qualité d'eau disponible (l'augmentation du résidu sec de l'eau diminue le potentiel d'évaporation) ;
- la nature de la surface qui s'évapore et qui dépend des dimensions de la surface d'eau libre (étendue, profondeur) et du sol (nu ou couvert, nature, porosité, granulométrie, degré d'humidité).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la mesure de l'évaporation, au niveau de la station météorologique de Tébessa, l'évaporation est mesurée à l'aide d'un bassin d'évaporation de type « Colorado ».

3. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est peu développé résultat d'un rythme de précipitation relativement modérée, il est représenté avec des petits cours d'eau temporaires aux larges vallées bien élaborées, Cette zone est drainée par oued Chabro et se déversant dans oued Mellegue.

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.

L'écoulement du système hydrographique se fait du Sud vers le Nord, caractère typique des oueds de toute la région.

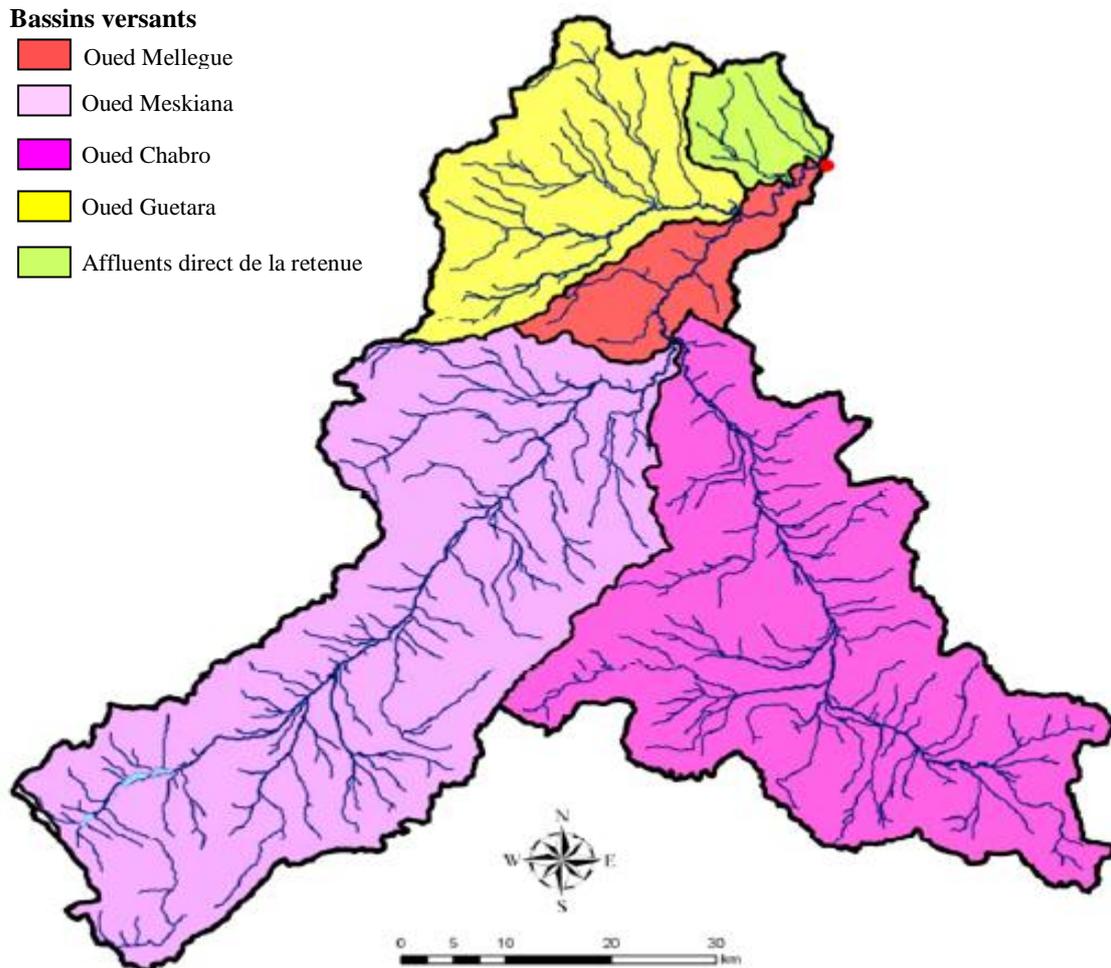


Figure 3: Carte du réseau hydrographique

CHAPITRE III :

APERÇU

GEOLOGIQUE

CHAPITRE III

APERÇU GEOLOGIQUE

I. Introduction :

La structure géologique du Nord de l'Algérie est très complexe. Les plus importantes unités de l'ensemble du Maghreb sont : l'Atlas Tellien, le Rif et Prérif. Ces ensembles sont formés par des nappes de charriage superposées dont les éléments situés le plus au sud dépassent l'autochtone des Hautes Plaines (Hauts Plateaux) à structure tabulaire. Plus au sud, nous avons l'Atlas Saharien dont les longs et larges plis sont orientés vers les limites du Sahara et ont une direction WSW-ENE. La ligne limite est formée par la principale faille saharienne.

Par endroits nous observons un caractère de flexure et en d'autres, nous avons des discontinuités se caractérisant par des rejets pouvant atteindre 2000 m et plus. Cette structure a été générée par les mouvements tertiaires, principalement du Miocène. Les massifs de Grande et Petite Kabylie, d'Alger et du Chenoua en Algérie et Tétouan au Maroc, sont formés par des formations paléozoïques ou plus anciennes, métamorphisés. Au Sud, ces massifs sont bordés par des formations calcaireuses dressées, du Mésozoïque- Eocène, formant des « écailles ». Ces écailles forment sur le territoire algérien une chaîne de Monts calcaires (La Dorsale Kabyle) et au Maroc (la dorsale calcaire). Dans ce qui suit, nous donnons un bref aperçu géologique sur le NE Algérien (figure 4).

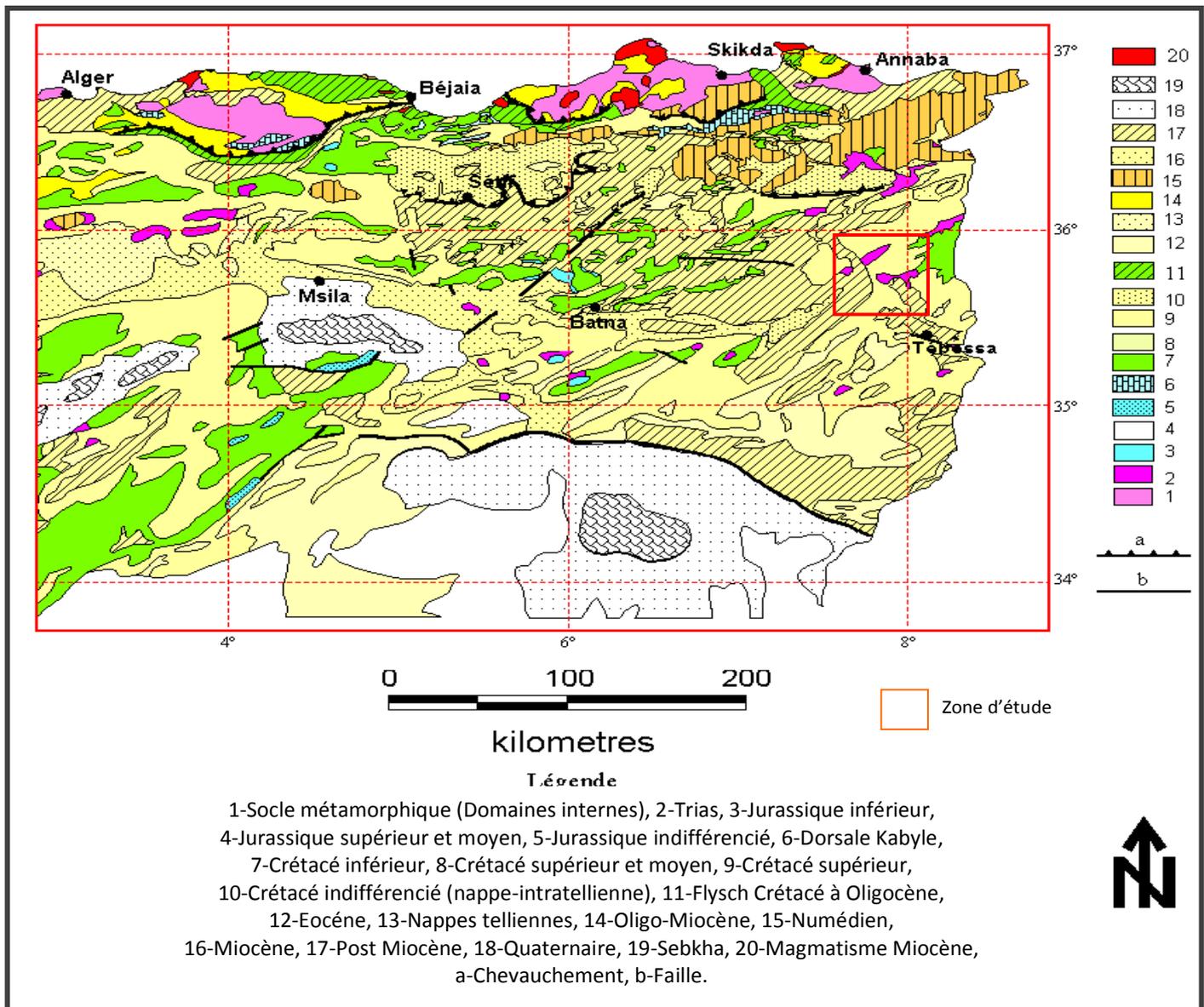


Figure 4: Carte géologique du Nord Est Algérien (Extrait de la carte géologique au 1 : 500 000) (FEHDI 2008)

II. Historique des travaux :

De nombreux travaux ont déjà été entrepris par différents auteurs pour l'étude du domaine atlasique et les zones telliennes. Sur le domaine atlasique les premiers travaux sont dus à Flamand 1911. D'autres travaux ont suivi dont Bassoulet., 1966 - 1973; Kulke.,1972; Delfaud., 1974; Abed et al., 1982; Douihasni., 1976; Guiraud., 1973; Elmi., (1978- 1982- 1986- 1998) ; Kazi-tani., 1986; Ait-Ouali., 1991; Tlili., 1995; Mehadjj., 1995; Meddah.,1998 ; Vially et al., 1994; Elmi et al., 1998 ; Frizon de Lamotte et al., 2000; Yelles et al., 2001; Bracene., 2002 et bien d'autres études. Ces travaux ont développé dans le cadre de la recherche universitaire ou industrielle et traitent principalement les aspects stratigraphiques, structuraux, sédimentologiques et pétroliers.

Les principaux travaux sont cités dans les références bibliographiques. Nous résumons les aspects abordés dans quelques uns de ces travaux.

FLAMAND (1911): Ce travail constitue le premier découpage stratigraphique des séries de l'Atlas Saharien.

CORNET (1952): Décrit la structure du domaine atlasique et définit les principaux accidents: Nord et Sud atlasique.

J.DEVAUX (1966): a étudié le Crétacé inférieur et moyen des confins Algéro-Tunisiens.

MACOIN (1969): effectue la synthèse biostratigraphique du gisement FO⁻², dans le Dj.Foua, l'objectif, essentiellement pétrolier du forage a permis de reconnaître l'extension vers l'Est des calcaires subrécifaux du Coniacien. En utilisant la même méthode que pour HTG⁻¹, il individualise une série stratigraphique, allant de l'Albien au Campanien.

AUGIER (1970): a présenté une classification lithologique des formations du Crétacé sur la plate forme et attire l'attention sur la possibilité de développement des faciès récifaux aux confins Algéro-tunisiens.

FAHMY et N.TEWFIK (1972): réalisent une étude sur la nature des sédiments du Crétacé dans le Sud-Est constantinois, ils ont établi des cartes en isopaques et de lithofaciès ainsi que des coupes paléogéographiques tout en évoquant les zones a potentialités en hydrocarbures.

GUIRAUD (1973): par son étude sédimentologique des terrains post-triasiques, au Crétacé supérieur, dans l'avant-pays de la chaîne alpine et de la mole constantinois, aboutit à une différenciation paléogéographique très nette.

BEGHOUL (1974): retrace la paléogéographie du Sud- Est Constantinois et de l'Ouest tunisien par une étude détaillée de la région des Hamimats. Il entreprend des études de sondages effectués par la Sonatrach et il s'aide de la microfaune benthique et planctonique pour établir des datations et une reconstitution des paléoenvironnements.

J. M. VILA (1980): a effectué une étude des formations autochtones à partir d'un secteur relativement central des monts de Ain Yaghout au Sud de Constantine dans le secteur de Dj. Toumbait (du Lias au Bérriasien) et hannout El kebir et hannout shrir, l'Aptien supérieur et l'Albien de Oum kcherid, l'Aptien de Dj. Sidi Rgheiss et l'ensemble du domaine allochtone de l'Algérie du Nord.

N-KAZI-TANI (1986): fait un important travail de synthèse géodynamique, il intéresse l'ensemble des bassins du domaine intra plaque du Nord de l'Algérie; ce travail fondé sur une approche méga séquentielle aboutit à la définition des principaux phénomènes géodynamiques ayant régit l'évolution des bassins au cours du Mésozoïque et propose une typologie de ces bassins.

S- ELMI (1978, 1982, 1986): souligne les différences de l'évolution géodynamique entre les domaines atlasiques (Monts de Ksour), pré atlas (Nador et Tiaret) et Tlemcenien (Monts de Rhar Roubane).

R.GUIRAUD (1990): reprenant ses travaux de 1973, fait une étude synthétique et complète consacrée à l'évolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne Alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines.

AIT-OUALI (1991): Ce travail est réalisé dans le but de l'étude des séries liasiques des Monts des Ksour intégrant l'évolution diagénétique afin de reconstituer la géométrie et la dynamique du bassin.

MEKAHLI (1995): Le travail a porté sur l'étude de L'Hetangien et Bajocien supérieur des Monts des Ksour: Biostratigraphie, sédimentologie, évolution paléogéographique, et stratigraphie séquentielle.

TLILI (1995): Il aborde le phénomène Récifal du Bajocien de la bordure méridionale de l'Atlas Saharien Occidental (secteur d'Ain Ouarka).

B. ADDOUM (1995): a effectué un travail sur la dynamique du sillon atlasique dans la bordure orientale de l'Atlas Saharien avec l'interprétation de l'évolution dynamique des bassins du Berriasiens à l'Eocène.

BELFAR.F et DOUAR M.C (1996) : il traite le Trias de L'Atlas Saharien Occidental : Stratigraphie et cadre géodynamique de sa mise on place. Mémoire d'ingénieur, IST/USTHB.

MEDDAH (1998): il établit une synthèse sur quelques appareils diapirique de l'Atlas Saharien occidental, dans le but d'une étude structurale et pétrographique.

BELFAR (2000): il traite de la géométrie et de la dynamique des bassins Triasiques de l'Atlas Saharien Occidental et les hauts plateaux (Algérie) (Thèse de Magister). IST/USTHB.

M.HERKAT (2002): a réalisé un travail qui porte sur l'étude stratigraphique des coupes du Crétacé supérieur de l'Aurès occidental qui a permis de mettre en évidence l'organisation séquentielle des dépôts et d'entreprendre une première révision des attributions stratigraphiques.

BRACENE (2002): Ce travail présente plusieurs coupes régionales et synthétise les principales connaissances du Nord de l'Algérie. Il dresse les principales relations structurales entre les différents ensembles structuraux composant le Nord de l'Algérie.

III. Aspects structuraux de l'Atlas Saharien :

L'Atlas Saharien sens large, forme l'avant-pays de la chaîne tellienne des Maghrébides, résultant de la fermeture de la **Téthys (Bouillin., 1986)**. Séparé dans sa partie méridionale de la Plate Forme Saharienne par l'Accident Sud Atlasique, il est classiquement interprété

comme une chaîne intracontinentale (Mattauer et al. 1977). Il est composé de trois faisceaux de plis organisés en échelons et formant du SW vers le NE; les Monts des Ksour, le Dj Amor, les Monts de Ouled Nail, les Aurès et les Mont de Mellègue.

L'Atlas Saharien est marqué par de nombreux époinçements de masses évaporitiques du Trias affleurant sur plusieurs kilomètres et ayant une direction générale NE-SO formant des diapirs, (figure 5), ils présentent une allure oblongue et perçant souvent les structures anticlinales. Parfois, le matériel est mobilisé en profondeur mais bloqué sous le Jurassique. Ce matériel triasique est également retrouvé re-sédimenté au sein du Jurassique supérieur (Herkat, 1992). Il est aussi décrit au sein du Crétacé dans le Tell (Leikine, 1971). Ces différentes positions structurales et sédimentaires traduisent une remontée diapirique à différentes périodes.

L'Atlas Saharien est bordé par deux accidents majeurs; l'Accident Nord Atlasique et l'Accident Sud Atlasique.

A. L'Atlas Saharien Oriental, limites et structuration

1. Les accidents majeurs

L'Atlas Saharien Oriental est traversé par de nombreux accidents d'orientation variable, dont les plus importants sont ceux de Biskra-Négrine et de Morsott à déplacement dextre. Ces derniers ainsi que l'Accident Sud Atlasique sont des accidents de socle (Vially et al., 1994). Cette zone est affectée par de nombreuses structures tectoniques fragiles se traduisant par le développement de trois familles principales de failles (Figure 6). Parmi les plus importantes, nous distinguons les directions.

- NE-SW, longitudinales, soulignées par les époinçements diapiriques.
- NW-SE, transversales à décrochement dextre.
- E-W déterminant les flexures Sud Aurésienne et Sud Atlasique.

2. Les plissements

Les différentes ceintures de chevauchement-plissement constituant l'Atlas Saharien Oriental se développèrent sur anciens grabens initiés pendant le rifting triasico-liasique (Piqué et al, 2002, Frizon de Lamotte et al, 2006). Elles résulteraient de l'inversion Cénozoïque liée à la convergence Europe-Afrique (Frizon de Lamotte et al, 2006).

Dans le domaine Atlasique Oriental, les systèmes de plissement montrent (1) des directions NE-SW, (2) des directions E-W et (3) des directions variant de NE-SW à E-W.

- Les plis de direction NE-SW ont été reliés à la phase de raccourcissement NW-SE d'âge fini-Eocène (phase Atlasique) (Laffite, 1939; Vila, 1980; Aissaoui, 1984 et Kazi Tani, 1986).

Elle correspond à la phase majeure d'inversion tectonique initiée dans les grabens triasicoliasiques. Les travaux récents montrent que cette inversion a débutée au Maestrichien

(Herkat et Guiraud, 2006).

- Les plis de direction ENE-WSW à E-W, affectant les séries villafranchiennes correspondent

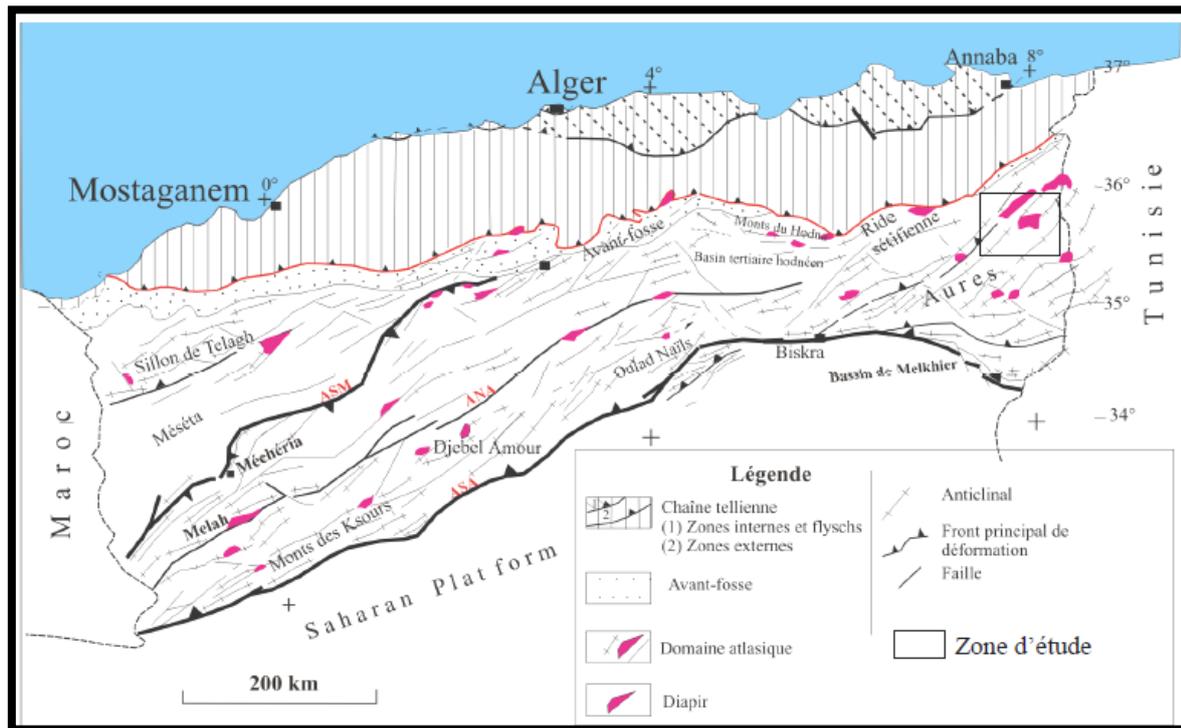


Figure 5: Schéma structural du Nord de l'Algérie (Bracène et al., 2002)

à la phase post-pliocène décrite dans les monts de Nemmentcha (Aissaoui, 1984 et Kazi Tani, 1986). Ils sont engendrés par un raccourcissement N-S.

- Les directions de plissement passant de NE-SW à E-W montrent des formes sigmoïdes induites par des décrochements de direction NE-SW. On notera également que certaines directions de plis correspondent à la réorientation de plis NE-SW liée à la phase atlasique. La réorientation de ces plis est compatible avec des décrochements dextres.

3. Les structures extensives :

Dans le domaine Atlasique Oriental tous les fossés d'effondrement coupent des structures atlasiques d'âge fini- lutétien. Ces fossés (Dubourdieu., 1956), sont comblés par des dépôts Plio-Quaternaires pouvant atteindre une puissance de 170 m (fossé de Tebessa-Morsott).

La phase distensive du Miocène se manifeste par la création des fossés d'Oulad Soukies, de Foussana-Kasserine et du bassin d'ELMa Labiod.

Il existe deux phases de plissements post miocènes dans les environs de Tébéssa :

- les plissements du Pliocène inférieur, dont le stade distensif a provoqué l'effondrement du fossé de Morsott; les plissements du Villafranchien inférieur, dont le stade distensif a provoqué l'effondrement du fossé de Tébessa, ainsi que celui de Hammamet.

Le substratum des fossés de Tébessa et Hammamet est constitué d'une mosaïque de horsts et grabens.

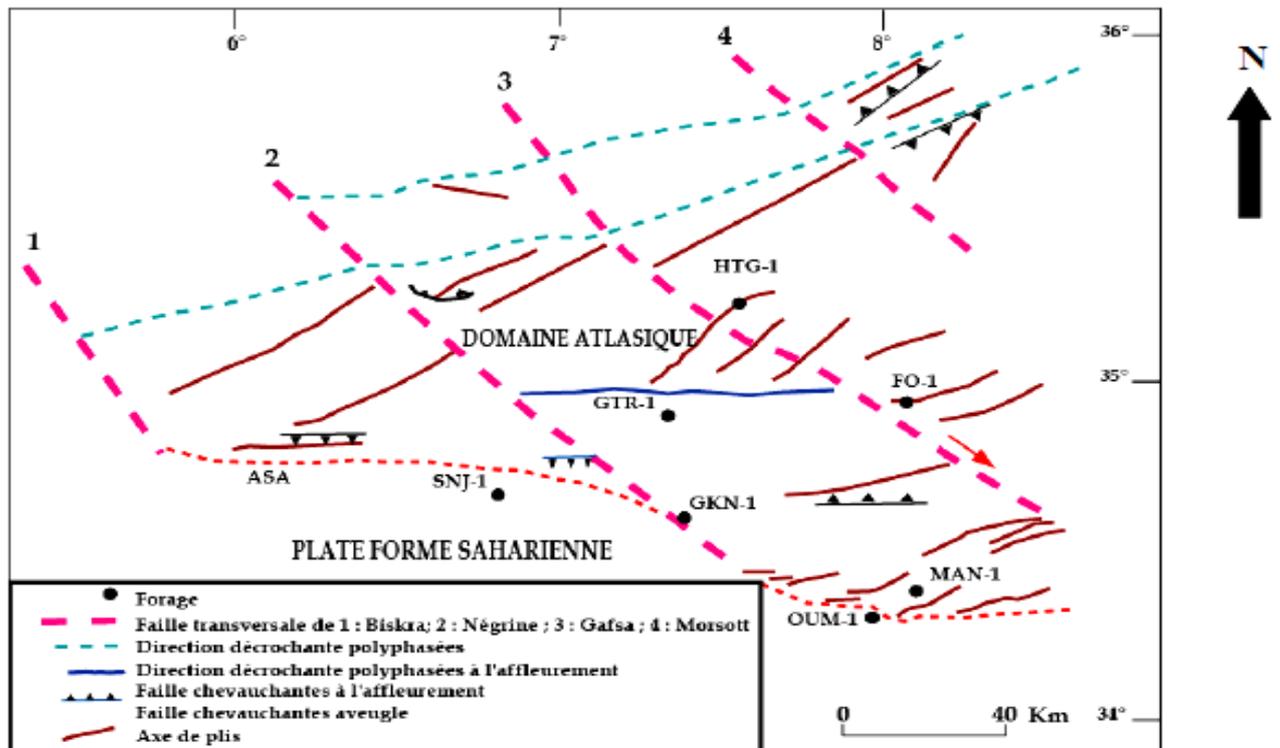


Figure 6: structural simplifié du Sud Est Constantinois (Kheidri.L.H, 2001,)

4. Les phases orogéniques :

La structure actuelle de l'Atlas Saharien Oriental en plis coffrés de direction NE-SW devenant E-W à l'approche de l'Accident Sud Atlasique (monts de Négrine) ainsi que la fracturation de direction NNE-SSW, NW-SE, NE-SW, E-W et N-S est le résultat d'une phase majeure compressive atlasique qui a affecté cette région à l'Eocène, d'Ouest en Est.

Cependant, d'autres phases orogéniques sont identifiées, elles sont antérieures ou postérieures à cette dernière.

a) Au Mésozoïque

- La Phase Néocimmerienne (Berriasien moyen)

C'est la phase anté-néocommienne de [Durand Delga., 1949](#), elle affecte l'Atlas Saharien ([N,Kazitani., 1986](#)) et la Plate Forme Saharienne ([Conrad., 1970- 1980](#)) et génère des plis concentriques droits orientés N110-N120. Les structures qui en résultent ne sont cependant décrites que localement.

- **La phase Autrichienne (Aptien et Albien moyen)**

Cette phase engendre des plis de directions différentes, et se traduit par des structures plissées de direction NW-SE dans les confins Algéro-tunisiens ([N, Kazi Tani., 1986](#)). C'est une phase de raccourcissement E-W, matérialisée par des jeux inverses sur des failles et des décrochements de direction NE-SW, et des plis N-S ([Boudjemaa., 1987](#)).

- **La phase Laramienne (Turonien terminal au Sénonien)**

Cette phase a été reconnue dans l'Atlas Saharien en régime distensif (structures synsédimentaires distensives à Khenchla), elle a donnée naissance à des plis de direction NW-SE et des failles d'orientation NE-SW ou ENE-WSW ([N. Kazi Tani., 1986](#)).

b) Au Cénozoïque

- **La phase Pyrénéenne (fini Éocène)**

Cette phase correspond à la phase Atlasique compressive de direction N120 à N150; liée à la fermeture de la Tethys occidental lors de la rotation de l'Afrique autour d'un pôle situé à l'Ouest de Tanger, conduisant à la collision entre la partie Oriental de l'Alboran et la marge Africaine tellienne, elle engendre de grands plis de direction NE-SW (Anticlinaux de Hamimat et de Dj Doukkane) à ENE-WSW (anticlinaux de Dj. Boudjellal ; Dj Bottena; Dj. Onk kemaken; et celui du Dj. Abiod) et une fracturation parallèle ou oblique aux structures anticlinales E-W, NW-SE, WNW-ESE ([Kazi Tani., 1986](#); [D. Bureau., 1986](#) et [R.Guiraud.,1990](#)) ainsi que des rejeux en failles inverses sur les directions NE-SW et ENEWSW ([Boudjemaa.,1987](#)).

- **La phase intra Néogène**

Elle apparaît dans les Aurès et elle traduit un effondrement du bassin lié aux jeux de décrochements et des failles normales ([N. Kazi Tani., 1986](#)). Les déformations résultantes sont des mouvements verticaux de vaste étendue, des discordances et des compressions engendrant un soulèvement par saccades successives du massif des Aurès. Ces déformations sont produites pendant le Miocène inférieur et moyen et elles se poursuivent jusqu'à Miocène terminal où on a une surrection des Aurès à la suite d'une compression au niveau de la marge septentrionale de l'Afrique du Nord.

- **La phase Plio-Quaternaire**

Cette Phase génère des directions de plis E-W et des failles de direction ENE-WSW dans la région méridionale de l'Atlas Saharien (Buroillet., 1956).

D'autres auteurs décrivent des phases bien distinctes au cours de cet intervalle.

- **Une phase orogénique datée Fini Pliocène**

Elle est décrite comme étant aussi importante que la phase Atlasique engendrant des plis et des fractures de direction ENE-WSW et des plissements E-W (N. Kazi Tani., 1986 et R.Guiraud., 1990).

- **Une phase Quaternaire distensive**

Elle forme des grabens de direction subméridienne (N. Kazi Tani., 1986), (Boudjemaa., 1987) a décrit une phase post villafranchienne compressive de direction N-S qui s'exprime entre Biskra et Négrine.

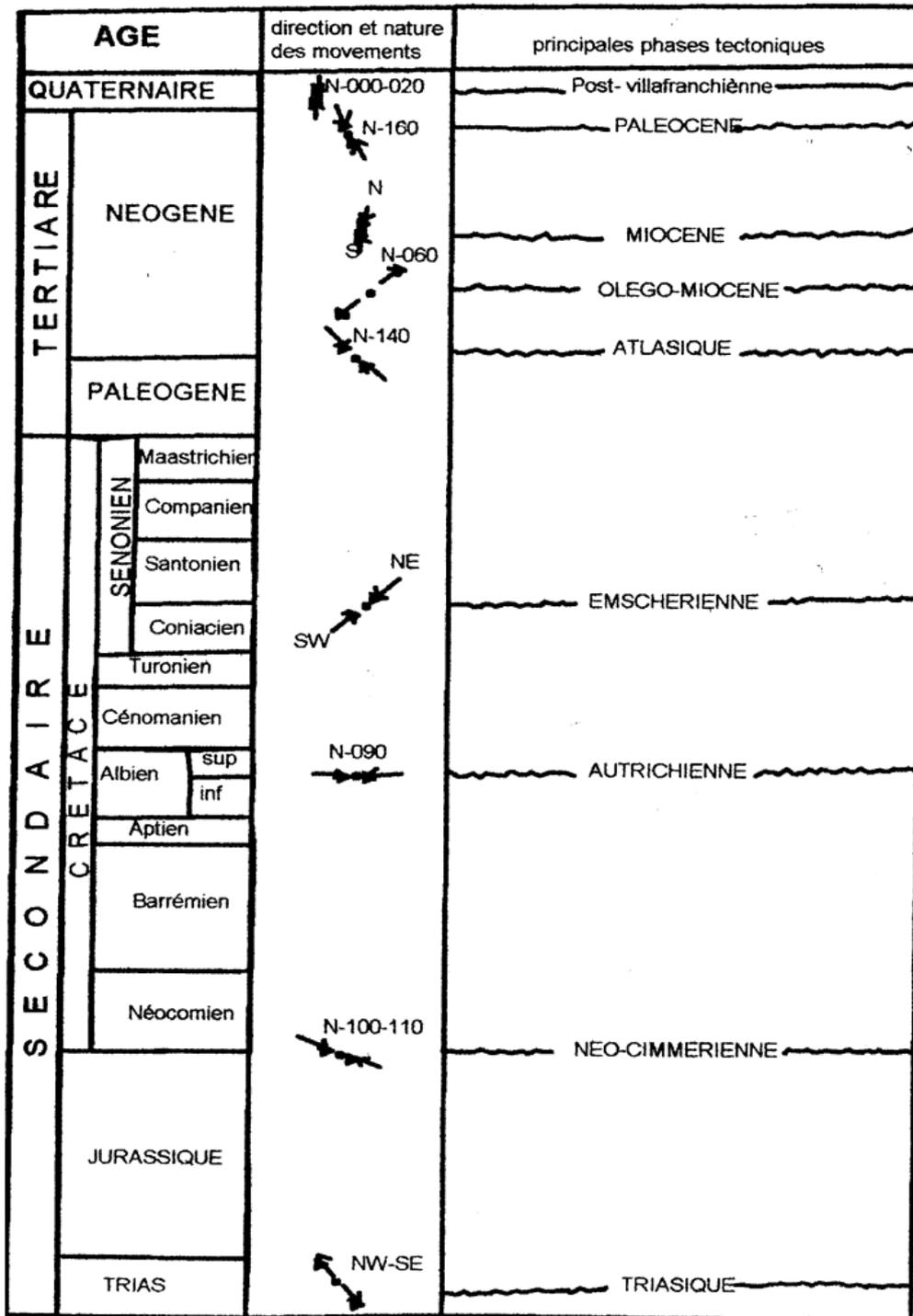


Figure 7 : Log tectonique de l'Atlas Saharien (établi à partir des travaux antérieurs)

IV. Stratigraphie régionale :

La stratigraphie du Nord Algérien est généralement d'âge Méso-Cénozoïque, constitué de faciès essentiellement marins, argilo-carbonatés intercalés épisodiquement par des dépôts argilo-gréseux correspondant, Au Néocomien, au Barrémien, à l'Albien inférieur et au Miocène. Ces séries montrent des variations remarquables de faciès induisant des aires paléogéographiques bien distinctes, ainsi, on distingue:

- Un haut fond situé au Nord-Ouest, il s'agit du môle d'Ain M'lila.
- une plate forme localisée dans la région de Tébessa au Sud-Est qui favorise le développement de faciès de type néritique parfois récifal.
- la partie centrale du périmètre est caractérisée par des dépôts de type pélagique surtout à partir de l'Albien supérieur qui marque l'importante transgression marine du Vraconien.

A. Mésozoïque :

1. Le Trias

Le Trias affleure en position stratigraphique anormale, on le rencontre essentiellement sous forme de diapir le long des accidents longitudinaux et l'intersection des accidents NW-SE et NE-SW. Le matériel triasique est rencontré en diverses régions (Morsott, Mesloul...), il présente la même composition pétro-sédimentaire: Argiles versicolores, dolomies rubanées; cargneules, gypses, des grès et des sels. Le Trias est parfois resédimenté dans les formations Albo-aptiennes (J.M. Vila., 1993).

2. Le Jurassique

Le contact Jurassique/Crétacé n'est observable que dans la région des Aurès, vers le Sud en direction de la Plate Forme Saharienne et sur le môle de Constantine. Dans le bassin Sud Est Constantinois, ce contact n'est atteint par aucun sondage, excepté celui du Dj Djahfa (JHF-1 Bis) (Fig. 14) qui a pu atteindre le Jurassique terminal (Tithonien) à une profondeur de 4000 m où il est constitué par des dolomies massives, argileuses à intercalations de marnes et de calcaire argileux, avec la présence de grès, d'anhydrites et de pyrite.

3. Le Crétacé

a) *Le Crétacé inférieur*

- **Le Bérriasien**

Il est constitué dans les Aurès par des faciès profonds de mer ouverte constitués par une série de 600 m de marnes et de calcaires argileux à calpionelles et ammonites, tandis que sur le môle d'Ain M'lila ce sont des faciès peu profonds ou néritiques avec développement de

dépôts carbonatés à haute énergie (Barrières récifales et oolithiques) dont l'épaisseur est d'environ 500 m.

- **Le Néocomien**

Au Nord (Ravin bleu) le Néocomien est épais de 1120 m; représenté essentiellement de marnes à intercalations de grès et de calcaires. Dans les Hammimats, le forage HTG-1 à traversé une série épaisse de 1230 m, constituée par des quartzites à intercalations d'argiles silteuses et de grès et des passées de calcaires argileux attribuées au Néocomien. A JHF-1bis le Néocomien est représenté par une alternance de grès quartzitiques et de dolomie avec de fines passées d'argiles silteuses, son épaisseur atteint les 1000 m.

- **Le Barrémien**

Représente une continuation des étages précédents, mais avec des conditions de faciès de moindre profondeur indiquant une phase régressive importante. Il affleure dans les Aurès, à Dj. Azreg, le long de l'axe Dj. Bou Arif et Dj. Fedjoudj. Dans le sillon Aurès-Kef le Barrémien est composé de grès quartzitiques et de dolomies avec de minces intercalations d'argiles caractérisant le faciès de carbonates orthoquartzitiques développés en milieu de mer profonde ou néritique. Au Dj. Jahfa et les Hammimats le Barrémien est représenté par des dolomies à la base et des grès quartzitiques au sommet. Plus au Nord à Dj. Guelb et Souabah, le Barrémien comprend des marnes silteuses à intercalations de calcaire argileux qui pourrait indiquer un approfondissement du milieu de sédimentation.

L'épaisseur du Barrémien varie considérablement, elle peut atteindre 1500 m (GE-1 et SB-1) et 110 m dans le môle d'Ain M'lila.

- **L'Aptien**

L'Aptien est représenté par une importante série sédimentaire, il affleure dans la région des Aurès, où il est représenté par 500 à 800 m de calcaires et de dolomies avec des intercalations d'argiles et de marnes. Cette série comporte des épisodes détritiques matérialisés par des intercalations de grès et d'argile. Au Nord Est du périmètre Ain Beida (SER-1, GE-1 et SB1); l'Aptien est représenté par des marnes et des calcaires argileux à rares intercalations de grès. De tel faciès s'est déposé dans un milieu marin profond infra néritique à pélagique. Dans la partie NW, l'Aptien occupe la plus grande partie des affleurements du Djebel Mesloula et ses calcaires récifaux constituent tous les reliefs important du massif (Dubourdiou, en 1959).

Différencie trois termes; série antérieure aux calcaires récifaux, les calcaires récifaux et la couverture des calcaires récifaux.

- **L'Albien inférieur**

Il est caractérisé par des faciès de mer peu profonde. Au Nord du sillon Aurès Kef, la sédimentation est constituée par des dépôts marins riche en faunes pélagiques à quelques passées de calcaire gréseux. Dans la partie méridionale l'Albien inférieur est caractérisé par une sédimentation argilo- carbonatée et gréseuse. Au niveau de Dj. Bou Djellal et Kemakem on note l'absence de l'Albien inférieur marquée par la discordance intra albienne liée à la phase autrichienne.

- **L'Albien supérieur**

Durant cette période on assiste à une transgression marine généralisée marquée par des dépôts carbonatés avec des passées de marnes et de marno-calcaires et une activité halocinétiq ue très intense le long des accidents de direction NE-SW liée étroitement à la phase autrichienne. Cette dernière a contribué aux développements d'édifices récifaux décrits dans la région d'Ouenza et des confins Algéro-tunisiens, à Dj. Aidel et constitue la plupart des affleurements du Dj. Mesloula. Notons aussi l'installation de barrières oolithiques dans la zone de Tebessa..

b) Le Crétacé supérieur

- **Le Cénomani en**

Dans le sillon Aurès- Kef le Cénomani en est bien développé (800 à 1200 m) constitué essentiellement de marne et d'argile avec des intercalations de calcaire argileux. Ce faciès est caractéristique d'un environnement infra néritique à bathyal. Sur le môle d'Ain M'lila la série du Cénomani en est réduite, elle est composée de dépôts carbonatés de mer peu profonde ou néritique, souvent à caractère récifal surmontés en discordance par les dépôts du Sénonien, à la fin du Cénomani en la région a connue un soulèvement généralisé et fut soumise pendant le Turonien à une érosion différentielle.

- **Le Turonien**

Il est très bien développé, sa puissance peut atteindre les 1000 m (Dubourdi eu 1956- 1959). Le Turonien est constitué par des calcaires et marno-calcaires à la base avec de nombreuses empreintes d'Inocéramus. Ces calcaires et marno-calcaires sont suivis par une puissante série de marnes argileuses riches en Ammonites, Huîtres, et divers Laméllibranches. L'assise calcaire du Turonien disparaît au Nord-est de Mesloula près du diapir de Débidba, ceci est contrôlé par une déformation tectonique légère (Dubourdi eu., 1959) matérialisée par une discordance au Djebel Mesloula. Cette discontinuité est caractérisée par un hard grounds ferrugineux qui disparaît progressivement vers le Sud- ouest, en même temps qu'augmente légèrement sa teneur en argile.

- **Le Sénonien inférieur (Coniacien, Santonien)**

Le Sénonien inférieur est représenté essentiellement par des marnes, d'argiles et de calcaires argileux. Dans la partie inférieure il y'a eu lieu localement au cours du Coniacien le développement de dépôts carbonatés de mer peu profonde ou néritique parfois récifaux à haute énergie. Le môle d'Ain M'lila qui était émergé pendant le Turonien fut de nouveau submergé, et on distingue différents horizons du Sénonien y surmontent en discordance les niveaux du Cénomaniens.

- **Le Sénonien supérieur (Campanien, Maestrichtien)**

Il est constitué par une série pouvant atteindre 800 m composée essentiellement de carbonates néritiques partiellement récifaux à intercalations de marnes.

4. Cénozoïque - Quaternaire

a) *Le Miocène (Néogène)*

L'épaisseur du Miocène peut atteindre une centaine de mètres (100 m). Il débute par des formations marines transgressives et discordantes sur les terrains anciens. Ils sont représentés par des calcaires roux, suivis de marnes très argileuses de couleur verte devenant rouge foncé et enfin par des argiles à intercalations de grès grossiers.

b) *Le Plio-Quaternaire*

Les plus anciennes formations continentales appartiennent au Quaternaire supérieur (Dubourdiou., 1959). Celui ci est représenté essentiellement par des dépôts argileux et conglomératiques. Il est à noter qu'aucun dépôt Pliocène ou Pléistocène ancien n'a été observé dans la région. Selon Dubourdiou (1956 et 1959), ce phénomène serait à mettre en relation avec une surrection régionale suivi d'une érosion intense à cette époque.

Ces formations Quaternaires constituent la plus grande partie du comblement du fossé d'effondrement Morsott - Tébessa dont l'épaisseur est estimée à plus de 170 m.

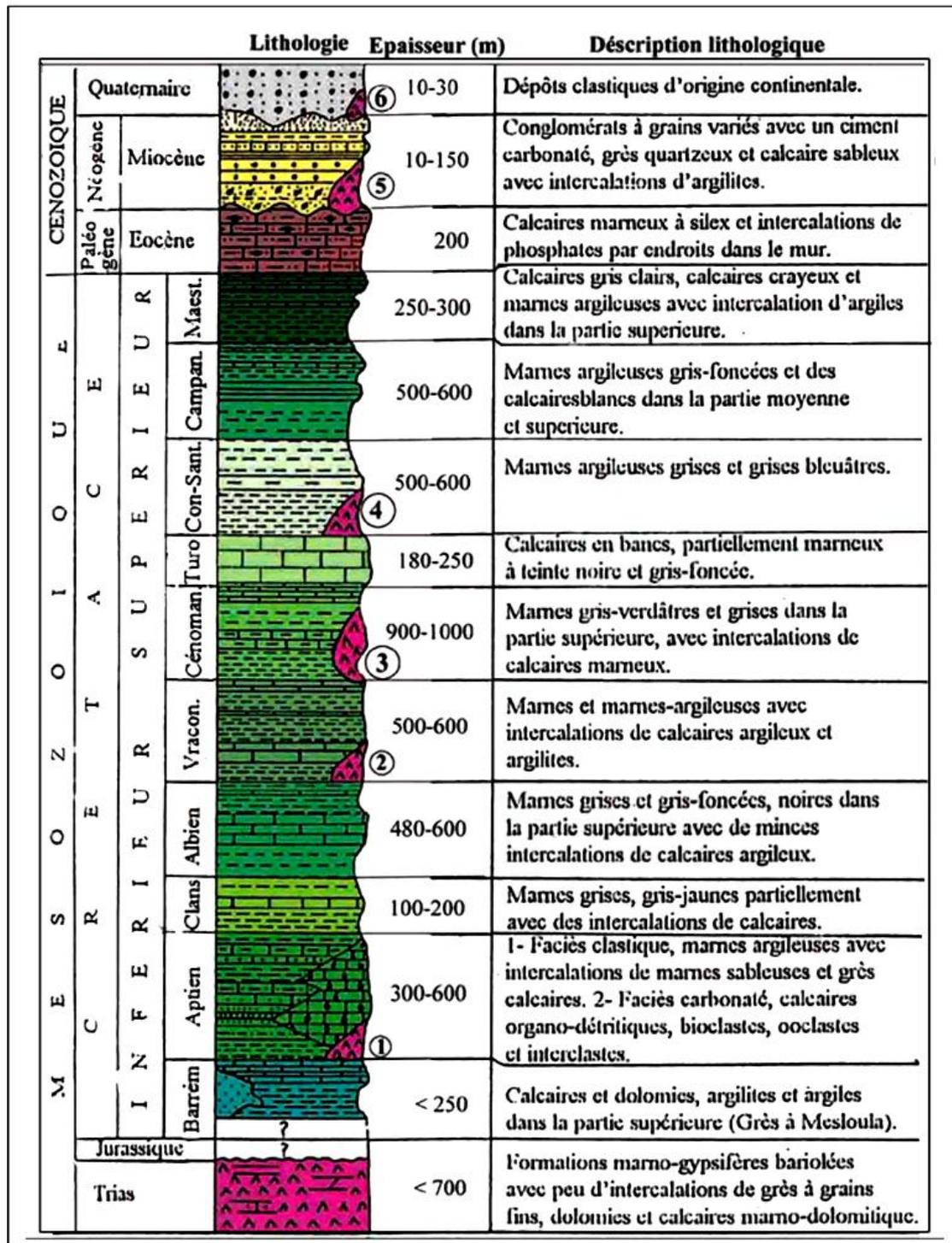


Figure 8: Log synthétique des monts du Mellègue (D'après: Dubourdiou., 1956- 1959; David., 1956; Madre., 1969; Fleury., 1969; Thibieroz et Madre., 1976; Chikhi., 1980; Otmanine., 1987; Bouzenoune., 1993 et Vila et al., 2000) in L.,Sami. 2003

B. Contexte paléogéographique des dépôts

Ces résultats sont déduits à l'aide de l'interprétation des données de forages existantes pour des intervalles allant de L'Aptien à L'Albien supérieur, (F. Belfar, 2005).

1. Au Barrémien

Le Nord Algérien est caractérisé au Barrémien par une sédimentation mixte argilo-carbonatée. Du point de vue paléogéographique, on assiste à un développement d'importants système fluvio deltaïque occupant toute la partie NE de la zone atlasique, ce système passe dans le bassin de Timgad à des faciès de plus en plus profonds intertidal à infratidal.

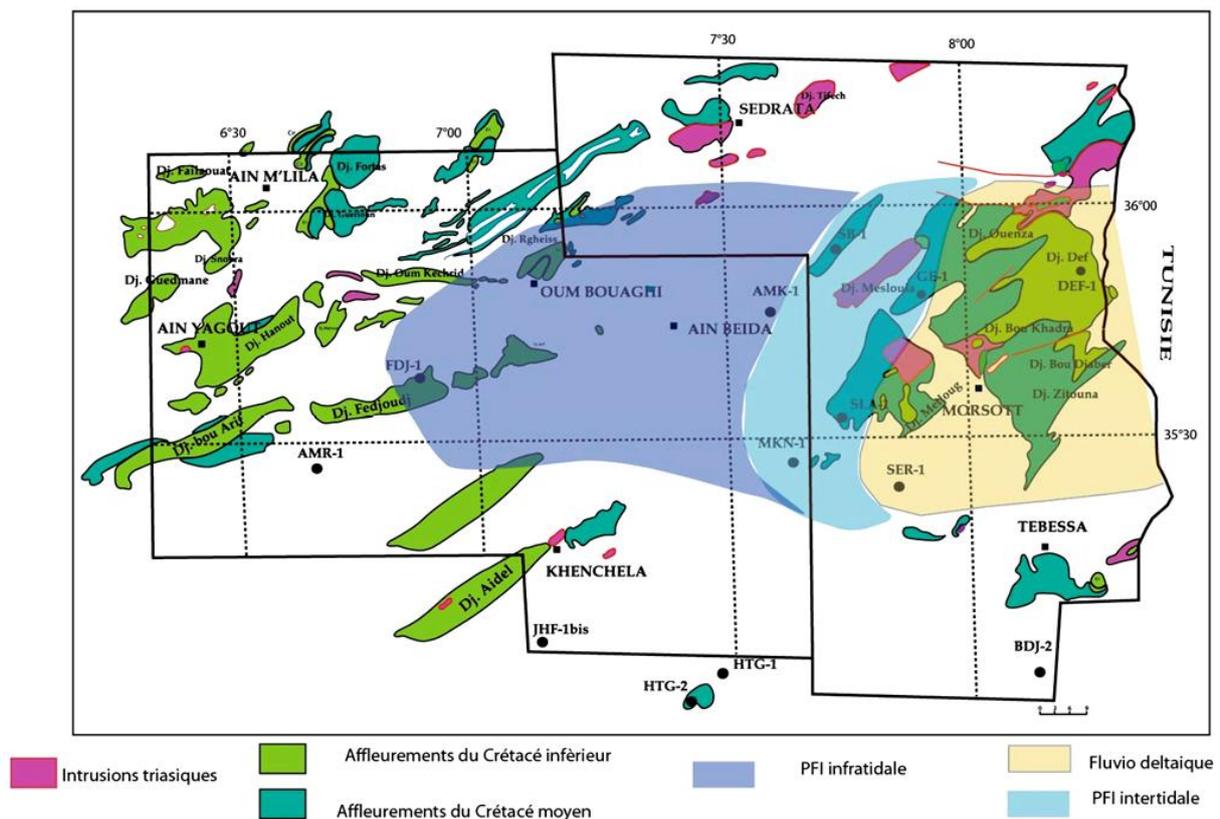


Figure 9: Paléogéographie au Barrémien (F. Belfar, 2005)

2. L'Aptien

La partie Nord est constituée par une importante barre carbonatée représentée par des calcaires cryptocristallins parfois oolithiques et bioclastiques au niveau du Dj Bou Djellal et de dolomies cristallines à rares passées d'argiles. Plus au Nord, vers la région où se localise les puits SLA-1, MKN-1 et SER-1 le faciès devient un peu plus argileux avec des passées de calcaires bioclastiques et oolithiques associés à une faune pélagique passant vers la région de Souabah à des calcaires carrément argileux. Dans le môle d'Ain M'lila des constructions récifales ont été signalées, à l'instar de Dj. Oum Kechrid, Dj. Hanout, Dj. Rgheiss, Dj. Bou

Djaber, Dj. Boukhadra où on décrit des calcaires récifaux dont l'âge est Albo-aptien indifférencié.

Du point de vue paléogéographique Quatre (04) zones se distinguent.

- Zone intertidale à subtidale supérieur avec localement des barrières oolithiques, des plages intertidales et des levées grainstones (JHF-1bis, HTG-1 et BDJ-2) dont l'extension est indéterminée et des barrières bioclastiques. Ces dernières constituent un important développement d'édifices récifaux isolés à rudistes, polypiers associés aux algues rencontrées à Dj. Khenchela, Dj. Chélia, Dj. Ich Moul, Dj. Rhgeiss et Hanout El Kebir. Ce qui constitue une véritable ceinture au niveau du Môle d'Ain M'lila.
- La zone subtidale inférieure à quelques influences détritiques, le faciès associé à cette zone a été rencontré dans les puits MKN-1 et SLA-1 où on note une alternance de marnes et d'argiles carbonatées à quelques passées de calcaire argileux gris foncé localement crayeux, fossilifère, des dolomies gris beige microcristallines à quelques niveaux gréseux (SLA-1).
- La zone de plate forme externe proximale à grand développement de barrières récifales liées au diapirisme, ces barrières ont été rencontrées au Dj. Bou Djaber, Dj. Boukhadra, Dj. Ouenza passant à des faciès marins plus profond infra néritique à pélagique à quelques influences détritiques.
- Plate forme externe distale située à l'extrême Est à quelques influences détritiques.

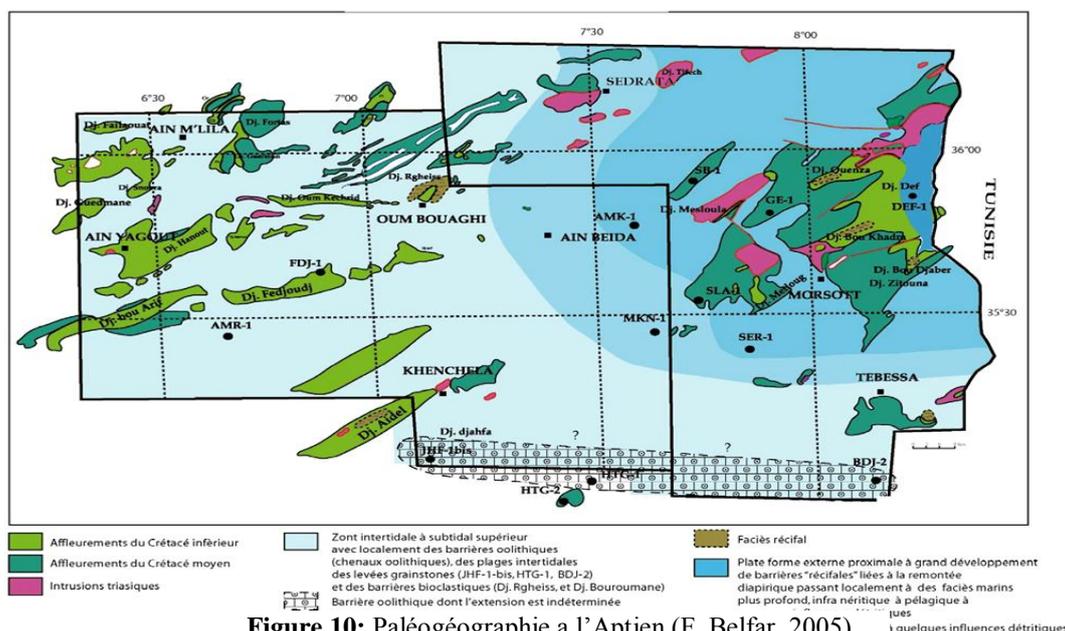


Figure 10: Paléogéographie a l'Aptien (F. Belfar, 2005)

3. A l'Albien

Cette période coïncide avec la grande transgression amorcée dès le Vraconien et qui a envahit la majeure partie du bassin Sud-est Constantinois. L'interprétation des données sédimentologiques a permis de mettre en évidence plusieurs domaines paléogéographiques distincts (Figures 11 et 12)

- **Domaine de plate forme externe**

Il couvre presque la totalité du bassin de Timgad et représenté par des marnes gris-noir, des marno-calcaires et des calcaires argileux à microfaunes pélagiques.

- **Domaine subtidal supérieur**

Il occupe essentiellement la plate forme de Tébessa, Le Nord de Khenchela et la région d'Oum Bouaghi. C'est un milieu légèrement profond de faible énergie, favorisant ainsi le dépôt de calcaires packstones et mudstones à foraminifères benthiques et planctoniques.

- **Domaine subtidal inférieur où se développent des faciès récifaux**

Il concerne essentiellement le môle d'Ain M'lila, se caractérise par une alternance de calcaires néritiques à faune benthique associée à des Polypiers, des Rudistes et des Algues et de calcaires oolithiques à quelques passées de marnes.

- **Domaine intertidal**

Il occupe la partie Sud, et à l'Ouest, le faciès consiste en calcaire dolomitique, localement argileux (Dj. Amrane).

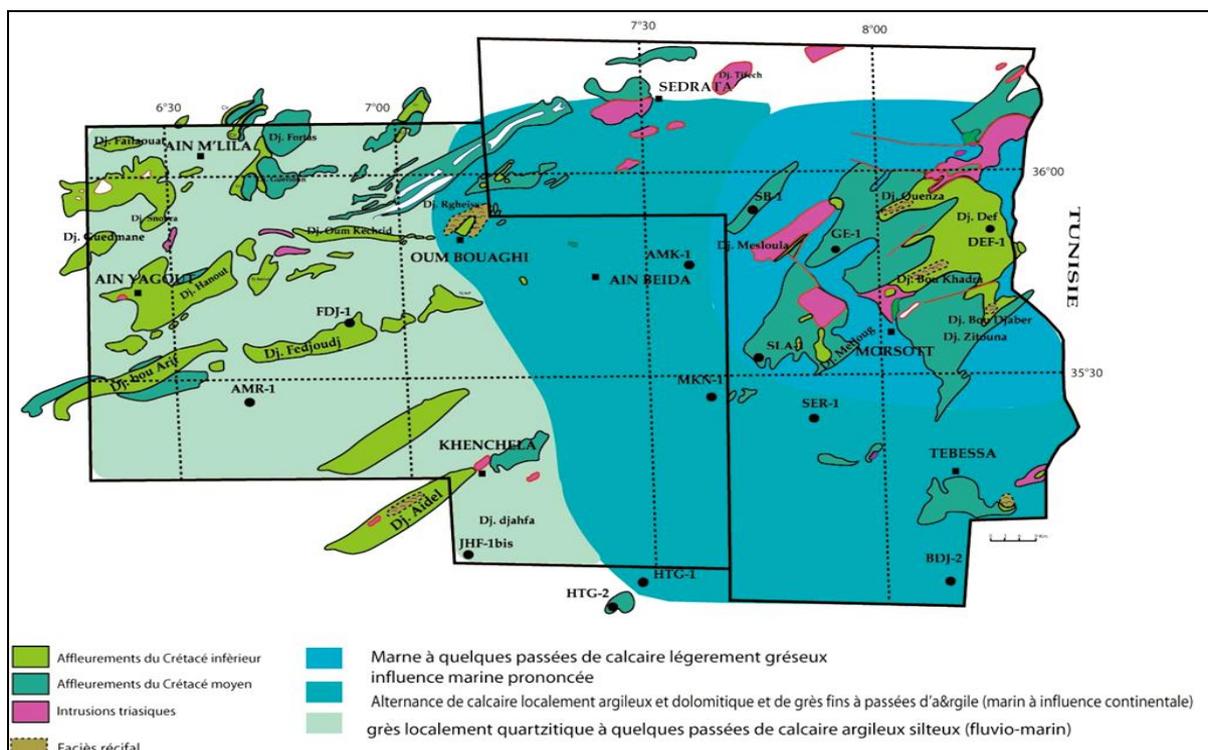


Figure 11: Paléogéographie à l'Albien inférieur (F. Belfar, 2005)

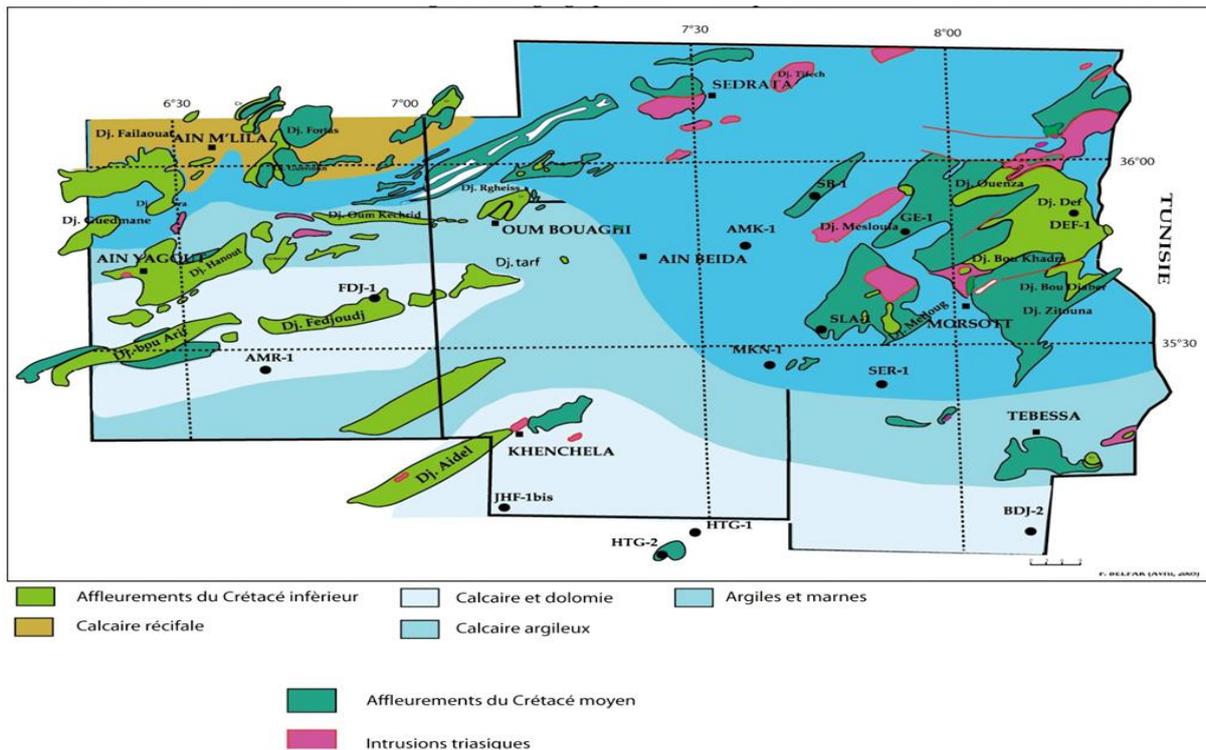


Figure 12: Paléogéographie à l’Albien supérieur (F. Belfar, 2005)

4. Au Cénomaniens supérieur

La carte paléogéographique établie sur la base des travaux de F. Belfar 2005; montre trois zones paléogéographiques bien distinctes (Figure 13).

- **Zone subtidale supérieur:**

Caractérisée par des dépôts de type plate-forme interne à faible énergie, caractérisés par des calcaires packstone bioclastiques, riche en débris de Mollusques et d’Echinodermes, à Foraminifères benthiques, parfois à débris de Rudistes et Polypiers (Dj. Amrane et Bou Arif) et à rares Foraminifères planctoniques.

- **Zone subtidale inférieur:**

Caractérisée par des faciès de faible énergie et paraissent relativement profonds par rapport à ceux cités précédemment. Cette zone est localisée au Sud du bassin, caractérisée par des calcaire wackstone à packstone à abondants Foraminifères planctoniques, notamment des Pithonelles, Dicarinella, Rotalipores et de rares débris de Mollusques.

- **Zone de plate forme externe:**

Représentée par des marnes et de calcaire, biomicritiques légèrement argileux riche en Foraminifères planctoniques indiquant ainsi un approfondissement du milieu.

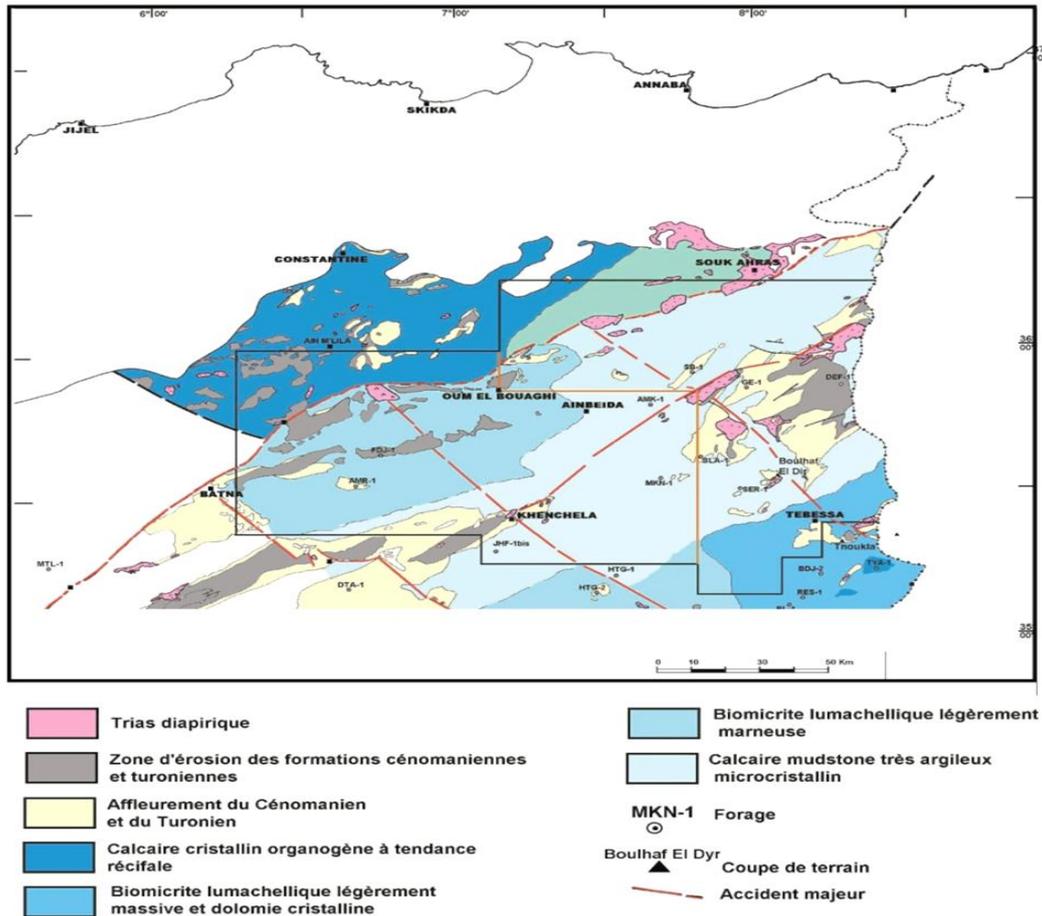


Figure 13: Paléogéographie au Cénomaniens (F. Belfar, 2005)

5. Au Turonien inférieur et moyen

La carte de faciès (Figure 14) montre que les dépôts de plate forme interne occupent une grande partie du bassin. Ils sont généralement caractérisés par des calcaires wackstone à packstone, parfois Grainstone oosparitique ou des dolomicrites, très riches en bioclastes. Ces faciès admettent un développement de construction récifale à Dj. Amrane. Il s'agit de calcaire boundstone de haute énergie, représenté essentiellement par des Polypiers.

- Dans la partie Sud-est du bassin, nous rencontrons des calcaires mudstone à wackstone biomicritiques à Foraminifères planctoniques abondants.
- Par ailleurs, le milieu s'approfondit vers la partie Nord-est du bassin et nous y rencontrons essentiellement des calcaires mudstone à Foraminifères planctoniques, à quelques passées de marnes.

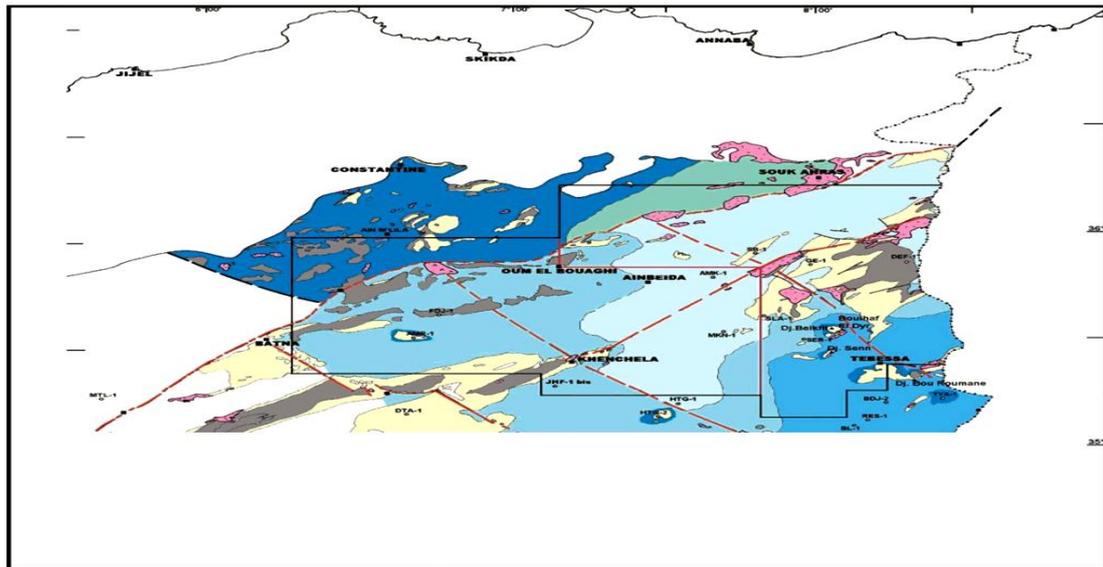


Figure 14: Paléogéographie au Turonien inférieur et moyen (F. Belfar, 2005)

V. Géologie de la région d'étude :

A. Introduction

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 Mellegue. 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 de l'Ouenza (Fehdi 2008).

L'analyse micro-paléontologique et biostratigraphique élaboré par J.L Blés et J.J Fleury (1970) et J.M Villa (1977 et 1980) a montré que du point de vue stratigraphique, la région d'étude couvre le fossé tectonique Plio-Quaternaire de Morsott qu'emprunte sur tout son cours, le lit de l'Oued Chabro. Ce fossé sépare à l'Ouest le diapir d'Argoub Zembai du diapir de Boukhadra à l'Est.

La région d'étude est constituée en majeure partie par des terrains crétacés (figure 15) formant une série d'anticlinaux et de synclinaux souvent déversées, la série stratigraphique se présente sous forme d'alternance de formations carbonatées de calcaires , des marnocalcaires et des marnes argileuses .

Les terrains plio-quaternaires et quaternaires 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.

B. 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 pointement 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-quadernaire. 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).

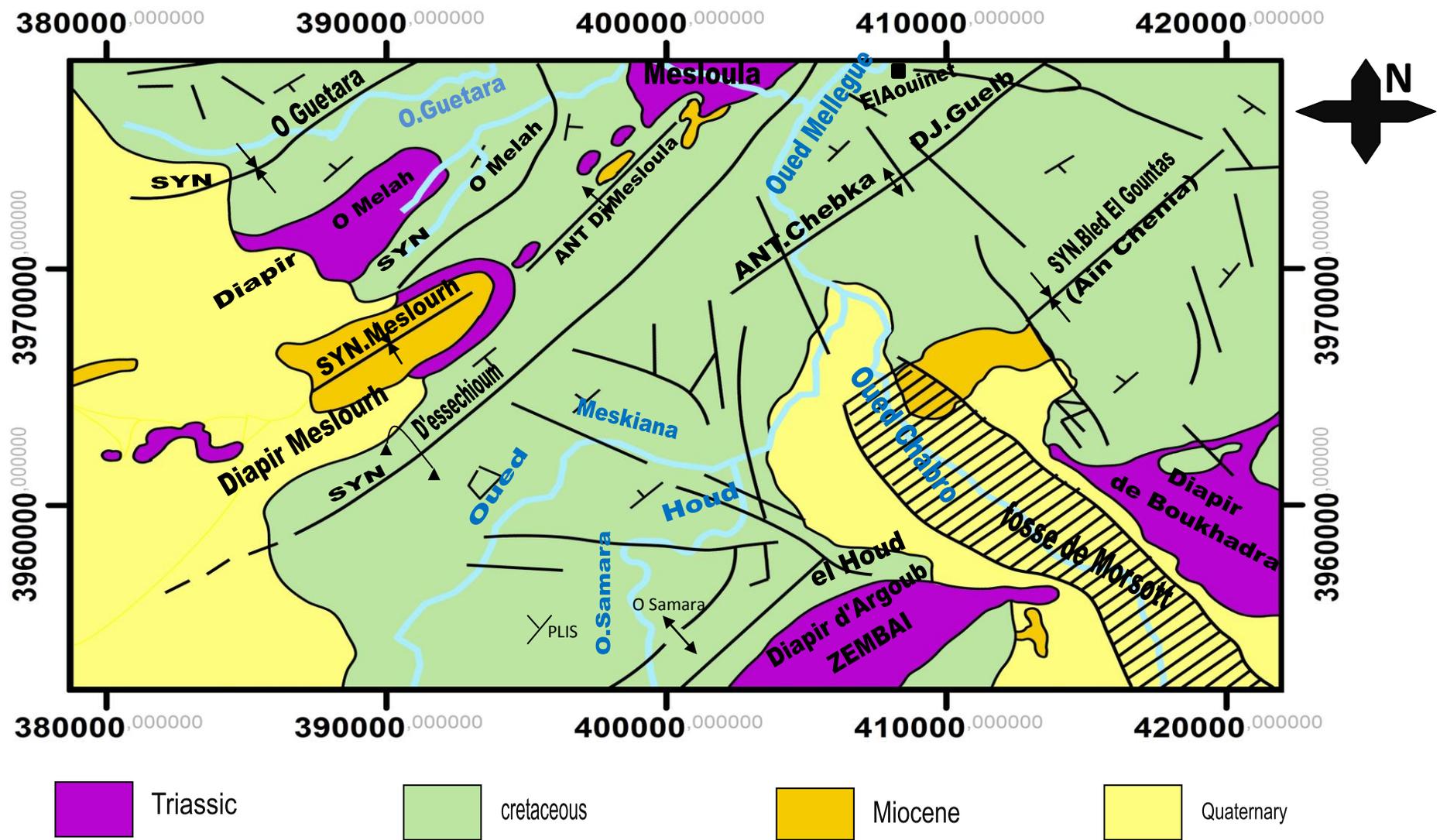


Figure 15: Esquisse tectonique au 1/300 000 de la région d'El Aouinet (extraite de la carte géologique au 1/50 000)

C. Lithologie du Trias

Ces Formation présentent les faciès typique des affleurements attribués au trias en Afrique du nord (figure 16).

La description par ordre chronostratigraphique 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 bipyramidés.

- *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.

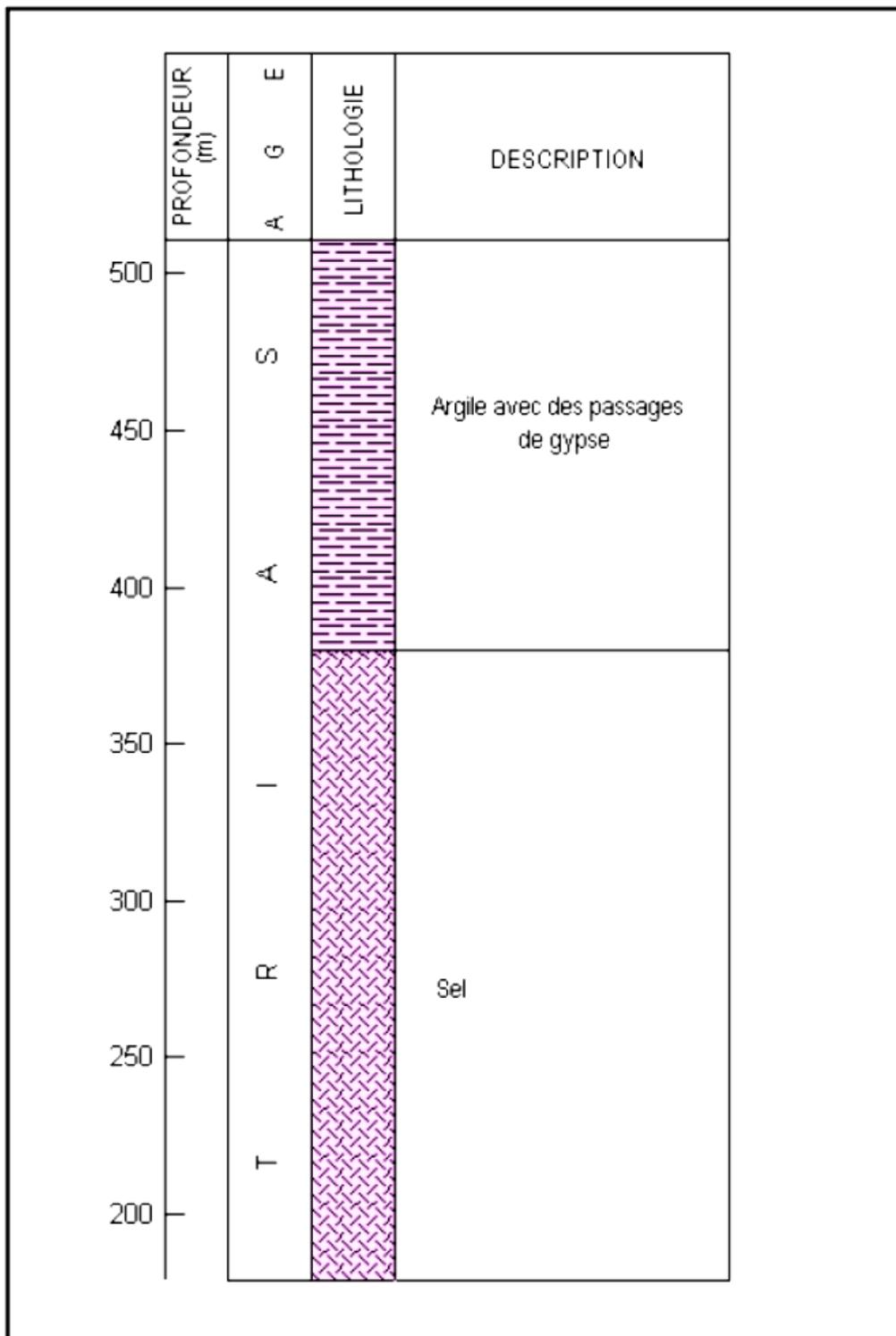


Figure 16: Colonne litho-stratigraphique d'un sondage dans la région d'étude (Bouaya 2005)

VI. Stratigraphie de la zone d'étude :

A. Formations Continentales Quaternaires :

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

1. Eboulis actuels et récents

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

- **Cailloutis actuels**

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

- **Alluvions actuelles et récentes**

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

- **Limons actuels et récents**

Se 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.

- **Croûte Calcaire**

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

- **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.

2. Formation continentale Néogène

- **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.

3. Formations Marines cénozoïques et mésozoïques

a) *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 :

- **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

- **Thanétien « Paléocène supérieur »**

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

b) *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.

- **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.

- **Turonien : (700 m environ)**

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.

- **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, sublithographiques, à grands gastéropodes alternant avec des niveaux de calcaires plus argileux en bancs moins épais, à surfaces ondulées et de marne grise assez calcaire.

- **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.

- **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.

- **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.

- **Cénomaniens inférieurs (300 m) :**

Il est représenté 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.

- **Cénomaniens supérieurs (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

c) Crétacé inférieur

- **Albien**

Il affleure à Djebel Mesloul et au sud-est de la région d'étude

- ✓ **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.

- ✓ **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 de Ammonites et Bélemnites.

- **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 Mesloul.

- **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 Mesloul 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.

4. 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'ElAouinet, 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 Mesloul.

En fin dans l'angle Sud Ouest de la région d'étude, des affleurements d'extension réduite se raccordent à l'anticlinal diapir du Djebel Boukhadra.

VII. Partie structurale

A. Etude des données de surface

1. Analyse de la carte structurale régionale des confins Algéro-tunisiens (Fig. 17)

a) *Différents axes diapiriques*

D'après Rouvier *et al.* (1990), il existe une continuité des grands ensembles structuraux de part et d'autre de la frontière Algéro-tunisienne.

- la limite Sud de la zone des nappes est sensiblement orientée ENE-WSW, depuis Ghardimou en Tunisie jusqu'à Souk Ahras en Algérie.
- le sillon tunisien se poursuit au Sud Ouest par le sillon des Sellaoua (Vila, 1980), mais le domaine subsident au Crétacé déborde largement au Sud et correspondrait au domaine subsident d'Ain Beida (Kieken, 1972, 1974) qui est sensiblement orienté NE-SW.

Les alignements NE-SW des diapirs triasiques, se poursuivraient en Algérie, respectivement du Nord vers le Sud selon les axes suivants:

- L'axe Ghardimou (Cap Serrat) se prolonge par les affleurements triasiques de Souk Ahras, entraînés par le déplacement des nappes (Rouvier, 1977).
- L'axe Bizerte-Hedils, fortement déformé par la tectonique tangentielle, s'ennoie sous la plaine de la moyenne Medjerda, ressortirait au niveau du diapir de Sakiet Yousef, au Sud de la zone des nappes.
- L'axe des diapirs de Thibar-le Kef-J. Slata se prolonge par celui de l'Ouenza-Mesloul.
- L'axe Lansarine- Fedj el Adoum-Bou Khlil-Kebbouch, est dans le prolongement hypothétique de celui de Boukhadra- M'Zouzia en Algérie.
- L'axe Medjez el Bab-J. Cheid-J. Lorbeus, J. Slata se poursuit par celui de Bou Jabeur et de Hamimet-Belkif.

Ces différents axes diapiriques subissent des inflexions axiales qui les font disparaître au SW du fossé de Tébessa sous le Quaternaire et sous le Crétacé- Eocène des monts des Nementcha.

b) *Plissements*

Du Sud au Nord de la région d'étude on individualise les structures suivantes (Figure 17)

- La zone anticlinale de Djebel Belkif, Djebel Es Sen, Hameimat (ed Dahra et el Guebla), Djebel Bou Jaber où s'individualisent deux structures diapiriques: structure Djebel Belkif- Hameimat et structure Djebel Bou Jaber.

- La zone du synclinal d'Oued Taga et de l'anticlinal Morsott-Ain Zitouna représente des structures sans affleurements diapiriques.
- Le synclinal perché de Haud Essrhyr se caractérise par un coeur (Turonien et Emsshérien) à pendage inférieur à 20%. Cependant, le flanc Ouest d'Oum Essba (nommé aussi Bagra) est verticalisé voire renversé au contact du diapir de Boukhadra. (G. Dubourdiou, 1956) a signalé que, à proximité de l'affleurement de Turonien (moins de 150m), les crêtes d'Oum Essba sont constituées de calcaires aptiens redressés qui se prolongent sur environ 1500 m du NE au SW. A l'Est d'Oum Essba, une série d'Albien et de Vraconien a fortement comprimé par en dessous les marnes argileuses du Cénomaniens. Les calcaires gargasiens ont été soulevés par le diapir qui s'est frayé en passage à la faveur des accidents bordiers de l'effondrement de Dehissa (faille d'Oum Essba). Selon le même auteur (1956, p.510), l'effondrement de Bled eddehissa a eu lieu avant le dépôt du Miocène des environs de Koudiat el Hamra. Les observations montrent que ce Miocène présente également des contacts intrusifs avec le Trias. Ainsi, si G. Dubourdiou prouve que les structures atlasiques (synclinal de Haud es Srhyr par exemple) sont déformées par le diapirisme postéocène de Boukhadra. Des observations montrent l'existence d'une phase postmiocène de ce diapirisme, en plus de la phase Albo aptienne qui explique la réduction brutale de l'épaisseur des séries Albo-aptiennes dans certains endroits, notamment dans la zone de Boukhadra.
- La zone anticlinale de Boukhadra - Djebel Def décrite par Hamimed, M., et Kowalski, W, M. (2001) est marquée au niveau du Djebel Boukhadra par un diapirisme polyphasé, tandis qu'au Djebel Def, ces auteurs n'observent aucune trace de diapirisme au Clansaysien et à l'Albien. De plus, au Djebel Def, la série marine de l'Albien est bien développée et n'observe pas de réductions locales comme à Djebel Boukhadra.
- Plus au NW, le diapirisme post-Eocène a effacé partiellement les éléments des structures atlasiques comme c'est le cas dans le synclinal du Koudiat-el-Hamra à cœur de Coniacien probable et flancs de Turonien couverts par un Miocène discordant à injection diapirique de Trias. Plus au NW, entre Morsott et Sidi-Yahia, on observe la structure anticlinale de Fedj-Ez Zgag (x 976,5 et y = 287; carte à 1/50000 d'El Aouinet; S. Dozet *et al.*, 1985). Sur le flanc SSE à noyau cénomaniens, on observe une injection diapirique de Trias qui a repoussé la série très réduite de l'Albo-Aptien et du Vraconien entre les calcaires turoniens et les marnes cénomaniennes. Il y a donc ici

deux phases de diapirisme dont la première est liée à la distension Albo- Aptienne, responsable de la réduction de la série Albo-aptienne. La deuxième phase, liée à la distension Mio-pliocène, a perturbé la structure plicative fini éocène.

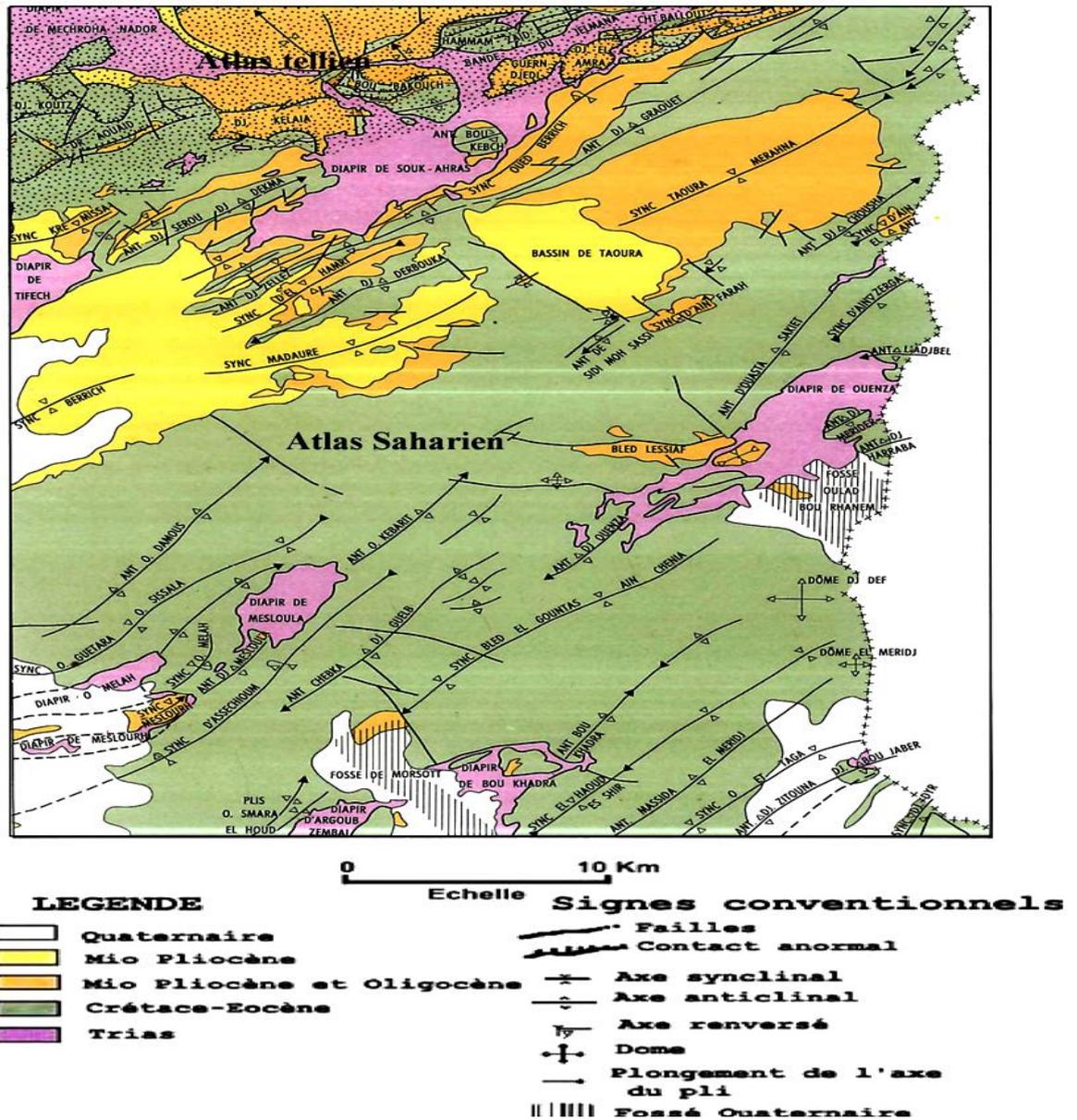


Figure 17: Schéma structural des confins Algéro-tunisiens (extrait de la carte géologique de Souk Ahras 1/200 000)

B. Aspect structural de la région d'El Aouinet

La structure de cette région (figure 18) est caractérisée par une succession d'anticlinaux et de synclinaux de direction NE-SW à ENE-WSW, des diapirs occupant les cœurs de certains plis, des fossés d'effondrement orientés globalement NW-SE et un réseau dense d'accidents associés ou affectant ces différentes structures.

1. Plissements

- Au NW de la ville d'El Aouinet, affleure le large synclinal Oued Guetara- Oued Melah à cœur triasique intrusif de direction NE-SW, le synclinal d'Oued Guitara occupe la partie NW où les formations de Crétacé supérieur (Cénomaniens et Turoniens) sont affectées par un réseau de fractures de directions NNE-SSW, NW-SE, NE-SW et E-W. tandis que le synclinal d'Oued Mellah occupe la partie SE, il est bordé par deux diapirs, Oued Mellah et Meslough où les formations Crétacées au contact de ce diapir sont redressées voire même renversées par endroits.

- Vers le SE, se dresse l'anticlinal de Meslough de direction NE-SW, au cœur de quel affleure un Trias argilo-Gypseux d'une forme elliptique étirée selon la direction du plissement (NE-SW). Il s'est mis en place sous forme de diapir. La terminaison SW de cet anticlinal est représentée par le synclinal de Meslough à cœur gréseux d'âge Miocène inférieur discordant sur le Cénomaniens et le Trias diapirique.

- la zone de synclinal d'Assechioum, formé essentiellement de Crétacé supérieur (Cénomaniens-Emshériens) marneux à marno-calcaire et ne représente aucun affleurement triasique. Il est affecté par une fracturation radiaire. Certains de ces failles semblent affecter toute la série sédimentaire, d'autres failles n'atteignent pas la surface et sont regroupées en deux générations: la première affecte les terrains Albo-aptien et la seconde intéresse ceux de Turoniens. (Cénomaniens-Emshériens) marneux à marno-calcaire et ne représente aucun affleurement triasique. Il est affecté par une fracturation radiaire. Certains de ces failles semblent affecter toute la série sédimentaire, d'autres failles n'atteignent pas la surface et sont regroupées en deux générations: la première affecte les terrains Albo-aptien et la seconde intéresse ceux de Turoniens.

- Au Sud-ouest du fossé de Morsott, affleure le pli Oued Smara d'âge Cénomaniens, au contact du diapir Argoub Zembai les couches essentiellement Albo-aptienne sont verticalisées. Plus au NE se trouve le synclinal de Bled El Guentas, à cœur de sédiments turoniens et couvert par le Miocène marin de la zone de Sidi Yahia-Mechta, et l'anticlinal de Djebel Guelb-Djebel Ouenza-Djebel Harraba, qui est bien connu à Ouenza par la présence de la minéralisation accompagnée par le diapirisme triasique Remila (Kowalski *et al.*, 1995).

2. Les diapirs

A l'Ouest d'El Aouinet affleure le diapir de Mesloulou, qui fait partie de la structure anticlinale Mesloulou-M'Kririga orientée NE-SW, où le Trias affleure largement en son cœur à la faveur des deux accidents bordiers, celui de Bardo au NW et celui de Mesloulou au SE, entre Kef M'Kririga et Argoub er Rerras ([Dubourdieu, G, 1959](#)). Au SE d'anticlinal Mesloulou M'Kririga, s'étend le diapir d'Oued Mellah et celui de Mesloulou.

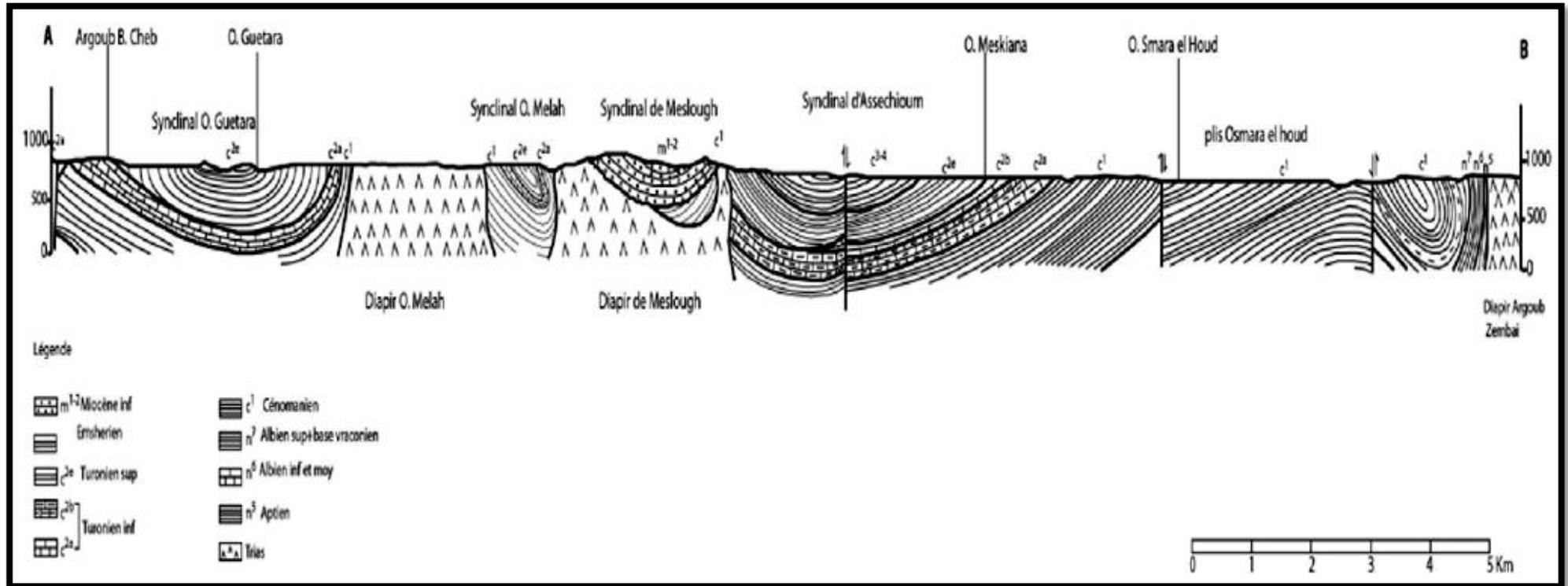


Figure 18: Coupe géologique NW-SE extraite de la carte géologique au 1/50 000 d'El Aouinet (A. Chacha 2011)

C. Fossés d'effondrements

D'après A. Othmanine., 1987, ils sont un caractère marquant de la région, dont le plus important est celui de Tebessa-Morsott. Il est constitué de deux branches distinctes, la branche méridionale orientée N110 et la branche septentrionale de direction N 150.

• La branche méridionale

- Au Sud; la limite du fossé correspond à des petites failles parallèles et de direction N140 à N160 qui abaissent en gradins les calcaires maestrichtiens d'au moins 400 m et les calcaires turoniens de 200 m. a l'extrême SE du fossé une faille de direction EW à SW-NE met en contact le calcaire aptien du Dj Roumane avec le Cénomaniens.

- A l'Est; le fossé limité par le diapir de Bekkaria.

- Au Nord; le fossé limité par des failles de directions N 110 à 120, au niveau de Dj Guenifida, mais plus à l'Est; ces failles prennent une direction N140 et diminuent d'importance. Les pendages des couches change des sens aux abords du fossé dessinant un petit pli anticlinal de direction NW-SE qui tend à devenir E-W vers l'Est. A l'extrême NW le fossé s'amortie dans le demi synclinal de Draa Es Snoubar orienté ENE-WSW.

- A l'Ouest; le fossé semble se prolonger dans la partie occidentale de Dj Belkfif comprenant Kt El Alia, Kt Deries et Kt El Agab.

• La branche septentrionale

Au Nord; le fossé s'amortir au niveau du diapir Boukhadra-Mzouzia. L'arête de calcaire albien limitant le diapir au Nord est interrompu sur une distance de 500 m mais ne semble pas décalée.

- La limite orientale correspond à des failles N 150 découpant les calcaires turoniens de Haoud srhir et Haoud El Kebir et de Dj Zitouna en corniches de même orientation que le fossé. Au Sud des Hamimats la limite suit les corniches de Kef Lahmar orienté ENE-WSW.

- La limite occidentale est matérialisée par les failles interrompant à l'Est Dj Metloug et Dj Belkfif faisant basculer les calcaires turoniens de ce dernier vers le fossé.

D. Les failles

L'ancienne fracturation n'a pas un impacte 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-

CHAPITRE IV
GEOMETRIE DE
L'AQUIFERE

CHAPITRE IV

GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

I. Introduction

La région d'étude a fait l'objet de plusieurs travaux géophysique (électriques, gravimétriques, sismiques ...etc) dans les plus importants sont :

- Les travaux de l'ORGM (Ex SONAREM, EREM) ; sou forme d'étude de prospection, recherches systématiques au 1/50000, travaux de synthèse sur les différentes minéralisations ferreuses et non ferreuses que recèle le sous sol de la région ;
- les travaux de l'entreprise Nationale de Géophysique « E.NA.GEO » qui a effectué une campagne géophysique par sondages électriques (1987), sur toute la région d'étude.
- les travaux de la CGG depuis 1954 et ceux de la SONATRACH, qui ont effectuée des levés gravimétriques dans le but de rechercher les structures propres à la recherche pétrolière.
- les travaux de A. Zerdazi (1990), dans le cadre de la préparation de sa thèse à l'université de Lausanne en Suisse a fait une étude gravimétrique du Nord-Est Algérien à l'échelle 1/200000. Ce travail constitue un précieux document de base qui vient s'ajouter à l'étude aérogéophysique.
- les travaux de la SONAREM qui entre (1971 à 1974) ont effectué un levé magnétique aérien dans le cadre de recherches systématiques.
- Sections sismiques de la campagne Ain Beida, réalisée par la SONATRACH en 1973- 1992.

II. 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 Sud-Ouest Nord-Est 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 = 3000m (Figure 20).

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 zone 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.

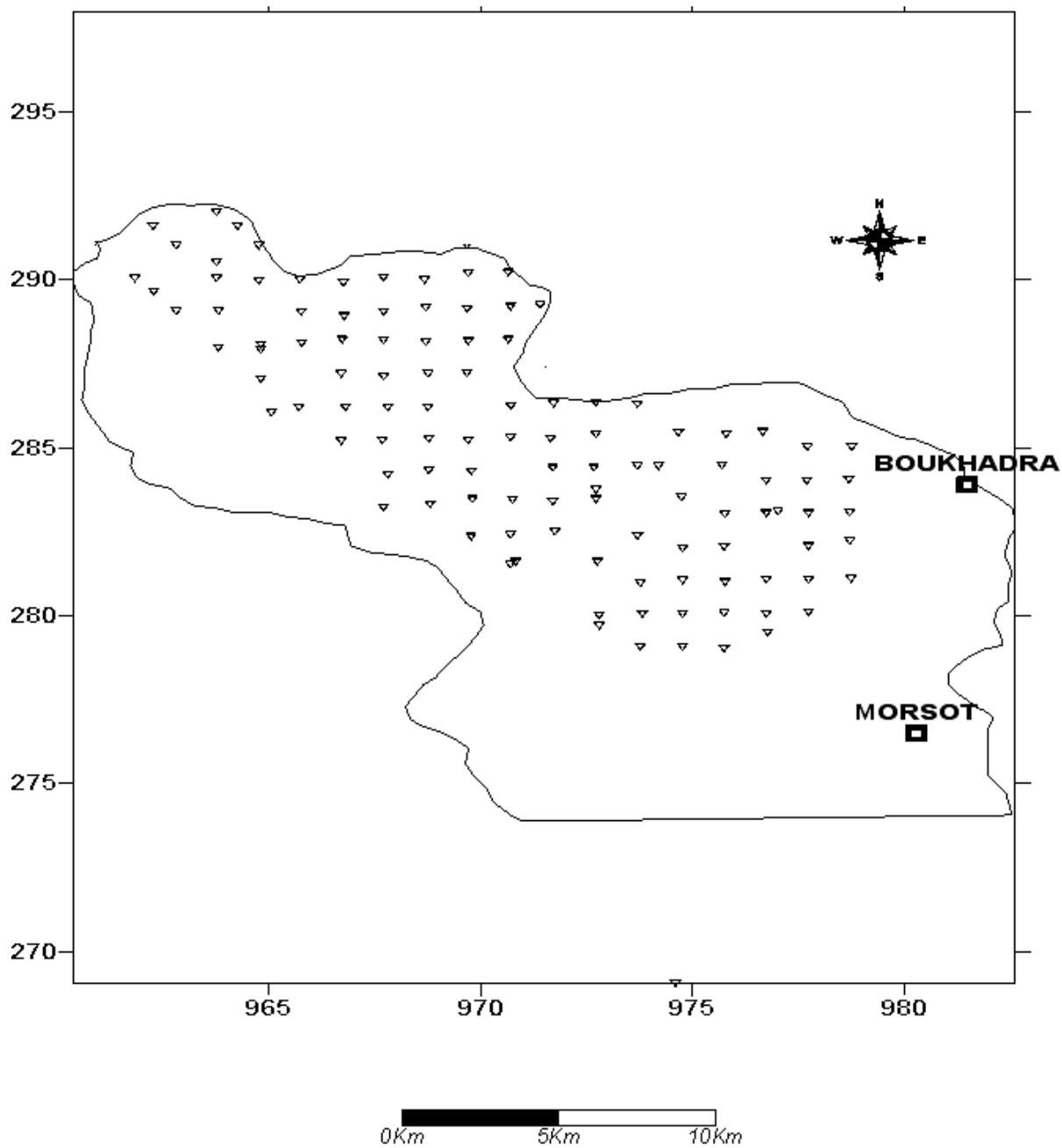


Figure 19: Carte de position des sondages (FEHDI.Ch 2008)

A. Interprétation :

Les sondages électriques verticaux réalisés sont disposés suivant des profils parallèles d'orientation Sud-Ouest – Nord-Est. 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 équirésistivités 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.

B. 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 Nord-Ouest – Sud-Est ;
- Une (01) coupe d'orientation Nord-sud ;
- Une (01) coupe d'orientation Sud-Ouest – Nord-Est .

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 mètres au sondage électrique W6.

En récapitulatif, nous pouvons dire que les 03 profils mettent en évidence les terrains suivants:

- Un terrain conducteur se présentant sous forme de deux niveaux de résistivité différente à savoir un niveaux marneux (la résistivité inférieure à 10 ohm mètres), et un niveau marnocalcaire (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.

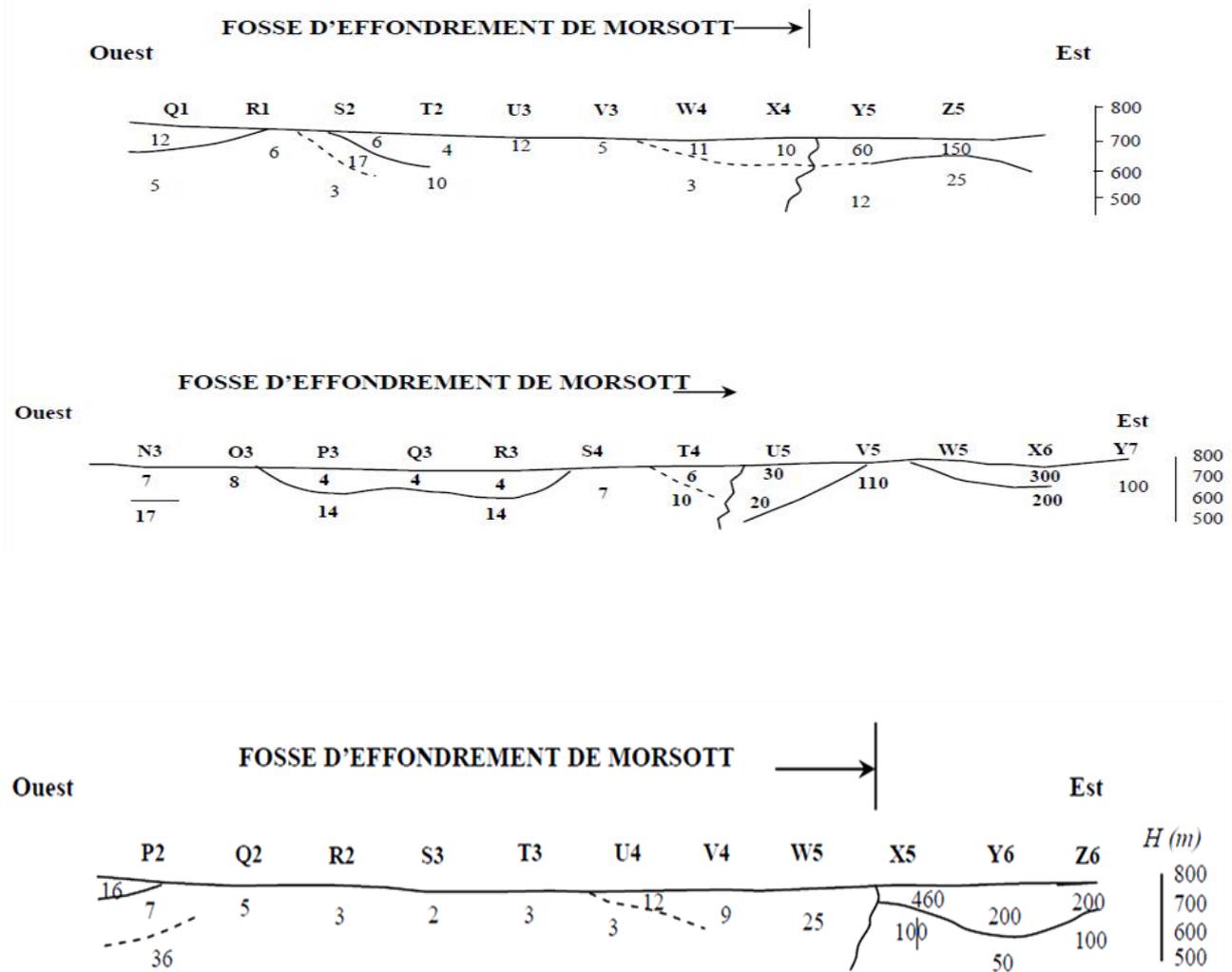


Figure 20: Coupes géoélectriques transversale 1,2 et 3 (In FEHDI.Ch 2008)

➤ **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 Nord-Ouest – Sud-Est 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 coeur est occupé par un terrain conducteur attribué aux marnes argileuses, puis en 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 Sud-Ouest Nord-Est montre la succession de formation suivante :

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

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

-Le toit de Turonien inférieure 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.

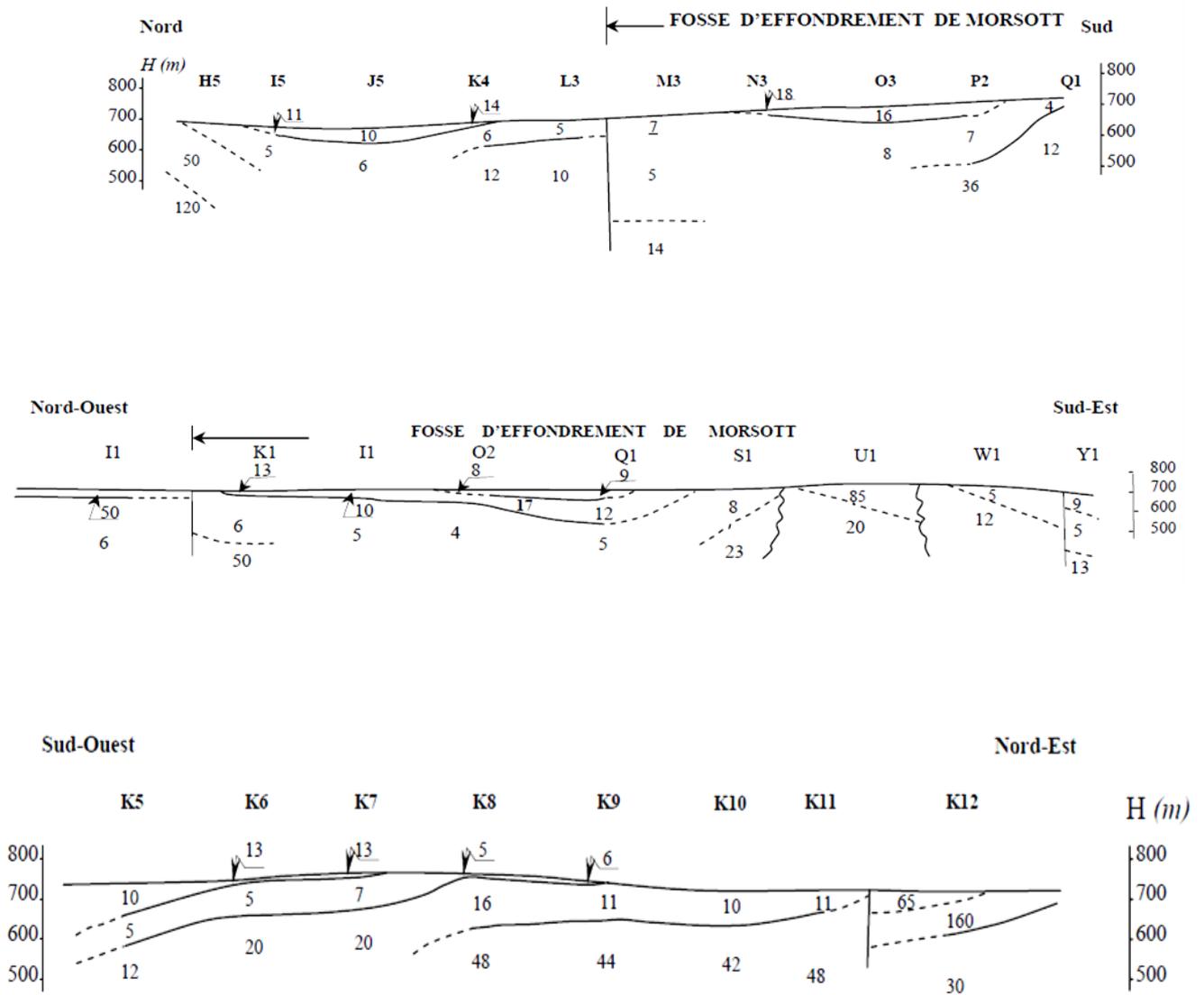


Figure 21: Coupes géoélectriques transversale 4,5 et 6 (In FEHDI.Ch 2008)

C. 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, on a établis 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

$$L = \frac{AB}{10} \text{ à } \frac{AB}{4}$$

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 (figure 23) 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 ohmmètre) 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.

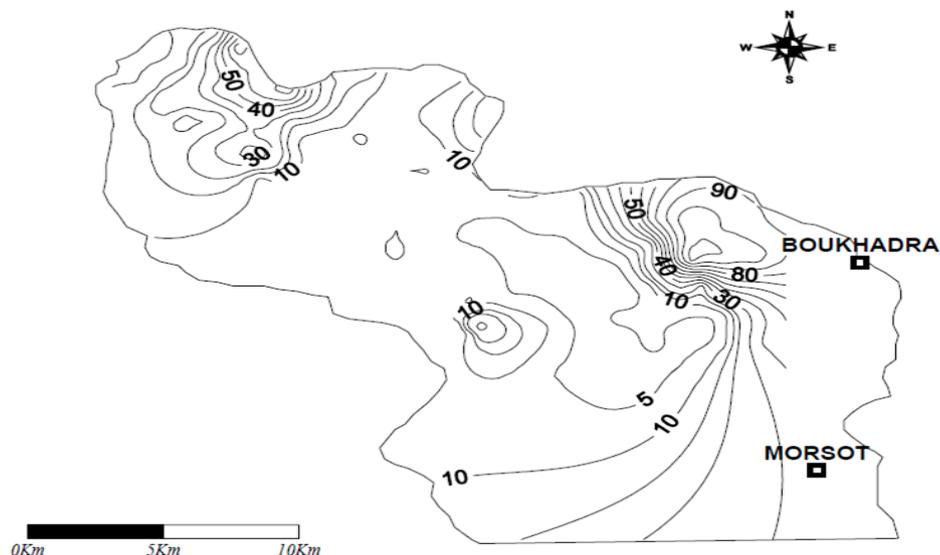


Figure 22: Carte de résistivité en ligne $AB=500$ m (In FEHDI.Ch 2008)

2. Carte en ligne AB = 800 m

L'examen de la carte de résistivité 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.

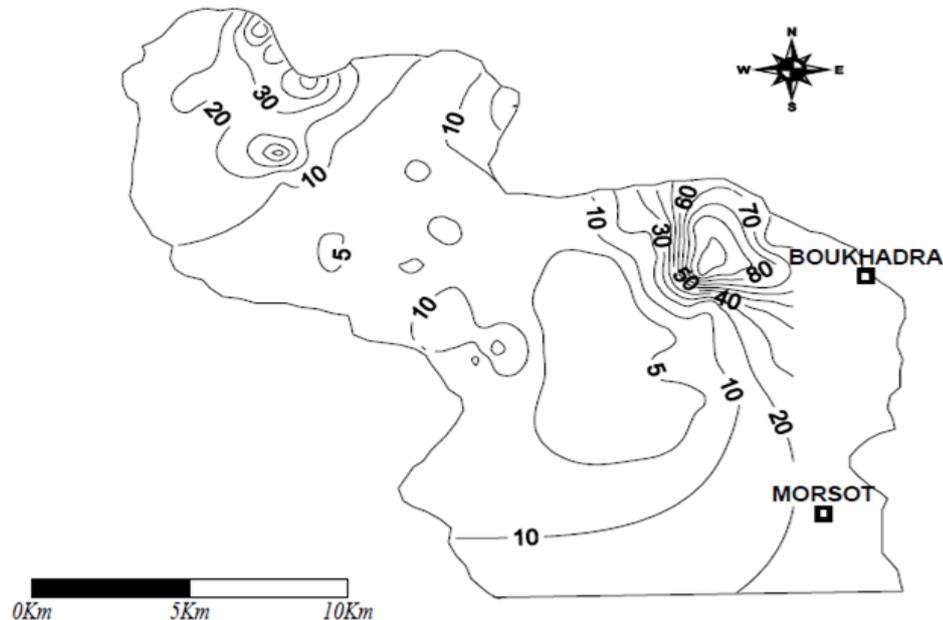


Figure 23: Carte d'isoresistivité AB=800m (In FEHDI.Ch 2008)

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 (figure 25) 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 supérieur 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 la plus faible valeur de résistivités sont toujours enregistrés au niveau du fossé d'effondrement de Morsott avec des résestivités de l'ordre de 10 à 15 ohm-mètre.

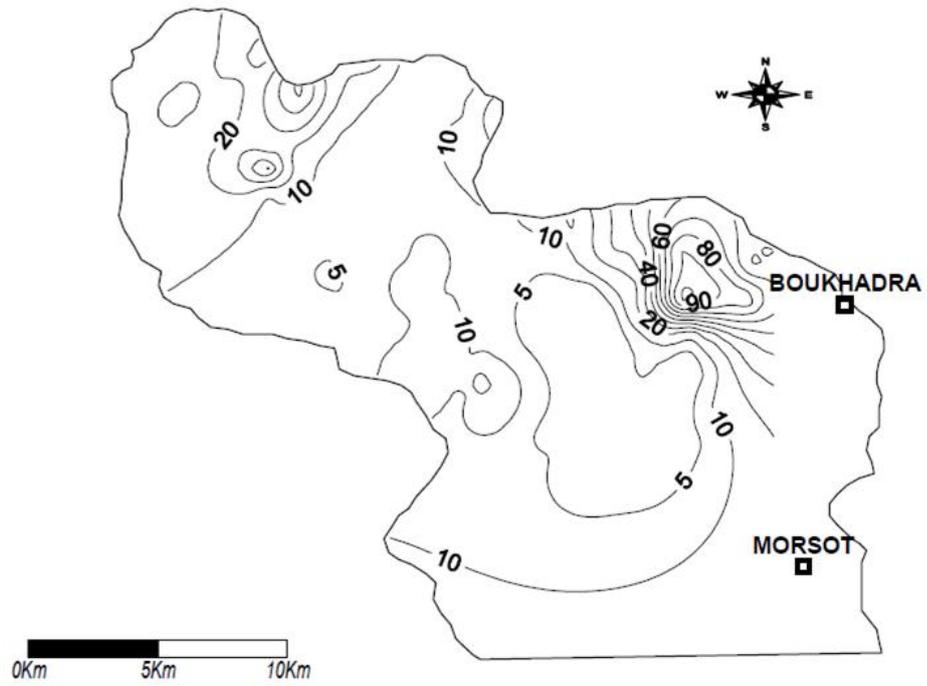


Figure 24: Carte de résistivité en ligne AB=1000m (In FEHDI.Ch 2008)

III. Prospection sismique :

Pour essayer de trouver la relation qui existe entre l'image en subsurface et les affleurements triasiques en surface nous avons fait appel à la sismique réflexion, outil indispensable dans l'exploration du sous-sol.

A. Documents utilisés

La région d'étude est caractérisée par une moyenne densité sismique, l'interprétation de ce matériel est étroitement liée à la géologie de surface des lieux.

Cependant un bon nombre de forages est disponibles dans le secteur d'étude, ce qui permet une rigoureuse calibration des sections sismiques au moyen des puits. En effet, l'étude est basée sur l'ensemble des documents suivants:

- Plan de position des sections sismiques et des sondages (Figure 26);
- Sections sismiques de la campagne Ain Beida, réalisée par la SONATRACH en 1973-1992;
- Carottage sismique et log habillés des puits SB-1, GE-1, SLA-1 et DEF-1.

B. Choix des profils sismiques

La zone est couverte par cinq sections sismiques, notre choix s'est porté sur trois sections sismiques qui répondent le mieux à nos attentes, à savoir:

- L'existence d'un sondage sur l'une des sections préalablement choisies, ceci pour permettre le calage et le tracé des horizons sismiques;
- Sections sismiques traversant les affleurements triasiques, ou montrant la mobilisation de matériel triasique en profondeur;
- L'orientation préférentielle des coupes est sensiblement Nord-Sud et ce afin de traverser les traits structuraux généraux transversalement.

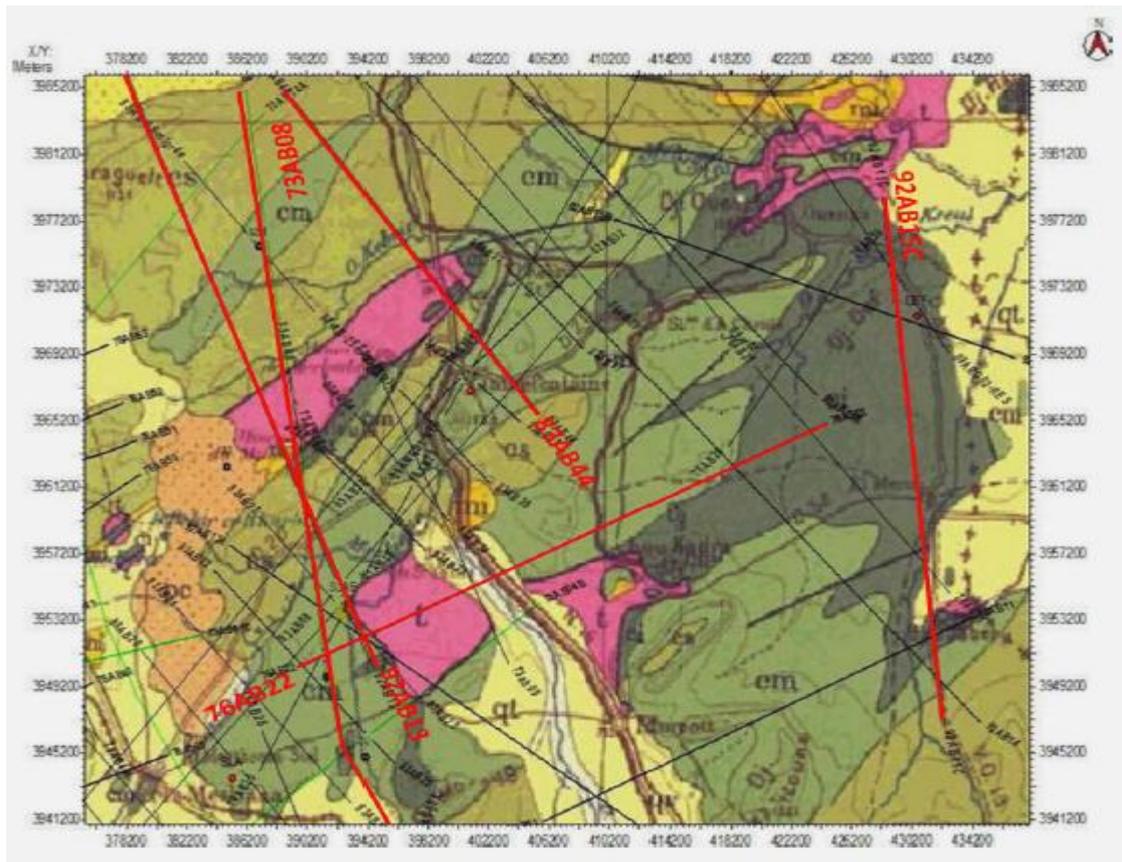


Figure 25: Plan de position des sections sismiques (Document Sonatrach)

C. Interprétation des sections sismiques :

Le positionnement des profils sismiques est indiqué sur la Figure 26, les sections interprétées sont les suivantes :

➤ La section sismique 73 AB 08 (Fig. 27) :

Elle est d'orientation NNW-SSE, proche de puits SLA-1, traverse le diapir de Mesloula, elle montre:

- Un pointement diapirique dans la partie Nord entre les points de tir 116- 118 correspond au diapir d'Oued Mellah.
- Un trias diapirique au Sud qui n'affleure pas correspond au diapir de Boukhadra en profondeur.
- Des plissements de la série sédimentaire de part et d'autre de trias diapirique dus au mouvement de ce dernier.
- Les failles sont normales atteignent l'Albien inférieur au Nord et arrivent jusqu'au Barrémien dans la partie Sud le long desquelles remonte le Trias évaporitique

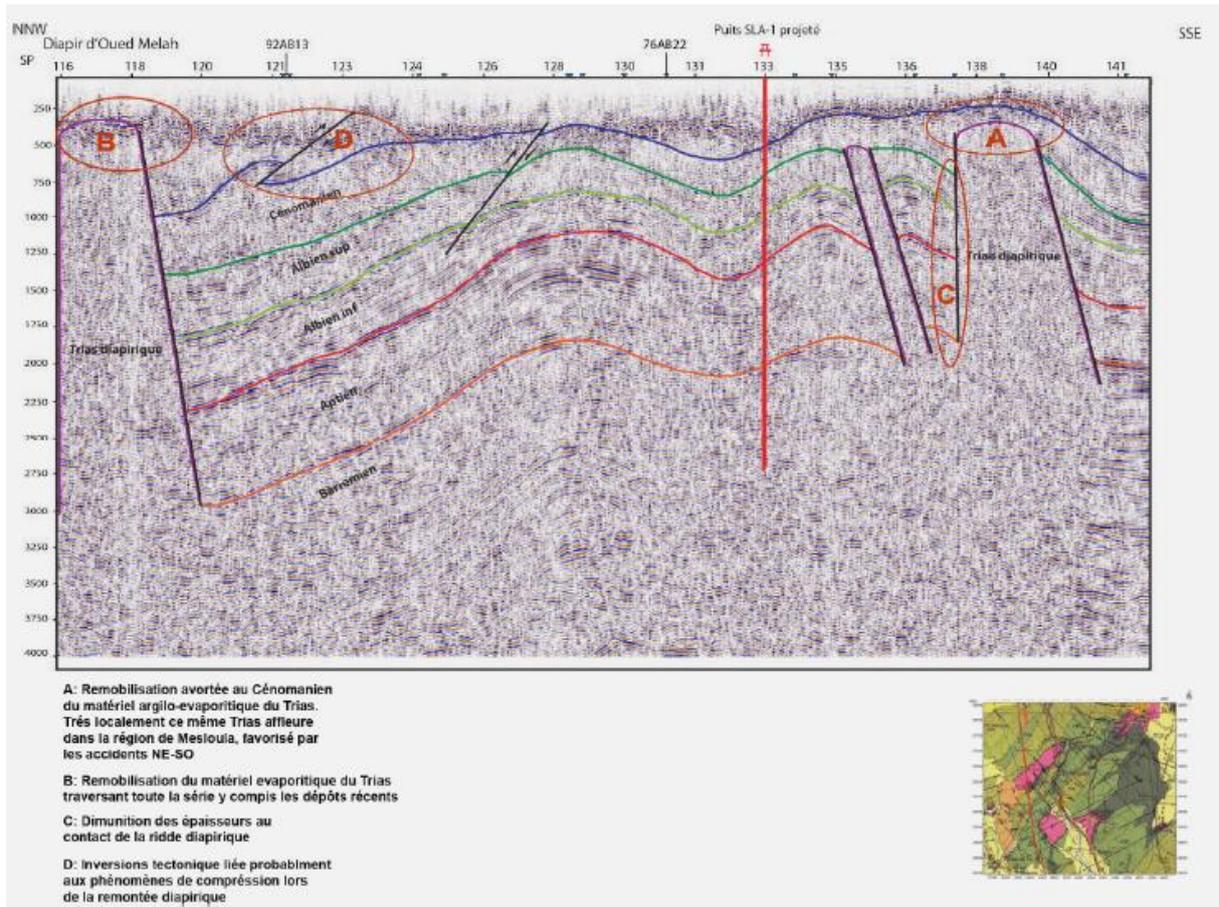


Figure 26: Section sismique montrant le diapir d'Oued Mellah en surface et de Boukhadra en profondeur

➤ La section sismique 76 AB 22 (Fig. 28)

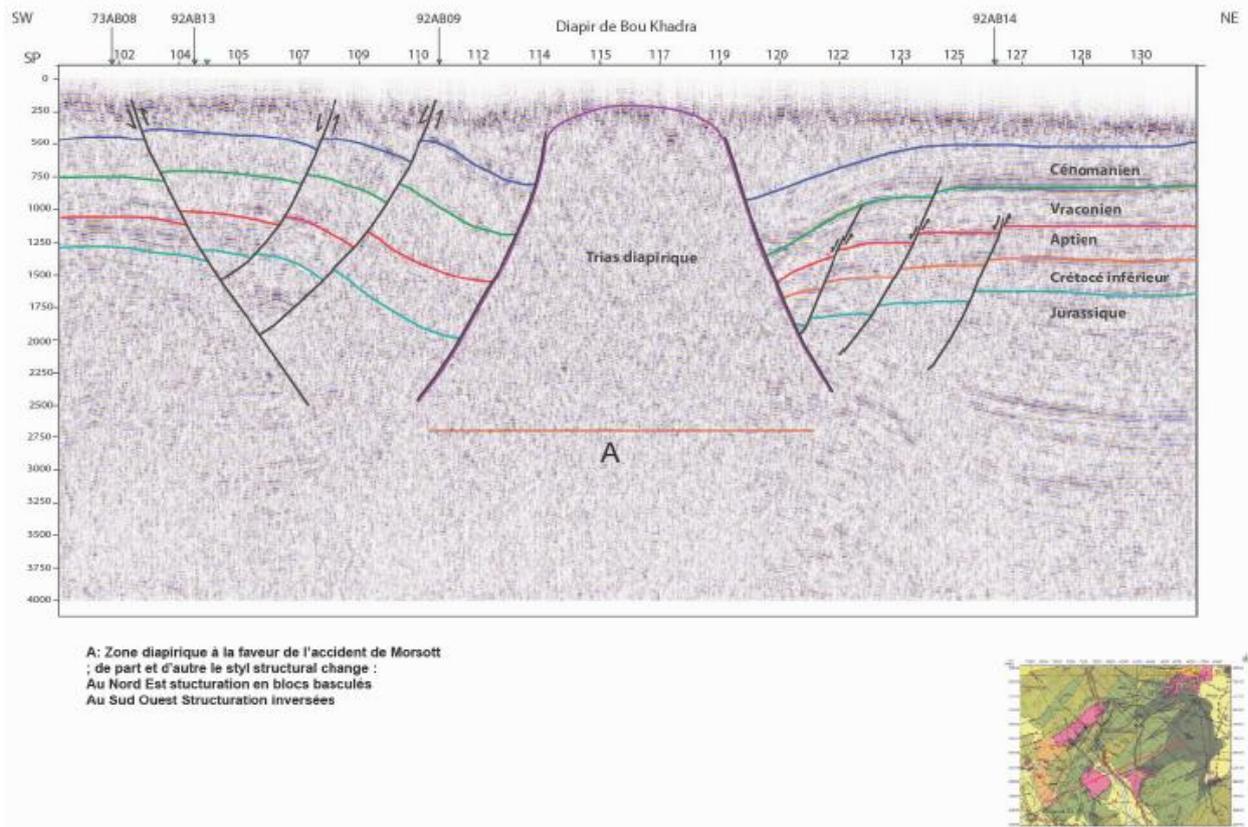


Figure 27: Section sismique montrant le diapir de Boukhadra

Comme le montre la Figure 28, cette section à une direction SW-NE, elle passe par le fossé d'effondrement de Tebessa- Morsott sur laquelle on peut observer:

- Au centre une zone diapirique qui traverse toute la série sédimentaire sus-jacent le long de deux failles bordières profondes depuis le Jurassique jusqu'aux l'affleurement formant le diapir de Boukhadra entre les point de tir 114 et 119; ce dernier est limité par deux accidents profond de direction SW-NE et NW-SE.
- Au Sud Ouest la série sédimentaire est affectée par un réseau de failles listriques entre les points de tir 102 et 111, jouent en mouvement inverse.
- Structures en blocs basculés au Nord- Est limitées par des failles normales à regard Nord depuis le Jurassique jusqu'au Crétacé supérieur, ce qui reflète bien une structuration des bassins mésozoïque durant cette période.

➤ La section 92AB13 (Fig. 29) :

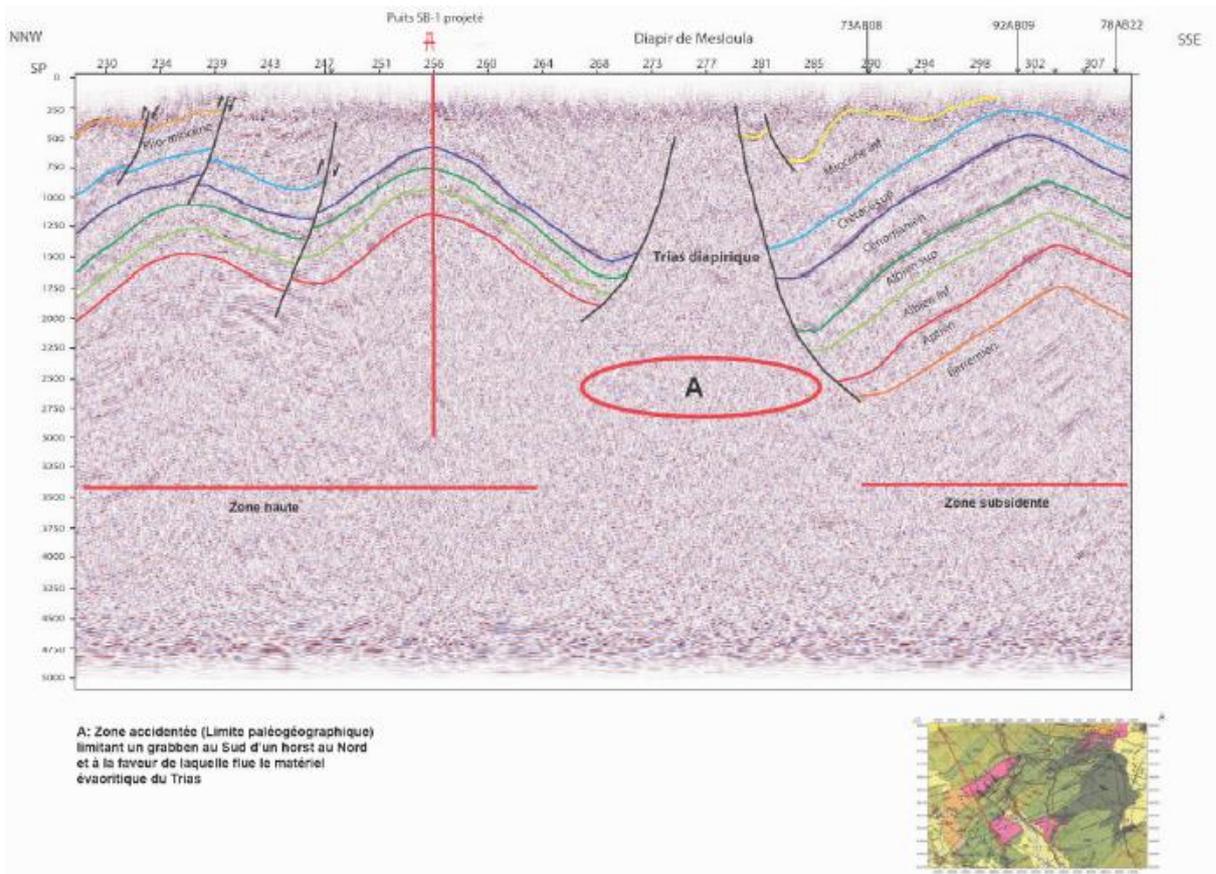


Figure 28: Section sismique montrant le diapir de Mesloulou

Cette section est presque perpendiculaire à la 76 AB 22, de direction NNW-SSE, et parallèle à la section 83 AB 44, elle présente:

- L'anticlinale de Souabah dans la partie NNW bordé par deux failles inverses.
- Les séries sont de plus en plus épaisses en allant du Nord au Sud, et sont affectées par des failles inverses dessinant des petits chevauchements au Nord.
- Au Sud les séries sont monotones non affectées par des accidents; seul le Mioène est discordant.

IV. 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 (Figure.36), établie pour une densité moyenne de 2.67 g/cm³ est dominée par une anomalie négative d'une intensité variant entre -32 mgal et -60 mgal.

L'anomalie importante a 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 carbonatées du Crétacé (Djebel Guelb).

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

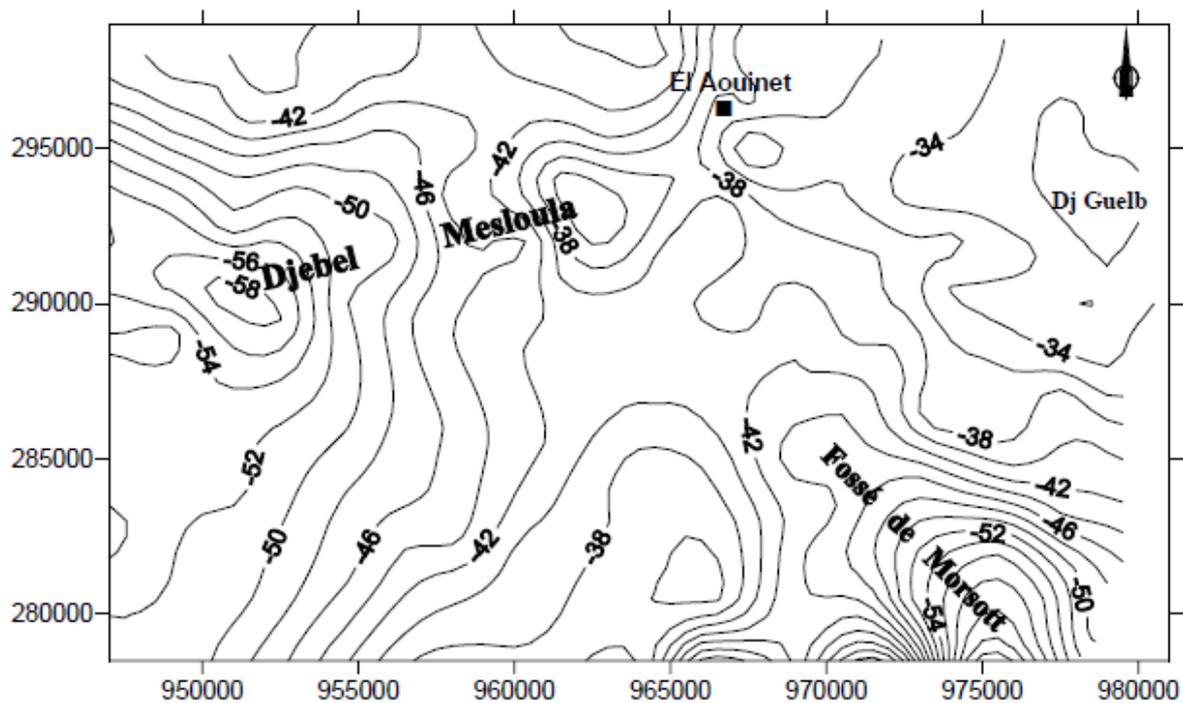


Figure 29: Carte gravimétrique résiduelle de la région d'étude (en mgal) (ZERDAZI.A 1990)

A. Modélisation gravimétrique

Un profil qui traverse une anomalie gravimétrique négative a été numérisé à partir de la carte gravimétrique résiduelle (Boubaya 2005).

Le modèle est construit en tenant en compte de la géologie de surface, l'interprétation des sondages électriques et la lithologie des sondages mécaniques, les densités prises dans la modélisation sont pour la plus part hypothétiques.

D'après l'interprétation du modèle et de l'anomalie gravimétrique, l'épaisseur de la masse salifère dépasse les 3 km (figure 31), La remontée de diapirs salifères de la région d'étude est étroitement liée à l'évolution tectonique (distension albo-aptienne et mio-plioquaternaire).

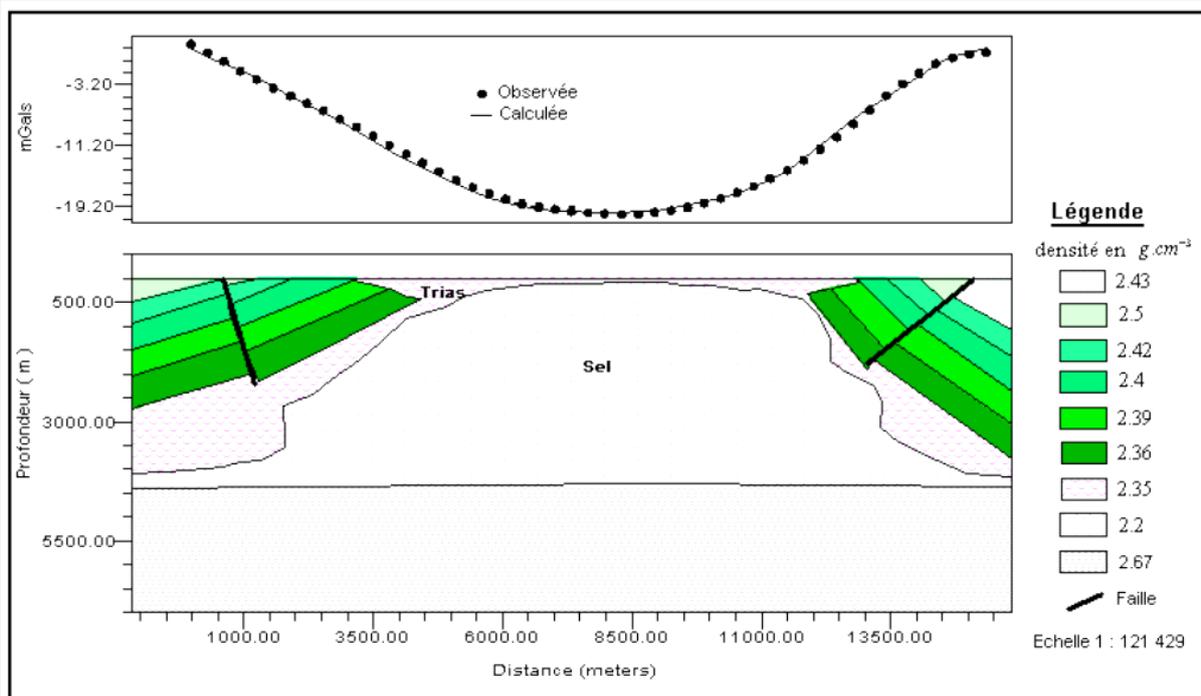


Figure 30: Schéma montrant une interprétation possible à 2 D de l'anomalie gravimétrique négative dans la région d'étude (d'après Boubaya 2005)

V. 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 (Figure 32) 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 -10 nT et un maximum de 20 nT. 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.

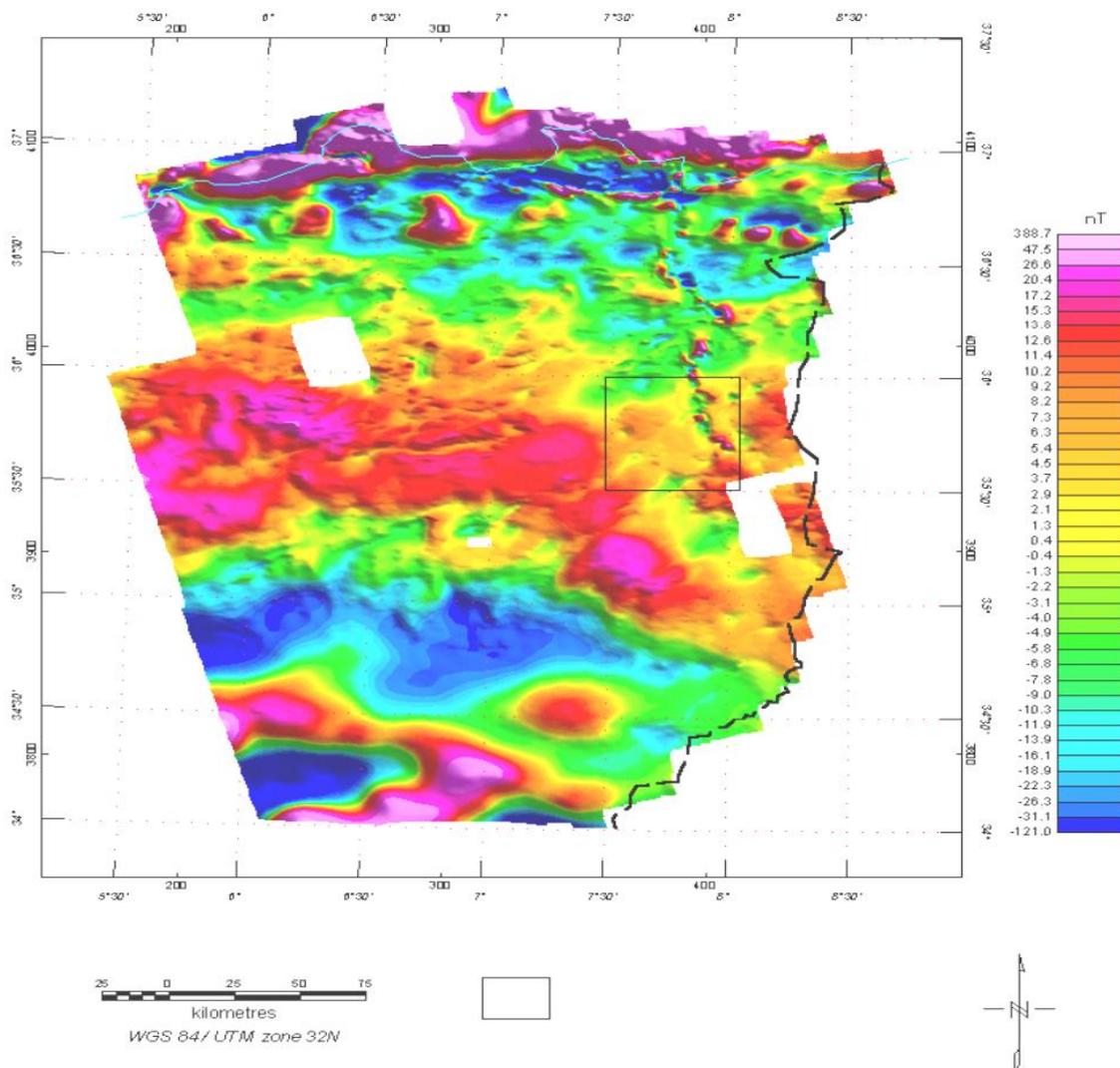


Figure 31: Carte aéromagnétique du Nord Est Algérien (Boubaya 2005)

VI. Conclusion

L'analyse de plusieurs SEV et profils sismiques nous amène aux conclusions suivantes :

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

- Terrains plio-quaternaires 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 à part sur les bordures, les faibles sondées 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 Nord-Ouest Sud-Est, il est représenté par des terrains d'épaisseur importante (souvent supérieure à 200m) de faibles résistivités et d'importance hydrogéologique moyenne. Ainsi que la cartographie révèlent une structuration différenciée dès le Trias associée, d'une part, au jeu d'un réseau de failles de directions NE-SW, N-S, E-W et NW-SE limitant des horsts et grabens dessinant ainsi des blocs basculés, et d'autre part, à la montée des évaporites du Trias supérieur, qui s'est effectuée par intrusion le long de ces failles.

La plupart des diapirs de la région d'étude dessinent une disposition morphologique en dômes percés de direction NE-SW, affleurant sous forme de corps elliptiques étirés, formant un chapelet de masses argilo-gypso-carbonatées.

L'activité diapirique amorcée au moins dès l'Aptien, elle est liée à la distension (en blocs basculés) qui a caractérisé l'Atlas Saharien Oriental durant le Crétacé. La remontée du matériel évaporitique depuis les zones d'anomalie lithostatique ou de densité est guidée par l'interférence de deux directions structurales majeures: La première NE-SW est marquée par les extrusions de Trias, la seconde, NW-SE à WNW-ESE matérialisée par les fossés d'effondrement. Ce contrôle structural est attesté par les données de géophysiques (sections sismiques) qui montrent des linéaments et des accidents profonds de même direction

CHAPITRE V :

HYDRO -

CLIMATOLOGIE

CHAPITRE V

HYDROCLIMATOLOGIE

Partie 1 : Climatologie

I. Introduction :

Dans la présente partie, les éléments de la climatologie qui sont appliqués dans les études hydrologiques vont être étudiés. En effet, l'étude de l'influence des éléments météorologiques sur les composantes du cycle hydrologique est assez importante puisque tels éléments sont responsables de la configuration du climat d'une zone donnée.

La région d'étude, sur le plan météorologique, constitue une zone de transition entre plusieurs phénomènes climatiques, notamment, le passage du régime climatique méditerranéen au climat saharien caractérisé par des influences desséchantes qui règnent, pendant une partie de l'année, sur le Sahara septentrional.

Le relief caractérisé par les derniers chaînons de l'Atlas Saharien et formant une barrière aux influences méditerranéennes accentue les contrastes climatiques entre l'Atlas Saharien et la Plate-Forme Saharienne.

L'objectif de cette étude est l'analyse de ces facteurs et la détermination des différents termes du bilan d'eau.

II. Choix des stations :

Toute étude climatique est basée sur la collecte des données. La quantité et la qualité de ces dernières conditionnent les résultats obtenus.

Les informations qui ont servi à la réalisation du présent chapitre proviennent de deux sources ; l'Agence Nationale des Ressources en eau et la Station Météorologique Tébessa, pour mener notre travail on a étudié les paramètres climatiques de trois stations pluviométriques qui sont représentées dans le (Tableau 6).

Tableau 6: Caractéristiques des trois stations

Station	L'atitudes	Longitudes	Altitude(m)
Tébessa	991,9	247,2	890
El Aouinet	967,8	297,5	650
Morsott	959	272	680

III. Caractéristiques climatiques de la région

L'Algérie, du fait de sa situation géographique se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes (figure 33); la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde à climat semi-aride vers l'intérieur du pays (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara.

La région d'étude Morsott-El Aouinet fait partie de la seconde zone, marquée par les risques et les aléas. Dans ce qui suit nous présentons un aperçu hydroclimatologique, indispensable à la compréhension des processus d'alimentation et de restriction des eaux souterraines, ce qui nous permettra d'avancer dans la connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau, et dans la variation des réserves des eaux souterraines. Ainsi, la variation des paramètres climatiques donne des indications sur l'évolution des concentrations des éléments chimiques, en fonction des saisons, tant au niveau des eaux souterraines qu'au niveau des eaux de surface.

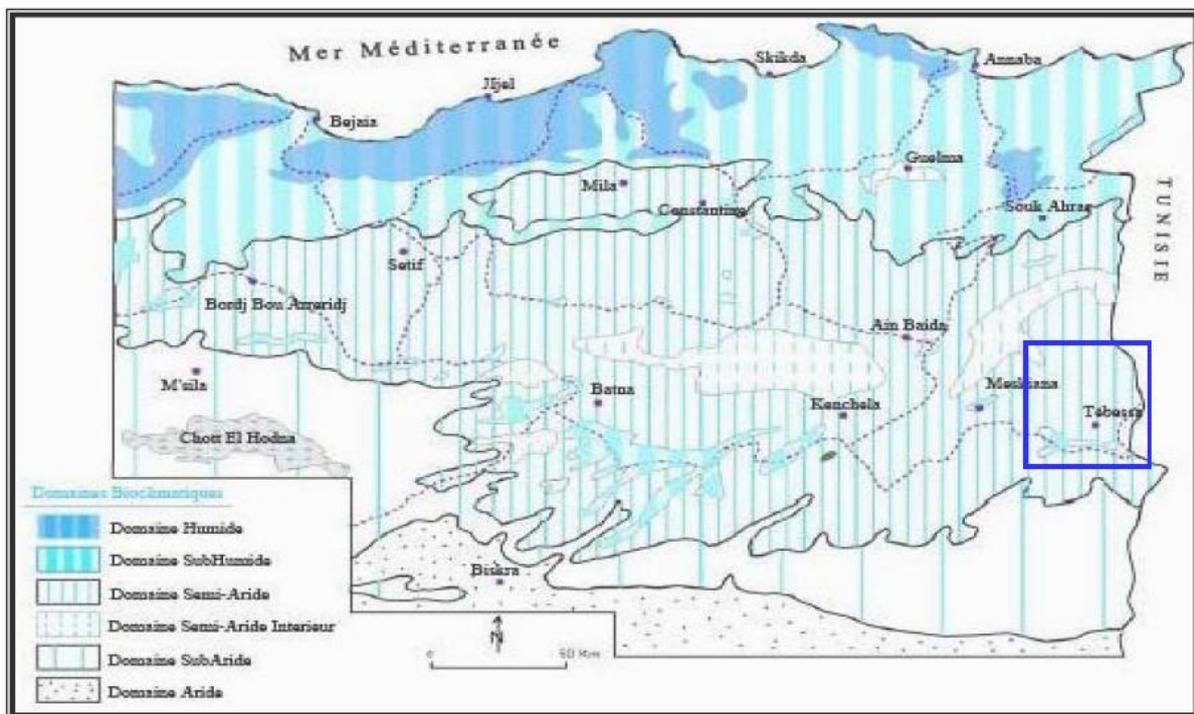


Figure 32: Carte bioclimatique de l'Algérie (Cote M., 1998)

A. Les précipitations :

La précipitation est l'une des composantes primordiales du cycle hydrologique ; elle pourra être qualifiée de facteur essentiel puisqu'elle constitue la matière première du cycle. Une eau est dite «précipitée» lorsqu'elle atteint la surface du sol sous état liquide ou solide. A cause des changements de pression et de température ainsi qu'en conséquence des mouvements des masses d'air, la vapeur d'eau contenue dans ces masses se regroupe en gouttes d'eau et en cristaux de neige qui précipitent vers la superficie. La précipitation est un phénomène discontinu, en conséquence on ne peut pas parler de sa variation journalière ou annuel de la même manière que pour la température ou les autres éléments météorologiques ; sa distribution spatio-temporelle est généralement variable.

Afin de caractériser cette composante climatique au niveau de la région d'étude, trois stations pluviométriques ont été considérées. Ces stations sont relativement bien réparties. Elles présentent une moyenne base de données s'étalant sur des périodes d'enregistrement, comprises entre 25 et 29 ans (Tableau 8).

Tableau 7: Moyennes pluviométriques interannuelles des stations de la zone d'étude

Station	Période d'observation	Moyenne pluv. Interannuelle (mm)
Tébessa	1987-2016	322.17
El Aouinet	1987-2012	305.57
Morsott	1987-2012	306.044

1. Variation de la pluviométrie annuelle :

La pluviométrie demeure le paramètre le plus important, elle conditionne l'écoulement saisonnier, le régime des cours d'eau et l'alimentation des nappes d'eau souterraines.

Les hauteurs des précipitations moyennes annuelles sont fournies par l'ANRH et la station météorologique Tébéssa.

Nous remarquons une disparité au niveau des quantités de pluie enregistrées pour les trois stations. Cette disparité est importante entre la station de Tébéssa et les deux stations, c'est-à-dire que la quantité d'eau qui tombe est presque la même pour la station d'El Aouinet et la station de Morsott.

La pluie annuelle moyenne varie entre un minimum de 305.57 mm au niveau d'El Aouinet et un maximum de 322.17 mm au niveau de Tébéssa.

2. Variations annuelles des précipitations :

Les figures visualisent l'évolution de la pluviométrie annuelle où l'on remarque que les hauteurs maximales des précipitations atteignent 624 mm au niveau de la station de Tébessa au cours de l'année 1995-96, 486 mm à El Aouinet (2010-2011) et de 413,7 mm à Morsott (1996-97) tandis que les hauteurs minimales sont de 185 mm (1993-94) à Tébessa, 183,2 (1997-98) à El Aouinet et de 57,8 mm (1994-95) à l'Ouenza.

La variation temporelle de ces précipitations annuelles montre le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre (dents en scie).

a) Station de Tébessa :

Le graphe suivant montre les variations annuelles des précipitations au niveau de la station de Tébessa. L'observation du graphique (figure 34), montre une variation presque cyclique des épisodes déficitaires et des épisodes excédentaires.

Cette station a une série qui s'étend sur la période 1987-2016, outre, la lame d'eau moyenne annuelle est égale à 322.17 mm. Les calculs font sur différentes périodes montre que les années les plus pluvieuses sont 1989-1992, 1995-1996, 2003-2004, 2009-2011, 2012-2014 et 2015-2016 soit 10 ans en excédent, Par ailleurs, les années les plus sèches sont 1987-1988,

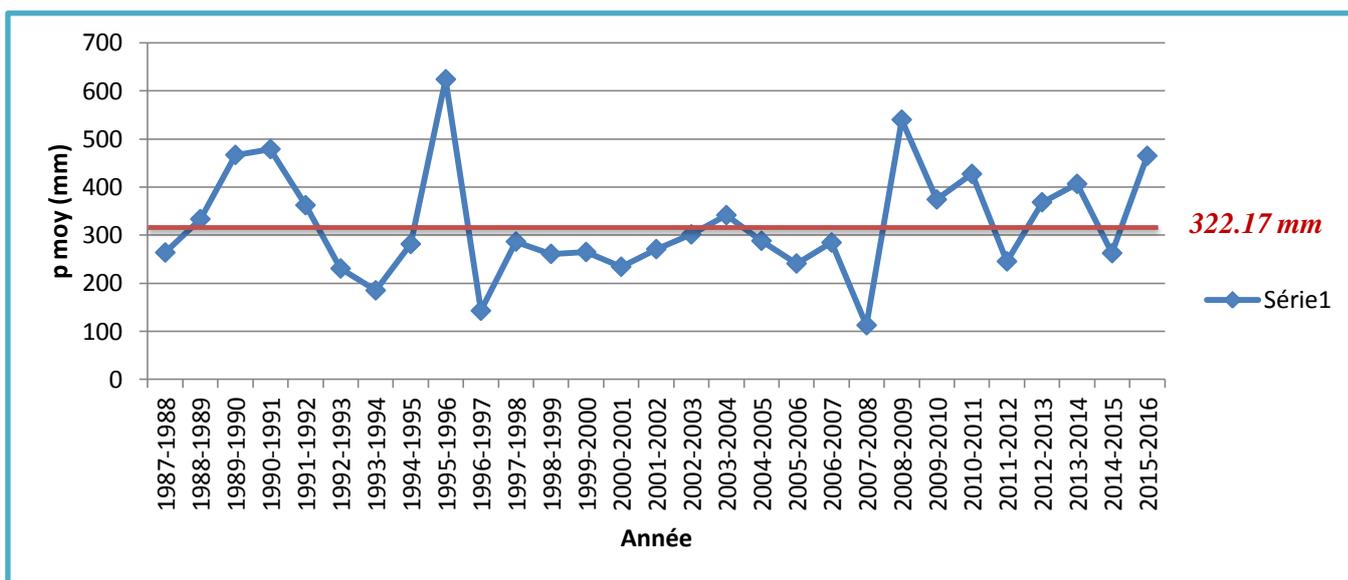


Figure 33: Précipitations moyennes annuelles de la station de Tébessa pour la période (1987/2016).

1992-1995, 1997-2003, 2005-2008, 2011-2012 et 2014-2015.

L'automne et le printemps constituent les saisons les plus pluvieuses (29 et 28 % des précipitations annuelles selon la station). La contribution d'hiver atteint les 23 %. L'été est la saison la plus sèche, 18 % des précipitations annuelles s'y produisent (Figure 35) ;

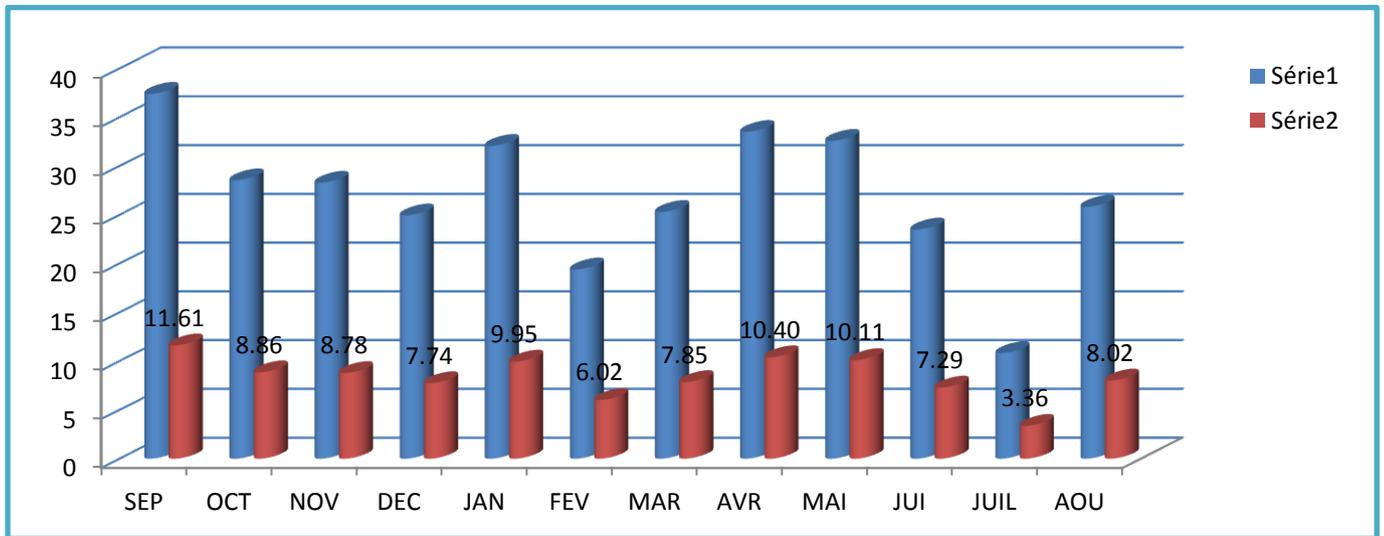


Figure 34: Contribution de la pluviométrie mensuelle moyenne au niveau de la station de Tébessa

b) Station d'El Aouinet :

L'observation du graphe montre une variation en dents de scie, traduisant des cycles courts (en durée) des épisodes déficitaires ou excédentaires. (Fig. 36)

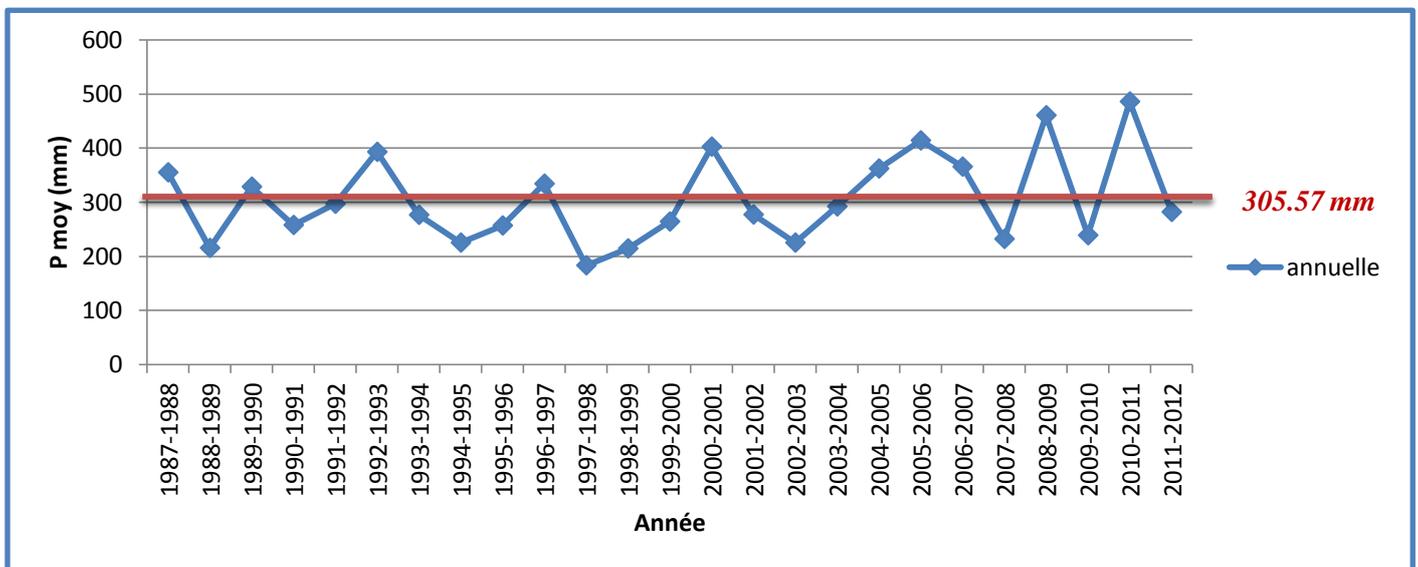


Figure 35: Pluviométrie annuelle dans la station d'El Aouinet (1987-2012)

L'hiver et le printemps constituent les saisons les plus pluvieuses (24 et 36 % des précipitations annuelles selon la station). La contribution d'automne atteint les 23 %. L'été est la saison la plus sèche, 15 % des précipitations annuelles s'y produisent (Figure 37) ;

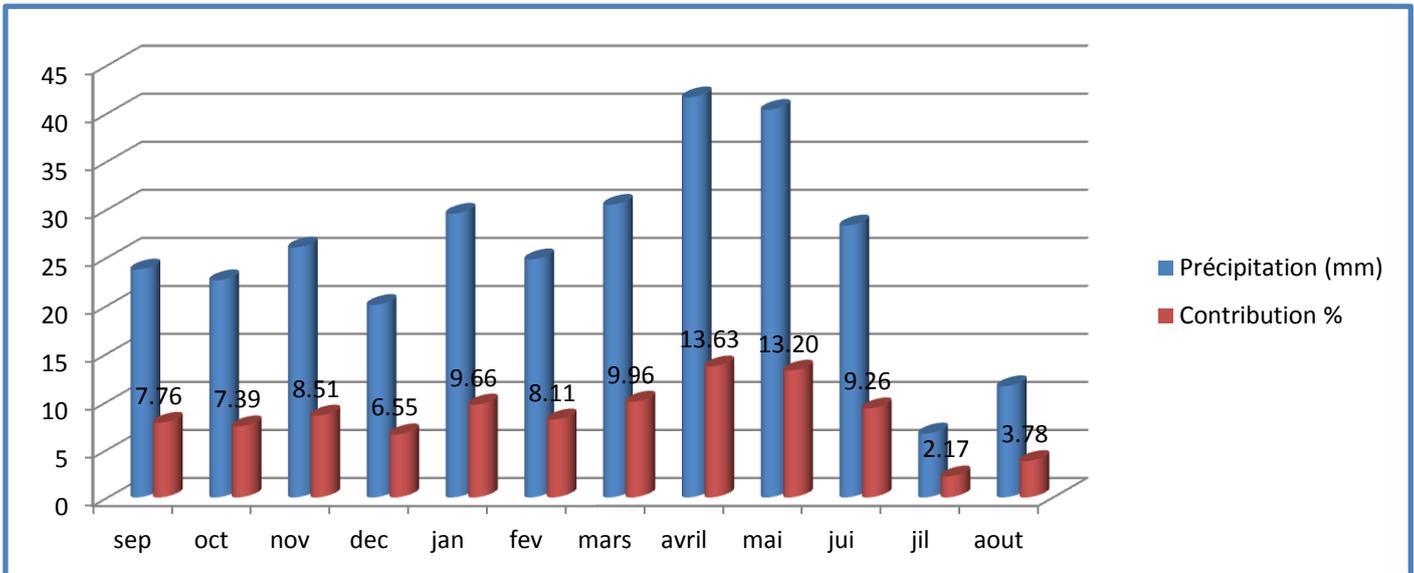


Figure 36: Contribution de la pluviométrie mensuelle moyenne au niveau de la station d'El Aouinet

a) Station de Morsott :

L'observation du graphe montre une variation en dents de scie, traduisant des cycles courts (en durée) des épisodes déficitaires ou excédentaires. (**Fig. 38**)

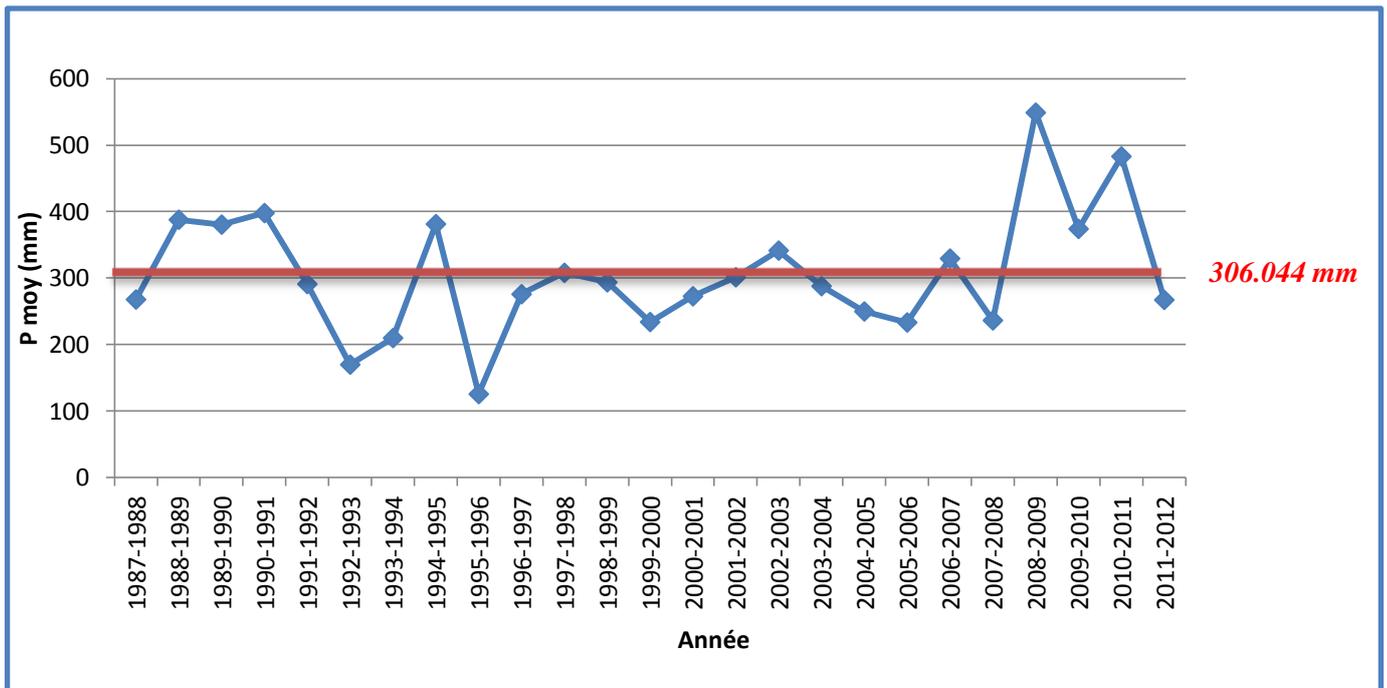


Figure 37: Pluviométrie annuelle dans la station de Mosott (1987-2012).

L’hiver et le printemps constituent les saisons les plus pluvieuses (27 et 32 % des précipitations annuelles selon la station). La contribution d’automne atteint les 24 %. L’été est la saison la plus sèche, 16 % des précipitations annuelles s’y produisent (Figure 39) ;

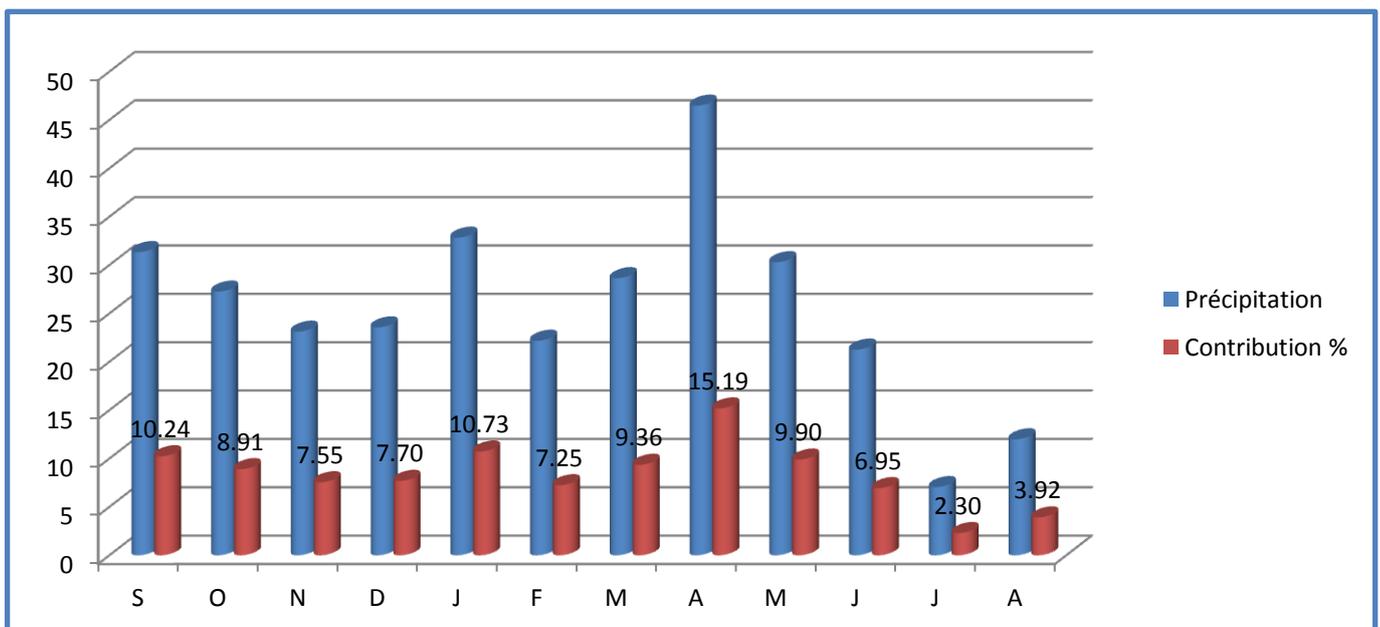


Figure 38: Contribution de la pluviométrie mensuelle moyenne au niveau de la station de Morsott

3. Calcul du coefficient pluviométrique :

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 P pour une période de 10 années.

$$H = \frac{P_i}{P_{moy}}$$

P_i : Hauteur annuelle de pluie de l'année considérée, en (mm).

P_{moy} : Pluviométrie moyenne en (mm).

H : Coefficient pluviométrique où coefficient d'hydraulicité.

L'année est excédentaire lorsque H est supérieur à l'unité ($H > 1$) et déficitaire quand H est inférieur à 1 ($H < 1$) comme le montre le tableau suivant :

Tableau 8: Coefficient pluviométrique des stations de Tebessa, Morsott et El Aouinet.

	Station de Tebessa			Station d'ElAouinet			Station de Morsott		
	Hauteur annuelle des pluies P (mm)	Pluviométrie moyenne P (mm)	Coefficient pluviométrique H	Hauteur annuelle des pluies P (mm)	Pluviométrie moyenne P (mm)	Coefficient pluviométrique H	Hauteur annuelle des pluies P (mm)	Pluviométrie moyenne P (mm)	Coefficient pluviométrique H
87-88	263.8	322.17	0.82	355.1	305.57	1.16	267.9	306.044	0.88
88-89	333.3	322.17	1.03	215.4	305.57	0.70	387.9	306.044	1.27
89-90	466.8	322.17	1.45	328.6	305.57	1.08	380.6	306.044	1.24
90-91	478.8	322.17	1.49	257.8	305.57	0.84	398	306.044	1.30
91-92	362.2	322.17	1.12	297	305.57	0.97	291.1	306.044	0.95
92-93	230.5	322.17	0.72	392.94	305.57	1.29	170	306.044	0.56
93-94	185	322.17	0.57	276.5	305.57	0.90	210	306.044	0.69
94-95	281.5	322.17	0.87	225.2	305.57	0.74	381.4	306.044	1.25
95-96	624	322.17	1.94	256.8	305.57	0.84	125.7	306.044	0.41
96-97	142.7	322.17	0.44	334.1	305.57	1.09	275.9	306.044	0.90
97-98	286.4	322.17	0.89	183.2	305.57	0.60	308.1	306.044	1.01
98-99	260.9	322.17	0.81	214.4	305.57	0.70	293.8	306.044	0.96
99-00	264.8	322.17	0.82	264.2	305.57	0.86	234.1	306.044	0.76
00-01	234.1	322.17	0.73	402.6	305.57	1.32	272.8	306.044	0.89
01-02	270.8	322.17	0.84	277.1	305.57	0.91	301.4	306.044	0.98
02-03	301.4	322.17	0.94	225.2	305.57	0.74	341.5	306.044	1.12
03-04	341.5	322.17	1.06	292.1	305.57	0.96	288	306.044	0.94
04-05	288	322.17	0.89	362.2	305.57	1.19	250	306.044	0.82
05-06	240.9	322.17	0.75	414.1	305.57	1.36	233.4	306.044	0.76
06-07	284.5	322.17	0.88	365.6	305.57	1.20	329.5	306.044	1.08
07-08	112.5	322.17	0.35	232	305.57	0.76	236.5	306.044	0.77
08-09	540	322.17	1.68	460.6	305.57	1.51	549	306.044	1.79
09-10	374.1	322.17	1.16	238.8	305.57	0.78	374.1	306.044	1.22
10-11	427.2	322.17	1.33	486	305.57	1.59	483.1	306.044	1.58
11-12	245.3	322.17	0.76	281.9	305.57	0.92	267.3	306.044	0.87
12-13	368.3	322.17	1.14						
13-14	406.5	322.17	1.26						
14-15	262.4	322.17	0.81						
15-16	464.8	322.17	1.44						

L'étude de l'évolution annuelle des trois stations a mis en évidence 12 ans excédentaires sur 29 ans à la station de Tebessa, 10 ans sur 25 ans à la station de d'El Aouinet avec une période qui s'étale de 2004 à 2007, 10 ans sur 25 ans à Morsott avec une période qui s'étale de 1989 à 1991 et une période secondaire de 2008-2011. Au niveau de cette zone et sur les vingt cinq (25) années on remarque que les nombres des années déficitaires est supérieure au nombre des années excédentaires, ceci implique que les apports par les précipitations reste faible.

4. Analyse pour chaque station :

- ***Station de Tébessa :***

Au niveau de cette station, nous observons la répartition suivante :

Années déficitaires : 17 années.

Années excédentaires : 12 années.

Soit 58.62 % des années sont déficitaires et 41.38 % excédentaires.

- ***Station d'El Aouinet :***

Années déficitaires : 15 années.

Années excédentaires : 10 années.

Soit 60 % des années sont déficitaires et 40 % excédentaires.

- ***Station de Morsott:***

Années déficitaires : 15 années,

Années excédentaires : 10 années

Soit 40 % des années sont déficitaires et 60 % excédentaires.

B. Etude des températures :

La température est le second facteur régissant les variations climatiques. Elle intervient dans le calcul du bilan hydrologique de la région. Pour mener notre travail, nous disposons des températures enregistrées à la station de l'aéroport de Tébessa pour la période 1987-1988 à 2015-2016.

1. Les températures annuelles :

Année	T moy C°	Année	T moy C°
1987-1988	16.88	2002-2003	16.48
1988-1989	15.04	2003-2004	16.03
1989-1990	16	2004-2005	16.13
1990-1991	15.28	2005-2006	16.79
1991-1992	14.5	2006-2007	16.55
1992-1993	16.58	2007-2008	16.44
1993-1994	16.84	2008-2009	14.51
1994-1995	16.18	2009-2010	16.28
1995-1996	15.65	2010-2011	15.97
1996-1997	16.42	2011-2012	15.82
1997-1998	16.57	2012-2013	15.86
1998-1999	16.48	2013-2014	15.97
1999-2000	16.04	2014-2015	16
2000-2001	19.08	2015-2016	15.66
2001-2002	16.73		

Les températures moyennes annuelles varient de 14,5 °C (1991-1992) l’année la plus froide à 19,08 °C (2000-2001) l’année la plus chaude. Le reste oscille entre 15,2 et 16,8 °C, la moyenne est de 16,29 °C et un écart type est de 0,81.

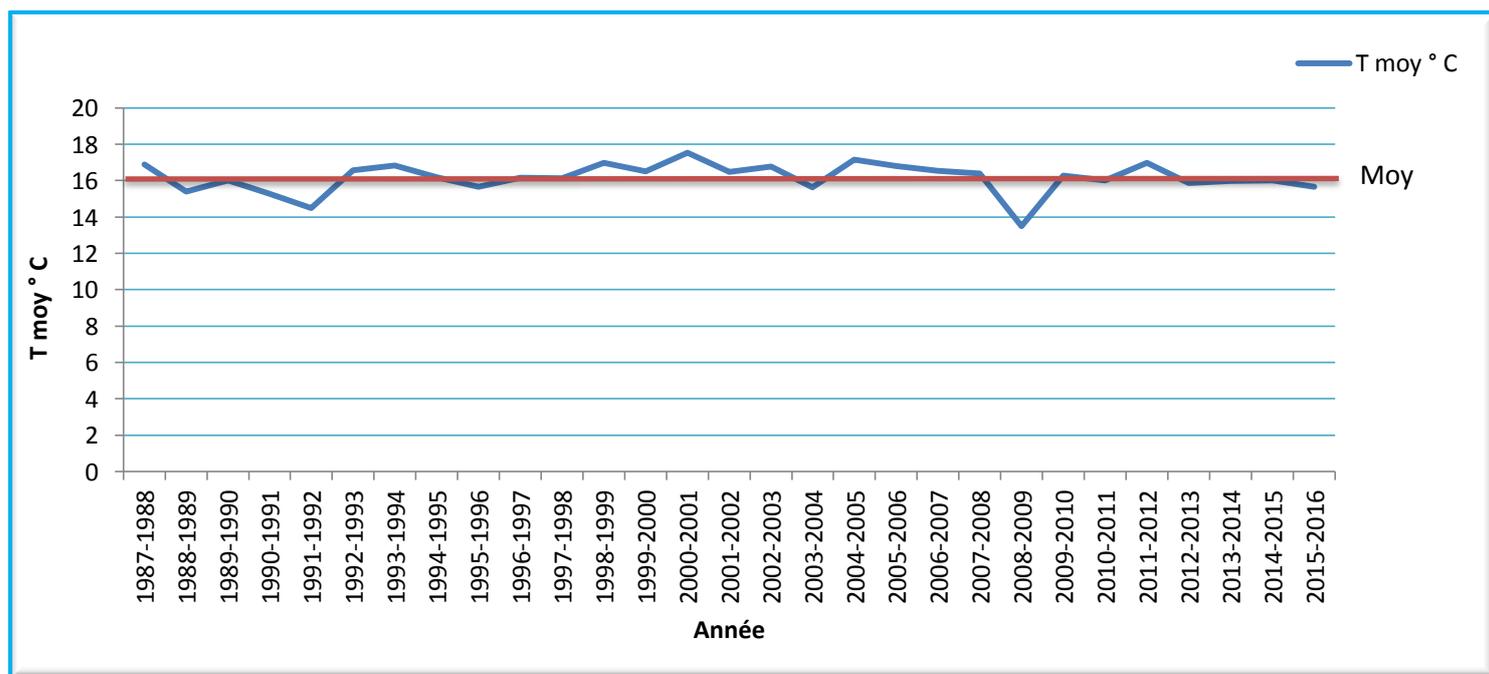


Figure 39: Températures moyennes annuelles de la station de Tébessa pour la période (1987/2016)

2. Températures moyennes mensuelles :

On dispose des données de températures moyennes mensuelles de la station de Tébessa pour la période 1987/2016.

Tableau 9: Températures moyennes mensuelles et annuelles

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
Tébessa	21.36	18.53	13.09	9.17	7.89	8.67	10.77	13.24	17.73	22.64	25.80	24.96	16.29

La figure 41 montre que les basses températures s'observent de décembre à février, avec un minimum de 7.89 pendant Janvier, tandis que les températures moyennes élevées s'observent aux mois de juillet avec 25.80°C et août avec 24.96°C. L'écart thermique entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid varie est de 17,91°C.

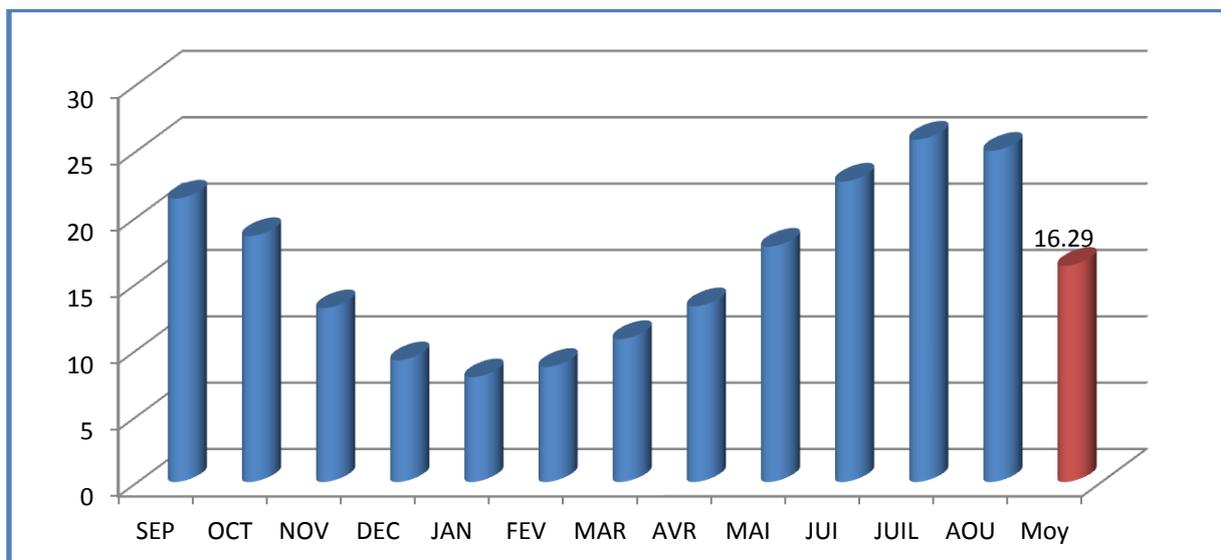


Figure 40: Températures moyennes mensuelle de la station de Tébessa pour la période (1987-2016)

C. Les indices thermiques :

1. Indice de Martonne :

Cet indice ne peut être calculé pour les stations d'El Aouinet et de Morsott, car on n'a pas la température.

En se basant sur le régime des précipitations et des températures De MARTONNE (1923) a défini un indice d'aridité "A".

$$A = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : température moyennes annuelles (°C).

Pour

$A < 5$: climat hyperaride.

$5 < A < 7,5$: climat désertique.

$7,5 < A < 10$: climat steppique.

$10 < A < 20$: climat semi-aride.

$20 < A < 30$: climat tempéré.

Tableau 10: Indice d'aridité annuel de De Martonne

Station	P (mm)	Indice de Martonne	Type de climat
Tébessa	322.17	12.25	Climat semi-aride

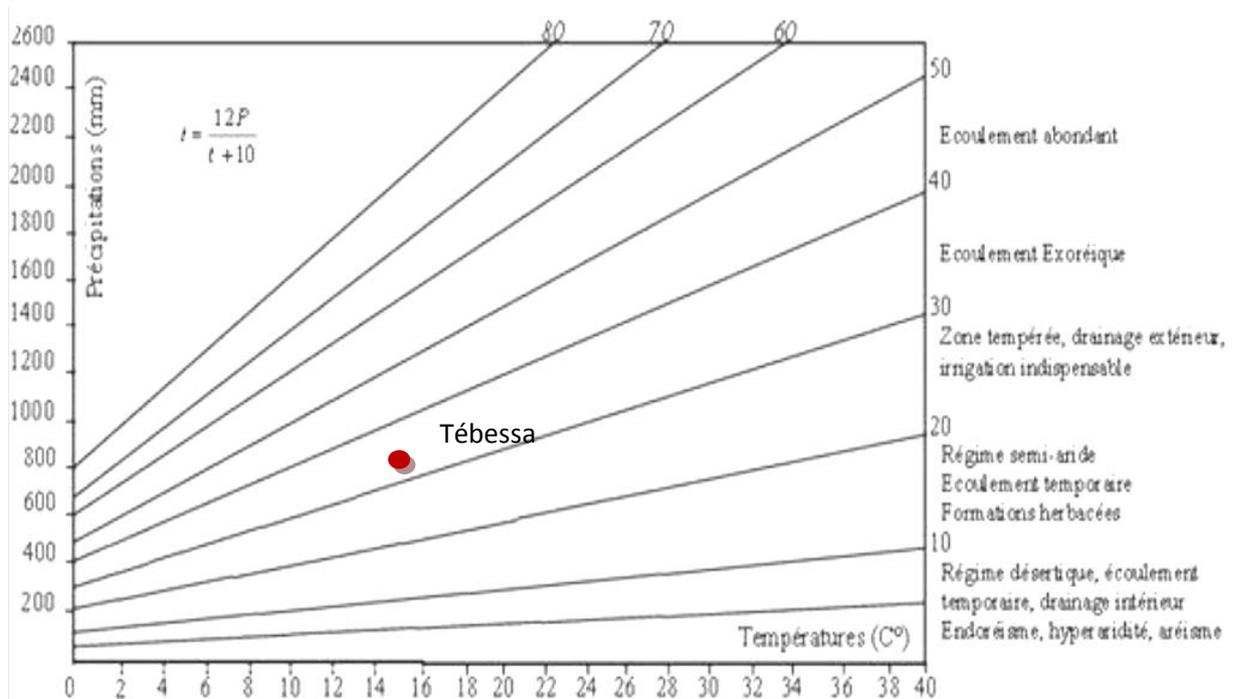


Figure 41: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne

2. Diagramme pluviothermique de Gausсен et Bagnouls :

Selon BAGNOULS et GAUSSEN (1953), un mois est dit sec si : le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades, cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes pluviothermiques traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes.

Une application a été faite à la station de Tébessa, il résulte que la saison humide s'étend du mois du Novembre jusqu'à mi-Avril.

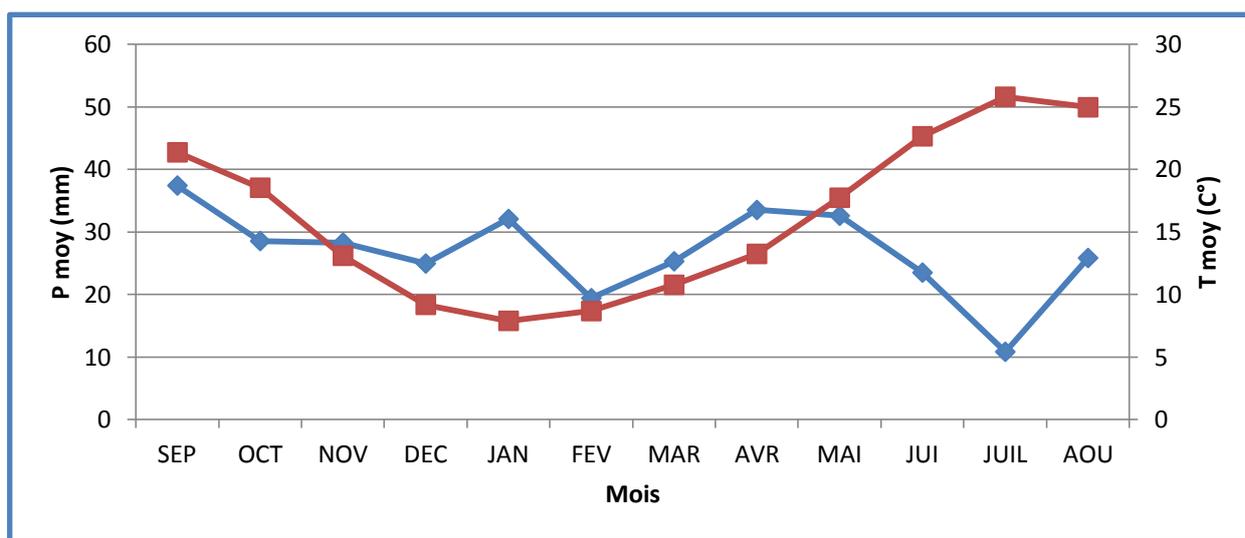


Figure 42: Courbe pluviothermique de la station de Tébessa pour la période (1987-2016)

D. Evaporation :

On dispose de mesures réalisées avec un bassin d'évaporation de type « Colorado » : c'est bac enterrés, le bord dépasse le niveau du sol d'une dizaine de centimètres. C'est un parallélépipède dont la section droite est un carré de 0,914 cm de côté. La profondeur de l'eau est de 0,462 cm. On dispose des données de Tébessa pour la période 1971-2006.

Tableau 11: Moyennes mensuelles de l'évaporation à la station de Tébessa : période 1971-2006.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Evaporation en mm	221,16	161,4	109,16	93,32	88,89	105,95	133,53	175,05	224,68	280,37	367,95	332,95
Evaporation en (%)	9,64	7,03	4,76	4,08	3,87	4,62	5,82	7,63	9,79	12,22	16,03	14,51

E. Evapotranspiration :

C'est la restitution de l'eau à l'atmosphère à partir d'une surface quelque soit sa nature : sol, végétation, surface d'eau libre, neige ou glace, par transformation de l'eau en vapeur. Ce processus est le résultat de deux phénomènes : L'évaporation (E) : s'effectue à partir des surfaces évaporantes, surfaces d'eau libre et les sols humides.

La transpiration (T) ou évaporation physiologique : est l'évaporation biologique des plantes.

1. Evapotranspiration potentielle ETP :

L'évapotranspiration potentielle qui correspond à la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant. Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, on a appliqué les formules de Thornthwaite et de Bouchet.

Les données de température qu'on dispose sont celles de la station de Tébessa.

a) Formule de Thornthwaite :

La formule THORNTHWAITE basée essentiellement sur les températures de l'air est la suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^{\alpha}$$

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en (mm) ;

T : Température moyenne de la période considérée C° ;

I : Indice thermique annuel égal à la somme des 12 indices mensuels ;

i : Indice thermique mensuel et égale à : $i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$

α : Indice calculé à partir de la formule : $\alpha = \frac{1,6}{100} I + 0,5$

Les valeurs de ETP trouvées par cette formule devraient être corrigées à l'aide d'un facteur correctif noté K, celui-ci dépend du temps, du lieu de la station : ETP corrigée = ETP non corrigée X K

Le résultat obtenu pour la station de Tébessa est mentionné dans le tableau suivant pour : I = 60,8 et $\alpha = 1,47$, l'ETPc = 849,7 mm, soit 245,87 % des précipitations.

2. Evapotranspiration réelle ETR :

L'évapotranspiration réelle est une réponse, en termes de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'évapotranspiration potentielle, compte tenu de la quantité d'eau disponible.

L'évapotranspiration réelle est estimée à l'aide des formules de TURC, COUTAGNE, WUNDT et THORNTHWAITE.

a) Formule de Turc

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm)

T : Température moyenne annuelle en (C°)

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

L : (300+25T+0.05T³)

b) Formule de Contagne

$$ETR = P - \gamma P^2$$

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm)

T : Température moyenne annuelle en (C°)

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

$$\gamma = \frac{1}{0.8 + 0.14 \times T}$$

Cette formule est valable si : $\frac{1}{8}\gamma < P < \frac{1}{2}\gamma$

Donc, cette formule n'est pas valable pour la région d'étude. P=322.17 $\gamma=0,34$

c) Formule de Thornthwaite

Pour le calcul de l'ETR, on a utilisé la méthode de THORNTHWAITE qui se distingue par deux cas principaux :

- Estimation des réserves facilement utilisable « RFU »

Elles présentent la quantité d'eau emmagasinée dans le sol donnée par la formule de J.Richard 1979

$$RFU = \frac{1}{3} Da. He. P$$

RFU : Reserve facilement utilisable en mm

Da : Densité apparente du sol

He : Capacité de rétention (teneur en eau)

P : Tranche d'eau parcourue par les racines

- Calcul du ruissellement « R »

D'après la formule de Tixeront et Berkalof on peut calculer le ruissellement à partir de la précipitation moyenne annuelle et l'évapotranspiration potentielle.

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

- Calcul d'infiltration « I »

La formule du bilan hydraulique est la suivante :

$$P = ETR + I + R$$

$$I = P - ETR - R$$

En tenant compte de si :

$I > 0$ les entrées sont supérieures aux sorties.

$I < 0$ les entrées sont inférieures aux sorties.

Dans notre cas on ne calcul pas l'infiltration ainsi que le ruissellement car le bilan hydrique est déficitaire dans son ensemble.

Tableau 12: bilan hydrique de la station de Tébessa (1987-2012)

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	21.36	9.0	1.03	97.7	37.40	-60.3	-0.6	0.0	0.0	37.4	60.3	0.0
O	18.53	7.3	0.97	72.2	28.53	-43.7	-0.6	0.0	0.0	28.5	43.7	0.0
N	13.09	4.3	0.86	35.5	28.29	-7.2	-0.2	0.0	0.0	28.3	7.2	0.0
D	9.17	2.5	0.81	18.2	24.94	6.7	0.4	6.7	6.7	18.2	0.0	0.0
J	7.89	2.0	0.87	15.2	32.065	16.9	1.1	16.9	23.6	15.2	0.0	0.0
F	8.67	2.3	0.85	17.4	19.40	2.0	0.1	2.0	25.6	17.4	0.0	0.0
M	10.77	3.2	1.03	30.5	25.29	-5.2	-0.2	-5.2	20.4	30.5	0.0	0.0
A	13.24	4.4	1.10	46.3	33.50	-12.8	-0.3	-12.8	7.6	46.3	0.0	0.0
M	17.73	6.8	1.21	83.6	32.58	-51.0	-0.6	-7.6	0.0	40.2	43.4	0.0
J	22.64	9.8	1.22	127.7	23.49	-104.2	-0.8	0.0	0.0	23.5	104.2	0.0
J	25.8	12.0	1.24	162.1	10.83	-151.3	-0.9	0.0	0.0	10.8	151.3	0.0
A	24.96	11.4	1.16	143.3	25.83	-117.5	-0.8	0.0	0.0	25.8	117.5	0.0
Annuel	16.2	75.0		849.7	322.2	-527.5				322.2	527.5	0.0

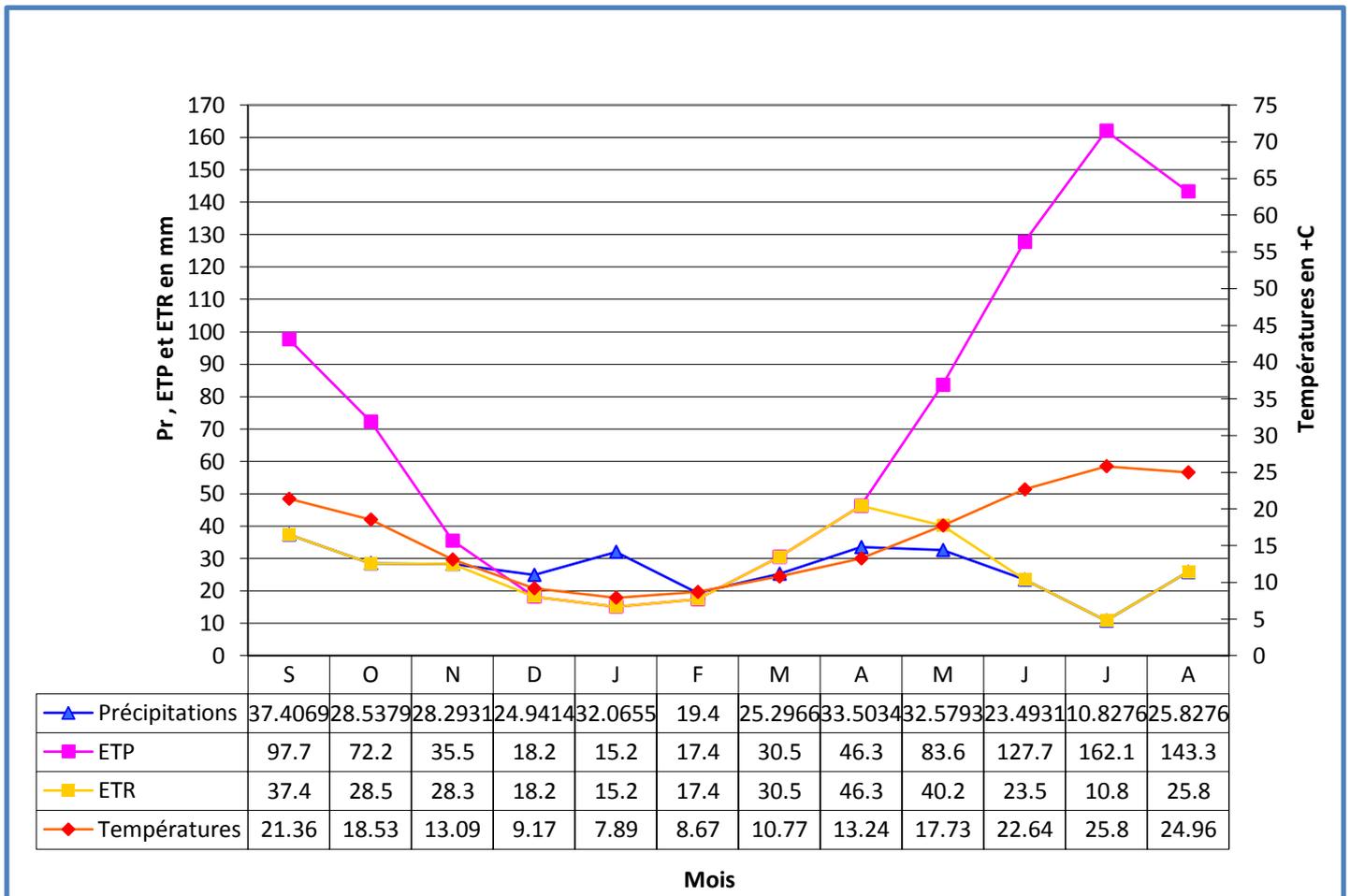


Figure 43: Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station de tebessa (1987-2016)

Tableau 13: bilan hydrique de la station d'El Aouinet (1987-2012)

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	21.36	9.0	1.03	97.7	23.716	-73.9	-0.8	0.0	0.0	23.7	73.9	0.0
O	18.53	7.3	0.97	72.2	22.592	-49.6	-0.7	0.0	0.0	22.6	49.6	0.0
N	13.09	4.3	0.86	35.5	26.012	-9.5	-0.3	0.0	0.0	26.0	9.5	0.0
D	9.17	2.5	0.81	18.2	20.0256	1.8	0.1	1.8	1.8	18.2	0.0	0.0
J	7.89	2.0	0.87	15.2	29.524	14.3	0.9	14.3	16.1	15.2	0.0	0.0
F	8.67	2.3	0.85	17.4	24.772	7.4	0.4	7.4	23.5	17.4	0.0	0.0
M	10.77	3.2	1.03	30.5	30.448	-0.1	0.0	-0.1	23.4	30.5	0.0	0.0
A	13.24	4.4	1.10	46.3	41.644	-4.6	-0.1	-4.6	18.8	46.3	0.0	0.0
M	17.73	6.8	1.21	83.6	40.336	-43.3	-0.5	-18.8	0.0	59.1	24.5	0.0
J	22.64	9.8	1.22	127.7	28.3	-99.4	-0.8	0.0	0.0	28.3	99.4	0.0
J	25.8	12.0	1.24	162.1	6.644	-155.4	-1.0	0.0	0.0	6.6	155.4	0.0
A	24.96	11.4	1.16	143.3	11.564	-131.8	-0.9	0.0	0.0	11.6	131.8	0.0
Annuel	16.2	75.0		849.7	305.6	-544.1				305.6	544.1	0.0

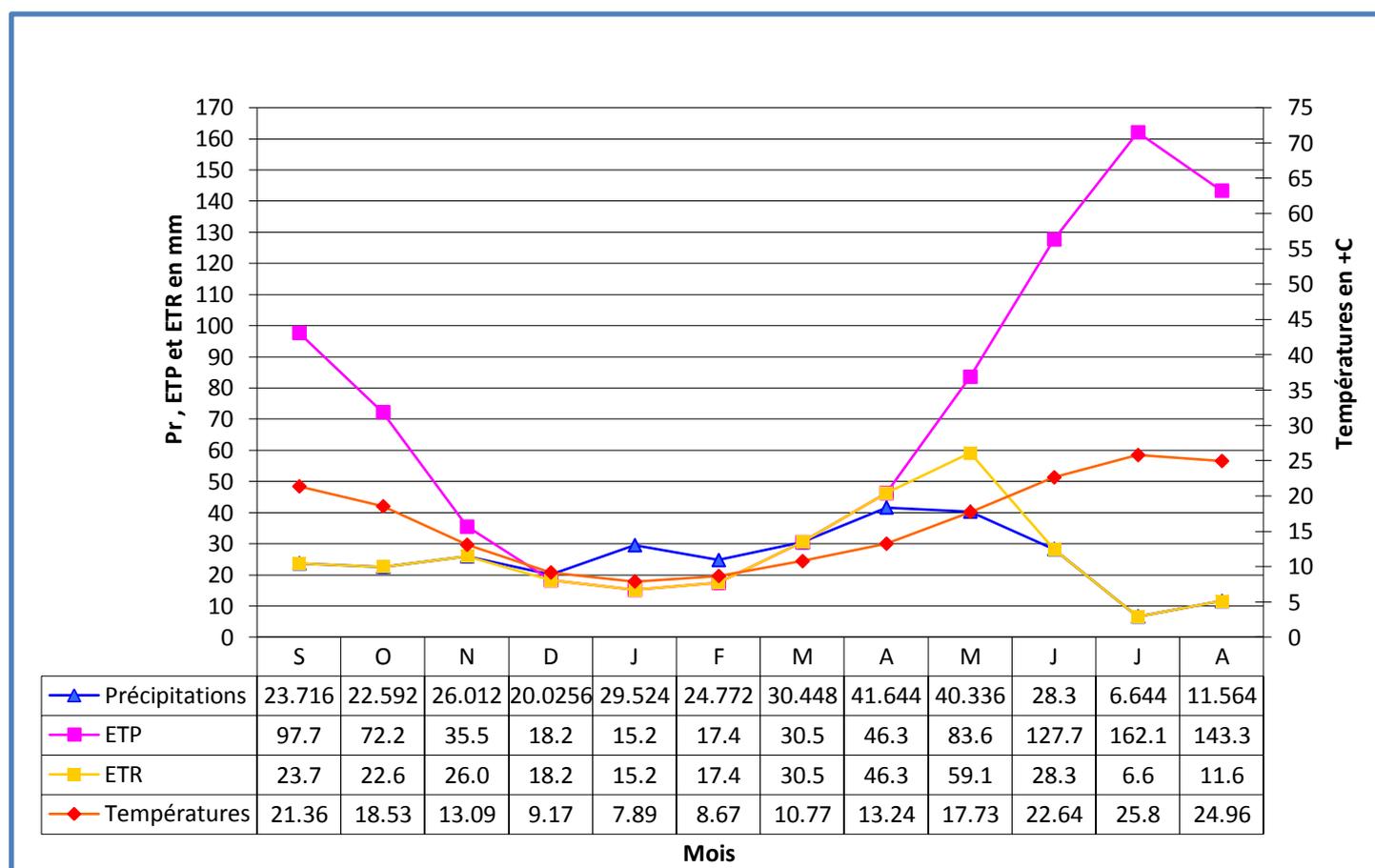


Figure 44 : Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station d'El aouinet (1987-2012)

Tableau 14 : bilan hydrique de la station de Morsott (1987-2012)

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	21.36	9.0	1.03	97.6	31.348	-66.3	-0.7	0.0	0.0	31.3	66.3	0.0
O	18.535	7.3	0.97	72.3	27.26	-45.0	-0.6	0.0	0.0	27.3	45.0	0.0
N	13.0987	4.3	0.86	35.5	23.12	-12.4	-0.3	0.0	0.0	23.1	12.4	0.0
D	9.17	2.5	0.81	18.2	23.56	5.3	0.3	5.3	5.3	18.2	0.0	0.0
J	7.89333	2.0	0.87	15.2	32.836	17.7	1.2	17.7	23.0	15.2	0.0	0.0
F	8.67667	2.3	0.85	17.4	22.184	4.8	0.3	2.0	25.0	17.4	0.0	0.0
M	10.7717	3.2	1.03	30.5	28.648	-1.8	-0.1	-1.8	23.2	30.5	0.0	0.0
A	13.247	4.4	1.10	46.3	46.48	0.2	0.0	0.2	23.3	46.3	0.0	0.0
M	17.7333	6.8	1.21	83.6	30.3	-53.3	-0.6	-23.3	0.0	53.6	30.0	0.0
J	22.6483	9.8	1.22	127.8	21.264	-106.5	-0.8	0.0	0.0	21.3	106.5	0.0
J	25.8017	12.0	1.24	162.1	7.052	-155.0	-1.0	0.0	0.0	7.1	155.0	0.0
A	24.9683	11.4	1.16	143.4	11.992	-131.4	-0.9	0.0	0.0	12.0	131.4	0.0
Annuel	16.2	75.0		849.9	306.0	-543.8				303.3	546.6	0.0

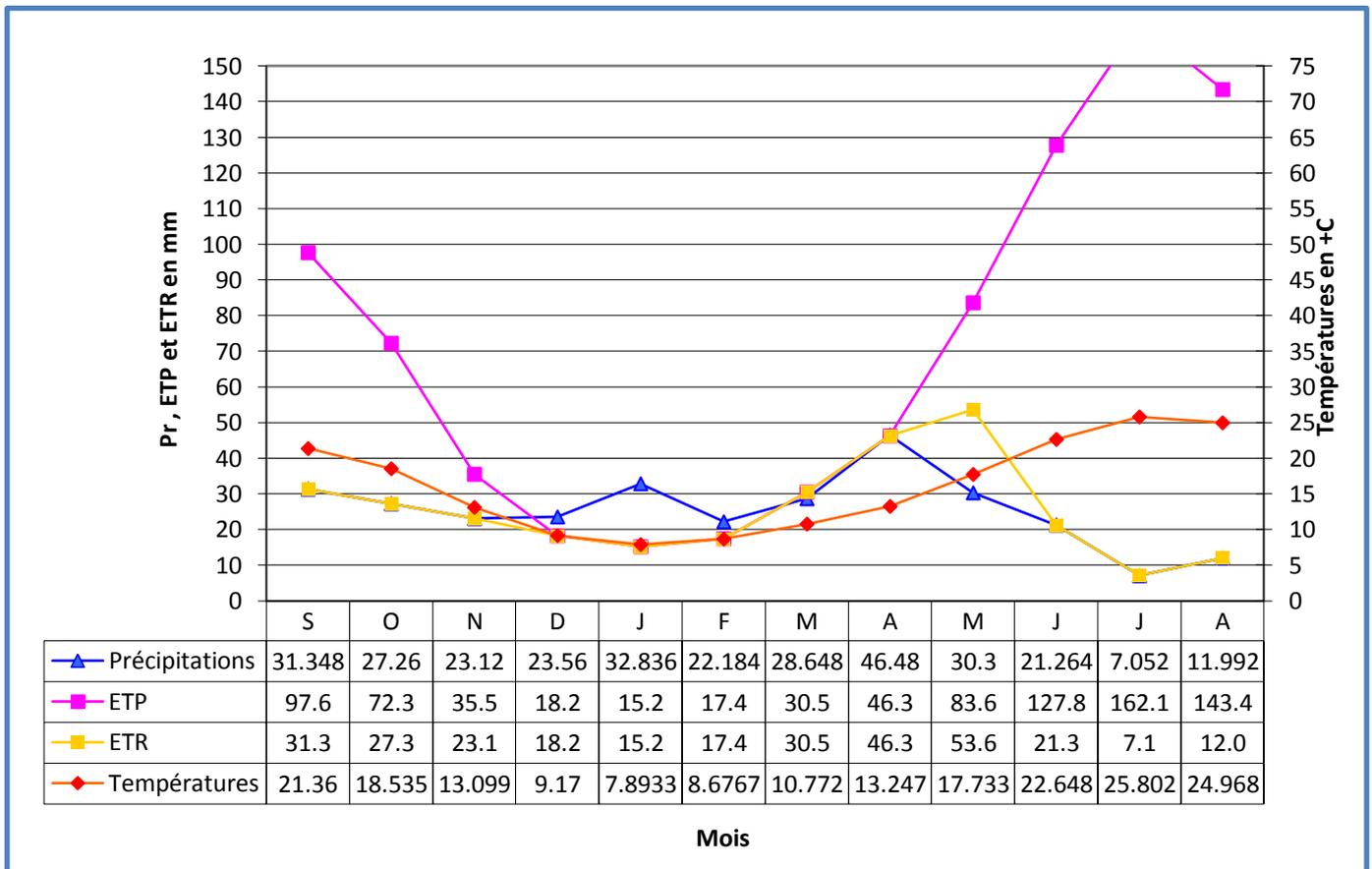


Figure 45 : Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE station de Morsott (1987-2012)

- **Commentaire sur les bilans hydriques**

Le bilan hydrique nous a permis d'évaluer la part de chaque paramètre hydrologique.

D'après l'établissement de ces bilans on a pu tirer ces quelques conclusions :

- Les hauteurs de précipitation atteignent leurs maximums au mois de Septembre (37.40 mm) sur la station de Tebessa et au mois de d'Avril (41.64 et 46.48 mm) sur les deux stations d'ElAouinet et de Morsott, où l'ETP atteint en janvier un minimum de 15.2 mm.
- L'ETP atteint son maximum au mois de juillet (162.1 mm) où les précipitations atteignent (10.83 mm pour la station de Tebessa, 6.644 mm pour la station d'El Aouinet et 7.052 mm pour la station de Morsott).
- Le déficit agricole se remarque à partir du mois de mai et se poursuit jusqu'à novembre, période pendant laquelle la RFU est épuisée.
- Pendant le mois de Février le stock se reconstitue ou la RFU atteint son maximum (25, 23 et 25 mm) aux stations de Tebessa, Morsott et ElAouinet, ensuite diminue jusqu'à l'épuisement total (Mai).

F. Bilan hydrologique :

Le bilan hydrologique permet d'évaluer la répartition des précipitations entre les différents composants de ce bilan, à savoir : l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration.

Le bilan est établi selon la formule suivante :

$$P = E + R + I$$

Où :

P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm.

E : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm.

R: Ruissellement moyen annuel en mm.

I : Infiltration moyenne annuelle en mm.

1. Ruissellements superficiels :

Il est estimé à partir de la formule de Tixeront-Berkaloff qui est la suivante :

$$R = P^3 / 3(ETP)^2$$

L'application de cette formule a donné les résultats mentionnés dans le tableau :

Tableau 15: valeurs de ruissellement superficiel Période (1987-2016).

Station	P (mm)	ETPc en mm	R en mm
Tébessa	322.17	849.7	15.48

Le ruissellement superficiel est de l'ordre 15.48 mm, soit 4,80 % des précipitations à Tébéssa.

Partie 2: Hydrologie

I. Introduction :

L'hydrologie est la science qui se consacre à l'étude des écoulements superficiels. Dans une région comme la notre les apports en eaux superficielles sont très importants la pluviométrie est très faible et le déficit observé peut être compensé par les apports d'eau externes à la zone d'étude.

Les relevés des débits d'un cours d'eau pendant une longue série d'années montrent des variations saisonnières systématiques (position des hautes et basses eaux) en fonction des principaux facteurs influençant l'écoulement : le régime des précipitations, la nature du bassin versant, sa situation géographique, l'infiltration, etc. Le régime hydrologique d'un cours d'eau résume l'ensemble de ses caractéristiques hydrologiques et son mode de variation.

II. Le bassin hydrographique constantinois-Seybouse -Mellegue :

Cette région couvre une superficie d'environ de 44 0719 Km². Elle est située entre la région Algérois_Hodna_Soummam et la Tunisie, au Nord limitée par la mer Méditerranée et au Sud par le bassin de Sahara. Cette région reçoit une pluviométrie annuelle de l'ordre 26 000 Millions de mètre cube et un apport annuel moyen de 5595 Millions de mètre cube.

A. Caractéristiques du bassin versant de l'Oued Mellegue :

Il prend naissance au sud-ouest au niveau de Zoui à une altitude de 1626 m. Le bassin versant de l'Oued Mellegue occupe environ 4575 km², l'altitude minimale est de 480 m.

Le bassin versant de l'oued Mellègue se compose de trois parties:

- Au Nord, le sous bassin drainé par l'Oued Mellègue. On y trouve notamment l'oued Guetara, affluent important de rive gauche.
- Au Sud-ouest, le sous bassin de l'oued Meskiana. Cet oued, en provenance de la région de Kenchela, présente des lacs salés dans sa partie amont.
- Au Sud-est, le sous bassin de l'oued Chabro. Cet oued prend sa source dans la région de Tébessa. L'oued Chabro et l'oued Meskiana confluent légèrement en amont d'El Aouinet.

Les caractéristiques physiographiques sont résumées dans le tableau suivant :

<i>Paramètres</i>	<i>Symbole</i>	<i>valeur</i>	<i>unité</i>
Surface	<i>S</i>	4575	Km ²
Périmètre	<i>P</i>	305	Km
Altitude maximale	<i>H_{max}</i>	1626	m
Altitude minimale	<i>H_{min}</i>	480	m
Altitude moyenne	<i>H_{moy}</i>	1028,47	m
Longueur du Thalweg principale	<i>L_p</i>	163	Km
Longueur du rectangle équivalent	<i>L</i>	111,5	Km
Largeur du rectangle équivalent	<i>l</i>	41,03	Km
Indice de compacité	<i>I_c</i>	1,26	/
Densité de drainage	<i>D_d</i>	0,91	Km/Km ²
Indice de pente	<i>I_p</i>	0,85	m/ Km
Indice de pente globale	<i>I_g</i>	5,29	m/ Km
Temps de concentration	<i>T_c</i>	27,25	Heures
Vitesse d'écoulement	<i>V_e</i>	1,66	m/s
Pente moyenne du bassin versant	<i>I_{moy}</i>	0,7	%
Dénivelée simple	<i>D</i>	590	m
Coefficient d'allongement	<i>K</i>	20,33	/

Tableau 16: Caractéristiques du bassin versant de l'Oued Mallegue (STAMBOUL.Med 2017).

III. Contexte hydrologique régional :

La région d'étude est drainée superficiellement par l'Oued Chabro qui constitue la continuité d'oued El kebir, ce dernier prend son origine dans la partie orientale du bassin d'effondrement Tébessa-Morsott.

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.

L'écoulement du système hydrographique se fait du Sud vers le Nord, caractère typique des oueds de toute la région.

Les études hydrologiques du secteur d'étude ont démarré ça fait plusieurs années par la création des stations de mesures, Morsott et ElAouinet.

IV. Etude des débits

Le régime des débits d'un cours d'eau et la précipitation durant une période déterminée sont les seuls paramètres du bilan hydrologique d'un bassin qui puisse être mesurés dans son ensemble avec une bonne précision, les autres éléments de ce bilan tels que, l'évapotranspiration (ETP, ETR),...etc, ne peuvent être qu'estimés à partir d'échantillons prélevés ou déduits des formules hydrologiques toujours approximatives.

Pour ce qui concerne la mesure des débits on dispose des chroniques de mesures au niveau des stations suivantes :

- **la station de Morsott** avec une superficie de bassin versant de 1305 km². Elle est située en amont de la région d'étude, où on dispose d'une série de mesure de : 1982-1983 jusqu'à 2004-2005.
- **la station d'El Aouinet** cette station est située en aval de la région d'étude avec une superficie de 3535 km², un périmètre de 270 km et une altitude de 654m. On dispose des données de plus de 200 jaugeages qui ont été réalisés entre 1984-1985 et 2005-2006.

Le tableau 16, montre les résultats des jaugeages d'oued Chabro au niveau des deux stations (débits mensuels et annuels).

Tableau 17: Moyennes annuelles et mensuelles interannuelles des débits en m³/s (1982/1983 – 2005/2006)

Mois / Oued	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne annuelle
Morsott	0.009	0.026	0.11	0.05	0.1	0.1	0.06	0.12	0.07	0.03	0.01	0.009	0.06
ElAouinet	0.056	0.31	0.09	2.02	0.29	0.3	0.27	0.28	0.24	0.1	4.5	0.07	0.71
Moyenne mensuelle (m ³ /s)	0.0325	0.17	0.1	1.035	0.195	0.2	0.165	0.2	0.155	0.065	2.225	0.08	/

L'examen des données du tableau 16, montre que la région d'étude possède un régime d'écoulement faible caractérisé par des pointes de crues de quelques m³/s (une moyenne de 4.5 m³/s pour le mois de juillet à la station d'El Aouinet) et par un débit d'étiage, soutenu par la contribution des écoulements souterrains, très faible enregistrés durant la période de sécheresse (exemple pour le mois de septembre qui ne dépasse pas 0.0325 m³/s).

A. Etude des variations annuelles des débits

Pour montrer les années déficitaires et excédentaires au niveau d'Oued Chabro, une étude a été établie pour les variations annuelles des débits de ce dernier, avec la représentation graphique de ces variations annuelles des débits.

Ainsi les variations des débits en fonction du temps de la station de Morsott montre en général des débits faibles où on a enregistré un maximum pour l'année (1991-1992) avec 0.12 m³/s et un minimum pendant l'année (2004-2005) avec un débit de 0.003 m³/s, tandis que le débit moyen pour toute la période d'observation est de l'ordre de 0.055 m³/s, ce qui représente une faible valeur de débit. En général il était enregistré 13 années excédentaires et le reste d'années est déficitaires, (figure 47)

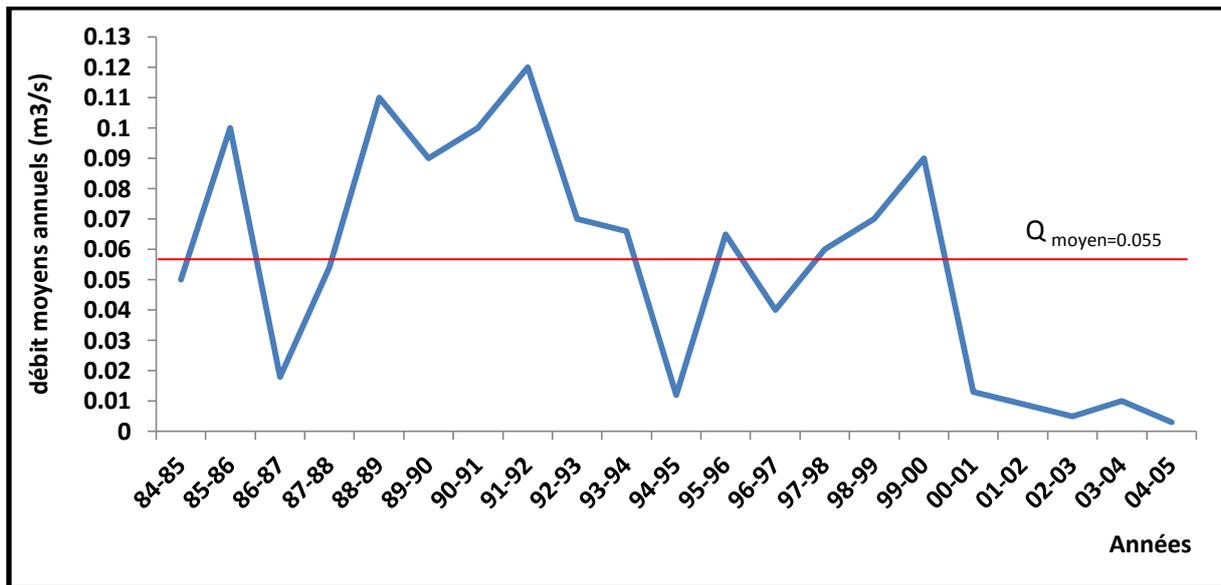


Figure 46: Evolution des débits annuelles à la station de Morsott (1984-2005) (ANRH Tebessa)

Pour la station d'El Aouinet l'étude des variations des débits moyens annuels montre une grande différence entre le débit maximum enregistré durant l'année (1985-1986) avec $8.21\text{m}^3/\text{s}$ et le débit minimum égal à $0.03\text{ m}^3/\text{s}$ (1999-2000) avec une moyenne de $0.74\text{ m}^3/\text{s}$. Durant la même période d'observation, nous avons enregistré uniquement deux années excédentaires le reste de la série est déficitaire, cela est due à la forte amplitude entre les valeurs des débits maximums et des débits minimums enregistrées au niveau de cette station de jaugeage, (figure 48).

En général les débits moyens annuels de la station d'El Aouinet sont beaucoup plus importants que ceux de Morsott, cette différence est due à un apport supplémentaire en eau par l'oued Meskiana.

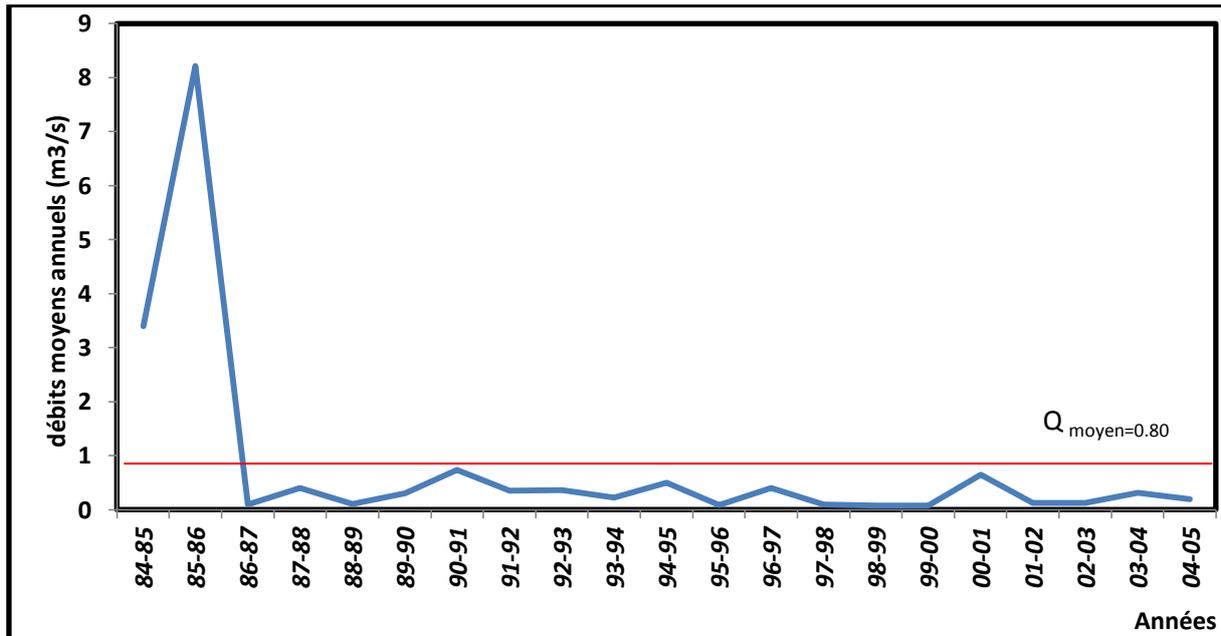


Figure 47: Evolution des débits annuels à la station d'El Aouinet (1984-2005)

B. Variation des débits moyens mensuels interannuels en relation avec les précipitations

Un examen des chroniques de débits en relation avec celles des précipitations révèle ce qui suit (voir figure 49 et 50) :

Pour la station de Morsott on remarque que ;

- Durant le mois d'avril, mois très pluvieux, l'annuaire hydrologique montre qu'aucune crue n'a été enregistrée alors que les précipitations ont totalisé plus de 26 mm de pluie.
- Durant le mois de juillet, où aucun événement pluvieux n'est intervenu, les débits sont très faibles et marquent une parfaite harmonie avec les précipitations.
- Pour le reste des mois, l'évolution des débits en fonction des précipitations reste très incohérente.

En général et durant toute l'année hydrologique, seul le mois de décembre semble présenter des chroniques de précipitations et de débits cohérentes.

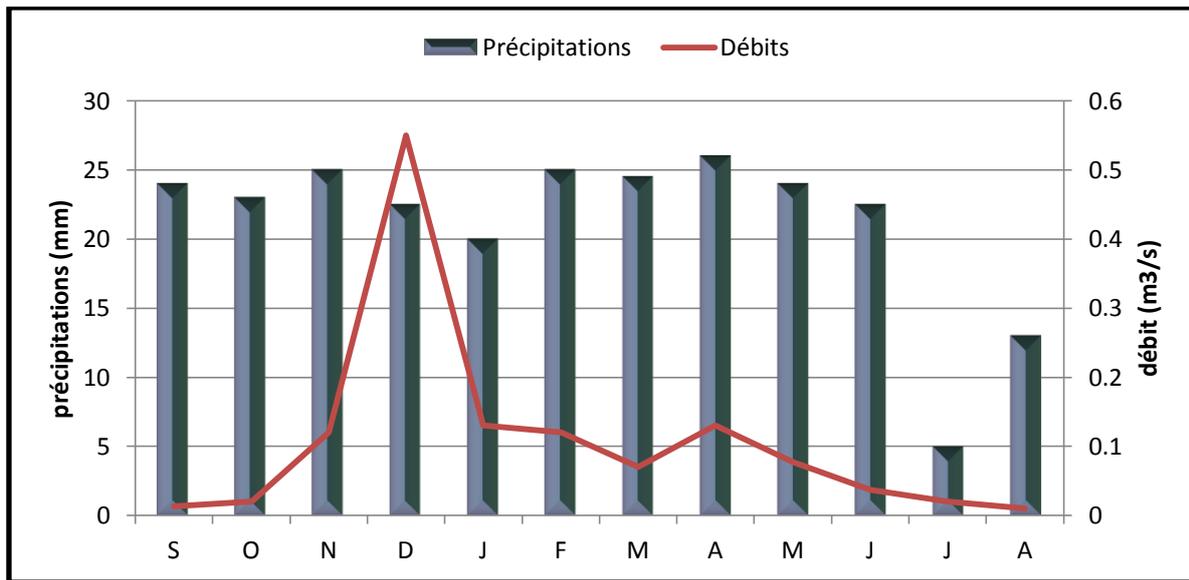


Figure 48: Evolution des débits mensuels interannuels et des précipitations (Station de Morsott 1984-2005)

Pour la station d'El Aouinet ;

- Durant le mois de juillet, on observe une montée précoce de la crue alors qu'aucun événement pluvieux n'est intervenu durant les mois précédents.
- Durant les autres mois et pour des précipitations doubles, on observe des débits moindres que ce que l'on attendrait.
- Seul le mois de décembre semble présenter des chroniques de précipitations et de débits cohérentes.

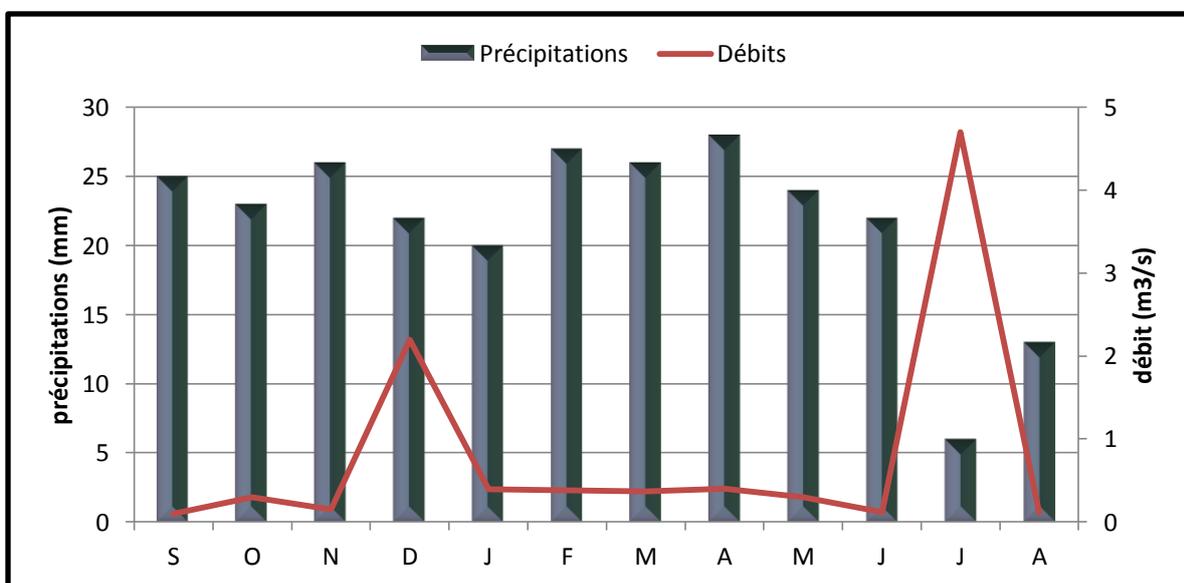


Figure 49: Evolution des débits mensuels interannuels et des précipitations (Station d'El Aouinet 1984-2005)

V. Conclusion :

-Le climat de la région d'étude a été déterminé par le calcul d'indice de Martonne, il s'agit d'un climat semi aride.

La caractéristique dominante du climat est la tendance à l'aridité qui se concrétise par l'irrégularité du régime pluviométrique et par les fortes températures estivales qui entraînent une intense évaporation.

La région étudiée est caractérisée par un déficit d'écoulement très marqué entraînant ainsi par des pertes en eau considérables soustraites aux apports par les précipitations.

Dans les régions à climat aride à semi-aride, Le calcul au pas de temps mensuel n'est pas réaliste et l'infiltration ne peut être approchée que par le pas journalier ce qu'on ne pouvait pas faire à cause de manque de données

-L'étude hydrologique a été abordée par la quantification des débits au niveau de chaque station.

L'apport de oued Chabro est très faible où on note un accroissement de la lame d'eau d'amont en aval, tous les affluents ont un écoulement temporaire très limité, à la suite de fortes précipitations orageuses.

Les fortes valeurs de débit on été enregistrés au niveau de la station d'El Aouinet, cela est du à la contribution des eaux de oued Meskiana qui constitue un apport supplémentaire où sa jonction avec oued Chabro donne naissance très en aval à l'oued Mellegue.

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.

CHAPITRE VI :

HYDROGEOLOGIE

CHAPITRE VI

HYDROGEOLOGIE

I. Introduction

La caractérisation hydrogéologique du système aquifère phréatique constitue l'étape préliminaire dans toute étude de vulnérabilité du fait qu'elle permet de mieux comprendre le modèle de fonctionnement hydrodynamique des eaux du système phréatique de la zone d'étude, ici nous intéressons uniquement aux formations alluvionnaires qui constituent l'aquifère le plus sollicité dans le bassin.

II. Le contexte hydrogéologique de la région d'étude

Basant sur les résultats obtenus dans la partie de la géométrie de l'aquifère et une analyse sommaire de la colonne stratigraphique de la région d'étude, laissent supposer la présence de trois (03) formations susceptibles d'être des aquifères potentiels. Ces trois formations correspondent aux calcaires et marno-calcaires du Turonien, aux calcaires, grès, dolomies du Trias et aux alluvions, limons, croûte calcaire du Plio-quaternaire. Toutes ces formations sont considérées comme des nappes d'importance hydrogéologique différentes, on distingue donc :

- La nappe aquifère du Plio-quaternaire ;
- La nappe aquifère du Turonien ;
- La nappe aquifère du Trias.

A. Les caractéristiques hydrogéologiques par formation.

On les décrit en remontant la série depuis le Trias (Tableau.17).

Tableau 18 : Classification hydrogéologique simplifiée de quelques formations géologiques de la région d'étude (Fehdi.ch 2008)

<i>Formations Géologiques</i>	<i>Classification hydrogéologique</i>	<i>Lithologie (type de roches)</i>	<i>Epaisseurs (m)</i>	<i>Débits (l/s) Rabattement(m)</i>
Trias (t)	Aquifère	gypses,calcaires, dolomies, brèches, et cargneules.	ind	?
Turonien inférieur (C_{2a}, C_{2d})	Aquifère	calcaires en gros bancs, calcaires en plaquettes, marnes argileuses.	100-150	8.5 l/s - 30l/s 7 m - 20 m
Turonien supérieur (C_{2e})	Aquifère/Aquiclude	marnes argileuses, marno-calcaires	150-250	4 l/s – 7 l/s 26 m -60m
Plioquaternaire (Pq)	Aquifère	alluvions,limons,croûtes calcaires, calcaires lacustres, poudingues, grés et graviers.	> à 100	?

- **La nappe du Trias**

Cette formation géologique d'extension limitée, se trouve en bordure du bassin d'effondrement, il s'agit d'un complexe de gypses, de calcaires, de dolomies, des brèches, et de cargneules.

Malgré des perspectives hydrogéologiques probablement intéressantes, les eaux de cette nappe présentent de mauvaises qualités hydrochimiques (eaux très chargées, salées).

- **La nappe du Turonien inférieur (C^{2a}, C^{2d})**

Cet aquifère est constitué par des calcaires en gros bancs et des calcaires en plaquettes, séparées par des niveaux de marnes argileuses.

L'importance hydrogéologique de cet aquifère, nous est appréciée par les forages (ACP1 et ACP2), les forages de Koudiat Charia (S3) et Sidi Chaabane (SC1). Ces forages donnent respectivement 23 l/s, 15 l/s, 8.5 l/s et 30 l/s, pour de faibles rabattements (7m pour ACP1 et 20 m pour SC1). Les possibilités aquifères de cette nappe sont étroitement liées au degré de fissuration des calcaires. ([Fehdi.ch 2008](#)).

- **La nappe aquifère du Turonien supérieur (C^{2e})**

Le Turonien supérieur est une formation géologique constituée par une alternance de marnes argileuses et de marno-calcaires. Les différents auteurs lui attribuent une puissance allant de 150 à 250 mètres.

L'importance hydrogéologique de cette nappe est donnée par les forages EA1 et KA1, ces forages donnent respectivement 7 l/s et 4 l/s pour des rabattements importants de 60 et 26 mètres ; au vue des débits extraits, cette nappe à elle seule ne constitue pas un bon réservoir hydrogéologique. ([Fehdi.ch 2008](#)).

- **La nappe aquifère du Plio-quaternaire**

Cette nappe de grande extension, occupe presque la totalité du bassin d'effondrement de Morsott, elle est limitée à l'Est et à l'Ouest par deux (02) grandes failles d'orientation Nord-Ouest-Sud-Est, elle est constituée par des dépôts très variés correspondant aux alluvions, aux limons, aux croûtes calcaires, aux calcaires lacustres, aux poudingues, aux grés et aux graviers.

Cet aquifère joue un rôle très important dans l'alimentation en eau potable de habitants de toute la région d'étude.

L'alimentation de cette nappe est assurée principalement par les précipitations, l'infiltration des eaux d'irrigation et par l'alimentation latérale à partir des affleurements des terrains crétacés en bordure Est et Sud-Est.

III. Piézométrie

A. Introduction

Dans les nappes libres et phréatiques, la couche aquifère est limitée à son toit par la surface piézométrique, laquelle constitue donc une donnée dimensionnelle importante pour le calcul des réserves et de leurs variations ou des sources exploitables. La surface piézométrique correspond au lieu géométrique des points qui signalent le niveau piézométrique, de chacune des portions d'un aquifère, référé à une profondeur déterminée.

Les surfaces piézométriques sont illustrées par l'intermédiaire des lignes d'égale hauteur piézométrique, de la même manière que les surfaces topographiques sont représentées via les courbes de niveau. Dans le cas des eaux souterraines, les courbes sont appelées *isopièzes* ou *hydroisohypses*.

B. Inventaire des points d'eau

Une campagne piézométrique a été réalisée en 2016, selon la disponibilité et la répartition des différents points d'eau (figure 51), permettant d'établir une carte piézométrique. Quatre campagnes piézométriques ont été assurées entre 2003-2005 (Fehdi.ch 2008) dans la même région d'étude.

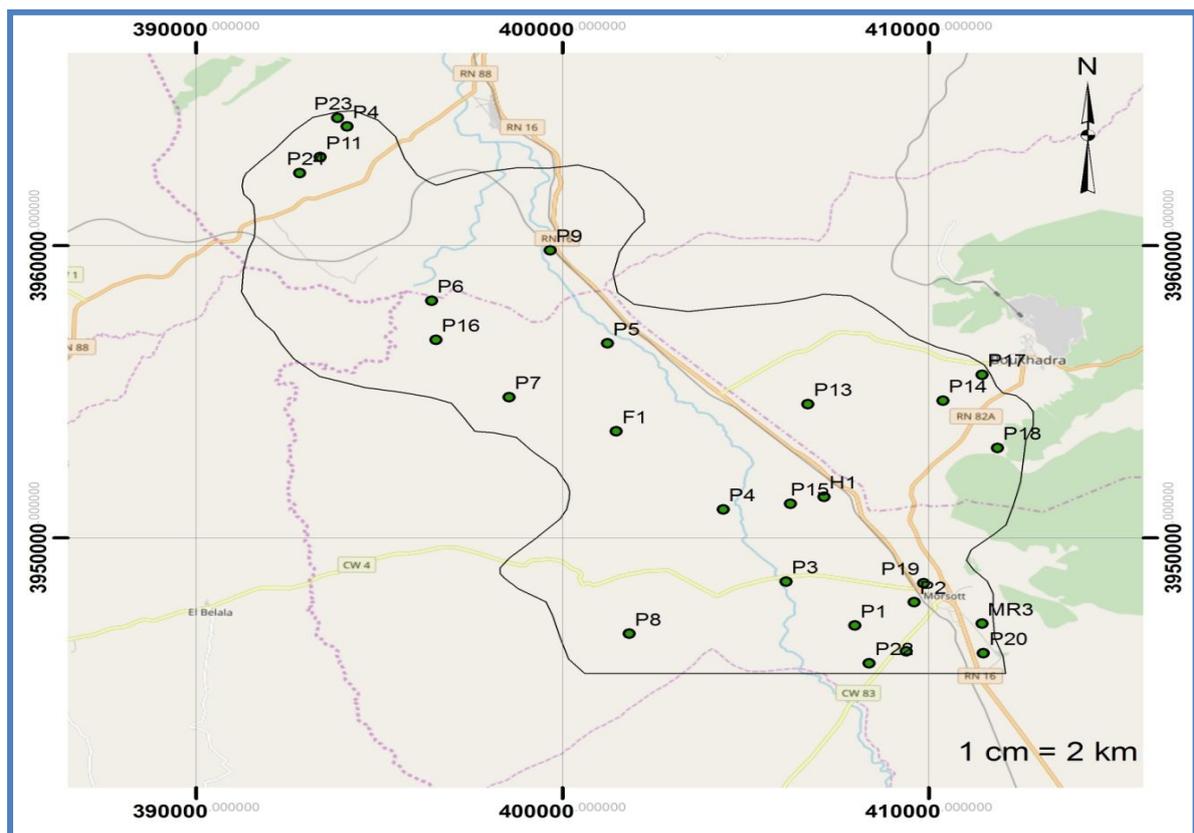


Figure 50: Carte d'inventaire des points d'eau

C. Interprétation de la carte piézométrique (Novembre 2016)

Cette carte dégage la convergence des lignes de courant en raison de la convexité des courbes isopièzes ouvertes vers l'amont, régulières et de plus en plus espacées (diminution du gradient hydraulique de l'amont vers l'aval et de Sud vers le Nord). La carte fait ressortir 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.

On observe que 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 (Figure 52)

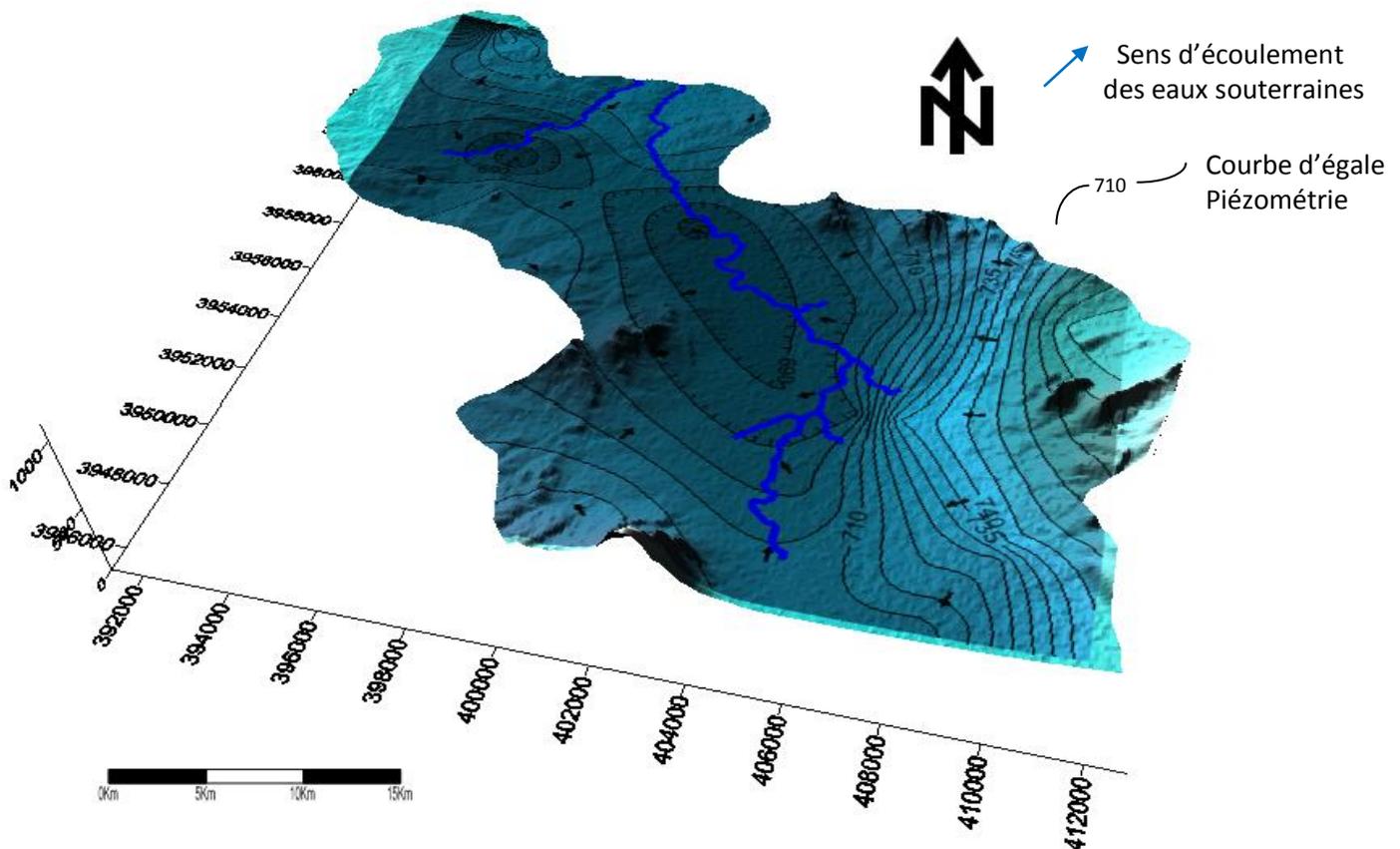


Figure 51: Carte piézométrique. Novembre 2016

D. L'évolution spatiale de la piézométrie

Afin de détecter les changements qui ont affecté les fluctuations de l'aquifère de Morsott-Boukhadra et ElAouinet, une étude comparative de l'évolution de la piézométrie de l'aquifère s'avère nécessaire.

Ainsi, la comparaison entre la carte piézométrique de l'année (2016) avec les deux cartes piézométriques de Septembre 2003 et de Mars 2005 (Figures 53, 54), qui figurent dans la thèse de l'obtention du diplôme de Doctorat es Sciences (Fehdi.ch 2008), montre aussi un écoulement de Sud vers le Nord, on note également que l'évolution temporelle de la piézométrie montre une baisse générale des niveaux atteint jusqu'à 3 mètres par an, surtout pour ce qui concerne la partie Sud de la région d'étude.

Les anciennes cartes iso-piézométriques montrent l'importance des reliefs comme pole d'infiltration des eaux. Le sens d'écoulement général est de deux sens opposés convergeant au centre vers l'oued Chabro.

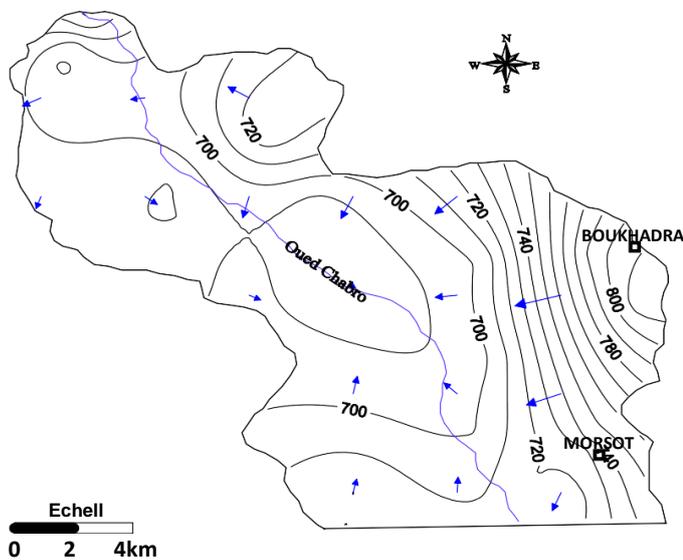


Figure 53: carte piézométrique, Septembre 2003 (Fehdi 2008)

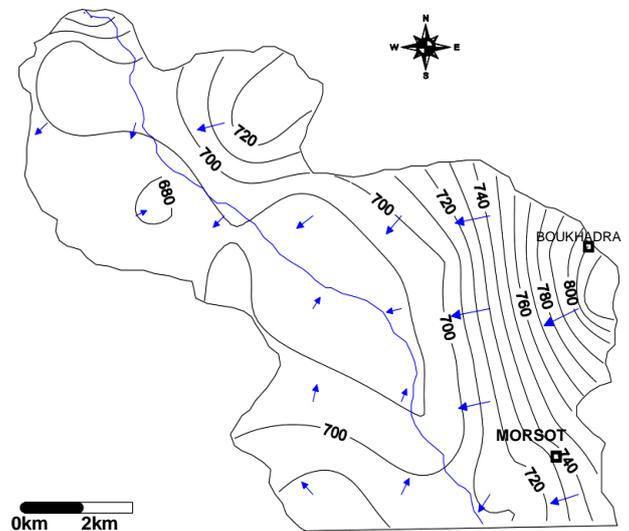


Figure 52: carte piézométrique, Mars 2005 (Fehdi 2008)

IV. Détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Plio-quaternaire.

A. Introduction

L'étude de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un aquifère s'effectue par analyse des résultats ponctuels des pompages d'essais et par interpolation spatiale des paramètres hydrodynamiques de chacun d'eux.

Dans le but de déterminer les valeurs de la transmissivité et de la perméabilité et par manque de données d'essais de débit sur les puits, nous avons utilisé les résultats des essais définitifs de pompage de forages réalisés par les services de la D.R.E de la wilaya de Tébessa. Leur interprétation est basée sur l'expression de l'approximation de C.E Jacob (1950).

B. Répartition des paramètres hydrodynamiques

Le tableau 19 donne les valeurs de la transmissivité et la perméabilité, obtenues après l'interprétation des essais par pompage dans quelques forages exploitant la nappe Plioquaternaire.

Tableau 19 : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques points d'eau (DRE Tébessa)

Forages	Coordonnées		Transmissivité T en $(m^2/s).10^{-3}$	Perméabilité. K en $(m/s) .10^{-5}$
	X	Y		
EA1	969.00	289.5	2.8	2.94
F3	962.1	290.1	0.66	0.62
F2	973.5	281.00	0.91	0.95
G2	964.824	289.5	0.52	0.4
SC1	970.00	282.00	0.8	0.47
M1	980.00	276.1	1.5	0.78

1. Carte des transmissivités :

Les essais de pompage montrent que les valeurs de transmissivité de l'aquifère de Morsott-Elaouinet varient entre $0,66 \cdot 10^{-3}$ et $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Figure 55). La transmissivité maximale est contemplée à proximité de R'mila au Nord-Est et à l'Est (Dj Boukhadra), les transmissivités sont de l'ordre de $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La transmissivité baisse en s'éloignant de ces secteurs ; elle varie entre $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dans la partie Nord-Ouest.

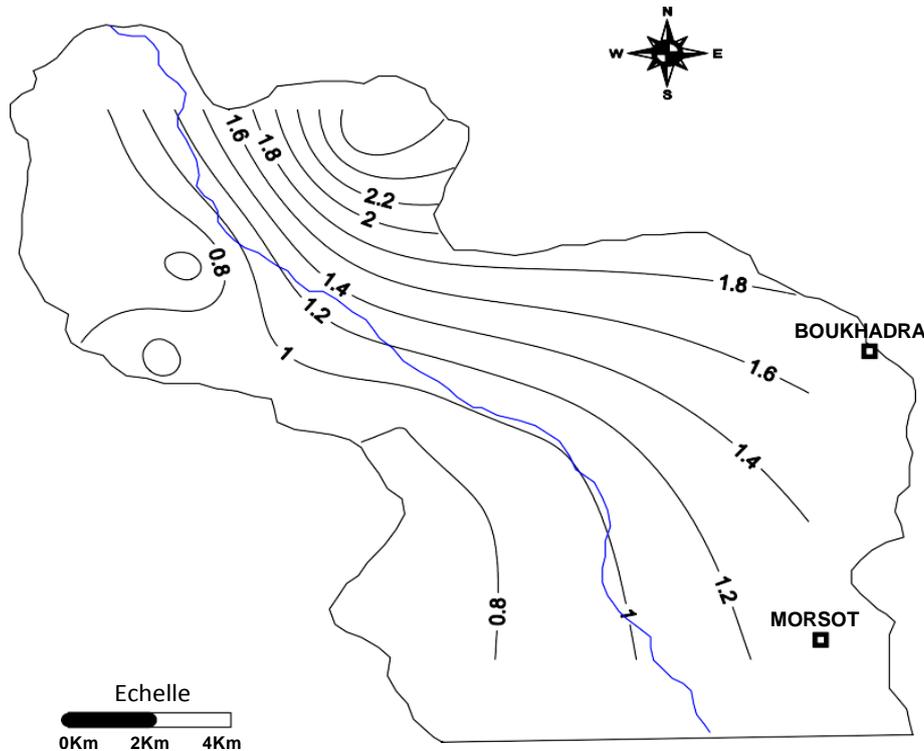


Figure 54: carte des transmissivités en $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

2. Carte des perméabilités

Les coefficients de perméabilités ont été calculés en divisant les valeurs de transmissivité par l'épaisseur saturée totale de l'aquifère. Les valeurs obtenues oscillent dans l'intervalle $0,4 \cdot 10^{-5}$ à $2,94 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. L'interprétation des valeurs obtenues a été gênée par la rareté des points. L'examen de la carte (figure.56) fait ressortir deux zones importantes de point de vue perméabilité :

- La zone nord-est (région de R'mila) ; où les valeurs varient entre $2. \cdot 10^{-5}$ m/s et $2.9 \cdot 10^{-5}$ m/s.
- La zone est (Djebel Boukhadra) ; où la perméabilité a atteint une valeur de $1.7 \cdot 10^{-5}$ m/s.
- A l'ouest et au nord-ouest de la région d'étude, les valeurs de la perméabilité deviennent faibles ne dépassant pas la valeur de $0.5. \cdot 10^{-5}$ m/s.

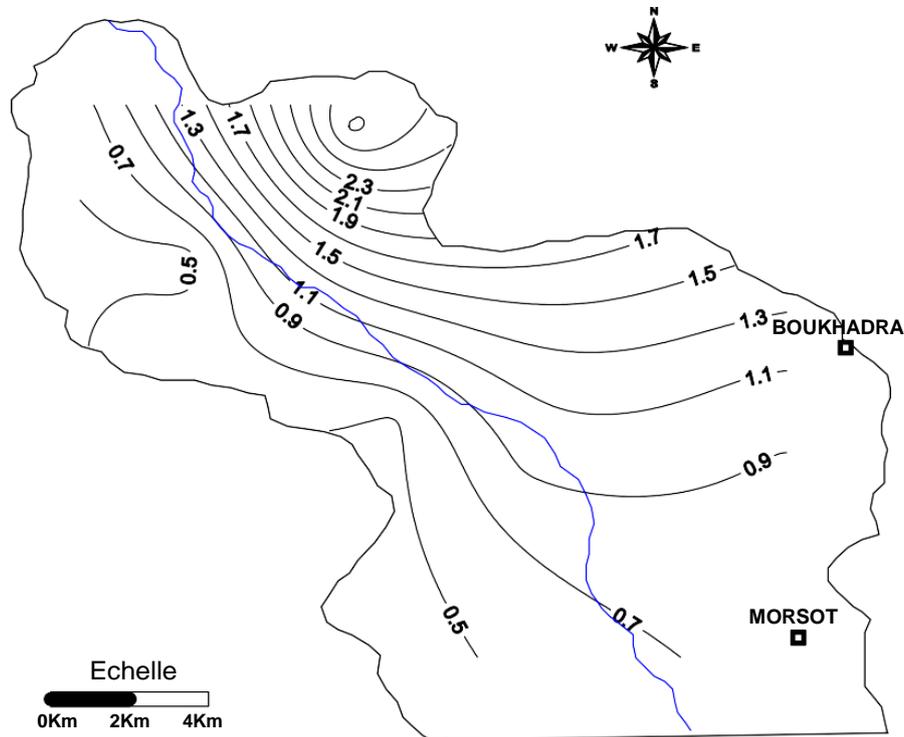


Figure 55: carte des perméabilités en 10^{-5} m/s

V. Conclusion

L'examen des informations hydrogéologiques indiquent que la zone d'étude abrite essentiellement quatre aquifères : un premier caractérisé par des gypses, calcaires, dolomies, brèches, et cargneules du trias, un second caractérisé par calcaires en gros bancs, calcaires en plaquettes et des marnes argileuses du turonien inférieur, un troisième qui contient des marnes argileuses, marno-calcaires d'âge turonien supérieur et un dernier qui est le plus important pour la région, l'aquifère Plio-Quaternaire qui est caractérisé par alluvions, limons, croûtes calcaires, calcaires lacustres, poudingues, grés et graviers.

La piézométrie montre l'importance des reliefs comme pole d'infiltration des eaux. Le sens d'écoulement général est de deux sens opposés convergeant au centre vers l'oued Chabro.

L'analyse des caractéristiques hydrodynamiques de la région d'étude à travers l'examen des cartes de transmissivités et celles des perméabilités, mettent en évidence l'existence de deux zones de bonnes caractéristiques hydrogéologiques, celle de Boukhadra et celle de R'mila situées sur la bordure est et nord-est de la région d'étude

Notons enfin que le nombre limité d'ouvrages de captage ne permet pas de tirer de bonnes conclusions sur les potentialités hydrodynamiques réelles de cet aquifère.

CHAPITRE VII :

HYDROCHIMIE

CHAPITRE VII

HYDROCHIMIE

I. Introduction

L'étude hydrochimique a pour but la connaissance des caractéristiques chimiques ou physico-chimiques des eaux souterraines, des processus de leur acquisition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous sol. Les eaux souterraines représentent une phase aqueuse dont la composition peut être très complexe étant donné son grand pouvoir dissolvant. La plupart des eaux qui circulent en lessivant les terrains ne conservent en fait qu'une minéralisation réduite et qui varie en fonction du contexte géologique et du climat. La composition chimique d'une eau souterraine est fonction d'un certain nombre de phénomènes telles que la concentration, l'hydratation, l'oxydation, etc. Dans ce qui suit, nous présenterons les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du secteur afin de confirmer leurs origines, définir leurs faciès chimiques et de comparer et suivre leurs évolutions dans l'espace. L'étude des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la zone étudiée s'est basée sur l'échantillonnage et l'analyse des eaux de vingt cinq (25) points d'eau.

L'étude hydrochimique que nous entreprenons, a un double objectif :

- A l'échelle régionale, caractériser les eaux sur la base de l'hydrofaciès : cela apporte des informations précieuses sur l'identification de la roche encaissante et sur la circulation des eaux souterraines ainsi que sur les conditions de recharge.
- A l'échelle locale, caractériser les eaux sur la base de leur potabilité et des problèmes pratiques que certains paramètres hydrochimiques donnent sur chaque point d'eau.

II. Les données disponibles

La caractérisation des eaux souterraines concerne essentiellement l'analyse des paramètres de base (pH, température et conductivité), des éléments « majeurs » et d'éventuels éléments traces.

Durant notre investigation hydrochimique, deux (02) campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines des différents puits qui captent l'aquifère Plio-quadernaire ont été entreprises. Les prélèvements ont été effectués selon une répartition et une fréquence différente d'un site à un autre ; qui dépend de la disponibilité des ouvrages du type des formations géologiques et de la profondeur des eaux.

III. Matériels et moyens d'analyse

Pour caractériser l'hydrogéochimie du système aquifère Morsott-El Aouinet, le long des lignes d'écoulement depuis la zone de recharge jusqu'à l'émergence, 25 puits ont été échantillonnés (durant l'année 2016).

Nous avons procédé à l'analyse du calcium (Ca^{2+}), du magnésium (Mg^{2+}), du sodium (Na^+), du potassium (K^+), des sulfates (SO_4^{2-}), des chlorures (Cl^-), des bicarbonates (HCO_3^-) et des nitrates NO_3^- .

Nous avons également mesuré la température de l'eau (T), le pH et la conductivité électrique (CE). Les paramètres physiques (la température et le pH), ont été mesurés in situ à l'aide d'un appareil portatif. Les précisions respectives avec lesquelles ont été pris ces paramètres sont ± 0.01 . Par contre les analyses ont été faites dans CERAD et aussi au laboratoire de l'ADE Tébessa.

IV. Caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère Plio-quaternaire

Une analyse des éléments majeurs a été effectuée sur les eaux prélevées de la nappe Plio-quaternaire Morsott-El Aouinet, l'ensemble des résultats obtenus, montrent une forte salinité des eaux, la conductivité moyenne est supérieur à $5000\mu\text{s}/\text{cm}$. En général l'évolution des éléments chimiques majeurs (anions et cations), la conductivité et le pH, montrent une augmentation sensible des teneurs durant toute la période d'investigation et pour tous les points d'eau analysés.

A. La conductivité électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

La conductivité électrique est l'expression de la minéralisation globale d'une eau et elle augmente avec la température ainsi qu'avec la concentration des sels dissous. D'autre part, le résidu sec est une donnée sur la minéralisation totale d'une eau ; il est étroitement lié à la résistivité électrique (qui est l'inverse de la conductivité), généralement mesurée sur le terrain à l'aide d'appareils portatifs qui nécessitent un étalonnage fréquent et précis.

Lorsque tel n'est pas le cas, la dérive de ces instruments peut devenir importante et fausser ainsi les mesures. Néanmoins, il s'agit là d'un paramètre simple à mesurer, synthétique, et qui fournit généralement de bonnes informations sur la minéralisation de l'eau.

Au niveau de l'entité d'étude, les valeurs de la conductivité électrique et de la minéralisation montrent une variabilité très accusée dans l'espace allant de $1154\mu\text{s}/\text{cm}$ à $23800\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une moyenne de $5585.70\mu\text{s}/\text{cm}$, ces valeurs dépassent de loin la norme recommandée surtout pour les eaux d'alimentation en eau potable.

Notons enfin que les valeurs élevées de la minéralisation sont dues aux eaux traversant les formations triasiques et à l'effet de la dissolution rapide des évaporites dans l'eau.

B. Potentiel d'Hydrogène (PH) :

Le pH représente l'acidité ou l'alcalinité de l'eau ; il dépend de la teneur en H_2CO_3 qui est en relation avec la dissolution de CO_2 . Il conditionne directement le degré d'ionisation des différentes solutions contenues dans les eaux naturelles. Dans ces dernières, le pH dépend principalement de la nature géologique des formations aquifères. Toutefois, les rejets résultants des activités humaines peuvent influencer le pH des eaux naturelles. La plus part des points de prélèvement présentent des pH, plus ou moins, neutres entre 7.2 et 7.32

C. Les cations majeurs

Les différents cations majeurs (Calcium, Magnésium, Sodium et Potassium) ont été observés temporairement pendant la période d'investigation sur toute la région d'étude.

Les concentrations de Calcium et du Magnésium varient respectivement, entre 114 mg/l et 418.2 mg/l et entre 50 mg/l et 294.55 mg/l, généralement, dans la région d'étude, ces deux cations proviennent de la dissolution des minéraux carbonatés et sulfatés qui sont quasi présents sur les bordures et au sein de l'aquifère Plio-quadernaire, par l'infiltration des eaux de précipitation à travers la zone non saturée, caractérisée par la présence du CO_2 .

Le deuxième groupe de cations, formé essentiellement de Sodium et de Potassium, présente des teneurs dominantes, surtout pour le Sodium. Les concentrations de ces deux éléments varient entre 58 mg/l et 3985 mg/l pour le Sodium et 07 mg/l et 140 mg/l pour le Potassium, ces valeurs peuvent être attribuées au faciès évaporitique dominant dans la région d'étude et parfois aussi à la surexploitation de l'aquifère Plio-quadernaire surtout dans les périmètres irrigués.

D. Les anions majeurs

Pendant la période d'observation les anions majeurs (Chlorures, Sulfates, Bicarbonates et Nitrates), montrent des fortes concentrations pour les éléments suivants:

Les chlorures qui varient entre 113 mg/l et 8139 mg/l, cet élément chimique marque une augmentation nette pendant la période d'investigation, il constitue l'anion dominant pour presque tous les points d'eau analysés et durant toutes les périodes. Les zones à fortes teneurs à cet élément sont en rapport direct avec la présence des terrains triasiques salifères.

Pour les sulfates, les concentrations en sulfates varient entre un minimum de 49 mg/l et un maximum de 575 mg/l. L'origine des sulfates serait le lessivage des évaporites (gypse et anhydrites) par les eaux météoriques, avant leur infiltration vers l'aquifère.

Les bicarbonates avec des concentrations qui varient entre 203 mg/l et 460 mg/l, l'évolution de cet Ion chimique traduit l'échange avec les terrains carbonatés formés de la calcite et la dolomite.

Pour les nitrates, Les concentrations de cet élément chimique restent moyennes pendant la période d'étude, elles varient entre un minimum de 02 mg/l et un maximum de 22 mg/l, enregistrée durant la campagne.

E. Cartographie hydrochimique :

1. La conductivité électrique

La conductivité électrique est liée à la présence des espèces ioniques en solution. Elle est proportionnelle au degré de minéralisation et varie en fonction de la température. Le lessivage des sols entraîne naturellement la dissolution d'un certain nombre de sel (bicarbonates, chlorures, sulfates, sodium...etc.) et provoque un accroissement de la conductivité.

Les valeurs mesurées in situ, ont été corrigées à une température standard de 20°C. Les résultats obtenus montrent que presque tous les points d'eau dépassent la norme recommandée pour les eaux d'alimentation en eau potable. La conductivité électrique est généralement élevée oscillant entre 1154 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 23800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 5214.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les zones de forte minéralisation sont localisées presque dans toutes les parties de la région d'étude surtout au niveau des bordures Est et Nord- Est, tandis que les faibles valeurs de minéralisation sont localisées dans la partie amont (au sud de la région d'étude du côté de Morsott).

Dans les parties Est (Djebel Boukhadra), centre et Nord (Djebel Mesloul) l'influence des terrains triasiques salifères riches en Halites est fortement sentie. On remarque une augmentation de la minéralisation globale des eaux de cet aquifère atteignant une valeur de conductivité égale à 23800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au niveau du point P5.

En s'éloignant vers l'amont (région de Morsott), l'influence du Trias s'amortit, la minéralisation globale diminue, la conductivité entre 1155 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cette diminution de la salinité traduit l'influence des formations carbonatées des bordures et celles des terrains marneux du Cénomaniens et du Turonien, lessivés par les pluies alimentant l'aquifère Plio-Quaternaire (Figure 57).

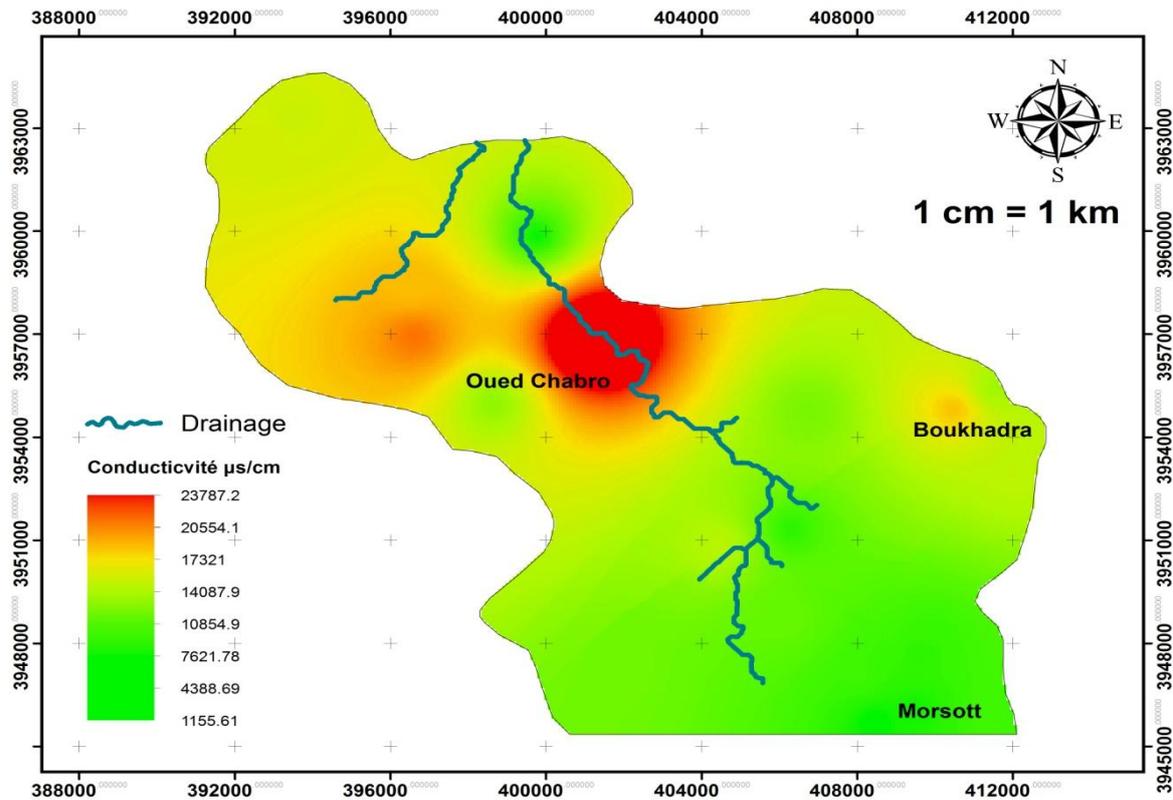


Figure 56: Variations spatiales de conductivité

2. La température et le pH

- a) 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) Le pH représente l'acidité ou l'alcalinité de l'eau ; il dépend de la teneur en H_2CO_3 qui est en relation avec la dissolution de CO_2 . Il conditionne directement le degré d'ionisation des différentes solutions contenues dans les eaux naturelles. Dans ces dernières, le pH dépend principalement de la nature géologique des formations aquifères. Toutefois, les rejets résultants des activités humaines peuvent influencer le pH des eaux naturelles. La plus part des points de prélèvement présentent des valeurs de pH, plus ou moins, entre 6.75 et 7.8 avec une moyenne de 7.32, cette hétérogénéité 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.

3. Ion Calcium

Le calcium est un élément marqué par une solubilité moyenne à élevée et il est peut précipiter facilement sous forme de CaCO_3 . Du point de vue chimique, il s'associe fréquemment avec les ions HCO_3 et CO_3^{-2} au niveau de divers systèmes hydriques naturels et il peut précipiter ou être dissous aisément lorsque le pH ou la pression partielle de CO_2 changent. Au niveau des eaux naturelles, les teneurs typiques en calcium varient entre 10 et 250 ppm. Toutefois, le principal inconvénient des fortes concentrations en calcium consiste l'élévation de la dureté de l'eau et la production des incrustations. Le calcium tire son origine principalement de la roche mère en procédant surtout dans la mise en solution par dissolution ou attaque des carbonates. (Custodio et al., 2001).

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 le minéraux argileux sous forme de Ca-montmorillonite (Hem, 1985).

Dans la région d'étude, Les concentrations de calcium varient respectivement entre un minimum de 114 mg/l et un maximum de 418.2 mg/l et une valeur moyenne de 221.76mg/l. L'examen de la carte de distribution de calcium (figure. 58), montre que les teneurs les plus élevées ont été enregistrés dans la partie centrale, la partie est et au nord de la région d'étude, tandis que les faibles teneurs ont été observés au sud de la zone d'étude, notamment près de la ville de Morsott, la plus grande concentration du Ca^{2+} a été enregistré au niveau du P5. Cette valeur est probablement due à la présence des dépôts du sulfate- Ca^{+2} sous forme d'anhydrite et de gypse, elle peut être attribuée aussi à l'influence des roches carbonatés (calcite et dolomite), qui caractérisent le substratum formées essentiellement de marno-calcaires d'âge Turonien.

La dolomitisation de la calcite et de l'aragonite représentée par la réaction suivante, est un processus qui peut constituer une source supplémentaire de Ca^{2+} dans la région d'étude (Freeze et Cherry 1979).



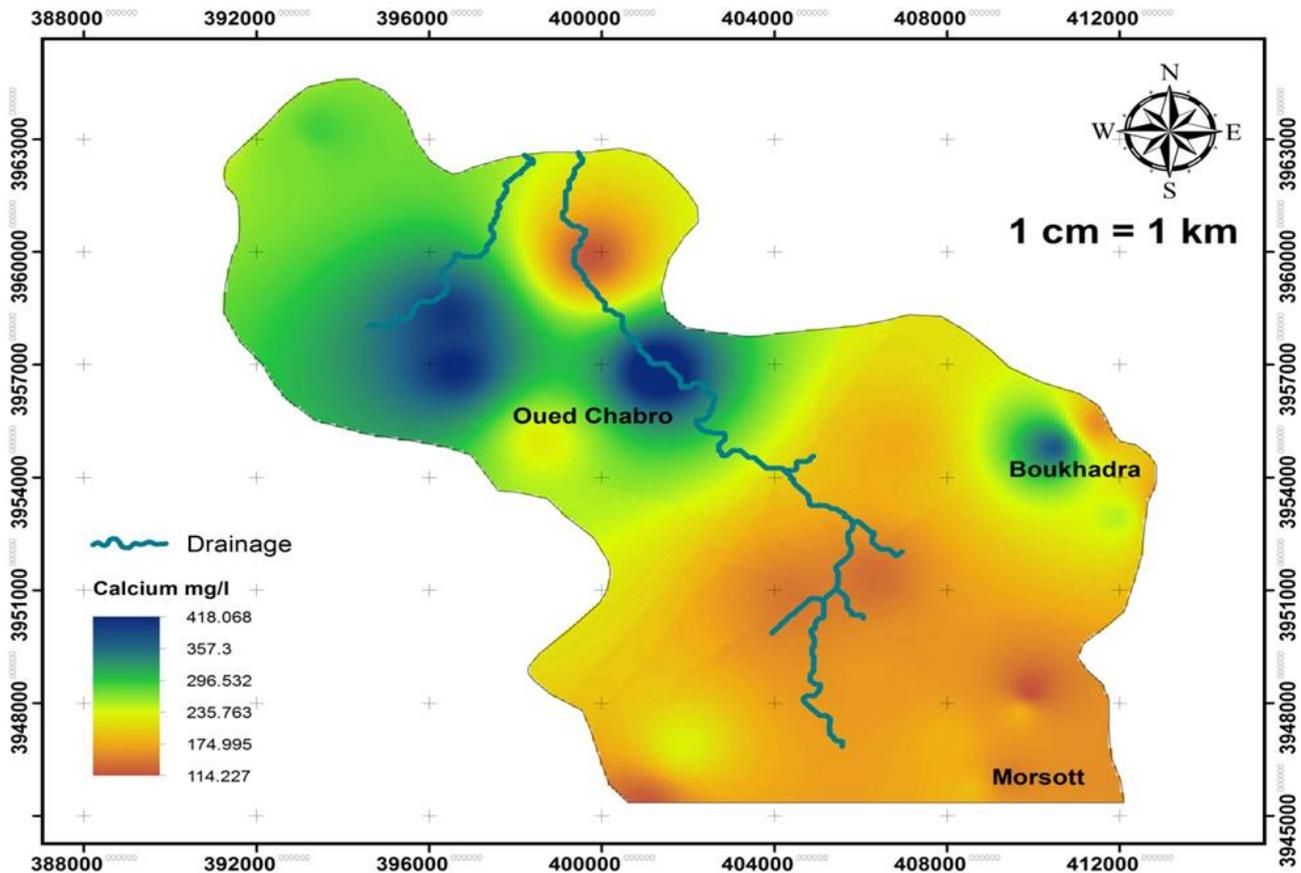
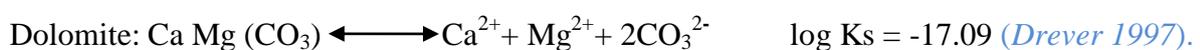


Figure 57: Carte de calcium (mg/l)

4. Ion Magnésium

Cet ion présente des propriétés similaires à celles du calcium tout en étant plus soluble. Les teneurs en magnésium oscillent entre 1 et 100 ppm au niveau des eaux naturelles quoiqu'elles puissent atteindre plusieurs milliers de ppm dans les eaux salines (l'eau de mer contient 1200 ppm de magnésium). Il se caractérise par des propriétés laxatives, attribue un goût amer à l'eau de boisson et il peut donner lieu à des incrustations en présence de PH élevé. Le magnésium procède surtout de l'attaque des dolomies ou des calcaires dolomitiques, des évaporites magnésiennes qui peuvent se trouver mêlées au gypse et à l'anhydrite. Il provient aussi des silicates magnésiques et ferromagnésiques (Custodio et al., 2001).



Dans notre zone d'étude les concentrations de Mg^{2+} varient entre 60 mg/l et 294 mg/l, avec une moyenne égale à 144.9 mg/l.

Les concentrations observées au niveau de la zone étudiée sont représentées dans la (figure59), l'évolution des teneurs est identique à celle du calcium, les teneurs les plus élevées sont observées au niveau des points d'eau P5,P6,P16, P14 et P11 ,au centre et au nord 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.

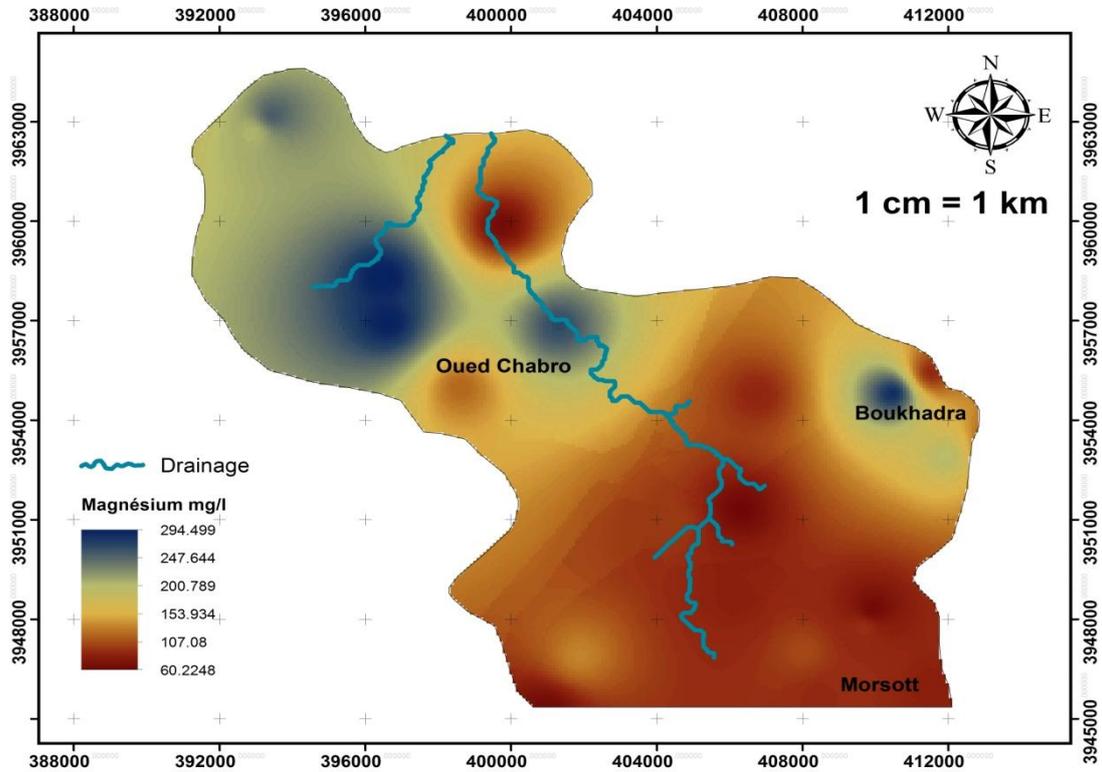


Figure 58: Carte de magnésium (mg/l)

5. Ion Sodium

Le sodium est un élément caractérisé par sa solubilité très élevée et il s'associe souvent avec l'ion chlore. Les eaux douces présentent des concentrations qui varient entre 1 et 150 ppm, quoiqu'on puisse retrouver des concentrations beaucoup plus élevées. La concentration de l'eau de mer oscille aux alentours de 10000ppm. Les fortes concentrations en sodium sont préjudiciables pour les plantes puisqu'elles réduisent la perméabilité du sol. Le sodium pourra être nocif s'il est accompagné par des faibles concentrations de calcium et de magnésium (Custodio et al., 2001).

L'origine de l'ion sodium dans les eaux naturelles est liée à la mise en solution des sels évaporitiques tels que l'halite (NaCl), de la décomposition des feldspaths plagioclases, du lavage des sédiments marins et du mélange avec les eaux d'imbibition. Dans certaines conditions, il peut être lié à la pollution urbaine et industrielle ou à l'invasion marine et il provient, parfois, de divers engrais minéraux dont il constitue un composant secondaire naturellement présent.

Au niveau de la région d'étude les teneurs de Na^+ sont très variables, les concentrations varient entre un minimum de 58.7 mg/l et un maximum de 3986 mg/l, avec une moyenne égale à 592.16 mg/l.

La variation spatiale de cet élément est représentée dans la figure 60, l'examen de cette carte montre que les plus grandes concentrations se localisent dans le secteur Est et Nord-Est de la région d'étude surtout au niveau des points d'eau P11, P14, P17 et P5, ce dernier qui marque la plus forte concentration 3988 mg/l. Ces fortes teneurs sont attribuées à l'influence du Trias évaporitique qui constitue les bordures Est et NE de la région d'étude (Trias de Boukhadra, Masloulou...).

Au sud et à l'ouest de la zone d'étude les teneurs de Na^+ diminuent pour atteindre un minimum de 58.7 mg/l au niveau du point d'eau P20.

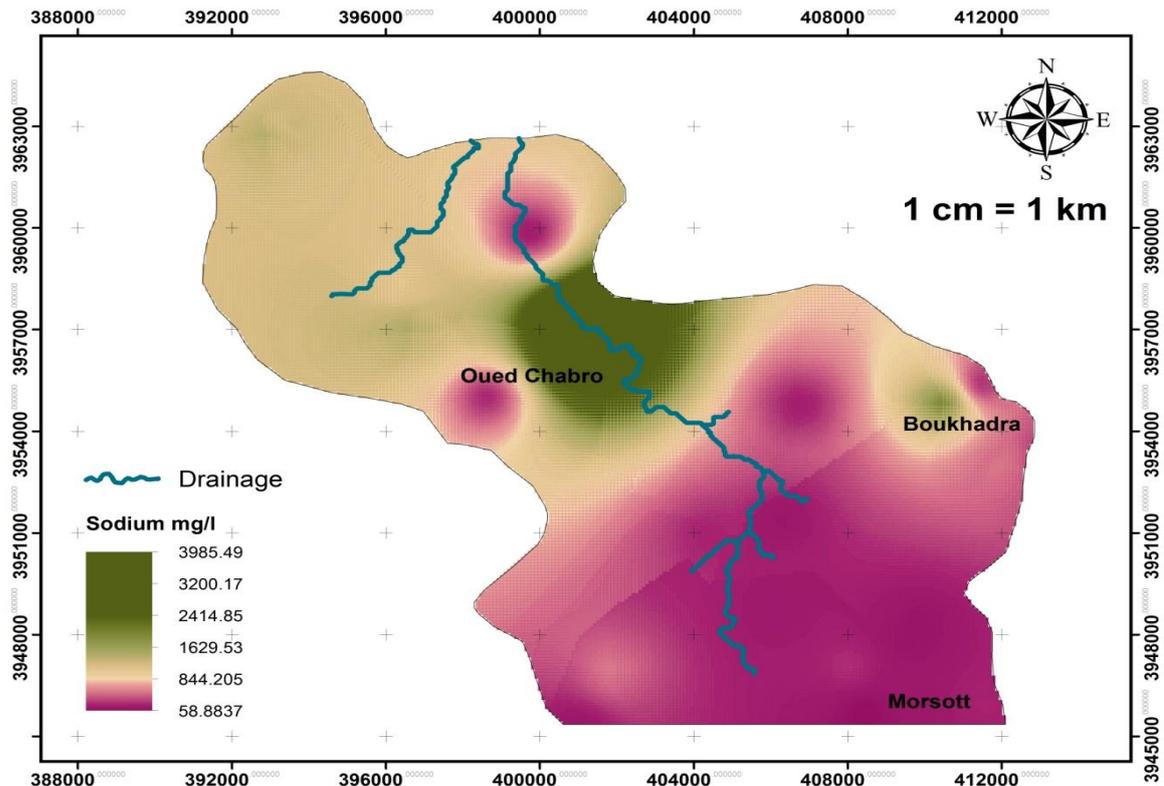


Figure 59: Carte de sodium (mg/l)

6. Ion Potassium

Il provient fondamentalement de la dégradation des silicates tels que l'orthose et surtout les micas potassiques (muscovite et biotite). Il peut aussi être lié à la pollution industrielle, minière ou agricole (fumeurs potassiques) en particulier dans les sables dotés d'une faible capacité d'échange cationique. En dépit de son abondance dans la croûte terrestre, sa teneur dans les eaux naturelles est, très souvent, inférieure à celle du sodium.

Cette immobilité relative s'explique d'une part par une altération des minéraux sodiques moins difficile par rapport à celle des minéraux potassiques et, d'autre part, du fait que la lixiviation du potassium étant faible en surface puisqu'il peut être adsorbé momentanément dans les feuilles argileux durant le processus de la transformation de l'argile (Custodio et al., 2001). Habituellement, il se trouve dans les eaux douces sous des concentrations comprises entre 0,1 et 10 ppm et il atteint rarement quelques centaines de ppm. La teneur de l'eau de mer est de l'ordre de 400 ppm. A des concentrations habituelles, cet élément ne présente pas des problèmes spéciaux vis-à-vis de la santé humaine et il constitue une substance vitale pour les plantes.

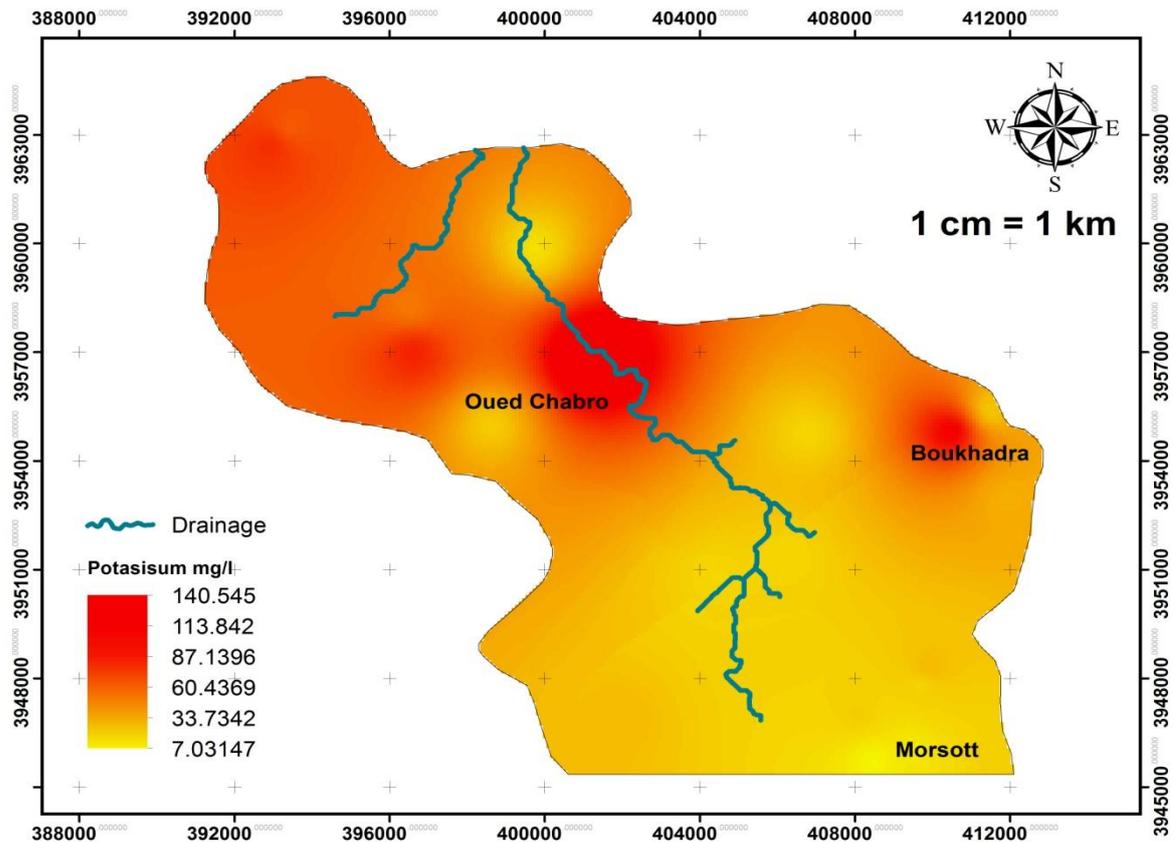


Figure 60: Carte de potassium (mg/l)

Dans la région d'étude le potassium est le cation le moins répandu, ses concentrations dans les échantillons d'eau analysés varient entre 7 mg/l et 140 mg/l avec une moyenne égale à 35mg/l (figure 61).

On remarque que les plus grandes valeurs sont enregistrées au niveau des points d'eau situés au centre et au nord de la région d'étude (P14, P5, P6 et P11), avec une teneur maximale égale à 140 mg/l enregistrée au niveau du P5, cette forte teneur est peut être attribuée à la dissolution des roches évaporitiques du Trias (sels potassiques KCl) d'une part et à l'utilisation des fertilisants potassiques d'autres part, par les agriculteurs, durant les différentes activités agricoles.

Cependant le taux de K^+ dans les sols reste très variable, il dépend de plusieurs facteurs à savoir, le type de sol, le pH du sol, la température, la présence d'argile, la présence des sels aussi et la production agricole.

7. Ion Bicarbonates

L'acide carbonique formé par dissolution du CO₂ atmosphérique et du sol constitue la principale source des carbonates et bicarbonates. Dans les eaux naturelles, les bicarbonates proviennent, aussi, de la dissolution des roches carbonatées et silicatées. Ce sont des ions généralement solubles et ils se présentent typiquement sous des teneurs comprises entre 50 et 350 ppm bien qu'ils touchent, parfois, les 800 ppm dans les eaux naturelles. Les carbonates et les bicarbonates ne présentent pas des problèmes de toxicité, cependant les eaux bicarbonatées sodiques sont inadéquates pour l'irrigation.

Dans notre entité d'étude, les concentrations des bicarbonates oscillent entre 203 et 460 mg/l avec une moyenne égale à 345.54 mg/l.

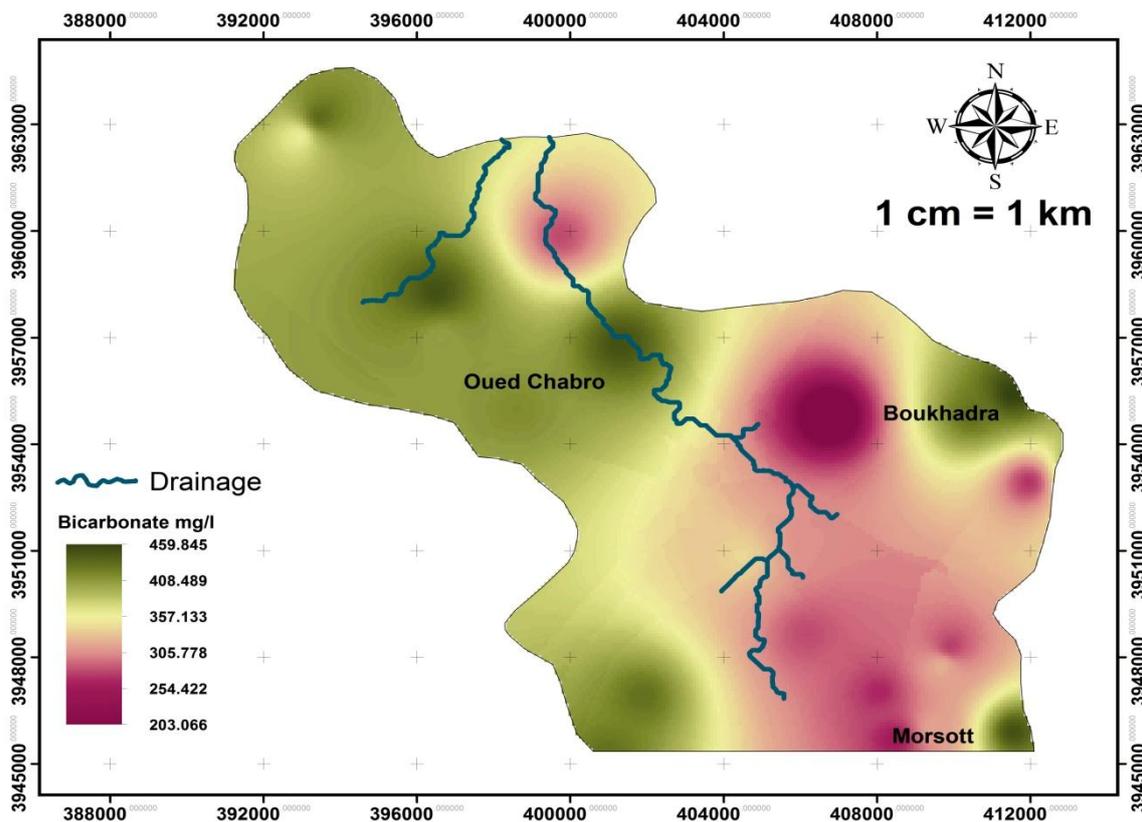


Figure 61: Carte des bicarbonates (mg/l)

L'évolution spatiale des bicarbonates (figure 62), montre une augmentation des concentrations de cet élément dans la partie est de la région d'étude au niveau des points d'eau P16, P18 et P5. Ces fortes teneurs sont dues probablement à l'influence des formations carbonatées d'âge Aptien, constituant le massif de Djebel Boukhadra. En allant vers le centre de la région d'étude, les concentrations de HCO⁻³ diminuent pour atteindre la plus faible teneur au niveau de point d'eau P13.

8. Ion Chlorures :

Les chlorures sont des sels, généralement, très solubles et très stables en dissolution. Dans les eaux naturelles, l'ion chlorure ne s'oxyde pas ni se réduit. Souvent, il s'associe avec l'ion sodium surtout dans les eaux très salines. Dans les eaux douces, la concentration du chlore varie normalement entre 10 et 250 ppm, quoique parfois on trouve des valeurs beaucoup plus élevées qui peuvent atteindre plusieurs milliers de ppm (in Stitou, 2002). Néanmoins, l'eau de mer est caractérisée par des concentrations qui varient entre 18000 et 21000, alors que les concentrations dans les lacs d'eaux (stagnantes) salines dépassent parfois 200000 ppm. Des concentrations supérieures à 300 ppm proportionnent une saveur salée à l'eau de boisson, mais sans être préjudiciable à la santé humaine (au moins jusqu'à plusieurs milliers de ppm) quoique les concentrations élevées en chlorures sont nuisibles à la plupart des plantes et elles causent la corrosivité de l'eau (Custodio et al., 2001).

Les chlorures proviennent fondamentalement du lavage des sédiments, d'origine marine, du mélange avec les eaux fossiles d'imbibition, de la concentration de l'eau de pluie et de la dissolution des sels évaporitiques chlorurés souvent accompagnés de l'anhydrite.

Les teneurs en chlorures dans les eaux de l'aquifère Plio-quadernaire enregistrées pendant toute la période d'investigation, montrent un écart important entre les différents points d'eau analysés.

L'observation de la carte des chlorures (Figure.63), durant la même période, montre des concentrations très élevées atteignant un maximum de 8139.44 mg/l enregistré au niveau du puits P5, ces fortes valeurs sont en rapport direct avec la présence des terrains triasiques salifères riches en halite (NaCl).

Les plus fortes concentrations des chlorures sont observées dans la partie Est et la zone centrale de la région d'étude (au niveau des puits P5, P6, P16 et P14), plus au Sud dans la région de Morsott, les concentrations des chlorures diminuent (100 à 800 mg/l) où la teneur minimale a été enregistrée au niveau du point d'eau P22.

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

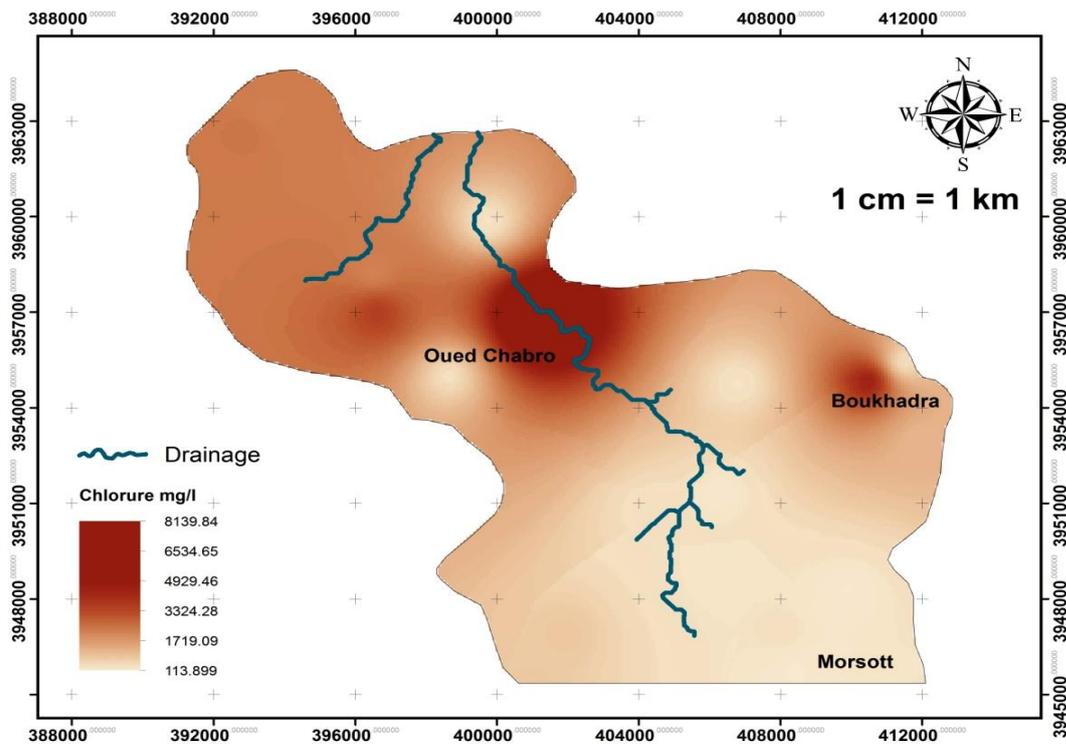


Figure 62: Carte des chlorures (mg/l)

9. Ion Sulfate:

Ces ions proviennent surtout de la dissolution des sulfates calciques et magnésiens des roches sédimentaires et évaporitiques (gypse, anhydrite et sulfate de magnésium) et de l'oxydation des sulfures. Ils peuvent également dériver des activités industrielles (tanneries, papeteries, textiles, etc.), agricoles (sulfate d'ammoniaque utilisé comme engrais de fond) et des activités urbaines. Les teneurs en sulfate varient entre 2 et 150 ppm dans les eaux douces tandis que la concentration de l'eau de mer est de l'ordre de 3000 ppm. Les eaux fortement sulfatées ne soulagent pas la soif et elles ont un caractère amer et peu agréable. Les composés soufrés peuvent être soumis à la réduction bactérienne en milieu réducteur et produire, ainsi, de l'hydrogène sulfuré (H_2S) qui cause d'importantes nuisances (odeur, corrosion, toxicité) (Custodio et al., 2001).

Au niveau de la région d'étude les concentrations des sulfates SO_4^{2-} sont très variables d'une zone à une autre. Les teneurs varient entre un minimum de 49 mg/l et un maximum de 574 mg/l, la figure 64, montre la distribution spatiale de cet élément au niveau de toute la région d'étude. Sur cette carte, on remarque que les fortes teneurs en SO_4^{2-} sont localisées au niveau d'un certain nombre de points P1, P5, P7 et P16, ces teneurs sont supérieures aux normes de eaux souterraines, tandis que les faibles teneurs sont enregistrées au niveau des puits P15, P21, P22, situés au sud de la région d'étude.

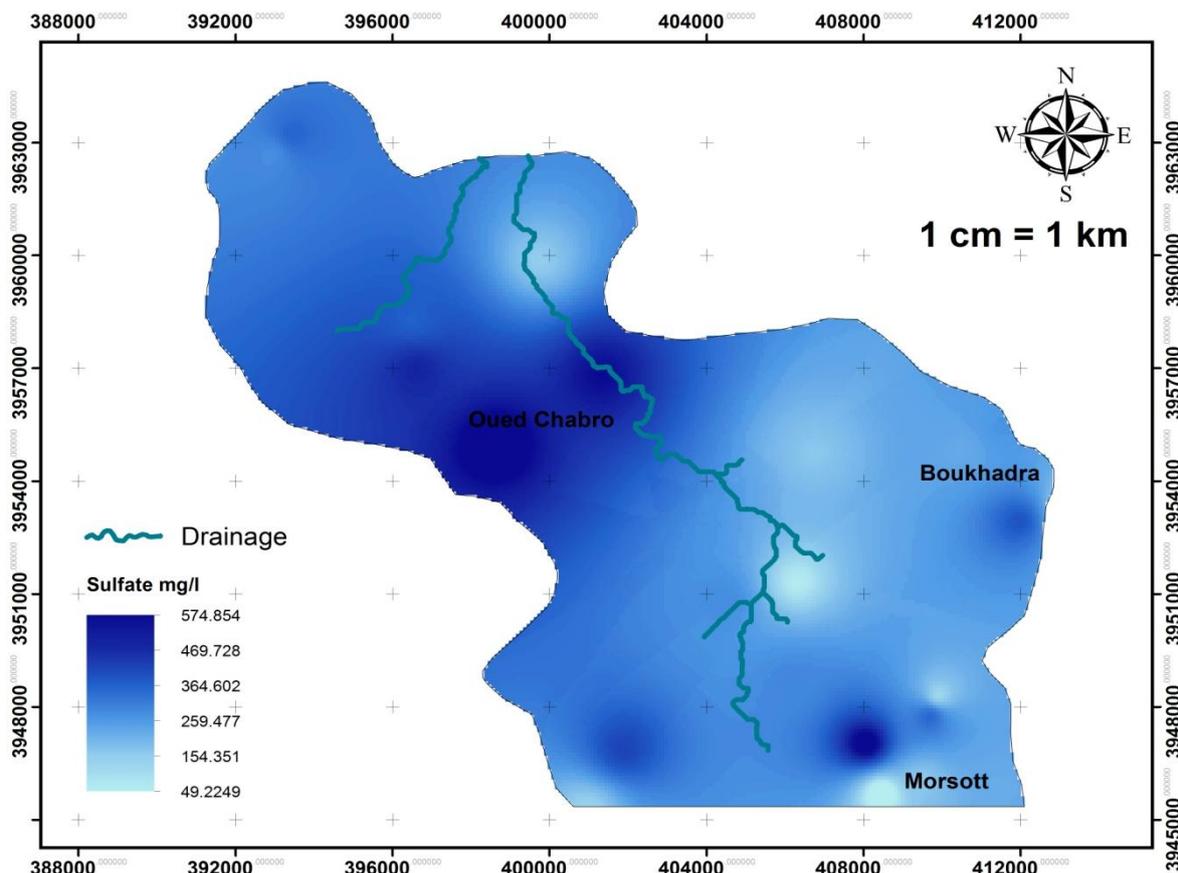
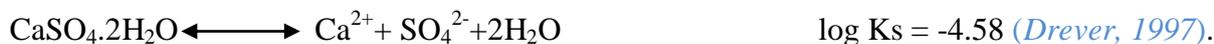


Figure 63: Carte des sulfates (mg/l)

L'origine des sulfates, dans la région d'étude est attribuée au lessivage de gypses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et d'anhydrite (CaSO_4), 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) :



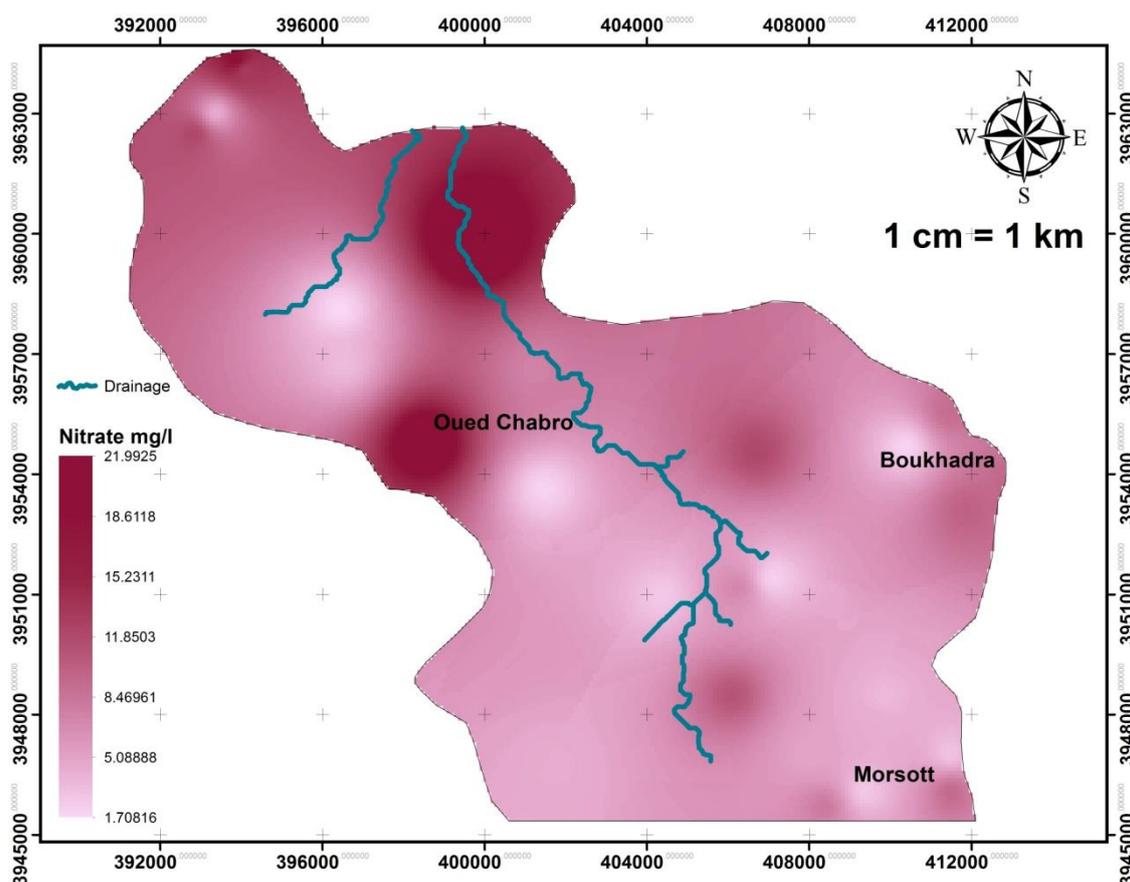
Théoriquement, si le gypse est dissous dans une eau douce, cette eau devient salée avec un TDS d'environ 200-2500 mg/l et un anion dominant SO_4^{2-} .

10. Les nitrates :

Le nitrate (NO_3^-) est un élément du cycle de l'azote dans la nature et il est utilisé comme engrais et dans l'industrie alimentaire. Dans le cycle d'azote, les nitrites (NO_2^-) n'occupent qu'une place intermédiaire instable et momentanée entre l'ammoniaque et le nitrate lors du processus de minéralisation de la matière organique par les bactéries nitrifiantes. La présence des nitrites dans les eaux naturelles traduit soit une oxydation incomplète des ammoniaques soit une réduction des nitrates soit une pollution directe d'origine fécale. Leur présence étant très rare dans des eaux de bonne qualité et bien aérée.

Le nitrate en lui même n'est pas toxique mais sa toxicité vient de la chaîne de réaction nitrates \rightarrow nitrite \rightarrow nitrosamines. Du fait de la transformation dans l'organisme humain des nitrates en nitrites et en nitrosamines cancérigènes (qui peuvent être mortelles surtout pour les enfants), il importe d'éviter une mise en circulation incontrôlée de nitrates. L'augmentation de la concentration des nitrates dans les ressources hydriques est un problème de plus en plus sérieux. La forte présence des nitrates dans l'organisme humain peut causer plusieurs maladies (hypertension, anémie, infertilité, problèmes nerveux, etc.). D'autant plus, ils présentent un impact négatif sur l'environnement puisqu'ils causent (en présence d'autres substance comme le phosphore) l'eutrophisation des cours d'eau superficielles et les eaux littorales. Il convient surtout de limiter leur utilisation pour la conservation des produits alimentaires. Dans l'agriculture, l'utilisation d'engrais azotés doit être proscrite dans les bassins versants qui servent de réservoirs d'eau potable ainsi que dans les zones où les nitrates peuvent s'infiltrer aisément dans les eaux souterraines.

Les nitrates se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface. Sans apport artificiel, les eaux ne contiennent pas plus de 10 mg/l de nitrates.



Dans la région d'étude, les concentrations des nitrates dans les eaux souterraines de l'aquifère Plio-quaternaire varient entre un minimum de 1.7 mg/l et un maximum de 22 mg/l et une valeur moyenne égale à 4.96 mg/l.

La distribution spatiale de cet élément, le long d'un profile sud-nord montre que les plus grandes concentrations sont enregistrées au niveau des points d'eau P7, P9 par contre les plus faibles valeurs sont enregistrées au niveau des puits P4 et P1 qui sont situés au sud de la région d'étude.

V. Détermination des faciès hydrochimiques :

L'étude du faciès géochimique des eaux de l'aquifère de Morsott-Boukhadra-ElAouinet a été effectuée par l'intermédiaire du logiciel Hydrochem (Piper, Schoeller et Berkallof et Riverside....ect).

Pendant la période d'investigation, on a remarqué que la majorité des points d'eau gardent le même faciès hydrochimique, uniquement quelques puits qui changent de faciès, on explique ce changement par la pluviométrie (diminution et/ou augmentation des concentrations par dilution).

Selon les anciens travaux hydrochimiques, l'aquifère Plio-quaternaire montre un faciès chimique chloruré-sodique, dans ses parties centrale et avale où l'influence des terrains triasiques salifères riches en Halites est fortement sentie, en s'éloignant vers l'amont (du coté de la ville de Morsott), l'influence du Trias s'amortit et le faciès devient plutôt bicarbonaté-calciq ou sulfaté-calciq, traduisant ainsi l'influence de la matrice carbonatée de l'aquifère et celle des terrains turoniens (riches en gypse) lessivés par les pluies alimentant le Plio-quaternaire. (Fehdi *et al.* 35th Congress of the International Association of Hydrogeologist IAH, Lisbonne 2007).

A. Interprétation par le diagramme de PIPER

Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eaux. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralité augmente ou bien pour distinguer des groupes d'échantillons.

Le diagramme de Piper classe les eaux en trois (3) faciès type (figure 66) :

- Faciès Chloruré et/ou Sulfaté Magnésienne,
- Faciès Chloruré Sodique et Potassique,
- Faciès Bicarbonaté calciq et Magnésienne.

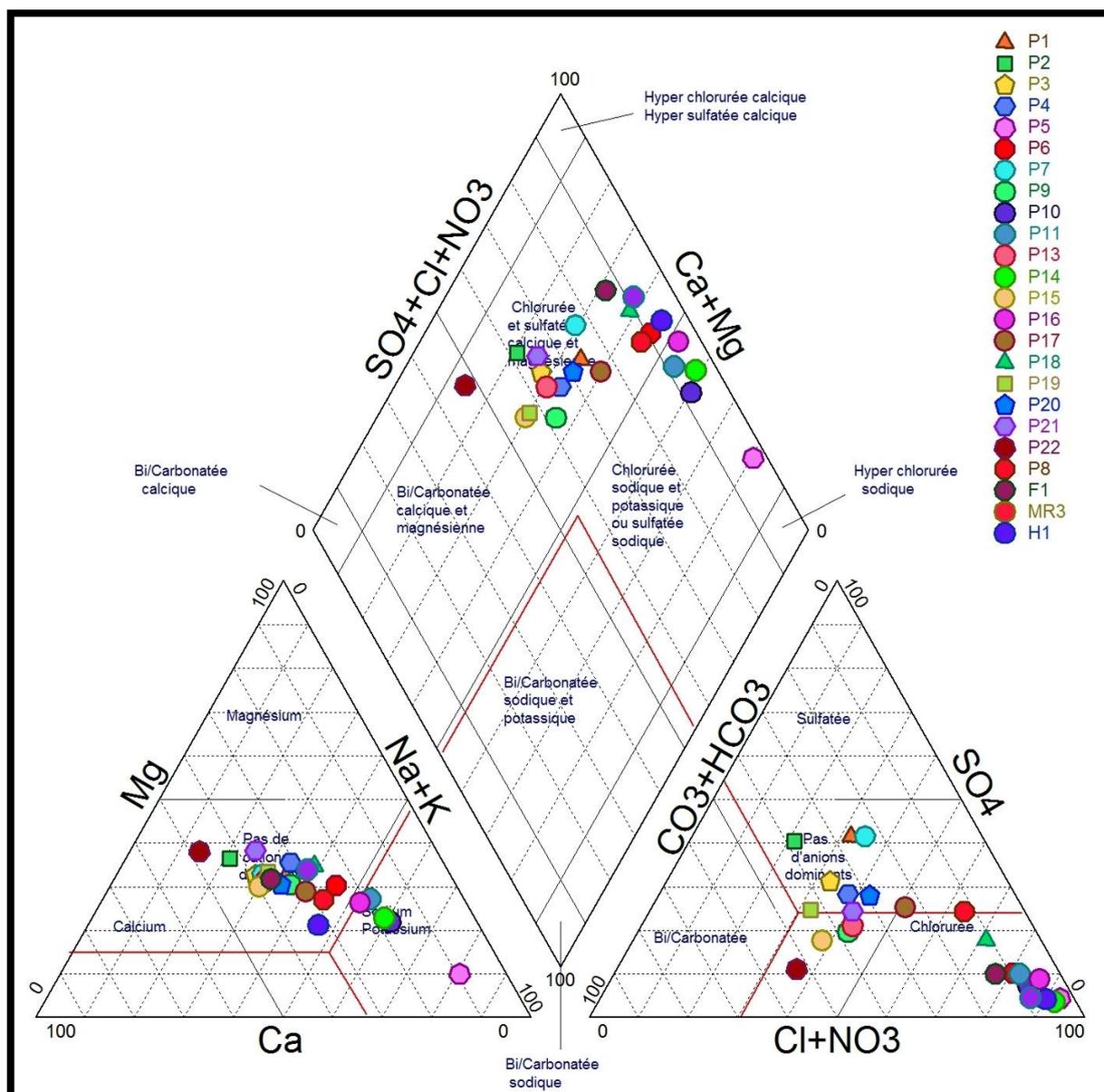


Figure 65: Diagramme de piper

La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique de l'aquifère et des conditions de recharge. En effet, l'abondance des formations salifères triasiques sur les limites Est et Ouest et les couches de croûte calcaire dans l'aquifère est en parfait accord avec ces faciès chimiques de l'eau. Les zones de forte minéralisation sont localisées surtout au niveau de ces bordures riches en halite. Par contre les faibles valeurs de minéralisation sont localisées dans la partie amont au Sud de la région d'étude où l'influence des terrains triasiques est faible.

B. Interprétation par le diagramme de SCHOELLER-BERKALLOF

Il s'agit d'un diagramme logarithmique qui permet de visualiser la composition chimique d'une eau, celui-ci représente chaque analyse par une ligne brisée, profil caractéristique de la concentration de chaque ion majeur en solution dans l'eau, ces profils permettent de mettre en évidence la parenté des eaux entre elles, il permet également d'effectuer la conversion des résultats d'analyse en milligrammes par litre (mg/l) en milliéquivalent par litre (méq/l).

Le diagramme tracé pour la période d'étude (figure 67), confirme principalement un faciès chloruré sodique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl^- et Na^+ . Secondairement on observe un faciès chloruré calcique et aussi sulfaté calcique.

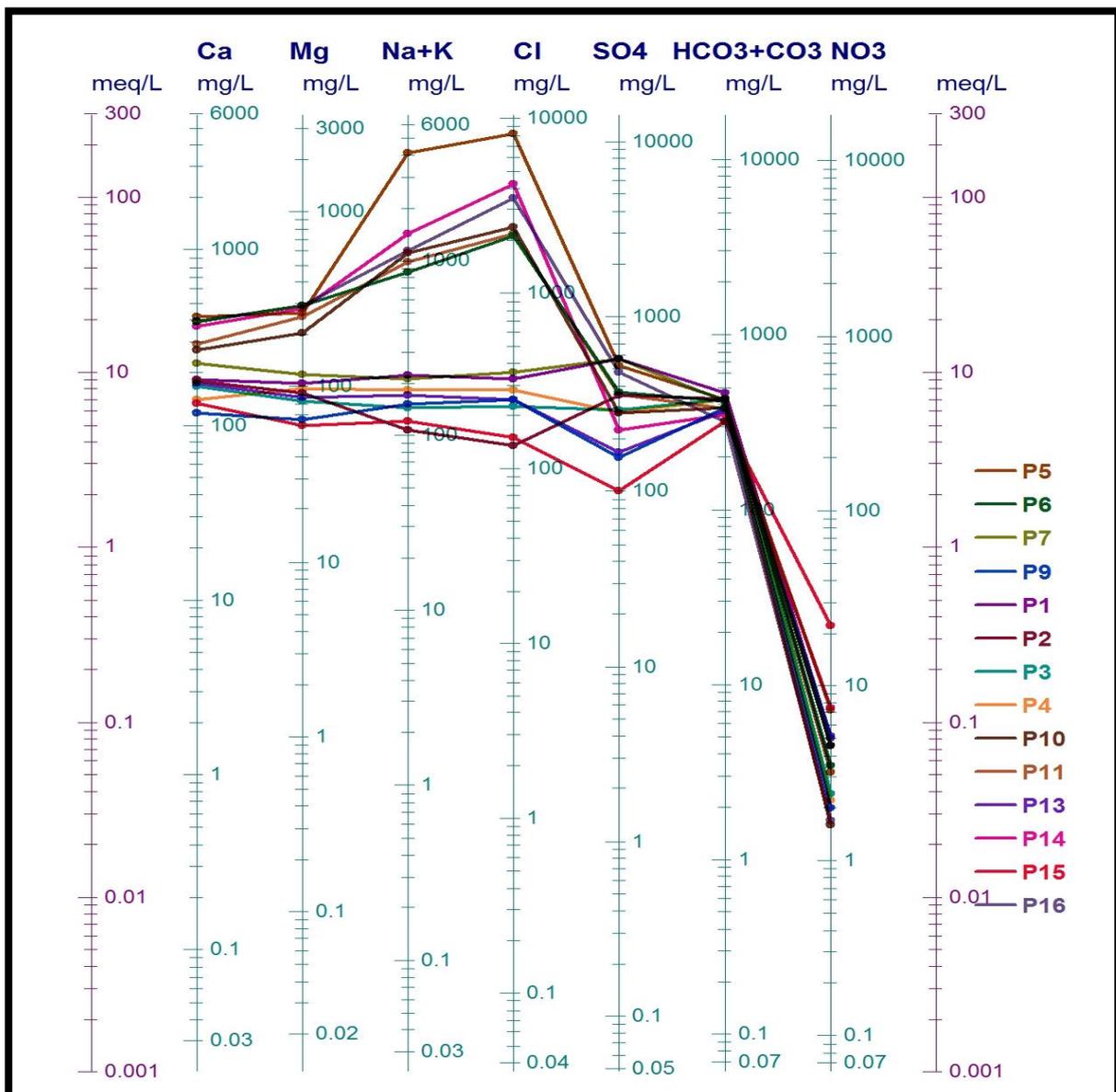


Figure 66: Diagramme de Scholler-Berkalof

Les puits P5, P6, P10, P11 et P14, présente une teneur élevée en chlorures, due à la mise en solution de l'halite qui lié aux formations triasiques salifères. Le sodium présente aussi des concentrations qui dépassent les normes au niveau des mêmes puits.

Généralement les graphiques qui sont marquées par des fortes concentrations sont liés à la présence des évaporites où les points d'eau se situent dans le domaine des diapirs, une deuxième catégorie positionnés au milieu de la figure caractérisent les puits se trouvant au sud de la région d'étude ce qui explique en quelque sorte les teneurs élevées de calcium, des bicarbonates et des sulfates.

C. Evaluation du risque de salinité (diagramme de Riverside) :

Le diagramme de Riverside est très utile et fiable pour caractériser une eau. En effet, le diagramme ne peut pas prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides auxquels il est destiné. Lorsque les eaux se concentrent, elles précipitent des minéraux, la calcite étant l'un des plus importants et des plus précoces à précipiter. Il en résulte une sur estimation de la charge saline et une sous estimation du rapport Na/Ca. Le diagramme sous estime le risque de salinisation et sous estime le risque de sodisation.

Ce diagramme repose sur le croisement de deux critères :

- le premier est la conductivité électrique (C.E). Ce critère vise à quantifier la charge en sel de la solution et par conséquent le risque de salinisation (i.e. d'accumulation de sel dans les sols). Les eaux sont classées de C1 à C5 selon le risque croissant de salinisation.
- le second est le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) de l'eau induit par l'eau dans le sol. Ce second critère permet d'évaluer le risque de sodisation du sol par l'eau d'irrigation. Les eaux sont classées de S1 à S3 selon le risque croissant de sodisation.

Pour nos échantillons, le diagramme est basé sur les valeurs du rapport du SAR et de la conductivité électrique des ions contenus dans l'eau (figure 68). L'objectif était de représenter les échantillons sur le diagramme de Riverside afin de faciliter la caractérisation des eaux sur leur aptitude à l'irrigation.

Les échantillons représentés sur le diagramme de Riverside se distribuent en :

Groupe 1 : où ce concentre la majorité des puits de la partie Sud, avec des risques de salinisation des sols faible et des risques de sodisation faibles à moyens,

Groupe 2 : avec des risques de salinisation moyens et de forts risques de sodisation,

Groupe 3 : Le reste de puits représentent une hyper forte salinisation et de forts risques de sodisation.

VI. Conclusion

Les eaux souterraines ont des propriétés chimiques étroitement liées à leur origine géologique, c'est-à-dire déterminées par la nature et la structure des terrains. A tout instant, l'eau est au contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule. Il s'établit, alors un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau.

A l'issue de cette étude hydrochimique de l'aquifère Morsott-Boukhadra-ElAouinet nous a permis d'étudier les variations spatiales des paramètres physiques, mesurés in situ et chimiques dosés aux laboratoires.

La répartition spatiale des faciès chimiques indique un faciès chloruré-sulfaté et calcique dépend de la nature lithologique de l'aquifère et des conditions de recharge. En effet, l'abondance des formations salifères triasiques sur les limites Est et Ouest et les couches de croûte calcaire dans l'aquifère est en parfait accord avec ces faciès chimiques de l'eau.

CHAPITRE VIII :
APPLICATION DES
METHODES DE
VULNERABILITE

CHAPITRE VIII

APPLICATION DES METHODES DE VULNERABILITE

I. Présentation de la méthode DRASTIC.

Rappelons que la méthode DRASTIC, faisant partie du groupe des classes pondérées, est un système qui a été développé par le « U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) » et le « National Water Well Association (NWWA) », en 1987 comme moyen pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. DRASTIC génère un indice ou 'score' pour le potentiel de pollution des ressources en eaux souterraines. Cet indice s'étale sur un intervalle de 23 à 226. Il faut noter que la vulnérabilité à la pollution est d'autant plus importante que les notes sont plus élevées.

La méthode DRASTIC utilise sept paramètres hydrogéologiques : la profondeur du plan d'eau [D], la recharge nette [R], la nature lithologique de l'aquifère [A], la texture du sol [S], la topographie ou pente du terrain [T], l'impact de la zone non saturée [I] et enfin la conductivité hydraulique [C].

Différentes étapes sont nécessaires à la mise en place de ce type de méthodes :

- Déterminer la disponibilité des informations pour quantifier les paramètres de la méthode ;
- Déterminer une cote spécifique à chacun des secteurs de la zone d'étude et ce pour chaque paramètre de la méthode ;
- Attribuer un poids à chaque paramètre ;
- Combiner les cotes et poids des paramètres pour produire un indice de vulnérabilité pour tous les secteurs de la zone d'étude.

Dans le SIG, chaque paramètre est noté sur une couche en lui affectant un coefficient correspondant au poids du paramètre, c'est-à-dire son influence sur la vulnérabilité de la nappe. La superposition des couches relatives aux paramètres déjà définis donne la carte de répartition de l'indice DRASTIC. Les couches ou cartes superposées devront évidemment avoir les mêmes caractéristiques cartographiques à savoir : un même système de projection, les mêmes unités de longueur, la même étendue géographique et aussi la même résolution, car tous les calculs se font sur un format matriciel.

Tableau 20: Intervalles et cotation des différents paramètres de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987)

Profondeur à la nappe (m)			Recharge (m)			Nature du milieu aquifère			Nature du sol			Pente du terrain (%)			Impact de la zone vadose			Conductivité hydraulique (m/s)		
intervalle	C	P	intervalle	C	P	Nature du milieu aquifère (classes)	C	P	Nature du sol (classes)	C	P	intervalle	C	P	Zone Vadose (classes)	C	P	intervalle	C	P
2-4.5	9	5	0.01-0.05	1	4	Sable et argile	1	3	Calcaire karstique	1 0	2	0-3%	1 0	1	Confined aaquifer	1	5	$8.3 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	2	3
4.5-9	7		0.05-0.10	3		Argile massif et sable	2		Basalte	9		3-5%	9		Argile sableuse et calcaire	2		$4 \times 10^{-5} - 2.5 \times 10^{-4}$	4	
9-15	5		0.10-0.18	6		Sable, gravier et argile	4		Sable et gravier	8		5-10%	5		Sable, limon	4		$2.5 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-4}$	6	
15-23	3		0.18-0.25	8		Gravier sableux	8		Calcaire massif	6		10-15%	3		Sable, gravier avec limon	6				
23-31	2		>0.25	9		Gravier et sable.	1 0		Grés massif	6					Gravier et sable	1 0				
>31	1								Métamorphique altéré	4										
									Métamorphique	3										
						Shale massif	2													

Avec, C : cote du paramètre correspondant.

P : poids du paramètre.

II. Application de la méthode DRASTIC

A. Description de la méthode :

DRASTIC demeure la méthode d'estimation de l'indice de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines la plus communément utilisée. Cette méthode, qui consiste en un système de cotation numérique, est décrite en détail dans le document EPA/600-2-87-035 (Aller et al., 1987). DRASTIC est un acronyme des paramètres qui contrôlent la pollution d'un système aquifère et étant, donc, les plus importants à cartographier. Il se réfère à :

- **D** : profondeur à la nappe d'eau (*Depth to groundwater table*) ;
- **R** : infiltration efficace (*net Recharge*) ;
- **A** : nature du milieu aquifère (*Aquifer media*) ;
- **S** : nature du sol (*Soil media*) ;
- **T** : pente du terrain (*Topography*) ;
- **I** : impact de la zone vadose (*Impact of vadose zone media*) ;
- **C** : conductivité hydraulique ou perméabilité de l'aquifère (*hydraulic Conductivity of the aquifer*).

Un système de classement numérique est utilisé pour estimer le potentiel de pollution de l'eau souterraine au sein d'un système aquifère. On y distingue les poids, les intervalles et les cotes.

▪ **Pondération**

Chaque facteur DRASTIC a été évalué par un poids qui détermine son importance relative par rapport aux autres facteurs. Les poids vont de 1 à 5 ; un poids relatif de 5 a été attribué aux facteurs les plus significatifs (Profondeur à la nappe d'eau et Impact de la zone vadose) alors que ceux qui le sont moins prennent des poids relatifs de 1. Ces poids constituent des constantes qui ne peuvent pas être modifiés (Aller et al., 1987).

▪ **Intervalles et cotes**

Chaque paramètre DRASTIC a été divisé en intervalles (ou en types significatifs) qui indiquent le degré de difficulté (ou de facilité) que va rencontrer un agent contaminant lors de sa percolation depuis la surface du sol vers l'aquifère et à l'intérieur de celui-ci. Chaque intervalle reçoit une cotation, comprise entre 1 et 10, qui expriment son importance relative par rapport à un autre. Par conséquent, la variabilité de la cotation pour ces paramètres permet à l'utilisateur de choisir la valeur typique ou d'ajuster la valeur de l'intervalle en se basant sur une connaissance détaillée du secteur étudié. Cette méthodologie permet à

l'utilisateur de déterminer une valeur numérique pour chaque système hydrogéologique en employant un modèle additif.

B. Définition des paramètres

1. Profondeur à la nappe d'eau

C'est l'un des plus importants paramètres puisqu'il représente toute l'épaisseur des horizons traversés par un contaminant pour atteindre la nappe ou aussi l'épaisseur de la zone vadose. En général, la capacité d'atténuation augmente avec la profondeur de l'eau. Ceci est dû au fait que plus la profondeur de l'eau est grande plus le temps du transit d'un polluant, depuis la surface du sol jusqu'à cette profondeur, sera long. Les deux paramètres, temps de transit et profondeur de l'eau, sont en adéquation avec une faible vulnérabilité dans ce cas.

L'existence d'une faible perméabilité des couches, qui confère à l'aquifère un comportement captif, va également limiter le transit du contaminant jusqu'à l'aquifère. Lorsqu'un aquifère est captif, la profondeur à la nappe d'eau devra être redéfinie comme étant la profondeur du toit de l'aquifère. Pour les aquifères semi-captifs, une décision devrait être prise de considérer l'aquifère comme captif ou libre selon le cas approprié.

2. Infiltration efficace

Typiquement, la première source des eaux souterraines est formée par les précipitations qui s'infiltrent à travers la surface de la terre et percolent jusqu'au niveau d'eau souterraine. L'infiltration efficace représente, alors, la quantité d'eau par unité de surface qui pénètre dans les couches souterraines et atteint le niveau d'eau. Cette eau rechargée est susceptible de transporter un contaminant verticalement jusqu'au niveau d'eau et horizontalement à travers l'aquifère. De plus, elle détermine le volume d'eau disponible pour la dispersion et la dilution du contaminant que ce soit dans la zone vadose ou saturée. Généralement, la vulnérabilité des eaux souterraines augmente avec la recharge.

3. Nature du milieu aquifère

Le milieu aquifère se réfère aux roches meubles ou consolidées qui ont un comportement aquifère (tel qu'un sable, un gravier ou un calcaire fissuré). Ce milieu gouverne le cheminement et la longueur de la trajectoire d'un contaminant à travers les niveaux saturés en eau. En effet, la longueur de la trajectoire reste importante pour la détermination du temps disponible aux processus d'atténuation (adsorption, dispersion, dégradation des polluants, etc.) qui protègent la qualité des eaux souterraines. La nature du milieu aquifère influe également sur l'étendue de la surface effective de l'aquifère qui va entrer en contact avec le contaminant. Le cheminement que suivra le contaminant sera influencé par le type du milieu,

la fracturation, la porosité ou par une série d'ouvertures interconnectées qui peuvent fournir des chemins préférentiels aux flux d'eaux.

4. Nature du sol

Le sol correspond dans cette méthode, approximativement, au premier mètre de dépôts à partir de la surface terrestre. Le sol a un impact considérable sur la quantité d'eau qui pourra s'infiltrer et donc sur le mouvement du contaminant. La présence de matériaux à texture fine, tels que les silts et les argiles, est susceptible de baisser la perméabilité relative du sol et restreindre la migration du contaminant. De plus, quand le sol est épais, les processus d'atténuation (comme la filtration, la biodégradation, l'adsorption et la volatilisation) peuvent être considérables. Le sol pourra donc être décrit suivant sa classification texturale et pourra être classé selon la vulnérabilité correspondante.

Tout type de sol présente une action épuratoire qui dépend d'un ensemble de mécanismes liés à ces propriétés physiques, chimiques, hydrodynamiques et biologiques. Cependant, selon DRASTIC, l'affinité d'un sol à retenir les polluants est contrôlée surtout par la texture, la surface spécifique des grains et la teneur en argile. Suivant ces caractères, il a été possible de distinguer trois types de classes en fonction de la prédominance relative des sables graveleux, argiles et limons.

5. Pente du terrain

La topographie contrôle le parcours du polluant ou sa rétention sur la surface du sol.

Les faibles pentes offrent au contaminant une grande opportunité d'être infiltré et elles sont associées aux degrés élevés de vulnérabilité. La topographie conditionne le développement du sol et, par conséquent, a un effet sur l'atténuation du contaminant.

6. Impact de la zone vadose

La zone vadose se réfère à la zone se situant au-dessus du niveau d'eau et étant non saturée ou saturée d'une manière discontinue. La nature de la zone vadose détermine les caractéristiques atténuateurs des matériaux surmontant le niveau d'eau. Elle contrôle aussi la longueur de la trajectoire ainsi que le cheminement et, donc, le temps disponible aux pouvoirs atténuateurs. Dans le cas des aquifères rocheux, le cheminement sera fortement influencé par la fracturation présente.

7. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est définie comme étant la capacité des matériaux de l'aquifère à transmettre l'eau. Elle contrôle la quantité d'eau qui va couler sous un certain gradient hydraulique ainsi que la quantité d'eau qui va pénétrer dans l'aquifère. La conductivité hydraulique est proportionnelle à la vulnérabilité.

C. Indice de vulnérabilité :

La vulnérabilité est évaluée par l'indice DRASTIC. Ce dernier est un indice numérique représentant la somme pondérée des sept cotes correspondant aux sept paramètres hydrogéologiques décrits ci-dessus. L'indice calculé représente une évaluation du niveau du risque de contamination d'une formation aquifère, ce risque augmente avec la valeur de l'indice.

$$INDICE_{drastique} = DR DW + RR RW + AR AW + SR SW + TR TW + IR IW + CR CW$$

Avec, R : poids du paramètre et W : cote du paramètre

L'indice DRASTIC minimum est de 23 tandis que le maximum est de 226. Toutefois, ces extrêmes théoriques sont très rares et les indices calculés sont plutôt dans la gamme 50 à 200. Trois classes de vulnérabilité ont été adoptées afin d'estimer la probabilité relative de contamination des ressources hydriques d'un aquifère (Salwa Saidi 2011). Ces classes sont représentées sur la carte de vulnérabilité par différentes couleurs.

D. Interaction entre les paramètres

Lors de l'application de DRASTIC il s'est avéré qu'une interaction certaine existe entre plusieurs paramètres. Par exemple, le paramètre « profondeur à la nappe » concerne l'épaisseur des matériaux qu'un polluant va rencontrer durant son ascendance jusqu'à la nappe; plus la zone vadose sera épaisse plus les effets de dégradation, de retardation et d'atténuation du polluant seront importants. Néanmoins, pour une même profondeur à la nappe, la texture et la structure des matériaux qui composent la zone vadose vont conditionner le temps de transit d'un polluant ; une texture argilo-sableuse ralentira la propagation du polluant alors qu'une texture graveleuse permettra un transit plus rapide. Si la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines devrait être évaluée selon le temps de transit, le flux et la concentration associés à l'incidence d'un polluant introduit au site, ces facteurs seront pris en charge par les paramètres DRASTIC comme suit: les paramètres qui prennent en charge indirectement le temps de transit d'un polluant sont la profondeur à la nappe, la recharge efficace, la nature du sol, l'impact de la zone vadose et la perméabilité de l'aquifère. Le flux du polluant est pris en charge par la nature du milieu aquifère et par la conductivité hydraulique, alors que la concentration du polluant est considérée par tous les paramètres.

La profondeur à la nappe d'eau et l'impact de la zone vadose sont deux paramètres complémentaires parce que le premier affecte la quantité tandis que l'autre s'intéresse à la nature lithologique des matériaux que l'agent de pollution doit traverser. En fait, la recharge nette influe sur le transport, la dispersion et la dilution du contaminant et elle partage cette influence avec la profondeur à la nappe ainsi qu'avec l'impact de la zone vadose.

D'ailleurs, la pente du terrain et le type du sol sont deux facteurs qui agissent sur la recharge en plus d'influencer la vulnérabilité de l'aquifère de différents modes ; d'une part, le sol exerce un rôle déterminant dans les processus d'atténuation et il contrôle le trajet, la direction et le temps disponible pour la pénétration du contaminant alors que, d'autre part, la topographie du terrain est liée certainement à l'épaisseur et le développement du sol ainsi qu'elle peut avoir des liens avec le gradient hydraulique.

La tranche supérieure de la zone vadose influe sur le type du sol et ces deux facteurs sont responsables des processus d'atténuations biologiques. La conductivité hydraulique conjointement avec la pente topographique déterminent la vitesse et la direction du mouvement et elles sont affectées par la taille des grains, la stratification et la fracturation. Ainsi, tous les facteurs pris en considération par DRASTIC peuvent être jugés comme étant des variables dépendantes et inter-agissantes.

E. Application de la méthode DRASTIC à l'aquifère Morsott-Boukhadra-El Aouinet :

1. Carte de la profondeur à la nappe d'eau

Afin d'établir la carte des profondeurs du plan d'eau, on a utilisé les données relatives au niveau statique de 26 points d'eau, pendant le mois de septembre 2016.

La carte des profondeurs du plan d'eau (figure 69) montre des valeurs qui oscillent entre 4 et 31 m, rencontrées surtout au voisinage des zones proches à Oued Chabrou coté Morsott, et à Remila coté ElAouinet où les notes les plus élevées sont attribuées (9 et 10). En allant vers le Sud Est et le Nord Ouest, les notes les plus faibles sont attribuées (1 et 2) à cause d'un approfondissement de la nappe qui atteint les 31m dans les zones montagneuses (Djebel Boukhadra et Djebel Mesloula), On attribue le poids 5 à ce système de ponctuation afin d'être intégré dans le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC.

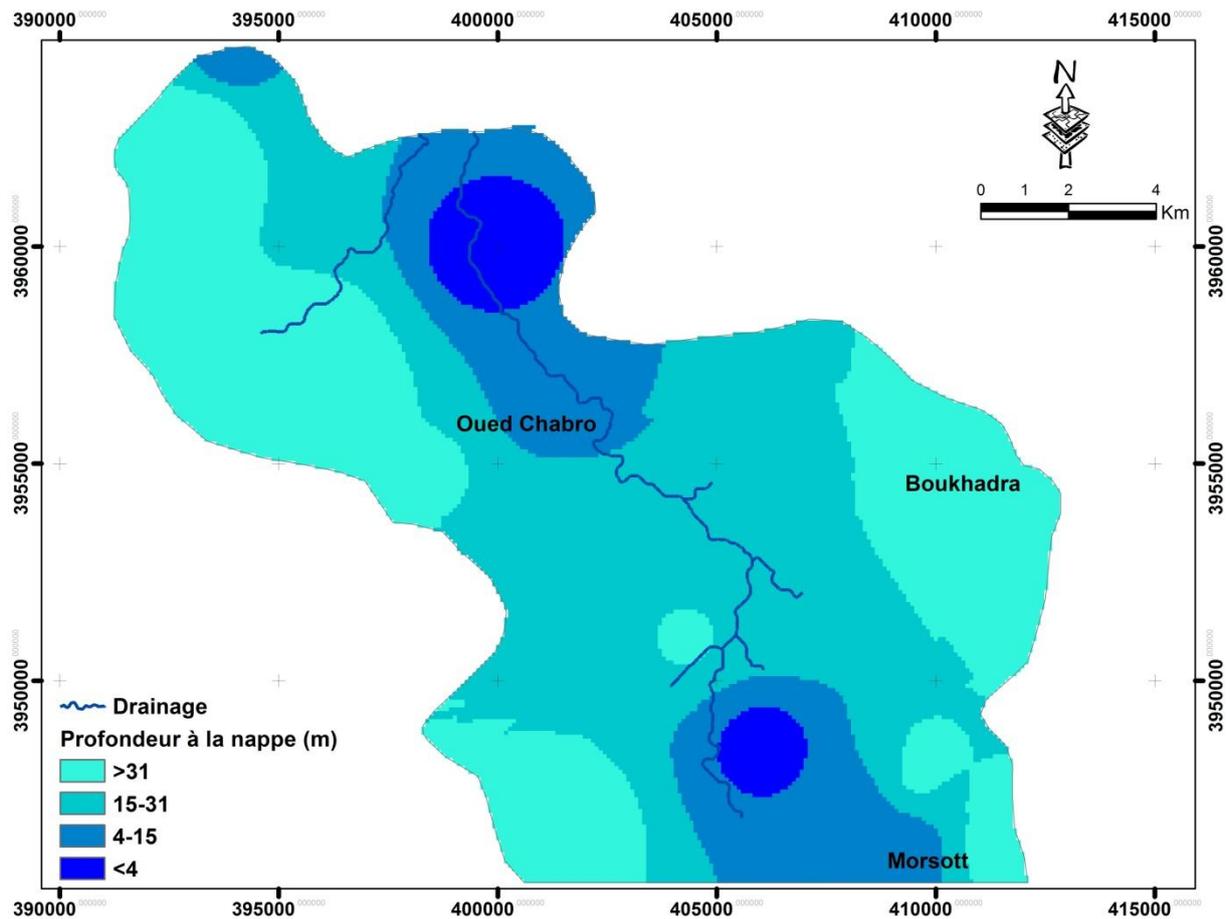


Figure 68: Profondeur de la nappe d'eau, dans la zone d'étude

2. Carte de la recharge :

La recharge correspond dans la conception DRASTIC à l'infiltration pluvieuse efficace. En effet, l'eau des précipitations efficaces est répartie à la surface du sol en deux fractions : le ruissellement superficiel et l'infiltration efficace qui est définie comme la part d'eau qui parvient à la nappe. Devant la difficulté de mesurer directement l'infiltration de la pluie efficace à l'aquifère, elle a été estimée d'une manière approximative. L'étude climatologique a démontré que les infiltrations pluvieuses efficaces étant très faibles.

Compte tenu des déficits hydriques prolongé dans la région, il n'a pas été possible de calculer l'infiltration, de c'est fait nous avons estimé la recharge efficace suivant les anciens travaux dans la région et on a supposé que la recharge pluvieuse étant homogène sur la totalité de la surface de la plaine ; ainsi on a obtenu une carte caractérisée par une seule cotation (cote 1).

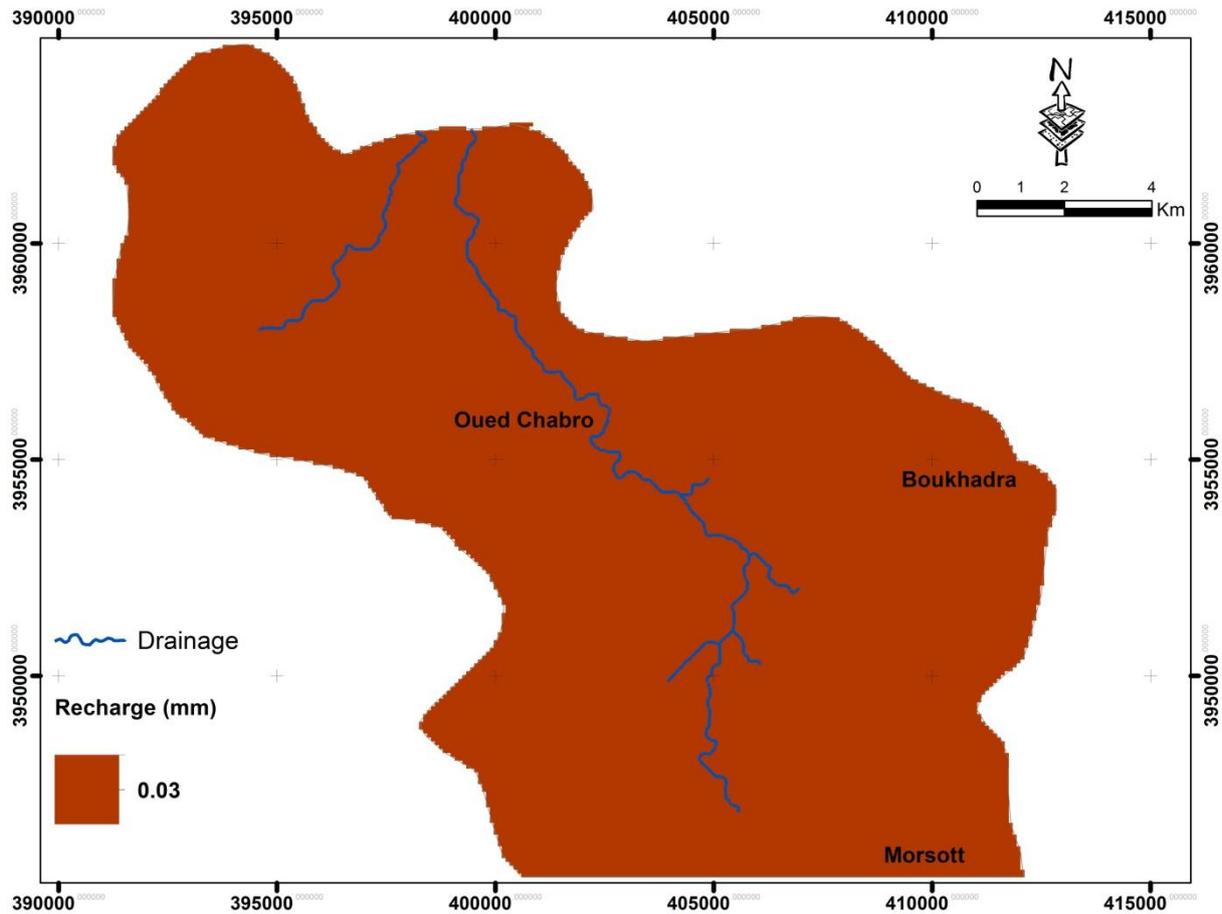


Figure 69: Carte représentative de la recharge nette dans la zone d'étude

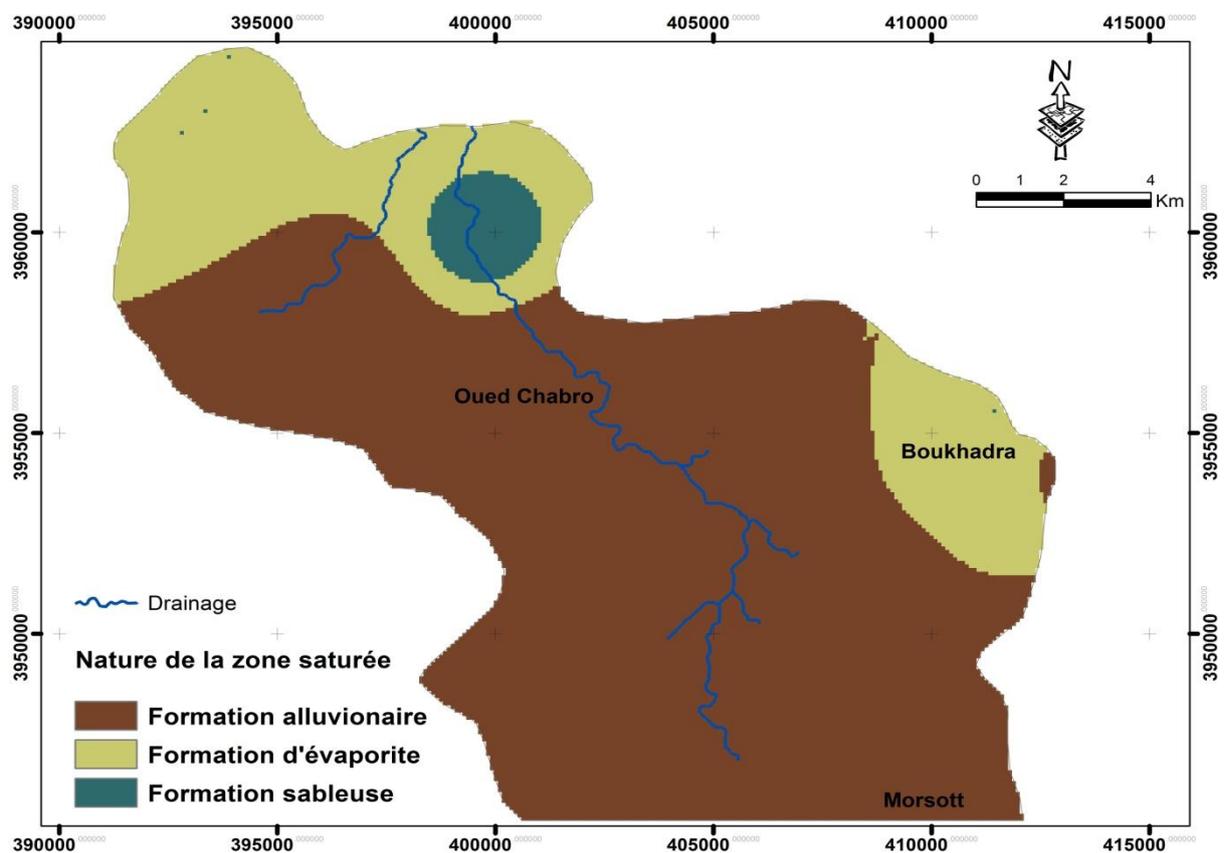
3. Nature du milieu aquifère

La carte des milieux aquifères a été établie à partir des cartes géologiques de Morsott et d'El-Aouinet également avec l'intervention de diagraphies des forages.

La plus grande perméabilité de l'aquifère a une plus grande estimation de potentiel de pollution ainsi plus les eaux souterraines sont vulnérables à la contamination.

Les résultats ont révélé l'existence de trois sections de la couche aquifère, ces trois formations correspondent aux formations alluvionnaires, formations évaporitiques et des sables.

Du point de vue vulnérabilité, on constate que les zones délimitées dans la première classe sont moins vulnérables à la pollution que celles délimitées dans la seconde et la troisième ; la vulnérabilité relative à la zone vadose augmente avec la nature de la formation géologique qui la constitue et avec la diminution de la profondeur à la nappe d'eau. Ainsi, on constate que les zones les moins vulnérables occupent les aires marquées par une zone vadose, relativement, plus épaisse, elles occupent la partie majeure du bassin d'effondrement morsott. La seconde classe est observée au niveau du Dj Boukhadra au Nord-Est et à Dj Mesloulou au Nord-Ouest dont la présence des formations Triasiques. D'ailleurs, les zones les plus vulnérables occupent principalement, la formation sableuse vers le Nord de la zone d'étude.



4. Carte du type de sol

Le sol se trouve sur la partie supérieure de la couche insaturée. Il descend de la surface supérieure à environ 2 mètres plus bas; l'information sur le type de sol est souvent nécessaire en tant qu'intrant de base dans l'évaluation hydrologique. La cartographie du sol consiste généralement à délimiter les types de sols qui ont des caractéristiques identifiables. La

délimitation est basée sur de nombreux facteurs tels que l'origine géomorphologique et les conditions sous lesquelles le sol s'est formé (Vieux 2004).

La carte des sols est classée en trois catégories de texture, à savoir le sable, la formation d'évaporation et la formation d'alluvions, que le taux le plus élevé représente sur la carte par le sable qui a une haute perméabilité et une grande vulnérabilité à la pollution. Formation qui consiste en un mélange d'alluvions caractérisé par une perméabilité moyenne à faible et une troisième partie qui est recouverte par un mélange de formation d'évaporation caractérisé par une perméabilité élevée et de bonnes caractéristiques hydrodynamiques.

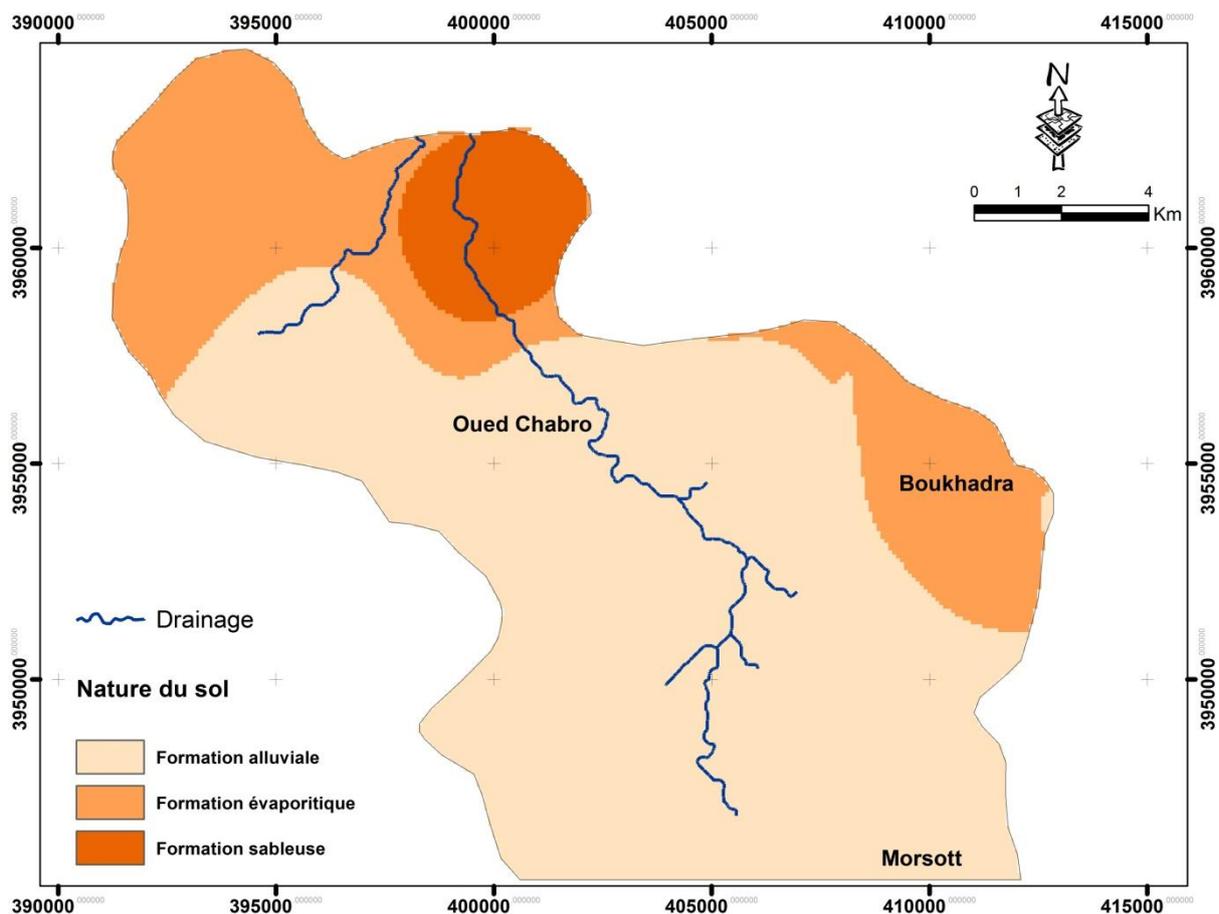


Figure 71: Carte de la nature du sol dans la zone d'étude

A ces classes pédologiques, on affecte des notes variant entre 6 et 9 et un poids respectif de 2 est adopté dans le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC (figure 72)

La catégorie de sol la moins vulnérable est représentée par la texture alluvionnaire et portent une notation de 6. Cette catégorie est observée à la partie centrale du fossé d'effondrement, la texture des évaporites peut contribuer au ralentissement du contaminant; les zones

caractérisées par cette texture portent une notation de 7 et qui couvrent les cotés Est et Nord-Ouest.

Enfin, les secteurs marqués par des vulnérabilités élevées (notation égale à 9) représentent des lieux dominés par la présence des formations sableuses, et on les repère dans la zone Nord-Est.

5. Carte de la pente de terrain

La topographie dans le modèle DRASTIC affiche la pente de la surface terrestre, les zones à faible pente retiennent l'eau et ont un potentiel de pollution plus élevé pour la migration des contaminants vers l'aquifère, comparativement à celles qui ont une forte pente et qui ont une grande quantité de ruissellement. La topographie de la zone d'étude est obtenue à partir du modèle numérique d'élévation (MNT) couvrant la zone d'étude. Les valeurs de pente (%) sont ensuite calculées à partir de cette carte à l'aide des outils d'analyse spatiale dans ArcGIS.

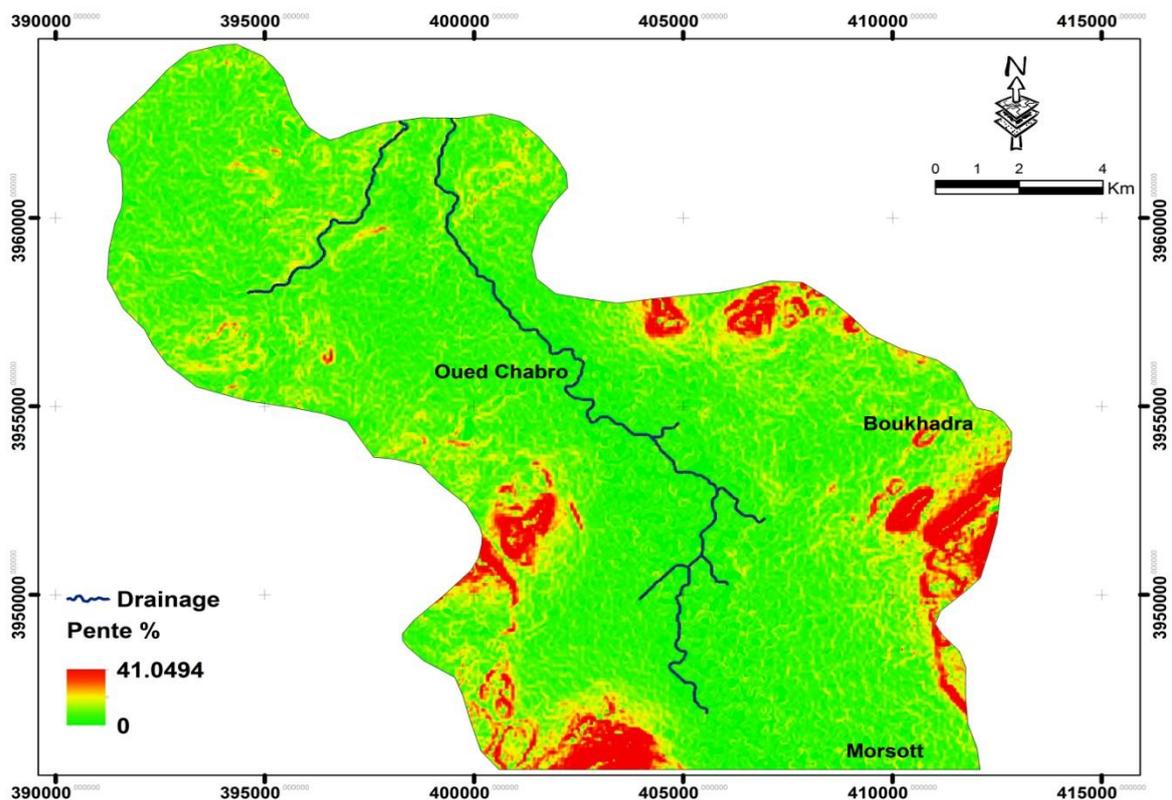


Figure 72: Carte de pente de terrain

La couche topographique affiche une pente (0-41%), généralement, la pente dans la zone d'étude est faible représentée par la plaine, inversement la pente la plus élevée est située autour des montagnes. Un poids de 1 est adopté dans le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC.

6. Carte de l'impact de la zone vadose

La zone vadose est le matériau insaturé au-dessus de la nappe phréatique. Elle contrôle le passage et l'atténuation des contaminants lessivés vers les aquifères (Sangam Shrestha, 2016), si elle se caractérise par une bonne perméabilité facilitant ainsi l'infiltration des eaux polluantes qui vont percoler vers la couche aquifère. Les informations sur ce paramètre obtenues sur la base des colonnes lithologiques des forages et des résultats des prospections géophysiques.

L'impact du paramètre de zone vadose est représenté par la même couche géologique, le sable, le gravier avec du limon et de l'argile d'âge Mioplio-quadernaire couvrent toute la zone d'étude.

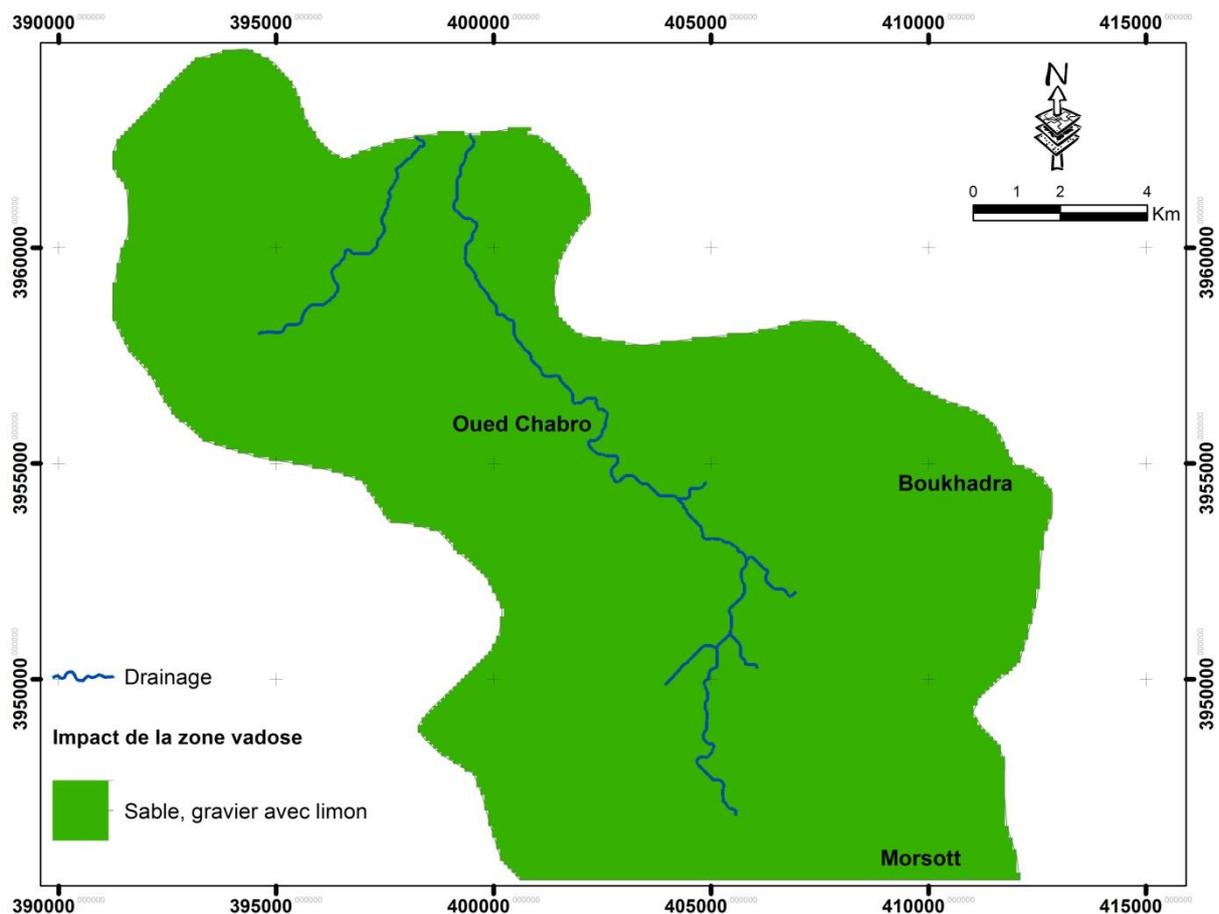


Figure 73: Carte d'impact de la zone non saturée

7. Carte de la conductivité hydraulique

L'interprétation des valeurs de la conductivité hydraulique a été gênée d'une part par le manque des points et, d'autre part, par leur mal distribution. Pour ces raisons, la délimitation des aires était réalisée avec beaucoup d'attention pour minimiser les erreurs qui peuvent résulter de l'insuffisance des données.

La carte de la conductivité hydraulique a permis de dégager trois aires; l'aire la plus vulnérable étant très restreinte et elle se limite au cote Nord-Est, là où les valeurs égales à $3 \cdot 10^{-5}$ m/s et qui représente la texture sableuse. Par contre, les zones modérément vulnérables on leur constate aux alentours de DJ Boukhadra au Nord-Est ainsi la partie Nord.

La zone la moins vulnérable occupe le centre du fossé d'effondrement; la conductivité hydraulique dans cette classe descend au $5 \cdot 10^{-6}$ m/s et elle domine les trois classes.

Des notes de 4 à 10 et un poids de 3 seront attribués à ce paramètre.

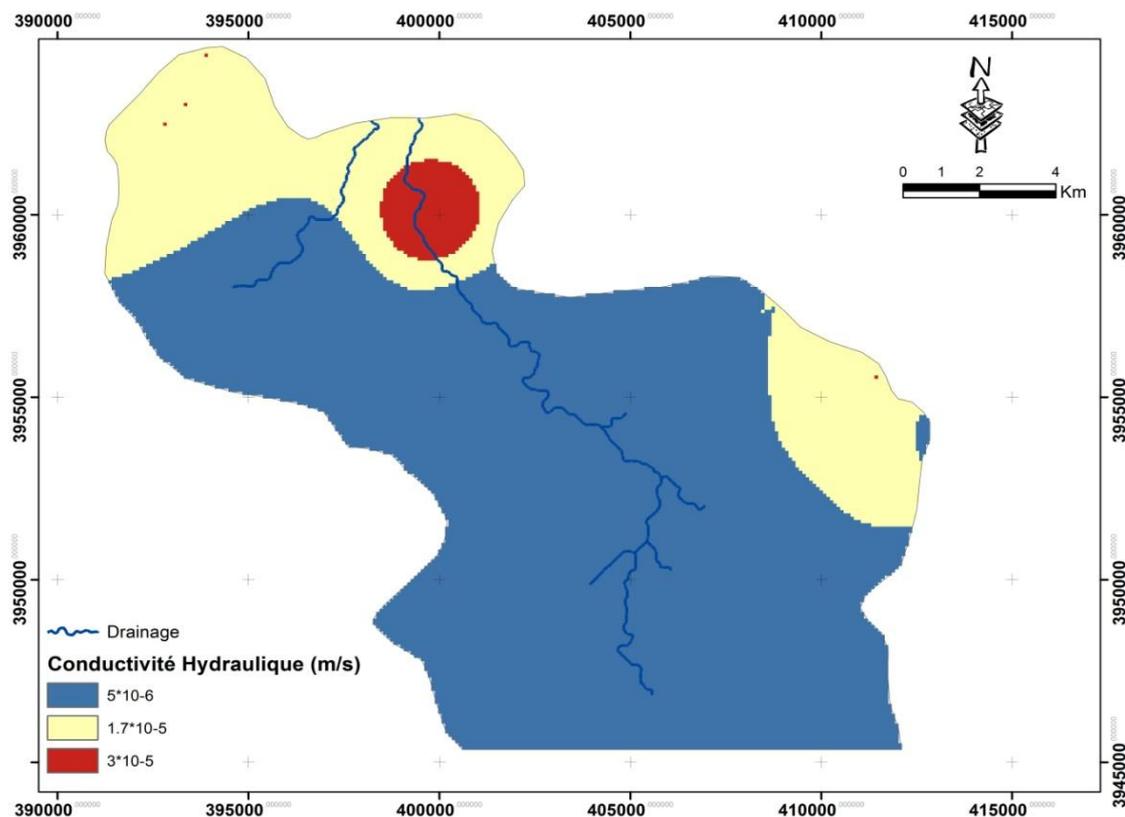


Figure 74: Carte de la conductivité hydraulique dans la zone d'étude

8. Carte de vulnérabilité selon DRASTIC

La combinaison des sept cartes thématiques préconisées par la méthode DRASTIC nous a permis de dresser une carte de vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère de Morsott-Boukhadra-ElAouinet, qui met en évidence trois classes à différents degrés de vulnérabilité (figure 76) ; les zones à faible vulnérabilité occupent la majorité de la superficie de la plaine (56 %) et elles se limitent au centre du fossé d'effondrement. Les zones à vulnérabilité modérée occupent (34%) de la plaine, alors que les aires à vulnérabilité élevées (10 %) paraissent réduites à la zone Nord-Est littorale surtout aux alentours des affleurements sableux.

La carte de vulnérabilité réalisée par la méthode DRASTIC illustre des classes qui ont été affectées par l'interaction des différents paramètres.

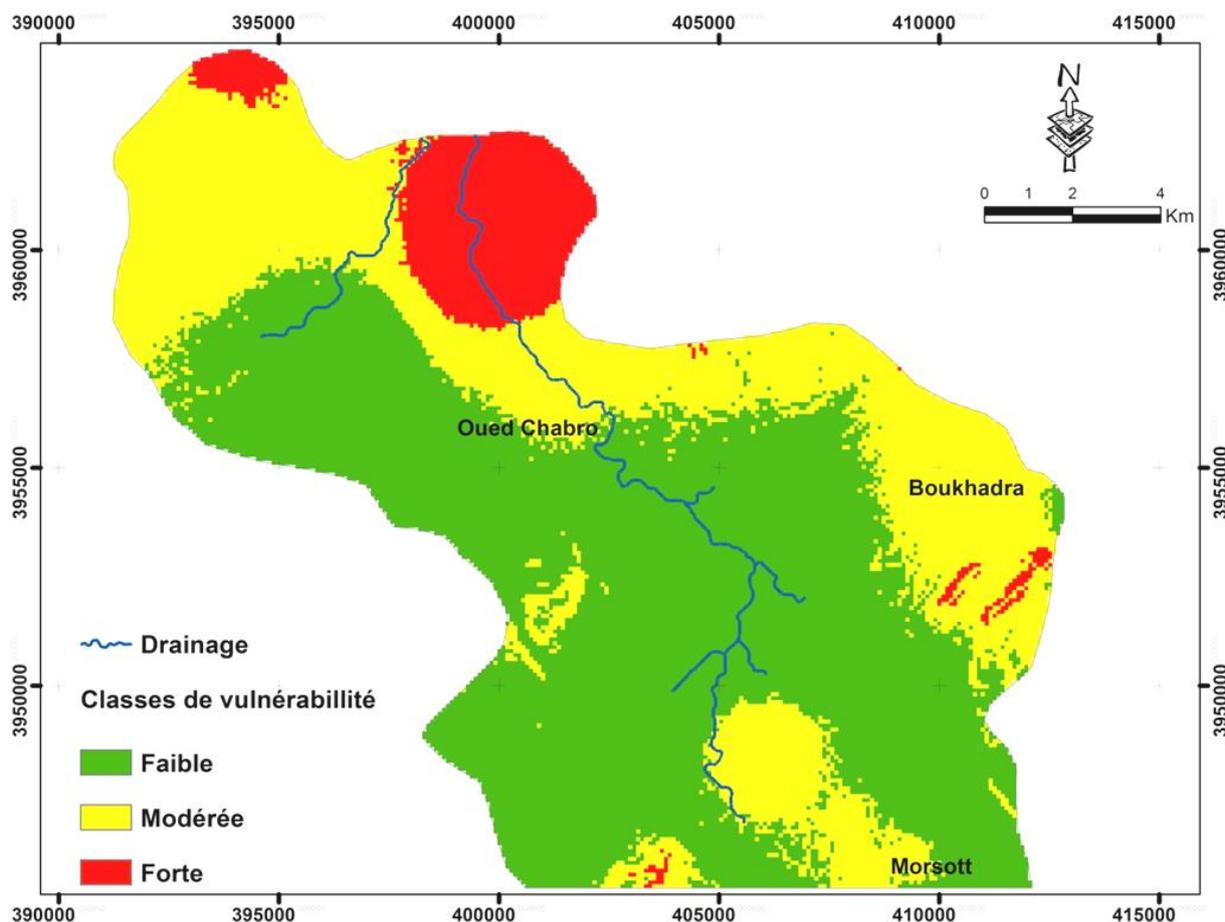


Figure 75: Carte finale selon la méthode DRASTIC (Novembre 2016)

La carte de vulnérabilité réalisée par la méthode DRASTIC illustre des classes qui ont été affectées par l'interaction des différents paramètres. Néanmoins, on observe que quatre facteurs principaux sont responsables, plus que les autres, de la caractérisation de la vulnérabilité qui sont :

1. La lithologie de la zone vadose : lorsqu'elle est constituée par des matériaux sableux graveleux riches en limons argileux (à comportement faiblement perméable), on assiste à une limitation de la vitesse de propagation du contaminant à travers des zones non saturées. Cette vitesse diminue conjointement avec la vulnérabilité. Dans le cas contraire, on observe un zonage des classes de forte vulnérabilité.
2. La conductivité hydraulique (conjointement au gradient hydraulique) régule la vitesse et la direction du mouvement du contaminant ; elle est affectée, elle-même, par la taille des grains, la stratification des couches et les fracturations.
3. La lithologie des couches aquifères : la texture sablo-graveleuse formée par d'importantes proportions d'argiles et limons contribue à la diminution de la propagation horizontale du contaminant à travers de la zone saturée en réduisant la vulnérabilité d'une manière sensible. Lorsque l'aquifère est constitué par des matériaux relativement moins perméable, alors les possibilités d'atténuation du contaminant s'élèvent en réduisant la vulnérabilité du système.
4. La profondeur à la nappe d'eau : dans le cas de la faible vulnérabilité la nappe d'eau se situe, généralement, à plus de 15 m de profondeur (en dépassant même les 31 m dans les zones de Dj Boukhadra et Dj Mesloul). Par contre, les zones les plus vulnérables sont marquées par une nappe très peu profonde. Plus la profondeur à la nappe est grande, plus le temps de transit du contaminant de la surface du sol jusqu'à la zone saturée sera important ; la capacité d'atténuation (qui évolue dans le sens contraire de la vulnérabilité) va augmenter par conséquence.

D'ailleurs, la topographie et le type de sol affectent la recharge et ils conditionnent la vulnérabilité de l'aquifère d'une manière notable. Le sol exerce un impact positif sur l'atténuation du polluant à travers l'adsorption, la filtration et la biodégradation. D'autant plus, l'épaisseur du sol ainsi que la pente topographique déterminent le trajet, la direction et le temps disponible à l'agent de contamination.

Ainsi, on conclut que les divers facteurs conçus par la méthode DRASTIC sont des variables interdépendantes et jointement reliées.

III. Etude de validité de la méthode DRASTIC :

A. Modèle de validation :

1. Validation par les nitrates:

Il existe plusieurs méthodes de validation de la vulnérabilité des eaux souterraines, dans la zone d'étude, le modèle a été validé en comparant le rendement (indice de vulnérabilité) avec la concentration de nitrate observée dans les eaux souterraines.

La raison de la sélection des nitrates était que les principales sources de nitrates dans les eaux souterraines sont diverses activités anthropiques comme les engrais utilisés dans le domaine agricole.

En effet, 26 puits de la zone sont échantillonnés, au cours du mois de novembre 2016. Les concentrations de nitrate se sont avérées être de l'ordre de 1.6-22 mg / l.

(figure77) indique clairement que les tendances des indices de concentration et de vulnérabilité des nitrates ont été rapprochées dans la plupart des cas, sauf quelques points.

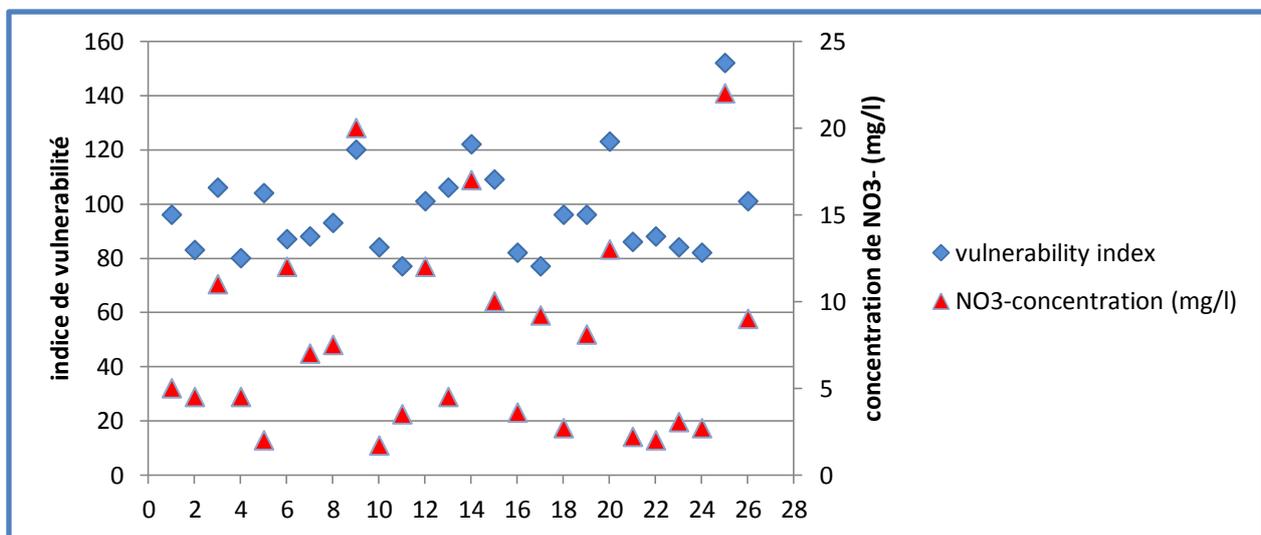


Figure 76: Variation de l'indice de vulnérabilité avec la concentration de NO₃⁻

2. Validation par des méthodes statistiques:

Des tests de sensibilité ont été utilisés par Evans et Myers en 1990, Babiker et al en 2005 et Saidi en 2011, afin d'éviter l'impact des erreurs et des incertitudes des paramètres d'entrée sur la carte finale (élément en sortie). Ces tests de sensibilité sont utilisés généralement pour étudier la validité de la méthode DRASTIC vu le nombre important de paramètres qu'elle fait intervenir.

Ces études statistiques permettent aussi de calculer le poids réel de chaque paramètre qui devrait être introduit dans les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité pour aboutir à des résultats plus efficaces que celles obtenus en utilisant les poids théoriques fixées par les méthodes standards.

a) *Test de sensibilité par suppression de carte*

Il a été introduit par Lodwick et al. (1990) et il décrit la sensibilité de la carte de vulnérabilité en supprimant une ou plusieurs cartes de l'analyse. L'indice de sensibilité (S) est déterminé par l'équation suivante :

$$S_i = \left| \frac{V}{N} - \frac{V'}{n} \right|$$

b) *Sensibilité de chaque paramètre :*

L'indice DRASTIC est très sensible aux scores et poids attribués pour chaque paramètre qui sont arbitraires (Al-Adamat et al., 2003). C'est pour cette raison, Napolitano et Fabbri en 1996 ont introduit la sensibilité des paramètres pour pouvoir comparer entre le poids « théorique » et le poids « effectif » par l'intermédiaire de la formule au dessous :

$$W = ((P_r \times P_w) \div V) \times 100$$

c) *Application du test de sensibilité à l'indice de vulnérabilité DRASTIC :*

Une synthèse statistique des notes attribuées pour les sept paramètres de la méthode DRASTIC est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 21) :

Tableau 21: Statistique des paramètres de l'indice DRASTIC

<i>Paramètre</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart type</i>
D	1	9	2.75	1.90
R	1	1	1	0
A	4	10	5.03	1.89
S	6	9	6.31	0.66
T	1	10	1.43	0.85
I	6	6	6	0
C	4	10	5.03	1.89

D'après le tableau 21, le risque le plus élevé est du essentiellement aux paramètres type de sol (moyenne = 6.31), l'impact de la zone non saturée (moyenne = 6) et relativement à la lithologie de l'aquifère et la conductivité hydraulique (moyenne = 5,03). De moindre importance, se succèdent les trois paramètres la profondeur du plan d'eau, recharge nette et la topographie, bien que son poids est relativement important.

▪ **L'analyse de sensibilité par suppression de carte**

Le test de sensibilité ainsi établi aide à valider et évaluer la fiabilité des résultats analytiques qui sont à la base de l'évaluation des cartes de vulnérabilité et permettant une meilleure interprétation des cartes de vulnérabilité (Raj Pathak et al., 2008).

Le tableau 22 illustre la statistique de variation de l'indice de vulnérabilité à chaque fois qu'on élimine une carte relative à un paramètre du calcul de l'indice de vulnérabilité. Ainsi, la plus forte variation est observée lors de la suppression du paramètre impact de la zone non saturée (moyenne d'indice de variation = 31,68). Ceci est du en premier lieu à la lithologie de la zone non saturée qui est couverte par une couche quaternaire perméable dans sa quasi-totalité et en deuxième lieu au poids théorique relativement élevé attribué à cette couche.

Tableau 22: Statistique du test de sensibilité par suppression d'une carte de l'indice DRASTIC

<i>Paramètre supprimé</i>	<i>Indice de variation (%)</i>			
	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
D	7.10	20.64	15.34	14.07
R	5.30	2.62	4.22	0
A	15.92	19.65	16.18	28.05
S	15.92	11.80	13.45	8.26
T	0.46	3.49	2.93	0.79
I	39.81	19.69	31.68	0
C	15.92	19.65	16.18	28.05

En outre, l'indice de vulnérabilité semble être sensible à la suppression des deux paramètres ; conductivité hydraulique et la nature lithologique de l'aquifère d'eau et ceci est dû essentiellement à leurs poids théorique élevé (moyenne d'indice de variation est de 16,18). Le paramètre qui ne provoque pas de grande variation dans le cas de sa suppression est celui de la topographie (2,93%). Aussi la suppression du paramètre recharge ne provoque pas de grande variation (moyenne = 4,22) malgré son poids théorique élevé. Cet indice de variation faible peut être expliqué par la recharge nette relativement faible et donc sa moindre contribution dans la vulnérabilité de la nappe.

Le tableau 23 résume la variation de l'indice de vulnérabilité suite à la suppression d'un ou plusieurs paramètres du calcul de l'indice DRASTIC. Le processus adopté dans la suppression des cartes est comme suit: les couches qui causent la variation la plus faible dans l'indice DRASTIC vont être enlevées les premiers et vice versa (Rahman, 2008). La variation la plus élevée a été calculée lors de la suppression du paramètre lithologie de la zone non saturée (69.17 %) et la variation la plus faible est observée suite à la suppression du paramètre topographie (2.93%). Généralement le calcul a révélé que plus le nombre de couches supprimées du calcul augmente, plus l'indice de variation augmente.

Bien que le calcul du test de sensibilité ait montré l'importance des paramètres nature de la zone vadose et la conductivité hydraulique dans l'évaluation de la vulnérabilité (leur suppression provoque une grande variation), l'interprétation de quelques indices de variation mérite d'être bien étudiée. Ce qui signifie que la suppression de telles couches relatives aux paramètres utilisés dans le calcul de vulnérabilité provoque une variation considérable ce qui peut influencer les résultats et par la suite la prise de décision.

Tableau 23: Statistique du test de sensibilité par suppression d'une ou plusieurs cartes de l'indice DRASTIC

<i>Paramètre supprimé</i>	<i>Indice de variation (%)</i>			
	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
D,R,A,S,I,C	0.46	3.49	2.93	0.79
D,A,S,I,C	8.33	16.47	13.22	2.28
D,A, I,C	19.87	30.58	26.05	2.88
A,I,C	26.41	53.04	39.35	6.79
I,C	47.5	63.47	54.26	4.44
I	62.5	80.76	69.17	4.45

- **Test de sensibilité à paramètre unique:**

Bien que le test de sensibilité déjà décrit ait montré l'importance de chaque paramètre de DRASTIC dans l'évaluation de la vulnérabilité de la zone d'étude, le test de sensibilité à paramètre unique compare leurs poids théoriques avec ceux effectifs (Babiker et al., 2005).

Le poids « effectif » calculé pour chaque paramètre est fonction des six autres paramètres et du poids attribué par le modèle DRASTIC. Le traitement des données a révélé que le poids « effectif » calculé montre une déviation par rapport au poids théorique (Tableau 24).

Tableau 24: Analyse statistique du test de sensibilité à paramètre unique de l'indice DRASTIC

<i>Paramètre supprimé</i>	<i>Poids théorique</i>	<i>Poids théorique relatif (%)</i>	<i>Poids effectif (%)</i>			
			<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Moy</i>	<i>Ecart type</i>
D	5	21.74	4.50	30.43	13.30	7.75
R	4	17.39	2.56	5	4.10	0.59
A	3	13.04	10.43	22.64	14.90	3.64
S	2	8.69	10.43	15	12.82	1.23
T	1	4.35	4.71	11.76	9.11	2.04
I	5	21.74	19.23	37.5	30.82	4.45
C	3	13.04	10.43	22.64	14.90	3.64

L'observation des poids effectifs ou calculés montre que la nature de la zone non saturée est le paramètre le plus important dans l'évaluation de la vulnérabilité du fait qu'il contribue avec un poids « effectif » de 30,82 % contre un poids théorique de 21.74%.

On remarque aussi que le poids calculé des paramètres nature de la lithologie de l'aquifère et la conductivité hydraulique est de 14.90 % et qui s'approche du poids attribué par le modèle DRASTIC 13.04%.

Pour le paramètre type de sols, le poids effectif est de 12.82% et celui théorique 8.69% sont. Toutefois, les valeurs du poids effectifs de la recharge nette et la profondeur du plan d'eau (respectivement 4.10 % et 13.30%) sont très faibles par comparaison avec leurs poids « théoriques » (respectivement 17, 39 % et 21.74 %).

La comparaison entre les poids effectifs et ceux théoriques révèle une grande différence surtout au niveau des paramètres lithologie de l'aquifère, recharge nette et impact de la zone vadose. En effet, le poids « effectif » ou calculé du paramètre Impact de la zone vadose dépasse énormément le poids théorique à cause du matériau perméable du système aquifère. A noter que le paramètre recharge, bien qu'il présente un poids théorique dépassant celui calculé, est caractérisé par sa faible variabilité, donc sa faible contribution à la vulnérabilité de la nappe.

IV. Présentation de la méthode GOD.

GOD est l'une des méthodes paramétriques développée par Foster en 1987. C'est une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée (Murat et al., 2003). La spécificité de cette méthode c'est qu'elle étudie la vulnérabilité de l'aquifère face au transfert vertical de contaminants à travers la zone vadose et ne tient pas compte des migrations latérales. Trois critères sont considérés dans cette méthode (Foster, 1987 ; Murat et al., 2003):

- L'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (*Groundwater hydraulic confinement*) ;
- Les caractéristiques des couches qui surmontent la zone saturée de l'aquifère (telles que la lithologie, le degré de consolidation, la porosité et la perméabilité) (*Overlying strata in terms of lithological character and degree of consolidation that determine their contaminant attenuation capacity*) ;
- La profondeur à la nappe d'eau (cas d'aquifère libre) ou la profondeur du toit de l'aquifère (cas de nappe captive) (*Depth to groundwater table (unconfined) or to groundwater strike (confined)*).

Les paramètres sont évalués par des cotes allant de 0 à 1 avec des valeurs qui évoluent dans le même sens de la vulnérabilité relative du facteur correspondant. L'application de GOD aboutie à la réalisation des cartes thématiques et de la carte synthèse selon la même procédure suivit par DRASTIC.

L'indice GOD est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Indice}_{\text{GOD}} = C_G * C_O * C_D$$

Avec, C : cote du paramètre correspondant.

Tableau 25: Cotation des différents paramètres de la méthode GOD (Foster et al., 2002)

PARAMETRE G	
Type d'aquifère	Cote
Aucun aquifère	0
Artésien	0,1
Captif	0,2
Semi-captif	0,3
Libre avec couverture	0,4 à 0,6
Libre	0,7 à 1
PARAMETRE D	
Profondeur à la nappe	Cote
Au-delà de 100	0,4
Entre 50 et 100	0,5
Entre 20 et 50	0,6
Entre 10 et 20	0,7

Entre 5 et 10	0,8
Entre 2 et 5	0,9
Entre 0 et 2	1
PARAMETRE O	
Lithologie de la zone vadose	Cote
Sol résiduel	0,4
Limon alluvial ; loess; shale ; calcaire fin	0,5
Sable éolien ; siltite ; tuf ; roches ignées ou métamorphiques fracturées	0,6
Sable et gravier ; grès ; tuf	0,7
Gravier (colluvion)	0,8
Calcaire	0,9
Calcaire fracturé ou karstique	1

A. Application de la méthode GOD à l'aquifère :

1. Carte de type d'aquifère :

Le paramètre « G » de cette méthode désigne le type d'aquifère ; il sert à déterminer si l'aquifère est libre, semi-captif ou captif ; la méthode sépare aussi, la catégorie « aquifère libre », en fonction de l'existence ou l'absence de la couverture (en tenant en compte la nature et l'épaisseur de celle-ci). L'évaluation de la vulnérabilité relative à ce paramètre a permis de dégager un seul type d'aquifère, portant une cotation de 0,4, désigne où la nappe aquifère est libre étant couverte par des formations lithologiques susceptibles de ralentir l'infiltration du contaminant de la surface vers la zone saturée ; elle occupe toute la zone d'étude (figure 78).

2. Carte de la lithologie de la zone vadose :

Ce paramètre se réfère à la nature lithologique de la zone non saturée. L'estimation de la vulnérabilité relative à ce paramètre a permis de distinguer une seule classe; le sable, le gravier avec du limon et de l'argile d'âge Moi-plio-quaternaire couvrent toute la zone d'étude. Pour cette raison, GOD lui attribue une cote de 0,5. (Figure 79).

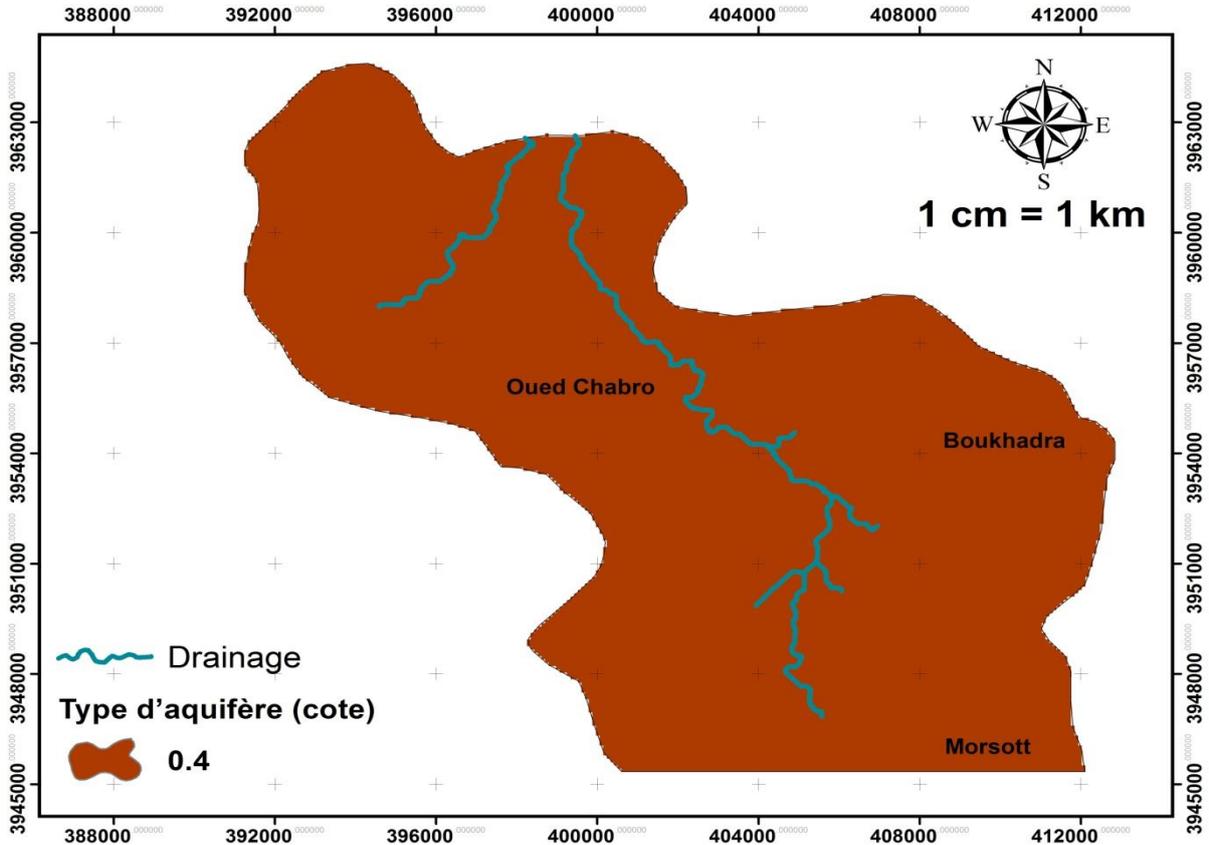


Figure 77: Carte du type d'aquifère

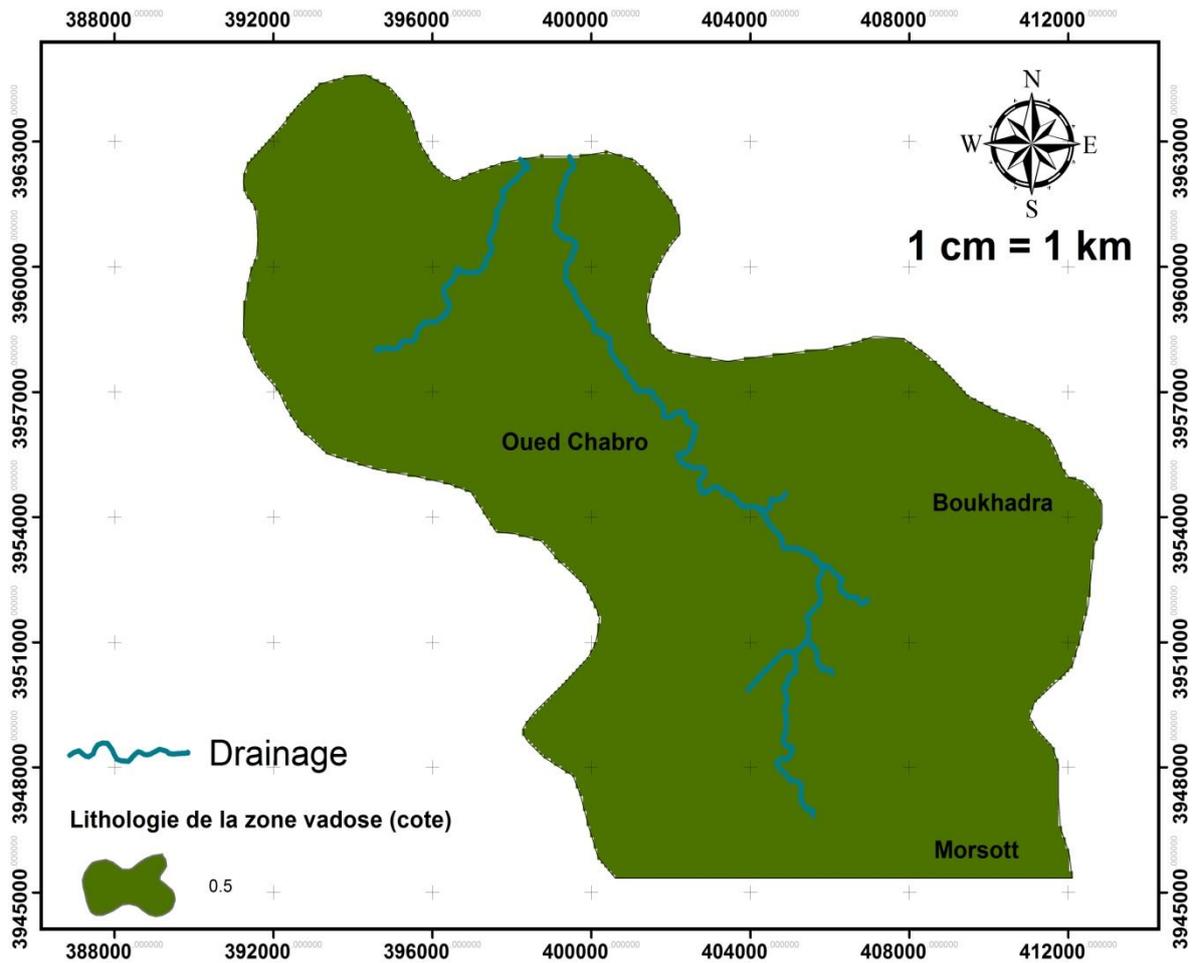


Figure 78: Carte de la lithologie de zone non saturée

3. Carte de la profondeur à la nappe :

L'évaluation de la « profondeur à la nappe d'eau » par la méthode GOD aboutie à la distinction de Quatre catégories; Les zones les plus vulnérables sont celles où la profondeur du niveau de la nappe se trouve à moins de 5 m (cotes de 0,9). Elles se répartissent sur toutes les zones proches à Oued Chabrou coté Morsott, et à Remila coté ElAouinet. Les zones les moins vulnérables sont celles où la profondeur à la nappe dépasse 20 m (cotes 0,5 et 0,6) ; elles dominent les zones montagneuses (Djabel Boukhadra et Djabel Mesloul).

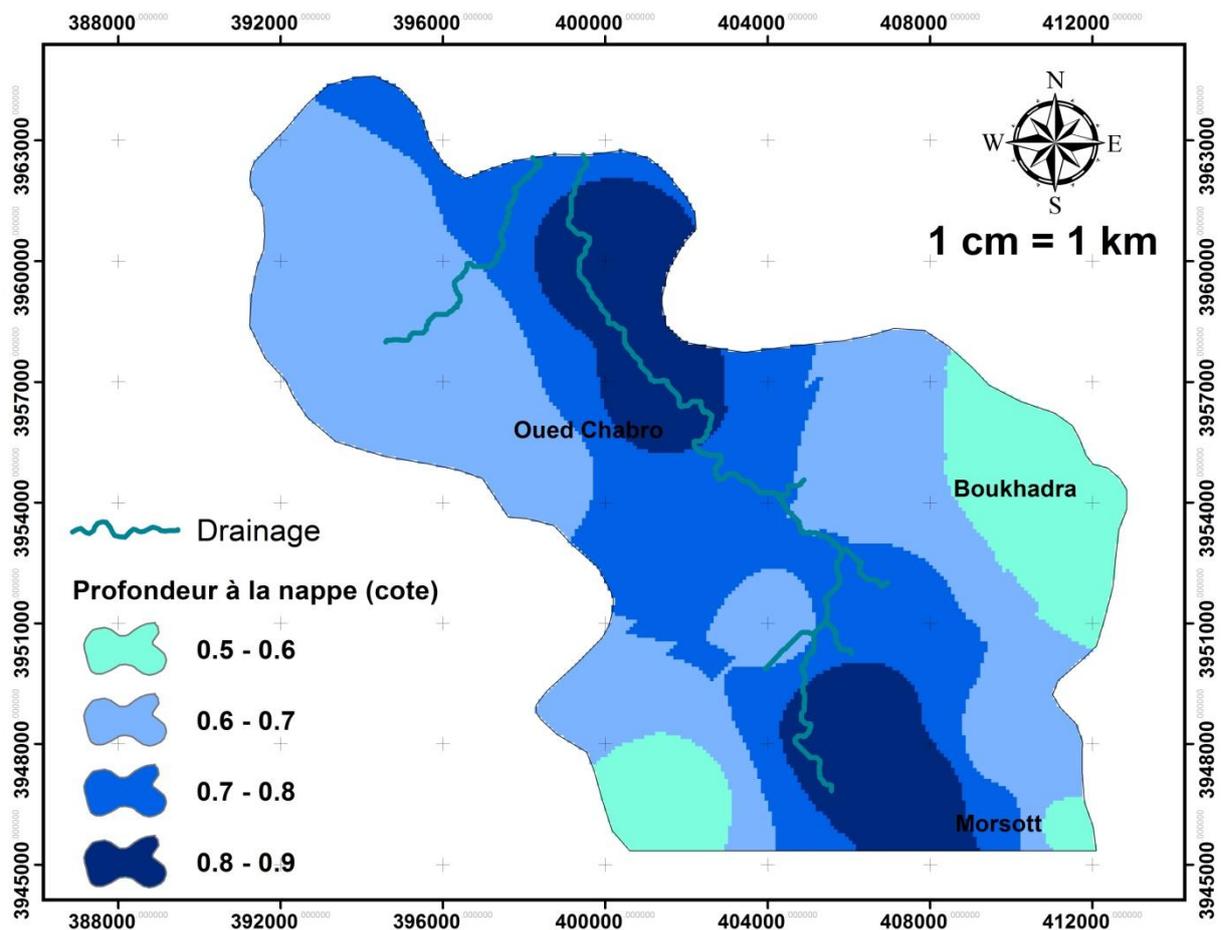


Figure 79: Carte de la profondeur à la nappe

4. Carte de vulnérabilité selon la méthode GOD

La superposition des trois cartes thématiques préconisées par la méthode GOD nous a permis d'établir une carte de vulnérabilité intrinsèque pour l'aquifère de Morsott-Boukhadra et ElAouinet (Figure 81) ; la carte obtenue se caractérise par la prédominance de la classe de vulnérabilité modérée. Cette carte met en évidence trois classes de vulnérabilité qui se distribuent de la manière suivante : les zones à faible vulnérabilité occupent 13,5 % de la surface de la plaine et elles s'observent à la partie Est aux alentours du Dj Boukhadra et à la partie extrême Sud-Ouest.

Les zones à vulnérabilité modérée occupent la majorité de la superficie de la plaine (58%)

La répartition de cette classe est régie par la l'interaction entre les moyennes vulnérabilités relatives des cartes paramétriques.

Les zones à forte vulnérabilité paraissent à la partie Sud de la plaine et la partie NE étendue sur 28.5 % de la surface totale de la plaine.

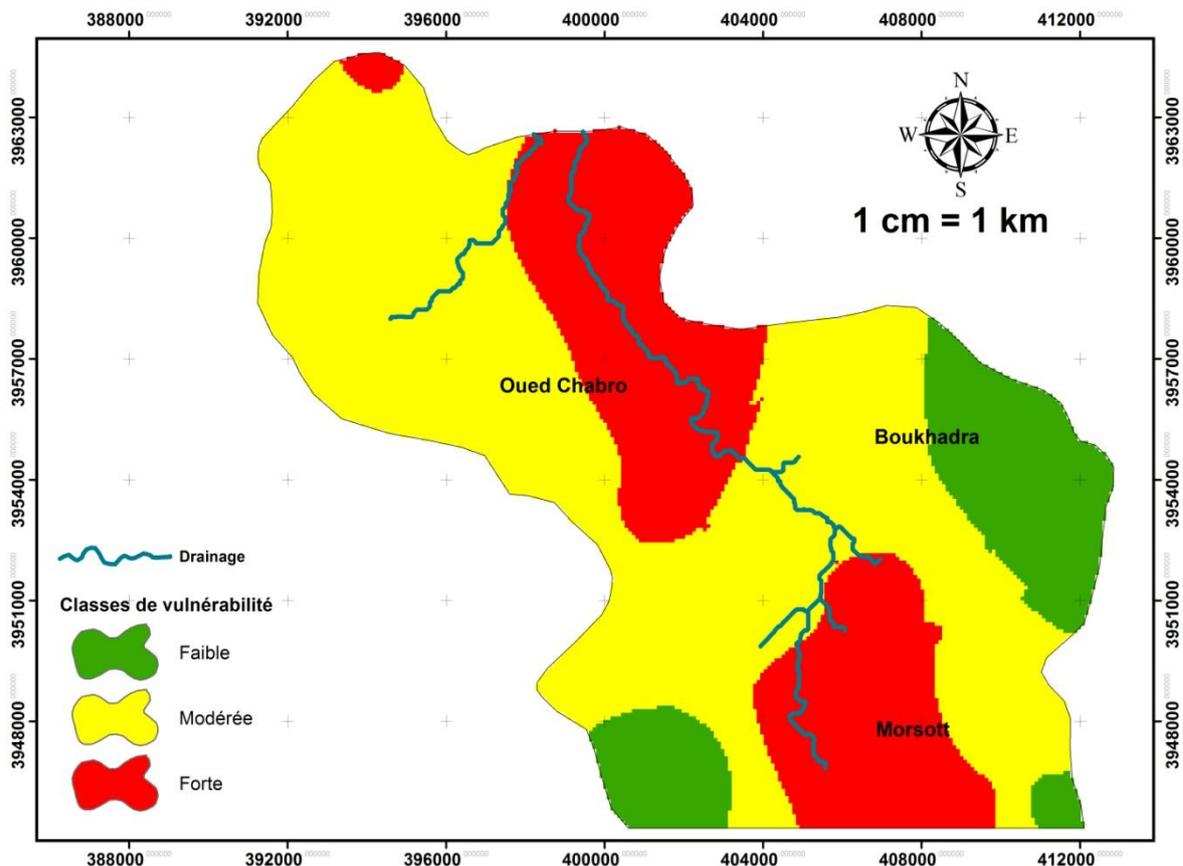


Figure 80: Carte de vulnérabilité selon la méthode GOD

V. Analyse comparative des deux méthodes utilisées

Dans notre étude, les deux méthodes employées (DRASTIC, GOD) sont comparées pour évaluer leurs efficacités dans l'étude cartographique de la vulnérabilité à la pollution des aquifères alluviaux ayant des caractéristiques lithologiques, morphologiques et climatiques ressemblant à celles de notre cas. Les faibles variations pluviométriques interannuelles et les changements piézométriques insignifiants de la nappe malgré l'état pluviométrique annuel sont deux éléments qui nous ont poussés à évaluer la vulnérabilité. Les indices de vulnérabilité ont été divisés en trois classes relatives (faible, modérée et forte) dans l'objectif est d'avoir un point de comparaison des deux méthodes.

L'étude des cartes de vulnérabilité réalisées par les différentes méthodes indique que la classe «vulnérabilité faible» couvre la plus part du secteur d'étude dans le cas de la méthode DRASTIC alors qu'une vulnérabilité modérée domine la carte qui résultait de l'application de la méthode GOD (Figure 82).

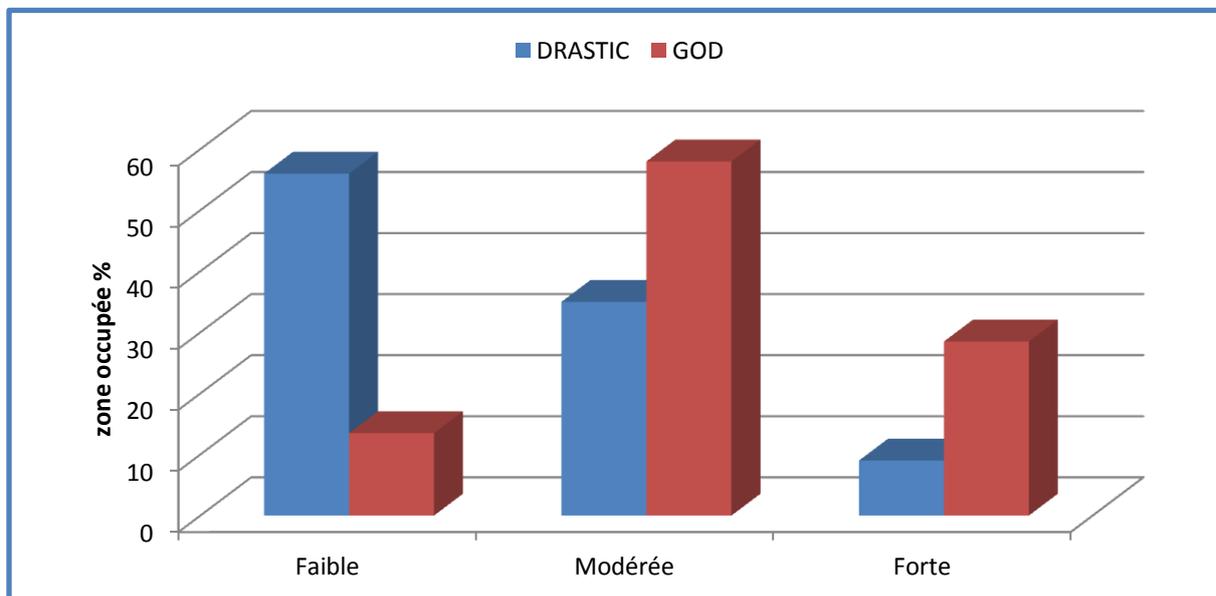


Figure 81: Comparaison des deux méthodes utilisées

Les différences dans les étapes de traitement de données entre les méthodes GOD et DRASTIC ont abouti à des résultats différents. Les principales différences concernent, entre autres, le nombre de cartes paramétriques obtenues et les zones de vulnérabilités finales délimitées.

En effet, le nombre de classes déterminées dans les cartes paramétriques est plus grand dans celles élaborées par la méthode DRASTIC que dans celles obtenues via GOD.

Ceci est en relation avec la grandeur de l'intervalle de variation des valeurs de chaque paramètre ainsi que la largeur de la gamme de subdivision de cet intervalle. Dans la méthode DRASTIC les intervalles sont moins larges et les gammes de subdivision sont plus réduites. Ceci entraîne l'apparition de nombreuses classes dans les cartes paramétriques élaborées par cette méthode. D'autre part, le nombre de cartes paramétriques est plus grand dans la méthode DRASTIC que dans la méthode GOD.

La carte paramétrique de la profondeur à la nappe d'eau présente des profondeurs qui varient, souvent, de 0 à 31 m. Il faut aussi noter la différence entre les systèmes de cotation de ce paramètre pour les deux méthodes, en fait, les deux cartes présentent de légères variations dans la répartition des cotes qui engendre une classification différente des surfaces. Le paramètre « nature lithologique de la zone non saturée » représente le même phénomène dans les deux méthodes ; de même, en ce qui concerne le type d'aquifère, la méthode GOD évalue ce paramètre en fonction du degré du confinement ce qui renvoie à l'évaluation de la qualité de la zone non saturée ou au type de comportement qu'elle confère à l'aquifère (libre ou confiné). Alors que dans la méthode DRASTIC, la classification s'effectue en fonction de la nature des matériaux présents, ce qui revient à la détermination quantitative et qualitative des matériaux non saturés qui surmontent la nappe aquifère. Cette conception choisie par les auteurs de la méthode GOD conjuguée avec l'insuffisance des paramètres implique une déficience dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution.

D'autant plus, GOD sous-estime l'importance de la recharge et elle dévalorise le rôle de la profondeur à la nappe d'eau en lui attribuant le même poids que les autres paramètres. Aussi, la méthode permet de classer les secteurs en fonction du degré de porosité, une caractéristique régionale dont l'information reste très difficile à obtenir localement pour les aquifères alluviaux et qui ne varie pas avec les possibles changements du niveau de la nappe d'eau (Salhi, 2004 ; Salhi *et al.*, 2007).

VI. Conclusion :

Dans cette partie, les techniques DRISTIC-SIG et GOD-SIG sont utilisées pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines de l'aquifère Morsott-Boukhadra-ElAouinet qui est située dans une région semi-aride NE Algérien.

L'application du modèle DRASTIC dans une région semi-aride fournit généralement une évaluation satisfaisante de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à la pollution.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC a été calculé et les valeurs ont été reclassées en trois classes (faible, moyenne et élevée) qui occupent respectivement 56%, 34% et 10%, la zone la moins vulnérable étant dispersée sur toute la zone d'étude, d'autre part les zones les plus vulnérables se trouvent dans la partie Nord et Nord-Est, ce qui nécessite des mesures de protection dans ce domaine.

L'analyse de sensibilité a montré que le paramètre de l'impact de la zone vadose est le plus efficace dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Afin de réduire la subjectivité de la carte de vulnérabilité, une nouvelle carte de répartition des nitrates a été produite sur la carte de vulnérabilité; cette carte a révélé que les concentrations maximales de nitrate correspondaient à certaines des valeurs de vulnérabilité DRASTIC les plus élevées.

Cependant, des valeurs élevées de nitrate sont apparues dans d'autres zones de faible vulnérabilité, la dernière présentant une forte similitude entre les zones très vulnérables et les fortes concentrations de nitrates.

Dans le cas du modèle GOD, Ceci est en relation avec la grandeur de l'intervalle de variation des valeurs de chaque paramètre ainsi que la largeur de la gamme de subdivision de cet intervalle. Les résultats sont dus, aussi, au fait que GOD sous-estime l'importance de la recharge et dévalorise le rôle de la profondeur à la nappe d'eau en lui attribuant le même poids que les autres paramètres. D'autant plus, la méthode permet de classer les secteurs en fonction du degré de porosité ; une caractéristique régionale dont l'information reste très difficile à obtenir localement pour les aquifères alluviaux et qui ne varie pas avec les possibles changements du niveau de la nappe d'eau.

La carte obtenue par l'application de la méthode GOD ; se caractérise par la prédominance de la classe de vulnérabilité modérée. Cette carte met en évidence trois classes de vulnérabilité qui se distribuent de la manière suivante : les zones à faible vulnérabilité occupent 13,5 %, les zones de vulnérabilité modérée occupent 58% et 28.5% classe de vulnérabilité forte.

Il paraît que la quantité d'information exigée par la méthode GOD ne soit pas suffisante pour comprendre le fonctionnement du système aquifère.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal du présent travail consiste en l'élaboration d'un document cartographique d'appui à la décision et à l'aménagement du territoire en vue d'un développement socioéconomique soutenable. Néanmoins, la réalisation des cartes de vulnérabilité de l'aquifère Morsott-Boukhadra-ElAouinet n'a pas été possible sans étudier avec soin les conditions géologiques et les variables climatologiques de la région concernée. D'autant plus, la reconnaissance géophysique et l'examen hydrogéologique de cet aquifère nous ont permis de mettre le point sur sa structure lithologique et ses potentialités hydrologique.

De point de vue général, la zone d'étude est située entre deux grandes régions, Morsott et El Aouinet, pourra constituer un pôle de développement pour les prochaines décennies. L'essentiel des besoins en eau provient et continuera de provenir des eaux souterraines du bassin d'effondrement de Morsott. La question de leur disponibilité se posera de manière accrue.

Il s'agit d'un bassin d'effondrement constitué en majeure partie par des terrains crétacés formant une série d'anticlinaux et de synclinaux souvent déversées. La série stratigraphique se présente sous forme d'alternance de formations carbonatées de calcaires, de marno-calcaires et de marnes argileuses.

La partie centrale remplie par un dépôt alluvial hétérogène constitué de sables, graviers et conglomérats du Plio-Quaternaire et de l'Actuel, ainsi elle sépare 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.

Du point de vue climatologique

La région d'étude sur le plan météorologique, fait partie des zones semi-aride, influencée par les facteurs géographiques (altitude, éloignement de la mer et orientation des versants des montagnes) et par les facteurs atmosphériques essentiellement imposés par le régime sub-saharien. Les précipitations, dont la moyenne annuelle sont comprise entre 305 et 322 mm/an, ont lieu à la fin de l'hiver et au début de l'été, résultant d'un contraste thermique dû à la présence de massifs élevés entourant la plaine, provoquant des mouvements convectifs qui sont à l'origine de pluies orageuses très fréquentes.

L'établissement du bilan hydrique des stations climatologiques, afin d'évaluer les besoins en eaux des systèmes hydriques de la région, selon la méthode utilisée de Thornthwaite : l'ETR est de l'ordre 322 mm soit 99% des précipitations.

Du point de vue hydrogéologique :

Les formations perméables qui peuvent constituées des aquifères plus ou moins importants sont : les calcaires et marno calcaire du Turonien aux calcaires, grés, dolomies du Trias et aux alluvions, limons, croûte calcaire du Plio-quaternaire

L'observation de la carte piézométrique montre une surface piézométrique conforme à ce que l'on attendrait d'une nappe d'eau souterraine unique, la morphologie des courbes indique un écoulement de deux sens opposés convergeant au centre vers l'oued Chabro, elle permet également d'identifier :

- 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.

Du point de vue hydrochimique:

Nous retiendrons en particulier que le chimisme est fortement lié à la lithologie, en effet qu'on observe que la quasi-totalité des échantillons examinés est regroupée dans le faciès de type chloruré sulfaté et calcique. La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique de l'aquifère et des conditions de recharge. En effet, l'abondance des formations salifères triasiques sur les limites Est et Ouest et les couches de croûte calcaire dans l'aquifère est en parfait accord avec ces faciès chimiques de l'eau.

La cartographie hydrochimique a montré une zonalité des concentrations des éléments dosés. Les zones de forte minéralisation sont localisées surtout au niveau de ces bordures riches en halite. Par contre les faibles valeurs de minéralisation sont localisées dans la partie amont au Sud de la région d'étude où l'influence des terrains triasiques est faible. On assiste donc à une concentration de la salinité d'amont en aval dans le sens de l'écoulement.

Concernant la cartographie de la vulnérabilité

En ce qui concerne la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère Morsott-Boukhadra-ElAouinet, l'information hydrogéologique reste essentielle pour la protection efficace et la gestion de la qualité de ces ressources. La protection efficace doit viser la prévention des problèmes à l'origine et doit exiger une base d'information continue et fiable afin de déterminer les problèmes qui existent et ceux qui peuvent survenir dans le futur.

Dans ce sens, les cartes de vulnérabilité à la contamination des eaux souterraines sont utilisées comme un guide pour l'emplacement de futurs projets de développements dans une région dans la finalité de minimiser l'impact négatif que portera le développement projeté sur les ressources hydriques environnantes. Ces cartes schématiques constituent, donc, un document

cartographique d'aider la prise de décision pour l'aménagement du territoire. Elles peuvent combler des besoins d'inventaire et guider les organismes de réglementation pour assurer une gestion globale de l'ensemble de la ressource en eau souterraine du territoire.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines se diversifient selon les besoins, les moyens, les objectifs recherchés et les organismes qui leurs développent pour une utilisation spécifique à leur pays, région ou province. Dans notre étude, deux méthodes ont été employées dans le but d'évaluer leurs efficacités dans l'étude cartographique de vulnérabilité à la pollution des aquifères qui ressemblent lithologiquement, morphologiquement et climatiquement notre aquifère *DRASTIC* et *GOD* figurent parmi les modèles les plus fameux et qui, en plus, ont démontré une bonne efficacité dans les études où ils ont été testés.

L'analyse des cartes de vulnérabilité réalisées par ces différentes méthodes indique que les vulnérabilités modérées et faibles couvrent la plus part du secteur d'étude, Ceci est dus, essentiellement au fait que *GOD* sous-estime l'importance de la recharge et dévalorise le rôle de la profondeur à la nappe d'eau en lui attribuant le même poids que les autres paramètres. D'autant plus, la méthode permet de classer les secteurs en fonction du degré de porosité ; une caractéristique régionale dont l'information reste très difficile à obtenir localement pour les aquifères alluviaux et qui ne varie pas avec les possibles changements du niveau de la nappe d'eau.

L'indice de vulnérabilité *DRASTIC* a été calculé et les valeurs ont été reclassées en trois classes (faible, moyenne et élevée) qui occupent respectivement 56%, 35% et 09%, la zone la moins vulnérable étant dispersée sur toute la zone d'étude, d'autre part les zones les plus vulnérables se trouvent dans la partie nord et Nord-Est, ce qui nécessite des mesures de protection dans ce domaine.

Le test de sensibilité a montré qu'il existe un grand écart entre les poids théoriques de la méthode *DRASTIC* et les poids « effectifs » ou réels. Cette révision des poids s'avère très importante pour donner des résultats plus pertinents et pour que les cartes de synthèse seront en accord avec la répartition des nitrates.

Recommandations :

Enfin, il reste à signaler que tous les axes de la présente étude nécessitent un approfondissement qui pourra faire l'objet d'autres travaux de recherche. A titre indicatif on peut proposer :

- Une actualisation des cartes de vulnérabilité en fonction de l'évolution de la société et des pressions anthropiques qui s'y exerce.

- Une étude plus détaillée doit être menée au niveau des secteurs vulnérables et à risques tant du point de vue quantitatif et qualitatif.
- une étude de modélisation d'écoulement et de transfert de nitrates doit être effectuée pour compléter les études de cartographie intrinsèque afin d'améliorer la qualité des documents de synthèse
- Une cartographie du risque à l'aide des données hydrochimiques et le SIG vont permettre la création des scénarios aidant à la gestion et la protection des ressources en eaux.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

BIBLIOGRAPHIE

- **ABED, S. (1982)**, Lithostratigraphie et sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du Dj. Amour (Atlas saharien). *Thèse 3ème cycle, Univ. de Pau.*
- **ADEL ZGHIBI, AMIRA MERZOUGUI, ISMAIL CHENINI, KARIM ERGAIEG, LAHCEN ZOUHRI, JAMILA TARHOUNI (2016)**, Groundwater Vulnerability Analysis of Tunisian coastal aquifer: an application of DRASTIC Index Method in GIS environment, GSD30.
- **AGARWADKAR YOGESH Y. Y (2005)**, Salinity mapping in coastal area using GIS and remote Sensing. *Thesis.iirs. India.65p.*
- **AIT OUALI, R. (1991)**, Le rifting des monts des Ksour. Organisation du bassin, diagenèse des assises carbonatées. Place des ouvertures mésozoïques du Maghreb. *Thèse ès -Sciences, Univ.'Alger.306 p.*
- **ALAA M. AL-ABADI ET AL (2014)**, A GIS-based DRASTIC model for assessing intrinsic groundwater vulnerability in northeastern Missan governorate, southern Iraq, *Appl Water Sci* DOI 10.1007/s13201-014-0221-7.
- **AL-ADAMAT, R. A. N., FOSTER, I. D. L. & BABAN, S. N. J., (2003)**, Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. *Appl. Geogr.* 23: pp.303–324.
- **ALLER L., BENNET T., LEHR J.H., PETTY R.J. & HACKETT G. (1987)**, DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. United States Environmental Protection Agency Report 600/2-87/035. Washington, D.C.
- **AMINREZA NESHAT ET AL (2014)**, Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environ Earth Sci* (2014) DOI 10.1007/s12665-013-2690-7
- **ANDRE P., DELISTE C. E. ET REVERET A. S. (1999)**, L'évaluation des impacts sur l'environnement: Processus, acteurs et pratique. *Presses internationales polytechnique, Canada, 416p.*
- **ANTONAKOS A.K., LAMBRAKIS N.J. (2007)**, Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of hydrology.* Vol.333: pp 288– 304.

- **AYAZI MH, PIRASTEH S, ARVIN AKP, PRADHAN B, NIKOURAVAN B, MANSOR S (2010)**, Disasters and risk reduction in groundwater: Zagros Mountain Southwest Iran using geoinformatics techniques. *Disaster Adv* 3(1):51–57
- **BABIKER INSAF, S., MOHAMED, A.A., MOHAMED, HIYAMA, T., KATO, K., (2005)**, A GIS-based DRASTIC model for assessing Aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Sci. Total Environ. J.* 345 :pp 127–140.
- **BASSOULET, P. (1973)**, Contribution à l'étude stratigraphique du Mésozoïque de l'Atlas saharien occidental. *Thèse es sci., Paris. 2 t., 497 p.*
- **BEAUDET R. (1999)**, Les eaux souterraines. Consultation publique sur la gestion de l'eau au Québec., *Bureau d'audiences publiques sur l'environnement*, 36 p.
- **BEAUDET. R (1999)** Les eaux souterraines. Consultation publique sur la gestion de l'eau au Québec., Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 36 p.
- **BELFAR, F. (2000)**, Géométrie et dynamique des bassins triasiques de l'Atlas Saharien Occidental et des Hauts Plateaux (Algérie). *Thèse Magister. IST. USTHB.*
- **BELZEGUES S. ET DOUGAPARSARD M. (2002)**, Suivi piézométrique des nappes de Grande Terre et de Marie – Galante (Gadeloupe), *compte rendu des données acquises en 2001 – BRGM/RP 51 445 FR, 20p.*
- **BETTAHAR, A. (2009)**, Les accidents majeurs de l'atlas saharien central et les structures associées, géométrie, cinématique et interprétation d'un secteur clé de l'évolution de la chaîne. *Thèse. Doct. D'Etat, IST. USTHB Alger. Algérie.*
- **BOUBAYA D. (2006)**, Etude géophysique multimethode du Nord Est Algérien. Mémoire de magister. Université des Sciences et Technologie H. BOUMEDIENNE, 140p.
- **BOUILLIN, J, P. (1986)**, Le bassin maghrébin, une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des Alpes. *Bul. Soc. Geol. France, (8), II, n° 4, p. 547-558.*
- **BRACENE, R. (2002)**, Géodynamique du Nord de l'Algérie: Implications sur la recherche pétrolière. *Thèse de doctorat, Univ. Cergy Pontoise 2 Vol., 300 p.*
- **BRGM, (2005)**, Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais. *Rapport BRGM/RP – 54238, Dec. France, 70p.*
- **CANTER L.W. (1997)**, Nitrates in groundwater Lewis Boca Raton Florida, USA. *Report, 263 p.*
- **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
- **CASTANY G. (1982)**, Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334p.
- **CHACHADI, A. G ET LOBO-FERREIRA, J. P. (2005)**, Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2-GALDIT Indicators Description. *The fourth Inter- Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, Guimaraes, Portugal, July 11-14, 2005.*
- **CHACHADI, A. G. AND LOBO-FERREIRA, J.P (2001)**, Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method, in Coastin. *A Coastal Policy Research Newsletter, Number 4, March 2001.* New Delhi, TERI: pp. 7-9.
- **CIVITA M., 1994.** Le Carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & Pratica. *Pitagora Editrice, Bologna, 325 p.*
- **CIVITA, M. ET DE MAIO, M. (2003)**, Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination. The Italian "combined" approach. Proc. *1st Intern. Workshop "Aquifer vulnerability and risk", Salamanca (Mexico) - 20-30/05/03: pp 3 – 19.*
- **DELFAUD, J. (1974)**, La sédimentation deltaïque ancienne. Exemples Nord sahariens. *Bul. Cent. Rech. de Pau. 8, 1 p. 24-62.*
- **DELFAUD, J. (1974)**, Typologie scalaire des séquences sédimentaires en fonction du milieu de dépôt. *B.S.G.F., (7), t. XVI, n° 6, p. 643-652.*
- **DJABRI L. (1996)**, Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la seyboise. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'État. Université d'Annaba 280p.
- **DUBOURDIEU, G. (1956)**, Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algérotunisiens). *Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, n.s, Bull., n°10, 659p.*
- **DUROZOY G. (1956)**, Carte géologique au 1/50 000 de Tébessa feuille 206, et ça notice explicative.
- **E.G., TESORIERO A.J., VOSS F.D., (1997)**, Ground Water, vol. 35, no. 6, pp. 1029-1039
- **ELMI, S., ALMERAS, Y., AMEUR, M., BASSOULET, J, P., BOUTAKTIOUT, M., BENHAMOU, M., MAROK., A., MEKAOUI, A., ET MOUTERDE, R. (1998)**, Stratigraphic and paleogeographic survey of the lower and middle Jurassic

along a North- South transec in wester Algeria. Crasquin- Soleau, S., Barrier, E. (Eds); peri Tethys Memoir 4: *Mém, Mus, Natl. Hist. Nat. ; Vol. 179, pp. 145-211.*

- **ENGEL B.A., NAVULUR K.C.S., COOPER B.S. AND HAHN L. (1996),** Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. *International Association of Hydrogeological Science Publications*, 235: pp. 521-526.
- **EVANS THOMAS A. ET DAVID R. MAIDMENT (1995),** A spatial and statistical assessment of the vulnerability of Texas Groundwater to nitrate contamination. *Technical report CRWR 260, Center for research in water resources, bureau of engineering research, the University of Texas at Austin, Austin, TX, 257p.*
- **FEHDI CH., BOUDOUKHA A., SALAMEH E. (01-03 Novembre 2006),** Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes de la salinité des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-ElAouinet (N.E Algérien). WATMED 2006, the 3rd International Conference on the Water Resources in the Mediterranean Basin, (présentation orale), Tripoli, Liban.
- **FEHDI CH., BOUDOUKHA A., SALAMEH E. (2007),** Sources of water salinities in the Morsott-Laouinet aquifer. Northern area of Tébessa. (North East of Algeria). XXXV IAH Congress, International Association of Hydrogeologists. Groundwater and Ecosystems. Lisbon, Portugal, p. 659-660.
- **FEHDI, CH ET AL (2009),** The hydrogeochemical characterization of Morsott-El Aouinet aquifer, Northeastern Algeria, *Environ Geol* (2009) 58:1611–1620.
- **FOSTER S. & HIRATA R. (1988),** Groundwater risk assessment: a methodology using available data. WHO PAHO-CEPIS Technical report. Lima 73 pp.
- **FOSTER S. & MORRIS B. (2000),** Assessment of Groundwater Pollution Risk.
- **FOSTER SSD, CHILTON PJ (2003),** Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philos Trans R Soc Lond B* 2003;358:1957–72.
- **FOSTER, S. S. D. (1987),** Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in: *TNO Committee on Hydrological Research, the Hague, Proceedings and Information, edited by: van Duijvenbooden, W. and van Waegeningh, G. H., 38: pp 69–86.*
- **FRIZON DE LAMOTTE, D., SAINT BÉZARD,B., BARCÈNE,R., AND MERCIER, E. (2000),** The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean. *Tectonics* 19 (4), 740-761.

- **GOGU RC, DASSARGUES A (2000)**, Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environ Geol* 39:549–559.
- **H.BAALOUSHA, (2006)**, Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC, *Environ Geol* (2006) 50: 405–414 DOI 10.1007/s00254-006-0219z.
- **HAMZA M. H. (2007)**, Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des nappes phréatiques de Ras Jebel et de l'Oued Gheniche par les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS, et SI appliqués par les systèmes d'information géographique. *Thèse de doctorat. Faculté des Sciences de Tunis, 200p.*
- **HEARNE G ET AL (1992)**, Vulnerability of the uppermost ground water to contamination in the greater Denver area. US Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 92–4143.
- **HERKAT, M. (1992)**, Manifestations diapiriques du Trias dans les séries du Crétacé supérieur de l'Atlas saharien et des Aurès. *Bull. du Serv. Géol. de l'Alg., Vol 3, n° 1, p. 15-27, 7 fig., 1 pl.*
- **J. MARGAT (1968)**, vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (groundwater vulnerability to contamination). Bases de la cartographie, (Doc.) BRGM, 68 SGL 198 HYD, Orleans, France.
- **J. MARGAT. (1991)**, Les eaux souterraines dans le monde. Similitudes et différences (The groundwater in the world: similitudes and differences). *Proc. 21 Journées d'Hydraulique* (Sophia Antipolis, France), vol. IV : pp 1-13.
- **JAVADI S, KAVEHKAR N, MOHAMMADI K, KHODADI A, KAHAWITA K (2011)**, Calibration DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical method to assess groundwater vulnerability. *Water Int* 36(6):719–732
- **KAZI-TANI, N. (1986)**, Evolution géodynamique de la bordure nord africaine : le domaine intra plaque algérien. Approche mégaséquentielle. Thèse Doct. Etat. *Univ. Pau et des pays de l'Adour.*
- **KOWALSKI, W, M., ET HAMIMED, M. (2000)**, diapirisme polyphasé ou glacier de sel albien? Dilemme du matériel triasique des confins algéro-tunisiens. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie Vol. 11, n° 1, pp. 29 - 60, 12 fig.*
- **LAFITTE, R. (1939)**, Etude géologique de l'Aurès. *Thèse Paris. Et bull Serv. Carte géol. Algérie, Alger, 2ème Ser. 15, 484P.*
- **LEFEBVRE R., BOUTIN A., MARTEL R., THERRIEN R., PARENT M. ET BLAIS V. (2003)**, Caractérisation et modélisation numérique de l'écoulement et la

migration de la contamination en TCE dans l'eau souterraine du secteur Valcartier, Québec Canada. INRS Eau, Terre et Environnement. Rapport de recherche R-631, 177p

- **LEIKEINE, M. (1971)**, Etude géologique des Babors occidentaux (Algérie). *Thèse ès Sciences, Paris*, ronéot, 536p.
- **LINDSTROM R. (2005)**, Groundwater vulnerability assessment using process-based models TRITA-LWR. PhD Thesis. 36p.
- **LIVET M. (2004)**, Vulnérabilité des ressources en eau et protection des captages pour l'alimentation en eau potable. *Revue française des laboratoires N°346*, 8p.
- **MATTAUER, M., TAPPONIER, P., ET PROUST, F. (1977)**, Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales. L'exemple des chaînes atlasiques du Maroc. *B.S.G.F. (7) XIX, n° 3, p. 521-526*.
- **MEDDAH, A. (1998)**, Etude géologique des appareils diapiriques de l'Atlas Saharien Occidental (Monts des Ksour). Essai de synthèse sur les diapirs atlasiques. *Thèse Magister.IST. USTHB*.
- **MICHAUD Y., LEFEBVRE R. ET MARTEL R. (2003)**, Vulnérabilité : Introduction et méthodologie. Rapport technique du Centre Géoscientifique de Québec, 9 p.
- **MINIVELLE E. ET SOUIAH S. (2003)**, L'analyse statistique et spatiale : statistique, cartographie, télédétection, SIG. *Edition des temps*, France, 284p.
- **MURAT V., PARADIS D., SAVARAD M., NASTEV M., BOURQUE E., HAMEL A., LEFEBVRE R. ET MARTEL R. (2003)**, Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturée du sud-ouest du québec : Evaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. *Commission géologique du Canada. Recherches en cours 2003-D3*, 14p.
- **PORNON H. (1995)**, Les SIG: mise en oeuvre et applications. *Editions Hermes Paris*, France, 156p.
- **PULIDO-LEBOEUF P., PULIDO-BOSCH A., CALVACHE M.-L., VALLEGOS A. AND ANDREU J.-M. (2003)**, Strontium, SO_4^{2-}/Cl^- and Mg^{2+}/Ca^{2+} ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro Aquifer (SE Spain), *C. R. Geoscience 335 (2003)*: pp. 1039–1048.
- **RAJ PATHAK, D., HIRATSUKA, A., AWATA, I. & CHEN, L. (2008)**, Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer of Kathmandu Valley using GIS-based DRASTIC model. *Environ. Earth Sci. 57(2)*, 1569–1578.

- **ROUABHIA Aek (2006)**, Vulnérabilité à la pollution chimique d'un système aquifère en région semi-aride d'Algérie. Cas de la plaine d'El Ma El Abiod. Mémoire de magister. Université d'annaba. 120p
- **SAIDI, S ET AL (2009)**, A GIS-based susceptibility indexing method or irrigation and drinking water management planning: Application to Chebba—Mellouleche aquifer, Tunisia. *Agric. Water Manag.* 2009, 96, 1683–1690.
- **SAIDI, S., BOURI, S. & BEN DHIA, H. (2010)**, Groundwater vulnerability and risk mapping of the Hajeb-Jelma Aquifer (Central Tunisia) using a GIS-based DRASTIC model. *Environ. Earth Sci.* 59, 1579–1588.
- **SALHI A., STITOU EL MESSARI J., BENABDELOUAHAB S., EL GETTAFI M., DÍAZ Y., HIMI M. & CASAS A. (2008)**, Cartografía comparativa de la vulnerabilidad del acuífero costero de Ghis-Nekor (Marruecos). *Soumis à la revue Geogactea*.
- **SALWA SAIDI ET AL, (2011)**, Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: a validation study, *Hydrol. Sci. J.* 56(2), 288–304.
- **SAMI, L. (2003)**, Contribution à l'étude géologique et gîtologique des minéralisations à Pb-Zn, Ba et F dans la région de Méskiana : Exemple des indices d'es Soubaa et de M'Khiriga. (Atlas Saharien Oriental, Algérie). *Thèse Magister.IST. USTHB*.
- **SANGAM SHRESTHA ET AL (2016)**, Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal, *Science of the Total Environment* 556 (2016) 23–35
- **SHWETA KUMARI ET AL (2016)**, Groundwater Vulnerability Assessment using SINTACS Model and GIS in Raipur and Naya Raipur, Chhattisgarh, India, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 9(41), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i41/99247, November 2016.
- **SONATRACH**, Exploration ; Rapports internes.
- **STIGER T. Y., RIBEIRO L., CARVALHO DILL A. M. M. (2006)**, Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeol J.*, 14: pp. 79–99.

- **TELLAM J.H. AND LLOYD J.W. (1986)**, Problems in the recognition of seawater intrusion by chemical means: an example of apparent equivalence, *Q. J. Eng. Geol.* 19 (1986): pp. 389–398.
- **TESO, R.R., POE, M.P., YOUNGLOVE, T. AND MCCOOL, P.M. (1996)**, Use of logistic regression and GIS modeling to predict groundwater vulnerability to pesticides. *Journal of Environmental Quality* 25 (3): pp. 425-432.
- **TRABELSI R., ZAÏRI M., SMIDA H. AND BEN DHIA H. (2005)**, Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. *C. R. Geoscience* 337 (2005): pp 515–524.
- **TROIANO, J., SPURLOCK, F. AND MARADE, J. (1999)**, Update of the Californian Vulnerability Soil Analysis for Movement of Pesticides to Ground Water, 1999. *Department of Pesticide Regulation, Sacra-mento. CA 95814-3510, Document EH 00-05.*
- **VAN STEMPOORT D., EWERT L., WASSENAAR L. (1992)**, Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18: pp 25-37.
- **VIALLY, R., LETOUZEY, J., BERNARD, F., HADDADI, N., DESFORGES, G., ASKRI, H., AND BOUDJEMAA, A. (1994)**, A basin inversion along the north African Margin. The Saharan Atlas (Algeria). In: *Roure, F. (Ed.), Peri-Tethyan Platforms. Technip, Paris, pp. 79—118.*
- **VIALLY, R., LETOUZEY, J., BERNARD, F., HADDADI, N., DESFORGES, G., ASKRI, H., AND BOUDJEMAA, A. (1994)**, A basin inversion along the north African Margin. The Saharan Atlas (Algeria). In: *Roure, F. (Ed.), Peri-Tethyan Platforms. Technip, Paris, pp. 79—118.*
- **VIEUX BE (2004)**, Distributed Hydrologic Modeling Using GIS. *Water Science and Technology Library*, vol 48. Kluwer Academic Publishers, Norwell.
- **VILA J.M (1980)**, La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat- es -sciences, Université Pierre et Marie curie, Paris VI.
- **VILA, J. M (1994)**, Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins Algéro-Tunisiens : Trias allochtone « Glaciers de sel » sous marins et vrais diapirs. In « Trias 93 Algérien ». G. Delfaud, M. Tefiani. *Mémoire du service géol. De l'Algérie 6, Alger.*
- **VILA, J.M. (1980)**, La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algérotunisiens. *Thèse ès Sci. Paris VI, 2 t., 665 p.*

- **VILA, J.M. (1996)**, Halocinèse distensive albienne à « glacier de sel » sous-marin et plissements tertiaires du secteur Ouenza-Ladjabel-Méridéf. *Bull. Serv. Géol. Algérie*, vol 7, n°1, pp3-34.
- **VILA, J.M., BENKHEROUF, F., CHARRIERE A. (1994)**, Interprétation du matériel triasique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens):un vaste « glacier de sel » sousmarin albien, à l'image des structures *off-shore* d'Aquitaine. *C.R. Acad. Sci. Paris, t. 318, série II, p. 109-116.*
- **VRBA J. ET ZAPOROZEC A. (1994)**, Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. *Int. Assoc. Hydrogeol.* 16, 131 p.
- **WILCOX L (1948)**: The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture Tech Bull 962, Washington DC
- **YELLES-CHAUCHE, A.K., AÏT-OUALI, R., BRACENE, R., DERDER, M.E.M., DJELIT, H. (2001)**, Chronologie de l'ouverture du bassin des Ksours (Atlas Saharien, Algérie) au début du Mésozoïque, *Bull. Soc. géol. Fr., t 172, n° 3 p. 285-294.*
- **ZERDAZI, A (1990)**, Etude gravimétrique du mole d'Ain M'lila, et de l'Atlas Saharien septentrionale orientale (Nord-Est d'Algérie). Thèse doc Es Science université de Lozane : in édite.
- **ZWAHLEN F (2004)**, Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST action 620). European Commission, Directorate XII Science, Research and Development, Report EUR 20912, Brussels; 2004. 297 pp.