

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de la Terre

Année 2018

Département de Géologie

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de **Doctorat en Sciences**

Option Hydrogéologie
Par

Rouaibia Farid

Caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques
de la partie aval d'Oued Medjerda

Directeur de Thèse Djabri Larbi PROF Univ. Badji Mokhtar Annaba

Devant le JURY

Président	Hani Azzedine	PROF	Univ. Badji Mokhtar Annaba
Examineur	Chaffai Hichem	PROF	Univ. Badji Mokhtar Annaba
Examineur	Maoui Amar	PROF	Univ. 8Mai 1945 Guelma
Examineur	Hadji Riheb	MCA	Univ. Ferhat Abbas Setif
Examineur	Hamed Younes	MCA	Univ. Gafsa. Tunisie

REMERCIEMENTS

En premier lieu je tiens à remercier Dieu qui m'a donné le courage pour compléter ce modeste travail.

Nos remerciements à tous ceux qui ont contribué techniquement ou moralement à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à présenter mes humbles et sincères remerciements ainsi que toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon directeur de Thèse le Professeur DJABRI Larbi, pour toute son aide et ses précieux conseils et pour l'intérêt qu'il a porté pour l'aboutissement de ce travail. Ses compétences scientifiques, ses conseils fructueux et son aide illimitée ont amplement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Tous mes vifs remerciements vont également à Monsieur Hani Azzedine Professeur à l'université d'Annaba, d'avoir bien voulu accepté de me faire le grand honneur de présider le Jury de ma soutenance.

À messieurs Chaffai Hichem Professeur à l'université d'Annaba, le Professeur Maoui Amar à l'université 19 Mai 1945 de Guelma et Hadji Riheb docteur à l'université Ferhat Abbas de Sétif qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Je tiens à remercier Monsieur Hamed Younes, docteur à l'université de Gafsa Tunis, d'avoir aimablement accepté d'examiner et de faire partie du jury de cette thèse.

Je remercie, le personnel de DRE de Souk Ahras qui a mis à ma disposition les données de la région d'étude.

Je remercie tous mes collègues et amis qui m'ont soutenu et m'ont encouragé pour accomplir ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents,

À ma petite famille, Sonia, Amine, Imene, Sara

Mes frères Madani et sa famille et Hamza

Mes sœurs et leurs familles

Et toute ma grande famille.

ملخص

نوعية المياه الباطنية مشروطة بالمكونات التي تخترقها أثناء تدفقها كذلك المياه التي تعبر المكونات الكلسية تكون غنية بالبيكربونات والتي تعبر المكونات الملحية تكون غنية بالكبريتات أو بالكلوريد. هذه الملاحظة يمكن أن تطبق على مياه الباطنية الكراسية لمدينة تاور الممونة من طرف مياه الأمطار أو من طرف المياه الآتية من مختلف المناطق المنحدرة التي تصب في اتجاه الحوض الهيدروغرافي مجردة-ملاق جنوب شرق مدينة سوق اهراس.

الدراسات الجيولوجية المنجزة تبين بأن المكونات الظاهرة تكون شكل مقعر هذه الأخيرة نحتوي على مستوى من المياه الباطنية ما يخفي الطبقة الكتومة التي يتم استغلالها عن طريق الآبار الارتوازية (T1, T7, T3, D3 D5). ملاحظة السلاسل الطباقية تبين عدم تجانس في البنية ما يعطي للمياه تنوع في تركيبها الكيميائية . إن دراسة وتحليل العينات تبين بأن مياه المنطقة المدروسة غنية بنسبة كبيرة بالبيكربونات و الكالسيوم في حين بعض النقاط تتميز بغناها بالكلوريد و الكبريتات, هذه الأيونات يتبعها الصوديوم و الكالسيوم مما يثبت تأثير المكونات على نوعية المياه التي تخترقها. المياه المأخوذة تستعمل في السقي و الشرب وبهذا خطر التلوث لا يمكن تجاوزه وهذا ما يثبت تركيز النترات (50 مغ/ل).

الكلمات المفتاحية: طبقة كراسية- مجردة -ملاق- الجيولوجية- التلوث- نوعية المياه .

Résumé

La qualité des eaux d'une nappe est conditionnée par les formations traversées par les eaux lors de leurs écoulements. Ainsi les eaux traversant des formations calcaires sont riches en bicarbonates, de même les eaux traversant les formations salifères sont riches en sulfates ou en chlorures. Ce constat peut être appliqué aux eaux de la nappe karstique de Taoura. Cette dernière est alimentée à partir des eaux de précipitations ou par les eaux en provenance des différentes zones drainant le bassin versant transfrontalier Medjerda-Mellègue dans la partie Sud-est de la ville de Souk Ahras. Les études géologiques réalisées ont montré que les formations à l'affleurement forment un synclinal, ce dernier contient un niveau aquifère, qui recèle une nappe captive. Cette dernière est exploitée par plusieurs forges (T1, T7, T3, D3, D5). L'observation des logs stratigraphiques montre une hétérogénéité lithologique, ce qui va conférer à l'eau une variation de sa composition chimique.

Les prélèvements et les analyses réalisés, ont montré que les eaux de la zone d'étude sont en grande partie riches en bicarbonates et en calcium, cependant quelques points se caractérisent par la domination des chlorures, des sulfates, ces anions s'accompagnent de sodium ou de calcium. Confirmant ainsi l'impact des formations traversées sur la qualité des eaux. Les eaux prélevées sont utilisées pour l'irrigation et l'AEP. De ce fait les risques de pollution sont quasi inévitables, confirmées par les concentrations des nitrates (> 50 mg/l).

Mots Clés : Nappe karstique- Medjerda-Mellègue- Géologie-Pollution- Qualité.

ABSTRACT

Ground water quality is conditioned by the formations traversed by this water during its flow. Thus, water flowing through limestone formations is rich in bicarbonates, and water flowing across salt formations is rich in sulfates or chlorides. This affirmation can be applied to the ground water of the karst formations of Taoura. The latter is fed from the waters of rainfall or water from different areas draining the trans-boundary watershed of Medjerda- Mellegue, South East of the town of Souk Ahras, Aleria.

Geological studies have shown that the outcrop formation form a syncline and conceals a confined aquifer. The latter is exploited by several deep wells (T1, T7, T3, D3, and D5). The observation of stratigraphic logs shows lithological heterogeneity, which will change chemical composition of the water.

Samples collection and analyzes conducted have shown that the waters of the study area are in large part rich in bicarbonate and calcium, though some points are characterized by the dominance of chlorides and sulfates along with sodium and/or calcium. This confirms the impact on water quality of the formations being traversed. The pumped water is used for drinking and irrigation. The pollution risk is therefore almost inevitable, as confirmed by nitrate concentration ($> 50 \text{ mg / l}$).

Keywords: ground water of the karst - Medjerda-Mellegue- Géologie- pollution- Quality.

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Résumé (langue Arabe)	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Sommaire	iv
Liste des Figures	X
Liste des Photos	Xi
Liste des Tableaux	Xii
Tables des Abréviations	Xiii
 Introduction Générale	1-3
Chapitre I : Zone d'étude et présentation du bassin versant	
I-1. Introduction.....	4
I-2. Géomorphologies et Présentation du BV de la Medjerda.....	5
I-2-1. Les éléments de relief	7
I.2.1.1. La zone montagneuse septentrionale.....	8
I.2.1.2. La chaîne centrale	8
I.2.1.2. Le piémont méridional	8
I.2.1.3. La dépression de Merahna et Sedrata	8
I.2.2. Les unités morphologiques	8
La chaîne montagneuse septentrionale	9
La zone centrale	9
I.4 réseau Hydrographique de la Medjerda.....	9
I.4. 1 Collecte des données (Production en eau – adduction – stockage).....	9
I.4.1.1 Production.....	9
Le barrage d'Ain Dalia.....	10
Les sources d'Ain Dalia.....	10
I.4.1.2. Les eaux souterraines	11

La nappe de Taoura.....	11
I.4.2. Barrages en projet.....	12
I.4.2.1 Le barrage d'Oued Djedra.....	13
I.4.2.2 Le barrage du sous bassin d'Oued Renem.....	13
I.5. L'importance d'Oued Medjerda.....	14
I.5.1. Secteur mobilisation	14
I.5.2. Productions agricoles– Systemes culturaux en irrigué.....	15
I.5.2.1. Cultures pratiquées	15
I.6. Hydrographie	16
I.7 Couvert végétal	16
I.8. Vocation économique de la région	16
I.9 Domaine industriel	18
I.10 Environnement.	19
I.11 Conclusion.....	20

Chapitre II : Géologie

II.1 Introduction.....	21
II.1.1. régionale.....	21
Domaine interne.....	21
Le Socle Kabyle.....	21
La chaîne calcaire Kabyle.....	21
Domaine médium (sillon des flyschs).....	22
II.2. Lithologie et stratigraphie	23
II.2.1. Le Trias	25
II.2.2. Le Crétacé inférieur et moyen	25
II.2.3. Le Crétacé supérieur	26
II.2.4. L'Eocène	27
II.2.5. L'Oligocène	27
II.2.6. Le Miocène Inférieur	27
II.2.7. Le Miocène Supérieur	27
II.2.8. Le Mio-Pliocène Continental	28
II.2.9. Quaternaire	28
Formations anciennes.....	28

Les Formations Récentes	28
Les Formations Actuelles	29
II.3. Les Terrasses	29
II.4. Tectonique.....	31
II.4.1. Tectonique souple.....	31
II.4.2. Tectonique cassante.....	32
II.5. Interprétations des coupes géologiques	34
II.5.1. Stratigraphie et descriptions lithologique des faciès	35
II.6. Conclusion	35
Chapitre III : Climatologie de la région	
III. 1 Introduction.....	37
III. 2 Les données climatologiques	37
III.2.1. Les précipitations	38
III.2.1.1 Répartition annuelle des précipitations.....	38
III.2.1.1.1. Les variations interannuelles.....	38
III.2.1.1.2. Répartition mensuelle des précipitations	38
III.2.1.1.3. Répartition saisonnière des précipitations	39
III.2.2. Les températures.....	40
III.2.3. Le vent.....	41
III.2.4. Relation température – précipitation.....	43
Diagramme pluviométrique	43
III.5. Détermination des indices climatiques.....	44
Climagramme d'Emberger.....	44
Indice d'aridité de De Martonne	45
III.6. Le Bilan hydrique.....	47
III.6.1. Etude de l'évapotranspiration	47
III.6.1.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	47
Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	47
III.6.2. Formule de Turc.....	48
III.6.3. Evapotranspiration réelle par la formule de Thornthwaite.....	48
III.6.4. Estimation des réserves facilement utilisables (RFU).....	48
III.6. 5. Calcul du ruissellement	49
III.6.6. Calcul de l'infiltration	49

La période 2003 (pluvieuse).....	50
La période 2000 (sèche).....	50
III.6. 7. Bilan hydrique global période allant de 1989-2006.....	51
III.7. Conclusion.....	52

Chapitre IV : Hydrogéologie et Gestion des eaux

IV. Introduction.....	54
IV.1. Les Caractéristiques Hydrogéologiques de la région.....	54
IV.2. Système Aquifère du Bassin Versant Medjerda	56
IV.2.1. Présentation des aquifère et leur Nature dans la partie aval de Medjerda.....	57
IV.3. Synclinal de Taoura	58
IV.3.1. La nappe du Mio-Plio-Quaternaire (nappe libre).....	58
IV.3.2. La nappe du calcaire Maestrichtiens (nappe captive).....	59
IV.3.2.1. Les sources de la région	62
IV.3.3. L'aquifère Mio-pliocène (région de Heddada, Merahna et Khedara).....	65
IV.4 L'aquifère campanien.....	67
IV.3.4.1. Les sources ou Ain	67
IV.3.4.2. Sources thermo-minérales.....	68
IV.3.5. La nappe alluvionnaire	69
IV.3.5.1. Les Puits.....	69
IV.3.5.2. Les Sources.....	69
IV.3.6. Aquifère Sid Fredj-Ain Zerga	70
IV.4. Caractéristiques piézométriques de l'aquifère de Taoura-Bir Louhichi.....	71
IV.4.1. Etude piézométrique des données des points d'eau.....	71
IV.4.2. Carte piézométrique Mars 2012	71
IV.4.2.1. Carte piézométrique Juillet 2012	73
IV.4.3. Etude piézométrique 2013.....	74
La nappe du synclinale de Taoura.....	75
La nappe de Bir Louhichi.....	75
IV.5. Apports de la géophysique	77
IV.5.1. Les méthodes de prospection électrique	78
IV.5.2. Principe de la méthode électrique.....	78

IV.5.2.1.	Les procédures de mesure	79
IV.5.3.	Travail géophysique réalisé.....	80
IV.5.3.1.	Forage T-2 Bled El Madjen	80
IV.5.3.2.	Forage B-1 Bordj M' raou	81
IV.5.3.3	Forage M-1 Bir Louhichi.....	82
IV.5.4.	Classification des roches sur la base de résistivités.....	83
IV.5.5.	Prospection par forages.....	85
IV.5.5.1.	Comparaison des données de la géophysique avec les forages	85
	Coupe géo-électrique n° 1	85
	Coupe géo-électrique n° 2.....	86
	Coupe géo-électrique n° 3	86
	Coupe géo-électrique n° 4.....	87
IV.5.5.2.	Carte des isohypses du substratum résistant	88
IV.6.	Paramètres hydrodynamiques des aquifères	89
IV.6.1.	Essais de pompages du forage D4	90
	Caractéristiques des pompages d'essai.....	90
IV.6.1.1.	Interprétation.....	90
IV.6.2.	Essais de pompages du forage D3	92
IV.6.2.1.	Caractéristiques des pompages d'essai	92
IV.6.2.1.1	Interprétation des résultats	92
IV.6.3.	Détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères du Sénonien.....	94
IV.7.	Evolution de l'exploitation par domaine d'utilisation.....	95
IV.8.	Gestion des eaux.....	96
IV.8.1.	Etats actuels de la ressource en eau dans la région	96
IV.8.2.	Provenance des eaux	96
IV.8.2.1.	Collecte des forages vers la station de pompage.....	99
IV.8.3.	Les nappes surexploitées.....	99
IV.8.3.1.	Commune de Souk Ahras	99
IV.8.3.2.	Commune De Merahna	100
IV.8.3.3.	Commune d'Ouillen	101
IV.8.3.4.	Commune de Taoura.....	102
IV.8.3.5.	Commune Zaarouria	103
IV.8.3.6.	Commune de Sidi Fredj	104

IV.8.4.	Les nappes moyennement exploitées.....	104
IV.8.4.1.	Commune de Heddada	105
IV.8.4.2.	Commune de Khedara	106
IV.8.4.3.	Commune d'Ouled Moumen	106
IV.8.5.	Les nappes faiblement exploitées.....	107
IV.8.5.1.	Commune d'Ouled Driss	107
IV.8.5.2.	Commune d'Ain Zana	108
IV.9	Conclusion.....	108
Chapitre V : Partie Hydrochimie de la région		
V	Introduction.....	109
V.1	Matériels utilisés, échantillonnage et conditionnement.....	109
V.2	Caractérisation physico-chimique des eaux.....	110
	La température de l'eau	110
	Le pH des eaux	111
	la conductivité	111
	Le Calcium (Ca^{2+})	111
	Le Magnésium (Mg^{2+}).....	111
	Le Sodium (Na^+)	111
	Le potassium (K^+).....	111
	Les Sulfates (SO_4^{2-})	111
	Le bicarbonate (HCO_3^-)	111
	Les chlorures.....	112
	Les nitrates.....	112
V.3	Etude des processus hydrogéochimiques.....	112
V.3.1	Classification des eaux.....	112
V.3.1.1	Dépouillement des résultats donnés par le logiciel diagramme	112
V.3.1.1.a	Interprétation du triangle de PIPER.....	112
V.3.1.1.b	Détermination des faciès chimiques à partir du Diagramme Schöeller– Berkaloff.....	115
V.4.	Analyse des Composantes Principales.....	116
V.4.1.	ACP globale 2011/2012.....	117
V.4.2.	La matrice de corrélation	117

V.4.3.	L'analyse du cercle ACP	118
V.4.3.1.	Cercle ACP, analyses Décembre 2012	118
V.4.3.2.	Cercle ACP, analyses Mars 2011 :.....	119
V.4.4.	Apports de la classification Ascendante hiérarchique ou C.A.H	120
V.5.1.	Essai de détermination des origines de la qualité des eaux	120
V.5.1.	Apports de la méthode des rapports	120
V.5.1.	Diagramme Ca^{2+} Versus HCO_3^-	120
V.5.1.2.	Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus Ca^{2+}	121
V.5.1.3.	Diagramme Na^+ versus Cl^-	122
V.5.1.4.	Diagramme HCO_3^- versus SO_4^{2-}	122
V.5.2.	Explications des origines des répartitions observées.....	123
V.5.2.1.	Calcul de l'indice d'échange de base	123
V.5.3.	Apports de la thermodynamique	126
V.6.	Utilisation des eaux en irrigation.....	126
V.6.1.	Risque de retour des eaux d'irrigation	126
V.6.1.1.	Impact du retour des eaux d'irrigation sur le sol	126
V.6.1.2.	Impact du retour des eaux d'irrigation sur la ressource	126
V.6.2.	Méthodes utilisées pour la classification des eaux d'irrigation	127
V.6.2.1.	Calculs des paramètres obtenus pour chaque méthode	129
V.6.2.2.	Diagramme de Richards	132
V.6.2.2.1.	Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation issue du diagramme de Richards.....	134
V.6.2.3.	Interprétation du diagramme %Na en fonction de la conductivité	135
V.6.2.4.	Diagramme de Wilcox.....	135
V.6.2.4.1.	Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation (méthode Wilcox)	137
V.6.2.5.	Diagramme d'EATON (SSP).....	138
V.6.3.	Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation	138
V.7.	Conclusion	139
Chapitre VI : Modèle Réseaux de neurones artificiels		
VI.1.	Application du modèle de RNA (ou ANN).....	140
VI.2.	Connexions entre les neurones.....	140
VI.3.	Architecture du réseau.....	142
VI.4.	Création du modèle.....	142

VI.4.1.	Calibrage et vérification du modèle.....	146
VI.4.2.	Détermination des modèles d'entrées.....	146
VI.4.3.	Résultats et discussion.....	146
VI.5.	Conclusion.....	149
	Conclusion général et Recommandations.....	150
	Référence Bibliothèque	
	Annexe	

Liste des Figures

Figure I.1 : localisation de la zone d'étude.....	4
Figure I.2 : le bassin versant Medjerda.....	6
Figure I.3 : La region d'etude et leur situation dans le bassin Medjerda-Mellague.....	7
Figure I.4 : Organisation du système production adduction de la région De Souk-ahras.....	12
Figure I.5 : Sous Bassin versant d'Oued Djedera	13
Figure I.6: Sous Bassin versant d'Oued Renem.....	14
Figure I.7: Réparation des terres utilisées par l'agriculture dans la région d'étude	15
Figure I.8 : Périmètres d'irrigation.....	17
Figure II.1: Cadre structural africain et ibérique de la chaîne tello-rifaine.....	22
Figure II.2 : Carte structurale au 1/500 000 de la chaine Alpine D'Algérie orientale et des confins Algerio-Tunisine.....	23
Figure II.3 : Carte géologique d'après L.David de la partie aval d'Oued Medjerda (Nord-est Algérienne).....	24
Figure II.4: Log litho stratigraphique de la région de Taoura, d'après les notices des cartes Géologiques de Taoura au 1/50000.....	30
Figure II.5 : mouvement tectonique de la région.....	32
Figure II.6 : Coupe géologique du bassin versant du Medjerda.....	33
Figure III.1: Moyenne interannuelle des précipitations (1989-2006).....	38
Figure III.2 : moyenne mensuelle de précipitation 1998-2006.....	39
Figure III.3 : Répartition saisonnière des précipitations (1989-2006).....	40
Figure III.4 : Répartition mensuelle des températures dans la station de Souk Ahras (1989/2006).....	41
Figure III.5 : Variation mensuelle des vitesses du vent [1989-2006]	42
Figure III.6 : Variation inter annuelle des vitesses du vent [1989-2006]	43
Figure III.7 : Diagramme ombrothermique de la station de Souk Ahras (1989-2006).....	44
Figure III.8: Climagramme d'Emberger.....	45
Figure III.9 : Climagramme de De Martonne.....	46

Figure III.10: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite dans la station de Souk- Ahras (1989/2006).....	52
Figure IV.1 : Coupe géologique transversale (d'après la carte 1/15000 Oued Mougras).....	56
Figure IV.2 : Système aquifère dans la partie aval de Medjerda.....	58
Figure IV.3 : Coupe hydrogéologique de la région de Taoura.....	58
Figure IV.4 : Coupe hydrogéologiques du synclinal de la nappe Taoura.....	62
Figure IV.5 : localisation de source Ain Legridjine et leur structure.....	62
Figure IV. 6 : Mouvement tectonique de la source Ain Legridjine.....	64
Figure IV.7 : Interconnection des forages Bir Louhichi (Heddada).....	66
Figure IV.8 : Caractéristiques hydrogéologiques des forages.....	67
Figure IV.9 : Coupe hydrogéologique dans le bassin Medjerda.....	70
Figure IV.10 : Coupe hydrogéologique (W - E) dans la commune de Sidi Fredj.....	71
Figure IV.11 : Carte piézométrique Mars 2012	72
Figure IV.12 : Carte piézométrique Juillet 2013.....	74
Figure IV.13 : La carte piézométrique pendant la période (2013).....	76
Figure IV.14 : Sondage électrique et des formations géologiques El Medjene.....	81
Figure IV.15 : Sondage électrique et des formations géologiques Bordj M'raou.....	82
Figure IV.16 : Sondage électrique et des formations géologiques Bir El Ouhichi.....	83
Figure IV.17 : Coupe géo-électrique n° 1.....	86
Figure IV.18 : Comparaison des données de la géophysique avec le forage T1.....	86
Figure IV.19 : Coupe géo-électrique n° 3.....	87
Figure IV.20 : Coupe géo-électrique n° 4.....	87
Figure IV.21 : Carte des isohypses du substratum résistant.....	88
Figure IV.22 : Premier pompage d'essai sur le forage D4.....	91
Figure IV.23 : Courbe de remontée du deuxième pompage d'essai par paliers du forage D4.....	92
Figure IV.24 : Premier pompage d'essai sur le forage D3.....	93
Figure IV.25 : Courbe de remontée du premier pompage d'essai sur le forage D3.....	93
Figure IV.26 : Deuxième pompage d'essai par palier su le forage D3.....	94
Figure IV.27 : L'exploitation des nappes profondes selon les domaines d'utilisation (Année 2013).....	95
Figure IV.28 : Interconnexion des forages dans la nappe de Taoura.....	97
Figure IV.29 : Schéma synoptique des transferts d'eaux à partir de la station de pompage Boumaaraf.....	98

Figure IV.30 : Schéma d'alimentation en eau potable de la ville de souk ahras.....	100
Figure IV.31 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Merahna.....	101
Figure IV.32 : Schéma d'alimentation en eau potable de la ville d'Ouillen.....	102
Figure IV.33 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Taoura.....	103
Figure IV.34 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Zaarouria.....	103
Figure IV.35 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Sidi Fredj.....	104
Figure IV.36 : Interconnexion des forages dans la nappe Bir Louhichi.....	105
Figure IV.37 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Heddada.....	106
Figure IV.38 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Khedara	106
Figure IV.39 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune d'Ouled Moumen...	107
Figure IV.40 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune d'Ouled Driss.....	107
Figure IV.41 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune d'Ain Zana.....	108
Figure V.1 : Diagramme de Piper globale (campagne 2011,2012).....	113
Figure V.2 : Diagramme de Piper Juillet 2011.....	114
Figure V.3 : Diagramme de Piper Décembre 2012.....	115
Figure V.4 : Diagramme de Schoeller Berkaloff,.....	116
Figure V.5 : ACP Globale	118
Figure V.6 : Cercle ACP, analyses 2012.....	119
Figure V.7 : Cercle ACP, Mars 2011.....	119
Figure V.8 : Dendrogramme visualisant les relations entre les variables physico-chimiques.....	120
Figure V.9 : Diagramme Ca^{2+} Versus HCO_3^-	121
Figure V.10: Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ Versus Ca^{2+}	121
Figure V.11 : Diagramme Na^{2+} versus Cl^-	122
Figure V.12 : Diagramme HCO_3^- versus SO_4^{2-}	123
Figure V.13 : Confrontation de la carte d'échange et de la carte géologique.....	124
Figure V.14 : Mécanismes régissant le retour des eaux d'irrigation.....	127
Figure V.15 : Diagramme de Richards-Eau de la partie aval de Medjerda	132
Figure V.16 : Classification des eaux d'irrigation selon la méthode de Wilcox.....	134
Figure V.17 : Diagramme Wilcox, eau de la partie aval de Medjerda.....	136
Figure V.18 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation (diagramme de Wilcox).....	137
Figure V.19 : Diagramme d'EATON (SSP), Taoura.....	138
Figure V.20 : Carte d'aptitudedes eaux à l'irrigation issue de la méthode SSP	139
Figure VI.1 : Schéma d'un neurone artificiel.....	140

Figure.VI.2 : Illustration du réseau à 3 couches (MLP).....	144
Figure VI. 3 : Fonction de transfert sigmoïde.....	145
Figure VI. 4 : Architecture du modèle.....	147
Figure VI. 5 : Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée.....	148

Liste des Photos

Photo I.1 : Barrage Ain Dalia	10
Photo I. 2 : Système de captage des sources d'Ain Dalia.....	11
Photo IV.1 : la source d'Ain Tamatmat	59
Photo IV. 2: Le synclinale de Taoura.....	60
Photo IV.3 : La position de la source et son environnement karstique.....	63
Photo IV. 4 : Emergence de la source Ain Guelib.....	68
Photo IV. 5 : Partie aval de Hammam Tassa.....	69
Photo IV.6 : Station de pompage Boumaaraf et leur équipement.....	98

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de Medjerda	5
Tableau I.2 : Potentialités du bassin versant de la Medjerda	6
Tableau I.3 : Mobilisation des ressources en eau.....	14
Tableau I.4 : Cultures irriguées par région agricole.....	15
Tableau I.5 : Dotation moyenne en milieu urbain et rural à travers la région.....	18
Tableau I.6 : Systèmes d'épuration des eaux usées dans la wilaya.....	19
Tableau II.1 : stratigraphie géologiques de la région.....	24
Tableau III.1 : pluviométriques mensuelles et annuelles (1989-2006).....	39
Tableau III.2 : Répartition saisonnière des précipitations (1989-2006).....	39
Tableau III.3 : Vitesses du vent moyennes mensuelles et interannuelles [1990-2006].....	42
Tableau III.4 : Indice d'aridité mensuel dans la station de Souk Ahras (1989/2006).....	46
Tableau III.5 : Résultats de l'ETP et ETR pour les régions Souk Ahras.....	48
Tableau III.6 : Récapitulatif des résultats d'ETR, R, I, pour les différentes périodes pour la station de Souk Ahras.....	49
Tableau III.7 : Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite dans la station de Souk Ahras (1989-2006).....	50
Tableau IV.1 : Les caractéristiques des sources de la région.....	55
Tableau IV.2 : log lithostratigraphique de la région de Taoura, d'après les notices des cartes géologiques de M'Daourouch et Taoura au 1/50000.....	64
Tableau IV.3 : Plage de résistivité de différentes formations (Favini, 1969).....	79
Tableau IV.4 : valeurs de résistivités par rapport à la formation géologie.....	84
Tableau IV.5 : Caractéristiques du pompage d'essai au forage D4.....	90
Tableau IV.6 : Caractéristiques du pompage d'essai au forage D3.....	94
Tableau IV.7 : L'alimentation en eau potable de la ville de souk ahras.....	100
Tableau IV.8 : L'alimentation en eau potable de la ville de Merahna.....	101
Tableau IV.9 : Source d'alimentation d'un ouvrage de taoura enter Ouilien.....	102
Tableau IV.10 : Source d'alimentation d'un ouvrage de taoura	103
Tableau V.1 : Des paramètres mesurés dans les eaux (méq/l).....	110
Tableau V.2 : Faciès Chimique.....	116
Tableau V.3 : Matrice de corrélation Taoura.....	117

Tableau V.4 : Associations entre les éléments chimiques selon la valeur de r.....	117
Tableau V.5 : Valeurs de l'indice d'échange.....	124
Tableau V.6 : Méthodes élaborées pour l'irrigation des eaux.....	128
Tableau V.7 : Résultats obtenus après application des différentes méthodes	128
Tableau V.8 : Classification des puits de la région en fonction du diagramme de Richards.....	133
Tableau VI. 1 : L'erreur SOSE dans différents réseaux de neurone.....	147
Tableau VI. 2 : Paramètres statistiques de régression.....	148
Tableau VI. 3 : Classement des variables par analyse de sensibilité.....	148

Abréviations

- A.B.H** : Agence des Bassins Hydrographiques
- ACP** : Analyse en composantes principales
- ADE** : Algérienne Des Eaux
- AEP** : Alimentation en Eau Potable
- A.N.B** : Agence Nationale des Barrages
- ANN** ou **RNA**: Artificial Neural Network
- ANRH**: Agence Nationale des Ressources Hydriques
- BV** : Bassin Versant
- C.A.H** : Classification Ascendante hiérarchique
- CE** ; Conductivité électrique
- CSM** : Constantinois - Seybouse - Mellègue
- DHW**: Direction de l'Hydraulique de la Wilaya
- DPAT**: Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire
- DRE** : Direction des Ressources en Eau
- DSA**: Direction des Services Agricoles
- ETP** : l'évapotranspiration potentielle
- ETR** ; l'évapotranspiration réelle
- EU** : Eau Usée
- EUT** : Eau Usée Traitée
- FAO**: Food and Agriculture Organization (Organisation des nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation)
- GPI** : Grands Périmètres Irrigué
- IEB** : L'indice d'échange de base
- SAT** : surface totale agricole
- SAU** : surface totale utile
- ONA** : Office National d'Assainissement
- O.N.D** : Office nationale D'Irrigation
- PMC** : Perceptron Multicouche
- PMH**: Petite et Moyenne Hydraulique
- SAR** : Risque du sodium pour l'eau d'irrigation
- SE** : Sondage électrique
- SEV** : Sondage électrique verticale

STEP : Station d'épuration

RFU : des réserves facilement utilisables

RMSE ; L'erreur moyenne des carrée (Root Mean Square Error)

Introduction générale

L'eau représente à l'échelle de la planète un élément vital pour tout être vivant. C'est aussi un facteur prépondérant pour toute activité socio-économique, depuis l'aube de l'humanité. Elle a quelque chose de sacré car elle est à l'origine de la vie, elle est l'expression même de la vie. La gestion des ressources en eau constitue l'un des problèmes les plus cruciaux du 21^{ème} siècle. La croissance continue de la demande d'eau génère des concurrences et des conflits entre les différents secteurs utilisateurs de la ressource.

En Algérie, les ressources en eau d'une façon générale, et les eaux souterraines d'une façon particulière, sont largement dépendantes de la variabilité du climat et de la lithologie.

Medjerda-Mellègue, considéré parmi les plus grands bassins hydrogéologiques en Algérie, il présente des ressources de plus en plus limitées à cause de la pluviométrie déficitaire et de l'augmentation des prélèvements. En conséquence de cette situation, les eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées, engendrant leurs dégradations quantitative et qualitative.

La situation actuelle dans la wilaya de Souk-Ahras, se caractérise par un déséquilibre entre les besoins et les ressources disponibles. La croissance démographique et le développement économique et social ont induit durant les deux dernières décennies écoulées, un accroissement considérable des besoins en eau potable, industrielle et agricole.

Oued Medjerda couvrant une superficie de 1411 km², qui à son tour approvisionne plusieurs agglomérations, telles que : Souk-Ahras (chef-lieu), Taoura, Drea, Ouled Driss, Zaarouria, Merahna, Ouillen, Heddada, Khedara, Ouled Moumen et Ain Zena.

Il est à noter que ce sous bassin est relativement riche en ressources hydriques souterraines et superficielles, la partie amont est utilisée pour l'alimentation en eau potable à travers le barrage d'Ain Dalia et la partie aval est un milieu qui reçoit les eaux usées domestiques et industrielles de la ville de Souk-Ahras par l'intermédiaire d'Oued Djedra et Oued Renam ; ainsi Oued Medjerda est un Oued transfrontalier entre l'Algérie et la Tunisie.

Les eaux souterraines dans la Wilaya de Souk-Ahras se trouvent principalement dans trois grandes nappes : Taoura , Terreguellte et Heddada.

Les majorités des eaux souterraines de la région d'étude se trouvent dans la nappe de Taoura. Cette nappe est considérée comme importante du point de vue hydrologique pour les raisons suivantes (i) une grande perméabilité du sol ; (ii) une formations géologique adaptée avec une grande épaisseur ; et (iii) un vaste étendu (Kherici, 2002). Le système lithologique et la structuration complexe comprend plusieurs aquifères qui mettent à jour de nombreuses

ressources froides et très peu de ressources chaudes, ces ressources sont largement mobilisées et exploitées par plus de 122 point d'eau (forages, puits et sources). L'importance de la minéralisation des eaux est en relation avec la nature géologique des terrains, qui influe fortement sur la composition chimique des eaux.

Les eaux souterraines de la région d'étude, se présentent sous forme d'un système karstique comportant une zone noyée développée et productive, relayée par une large zone d'infiltration. Cette dernière est alimentée à partir des eaux de précipitations ou par les eaux en provenance de différentes zones drainant le bassin versant transfrontalier Medjerda-Mellègue. Les formations litho stratigraphiques dominantes sont en majeure partie des calcaires Maestrichtiens, constituant ainsi la structure synclinale qui est recouverte par des formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire ce qui favorise l'accumulation des eaux souterraines.

C'est une zone très fertile où l'activité agricole est très poussée. Les régimes des précipitations sont dominés par une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps. Le périmètre de Battoume est le grand périmètre irrigué dans la région. Ce périmètre a une superficie de 750 hectares, et la demande d'irrigation est estimée à plus de 9.000 m³/an/Ha (DSA 2016).

Cette étude a pour objectif :

- Caractérisation du bassin versant en synthétisant les données disponibles et acquises : caractères géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques de ce sous bassin et les différentes aquifères de la région.
- Définir les caractéristiques hydrogéologiques du bassin, afin d'examiner la possibilité d'utiliser ces ressources (souterraines) pour divers usages.
- La relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface, piézométrie des eaux souterraines, un suivi saisonnier (basses et hautes eaux).
- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines de la partie aval d'Oued Medjerda et les eaux de la nappe de Taoura?
- Connaître le type de pollution qui affecte la partie aval et caractériser chaque type d'aquifère du point de vue physique et chimique.

Pour réaliser cette étude, nous avons adopté la méthodologie suivante :

- Introduction générale rassemble les données disponibles relatives au sous bassin de la partie aval d'Oued Medjerda.
- Dans la première partie nous avons essayé d'étudier les caractéristiques morphologiques du bassin versant qui jouent un rôle important sur le ruissèlement et donc sur le volume d'eau

stocké et sur le comportement hydrologique; qui a été consacrée aux caractéristiques naturelles du bassin versant et les ressources en eau de surface ou souterraine.

- Dans la deuxième partie nous avons abordé la géologie présente le cadre litho-stratigraphique de la région et décrit les principales phases tectoniques qui l'ont affecté à fin de voir l'influence de la lithologie sur la qualité des eaux.
- Dans la troisième partie nous avons abordé le coté hydro-climatologique à fin de déterminer les facteurs climatiques qui influent sur les débits instantanés au niveau des stations de prélèvement d'eau destinée à l'analyse physico-chimique; comprend d'une part, une étude des conditions climatiques qui règnent sur la région et établie d'autre part le bilan hydrique (écoulement, infiltration et ruissellement).
- Dans la quatrième partie nous avons abordé l'hydrogéologie ; l'objectif était d'approfondir la connaissance du système hydrogéologique, qui a été utilisé pour explorer les propriétés de l'aquifère étudié à fin de localiser les principales zones d'alimentation de l'aquifère, avec une gestion plus adéquate de ces aquifères.
- Dans la cinquièmes partie ; Hydrochimie nous avons achevé notre travail par une étude approfondie de la qualité des eaux suite à des campagnes de prélèvements à partir des points d'eau, répartis sur le terrain de la zone d'étude, nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres physico-chimiques. Ces derniers visent à mettre en évidence la vulnérabilité et les différents risques répertoriés des pollutions chimiques.

L'étude de l'évolution du faciès chimique des eaux et l'étude statistique sont détaillées pour définir et vérifier les relations existantes entre les éléments chimiques présents dans les eaux étudiées.

- Dans la sixièmes partie modélisation; l'originalité de ce travail de modélisation réside dans l'utilisation des réseaux neuronaux qui sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexion des neurones.
- Conclusion générale : Une synthèse de tous les résultats obtenus et quelques recommandations seront indiquées dans la conclusion générale.

Chapitre I : Zone d'étude et collecte des données du bassin

I.1 Introduction

Le sous bassin versant de Medjerda est parmi les cinq sous bassins qui constituent le grand bassin de Medjerda-Mellègue, ce dernier situé au Nord-est Algérien d'une superficie de 7870 Km².

La région d'étude est située dans le territoire de la wilaya de Souk-Ahras entre les méridiens de 7°37'E et 8°25' et les parallèles 36°05' et 36°27 'Nord, elle est limitée par :

- la wilaya de Tarf au Nord -est,
- la wilaya de Guelma au Nord-ouest,
- la wilaya de Tebessa au Sud,
- la wilaya d'Oum el Bouaghi au Sud-ouest,
- et la frontière Algéro-Tunisienne à l'Est.

Cette zone située dans l'atlas tellien représentée par les monts de la Medjerda, constituée par deux axes montagneux de direction NE-SO. L'axe Nord est constitué par les Djebels Ras El Alia, Arous, et à l'Est le Dejbél Mesid qui atteint l'altitude de 1406 m, au Sud, le deuxième axe parallèle au précédent est constitué par les Djebels: Zellez (1110 m) et Berda (1129 m) entre ces deux chaînes de montagnes se situe la vallée de la Medjerda. (Senini S., 2010).

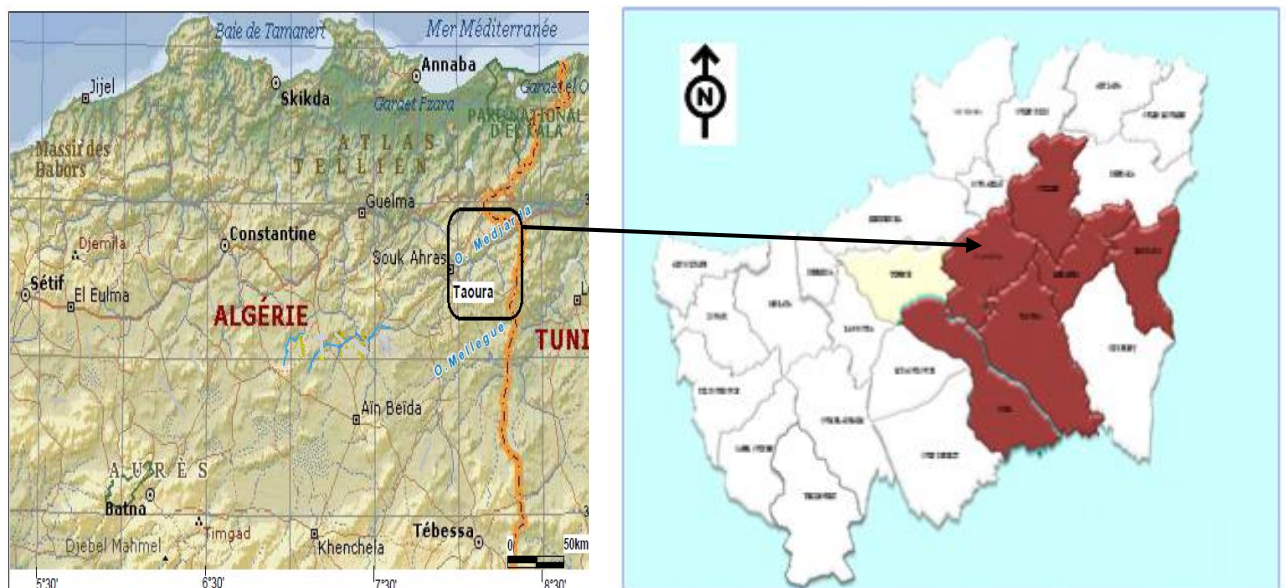


Figure I.1 : localisation de la zone d'étude.

I.2 Géomorphologie et présentation du sous BV de la Medjerda

La détermination de la forme des reliefs est très utile pour déterminer les zones hautes et les zones basses et pour rechercher des sites de réservoirs de rétention et de stockage des eaux de surface.

Oued Medjerda est le plus important de la partie aval de la région de Souk-Ahras ; il draine un bassin versant de 23 700 km² dont 7 600 km² sont situés en Algérie (MEBARKI A. 2005) ; le cours suivant la branche la plus longue s'étend de 600 km, le cours principal de la Medjerda faisant lui 485 km. Lui et ses affluents collectent de l'Ouest vers l'Est la majeure partie des eaux de surface du Nord de la Tunisie et véhiculent en moyenne près d'un million de mètres cubes d'eau par an.

Tableau I.1 : Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de Medjerda (ANRH 2007).

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Superficie	S	1411	Km ²
Périmètre	P	231	Km
Altitude max	H Max	1125	m
Altitude min	H Min	257	m
Altitude moy	H Moy	690	m
Dénivelle spécifique	Ds	321.9	m
Temps de concentration	Te	18.58	h
Densité de drainage	Dd	3.32	Km/Km ²
Largeur de Talweg principale	Lw	106.16	km
Pente moyenne	pm	3.32	%
Longueur du rectangle	Le	101.29	m
Largeur du rectangle	Le	13.31	m

Tableau: I.2 : Potentialités du sous bassin versant de la Medjerda (Araibia F, 2010)

La région Le bassin		Superficie en km ²	Epaisseur de l'eau par rapport à la superficie du bassin en mm	Ressources Annuelles en millions de m ³	Moyenne Annuelle en millions de m ³	Le Taux compare à la moyenne annuelle En %
Medjerda	Mellag	10600	12.0	127	188	68
	Les affluents de la côte nord	660	287.0	189	200	95
	Medjerda Centrale	7 700	39.0	300	460	65
	Siliana-Khalled	2 660	23.0	61	115	53
	Le reste du bassin	2 080	8.0	17	37	45
Total Medjerda		23 700	30.0	695	1000	69

Medjerda est un Oued qui prend sa source de khemissa *ruine romaine* près de Souk-Ahras puis s'écoule vers l'Est avant de se jeter dans la mer méditerranée *golf de Tunis*. S'étendant sur plus de 416 km dont 106.16 km relèvent de la wilaya de Souk-Ahras, (Guesmi I, 2004). Sa partie amont est utilisée comme source d'alimentation en eau potable.

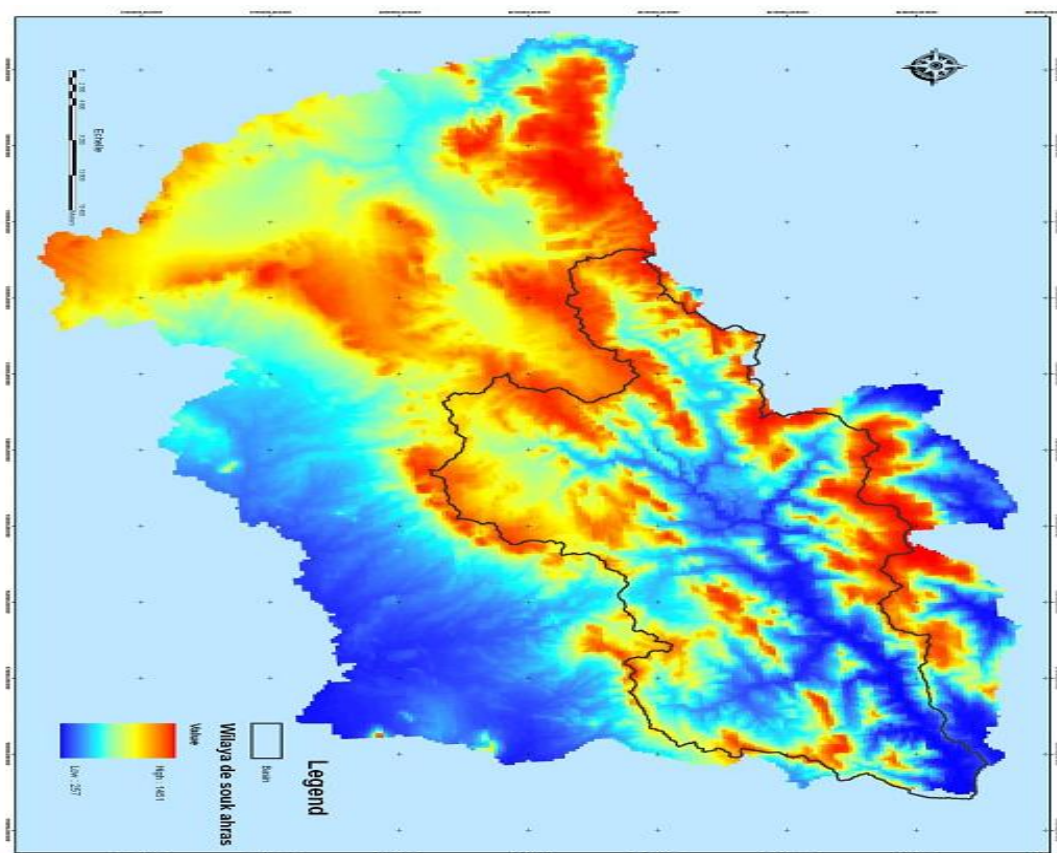


Figure I.2 : sous bassin versant Medjerda.

I.2.1 Les éléments de relief

D'une manière générale, il s'agit d'un relief montagneux complexe, assez élevé au Nord et moins élevé au Sud de la wilaya. Au Nord, il est subdivisé en deux alignements séparés par la vallée de la Medjerda. Ils ont une orientation générale Sud-ouest, Nord-ouest. Dans le détail, quatre principales zones peuvent être distinctes :

- La zone montagneuse septentrionale ;
- La chaîne montagneuse centrale ;
- La dépression de Merahna ;
- Le piémont méridional.

I.2.1.1. La zone montagneuse septentrionale

Constituée essentiellement par les monts de la Medjerda, cette zone montagneuse est située au Nord de l'Oued Medjerda et de l'Oued Cherf. Elle présente un relief accidenté constitué d'une série de Djebels et de Kefs dont l'altitude varie entre 700 et 1400 m.

Les sommets les plus élevés sont : Djebel M'Sid (1406 m), Ras El Alia (1317 m) et El Beida (1423 m) qui constitue le point le plus élevé de la zone d'étude.

Elle présente des versants courts et raides à interfluves étroits. Ces versants à forte pente ont été disséqués par un chevelu très dense de talwegs qui convergent vers l'Oued Medjerda pour la zone Nord-est et vers l'Oued Cherf pour la partie Nord-ouest. Ces deux (02) écoulements ainsi que Oued Mellègue au Sud, constituent les principaux drains du territoire de la wilaya de Souk-Ahras.

I.2.1.2 La chaîne centrale

Faisant partie du domaine atlasique, cet ensemble est constitué essentiellement de chainons et de crêtes qui se dressent en deux lignes parallèles au Sud de la Medjerda. Ce double alignement forme une barrière haute et rigide débutant de la frontière Tunisienne (Djebel Melaha 1020 m) et se prolonge jusqu'à hauteur de Sedrata (Djebel Tiffech). Culminant à Djebel Tiffech (1154 m) la continuité de ce double alignement s'interrompt au niveau de la route reliant Taoura à Souk-Ahras, pour reprendre à l'Est jusqu'à la frontière Tunisienne.

I.2.1.3 Le piémont méridional

Débutant au pied de Djebel Boussessou, Baba Embarek, il correspond à un plan incliné vers le Sud à pente douce. Ayant un profil concave et une altitude oscillant entre 800 et 900 m. Cette forme s'étend jusqu'à la vallée de l'Oued Mellègue sur une distance d'environ 15 Km².

I.2.1.4 La dépression de Merahna et Sedrata

Ces dépressions sont considérées comme un simple prolongement du paysage constantinois. Moins apparentes topographiquement, elles sont limitées au Nord comme au Sud par les crêtes de la chaîne centrale. Ayant une orientation Sud-ouest, Nord-est, elles représentent un relief légèrement ondulé où l'altitude varie entre 833 et 892 m pour la dépression de Sedrata et entre 693 et 724 m pour celle de Merahna. Le prolongement oriental de cette dépression semble être interrompu par une série de Koudiats au niveau de M'daourouche.

I.2.2 Les unités morphologiques

D'une façon générale et du point de vue structural, le périmètre d'étude est considéré comme un point de contact entre deux (02) unités structurales, fondamentalement à savoir :

L'unité Tellienne d'une structure complexe, et l'unité Atlasique d'une structure relativement simple, on considérant cette diversité structurale et du relief, deux unités morphologiques peuvent être distinctes :

- La chaîne montagneuse septentrionale : cette appellation gagne tous les terrains situés au Nord de la Medjerda et Oued Cherf ; qui se compose d'une série de Djebels (ras El Alia, Azega et Tebaga) constitués des calcaires sénomanies. Au Sud de cette série se dresse une deuxième ligne de crête toujours taillée dans les calcaires de cénomanien et ouvert par des Grés Numidiens. Cette série de Djebels Bousatarine à El Beida (1423 m).
- La zone centrale : elle englobe les dépressions de Sedrata, Taoura et Merahna ; ainsi que le double alignement de crêts de Tifech à la frontière Tunisienne ; cette zone a une structure simple. Elle se résume en des plis synclinaux et anticlinaux qui se succèdent régulièrement depuis la vallée de la Medjerda jusqu'aux abords de la vallée du Mellègue. Le piémont méridional s'étale, depuis les crêts de Boussessou, Baba Embarek etc. Jusqu'à la vallée de l'Oued Mellègue.

I.3 réseau Hydrographique de la Medjerda

Les principaux affluents de cet Oued sont ([A.B.H, 2007](#)) :

- ❖ Oued Chouk 31.6 KM (Commune de Drea)
- ❖ Oued Djedra 36.1 KM (Commune de Souk-Ahras)
- ❖ Oued Berriche 21 KM (Commune d'Ouillen)
- ❖ Oued Renem 28.2 KM (Commune de Khedara)
- ❖ Oued El Ghoul 12.6 KM (Commune d'Ouled Moumen)

Ainsi qu'une centaine de petites rivières et ruisseaux.

Le réseau pluvial de ce bassin est très développé, l'apport annuel moyen observé est en moyenne de 202 million de m³. La couverture végétale est relativement dense dans le Nord du bassin avec des forêts de pins, cyprès, broussailles et eucalyptus telle que la forêt de Mahbouba. Alors que dans sa partie Sud c'est les terres agricoles et les arbustes qui prédominent.

I.4 Collecte des données (Production en eau – adduction – stockage)

I.4.1 Production

I.4.1.1 Les Ressources en eaux superficielles

- Le barrage d'Ain Dalia : Les ressources superficielles proviennent principalement du barrage d'Ain Dalia situé à une dizaine de kilomètres à l'Ouest de Souk-Ahras (figure 4.). Le barrage a été mis en service en 1987. ([DRE, 2017](#)).



Photo I.1 : Barrage Ain Dalia

La baisse sensible du volume du barrage d'Aïn Dalia (Souk-Ahras) a provoqué une grave crise dans l'alimentation en eau potable dans cette région frontalière. Le volume de ce barrage (76 millions m³) qui alimente les wilayas de Tébessa, Oum El Bouaghi et Souk-Ahras a diminué à environ 5 millions m³, notant que des mesures d'urgence ont été prises, notamment l'utilisation d'une station mobile installée dans les endroits où le volume d'eau est élevé afin d'éviter de pomper de la gadoue. La réduction de ce volume a causé le recul de la moyenne quotidienne d'eau distribuée à une fois tous les 7 jours à 10 jours, a-t-il noté, affirmant qu'un programme a été tracé par le ministère de tutelle, visant à exploiter de manière rationnelle le reste du volume de ce barrage (5 millions m³), en distribuant 30.000 m³ chaque jour en faveur des wilayas de Souk-Ahras, d'Oum El-Bouaghi et de Tébessa. Selon la même source, la wilaya de Souk-Ahras a été répartie sur 4 secteurs et cela pour une gestion efficace de cette crise. Le premier secteur, a-t-il détaillé, est alimenté depuis les eaux souterraines de la nappe de Taoura. (ADE, 2017, A.N.B.T & D.H.W., 2017).

- Les sources d'Ain Dalia

Ces sources sont en fait des infiltrations d'eau du barrage. Elles seraient apparues simultanément à son édification. Les débits des émergences fluctuent en fonction de la hauteur d'eau du barrage et auraient fortement évolués au fil du temps. Les eaux sont captées par un système de drains en pied de versant comme le montre la Photo 1.2, puis conduites par gravité jusqu'à la station de pompage de Moulin Deyron. Elles sont ensuite refoulées vers Souk-Ahras (BCEOM, 2008).



Photo I. 2 : Système de captage des sources d'Ain Dalia.

I.4.1.2 Les eaux souterraines

Les eaux souterraines constituent une ressource importante d'eau pour l'approvisionnement de la population et pour l'irrigation. Toute étude visant l'évaluation des potentialités en eau souterraines d'une région nécessite le traitement du bassin hydrogéologique comme unité de raisonnement. Ainsi, la bonne connaissance des limites géométriques et la structuration de ce bassin, la compréhension de son hydrodynamisme et la précision des communications qui peuvent se produire entre les différents aquifères s'avèrent indispensables.

Les ressources souterraines actuellement mobilisables pour l'alimentation en eau de la région de Souk-Ahras et l'utilisation pour l'irrigation de plusieurs cultures.

- La nappe de Taoura

Cet aquifère qui s'étend vers la frontière Tunisienne a une importance régionale, car il alimente de nombreuses localités riveraines, il est situé à une trentaine de kilomètres au Sud de Souk-Ahras. Cette nappe est sollicitée par de très nombreux forages et puits et joue un rôle très important dans l'alimentation en eau de la population. Elle se recharge principalement par les eaux de pluie.

Les couches géologiques renfermant cette nappe forment une épaisse série dont l'épaisseur dépasserait les 500 m, seul le Maestrichtien inférieur constitué par un calcaire blanc micritique à patine fine est productif. Les formations supérieures et inférieures sont principalement constituées de marnes imperméables. La série supérieure par son épaisseur et

son imperméabilité peut créer une mise en charge de l'aquifère du Maestrichtien et le rendre ainsi captif.

Cette nappe est donc plutôt bien protégée des activités anthropiques grâce à son toit argileux. Du point de vue quantitatif, la nappe de Taoura à un réel potentiel compte tenu de la multiplicité des prélèvements par forages sans que cela n'ait d'impact significatif.

Il a été identifié en tout 22 forages sur le secteur de la nappe de Toura alors que seulement 3 d'entre eux sont réservés à la région de Souk-Ahras. Ces ouvrages refoulent vers un réservoir de mise en charge de 2000 m³ puis l'adduction se fait par gravité vers Souk-Ahras via une conduite acier et fonte de diamètre 500 mm. L'ADE a procédé (fin de l'année 2014) à des travaux de remise en état de 2 forages D4 et T7 et à la construction d'un nouveau forage T'1 en remplacement du forage T1 afin de réactiver la connexion au système d'adduction de Souk-Ahras. Le potentiel mobilisable serait de l'ordre de 8 000 m³/jour (DRE, 2017).

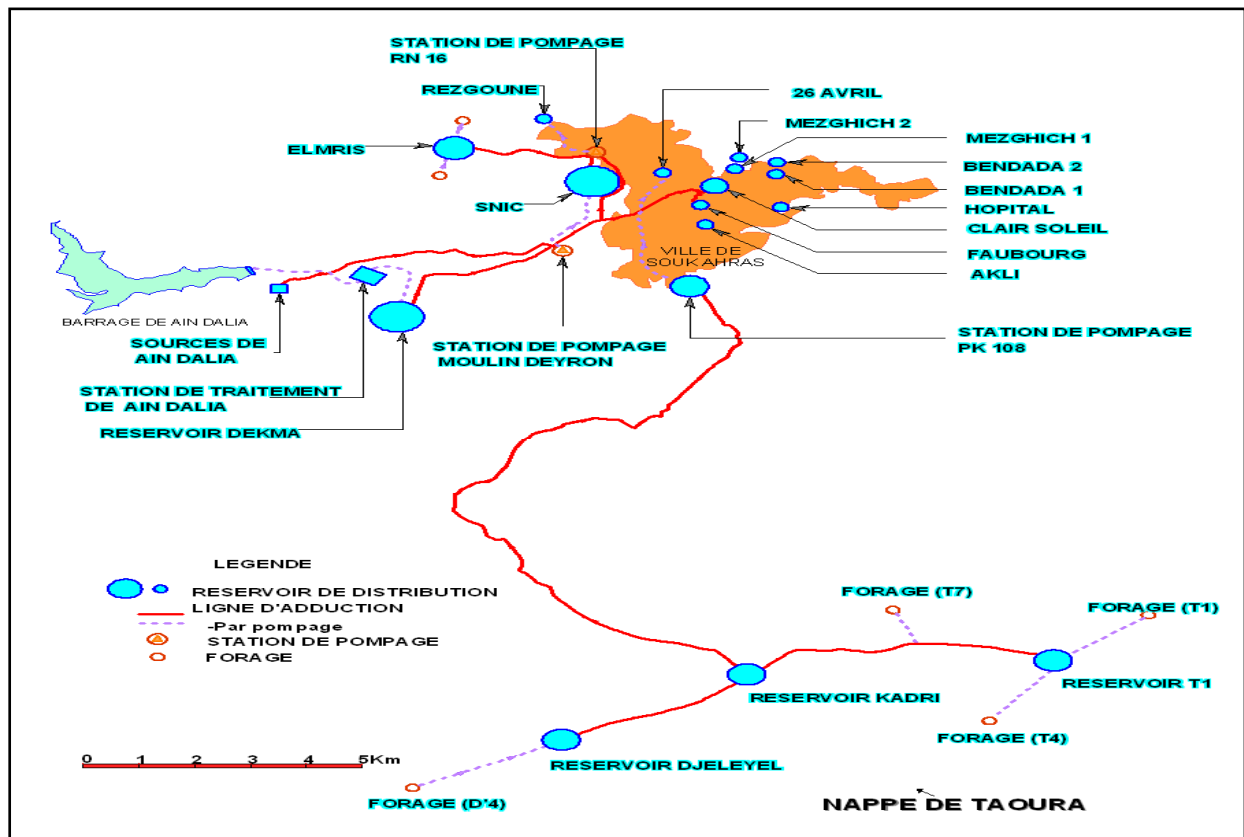


Figure I.4 : Organisation du système production adduction de la région de Souk-Ahras (ADE, 2008).

I.4.2 Barrages en projetée

Pour une meilleure mobilisation des eaux du sous bassin Medjerda qui représente un réseau fluvial très développé et un apport annuel avoisinant les 202 Hm³, une étude de faisabilité de deux barrages a été élaborée:

communes de la wilaya de Souk-Ahras. La densité de population est peu élevée pour l'ensemble du bassin versant. Elle est de l'ordre de 42 habitants par km².

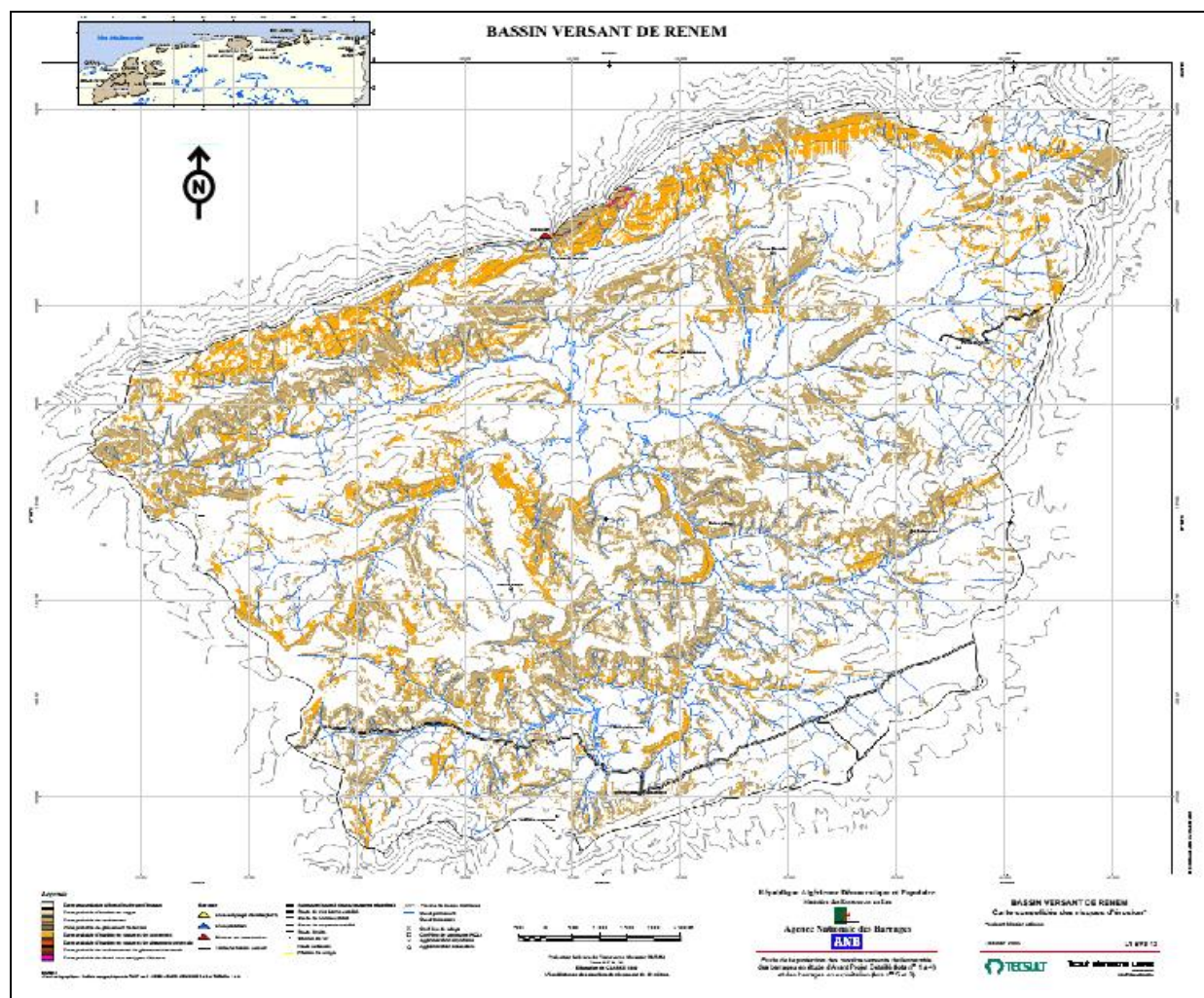


Figure I. 6 : Sous Bassin versant d'Oued Renem. (A.N.B.T. 2012)

I.5 L'importance d'Oued Medjerda

La basse plaine de Medjerda se situe au Nord-est de l'Algérie à 680 km à l'Est d'Alger et à 100 km d'Annaba et se range parmi les Oueds de portée internationale

Les économies principales sont, l'agriculture, l'industrie locale, la construction et le commerce, l'agriculture d'irrigation actuellement n'est pas développée.

La wilaya de Souk-Ahras chevauche 03 grands bassins versants : Medjerda, Seybouse et le bassin versant de Mellègue.

I.5.1 Secteur mobilisation

Tableau I.3 : Mobilisation des ressources

en eau (Guebaili A., 2008)

Libelle	Volume mobilisable	Volume exploité
---------	-----------------------	--------------------

Capacité globale d'eau mobilisable	95.92Hm ³	91.00Hm ³
Capacité des barrages	74.72Hm ³	
Capacité des forages	12.22Hm ³	8.89Hm ³
Capacité des puits	2.98Hm ³	1.09Hm ³
Capacité des sources	3.84Hm ³	1.4Hm ³
Capacité des retenues collinaires	2.16Hm ³	

Toutes ces ressources, superficielles et souterraines, constituent les principales sources d'approvisionnement de la région, dont les besoins sont sans cesse croissants.

I.5.2 Productions agricoles – Systèmes culturaux en irrigué

I.5.2.1. Cultures pratiquées

L'occupation du sol (exprimée en Ha) présentée dans le tableau ci-dessous est issue de l'inventaire effectué auprès des délégués communaux en 2008.

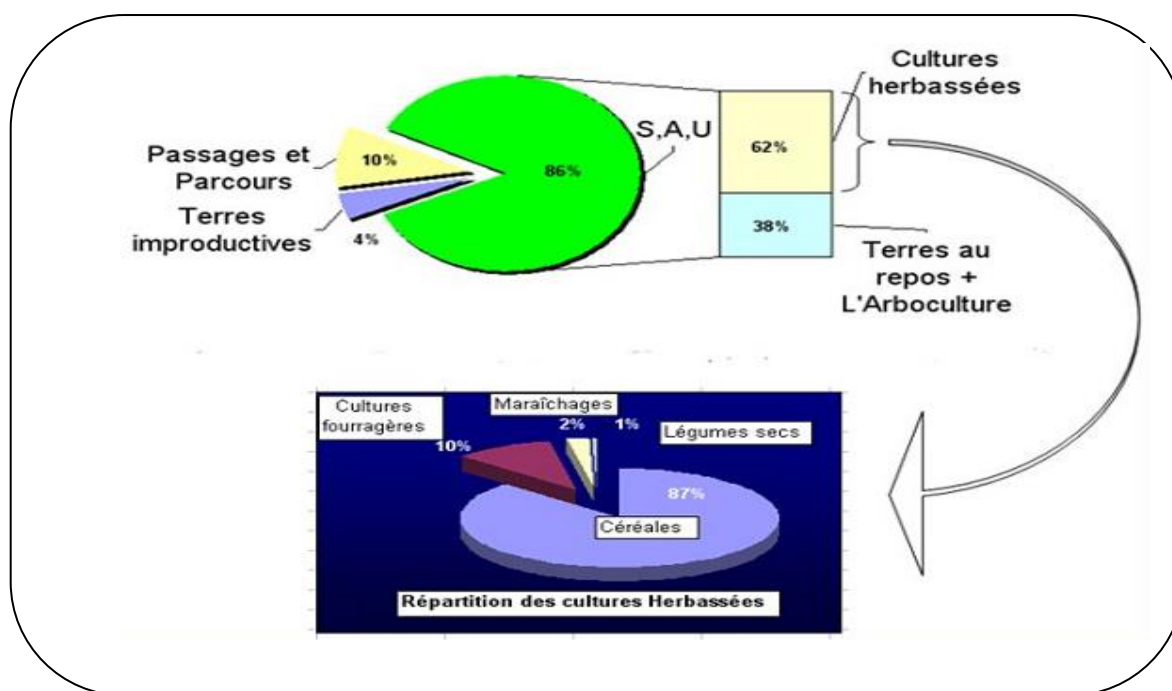


Figure I.7: Répartition des terres utilisées par l'agriculture dans la région d'étude (Djaba H, 2010)

Tableau I.4 : Cultures irriguées par région agricole (D.S.A., 2014)

Région Agricole	Hautes plaines du Constantinois	Monts de L'Ouest	Monts de Souk-Ahras	Total wilaya
SAU totale	149 826	32 915	78 500	261 241

<i>SAU physique irriguée</i>	1 810	625	1339	3774
<i>SAU irriguée développée</i>	2 030	625	1344	3999
<i>Taux d'intensification</i>	1,12	1,00	1,00	1,06
Céréales	120	40	0	160
Fourrages	71	25	23	119
Maraîchage	1 269	409	688	2366
Cultures industrielles	0	20	0	20
Arboriculture	410	130	471	1011
Agrumes	0	0	6	6
Oliviers	160	1	156	317
TOTAL	2 030	625	1344	3999

I.6 Hydrographie

Deux sous bassins versant s'étendent sur la majorité de notre région, ils drainent les eaux superficielles vers deux grands cours d'eau qui sont la Medjerda et Mellègue. Dans la zone de Merahna les cours d'eaux prennent une direction (NNC-SSE) en traversant vigoureusement les chaînes montagneuses pour atteindre les Oueds de Renen et Mendil qui mènent à la Medjerda.

Dans la zone de Taoura où apparaît le rétrécissement brusque du synclinal qui engendre des lignes de partages des eaux de surfaces, les cours d'eaux prennent des directions différentes : les Oueds de Sfari et Gredine s'évacuent vers le Nord dans la Medjerda, par contre ceux de Berbaga, El Mellah et Merzita se déversent au Sud dans le Mellègue.

A partir des massifs montagneux, bordant la zone d'étude, de nombreux cours d'eau pérennes et temporaires naissent pour former le réseau hydrographique.

I.7 Couvert végétal

La partie aval du sous bassin versant de Medjerda est une région rurale, c'est pour cela elle est connue par la vocation agricole. La végétation est étroitement liée à la pluviométrie. Au Nord où la pluviométrie est très importante on trouve une couverture végétale assez dense représentée par le chêne-liège et ses associations. Au Sud, sur les zones caillouteuses, où la pluviométrie est faible on trouve la garrigue à chênes verts, genévriers, lentisques et disse le domaine de la stoppe qui se caractérise par le disse et l'halfa.

Essentiellement, les cultures céréales sont localisées sur les formations marneuses dans la partie septentrionale de la région d'étude. Sur les calcaires, les forêts de pins d'Alep dominant. Les zones caillouteuses et croûtes calcaires sont couvertes de disse et de halfa végétation de type steppique. Au Nord de la région de Taoura se trouvent des pinèdes, sous-bois et maquis.

I.8 Vocation économique de la région

La région d'étude constitue une région à vocation agricole, où l'application des cultures maraichères et céréales sont les plus importantes. (B.N.E.D.E.R.2008)

Les cultures occupent une superficie très importante (culture céréalière en particulier blé, maïs, culture fourragère ; arboriculture ; viticultures ; culture du tabac) et l'élevage du bétail avec 310 000 ovins, 93 000 caprins et 85 500 bovins.

Les grands périmètres d'agriculture dans la région, comme le montre la figure 4.3, sont : le périmètre de Battoume dans la commune de Taoura avec une superficie de 350 hectare, et le périmètre de Tara situé dans la commune de Sidi Fredj avec une superficie de 300 hectare. Et le périmètre d'irrigation Sidi Bader et Hemissi (500 Ha). La demande d'irrigation est estimée de plus de 6.000 m³/an/Ha. Le type d'irrigation utilisée est mixte, traditionnelle (gravitaire), et moderne (aspersion) selon le type de culture. (Rouaibia F, 2009). La demande d'irrigation est collectée de la direction de l'agriculture, cette dernière a été estimée à plus de 6 mille de m³ par hectare par an, la quantité d'eau qui a été utilisée pour l'irrigation est exploitée, les eaux de surface en premier lieu comme les retenus collinaires et une quantité faibles des eaux souterraines exploitées par les forages.

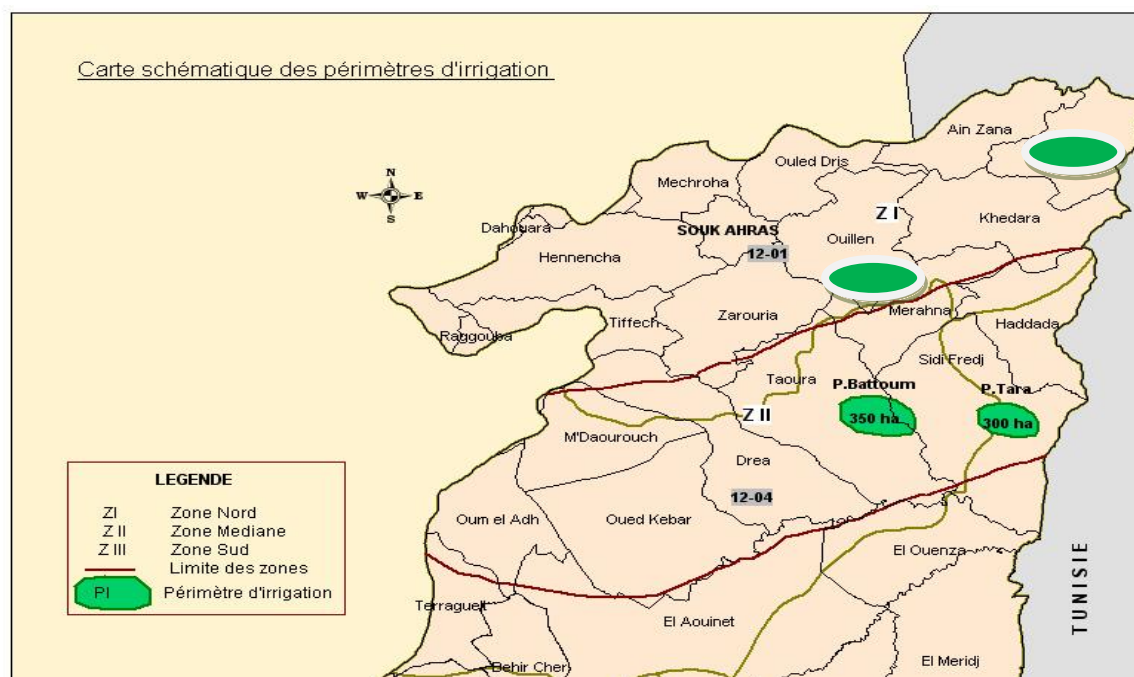


Figure I.8 : Périmètres d'irrigation

La dotation moyenne en eau et son évaluation dépend des facteurs économiques, démographiques et géographiques. Actuellement la dotation varie d'une commune à autre, et même dans la même commune entre le milieu urbain et rurale, selon la DRE et comme configurée dans le tableau I.5 on observe cette variation.

Tableau I.5 : Dotation moyenne en milieu urbain et rural à travers la région (Boukari S., et al 2014).

Communes	Dotation Moyenne en milieu urbain (L/Hab/J)	Dotation Moyenne en milieu rural (L/Hab/J)	Dotation Moyenne (L/Hab/J)
Khedara	140	31	85.5
Heddada	114	100	107
Ouillen	30	60	45
Merahna	110	60	85
Sidi Fredj	60	60	60
Zaarouria	110	80	95
Taoura	150	80	115
Drea	120	80	100
Moyenne	104.25	68.87	86.56

I.9 Domaine industriel

L'industrie constitue pour la wilaya de Souk-Ahras le second secteur économique après l'agriculture. Elle comporte plusieurs unités industrielles dont les plus importantes sont:

- ❖ Briqueterie (stones de tuileries): unité de production de brique, qui consomme 38 m³/j d'eau.
- ❖ Celpap-Rosa : entreprise nationale de la cellulose et du papier, Elle utilise 2210 m³/j d'eau de surface d'Oued Medjerda.
- ❖ Complexe avicole : spécialisé en aviculture, il consomme quotidiennement 30 m³/j d'eau du barrage de Ain Dalia.
- ❖ ENAP ex SNIC : unité de production, pour la fabrication de la peinture, résine, colle et vernis. Elle consomme quotidiennement 300 m³ d'eau du barrage d'Ain Dalia.
- ❖ ELATEX : Cette unité de production de textile (toutes sortes de tissus), consomme 1200 m³/j d'eau. Cette richesse dans les trois domaines engendre actuellement un souci majeur, car ces domaines représentent les plus importantes sources de pollution, à savoir :
 - Pollution urbaine : Elle est représentée par les rejets urbains de la wilaya de Souk-Ahras qui sont déversés sans traitement préalable dans l'Oued Medjerda (Dairi S, 2009)
 - Pollution industrielle : les cinq industries principales de la wilaya précitées déversent leurs effluents au niveau de l'Oued Medjerda

- Pollution agricole : cette pollution est liée essentiellement à :
- l'existence de plusieurs fermes pratiquant divers types d'élevages (ex. : Complexe avicole) et ne disposant d'aucun équipement de sécurité contre la pollution;
- l'utilisation intensive des engrais et de pesticides riches en NO_3^- surtout dans les quatre périmètres d'irrigations avec une superficie 1300 Ha.

Il existe quelques problèmes de pollution des Oueds notamment sur la commune de Souk Ahras. La totalité du réseau d'assainissement de la ville de Souk-Ahras n'est pas raccordée à la station d'épuration (STEP), ce qui explique cette pollution.

**Tableau I.6 : Systèmes d'épuration des eaux usées dans la wilaya (Dairi S. 2018).
de Souk-Ahras**

Processus d'épuration	Commune	Date de mise en service	Observations
STEP Boues activées	Hannancha	1994	Irrigation des zones des Oued Medjerda et Dardoura en projet
STEP Boues activées	Sedrata	2008	Protection du barrage Oued Charef et nappe de Tarreguelt
STEP Boues activées	Souk-Ahras	2003	Irrigation des zones des Oued Medjerda et Dardoura en projet

I.10 Environnement

Le milieu de la zone d'étude possède une richesse naturelle importante (montagne, forêts ...), avec des sources de pollution par les déchets solides ou atmosphériques vu l'activité industrielle dans son territoire ainsi que des rejets liquides: les eaux usées ménagères sont évacuées et rejetées directement dans le milieu naturel (Oueds et chaabat) sans traitement préalable (Rouaibia,F 2012).

I.11 Conclusion

Le sous bassin de l'Oued Medjerda appartient au grand bassin du Medjerda-Mellègue, il occupe dans sa partie Algérienne une superficie environ de 1411Km² et s'étend sur une longueur du talweg principal de 106.16 Km caractérisé par un chevelu hydrographique très dense et un écoulement temporaire.

La zone d'étude est située dans une région à vocation agricole et industrielle, d'une population plus de 344 000 habitants. Ce développement socio-économique a engendré une augmentation importante de la demande en eau des différents secteurs.

Chapitre II : La Géologie

II. Introduction

La géologie constitue la base fondamentale de toute étude hydrogéologique, elle détermine les formations susceptibles ou non de constituer des aquifères à partir de leur lithologie; ainsi que la détermination des relations pouvant exister entre eux.

Le lessivage des formations géologiques par les eaux des précipitations et les eaux des Oueds montre que le cadre géologique a un intérêt très spécial car c'est le noyau de nos interprétations, on y revient aux formations géologiques du terrain d'étude à chaque fois qu'on a besoin d'expliquer ou d'interpréter un résultat.

L'étude géologique détaillée par (David L., 1956) dans le cadre de sa thèse de doctorat consacrée aux monts de la Haute Medjerda en se basant sur la lecture de sa carte géologique au 1/200 000ème complétée par les travaux de (Villa J. M., 1980,1994).

II.1 Régionale :

Parmi de nombreux chercheurs qui ont étudiés la structure géologique Nord-Africaine nous citons Villa (1980) et (Wildi W., 1983) qui subdivise le Nord Algérien en trois domaines paléogéographiques qui sont du Nord au Sud :

- Domaine interne :

Il comprend le socle Kabyle cristallin et sa couverture sédimentaire paléozoïque peu ou pas métamorphisée, caractérisant surtout la grande et la petite kabylie. En Algérie orientale, le domaine interne compose les reliefs littoraux bordés par les unités (discontinues) de la dorsale kabyle ayant subi un mouvement Nord-sud.

- Le Socle Kabyle :

Il est composé de deux grands ensembles :

- ❖ Un ensemble de roches peu ou pas métamorphiques ;
- ❖ Un ensemble de roches métamorphiques mésozonales à catazonales.

- La chaîne calcaire Kabyle :

Elle constitue la couverture de la bordure méridionale du Socle Kabyle. Cette dorsale comporte des formations allant du Permo-Trias au Lutétien.

- Domaine médium (sillon des flyschs):

C'est un domaine paléogéographique qui a reçu une sédimentation essentiellement argilo-gréseuse depuis le Crétacé jusqu'au Paléocène. En Algérie, ce domaine occupe une position allochtone.

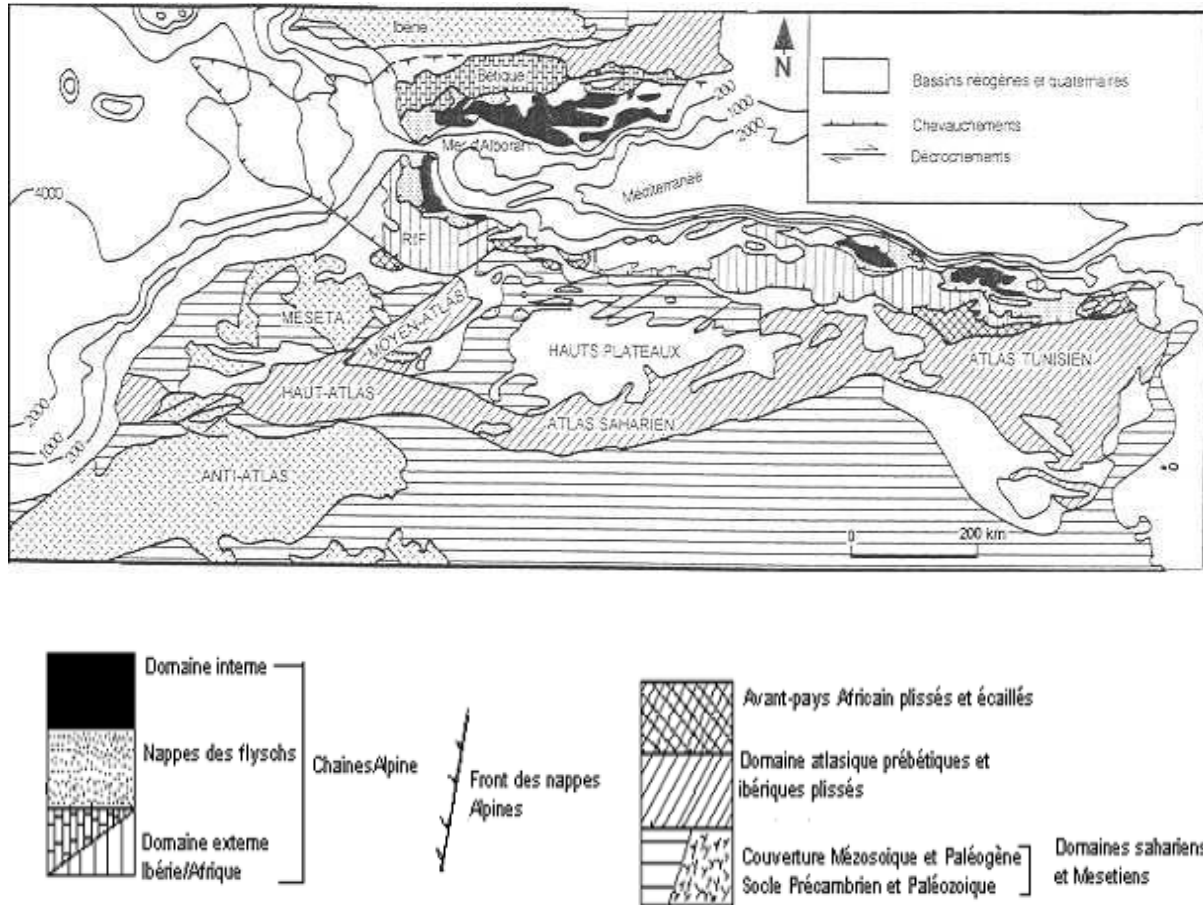


Figure II.1: Cadre structural Africain et ibérique de la chaîne tello-rifaine
(d'après Wildi, W 1983).

Le territoire de la région de Souk-Ahras qui s'insère dans les monts de la Medjerda constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir l'Atlas Tellien au Nord et Saharien au Sud. La zone saharienne d'une structure plissée d'une orientation dominante Sud-ouest ; Nord-est. Cette structure dite jurassienne est composée d'une série de plis synclinaux larges et d'anticlinaux plus étroits datant du Crétacé. Leur couverture est généralement mince, elle présente une épaisseur de quelques milliers de mètres au maximum. Au Nord, vers le Tell et compte tenu des poussées tangentielles venues du Nord, les plis adoptent une orientation Ouest, cette orientation dite Numidienne est très visible, surtout dans la zone Nord-ouest. Cette compression latérale a réduit la taille de l'ensemble des plis en

donnant des synclinaux couchés, dans la plupart des cas faillés. Il est donc remarqué un passage progressif de la structure Atlasique à la structure Tellienne, qui a connu la zone tellienne. Aussi, la présence des fractures transversales responsables des bassins d'effondrement (Taoura) a fait que les plis ont subi une légère torsion vers le Nord du côté de la frontière Tunisienne. Le Trias quant à lui réagit pour son propre compte. Il est toujours responsable de certaines complications comme notre zone. Il se trouve en position stratigraphique anormale (discordante). Sa grande plasticité lui permet de montrer à travers les terrains sous-jacents (O.R.G.M., 2002). Il est remarqué dans les anticlinaux, dans les grandes fractures ou dans les massifs (les massifs de Souk-Ahras). La mise en place de cette structure s'est faite comme pour toute la chaîne montagneuse Nord orientale au cours de nombreuses phases orogéniques.

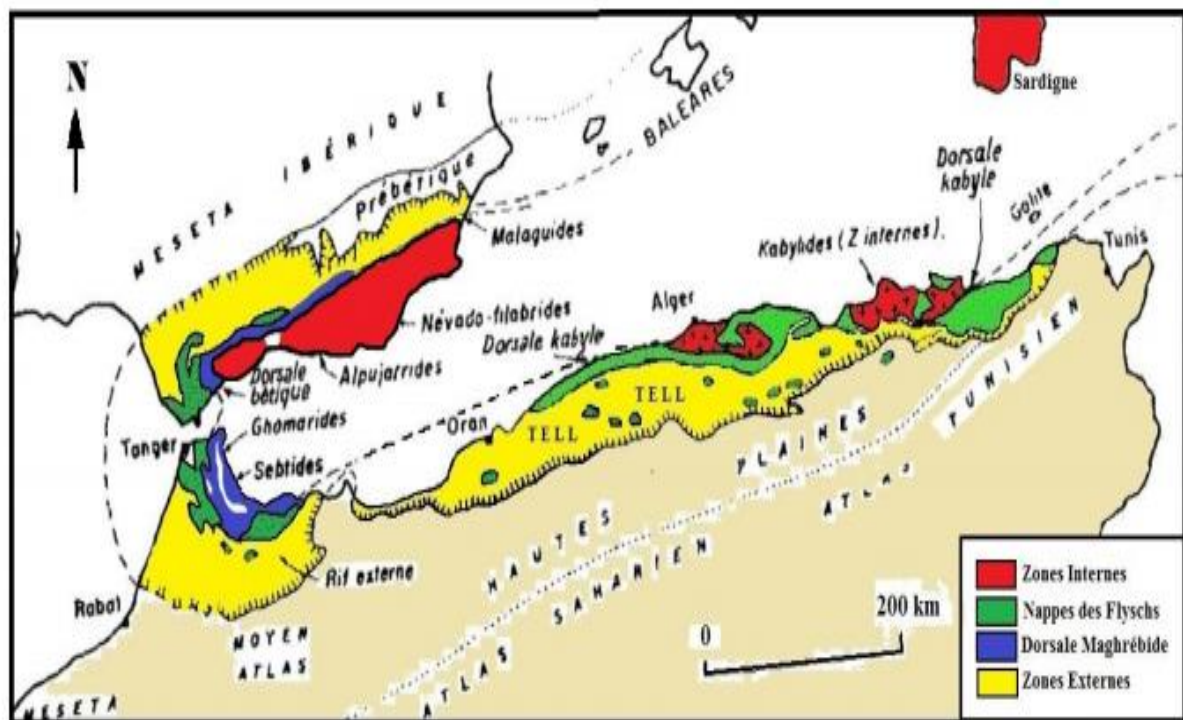


Figure II.2 Schéma structurale des Maghrébides (d'après M. Durand-Delga et J.M. Fontboté, 1980)

II.2 Lithologie et stratigraphie :

D' après les cartes géologiques couvrant le territoire de la wilaya de Souk Ahras , une carte lithologique au 1/50.000 a été dressée pour servir de base à l'établissement de la carte pédologique, elle traduit la nature lithologique des grandes formations géologiques

rencontrées et qui vont du Trias étant la plus ancienne formation au Quaternaire qui représente les terrains les plus récents de l'échelle stratigraphique, résumée comme suit :

Tableau II.1 : stratigraphie géologiques de la région

FORMATION	LITHOLOGIE DOMINANTE
Quaternaire	Alluvions, terrasses
Mio- Pliocène continental	Argiles rouges, sables, agglomérats
Miocène supérieur	Argiles et argiles – sableuses
Miocène inférieur	Argiles sableuse, argiles et calcaires lacustres
Oligocène	Argiles rouges et argiles sableuses de Numidie
Eocène Moyen	Marnes et calcaires
Eocène inférieur	Marnes et nappes de calcaires
Crétacé Supérieur	Calcaires sénonien et marnes
Crétacé inférieur et Moyen	Marnes et calcaire marneux Turoniens
Trias	Marnes Gypses, calcaires et Dolomies

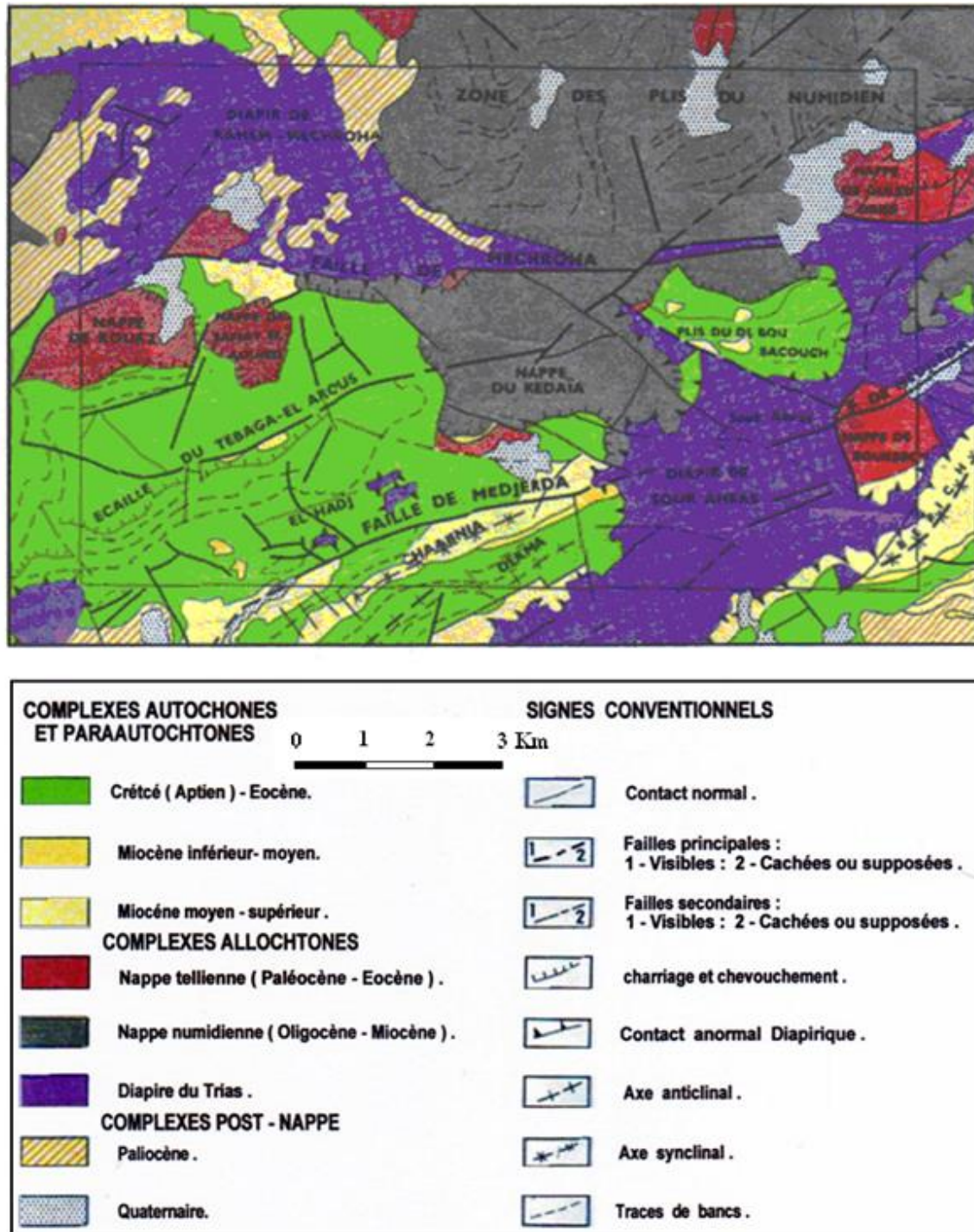


Figure II.3 : Schéma structural 1/250 000 d'après la carte géologique 1/50 000 (Souk-Ahras) d'après (SONATRAC)

II.2.1 Le Trias

Sans évoquer les mécanismes et la dynamique de la mise en place des dépôts triasiques de la région (Villa, 1980 ; 1993, 1994 ; Chouabi, 1987, Perthuisot & al., 1998), le Trias constitue la base des structures géologiques et comporte des calcaires vermiculés (bancs disloqués), des argiles bariolées gypsifères, des cargneules, des marnes jaunes, des amas de gypse et de

calcaires dolomitiques sombres (Souid, 1983 ; Aoudjehane & al., 1992 ; Bouzenoune & al., 1995).

Les premiers affleurements triasiques se situent au centre du massif, autour de la ville de Souk-Ahras. Au Nord de notre zone d'étude, les affleurements triasiques sont affectés par des plissements intenses à l'exemple d'Ouled Driss et Oued Mougras et Hennancha.

Dans le massif de Mechroha-Nador-N'Bails, les dépôts triasiques font partie de la semelle des nappes telliennes qui est développé en Tunisie.

D'une façon générale, les terrains Triasiques sont discordants par rapport aux formations sus-jacentes (Thibiéroz et Madre, 1976). Ils sont caractérisés par une hétérogénéité lithologique composée :

- D'une formation grés-gypso-argileuse à Blocs de roches variées, c'est une formation plastique constituée d'un mélange de marnes et d'argiles bariolées avec des blocs de calcaires gris ou noirs.
- Des grés, argiles et marnes : Ce sont des blocs de grés micacés intercalés d'argiles et de marnes bariolées de teinte rougeâtre.
- Des dolomies qui correspondent à des roches à grain fin légèrement poreuses et litées.

II.2.2 Le Crétacé inférieur et moyen

Dans la zone d'étude, le Crétacé est caractérisé par l'affleurement des formations de l'étage Barremien, Aptien, Albien, Cenomanien et le Turonien, il ne couvre qu'une restreinte superficie des monts de la Medjerda. Il apparaît au Nord dans l'anticlinal de l'Oued Mougras (Sidi el Hemessi, Djebel Graouet et Bourzine) et s'étend jusqu'à la frontière Tunisienne. Il est aussi remarqué dans l'anticlinal de Djebel Ladjbel, en bordure du diapir Triasique d'El Ouasta, près de la frontière Tunisienne (O.R.G.M., 1997-2000). Il est bien développé à Souk-Ahras avec les dépôts des calcaires néritiques (Crétacé inférieur), surmontés par des niveaux argilo-marneux sombres à microfaunes planctoniques du Maestrichtien (Crétacé supérieur) et du Pliocène. Au Sud de Souk-Ahras, les matériaux composants le Crétacé inférieur et moyen sont des dépôts marins constitués essentiellement de marnes du Cenomanien et des marnes et marno-calcaires de Turonien.

Il est caractérisé par un faciès marno-gréseux représenté par une alternance de marnes grises avec des petits bancs gréseux gris. Des intercalations d'énormes lentilles de calcaires pseudo-récifal gris dans le Sud. Par contre au Nord, on retrouve des marnes schisteuses noires. En ce qui concerne l'Albien supérieur, il est inséparable du Cenomanien. L'Albien moyen est

représenté par une masse de calcaires noirs au Sud, qui diminuent puis disparaissent vers le Nord, avec des marnes et des grès.

II.2.3 Le Crétacé supérieur

Le Crétacé supérieur qui couvre la majeure partie du territoire de la Wilaya est caractérisé par deux (02) faciès importants : Les calcaires du Campanien et du Maestrichtien et la série marneuse des différents étages.

Il apparaît au Nord dans le territoire de la commune de Hanancha , Zaarouria, où il constitue les différents Djebels tels que Dekma . Zaarouria , Zelaz et Bourzine .

Dans la zone médiane, il est observé dans la commune de Taoura où il apparaît à Djebel , Taguilaline , Boussessou , Alahoum et Choucha .

- Le Cénomaniens est représenté par une succession, très épaisse, de marnes homogènes, surmontés de calcaires annonçant ainsi la mise en place de la sédimentation du Turonien inférieur plus épais vers le Nord.
- Le Turonien est formé essentiellement de calcaires. Le rapport entre les calcaires et les marnes varie énormément ; car vers le Nord, le Turonien n'est calcaires qu'à la base, dépassant les 200 m d'épaisseurs. Par contre vers le Sud, il est soit entièrement calcaire, soit essentiellement marneux et ne dépasse pas les 100 m d'épaisseur.
- L'Emschérien qui contient le Coniacien et le Santonien se caractérise par un ensemble essentiellement marneux épais surmontant la barre de calcaire Turonienne. On constate que les assises du Coniacien sont essentiellement marneuses associées à du quartz, des micas et des calcaires blanchâtres.
- Le Campanien se démarque par le passage latéral entre les calcaires blancs détritiques et les marnes grises tantôt bleutées en surface, tantôt verdâtres identiques à celles rencontrées depuis le début du Crétacé.
- Le Maestrichtien débute près du sommet des marnes intermédiaires. Il comprend essentiellement la seconde barre des calcaires ainsi que les marnes supérieures. Notons que les calcaires du Crétacé se trouvent dans les monts d'Ain Soltane ainsi que dans les flancs du synclinal de Dréa-Taoura-Mérahna et de bordj M'Raou où ils sont recouverts par les grès du Miocène et les alluvions du Quaternaire. Les épaisseurs peuvent atteindre 300 m.

II.2.4 L'Eocène

Du point de vue répartition géographique, l'éocène est très peu observé dans le territoire de la Wilaya de Souk-Ahras. Il n'apparaît que sous forme de lambeaux dans la région Nord .Il

affleure à Djbel Dekma, au Nord de Djebel M'sid, à Djebel Boukebch et aux environs de la gare de l'Oued Mougras .

Dans la zone médiane, il n'apparaît qu'aux environs de Taoura (Plateau de Taoura) .

L'Eocène se manifeste à travers le périmètre sous forme d'épaisses couches de marnes, de calcaires ou d'alternance de calcaire et de marne.

II.2.5 L'Oligocène

Comme l'Eocène, l'Oligocène se présente comme une bande Est-ouest au Nord de la zone passant par Oued Mougras et Sidi El Hemissi. Il affleure sous forme de grès Numidiens séparés quelques fois par des argiles schisteuses ou de marnes peu épaisses de couleur grise et pauvre en calcaire.

II.2.6 Le Miocène Inférieur

Il constitue le troisième cycle sédimentaire marin de l'^{ère} Tertiaire. Il couvre une vaste surface de la Wilaya. Il est observé au cœur des structures synclinales au Nord comme au Sud, passant par la zone médiane. Il affleure le long de la vallée de la Medjerda jusqu'à la frontière Tunisienne. Il apparaît aussi à Djebel Serrou, à Oued Chouk et dans la dépression de Merahna. (O.R.G.M, 2002) Dans l'ensemble le faciès dominant du Miocène sont les grès et les marnes associées quelques fois aux conglomérats et aux calcaires.

Les marnes sont d'une couleur noire ou brune riche en calcaire et souvent gypsifères, les grès quant à eux sont d'une teinte brune claire à ciment calcaire.

Le Miocène marin présente des faciès littoraux ou de mer peu profonde. Il est présenté par :

- ❖ les marnes noires qui prennent par altération une couleur brune assez claire, toujours riche en calcaire plus au moins ferrugineux et gypsifères,
- ❖ les grès blancs, roux ou bruns, à ciment calcaire ou calcaires-siliceux accompagnés souvent de conglomérats, sables, glauconites et de coquilles.

II.2.7 Le Miocène Supérieur

Son étendue est très limitée dans l'espace, il n'affleure que le long l'Oued Medjerda sur la rive Nord aux environs de la zone de l'Oued Mougras .

Comme le miocène inférieur, sa lithologie est dominante par l'affleurement des marnes , des grès et des conglomérats.

II.2.8 Le Mio-pliocène Continental

Il se manifeste en majeure partie dans la zone médiane au Sud de Zaarouria et à l'Est de Taoura, il se présente sous forme de sédiments détritiques avec alternance de grès, de conglomérat, de calcaire lacustre et de marne.

Le Mio-Pliocène englobe toutes les formations continentales postérieures à la dernière avancée marine du Miocène. Il est représenté par des marnes blanches à gypse, des calcaires bicolores gris bleu et jaune vif, des argiles et des conglomérats rouges, remplissant le synclinal de Taoura-Merahna où l'épaisseur atteint les 350 m.

II.2.9 Quaternaire

Selon [L. David \(1956\)](#), il s'agit de toutes les formations postérieures à la dernière phase importante de plissement qui a suivi le dépôt du Mio-Pliocène continental. Ce Quaternaire couvre de vastes surfaces à l'Ouest de la Wilaya (régions de Sedrata, Bir Bouhouche, Terreguel, Oum El Adeim et Saf El Ouiden). On y rencontre tous les types de formations continentales des plus anciennes au plus récentes: nappes d'épandage, croûte de calcaire, calcaires lacustres, travertins, limons, cailloutis, terrasses fluviales et éboulis). Dans le territoire de la Wilaya de Souk-Ahras le Quaternaire couvre d'importantes superficies. Il est présent pratiquement dans toutes les feuilles géologiques couvrant la wilaya. Il se compose en général de formations continentales telles que les nappes d'épandage, les terrasses fluviales, des éboulis et des limons, selon leur caractéristique, ces dépôts ont été classés en trois (03) groupes :

❖ Les formations anciennes :

Elles correspondent à deux types de dépôts :

✓ La croûte calcaire constituée de roches carbonatées blanches, jaunâtres et roses.

Elle est granuleuse, terreuse et poussiéreuse. Elle est localisée sur le revers méridional des monts de la Medjerda.

✓ Les cailloutis localisés au Sud de Souk-Ahras, sur le Trias à des altitudes passant de 660 à 700 m appartenant ainsi à des formations Quaternaires.

Dans cette catégorie, se regroupent les nappes d'épandages qui est une formation caillouteuse reposant sur les marnes Crétacées. Elles apparaissent au Sud de M'daourouch jusqu'à la frontière Tunisienne. On trouve aussi, la croûte calcaire à l'extrémité Sud de Taoura et au Sud de Souk- Ahras.

❖ Les formations récentes :

Ces formations sont représentées par les cailloutis, les brèches et les alluvions, les premiers sont observés sur le versant Sud de Djebel Guenbuita, Zaarouria et Djebel Ladjbel, Les alluvions, par contre sont remarquées dans les vallées des Oueds du périmètre.

❖ Les formations actuelles :

Elles sont formées de :

✓ Limons et cailloutis provenant des lessivages de la portion superficielle altérée des marnes (limons) et du transport des éboulis des calcaires (cailloutis). Elles sont observées à l'extrême du périmètre (Ouest du Sakiet Sidi Youcef) et aux environs de Taoura et de M'daourouche . Pour les travertins, ce sont des dépôts issus des sources thermales. On citera à titre d'exemple Hammam N'Bails, Ain el Hammam et Ben Nouir à 24 km de Souk-Ahras et Hammam Tassa.

✓ Eboulis rencontrés au pied des montagnes.

D'autre part, le Quaternaire est caractérisé aussi par les terrasses étagées retrouvées essentiellement sur la Medjerda et l'Oued R'enam. Ces terrasses sont composées généralement de deux parties :

- Très haute vallée à pente très raide où nous distinguons la présence de lit actuel de la rivière d'une part et d'une très basse terrasse, de 3 à 5 m, conservée principalement dans les méandres et correspondant au lit majeur d'autre part.
- Pour la haute vallée, la Medjerda coule dans un manteau d'alluvions qui domine de 1 à 2 m le fond de son lit, avec une basse terrasse à 10 m au-dessus du fond du lit actuel. Une moyenne terrasse à 30 m formée de cailloutis et de sable et une haute terrasse à 100 m au-dessus de la rivière avec un matériel consolidé en poudingues.

II.3 Les Terrasses

Elles persistent sous forme de lambeaux de terrasses le long de l'Oued Medjerda après le massif Triasique de Souk-Ahras. Dans la feuille géologique de l'Oued Mougras, elles sont observées aussi sur une partie de l'Oued Renem. D'une façon générale, ces terrasses n'ont que deux niveaux.

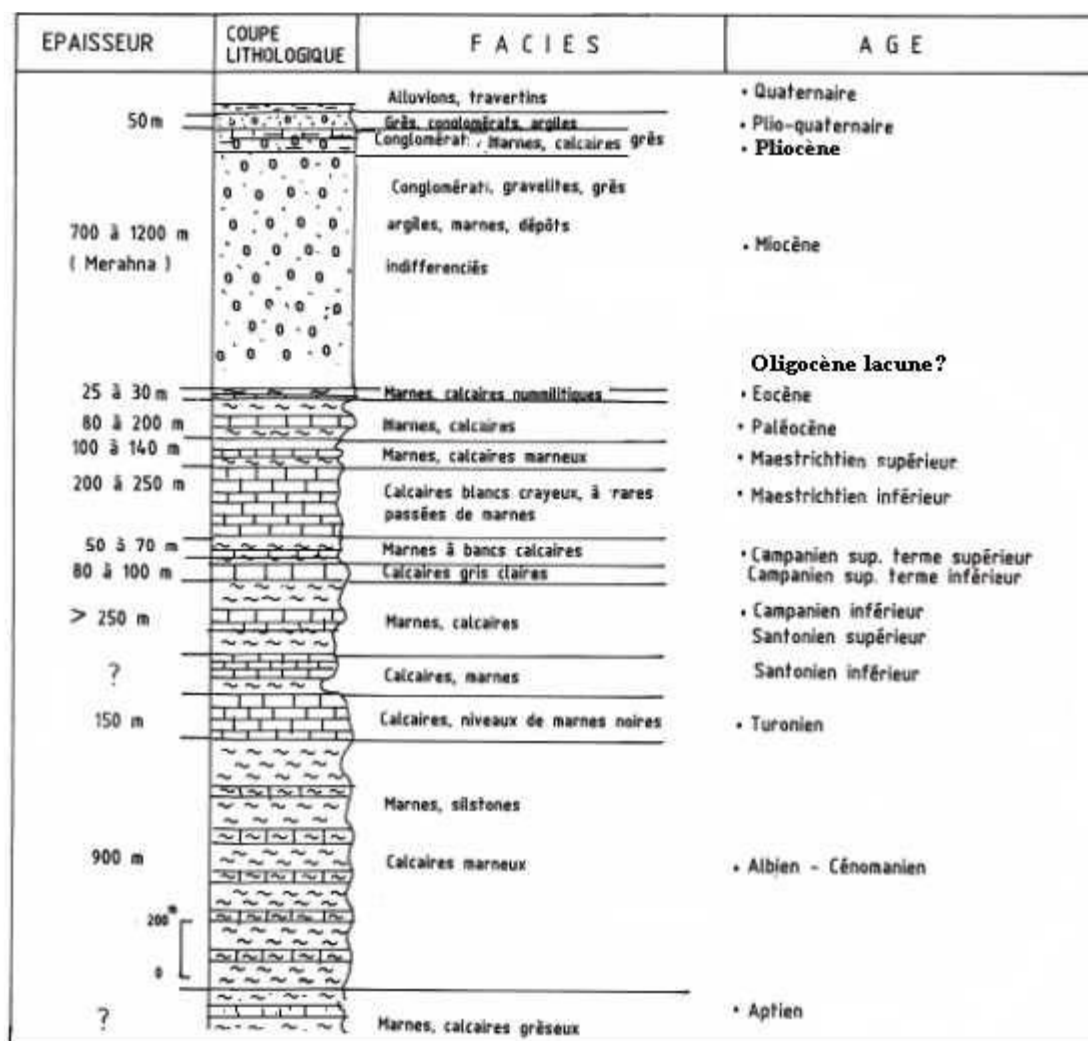


Figure II.4: Log litho-stratigraphique de la région de Taoura, d'après les notices des cartes géologiques de Taoura au 1/50000.

Localement, dans le secteur de Taoura de la structure anticlinale NE-SW de l'ensemble Crétacé- Eocène composent les Djebels, Seraser, Serou Dekma, Graouet, Boussessou, Guenguita, Chaoucha. Ce sont en général des structures étroites, en crêtes, qui forment des chaînes de montagnes. Au cœur des anticlinaux, à allure asymétrique, à axe de courbure, atteignant 8 à 10 km, affleurent les marnes d'âges Santonien supérieur-Campanien inférieur. Certaines structures plissées consistent en un relai de petits plis dessinant dans l'ensemble un anticlinal, tel qu'entre les monts Barka-Gridjine- Derbouka.

Aux différents épisodes de déformations des terrains mésozoïque et cénozoïque, succédés depuis l'Eocène supérieur, sont liés les structures faillées tel que l'accident Batna-Souk Ahras, les familles de failles NW-SE et NE-SW à rejet de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Les failles verticales ont structuré l'ensemble des terrains en effondrements au cours du Plio-Quaternaire.

II.4 Tectonique

Les structures géologiques de la région sont le résultat d'une tectonique de compression, donnant naissance à des synclinaux et des zones anticlinal, de direction axiale NE-SW.

les monts de la haute Medjerda sont marqués par une phase orogénique importante qui s'étend depuis la fin du Lutétien jusqu'au Quaternaire. D'après L. David (1956), les principales phases tectoniques seront ici brièvement résumées :

- ❖ Phase préliminaire, post-Lutétien et anté-Bartonien : elle est responsable des premiers véritables plissements des assises antérieures ;
- Première phase majeure post-Oligocène et anté-Miocène antérieure à la transgression miocène,
- Deuxième phase majeure, post-Miocène inférieur et anté- Miocène supérieur : il s'agit d'une nouvelle phase paroxysmale qui met fin à l'existence de la mer dans l'Est Algérien. C'est au cours de cette période que les nappes de glissement reposent toutes sur le Miocène.
- ❖ Phase post-Miocène et anté-Pliocène : elle se distingue par une période de distension au cours de laquelle certains panneaux du socle s'enfoncent progressivement. Ainsi, on assiste à la naissance des bassins d'effondrement.
- ❖ Phase post-Pliocène: elle entraîne la fin du régime subsides des bassins d'effondrement.

II.4.1 Tectonique souple

Le synclinal est formé par les formations crétacées. Le remplissage est d'âge Mio- Pliocène. Il représente une structure plus au moins symétrique, avec une tectonique cassante très complexe.

La région d'étude est marquée à la fois par une tectonique souple (plis sous forme d'anticlinaux et de synclinaux) (Toubal, 1993) et par une tectonique cassante (failles) à laquelle s'ajoute une tectonique triasique très importante.

- de l'anticlinal d'El Ouasta-Sakiet ;
- de l'aire synclinale d'Ain Farah-Ain el Anz, anticlinal du Dj. Choucha ;
- de l'anticlinal de Sidi Mohammed Sassi ;
- du synclinale de Montes Gambetta-Merahna ;
- de l'anticlinal du Dj. Zellez-Dj. Zaarouria-Hammam Tassa-Dj. Berda-Dj. Graouet ;
- de l'anticlinal du Dj. Serou-Dj. Dekma-Dj. Bou kebech ;
- du synclinale de la haute Medjerda ;
- des plis telliens.

II.4.2 Tectoniques cassante

Elles sont développées sur la bordure orientale du bassin (exemple bassin de Gambetta, et de Nador n'Baïls); Les failles transversales majeures: ces failles affectent à la fois les chaînons telliens et sahariens. Dans la région de Medjerda, en générale, ces accidents cassants sont en majeure partie des accidents de portée régionale, car ils limitent la dépression, d'autres Kef (Aliev et All 1971). Les plissements caractéristiques de la tectonique tangentiels sont de direction NE-SW, formés au cours de la phase des magrébines. La carte géologique de l'Oued Mougras (N° 78, 1986), montre des plis orientés Est-ouest, lié à la mise en place des nappes telliennes, la cour du synclinal est formée par des formations autochtones, ou para-autochtones affectés par failles profondes.

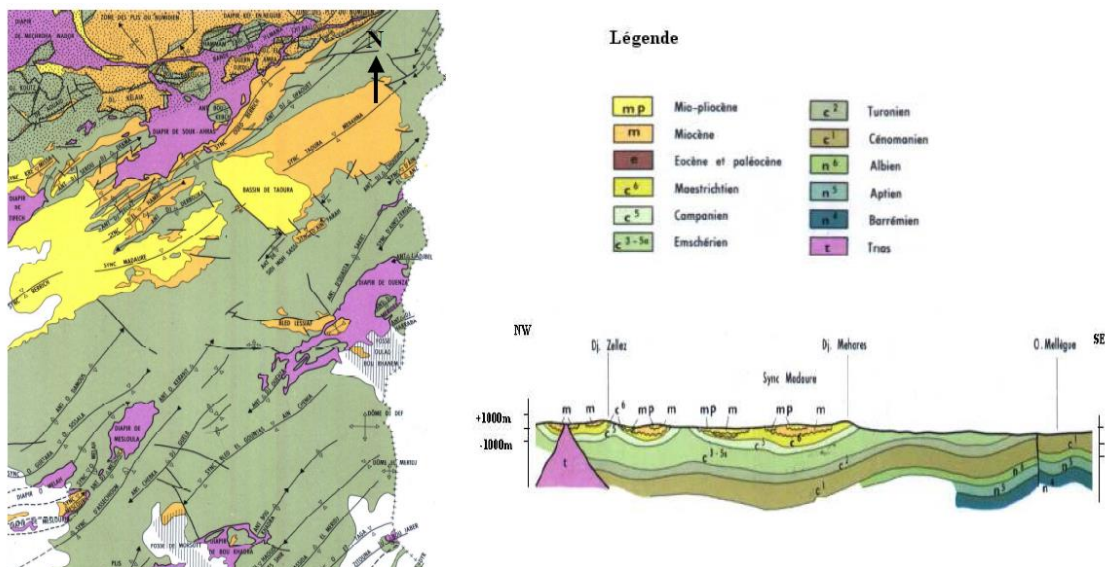


Figure II.5 : mouvement tectonique de la région

Concernant l'aperçu géomorphologique de la région d'étude on observe différents macro-formes:

- Sous bassin versant : C'est le sous bassin de l'Oued Renem et ces affluents, qui font partie du bassin versant de l'Oued Medjerda;
- Les vallées d'érosion: la vallée de l'Oued Renem représente une érosion très forte par endroit et faible ou même nul par d'autre, due à la végétation importante et la lithologie des roches et leur résistance;
- Les terrasses d'accumulation: on observe sur le terrain les hautes et les basses terrasses, les premières sont de faible importance, les plus importantes sont les basses terrasses, vu leur grande surface;

- Les vallées de failles : ce sont les déformations tectoniques causées par les failles, et son résultat des mouvements techniques cassantes. Ils forment les différents chenaux des Oueds de la région exemple Oued Renem.
- Les formes karstiques : on les rencontres surtout dans les barres calcaires du Crétacé, ce sont les vides, grottes et fissures de tailles différentes.

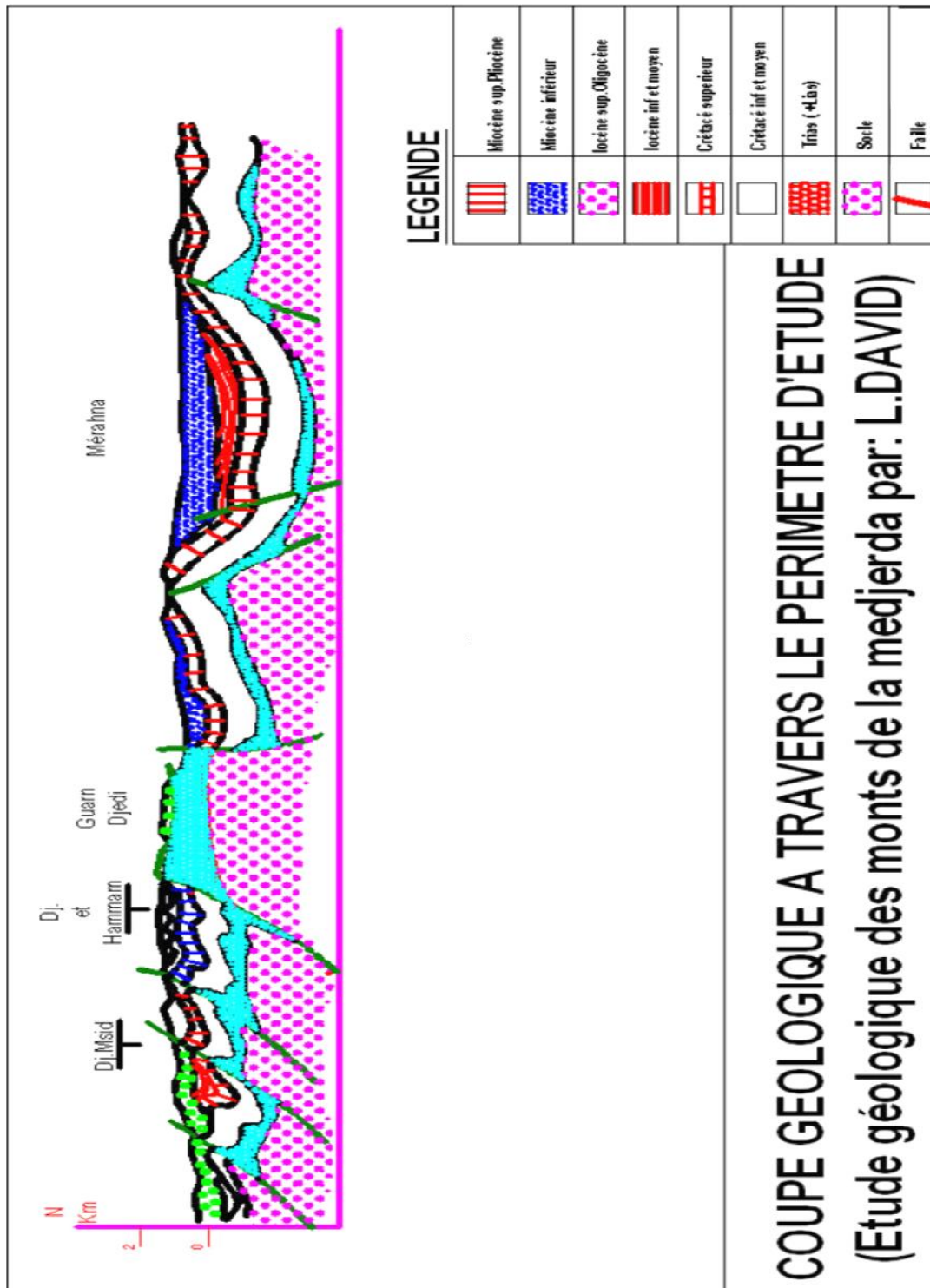


Figure II.6 : Coupe géologique du sous bassin versant du Medjerda.

II.5 Interprétations des coupes géologiques

L'élargissement de la structure se poursuit, définissant un remplissage Miocène important, reposant sur les dépôts du Crétacé au Paléocène. La tectonique cassante est caractéristique dans la zone, elle est très forte, montrant des failles de directions longitudinales et transversales par rapport à l'axe du synclinal; la structure du synclinal s'élargie, d'où l'extension du remplissage Miocène et Pliocène devient très important.

II.5.1 Stratigraphie et descriptions lithologique des faciès

Dans la région de Taoura, on constate deux grands ensembles de faciès, le premier est constitué par les formations marraines (synclinal), le deuxième est formé par des formations continentales (remplissage) d'âge Mio-Plio-Quaternaire.

D'après la notice explicative de la carte de l'Oued Mougras et Taoura montrés sur la figure 5 successivement on a :

- Formations secondaire;
- Formations Tertiaire;
- Formations quaternaires;

Les structures géologiques de la région sont le résultat d'une tectonique de compression, donnant naissance à des synclinaux et des zones anticlinal, de direction axiale NE-SW.

Le synclinal est formé par les formations crétacées. Le remplissage est d'âge Mio pliocène. Il représente une structure plus au moins symétrique, avec une tectonique cassante très complexe, on distingue :

- Les failles longitudinales : de direction SW-NE;
- Les failles transversales : ayant une direction NNW-SSE;
- Les failles obliques : de direction Ouest-est.

II.6 Conclusion

Les travaux de ([David. L 1956](#)) dans son étude géologique des monts de la haute Medjerda a mis en évidence que cette région est essentiellement caractérisée par des formations sédimentaires dont l'âge le plus ancien est le Trias jusqu'au Quaternaire, constituée généralement par des calcaires, des grès des marnes des cailloutis et des alluvions. Les terrains constituant le sous-sol ont un âge compris entre le Trias et le Crétacé avec une couverture d'âge Plio-Quaternaire. La région d'étude fait de la zone des diapirs de Souk-Ahras qui s'insèrent dans les monts de la Medjerda.

La région de Taoura Bordj M'Raou, fait partie des zones externes (telliennes) et du domaine para-autochtone. La structure géologique est le résultat d'une tectonique compressive durant

le Miocène inférieur, suivit par une tectonique cassante (tardive), conséquence de la naissance de tout l'édifice régionale. Les principales phases sont définies comme suit :

- Première phase : durant le Miocène inférieur, une phase de compression a affecté la chaîne des Magrebides, qui a causé le phénomène de transgression, d'où la mer Miocène a recouvert toute la région, en direction du Nord vers le Sud, dont les témoins sont les dépôts marins qui forment les couvertures des terrains, d'âge Crétacé-Eocène. Cette principale phase a donné la forme structurale du synclinal;
- Deuxième phase : vers la fin du Miocène moyen et le début du Miocène supérieur, commencent une phase de régression. Ce sont les dépôts continentaux qui ont fait l'alternance des dépôts gréso-conglomératiques et argileux. Après la régression, il y'aura l'exposition des montagnes jeunes à l'érosion;
- Troisième phase : durant le Plio-Quaternaire, une tectonique tardive de réajustement a causé la naissance des bassins d'effondrement, qui ont fait ressortir les différents chenaux des Oueds de la région. Cette phase a donné l'état actuel de la structure de notre synclinal.

Donc on conclut que notre région est caractérisée par une structure synclinale de direction NE-SW. Elle est composée essentiellement de formations sédimentaires datant du Crétacé supérieur jusqu'au Quaternaire.

La tectonique montre l'existence des déformations plissantes et cassantes affectant le synclinal, dont les deux flancs (Nord et Sud) sont composées de formations du Crétacé à l'Eocène, tandis que le remplissage est d'âge Mio-Plio-Quaternaire.

Chapitre III : La Climatologie de la région

III.1 Introduction

L'étude climatologique est indispensable pour évaluer le degré de variation des caractéristiques physico- mécaniques des sols. Pour discuter l'influence des facteurs climatiques basée sur les données de précipitations moyennes mensuelles, températures moyennes mensuelles, humidité relative et les vitesses du vent ainsi que des activités socio-économiques des populations qui l'habitent est indispensable dans l'étude des composantes du cycle de l'eau.

Le sous bassin de Medjerda appartient au grand bassin versant de Medjerda-Mellègue, il possède un climat semi-aride, peu pluvieux en hiver et très chaud et sec en été avec des vents parfois violents ([Khouldia W., 2014](#)). L'étude des données climatiques permettant d'analyser les facteurs du climat de cette zone qui nous renseignera sur :

- Le type du climat
- le comportement hydroclimatologique du bassin versant.
- le bilan hydrologique.

Dans ce chapitre, on s'intéressera à évaluer trois paramètres climatiques jugés importants:

Les précipitations, les températures et l'évapotranspiration, afin d'expliquer certains facteurs constituant la pollution des eaux.

Le milieu physique est représenté par le relief, l'occupation naturelle de la zone d'étude, et l'occupation due à l'action anthropique sur le milieu, ainsi, la connaissance des conditions climatiques d'une région nécessite une série de pluies sur plusieurs stations, car elle permet de mieux voir l'évolution du régime pluviométrique sur la région et elle permet de maîtriser les apports non contrôlés qui engendrent le bon fonctionnement du système de prévision et de gestion des ressources hydriques à court, à moyen et à long termes, l'indice d'aridité, et le vent ([Mrad D., 2015](#)).

III.2 Les données climatologiques

L'ensemble des stations de la région de Souk-Ahras fait partie de la région naturelle qui appartient elle-même à Souk-Ahras centrale, zone de charnière entre un Nord d'une région tellienne montagneuse froide et pluvieuse et le Sud de d'une région hautes collines, un climat continental. Ainsi, suivant les années et les saisons, les steppes se retrouvent sous l'influence climatique de la zone tempérée. Le climat de nos régions dépend de ce

balancement longitudinal de la circulation atmosphérique, comme il subit par ailleurs l'effet de l'altitude de la continentalité et de relief. D'une façon générale la région de Souk-Ahras se situe dans les étages bioclimatiques subhumide à hiver frais au Nord et semi-aride à hiver tempéré, pour le Sud de la région (Mrad D2017).

III.2.1 Les précipitations

III.2.1.1 Répartition annuelle des précipitations

III.2.1.1.1 Les variations interannuelles

L'interprétation de l'histogramme (Fig. III.1) fait sortir, que d'une manière générale les précipitations se caractérisent par leur irrégularité interannuelle.

Les hauteurs annuelles des précipitations pour la période considérée (1989-2006) varient de 222,6 mm en 1993 et 881,6 mm en 2004 pour la station de Souk Ahras; et de 393,2 mm en 1992 et 1033,3 en 2003 pour la station de Ain Dalia. La pluviométrie interannuelle varie entre 653,6 mm à 721,31 mm, on remarque que le nombre d'année humides est inférieur à celui sèches.

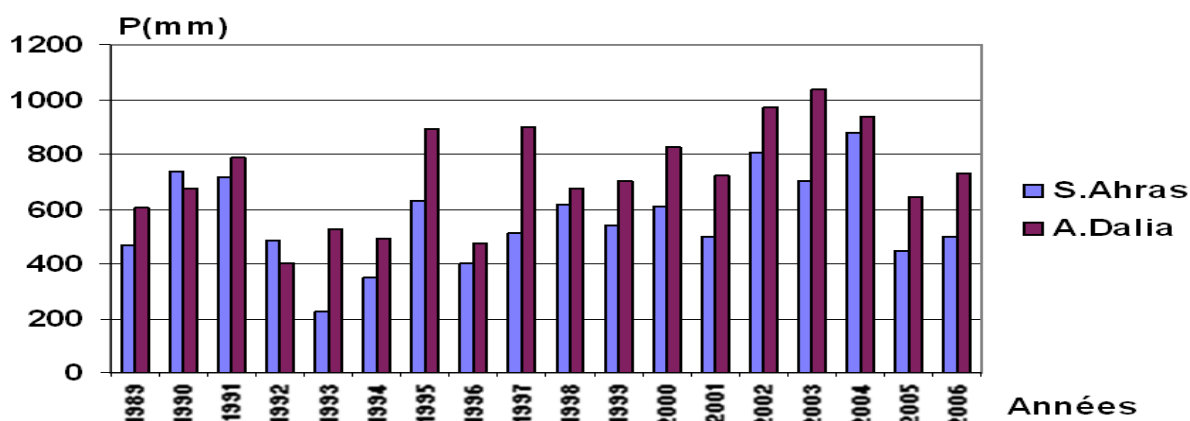


Figure III.1: Moyenne interannuelle des précipitations (1989-2006).

III.2.1.1.2 Répartition mensuelle des précipitations

L'histogramme des précipitations mensuelles montre la variation des précipitations d'un mois à un autre. Le mois de Janvier est le plus pluvieux avec des précipitations qui atteignent une hauteur de 79,2 mm, par contre, le mois de Juillet correspond au mois le plus sec de l'année. Les mois les plus pluvieux dans la région de Souk-Ahras sont les mois de Novembre, décembre, Janvier, Février, Mars et Avril au cours de cette période il tombe en moyenne plus de 70% de la pluie totale.

Tableau III.1 : pluviométries mensuelles et annuelles (1989-2006) (Source ANRH 2006).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fèv	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Août	Module
	Annuel												
Souk -Ahras	30.3	40.0	49.9	76.9	79.2	59.0	69.7	56.0	38.7	15.5	6.9	15.1	537.2
Ain Dalia	24.9	33.3	40.0	55.8	73.3	54.7	56.0	50.8	41.0	17.5	6.1	8.0	721,31

Analyse des données pluviométriques (mensuelles) station par station.

- La station de Souk Ahras : les valeurs maximales des précipitations s'observent au mois de Janvier avec 79.2 mm, et celles minimales au mois de Juillet avec 6.9 mm.
- La station d'Ain Dalia : les valeurs maximales des précipitations s'observent au mois de Janvier avec 140, 13 mm, et celles minimales au mois de Juillet avec 9,73 mm.

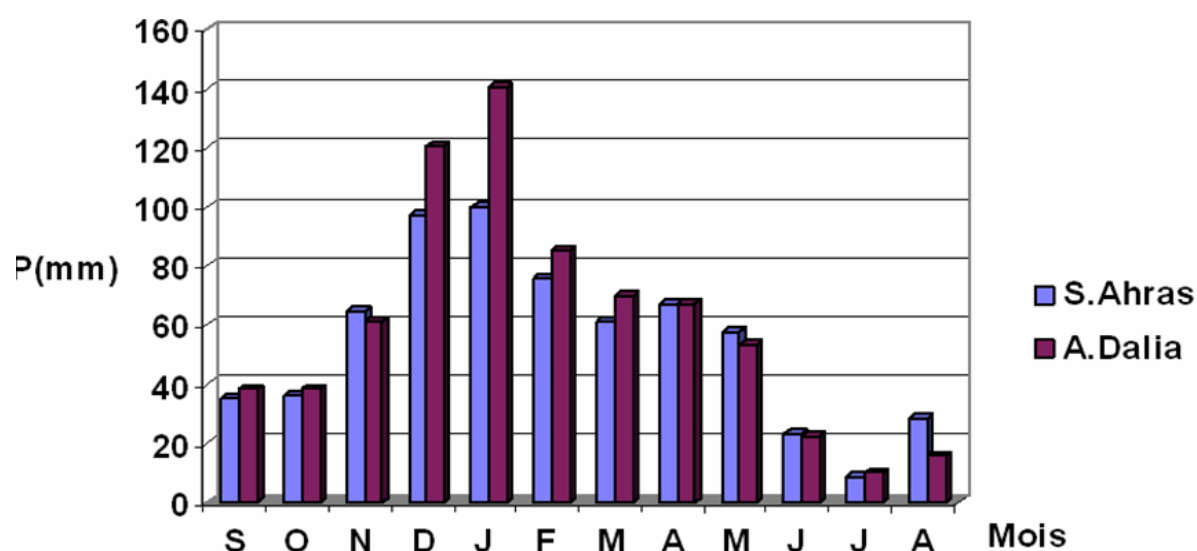


Figure III.2 : moyenne mensuelle de précipitation 1998-2006.

III.2.1.1.3 Répartition saisonnière des précipitations

Tableau III.2 : Répartition saisonnière des précipitations (1989-2006)

Stations	Pluviométrie	AUTOMNE	HIVER	PRINTEMPS	ETE
Souk -Ahras	P (mm)	135,14	272,77	185,84	59,85
	P (%)	20,67	41,73	28,43	9,15
Ain Dalia	P (mm)	137,49	346,1	189,79	47,91
	P (%)	19,06	47,98	26,31	6,64

Les variations mensuelles des précipitations durant ces seize ans (figure 20) permettent de distinguer deux périodes (Guebail A., 2017):

- Une période de sécheresse correspondant à la saison d'été regroupant quatre mois (Mai, Juin, Juillet, Août).
- Une période pluvieuse de six mois allant de Novembre jusqu'au mois d'Avril dont le mois le plus arrosé est le mois de Janvier avec une moyenne de 137.42 mm.

En plus des crues connues généralement en hiver, se sont les journées orageuses, particulièrement en mois de Janvier, qui sont à l'origine du déclenchement des mouvements de terrain.

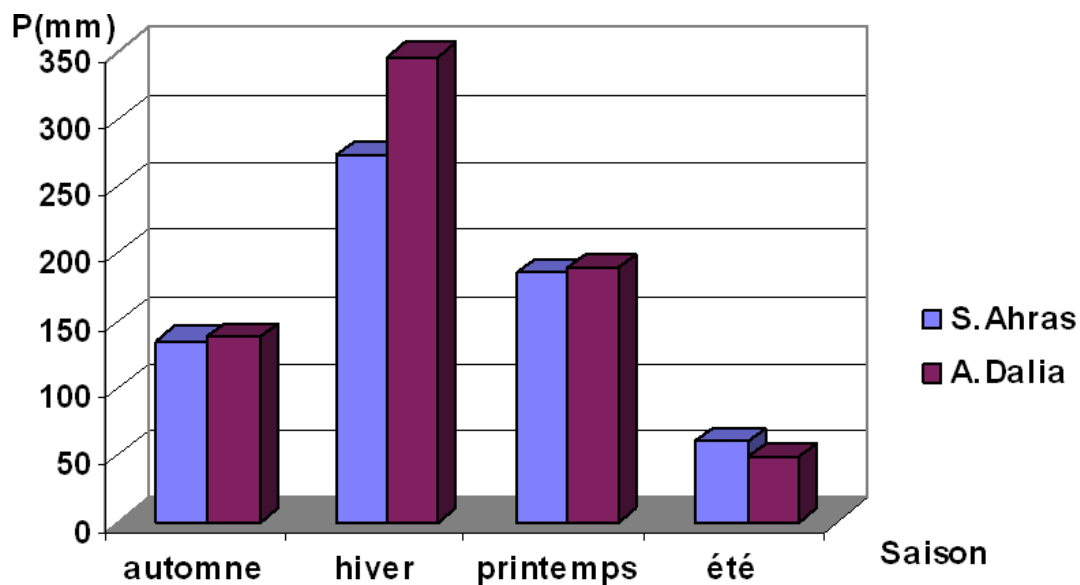


Figure III.3 : Répartition saisonnière des précipitations (1989-2006).

III.2.2 Les températures

Les températures constituent l'autre élément majeur conditionnant le climat d'une région, elles permettent de déterminer l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement et facilitent l'établissement du bilan hydriques, l'absence totale des données de la température d'air dans la région d'étude, nous a amené à choisir celles de la station de Souk-Ahras. Pour réaliser notre travail, nous nous sommes basé sur les données recueillies à la station de Souk Ahras.

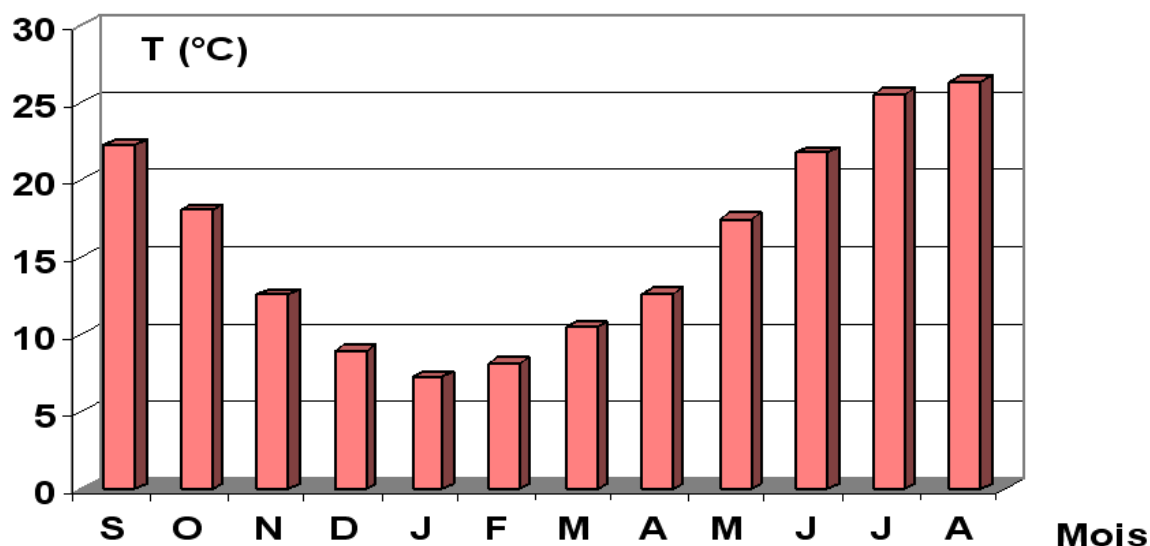


Figure III.4 : Répartition mensuelle des températures dans la station de Souk Ahras (1989/2006).

une variation remarquable des moyennes de température mensuelles d'une saison à l'autre, la saison la plus chaude étant l'été avec un maximum de 26.36 °C en Août et la saison la plus froide étant l'hiver avec un minimum de 07.35 °C à Janvier d'où un écart de 19 °C. La température croît progressivement du mois de Février jusqu' au mois d'Août, le deuxième décroît progressivement du mois de Septembre jusqu'au mois de Janvier (Ouled Zaoui S., 2010).

III.2.3 Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluviaux, de l'évapotranspiration et par conséquent du climat. Il est aussi une cause de dommages importants quand il souffle très violemment. Ses effets sur la stabilité de surfaces sont nombreux: forces de pression (sur la face exposée du terrain) et d'aspiration (sur la face opposée), vibrations de structure par phénomène de résonance, transport de particules solides, accélération de l'évaporation de l'eau contenue dans les couches à la surface exposée aux vents, ce qui accélère le phénomène de cristallisation des sels, etc. Les données sur la direction et la vitesse des vents ont été fournies par la station de Ain Dalia de la région Souk Ahras. Les observations ont été relevées mensuellement selon la direction des vents et leurs vitesses en m/s. Nous les avons rassemblées par direction comme le montre le tableau 10. Les principales directions sont Nord et Nord-ouest.

L'examen du tableau III.3 et les figures (III.5 et III.6) montre que les vitesses du vent les plus fortes sont marquées en automne de direction NE (74 m/s en Octobre) se sont des vents

généralement secs mais cela n'empêche pas qu'ils soient à l'origine de quelques orages surtout quant elles changent de direction. En hiver, la direction dominante des vents est NW, ils ne sont pas secs et causent des pluies intenses malgré que leur vitesse ne soit pas très forte.

Tableau III.3 : Vitesses du vent moyennes mensuelles et interannuelles [1990-2006]

Mois Années	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Moy annuel
1990 - 1991	2.40	22	5.83	4.78	5.72	11.41	7.08	11.1	8.17	1.93	2.34	2.49	7.10
1991 - 1992	2.70	2.83	6.17	7.66	3.14	4.75	4.61	5.68	3.40	10.27	7.64	3.35	5.18
1992 - 1993	1.72	11.29	6.68	10.03	9.32	11.42	19.4	13.48	3.67	11.54	14.62	2.58	9.64
1993 - 1994	10.62	4.62	11.31	10.03	10.41	11.10	3.48	3.21	1.97	11.46	2.40	9.25	7.49
1994 - 1995	5.02	11.49	4.16	10.58	9.12	4.63	11.6	10.17	8.98	11.25	11.46	3.39	8.49
1995 - 1996	5.56	8.70	8.36	13.59	4.23	8.93	11.44	8.14	11.35	11.44	8.09	10.36	9.18
1996 - 1997	10.62	8.93	11.45	10.21	8.22	8.92	11.36	3.49	3.05	11.43	8.25	5.35	8.44
1997 - 1998	8.12	11.29	11.57	11.43	11.42	10.38	11.12	11.23	11.56	11.47	10.88	14.52	11.25
1998 - 1999	6.93	7.9	9.54	11.34	1.85	1.00	11.46	9.36	3.40	10.52	11.43	11.43	8.01
1999 - 2000	11.42	10.51	11.55	11.47	9.24	11.46	10.20	10.59	10.57	9.48	6.87	1.20	9.55
2000 - 2001	5.09	7.04	10.32	23.13	11.38	11.54	11.54	9.34	10.54	1.12	5.71	9.34	9.67
2001 - 2002	6.79	4.71	9.04	9.34	11.38	11.54	11.54	9.34	10.54	1.12	5.71	9.34	8.36
2002 - 2003	324	1030	113.0	113.8	1.09	8.02	3.22	4.83	3.36	1.30	5.98	3.36	134.33
2003 - 2004	31.83	31.31	21.18	26.28	28.98	28.53	31.29	31.39	26.03	25.05	27.97	28.50	28.19
2004 - 2005	04.38	00.43	04.41	00.38	03.85	04.38	03.76	04.76	00.49	11.23	11.47	03.79	4.44
2005 - 2006	01.10	10.62	11.23	13.19	02.90	00.88	03.61	01.21	01.56	00.10	01.75	01.05	4.10
Moyen	27.39	73.98	15.99	17.95	8.26	9.30	10.42	9.21	7.41	8.79	8.91	7.46	17.09

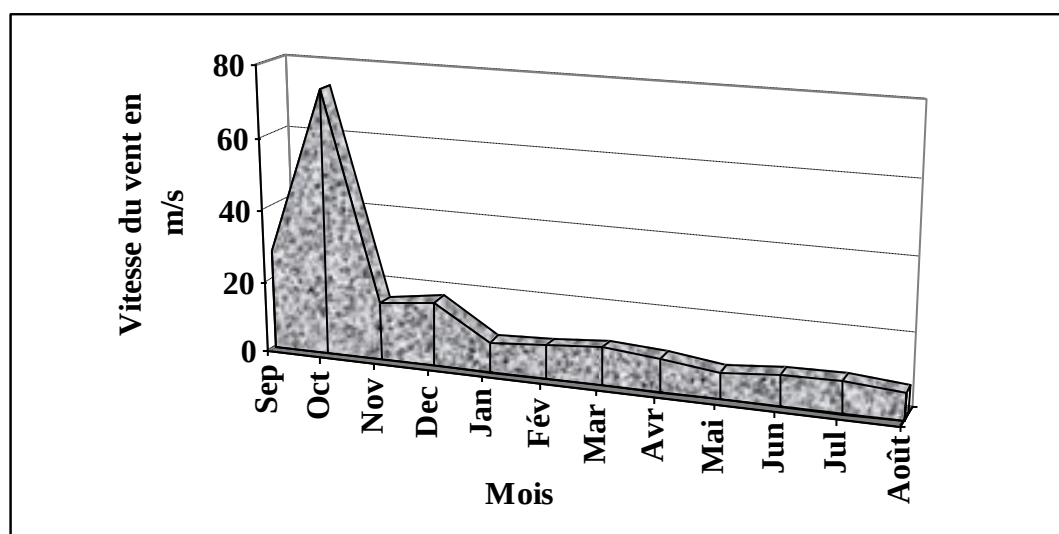


Figure III.5 : Variations mensuelles des vitesses du vent [1989-2006]

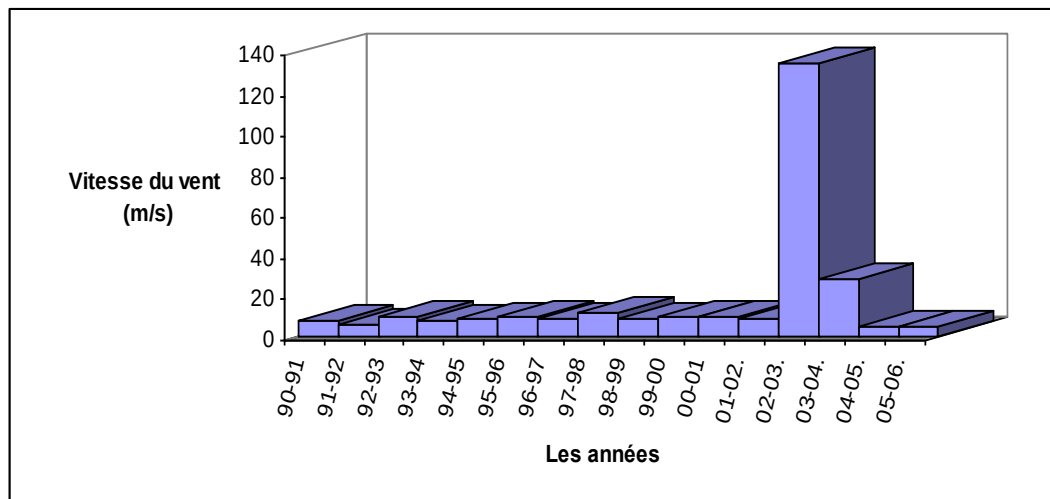


Figure III.6 : Variations inter annuelles des vitesses du vent [1989-2006]

III.2.4 Relation température – précipitation

- *Diagramme pluviométrique*

Un diagramme Ombro-thermique est un type particulier de diagramme climatique. Ce dernier est représenté par les variations mensuelles des températures et des précipitations sur une année.

Le diagramme montre la succession de deux saisons l'une est sèche et l'autre est humide. La période sèche du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre et la période humide va du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril. La représentation graphique de la figure 2.12 du bilan d'eau selon la méthode de C.W Thornthwaite montre que l'évapotranspiration potentielle maximale a été observée pendant le mois de Juillet pour une valeur de 156.90 mm. Cette évapotranspiration produit un déficit agricole de l'ordre de 148.4 mm qui nécessite un volume d'eau important pour satisfaire l'irrigation des zones de culture. Cependant, durant les mois de Novembre jusqu'à Mars, on remarque une recharge de la nappe. Lorsque celle-ci dépasse la RFU (RFU_{max} = 50mm), le surplus d'eau va partir vers le ruissellement souterraines. Les deux saisons durent en moyenne six mois par an.

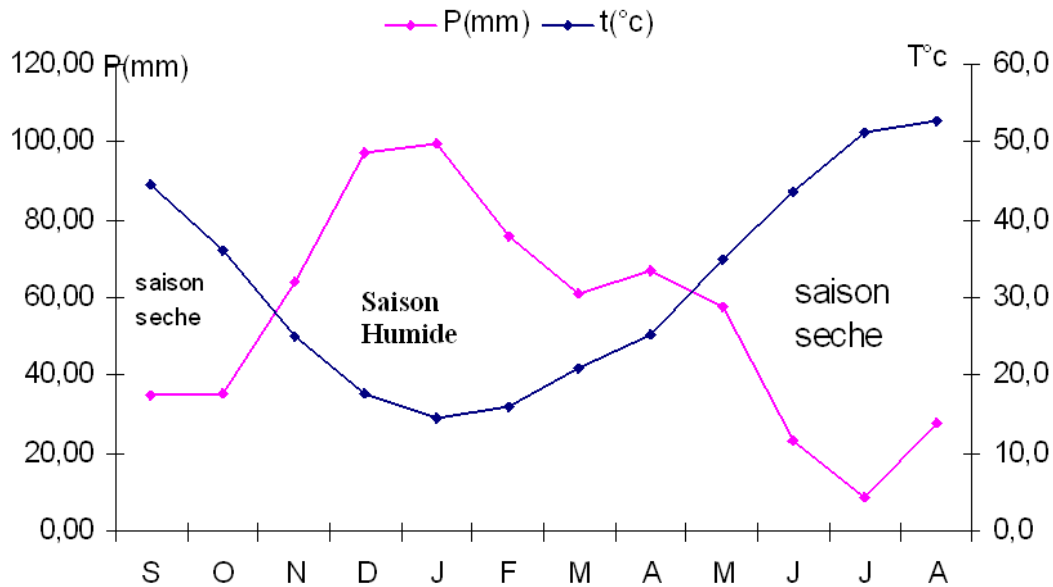


Figure III.7 : Diagramme ombrothermique de la station de Souk Ahras (1989-2006).

III.3 Détermination des indices climatiques

- **Climagramme d'Emberger**

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q. Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q = \frac{P}{\frac{M+m}{2} \cdot (M-m)} \cdot 100$$

P : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés kelvin) ;

m : moyenne des minima du mois le plus froid (degré kelvin).

Le calcul de ce dernier dans la zone de Souk Ahras donne les valeurs suivantes :

D'après cette valeur on peut dire que la région de Souk Ahras possède un climat semi-aride (Figure III.8).

$$Q = \frac{653.60}{(653.60 + 276.29) / 2 (306.68 - 276.29)} \cdot 100 = 42.72$$

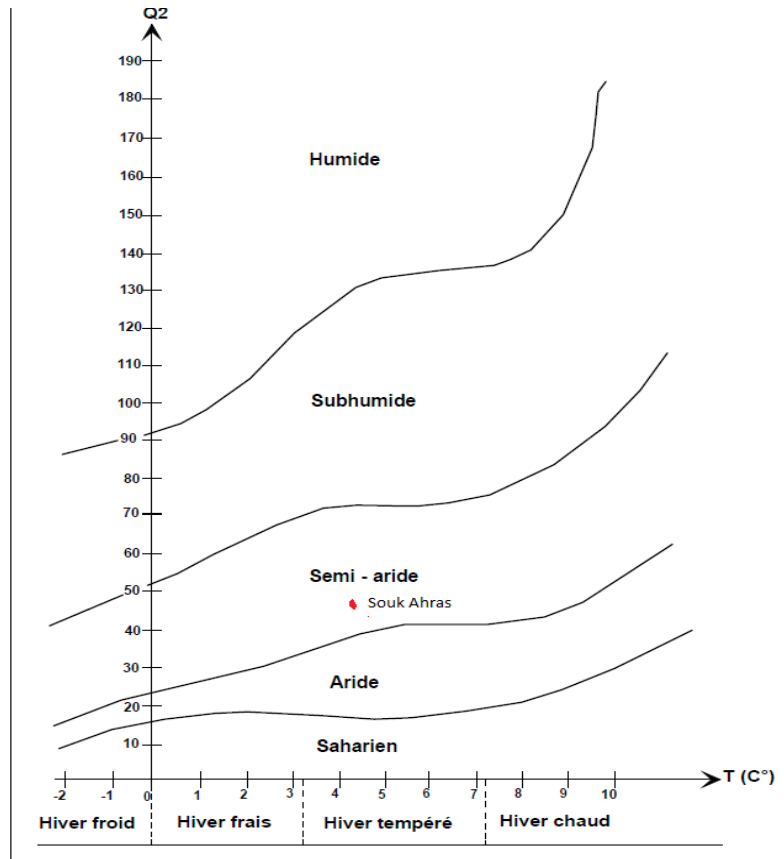


Figure III.8: Climagramme d'Emberger.

• Indice d'aridité De Martonne

En 1923 De. Martonne avait établi un indice en fonction des températures et des précipitations, calculé par les relations suivantes :

$$I = P/T + 10$$

Où:

P : précipitation annuelle moyenne (mm).

T : température annuelle moyenne (°C).

Suivant les valeurs de I obtenues, De.Martonne a proposé selon la valeur de (I) la classification suivante :

- $20 < I < 30$: Le climat est tempéré.
- $10 < I < 20$: Le climat est semi-aride.
- $7.5 < I < 10$: Le climat est steppique.
- $5 < I < 7.5$: Le climat est désertique.
- $I < 5$: Le climat est hyper aride.

Dans notre cas, la valeur de (I) est comprise entre 10 et 20, donc il s'agit d'un régime semi-aride lié à la répartition saisonnière des températures et des précipitations.

On peut dire que le climat annuel de la région de Souk Ahras est de type semi-aride.

• **Indice d'aridité mensuelle**

L'indice d'aridité mensuel i donné par la formule

$$I=12.P/T+10$$

Avec:

P : précipitation mensuelle moyenne (mm)

T : température mensuelle moyenne (°C)

Tableau III.4 : Indice d'aridité mensuel dans la station de Souk Ahras (1989/2006)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
I	13.01	15.28	34.19	61.86	69.31	50.27	35.86	35.41	25.15	8.79	2.87	9.26

D'après les résultats présentés dans le tableau 11, on remarque qu'au mois de

- Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril le climat est humide,
- Mai le climat est tempéré,
- Septembre et Octobre le climat est sec.
- Alors que, du mois de Juin et Août le climat est très sec, par contre le mois de Juillet est Hyper aride.

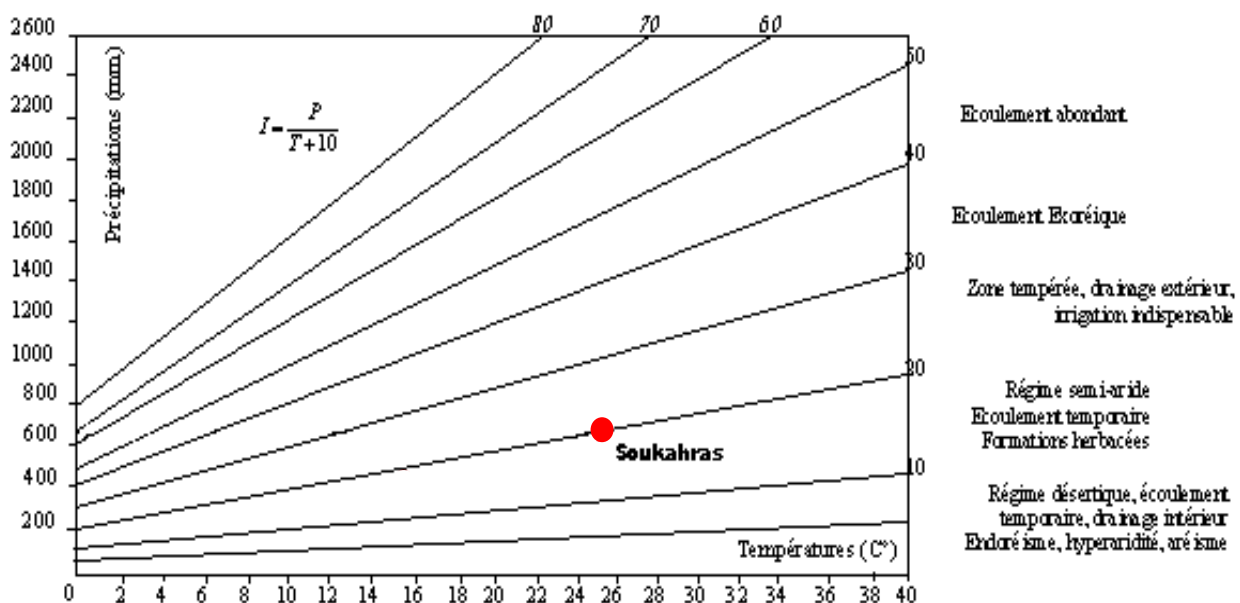


Figure III.9 : Climagramme de De Martonne.

III.4 Le Bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime le processus que suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de se retourner à l'atmosphère.

Le bilan hydrologique naturel peut se calculer par la formule suivante (Castany., 1982):

$$P = ETR + R + I$$

ETR : l'évapotranspiration annuelle (mm).

I : infiltration.

P : précipitation.

R : ruissellement.

III.4.1 Etude de l'évapotranspiration

C'est un terme important du cycle hydrique qui résulte deux phénomènes, l'un physique (l'évaporation) et l'autre biologique (la transpiration) ; l'évapotranspiration est fonction de plusieurs facteurs (l'humidité, la température, l'insolation et la couverture végétale).

III.4.1.1 Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est « 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, la valeur limite de l'évapotranspiration potentielle est fonction de l'énergie disponible » (Margat, 1997).

Pour l'estimation de l'ETP, on utilise la formule de Thornthwaite.

$$ETP \text{ (mm/mois)} = 16 (10T / I)^a \cdot k$$

$$i = (T/5)^{1.514}$$

$$I = \sum i \quad a = (1.6/100) I + 0.5$$

T : Température moyenne du mois considérée en °C

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré en mmw²&2&2 .

K : Coefficient de correction de l'altitude. - I : indice thermique annuel.

i : Indice thermique mensuel.

- : Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la RFU. En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle, cette estimation se fera à partir des formules de Turc, de Coutagne, et de Thornthwaite.

III.4.1.2 Formule de Turc

Cette formule permet d'évaluer directement l'ETR annuelle d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = P / (0.9 + P^2 / L^2)^{1/2} \text{ (mm/an)}$$

$L = 300 + 25T + 0.05 T^3$ (facteur qui tient compte des échanges de chaleur) ;

P : Précipitation moyenne annuelle en mm;

T : Température moyenne annuelle en °C.

III.4.1.3 Evapotranspiration réelle par la formule de Thornthwaite

Pour l'établissement du bilan mensuel on utilise l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne par la méthode de C.W. Thornthwaite.

Ce bilan repose sur l'hypothèse suivante :

- La satisfaction de l'ETR est prioritaire sur l'écoulement.
- Le calcul de $\Rightarrow$ l'ETR peut s'effectuer suivant deux cas :

1^{er} cas : $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$ on a alors un excédent.

2^{ème} cas: $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Sur le tableau suivant (tableau III 4.5) figurent les valeurs de l'ETR en (mm) et en (%) d'après les deux méthodes L. Turc et Thornthwaite d'où on remarque une différence nettement distincte.

Tableau III.5 : Résultats de l'ETP et ETR pour les régions Souk Ahras

Méthode	ETR (mm)	ETR (%)
Thornthwaite	395,16	60.46
Turc	547.85	83.82

III.4.2 Estimation des réserves facilement utilisables (RFU)

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- la nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle ;
- la profondeur du niveau piézoélectrique de la nappe aquifère ;
- le climat de la région ;
- le type de la couverture végétale.

La RFU pour la région de Souk Ahras, en tenant compte de tous ces facteurs serait de 46

- l'indice thermique mensuel

$$i = (t/s) \cdot 1.5$$

Cet indice est calculé à partir de la température moyenne mensuelle (t) du mois considéré.

- l'indice thermique annuel

C'est la somme des indices mensuel des 12 mois de l'année.

$$I = \sum i$$

III.4.3 Calcul du ruissellement

Le ruissellement (R) peut être calculé par la formule suivante d'après (Tixeront Berkalooff)

Avec la condition de $P < 600$ mm

Avec :

R : ruissellement en m ;

P : précipitation moyenne mensuelle en m ;

ETP : évapotranspiration potentielle en m.

Tableau III.6 : Récapitulatif des résultats d'ETR, R, I, pour les différentes périodes pour la station de Souk Ahras.

Périodes	P (m)	ETP (m)	R (m)	R (%)
1989/2006	0.653	0.834	0.133	20.43
1996/2006	0.71	0.852	0.164	23.14
2000	0.469	0.866	0.045	9.77
2003	0.972	0.904	0.375	38.53

III.4.4 Calcul de l'infiltration

D'après le bilan hydrologique l'infiltration efficace peut être calculer comme suit :

$$P = ETR + R + I$$

Avec $I = P - R - ETR$

En examinant les résultats du tableau 4.11 on distingue que :

- La période 1989 /2006

La lame d'eau précipitée d'environ 653.7 mm, plus de 50.84% est évapotranspirée (332.72 mm), pour le volume infiltré aboutissant aux nappes souterraines, il est de 133 mm (20.43%), qui varie fortement avec la nature des terrains. Le ruissellement est plus important que l'infiltration 188 mm (29 %), ceci est dû à la présence des pentes dans le terrain traversé ainsi que la nature du terrain.

- La période 96/2006

Sur un total précipité de 710 mm, (46.62%) d'eau est évapotranspirée (331), l'eau ruisselée est moins importante que celle infiltrée avec 164 mm (23.14 %) et 215 mm (30 %) respectivement et cela revient à la nature du terrain de la région.

- La période 2000 (sèche)

La lame d'eau tombée 469 mm est à 93.6% évapotranspirée et ne laisse qu'une petite part à l'infiltration est au ruissellement ce qui reflète réellement l'année sèche.

Le tableau III.7 montre les bilans hydriques à la station de Souk Ahras pour une période de 18 ans, année pluvieuse et année sèche, allant de l'année 89 jusqu'au 2006.

- La période 2003 (pluvieuse)

La lame d'eau précipitée est d'environ (972 mm), 31 % est évapotranspirée (301 mm), une grande quantité de cette eau ruisselée qui est de l'ordre de 375 mm (38.53 %) et le reste de 296 mm (30 %) rejoint les eaux souterraines par infiltration à travers les formations perméables de la région.

Tableau III.7 : Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite dans la station de Souk Ahras (1989-2006)

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	22.4	9.5	1.05	109.2	44.79	-64.4	-0.6	0.0	0.0	44.8	64.4	0.0
O	18.1	6.9	0.91	66.6	46.61	-20.0	-0.3	0.0	0.0	46.6	20.0	0.0
N	12.5	4.0	0.75	29.9	52.51	22.7	0.8	22.7	22.7	29.9	0.0	0.0
D	8.8	2.4	0.70	15.7	69.74	54.0	3.4	44.3	67.0	15.7	0.0	9.7
J	7.4	1.8	0.73	12.1	74.09	62.0	5.1	0.0	67.0	12.1	0.0	62.0
F	7.9	2.0	0.78	14.6	64.79	50.2	3.4	0.0	67.0	14.6	0.0	50.2
M	10.6	3.1	1.02	30.6	79.09	48.5	1.6	0.0	67.0	30.6	0.0	48.5
A	12.7	4.1	1.15	47.1	58.20	11.1	0.2	0.0	67.0	47.1	0.0	11.1
M	17.3	6.4	1.32	89.5	39.08	-50.4	-0.6	-50.4	16.6	89.5	0.0	0.0
J	21.3	8.8	1.33	127.7	19.07	-108.6	-0.9	-16.6	0.0	35.6	92.0	0.0
J	25.3	11.4	1.33	169.8	9.28	-160.5	-0.9	0.0	0.0	9.3	160.5	0.0
A	26.2	12.0	1.24	167.2	11.33	-155.9	-0.9	0.0	0.0	11.3	155.9	0.0
Annuel	15.9	72.2		879.9	568.6	-311.3				387.1	492.8	181.5

Avec

- T : température mensuelle en °C
- Pr : précipitation mensuelle en (mm)
- IT : indice thermique
- RU : réserve facilement utilisable en (mm)
- CL : coefficient de latitude
- ETPR : évapotranspiration réelle en (mm)
- ETPC : évapotranspiration potentielle en (mm)
- Def : déficit agricole en (mm)
- BH : Bilan hydrique
- Exc : excédent en (mm)

Formules de vérification:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad \text{A.N: } P = 387.1 + 181.5 = 568.6 \text{ mm.}$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad \text{A.N: } ETP = 387.1 + 492.8 = 879.9 \text{ mm.}$$

Nous constatons que les résultats issus des bilans hydriques sont vérifiés.

III.4. 5 Bilan hydrique global période allant de 1989-2006

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 :

- Le déficit agricole se remarque à partir du mois de mai et se poursuit jusqu'à octobre, période pendant laquelle la RFU est épuisée ;
- La figure ci-dessous (Figure III.10) illustre les résultats du tableau (4.8) sur 18 ans (1989/2006), sur le bilan de Thornthwaite, qui nous permet une lecture simple des différents éléments du bilan ;
- Les hauteurs de précipitation atteignent leurs maximums au mois de Janvier (79.2 mm) où l'ETP atteint en janvier un minimum (13.5 mm)
- L'ETP atteint son maximum au mois de juillet (156.9 mm) où les précipitations atteignent (6.9 mm).

Pendant le mois de Novembre le stock se reconstitue où la RFU atteint son maximum (46 mm) au mois de Décembre puis demeure jusqu'au mois de Mai ensuite diminue jusqu'à l'épuisement total (Juin).

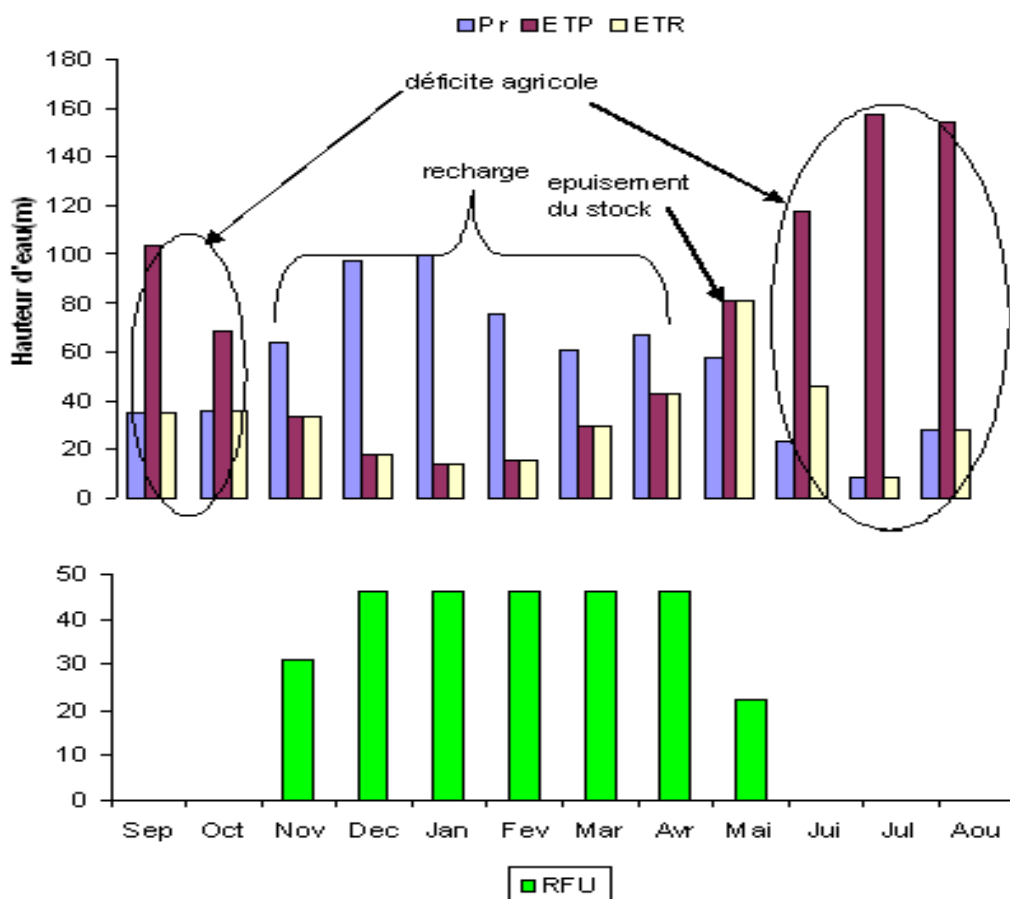


Figure III.10 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite dans la station de Souk Ahras (1986/2006).

III.5 Conclusion

L'étude hydro climatologique nous a permis de conclure que notre zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride. La pluie n'est pas homogène sur toute la surface de la zone, les apports différents d'une zone à une autre, elles sont sous la dépendance de deux facteurs essentiels la latitude et l'altitude.

- La moyenne annuelle de précipitation de la station de Souk Ahras est de 568.6 mm/an ;
- La température moyenne annuelle marquer dans la station pluviométrique d'Ain Dalia est de l'ordre de 15.24 °C ;
- La vitesse du vent la plus forte est marquée en automne de direction NE (74 m/s en Octobre). Les vents sont généralement des vents secs. La direction dominante des vents est NW ;
- La région d'étude à deux périodes bien distinctes : Une période chaude et sèche, et une autre froide et humide. L'indice d'aridité est $I = 21$;
- L'estimation du bilan hydrique nous donne une quantité d'évapotranspiration réel de 387.1 mm, une lame d'eau ruisselée environ de 71.89 mm et un volume d'eau infiltré de l'ordre de 23.90 million m³/an;
- Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, nous constatons que les résultats obtenus par les différentes méthodes sont très approchés et à la limite, on ne peut que les comparer;
- L'estimation du déficit d'écoulement moyen selon les différentes méthodes est égal à 471.50 mm soit 73,37 % de P;
- Le ruissellement calculé selon la méthode de Tixeront Berkloff est égal à 133 mm soit 20.43 % de P, et l'infiltration est égale à 67,63mm soit 12,70 % de P. Cependant, le bilan moyen annuel de l'écoulement montre un écoulement égal à 53,02 mm.

Chapitre IV: Hydrogéologie

1^{ère} Partie

IV.1 Introduction

La nature est souvent imprévisible, souvent les hydrogéologues sont confrontés à cette situation. Les hypothèses émises au départ d'une étude d'un système sont souvent infirmées par la situation qui prévaut au sein d'une nappe. Cette situation est particulièrement présente au niveau de la plaine de Taoura, caractérisée par la présence de deux nappes au niveau d'un synclinal laissant apparaître une variation dans la succession des niveaux aquifères.

L'exploitation des ressources hydriques des systèmes aquifères se fait par des puits de surfaces, des forages profonds et semi- profonds et par des émergences naturelles (sources). (Rouabhia A., 2006). La plupart des nappes souterraines de la région sont marquées par une augmentation continue de l'exploitation des ressources en eaux.

Les formations aquifères, tant par leur nature lithologique que par leur extension dans l'espace, occupent une place importante dans notre présente étude, car elles influent sur le fonctionnement hydrogéologique. Ainsi, ce travail a pour but de mettre en évidence l'impact des variations climatiques sur la quantité de la ressource en eau et par conséquent sur le comportement hydrogéologiques dans les différentes aquifères.

Les relevés piézométriques, effectués au cours de quatre (04) campagnes se répartissant en deux (02) campagnes en période de basses eaux et deux (02) en périodes de hautes eaux. Les cartes élaborées à l'issue des mesures effectuées, nous permettent de mieux comprendre les écoulements des eaux dans un contexte hydrogéologie particulier car caractérisé par l'interférence de deux nappes, la première contenue dans un milieu poreux et la seconde dans un milieu karstique (Strojexport Prague., & progress. ; 2009).

IV.2 Les Caractéristiques Hydrogéologiques de la région

Les conditions hydrogéologiques sont déterminées par leur structure géologique et tectonique et par la nature du relief et du climat Elles dépendent également de l'alternance des zones d'alimentation, de transit, de décharge des horizons aquifères, de la présence des zones de fractures conduisant et filtrant l'eau et enfin de la présence des sources thermales à composition chimique variée (Djebbar M., 2006).

La zone d'étude est caractérisée par la présence de formations carbonatées ([Bousnoubra H., 2002](#)), l'action de l'eau et les mouvements tectoniques intenses qui se sont produits dans cette région, ont accéléré le processus de genèse du karst et le compartimentage observé.

Les formations dominantes sont en majeure partie des calcaires maestrichtiens, constituant ainsi la structure synclinale qui est recouverte par des formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Les calcaires sont fissurés et karstifiés, favorisant l'accumulation des eaux souterraines. L'examen des colonnes lithostratigraphiques des forages exécutés dans la région couplé à l'interprétation des données géologiques, permet la détermination des différentes nappes souterraines. Nous remarquons la présence de deux aquifères superposés de la manière suivante :

- aquifères superficiels à lithologie variable, captés par des sources, dont le débit extrait avoisine 93m³/s ([D.H.W., 2014](#)).

Tableau IV.1 : Les caractéristiques des sources de la région

Source	X (m)	Y (m)	Z (m)	Débit (l/s)	Conditions d'émergences
Ain Ogla	972906	322760	895,75	3	Grès miocène
Ain El Hammam	966130	326620	793,61	3	Alluvions quaternaires
Ain Trab	976075	329878	866,13	6	Pliocène continental
Ain Legridjine	972093	329470	783	8	Calcaire maestrichtien
Hamman Tassa	968100	334300	650	5	Alluvions quaternaires
Ain Bousessou	971950	320050	954	2	Calcaire maestrichtien inférieur
Ain-Tamtmat	974540	328990	846,07	8	Grès miocène
Ain Hallouf	978452	333093	765	3	Calcaire maestrichtien inférieur
Ain Tekkouka	886550	348400	600	8	Grès miocène
Ain Guelib	968079	328305	789,2	5	Calcaire campanien
Ain Bousebett	1002 150	337850	770	7	Campanien inférieur
Ain Si Salah	966350	326230	794,52	1.5	Pliocène continental
Ain El Hammia	979014	332877	760	3	Alluvions quaternaires
Ain jehifa	975100	333850	907	7	Santonien supérieur-campanien

El Khengua	980660	328360	831,25	4	Calcaire maestrichtien inférieur
Ain OumTouaimai	790000	329681	837,43	1	Grès miocène
Ain el hadjar	790350	329500	810	1	Grès miocène
Ain el Berda	791000	329400	807	1.5	Grès miocène
Ain Oum El Djera	974734	342650	860	4	Calcaire campanien

- aquifères profonds captés par les forages, dont le débit extrait avoisine 370 m³/s (annexe) (D.H.W., 2014).

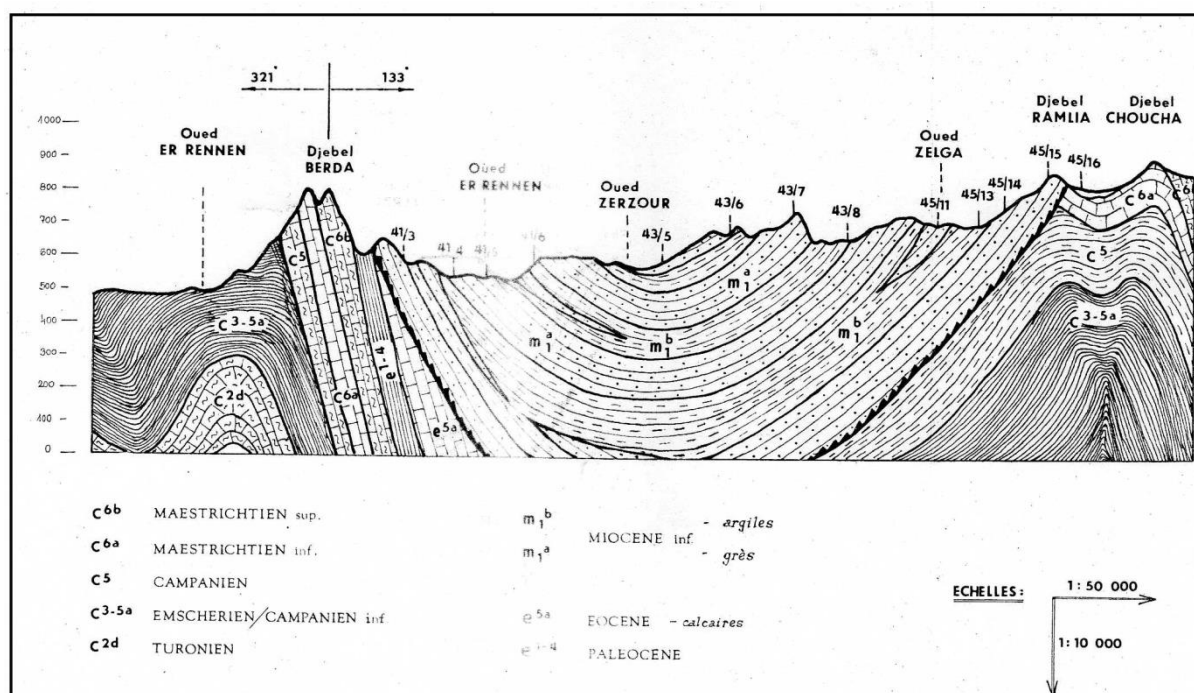


Figure IV.1 : Coupe géologique transversale (d'après la carte 1/15000 Oued Mougbras).

IV.2. Système Aquifère du Bassin Versant Medjerda

Les nappes présentes dans la zone d'étude, sont captées par des forages selon les zones de captages suivantes, champs captant Taoura, champs captant Terguelt, champs captant Tiffech et champs captant Sedrata (Aouadi & Zeghadnia, 1990, in Aggoun, 1993, in Bousnoubra, 2002).

IV.2.1. Présentation des aquifère et leur nature dans la partie aval de Medjerda

Face aux changements climatiques et à la demande en eau sans cesse en augmentation, il est préconisé de connaître avec certitude de l'emplacement des zones aquifères. Il est à noter que le système aquifère de la partie aval de Medjerda, situé sur le sous bassin versant de ce dernier constitue la principale ressource en eau pour la population de la région.

Une bonne gestion de la ressource en eau dans une région, repose sur une étude hydrogéologique qui prendra en compte tous les aspects relatifs à la quantité et à la qualité de l'eau présente dans les nappes.

Ainsi le recours à une étude hydrogéologique, s'avère être la seule solution. Pour réaliser notre travail, nous avons opté pour la chronologie suivante :

- détermination de l'extension des aquifères,
- interprétation des cartes piézométriques réalisées par nos soins,
- estimation des caractéristiques hydrodynamiques.

L'observation des données géologiques et des colonnes litho stratigraphiques des forages de la région, ont permis l'identification des principales nappes (Figure IV.2), le principal réservoir est : L'aquifère formé par des calcaires du Crétacé supérieur fissurés et karstifiés (Maestrichtien, Campanien et Turonien) localisés dans le synclinal de Taoua et la nappe de grès fracturés du Mio-pliocène localisée dans la région de Bir Louhich. Ainsi, les calcaires pliocènes formations susceptibles de contenir des aquifères à potentiel non négligeable.

Aquifère thermal du formations des calcaires crétacés inférieurs. Les observations sur terrains ont permis de noter les indices d'un karst hydrothermal, avérés par les travertins à proximité de Hammam Tassa et Ain Guelib (anciennes émergences thermales).

L'eau de pluie est la principale source d'alimentation, au cours de son infiltration dans le sol et le sous sol, elle dissout les minéraux de l'encaissant, se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent la nappe qu'elle alimente (Aunay B., 2003). Des éléments chimiques vont donc se transférer des minéraux vers l'eau et seront emportés par celle-ci lors de son écoulement. En effet, le chimisme des eaux souterraines est défini par la nature lithologique de l'encaissante et conditionné par le régime hydraulique du système.

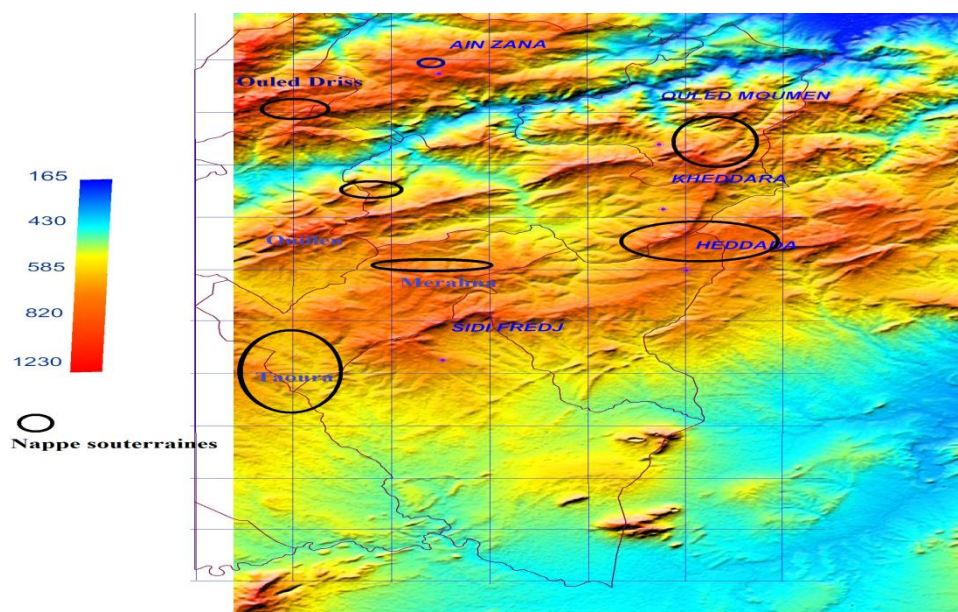


Figure IV.2 : Système aquifère dans la partie aval de Medjerda

IV.3. Synclinal de Taoura

Il est formé par la superposition de deux horizons aquifères (Figure IV. 3). L'un superficiel, dit nappe du Mio-Plio-Quaternaire relativement de faible potentialité et l'autre plus profond dont les constituants sont des calcaires du Maestrichtien.

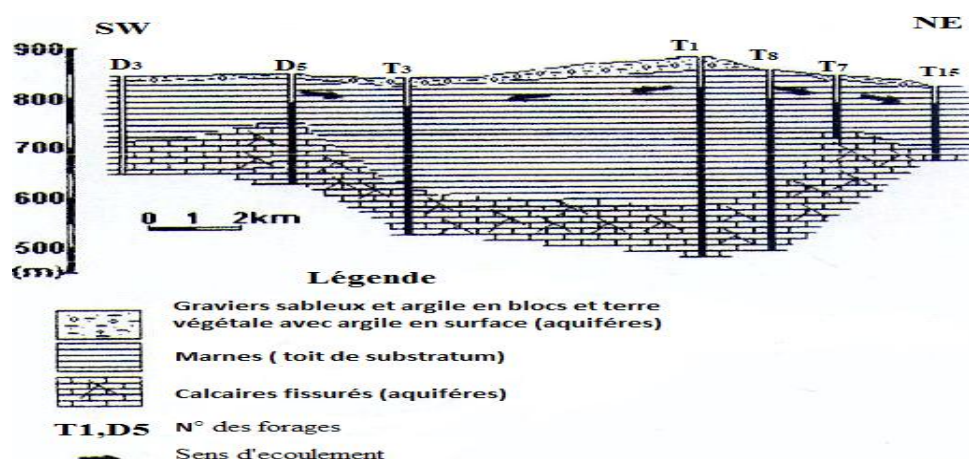


Figure IV.3 : Coupe hydrogéologique de la région de Taoura

IV.3.1. La nappe du Mio-Plio-Quaternaire (nappe libre)

Cette nappe est contenue dans des formations hétérogènes telle que marnes, conglomérats, sables, graviers et limons sableuses, ces mêmes formations sont datées du Miocène au Quaternaire. Les ouvrages captant cette nappe sont imparfaits, ainsi ses extensions (verticale

et horizontale), ne peuvent être définies avec exactitude, se traduisant par une méconnaissance de la nappe et de ses potentialités.

La coupe précédente (Figure IV.3), montre que la partie aquifère est présente au centre du synclinal par contre son épaisseur diminue jusqu'à disparition sur les bordures. Cette nappe est captée par les puits domestiques, son alimentation se fait essentiellement par les précipitations efficaces, son épaisseur varie de 10 à 140 mètres, nous pensons qu'elle peut atteindre les 200 mètres de profondeur. La photo 1, donne un aperçu sur les formations lithologiques présentes dans la région. On y retrouve des argiles plus ou moins sableuses, riches en marnes, conglomérats, sables, graviers, limons sableuses, éboulis, calcaires, décomposés et cailloutis constituant le remplissage du synclinal de Taoura. Cette constitution lithologique est à l'origine de plusieurs sources, tel que Ain Tamatmat, Ain el hadjar, Ain el Berda....



Photo IV.1 : la source d'Ain Tamatmat

IV.3.2 La nappe du calcaire Maestrichtiens (nappe captive)

Cette nappe affleure vers les deux flancs du synclinale (Nord et Sud), par le biais de sources, c'est le cas d'Ain Legridjine, Ain Bousessou et El Khengua et plonge en profondeur sous le remplissage Mio-Plio-Quaternaire, donnant ainsi la forme structurale observée au niveau de la zone. Au cœur de la structure la profondeur peut atteindre les 600 m environ. L'extension de la nappe est horizontale, elle est subdivisée en deux couches aquifères superposées. Ces dernières sont séparées par une faible couche de marnes. Le sommet de cette nappe est limité par des couches des formations argileuses et marneuses. Par contre, le substratum est de nature marneuse. Notons que cette nappe, est considérée comme le principal réservoir d'eau dans la région, constituée par des marnes et des calcaires fissurés appartenant au Maestrichtien inférieur et au Campanien moyen. Les calcaires du

Maestrichtien inférieur sont très fissurés et renferment un aquifère important. Les fissures peuvent avoir des dimensions de cavernes confirmées par le forage "T1" qui a rencontré une caverne à 103 mètres de profondeur au cours de sa réalisation (Friane, 2000).

Les calcaires sont particulièrement présents au centre de la nappe captive de Taoura mais en allant vers le Nord-est, on assiste à un amincissement de l'épaisseur qui aux piémonts des reliefs, elle n'excède pas 110 mètres, (cas du forage T1).

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pris en considération, les dix-sept forages ne captant pas le Maestrichtien, car il a été constaté des pertes totales de boue, indiquant une karstification des calcaires. C'est le cas du forage T1, avec un débit d'exploitation de 100 l/s. Ce débit est dû au fait que l'ouvrage avait atteint une zone noyée (Bouroubi 2009). Cette indication signifie qu'il s'agirait d'un aquifère épikarstique, ce type d'aquifère se développe particulièrement dans les calcaires crayeux en subsurface (Mangin., 1975 ; Bakalowicz., 1979). Les travaux de (Bouroubi Y., 2009) confirment que La structuration d'âge Maestrichtien inférieur contient plusieurs aquifères épikarstiques.

Cet aquifère (Photo IV.2) s'étend sur tout le synclinal et disparaît au Nord-est vers Merahna sous une épaisse couche de marnes miocènes (400 m). Son substratum n'a jamais été atteint en raison de sa profondeur, supérieure à 400 m. Par contre, son toit est représenté par la formation argilo-calcaire du Maestrichtien supérieur.

Cette nappe offre un débit d'exploitation important pouvant aller jusqu'à 300 l/s, c'est le cas des forages D4, T1 et D3, T2, D7 T3, T7, T6. Cette eau est destinée à l'alimentation en eau potable des villes de Souk-Ahras, Taoura, Merahna, Drea, Zaarouria, Sidi Fredj et Ouillen.



Photo IV. 2: Le synclinal de Taoura

Le contact des marnes du Miocène et des calcaires fissurés, favorise l'apparition des sources, nous avons dénombré environ 14, avec un débit global, de l'ordre de 43 l/s, destiné à l'alimentation en eau potable.

Notons que dans la partie effondrée du synclinal au niveau de Merahna, la formation du Maestrichtien plonge sous la couverture miocène à plus de 400 m, ce qui explique l'absence de forages profonds dans cette zone.

Nous rappelons que la superficie des calcaires du Maestrichtien inférieur à l'affleurement est de l'ordre de 57 Km². L'écoulement des eaux souterraines s'effectue généralement du Sud vers le Nord. L'estimation de la capacité hydrique des calcaires fissurés du synclinal de Taoura est de 44 Mm³. Les valeurs de la transmissivité, sont élevées, variant entre 10⁻¹ et 10⁻² m²/s, ce qui confirme la présence d'une fissuration et karstification de la nappe. Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 9.10⁻³ (Toubal, 1993).

La figure IV.4 montrant que les eaux sont contenues principalement dans les calcaires du maastrichtien inférieur, avec une puissance de 100 m en moyenne, repose sur une formation marneuse importante et son toit est constitué par des formations marneuses et argileuses. Donc elles jouent un rôle important pour l'exploitation de leurs eaux et pour l'utilisation dans différents usages. Il s'agit d'un système aquifère multicouche formé par deux principaux niveaux réservoirs :

Le premier niveau constitue le système d'âge Plio- Quaternaire et d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 40 m.

Le deuxième niveau profond, d'âge Maestrichtien inférieur et au Campanien moyen, constitue le réservoir d'eau principal de la région. Son épaisseur devient maximale (150 m à 200 m) au centre du bassin.

Ces deux niveaux sont séparés par des niveaux argileux et marneux en présence de conglomères de calcaires plus ou moins imperméables. Il est influencé par la tectonique qui joue un rôle important dans l'enfouissement des formations et de leur épaissement, de plus en plus vers le centre du bassin.

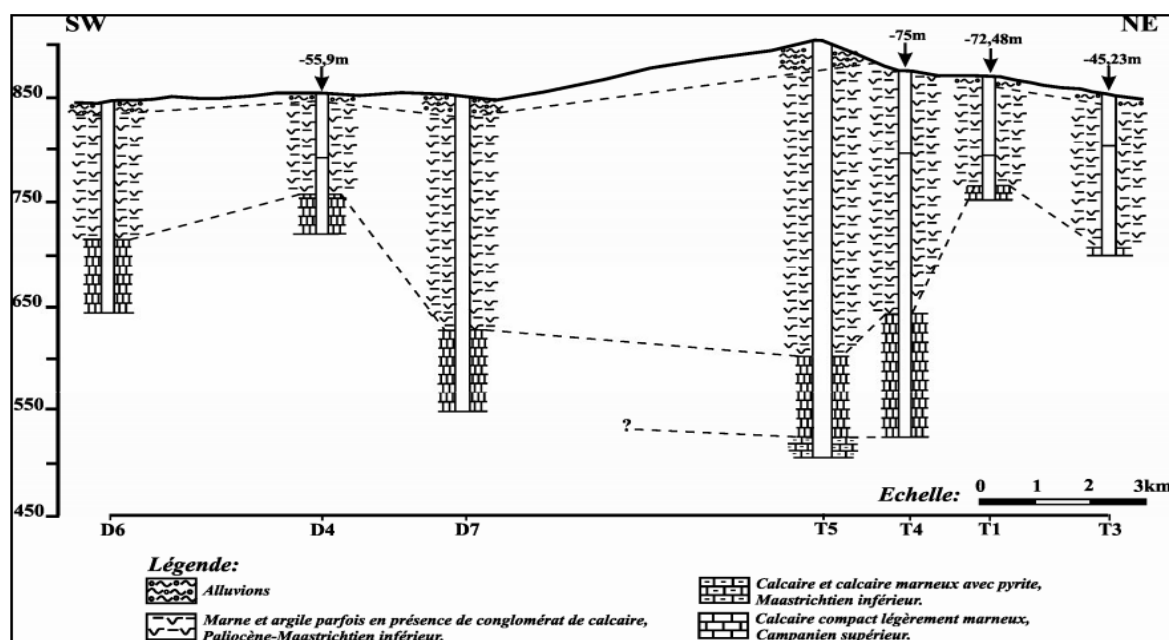


Figure IV.4 : Coupes hydrogéologiques du synclinal de la nappe de Taoura.

IV.3.2.1 Les sources de la région

Comme annoncé précédemment la région se caractérise par la présence de plusieurs sources. Nous allons décrire quelques unes.

- Ain Legridjine

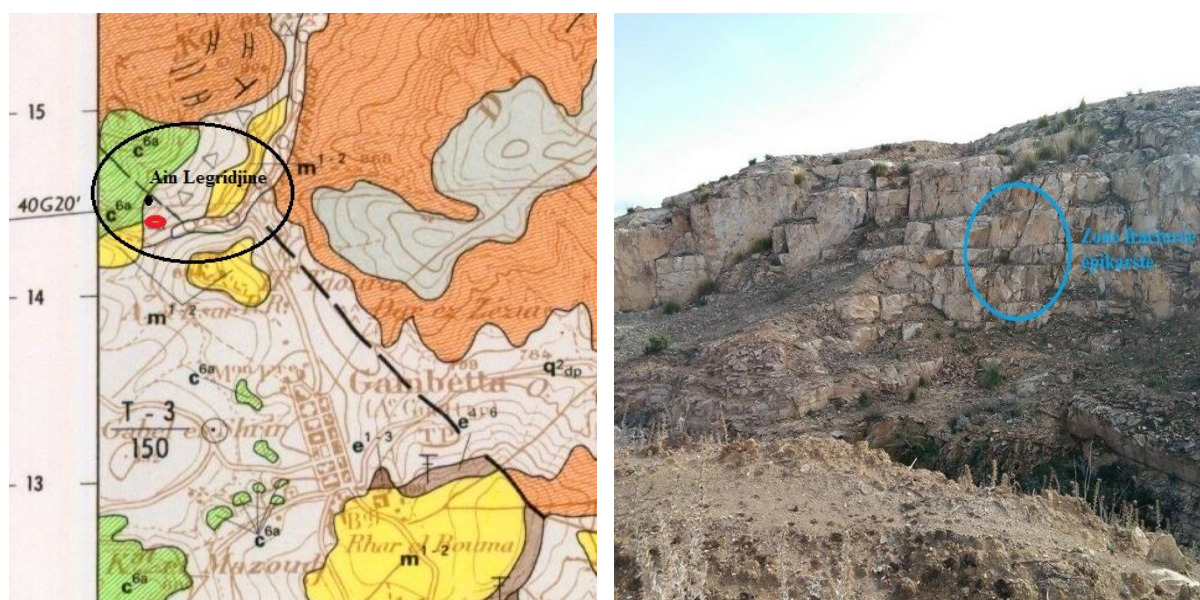


Figure IV.5 : localisation de source Ain Legridjine et ces structure

Cette source est située à 7 km à l'Ouest de la ville de Taoura, elle constitue un des exutoires de l'aquifère des calcaires du Maestrichtien. Elle se localise dans une zone très fracturée (photos suivantes). L'épikarst se localise en amont de la source.



Photo IV.3 : La position de la source et son environnement karstique.

Elle se localise à proximité d'une faille orientée NW-SE. La Figure 7, montrant les indications avancées suivantes : Provoque un léger décalage de la barre calcaire du Maestrichtien inférieur au niveau de la zone; qui participe à l'effondrement de compartiment, ces failles ont donné naissance aux sources les plus importantes de la région. Dans les années 1980, avant la mise en service du barrage Ain Dalia, Ain Legridjine était captée pour l'AEP de la ville de Souk -Ahras ; le débit de la source à cette période était 100l/s. Après exploitation par les forages de l'aquifère, le débit actuel s'est considérablement abaissé à 10-30l/s.

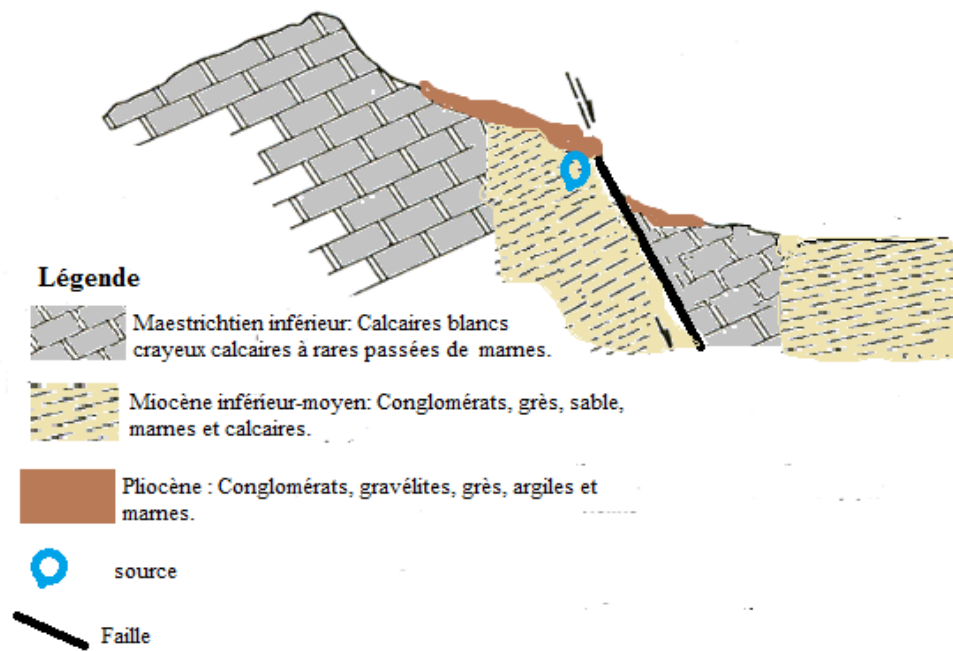


Figure IV. 6 : Mouvement tectonique de la source Ain Legridjine .

Le loglithostratigraphique au dessous Tableau IV.2 montre que le bassin de Taoura comprend des terrains géologiques crétacés et cénozoïques. Cet ensemble de formations est susceptible de développer différents types d'aquifères en fonction de la nature des roches et de leurs perméabilités (Djabri L., 1987).

Tableau IV.2 : log lithostratigraphique de la région de Taoura, d'après les notices des cartes géologiques de M'Daourouch et de Taoura au 1/50000.

Epaisseur	Coupe Lithologique	Facies	Age
50 m		Alluvions travertins. Grès, conglomérats, argiles Grès, conglomérats, argiles, marnes.	• Quaternaire • Plio-quaternaire • Pliocène
700 à 1200 (Merahna)		Conglomérats, gravélites, grès, argiles et marnes.	• Miocène
25 à 30m		Marnes calcaires, lumachelles calcaire nummulitiques, marnes.	Oligocène lacune?
80 à 120m		Marnes-calcaires.	• Eocène
200 à 140m		Marnes, calcaires-marneux.	• Paléocène
200 à 250m		Calcaires blancs crayeux, calcaires à rares passées de marnes.	• Maestrichtien supérieur • Maestrichtien inférieur
50 à 70m		Marnes à bancs calcaires	• Campanien sup terme supérieur
80 à 100m		Calcaires gris claire	• Campanien sup terme inférieur
plus de 250m		Marnes, Calcaires	• Campanien inférieur • Santonien supérieur
?		Calcaires, Marnes	• Santonien inférieur
150m		Calcaires, Marnes noires	• Turonien
		Marnes, silsieuse	
900m		Calcaires Marneuse	• Albien - Cénomanién
?		Marnes, calcaires greseux	• Aptien

IV.3.3. L'aquifère Mio-Pliocène (région de Heddada, Merahna et Khedara)

Le remplissage Mio-Pliocène, montre que le bombement de Koudiat et Merdja, subdivise le compartiment Ouest de ce système en deux sous bassins Nord et Sud. L'épaisseur de ce remplissage diminue tout en se rapprochant de ce bombement anticlinal (jusqu'à 50 m) puis se biseaute, laissant place aux affleurements Crétacés (formation Ouillen).

L'épaisseur moyenne du niveau phréatique atteint 50 m, par contre celle de Mio-Pliocène varie entre 100 m et 300 m. Les grès miocènes ont développé un aquifère assez important, identifié par huit forages au niveau de Heddada et trente puits destinés à l'irrigation avec un débit faible de 1.5 à 3 l/s et quatre sources au niveau de Merahna.

Parmi ces ouvrages, les plus productifs sont ceux localisés à Bir Louhichi (figure IV.7) M1bis, M11, M12 et M2bis qui seront raccordés à la station de pompage projetée. Cette nappe s'étend sur environ 66 km², elle est exploitée par plusieurs forages et un puit donnant un débit global de 98 L/s. Ces forages seront destinés à l'alimentation en eau potable des communes de Heddada, Khedara, Ouled Moumen et le Sud de Sidi Fredj (projet en cour de réalisation).

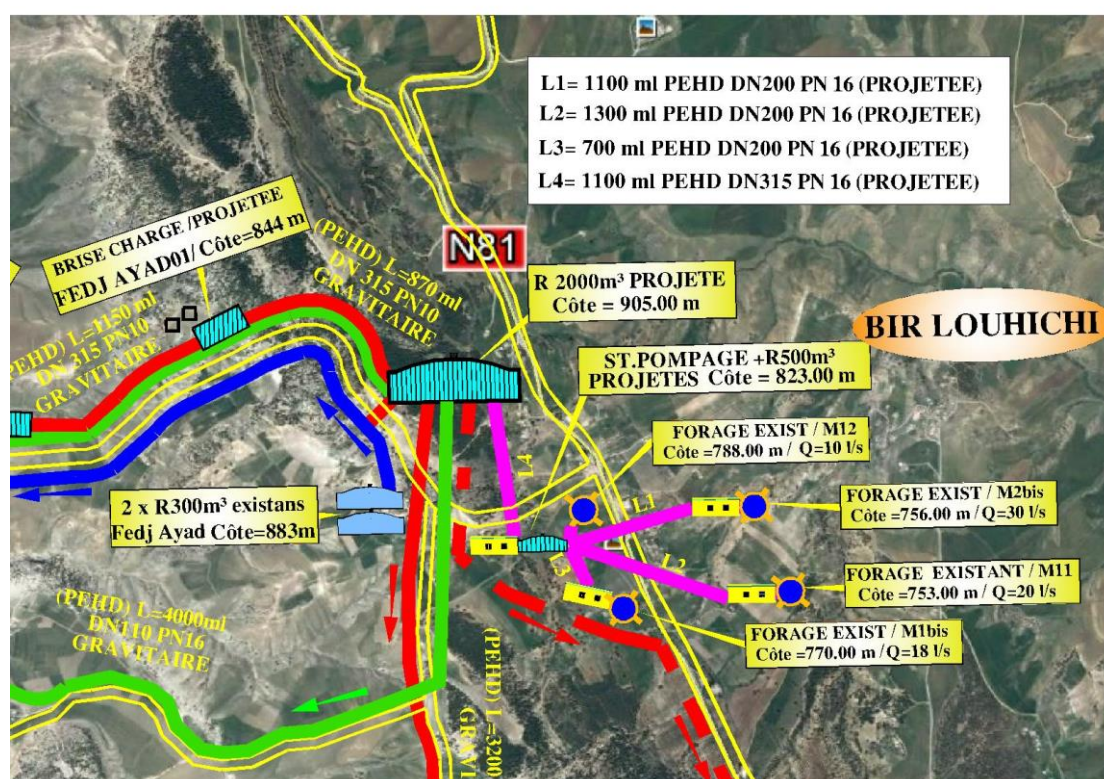


Figure IV.7 : Interconnection des forages Bir Louhichi (Heddada).

L'observation de la coupe hydrogéologique montre une discontinuité des formations rencontrées lors de la réalisation des ouvrages. Ce changement est probablement généré par le jeu de faille. Ainsi nous observons un soulèvement au centre du bassin avec un épaissement maximal à l'Est au niveau d'Ouled Moumen et au niveau de la région d'El Hemmissi (140 à 240 m d'épaisseur). A l'Ouest l'épaisseur de cette formation peut atteindre les 180 m au niveau de Heddada et montre que le Mio-Pliocène, dans le bassin est relativement très profond surtout du côté de Merahna où les altitudes peuvent aller jusqu'à 850 m. Sur le plan hydrodynamique, la transmissivité de la nappe (forage M1bis et MS2) varie de $2,22.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $2,35.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. La perméabilité moyenne est de l'ordre de 10^{-5} m/s (Aggoun, 1993).

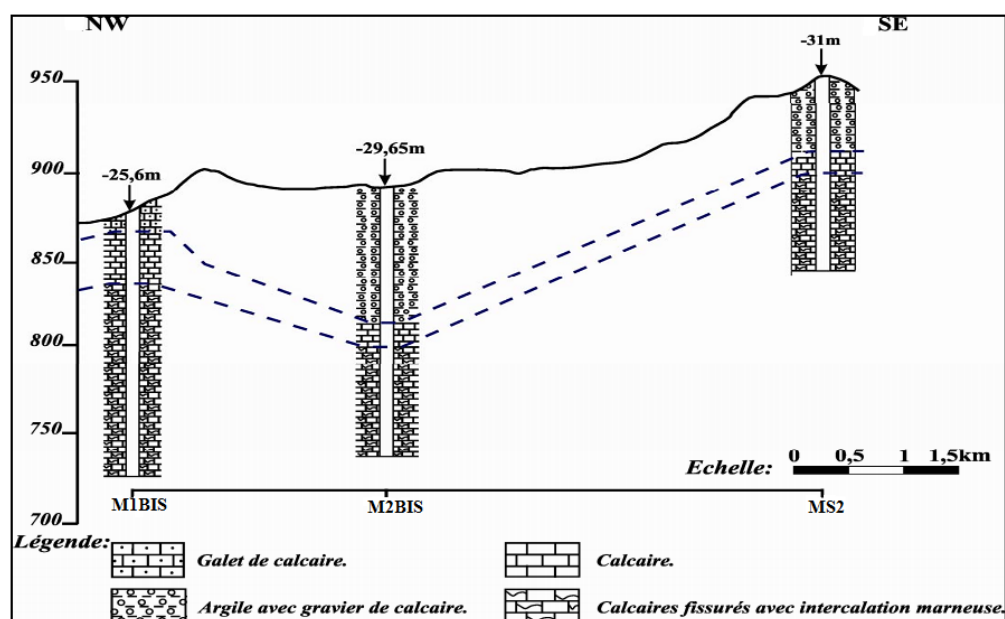


Figure IV.8 : Caractéristiques hydrogéologiques des forages

Cette coupe, orientée NW-SE, est traversée par les forages MS2, M2Bis, M2Bis. Elle donne une idée sur la géométrie du réservoir d'aquifère de Bir Louhichi, représenté par des calcaires fissurés avec intercalation ce qui présente un aquifère relativement important. Il est situé entre un substratum argileux d'âge Mio-Pliocène et un toit argilo-limoneux (Djabri L., 1996). L'extension de l'aquifère bir louhichi à partir de bourrnaine 6 km à Heddada jusqu'à la source Ain Boussebett environ 1 km de Heddada. Son épaisseur varie entre 20 et 45 m .

IV.3.4. L'aquifère campanien

Les ouvrages de reconnaissance et d'exploitation n'ont pu atteindre l'aquifère du Campanien supérieur, en raison de sa profondeur et surtout de la difficulté à traverser les calcaires du Maestrichtien inférieur du fait du phénomène de pertes totales de boue au cours du forage.

IV.3.4.1. Les sources ou Ain

Dans la région on dénombre plusieurs sources, nous donnons un bref aperçu sur ces sources.

- **Sources ou Ain Guelib**

La source est située à 12 km à l'Ouest de la ville de Taoura, Elle émerge à la faveur d'une faille NW-SE au contact des marnes et calcaires du campanien, à quelques mètres au nord, on y trouve des travertins déposés par d'anciennes sources thermales. L'exutoire principal est capté, trois autres griffons émergents des alluvions. Toutes ces sources se rejoignent et finissent dans les gorges de l'Oued Guelib. L'eau sert à l'irrigation.



Photo IV. 4 : Emergence de la source Ain Guelib.

IV.3.4.2 Sources thermo-minérales

Les nombreuses sources thermales de la région sont liées aux accidents tectoniques, le plus souvent jalonnés par une montée triasique (David, 1956). Les failles transversales qui génèrent d'importantes sources thermales, sont aussi responsables de la remontée du flux de chaleur, des formations évaporitiques et des coulées magmatiques. Le gradient géothermique mesuré ou calculé est souvent supérieur à 4°C/100 m ([Guasmi I., 2009](#)).

- Source thermal de hammam Zaid :

Cette source prend naissance à l'extrémité sud-occidentale du massif Eocène dit Djebel El-Hammam ; sa température atteint une moyenne de 39° à 40°, son débit serait d'environ 80 l/s ; c'est une eau chlorurée-sulfurée au contact des calcaires yprésiens et au Trais. Elle constitue un établissement de bains fréquents sur toute l'année pour des cures thérapeutiques

- Hammam Tassa:

La source coule au centre de l'anticlinal crétacé du même nom, sur la route du Kef, à 15 km de Souk-Ahras, où un établissement de bain maure y est installé. L'eau est chlorurée-sulfurée et jaillit des calcaires du Sénonien à 40 °C, avec un débit de 2 L/s. Elle possède les mêmes caractéristiques que la précédente avec moins de H₂S (6,8 mg/L) et un peu plus de CO₂ (957,6 mg) (cité par David, 1956).



Photo IV. 5 : Partie aval de Hammam Tassa

IV.3.5. La nappe alluvionnaire

Exploitée par deux forages, ces derniers se localisent à proximité d'Oued Medjerda mobilisant 08 l/s destinés à l'A.E.P des localités de Khedara gare et El Hemmissi.

La transmissivité du forage F1 est de $3.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. La perméabilité moyenne est estimée à $1,2.10^{-5} \text{ m/s}$, le coefficient d'emménagement calculé est de $2,3.10^{-4}$. Les alluvions se localisent dans la zone effondrée (Dahdouha N., 2012)

IV.3.5.1 Les Puits

En majorité les puits se localisent à proximité des berges d'Oued Medjerda et de ses affluents et leur débit moyen par puits varie de 01 à 02 l/s, le reste est réparti aux piémonts des montagnes et les zones éparses avec un débit de 01 l/s par puits.

IV.3.5.2. Les Sources

Les débits jaugés dépassent les 10 l/s, c'est le cas des sources de Ced Benouir, Mougras, Cheb, Hefala, Alioua,etc. Ces sources se localisent dans les calcaires du turonien.

Notons également que des émergences sont issues des calcaires Eocène, plus particulièrement les calcaires à grandes nummulites au contact des marnes paléocènes.

Les sources, du massif du Djebel El-Hemmam, Ras-El-Oud et Ain Souda, s'écoulent à la base des calcaires à silex yprésien. Elles alimentent la commune d'Ouled Driss avec un débit très important d'environ $\approx 12 \text{ l/s}$; soit : $(1000 \text{ m}^3/\text{jour})$.

En outre, dans les sédiments gréseux du (Numidien), se forment des sources d'affleurement au niveau des masses argileuses. Le débit est faibles, elles sont souvent ferrugineuses et sortent du pied de grands cônes d'éboulis installés au bas des pentes.

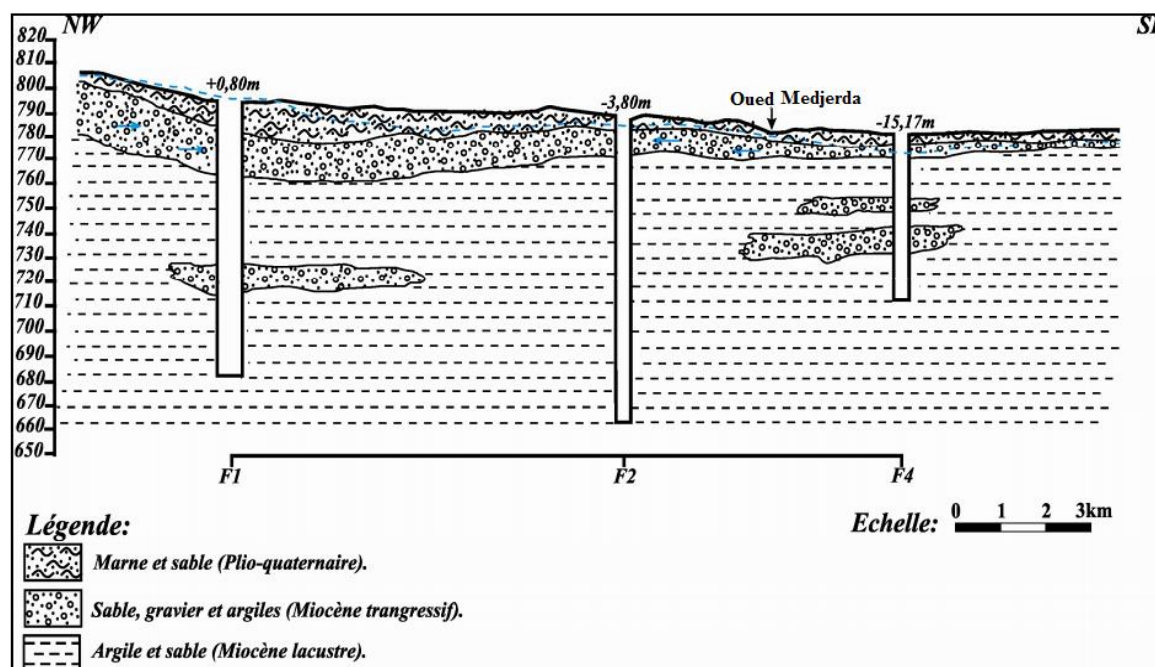


Figure IV.9 : Coupe hydrogéologique dans le bassin Medjerda.

IV.3.6. aquifère Sid Fredj-Ain Zerga

Cette zone comporte deux type d'aquifères :

- un libre qui se trouve à sa moitié Nord, là où on trouve 05 sources de bonne qualité d'eau, cette nappe captée par une dizaine de puits et 3 forages ([A.B.H, 2012](#)).
- un karstique se trouve dans la moitié Sud, capté par 6 forages, dont deux (02) équipés par une station de déminéralisation à l'osmose inverse pour chacun suite à ses teneurs élevé en salinité ., il s'agit des forages (AOB2 et AZ2), on note aussi la présence de zones humides (chotts d'EL Madjene et El Mkimen). Ces nappes sont exploitées par 4 forages et 8 sources avec des débits totaux de 65 L/s, mais dans la majorités de ces sources la salinité est très élevés et le sens de l'écoulement est vers le bassin Mellegue. La Figure 11 est représentée, essentiellement par des argiles vertes gypseuses et des marnes avec des intercalations de petits bancs carbonatés ([Bourouga M ; 2015](#)). Les niveaux carbonatés, sableux et gréseux peuvent présenter un bon réservoir d'eau souterraine dans cette région. L'importance hydrogéologique varie avec le degré de karstification et de fracturation de ces niveaux.

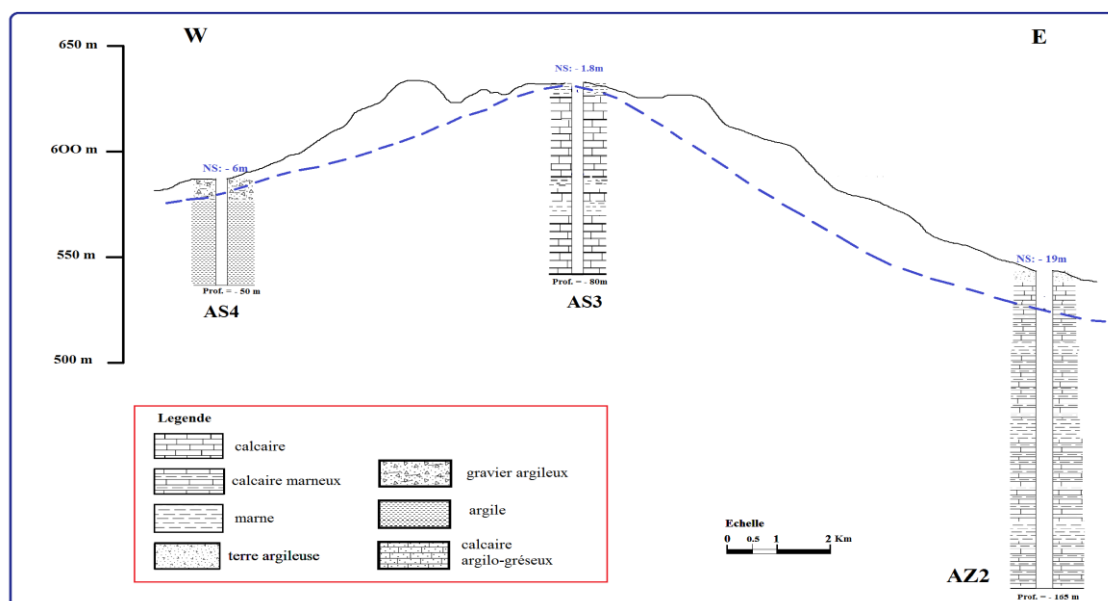


Figure IV.10 : Coupe hydrogéologique (W - E) dans la commune de Sidi Fredj

IV.4. Caractéristiques piézométriques de l'aquifère de Taoura-Bir Louhichi

IV.4.1. Etude piézométrique des données des points d'eau

Pour mieux comprendre l'évolution de la piézométrie au cours du temps et sa relation avec l'exploitation, nous avons utilisé les données de surveillance relevées. L'inventaire est effectué afin de vérifier la distribution des différents types de points d'eau et leurs caractéristiques générales. L'information est obtenue à ce stade soit par des campagnes de terrain, soit par collecte de données archives des points d'eau au près de plusieurs organismes en relation avec le domaine de l'eau dans les deux systèmes d'aquifère de Taoura et Bir Louhichi. Pour mieux étudier cette fluctuation de la piézométrie en fonction du temps on a utilisé les données et les cartes réalisées au cours des campagnes.

IV.4.2. Carte piézométrique Mars 2012

Dans le but d'élaborer une nouvelle carte piézométrique de la région de la partie aval de Medjerda, on a utilisé le maximum d'informations disponibles (puits de surface, sources et piézomètres).

La carte piézométrique représentant l'état de Mars 2012 de la partie Taoura-Heddada (figure V. 11), montre un écoulement général de direction NW-SE avec la distinction de trois sous bassins hydrogéologiques. Le premier, au S-W est le plus important, il est constitué du synclinale de la zone de Drea -Taoura où l'écoulement est convergent vers les reliefs limitrophes.

Le second sous bassin, situé à l'extrémité du synclinal de Taoura vers le bombement de Merahna (constitue une zone anticlinale) jusqu'au Nord de la commune de Ouillen. L'écoulement des eaux, dans cette région, commence W-E puis NW-SE. Les courbes isopièzes divergent de l'Oued Medjerda.

La limite entre la nappe de Taoura et celle Heddada peut être attribuée à une ligne de partage des eaux de direction SW-NE située au Nord de la ville de Merahna, matérialisée par un changement brusque du sens d'écoulement qui est généralement multidirectionnel, E-W vers le centre de la nappe de Heddada qui représente le troisième sous bassin caractérisée par des potentiels hydriques moins élevés.

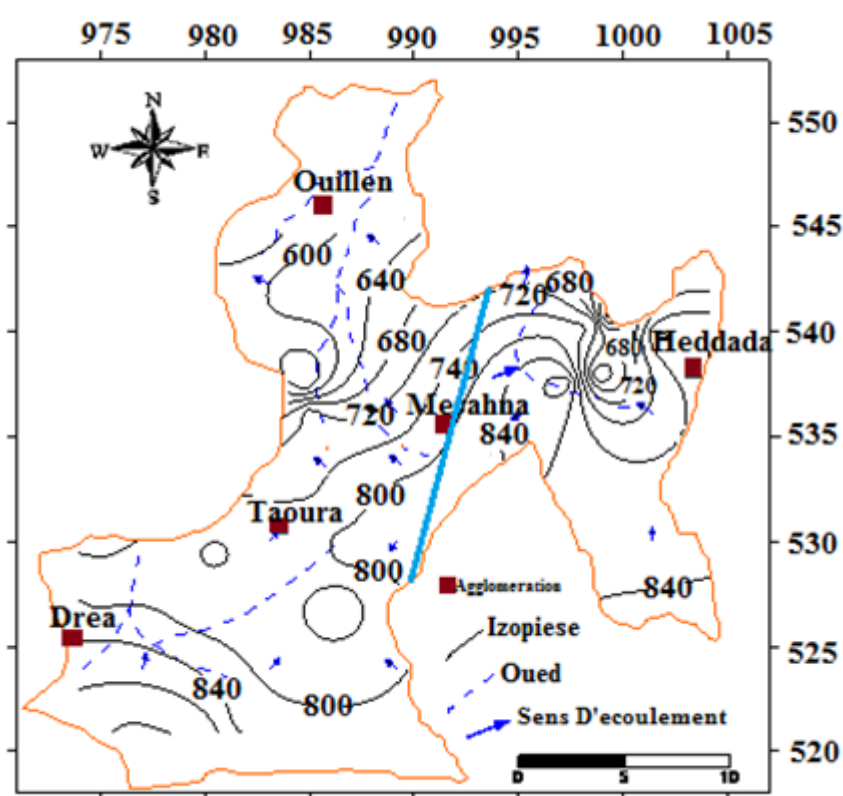


Figure IV.11 : Carte piézométrique Mars 2012

Il est de direction SW-NE dans la partie Sud du bassin. L'écoulement devient nettement S-N, jusqu'à l'exutoire de la nappe (Oued Medjerda). L'alimentation de la nappe se fait au niveau des piémonts de Jebel Boussessou (1087m) (Senani S, 2011), au niveau d'aquifère de Taoura, c'est l'aquifère principal de la région. Il a été reconnu par de nombreux forages et fait l'objet d'une importante exploitation pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. Les zones fissurées se rencontrent en général dans les 80 m. Au

centre de la plaine les courbes isopièzes sont généralement convergentes vers le synclinale qui joue le rôle d'exutoire secondaire de cette nappe et Oued el hammamel qui draine la nappe. Le gradient hydraulique est très variable avec une moyenne de l'ordre de 2 à 5 m/Km. Il est de 5 à 10 m/Km au piémont de Djebels Draâ Snouber (1064 m). Et de 3 à 6 m/Km (Lannani. K., & Abdouni. L., 2008). Au niveau de exutoire (Oued Medjerda) la (figure 11) montrent aussi une stabilité des niveaux piézométriques.

IV.4.2.1. Carte piézométrique Juillet 2012

La figure IV. 12 représente la carte piézométrique de l'état de Juillet 2012 de la zone d'étude. Les courbes piézométriques montrent une même morphologie que dans les cartes précédentes, ce qui traduit le même régime d'écoulement. Cependant, on note une diminution des côtes piézométriques des forages par rapport aux périodes précédentes, due à la faible recharge de la nappe suite à la faible pluviométrie annuelle qui n'excède pas 325 mm.

La carte piézométrique juillet 2012, suggère un écoulement multidirectionnel (figure 12), ce changement d'écoulement peut être expliqué par la surexploitation dans certaines régions du synclinal.

Les courbes isopièzes divergent surtout en amont du bassin, qui participe activement à l'alimentation de la nappe, où les perméabilités verticales et horizontales sont bonnes. Pour le synclinale de Taoura (entre ouillen-Taoura et Drea) d'une façon générale on peut remarquer que le niveau d'eau est en abaissement pour la période Juillet 2012 ce qui peut être expliqué par la surexploitation et la sécheresse qui a touché la région, le rabattement est très faible et ne dépasse pas un mètre pour la nappe de Heddada (entre Merahna-Heddada). Cela est dû à la forte densité des puits. Dans l'aquifère de Bir Louhichi la stabilité du niveau piézométrique de la nappe peut être expliquée par le taux très important de recharge de la nappe. Au niveau du compartiment Nord, l'écoulement des eaux est globalement dirigé vers l'axe du synclinal du bassin.

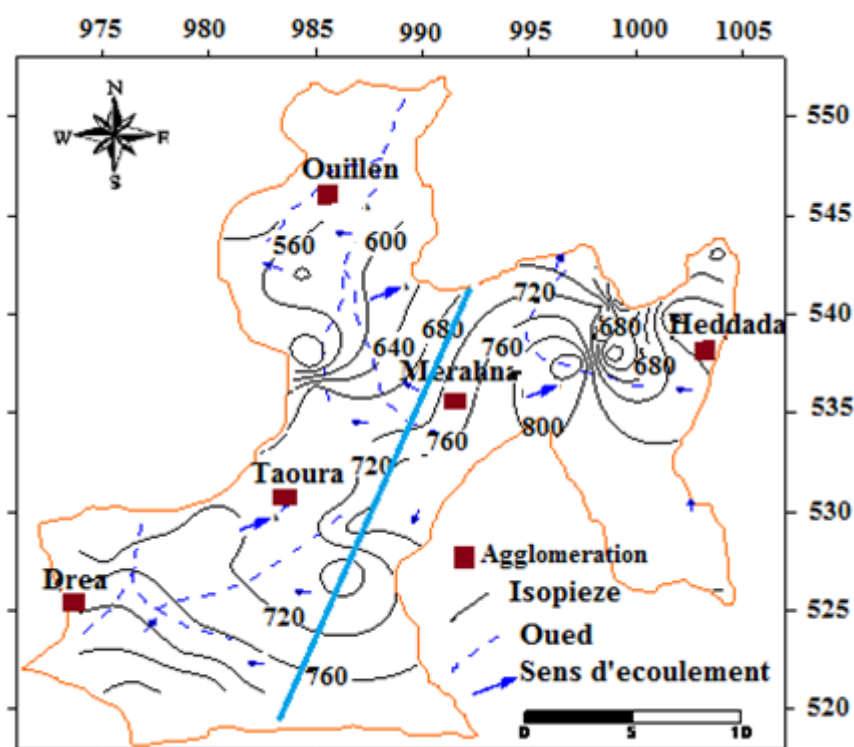


Figure IV.12 : Carte piézométrique Juillet 2012

L'examen des cartes piézométriques 2012 a permis de dégager les constatations suivantes:

- Les valeurs les plus élevées du niveau piézométrique (840 m) se trouvent en amont de la nappe de Taoura ;
- L'allure générale de l'écoulement se fait suivant une direction WE à SW-NE à l'exception du sous-bassin de centre de la nappe de Heddada où elle devient N-S.

Nous remarquons qu'ils n'existent pas de grands changements dans la forme des lignes ce qui traduit que les régimes d'exploitation des nappes sont semblables.

- Pour le synclinal de Taoura, l'état de 2012 présente une différence par rapport aux niveaux piézométriques à l'amont de la plaine qui atteint la cote de 840 -800 m, le centre de la plaine reste dans la limite de 800-760 m en aval il atteint la cote de 640 à 600 m, on remarque que les courbes isopièzes en 2012 sont plus espacées.

IV.4.3. Etude piézométrique 2013

L'évolution piézométrique au niveau de différents points de surveillance contrôlant ce système aquifère montre, en gros, une baisse continue de la piézométrie, interrompue par de légères remontées liées aux périodes de hautes eaux. Les lignes piézométriques montrent un même régime d'écoulement. Cependant, le sens de l'écoulement des eaux s'effectue du S-E vers le N-W. Dans cette partie on s'intéresse à la nappe du karst (synclinale de Taoura) et la nappe du Mio-Pliocène qui représentent un grand intérêt hydrogéologique dans la région. A

partir de l'année 2013 la station de pompage située à Taoura (interconnection des forages) a été mise en service avec un débit de $17000 \text{ m}^3/\text{j}$. Des périmètres d'irrigation à Heddada consomment l'eau de l'aquifère ainsi que l'huilerie d'olive.

- **La nappe du synclinale de Taoura**

Elle enregistre un rabattement du niveau piézométrique voisin de 20 m au centre du bassin (point T7, T11, D10) et de l'ordre de 10 m au Sud de la ville de Taoura (point T1, T7, T3, D5). Cela est dû au résultat de l'exploitation intense des puits et forages dans le synclinale de Taoura (surtout en période estivale où l'alimentation du chef lieu de Souk-Ahras est assurée par cette nappe), ce rabattement est interrompue par de légères remontées liées aux périodes pluvieuses. L'alimentation de cette nappe provient de l'eau de pluie, par infiltration directe où les formations géologiques sont, relativement perméables (calcaires fissurés). Au niveau des piémonts des reliefs la nappe subie aussi une recharge relativement importante. Dans la partie centrale de la nappe de Taoura-Drea présentée par l'aquifère maestrichtien, la majorité des points d'eau sont équipés ce qui entraîne une exploitation très importante qui dépasse les ressources exploitables avec un débit de pompage de $17000 \text{ m}^3/\text{j}$. Il en résulte une baisse continue de la piézométrie entraînant le tarissement d'un grand nombre de puits. En effet l'amplitude de variation du niveau piézométrique ne dépasse pas 1 mètre durant l'année de suivi.

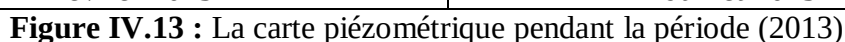
- **La nappe de Bir Louhichi**

Dans la région de Heddada et Ouled Moumen (MS1, M1Bis) ces nappes sont exploitées par un nombre limité des forages équipés ce qui entraîne un taux d'exploitation relativement faible par rapport aux autres nappes, le rabattement est très faible et ne dépasse pas un mètre pour une période d'observation. Cette nappe est caractérisée par des potentiels hydriques moins élevés, la stabilité du niveau piézométrique de la nappe du Mio- Pliocène peut être expliquée par le taux très important de recharge assuré par les Oueds Sidi Mendi et Zarzoura et la faible exploitation, montrent aussi une stabilité des niveaux piézométriques. La région de l'Est de la nappe de Bir Louhichi (Figure IV.13) révèle un écoulement de direction SW-NE avec un resserrement dans la région d'exutoire présentée par le centre de l'aquifère.

La nappe mio-pliocène montre un sens d'écoulement qui se dirige de l'Ouest vers l'Est, le resserrement est bien visible dans la région d'exploitation intense et agressive de cette nappe.

Les deux nappes qui représentent un grand intérêt hydrogéologique dans la région sont :

La deuxième est exploitée, essentiellement, pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation (projet en cours).



- Une alimentation par infiltration directe des eaux.
- Une alimentation par la nappe libre de Mio-Plio-Quaternaire à travers les sources (Madoure, Ain Tamatmatt, Ain Ghilb) avec un débit moyen de l'ordre de 6 l/s.

Les courbes isopièzes du Février 2013 dans la nappe de Bir Louhichi sont très resserrées suite à l'utilisation intensive de l'eau dans le domaine d'irrigation, et dans la nappe de Taoura elles sont espacées, et le contraire au mois de Juillet, suite à la surexploitation de la nappe pour l'alimentation en eau potable a campagne de mesure du niveau piézométrique effectuée a permis de dresser la carte piézométrique établie pour tous les niveaux confondus montrant que le sens général de l'écoulement des eaux s'effectue du Sud-est vers le Nord-Ouest. Cependant, on note l'existence d'une ligne de partage des eaux ayant une direction SE-NW et qui influe sur le sens local de l'écoulement des eaux.

Le gradient hydraulique montre des variations qui peuvent être induites par la nature lithologique du réservoir (abondance de calcaires ou de marnes) ou par les variations qualitatives et quantitatives de la fracturation.

L'évolution de la piézométrie annuelle de la nappe fait apparaître l'étroite relation avec les variations pluviométriques et l'allure des courbes de variation piézométrique incite à faire les commentaires suivants:

- La période 2012 se caractérise par une baisse généralisée du niveau piézométrique. D'une façon générale ce qu'on peut remarquer pour les figures ce qui peut être expliqué par la sécheresse qui a touché la région. Avec une surexploitation des ressources en eau et un manque de précipitation.
- le début de l'année 2013 qui est très excédentaire de point de vue pluviométrique, tous les piézomètres vont enregistrer une remontée rapide de la surface piézométrique. La saison pluvieuse s'est répercutée très positivement sur l'état piézométrique de la nappe qui a permis de rétablir l'ancien niveau piézométrique. Avec un axe de drainage qui coïncide sensiblement avec le parcours d'Oued Medjerda et Mellègue.

IV.5. Apports de la géophysique

L'exploration des couches aquifères d'une formation géologique donnée sont étroitement liées à la connaissance de la nature lithologique de cette formation.

L'identification de la géométrie de ces couches aquifères nécessite des moyens de reconnaissance, tels que la prospection électrique. L'utilisation de ces moyens va permettre la connaissance des dimensions de ces aquifères, et par conséquent aider à la bonne gestion de ces ressources hydriques.

Une étude géophysique a été réalisée dans la région en 1977 par le **STROJEXPORT-PRAGUE** (Direction des Etudes de Milieu et de la Recherche Hydraulique). Il a été réalisé 102 sondages électriques de AB 600 m, implantés pour la plus part sur les affleurements du crétacé, 475 sondages électriques de AB 2000 m et 40 sondages électriques de AB 6000 m. Les sondages électriques ont été implantés sur des profils parallèles au rivage et d'orientation NE-SW. Les mesures ont été faites par l'emploi du dispositif de Schlumberger. Les objectifs principaux des investigations géo-électriques réalisés par STROJEXPORT-PRAGUE dans la région de Taoura- Borj M'raou, visaient à identifier les caractéristiques des calcaires du Maestrichtien:

- leur structure, degré de fissuration, compaction et forme du synclinal;
- leur profondeur et épaisseur ; La géophysique a permis de détecter des zones fracturées en dessous de différentes sources avec un toit élevé des calcaires maestrichtiens au niveau du fossé de Taoura.

Les zones favorables à l'implantation d'ouvrages techniques ont été mises en évidence à partir d'une trentaine de coupes géo- électriques.

Bien que la superficie prospectée (425 km²) ne couvrait que la moitié de l'aire d'étude, les objectifs fixés avaient donc été atteints, une profondeur notable à laquelle se trouvent les calcaires maestrichtiens et une géométrie asymétrique du synclinal de Taoura.

IV.5.1. Les méthodes de prospection électrique

Dont la méthode des résistivités (traînés et sondages) est la plus fréquemment mise en œuvre. Elle permet de distinguer des contrastes.

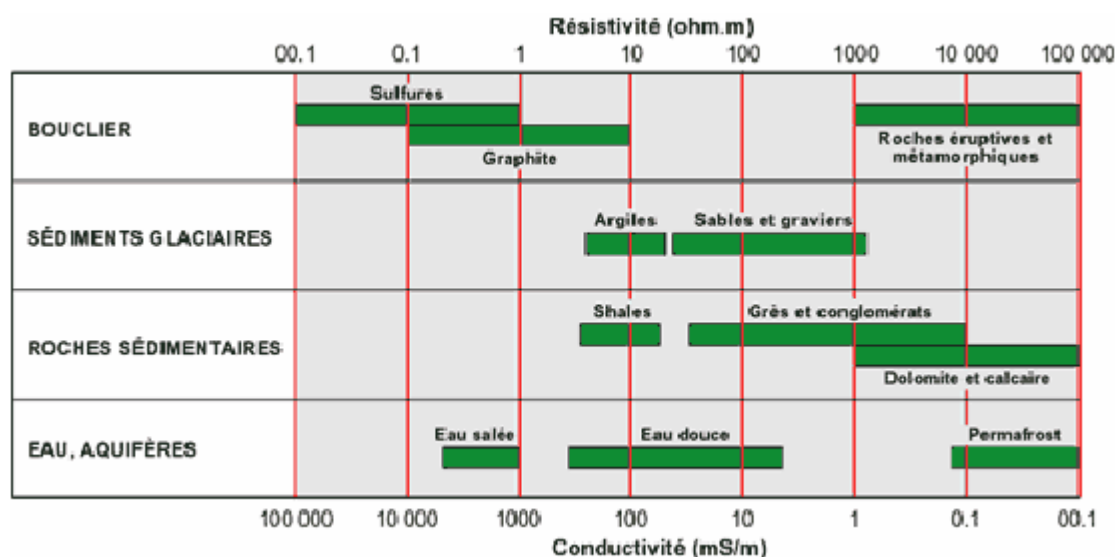
La prospection électrique est basée sur la mesure, à partir de la surface, des résistivités apparentes du sous sol. La correspondance entre la résistivité et le faciès géologique est une notion d'une grande importance pratique. En général, la résistivité d'une formation est moins constante et peut évoluer progressivement le long d'une même formation spécialement dans les dépôts quaternaires.

Il faut noter que les résistivités que l'on mesure en prospection sont déjà des moyennes relatives à de grands volumes de terrain en place. Il s'agit d'une moyenne d'autant plus large que les terrains sont plus profonds. Il en résulte que les mesures de résistivité faites sur échantillons ne sont comparables à celles des terrains en place que si l'on considère la valeur moyenne d'un grand nombre d'échantillons. Souvent, les résistivités des roches dépendent de la direction du courant qui les traverse, on dit qu'elles sont anisotropes. Cette anisotropie peut être due à la structure de la roche, les terrains sédimentaires étant généralement plus résistants dans la direction perpendiculaire au plan de stratification par exemple. Il s'agit alors de micro anisotropie. Mais pour de grands volumes, il peut également s'agir d'une anisotropie apparente ; une succession de couches alternativement résistantes et conductrices donnera une valeur de résistivité plus élevée normalement aux strates.

IV.5.2. Principe de la méthode électrique

La prospection électrique à courant continu repose sur l'étude de la circulation du courant dans le sol et fait intervenir par conséquent les contrastes des résistivités électriques des roches. Elle est basée sur la distribution du potentiel à la surface du sol à la suite du passage du courant électrique. On mesure en fait « une résistance ». Cette dernière traduit l'opposition au passage du courant et caractérise les formations géologiques du sous- sol.

Tableau IV.3 : Plage de résistivité de différentes formations (Favini, 1969).



IV.5.2.1. Les procédures de mesure

L'exploration par prospection électrique peut se faire selon deux manières :

- Par sondage électrique « SE » ou « SEV » ;

- Par cartographie électrique à partir de traînés ou profils électriques.

A/ Sondage électrique

L'objet du SE est d'étudier la variation verticale de la résistivité à partir de la surface.

Ainsi quand on injecte du courant dans le sol, on explore à cet endroit une tranche de terrain de plus en plus épaisse et l'on met par conséquent en évidence les changements de construction géologique suivant la verticale. Sachant que cette exploration verticale du sous sol ne peut se faire qu'après avoir augmenté la longueur de ligne AB progressivement en exécutant en un même endroit une succession de mesures, en augmentant à chaque fois les dimensions du dispositif.

Les mesures peuvent être réalisées avec les dispositifs classiques : Schlumberger, Wenner, dipôle- dipôle etc... Dans la pratique, on utilise généralement les quadripôles symétriques, et le plus souvent le dispositif Schlumberger.

B/ Traîné électrique

Le principe consiste à déplacer un quadripôle AMNB sur le site à explorer. A chaque station, centre du dispositif, on mesure une résistivité apparente. L'objectif est la mise en évidence des variations latérales de résistivité qui sont dues aux changements latéraux de faciès, à la présence de failles et aux filons conducteurs ou résistants.

IV.5.3. Travail géophysique réalisé

Dans la région de Dréa-Madaure, les S.E ont été espacés par 750 m. L'intervalle des S.E a varié de 500 à 1000 m en fonction de supposition structurale, déduite de la géologie superficielle. Dans le détail de Taoura les S.E ont été situés en quadrillage régulier de 500 * 500 m.

La distance entre les profils dans la zone de Merahna et Khedara est en moyenne 2 Km. l'intervalle des S.E est irrégulier, variant entre 500 m et 2 km en fonction de la situation géologique.

Dans la zone étudiée, ils ont effectué les forages de reconnaissance, en 1976 par la BULGARPROJETS – ALGER. Exécution de 3 forages de reconnaissance, la localisation de ces forages est la suivante :

IV.5.3.1. Forage T-2 Bled el Madjen a été étalonné par S .E . N° 21/11/ X = 985 650 ; Y= 333 200

Il faut constater que le forage a été situé dans la zone trop défavorable, en perçant 500 m

de l'alternance exclusivement marneuse sans la traverser. En plus, la coupe géologique y signale une zone de fissuration. Le S.E relatif montre une conductibilité extrême des marnes de 2 et presque 1 ohm. m. le substratum relativement résistant n'est indiqué que dans la profondeur approximative de 700 m et il est contestable de dire s'il s'agit déjà du toit de quelques unes des formations calcaires du crétacé.

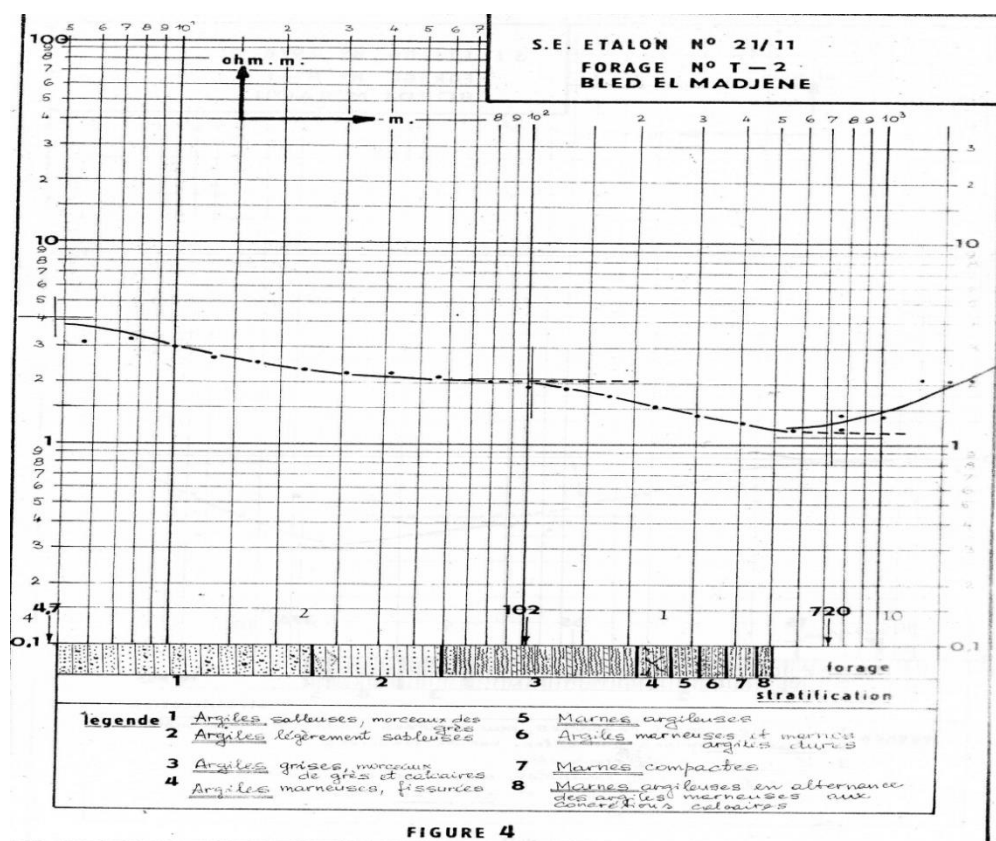


Figure IV.14 : Sondage électrique et les formations géologiques (El Medjene)

IV.5.3.2. Forage B-1 Bordj M'raou est identique au S.E N° 49/8 / figure 3 / X = 1003 700 ; Y = 346 400

Jusqu'à la profondeur de 300 m la coupe géologique ressemble à la même précédente. Dans l'intervalle de 300 à 350 m, les bancs intercalant des calcaires marneux apparaissent aussi. Le débit faible en eaux a été capté près de la surface en 8 - 9 m, dans le milieu des marnes sableuses. Durant l'essai de pompage le débit de 0,6 l/s a été diminué jusqu' à 0,058 l/s, la résistivité de marnes est de nouveau trop faible : 10 ohm.m près de la surface, où les marnes sont parfois sableuses ; 5 ohm. m. jusqu' à la profondeur de 65 m et 3,5 ohm. m jusqu' à la profondeur de 360 m à la quelle on rencontre le substratum résistant de 100 ohm.m correspondant, sans doute, aux calcaires maestrichtiens. On ne peut que regretter que le forage n'ait pas été approfondi encore de quelques dizaines de m.

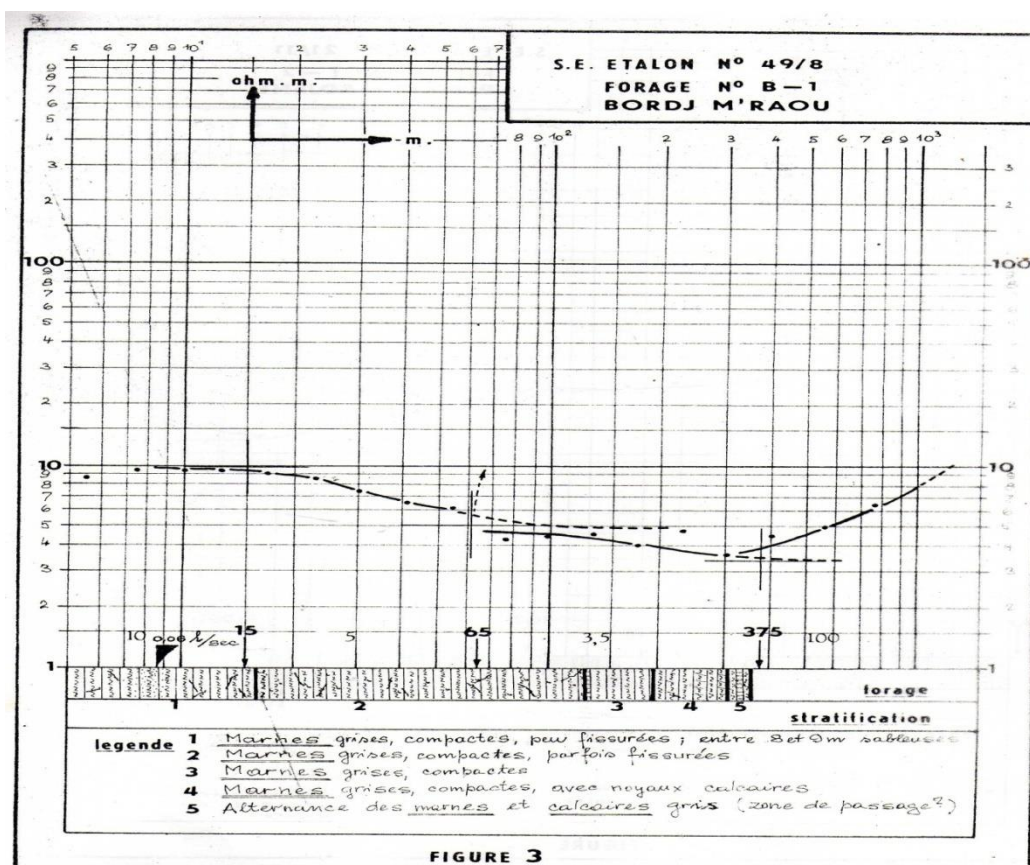


Figure IV.15 : Sondage électrique et les formations géologiques (Bordj M'raou)

IV.5.3.3. Forage M-1 Bir Louhichi X = 1002 150 ; Y = 337 850

La coïncidence des limites géologiques et géo-électriques est évidente dans les petites profondeurs :

- Le fond du diluvium argilo-sableux a été constaté par le S.E au 15 m à 19 m.
- Le fond de la formation des grès quartzeux correspond au forage avec précision en 145 m avec une résistivité de 120 ohm.m.

Les calcaires blancs (maastrichtien), traversés par forage de 248 à 300 m, sous l'influence de la couche sus-jacente, extrêmement conductrice. D'après la coupe géologique ; les calcaires sont fissurés ; perte de boue. Et c'est pourquoi on y suppose une fusion des effets de forte conductibilité des marnes avec une zone de fracturation. De l'autre coté, le S.E indique en 340 m le toit d'un résistant (130 ohm.m) qui correspond aux calcaires marneux compacts.

Bien que la coupe géo-électrique relative / profil N° 49 (voir annexe) saisisse exactement la structure géologique favorable (le synclinal d'un pli local), la nappe au débit de 4 à 5 l/s provenant de la barre des calcaires blanc reste dissimulée. (Le forage a été doublé par l'autre en voisinage qui donne de la même nappe le débit de 17 l/s).

Finalement, on peut dire : trois forages-étalons, trois problèmes spécifiques et trop peu de notion pour classer les roches sur la base de résistivité. Tandis que le forage M-1 a touché la structure favorable, le T-2 a été situé dans la plus défavorable part de la zone étudiée. Si le forage B-1 continuait encore 30-50 m, son rôle pour l'exploitation pourrait être sensiblement plus important.

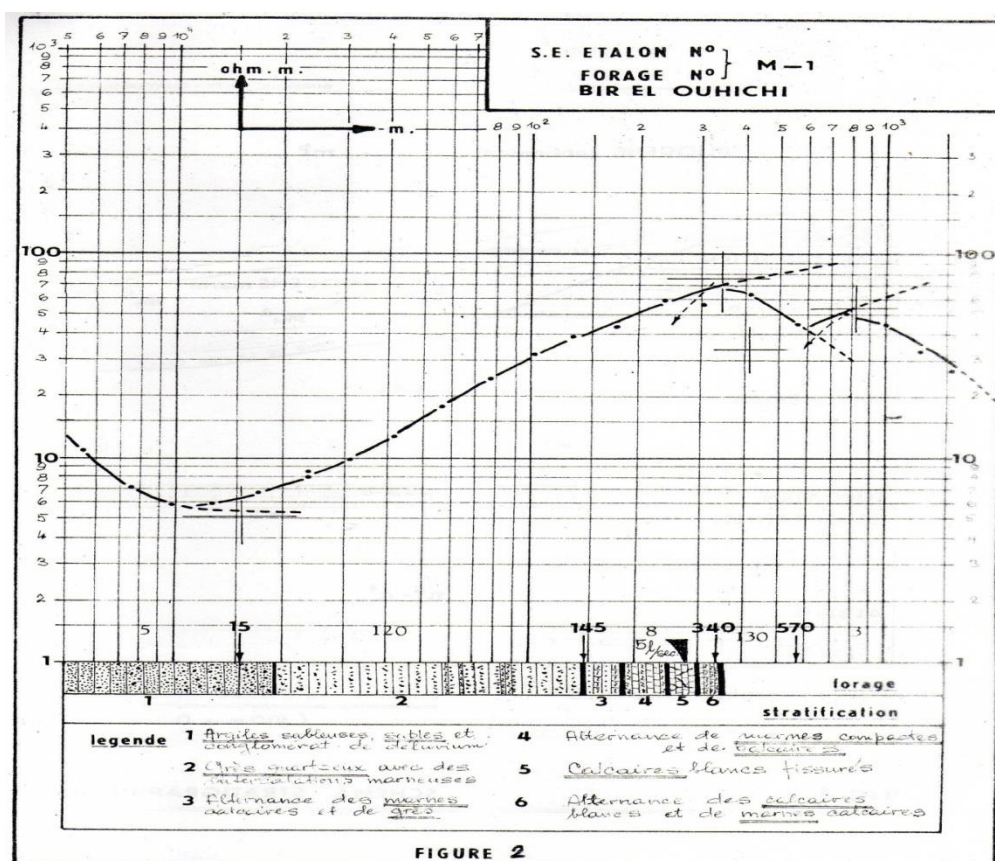


Figure IV.16 : Sondage électrique et les formations géologiques (Bir louhichi)

IV.5.4. Classification des roches sur la base de résistivités

Sur la base des conclusions de la mesure-étalon il nous a fallu comparer tous les S.E paramétriques sur les affleurements du Crétacé pour connaître et définir leurs qualités géo-électriques : les éventails des valeurs relatives sont encadrés sur l'aperçu suivant :

Tableau IV.4: valeurs de résistivités par rapport à la formation géologie

Formation	Zones								
	Merahna-Khedara			Taoura			Dréa-Madaure		
	r	m	n	r	m	n	r	m	n
Eocène calcaires	40-130	69	7	-	-	-	-	-	-
Eocène indifféré	4-40	14	15	-	-	-	8-12	12	3
Paléocène-Maestrichtien supérieur (marnes)	9-90	40	24	-	-	-	20-150	120	13
Maestrichtien inférieur	33-300	110	35	34-650	200	41	40-600	255	36
Barre supérieures des calcaires blancs									
Campanien sup marnes	4-25	12	22	10-150	49	8	8-110	45	20
Campanien moyen barre inférieure des calcaires blancs	25-400	65	31	30-500	200	8	20-500	215	15
Campanien inférieur	3-55	16	16	4-80	18	12	3-65	16	23
Emscherien prédomination des marnes									
Turonien calcaires	80-260	140	3	-	-	-	-	-	-

r=éventail des résistivités en ohm.m.

m= résistivités moyenne en ohm.m.

n= nombre des observations.

On voit qu'à l'exception de l'emschérien les autres résistivités relatives aux zones situées à l'Ouest de Taoura sont sensiblement renforcées par rapport aux mêmes de la zones des Merahna et khedara. On observe cet effet en comparant les valeurs moyennes, aussi bien que les éventails respectifs.

Pour l'interprétation est très important la notion que les rapports entre les formations individuelles restent constant malgré les variations entre les parties orientale et occidentale

du synclinal. En ce qui concerne le remplissage Mio-Pliocène et Quaternaire, il ne peut exprimer la signification des valeurs de résistivités par rapport à la géologie que schématiquement :

De 1 à 10 ohm.m. – terrain marno-argileux, zones de fracturation limons superficiels.

De 10 à 20 ohm.m. – terrains marno-sableux ou argilo-sableux.

De 20 à 100 ohm.m. - terrains à prédominance croissante de sable et grès, passages conglomératiques, zone de l'altération superficielle des calcaires, carapaces calcaires.

Plus que 100 ohm.m. Assises de grès compactes, notamment quartzeux, conglomérats, éboulis, carapaces superficielles, traversines.

IV.5.5. Prospection par forages

Quarante sept sondages ont été forés dans la région d'étude atteignant différentes profondeurs et différents aquifères (Tableaux des forages en annexes 5 et 6).

- Six forages ne captent que les formations du miocène au niveau de Merahna.
- Onze ouvrages sont des forages «bis» de remplacement, situés à quelques mètres des premiers.
- Cinq forages ne dépassent pas les formations du Paléocène et du Maestrichtien supérieur.
- Dix-sept forages atteignent les calcaires aquifères du Maestrichtien.
- Six forages captent l'aquifère du campanien supérieur, et par conséquent, ils traversent tout l'aquifère du maestrichtien inférieur.

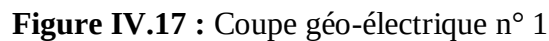
Les plus productifs sont ceux qui captent les calcaires Maestrichtiens et Campaniens.

IV.5.5.1. Comparaison des données de la géophysique avec les forages

La plupart des forages réalisés dans la région de Toura ont été proposés par la prospection géo-électrique menée par STROJEXPORT-PRAGUE en 1977.

❖ Coupe géo-électrique n° 1

La coupe géo-électrique signale que le toit des calcaires se trouve à une profondeur de 200 m, alors que le forage réalisé en ce même point a atteint les calcaires à 94 m. Par contre, la résistivité de la formation aquifère de 120 Ohm.m est concordante avec les données du forage (D4) qui a initialement débité 110 l/s.



Le sondage électrique six signale le toit des calcaires à une profondeur de 170 m (Figure IV.18) ; l'ouvrage de captage T1 implanté aux mêmes coordonnées que le S.E 6 a atteint les calcaires à 103.9 m. En revanche, la résistivité 120 Ohm.m de la formation aquifère est bien concordante avec les données du forage T1 qui a initialement débité 100 l/s.



Exceptionnellement, pour cette région située à 2.5 km au Sud-est de la ville de Taoura, la résistivité de la formation captée est de 52 Ohm.m, les forages ont atteint le toit des calcaires à une profondeur de 150 m (Figure IV.19).

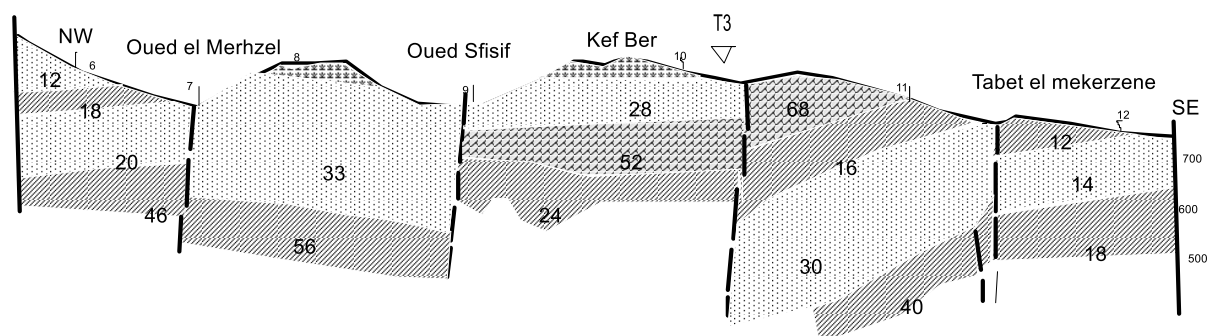


Figure IV.19 : Coupe géo-électrique n° 3

Cette coupe montre aussi des zones de fractures et succession de deux petites cuvettes synclinales au N-W au niveau d'Oued El Merhzel et Oued Sfisfa .

❖ Coupe géo-électrique n° 4

Ce profil effectué à quatre kilomètres à l'Ouest de la ville de Taoura, montre le comblement du synclinal par les dépôts Mio-Plio-Quaternaires (Figure IV.20).

Nous remarquons que la gamme des calcaires crétacés (Maestrichtiens et Campaniens) dans le secteur d'étude varie entre 80 et 650 Ohm.m. Les calcaires dont la résistivité dépasse 400 Ohm.ms ont très compacts, aucun forage n'a été fait dans ces formations.

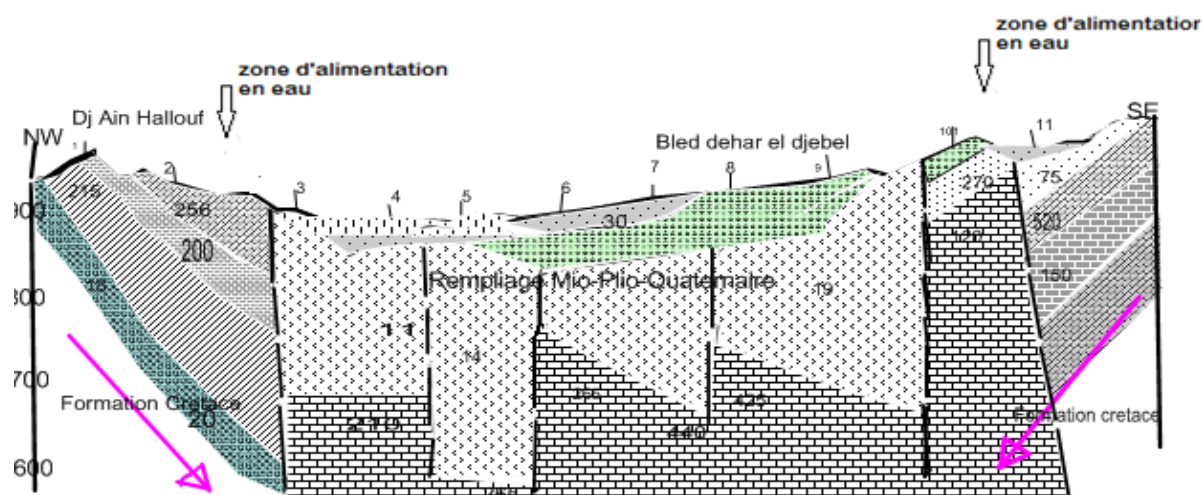


Figure IV.20 : Coupe géo-électrique n° 4

IV.5.5.2. Carte des isohypses du substratum résistant

L'analyse des coupes géo-électriques montré sur la figure IV.21 a permis l'élaboration de la carte des isohypses du substratum résistant, déduite à partir des épaisseurs interprétées des formations sus-jacentes, les formations Mio-Plio-Quaternaire. L'interprétation de cette carte fait ressortir les zones suivantes, selon l'altitude du substratum résistant:

- Zone 1 : cette zone se localise à l'Ouest du Bordj M'Raou, avec une altitude allant de 200 à 100 m montrant la dépression de la partie Ouest du synclinal;
- Zone 2 : l'altitude varie entre 100 et 1000 m elle se localise au centre de notre secteur d'étude;
- Zone 3 : l'altitude du substratum varie entre 100 et 700 m formant le contour du synclinal;
- Zone 4 : d'une altitude entre 700 et 900 m, le substratum affleure sur les flancs Nord et Sud et également à l'Est du synclinal.

En conclusion la fermeture du synclinal, montre une structure concentrique avec les indications nette de la tectonique radiale. La profondeur extrême du toit est de 300 m par rapport à la surface du sol. Au centre, les formations du toit du substratum plongent en profondeur, sous une épaisse couche du remplissage Mio-Plio-Quaternaire de 700 m. Sur les flancs Nord-sud, le toit du substratum, remonte vers la surface d'une profondeur de 200 à 300 m.

La carte de la résistivité du substratum a été établie à partir des mesures des sondages électriques exécutées sur le synclinal de Taoura. Selon les valeurs de résistivité, nous pouvant distinguer que la nature lithologique du substratum peut varier d'un endroit à l'autre.

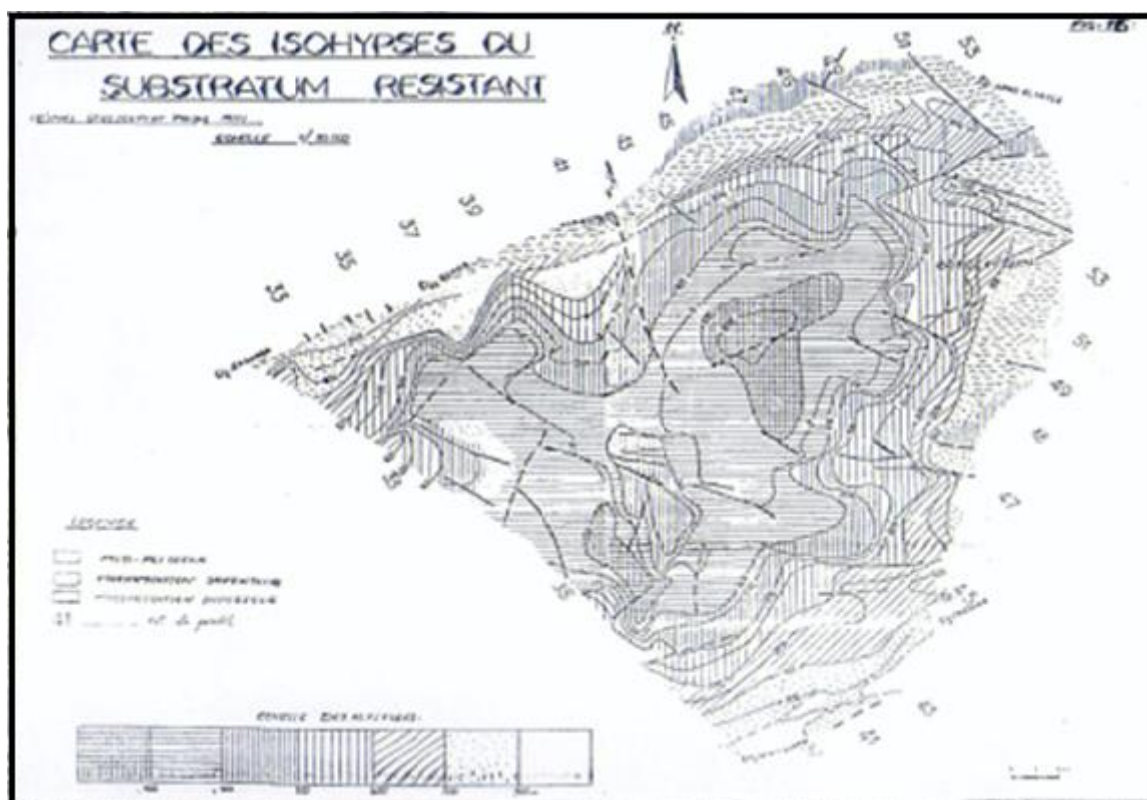


Figure IV.21 : Carte des isohypses du substratum résistant

L'étude géophysique entreprise dans la région de Taoura a permis :

- La détermination du système structural du synclinal et qui est orienté NE-SW;
- La séparation sur le synclinal de Taoura- Bordj-M'Raou des zones favorables et défavorables du point de vue hydrogéologiques;
- Le synclinal est caractérisé par sa géométrie interne complexe, due aux systèmes de failles, ce qui a donné la naissance des horsts et des grabens, vue la tectonique de compression et de décompression;
- L'analyse des coupes géo-électriques a permis de déterminer un système de la superposition de deux nappes libre et captive.

IV.6. Paramètres hydrodynamiques des aquifères

Les travaux hydrogéologiques consacrés au bassin de Taoura sont peu nombreux.

Comme nous disposons de peu de travaux, nous avons associé aux travaux de [Ferraga ..1986](#)) nos observations de terrain.

Les essais de pompages réalisés sur les forages D3 et D4 captant l'aquifère Maestrichtien, ont été interprétés par la méthode de Theis.

IV.6.1. Essais de pompages du forage D4

Les essais de pompages ont été réalisés par les services de l'hydraulique, entre le 18 Avril 1982 et le 23 Avril 1982.

L'interprétation que nous avons reproduite est faite par A. Ferraga, 1986.

- Caractéristiques des pompages d'essai

Essai de longue durée

- Durée de pompage : 70 h ; débit d'exhaure : 112 l/s ; pas de piézomètre ;
rabattement final : 0.72m ; niveau statique à : - 55.70m sous le sol.

Essai par paliers

- Durée de pompage : 39 h ; débit d'exhaure variable entre : 60l/s et 112 l/s ; pas
de piézomètre ; rabattement final : 0.72m.

IV.6.1.1. Interprétation

Le rabattement faible évolue comme $\log t$ (Figure IV.32). Les valeurs à introduire dans les formules de l'approximation logarithmique sont :

$c = 0.02$; $Q = 112\text{l/s}$

On obtient : $T = 1.02\text{m}^2/\text{s}$

La transmissivité T élevée, caractérise ces calcaires très karstifiés.

Les quatre paliers obtenus donnent en fin de pompage, les valeurs suivantes (Tableau IV.5).

Tableau IV.5 : Caractéristiques du pompage d'essai au forage D4.

Paliers	Durée (s)	Débit (l/s)	Rabattement (m)	Débits spécifiques (l/s/m)
1 ^{er}	$3.60 \cdot 10^4$	60	0.43	139.53
2 ^{ème}	$3.60 \cdot 10^4$	80	0.49	163.27
3 ^{ème}	$3.20 \cdot 10^4$	100	0.62	161.29
4 ^{ème}	$3.20 \cdot 10^4$	112	0.72	155.56

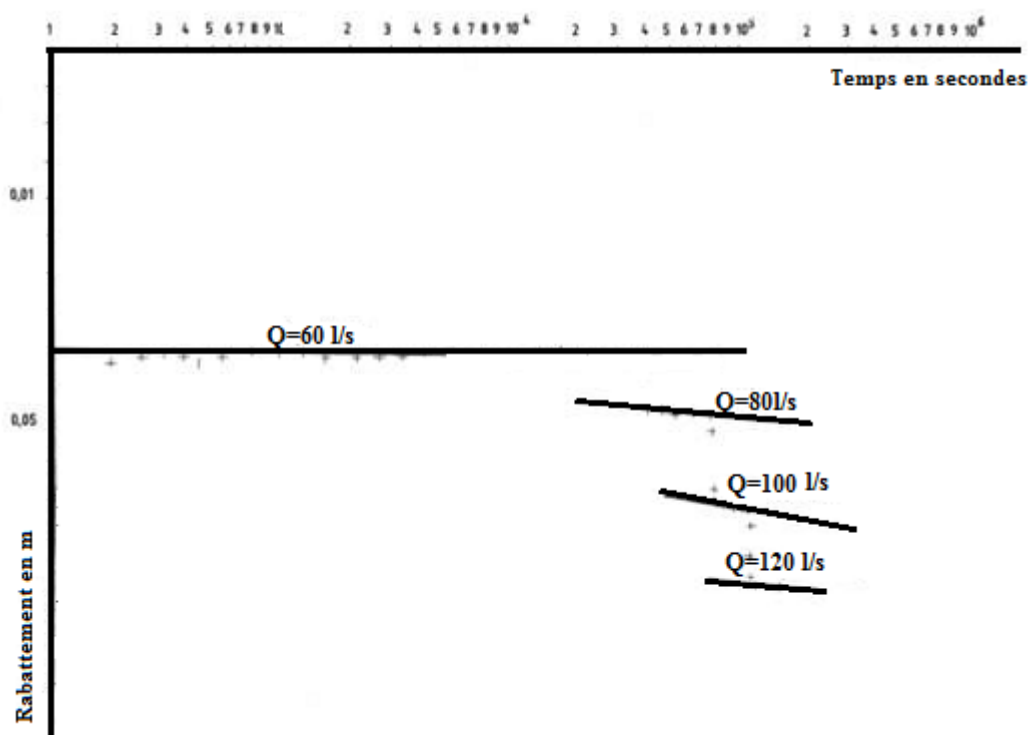


Figure IV.22 : Premier pompage d'essai sur le forage D4.

L'évolution du rabattement du premier palier de débit est faible, semblable à l'essai de longue durée. (Figure IV.22 Essai par palier). Le rabattement total est de 0.43 m pour une durée de 10 heures ; ensuite, l'abaissement est extrêmement faible, de l'ordre de 1cm par heure pour les trois paliers suivants.

La courbe de rabattement, $\log$ de t (temps) (Figure IV.23), tend vers une asymptote d'équation : $s = c \log bt$; avec $c = 0.01$, $Q = 60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; soit, une transmissivité, $T = 1.19 \text{ m}^2/\text{s}$. Cette transmissivité est semblable à la valeur trouvée précédemment.

Après arrêt des pompes la remontée du niveau, pour les deux types de pompage d'essais étudiés lors du rabattement, indique pour chaque forage les transmissivités ci-après :

- Essai de longue durée $T = 0.86 \text{ m}^2/\text{s}$
- Essai par palier $T = 0.98 \text{ m}^2/\text{s}$

Ces deux valeurs confirment les transmissivités trouvées précédemment.

Par ailleurs, l'évolution très lente des rabattements des deux essais permet de penser qu'il y aurait près de l'ouvrage, un système de fissures de très fortes sections, alimenté par la drainante des alluvions quaternaires.

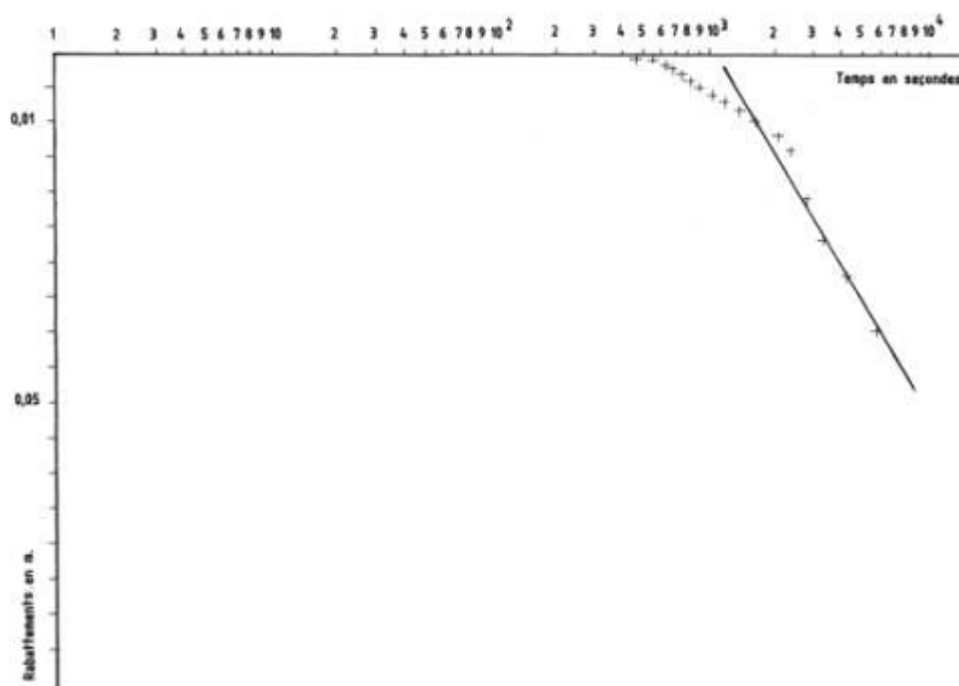


Figure IV.23 : Courbe de remontée du deuxième pompage d'essai par paliers du forage D4.

L'évolution très lente des rabattements des deux essais permet de penser qu'il y aurait près de l'ouvrage, un système de fissures de très fortes sections.

IV.6.2. Essais de pompages du forage D3

Les deux pompages d'essai ont été réalisés par les services de l'hydraulique, entre le 5 Juin 1982 et le 9 Juin 1982. L'interprétation développée dans ce contexte est synthétisée des travaux de (Ferraga, 1986).

IV.6.2.1. Caractéristiques des pompages d'essai

Essai de longue durée

- Durée de pompage : 72 h ; débit d'exhaure : 80 l/s ; pas de piézomètre ;

Rabattement final : 29m ; niveau statique : -18m sous le sol

Pompage d'essai par paliers
- Durée de pompage : 24 h ; débit d'exhaure variable entre : 40l/s et 60 l/s ; pas de piézomètre ; rabattement maximum sur le puits : 29.95 m ; niveau statique : -18 m sous le sol.

IV.6.2.1.1 Interprétation des résultats

L'irrégularité de la courbe de rabattement (Figure IV.24) est difficilement interprétable, sans piézomètre.

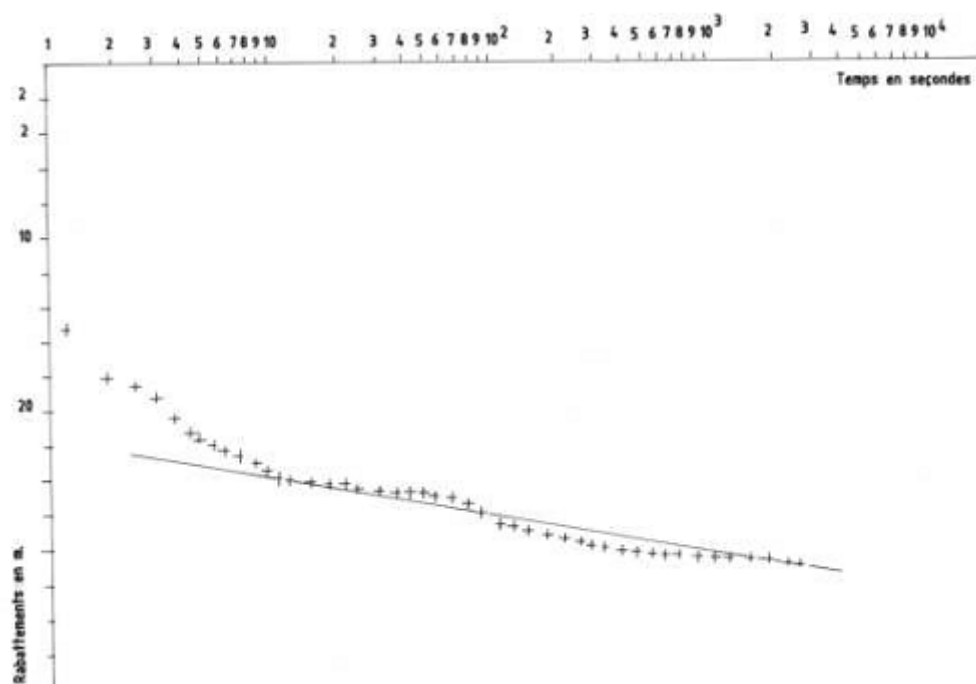


Figure IV.24 : Premier pompage d'essai sur le forage D3.

La courbe de remontée (Figure IV.25) peut permettre de tracer une droite qui fournirait une valeur de $T = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

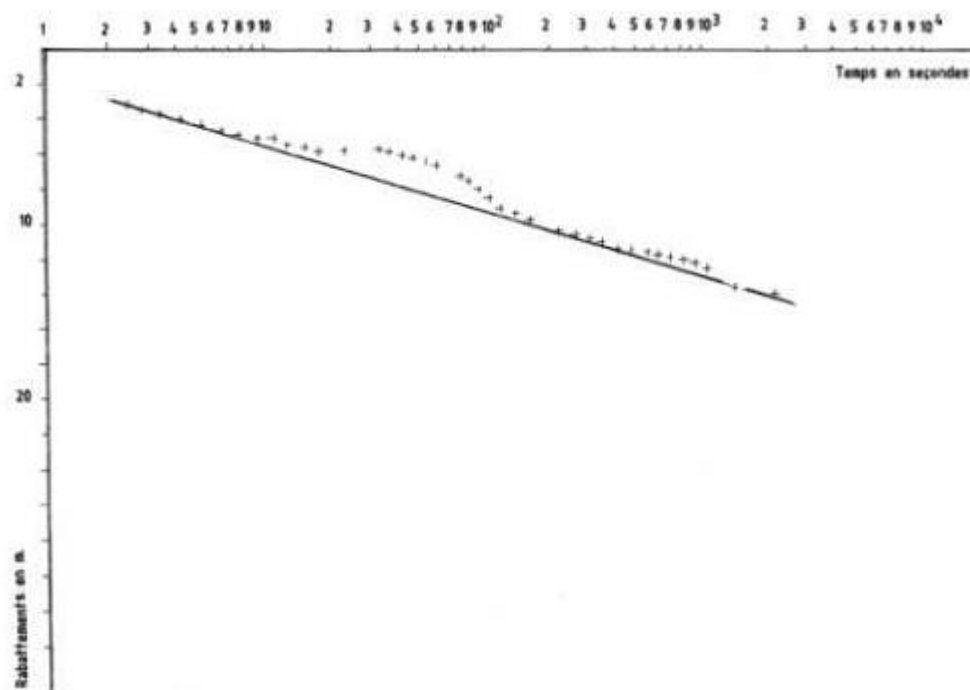


Figure IV.25 : Courbe de remontée du premier pompage d'essai sur le forage D3.

Les deux paliers donnent en fin de pompage les valeurs suivantes :

Tableau IV.6 : Caractéristiques du pompage d'essai au forage D3.

Débit (l/s)	Rabatement (m)	Débts spécifiques (l/s/m)
40	19.88	2.06
60	28.95	2.76

La courbe de rabattement, Log T (Figure) montre bien que les points expérimentaux s'alignent sur deux droites dont les pentes sont égales :

$c = 1.3$, pour la droite de débit $Q = 40 \text{ l/s}$; et $c = 3$, pour la droite de débit $Q = 60 \text{ l/s}$.

D'où les transmissivités suivantes :

Premier palier : $T = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; et deuxième palier : $T = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Ces valeurs de la transmissivité sont donc très semblables.

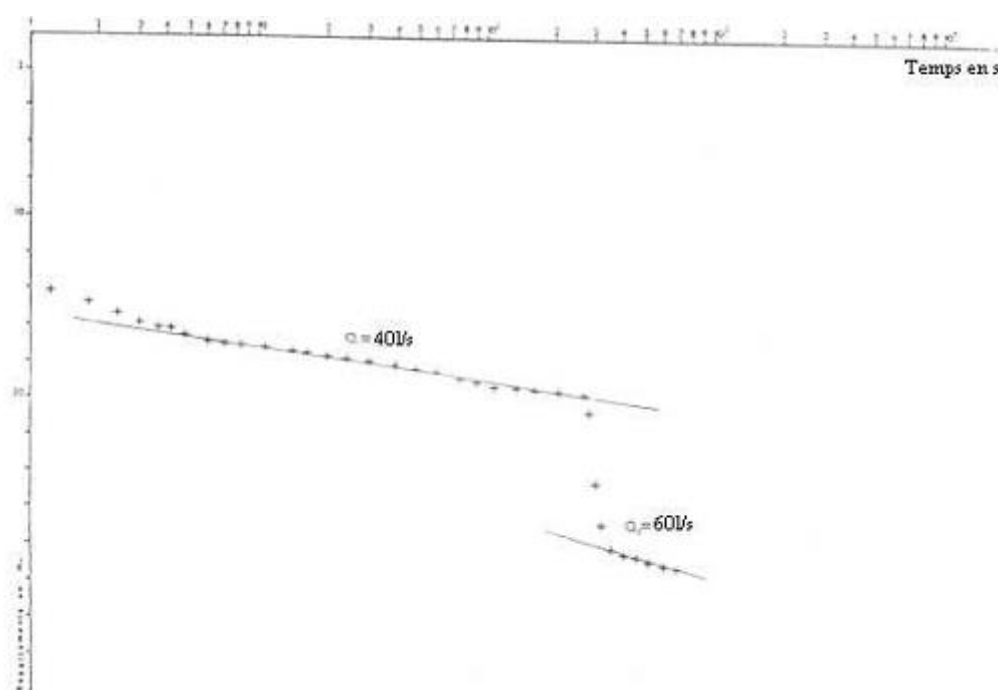


Figure IV.26 : Deuxième pompage d'essai par palier su le forage D3.

IV.6.3. Détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères du Sénonien

- Essais de pompages du forage D4

L'essai par pompages a été réalisé par les services de l'hydraulique, entre le 18 Avril 1982 et le 23 Avril 1982.

- la transmissivité $T = 1.02 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur caractérise un Karst.

Essais de pompages du forage D3 :

- la transmissivité obtenue est de l'ordre de valeur de $T = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Les coupes litho-stratigraphiques et hydrogéologiques, ont révélé l'existence de plusieurs niveaux réservoirs (cinq à sept) plus ou moins communicants pour chaque bassin hydrogéologique. Dans certains systèmes aquifères, le remplissage Mio-Plio-Quaternaire et carbonatés crétacés sont les aquifères les plus sollicités et représentent les principaux aquifères. L'augmentation continue du nombre de puits de surface entraînant une surexploitation et donc une baisse continue de la piézométrie pour certaines nappes (synclinal de Taoura et Bir Louhichi). Les autres nappes sont soit en équilibre, soit légèrement exploitées (Ouled Moumen et Ain Zana).

L'évolution très lente des rabattements des deux essais et la transmissivité très élevée, conduit vertical de la zone noyée discontinue dans la zone d'infiltration.

IV.7. Evolution l'exploitation par domaine d'utilisation

On remarque que le nombre le plus important des forages est utilisé dans le domaine d'alimentation en eau potable. Prenons par exemple l'année 2013, plus de 82 % des forages sont utilisés dans le domaine d'eau potable avec une exploitation voisine de 80 % du volume total pompé.

L'irrigation vient en deuxième lieu avec 17 % d'exploitation à travers 6 forages. Le domaine industriel, dans la région est très peu développé et ne dépasse pas le 1% d'exploitation à travers un forages (Figure IV.27).

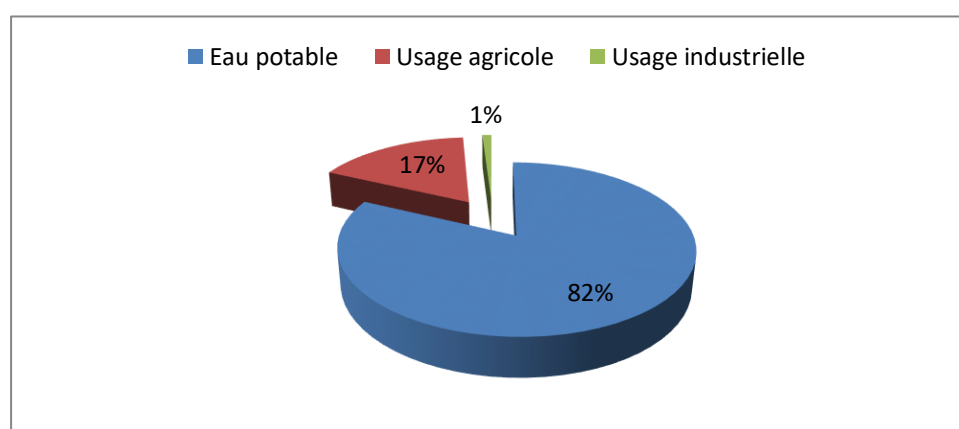


Figure IV.27 : L'exploitation des nappes profondes selon les domaines d'utilisation (Année 2013)

Gestion des eaux

2^{ème} Partie

IV.8. Gestion des eaux

IV.8.1. Etats actuels de la ressource en eau dans la région

La disponibilité de l'eau potable en permanence dans les régions rurales, est un facteur de stabilité des populations et un moyen de lutte contre l'exode rural et l'encombrement des centres urbains.

Au niveau de la région étudiée et malgré les nombreuses ressources, la population reste mal desservie. Nous avons également remarqué que les communes les mieux dotées en alimentation en eau potable sont celles alimentées à partir des ressources karstiques, tel que le groupement urbain et les différentes mechtas de Taoura, Merahna, Zarouria, Drea, Ouillen, Sidi Fredj et environ 20% de la population de chef lieu de Souk- Ahras.

Les eaux de la nappe karstique sont également utilisées par le secteur industriel et agricole.

L'exploitation intensive des aquifères karstiques dans le synclinale de Taoura depuis une vingtaine d'années, a provoqué une baisse considérable des niveaux piézométriques. Ce qui pose un problème de disponibilité d'eau dans l'avenir. Cette surexploitation peut entraîner l'apparition d'effondrement des zones karstiques sous l'effet de rupture de voûte.

Dans la partie suivante, nous donnons un aperçu sur les raccordements réalisés dans le cadre de l'AEP. Environ 32 forages ont été réalisés pour l'alimentation en eau potable des populations de cette région. Les quantités d'eau produites, estimées en 2016 à 17000 m³ /j à la nappe de Taoura, 6000 m³ /j à la nappe Bir Louhichi et 1000 m³ /j à la nappe de Ain Zana et Ouled Driss sont destinées à la population, 100 m³ /j seulement est réservée à l'industrie.

IV.8.2 Provenance des eaux

La figure IV.28 montre que les Neuf (09) forages qui seront raccordés à la station de pompage du synclinal de Taoura sont les suivants : T1, T1Bis, T4 Bis, D'4, T7, T8 et T20 (DRE, 2013).

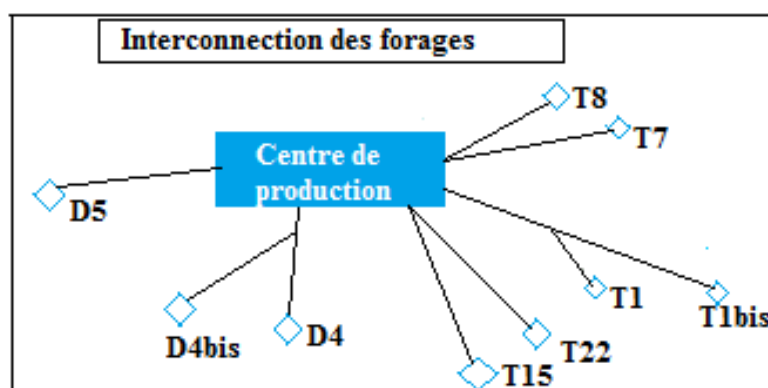


Figure IV.28 : Interconnexion des forages dans la nappe de Taoura

Les forages T1, T1Bis, T4Bis, T7, T8 et T20 sont localisés dans la limite du champ captant de Taoura, le forage D4 se trouve dans la limite du champ captant de Dréa.

Les forages T1, T1Bis, T4Bis, D'4, T7 et T8 sont en marche.

Les villes et les agglomérations qui seront alimentées à partir de la station de pompage sont les suivantes :

- ✓ Souk- Ahras ;
- ✓ Zarouria ;
- ✓ Taoura ;
- ✓ Merahna ;
- ✓ Sebti Boumaref ;
- ✓ Seria ;
- ✓ Djehifa ;
- ✓ Tamatmat ;
- ✓ Ouilen

La région de Taoura caractérisée par des ressources en eau très abondantes. Les caractéristiques de ces ressources varient d'une zone à une autre. Elles dépendent essentiellement des conditions climatiques, géologiques et hydrogéologiques ([Rouaibia .F., 2014](#)).

L'installation d'une station de pompage des eaux souterraines dans la commune de Taoura, s'inscrit dans le programme de l'état à l'appui de la gestion durable des eaux souterraines. Ce projet a été financé par la direction des ressources en eaux, avec une production de débit d'eau d'environ 13000 m³/j, en raison de 24h de marche par jour (Figure IV.29). Cette eau de très bonne qualité donnant la satisfaction de la population bénéficiaire de cette ressource vitale.

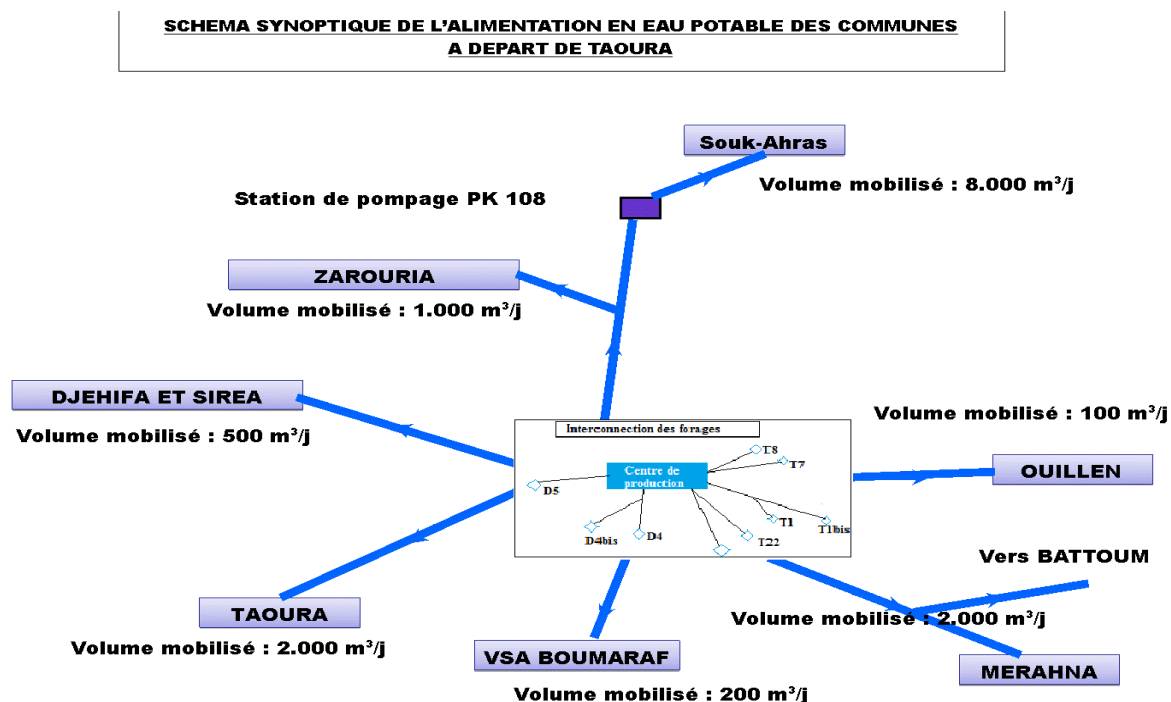


Figure IV.29 : Schéma synoptique des transferts d'eaux à partir de la station de pompage Boumaaraf.

La consommation domestique en eau potable des villes de Souk Ahras, Taoura, et Merahna a connu au cours de la dernière décennie des variations saisonnières et annuelles importantes. Ces variations se traduisent par l'évolution croissante du nombre de consommateurs et l'augmentation des besoins en eau des populations (Figure IV.29).



Photo IV.6 : Station de pompage Boumaaraf et ses équipements

IV.8.2.1 Collecte des forages vers la station de pompage

La figure IV.29 montre que le débit total des forages est de 262 l/s à l'heure actuelle et d'après l'information de la D.R.E de Souk Ahras il existe la possibilité d'augmenter le débit total du champ captant jusqu'au 280 l/s.

L'examen de la situation de l'exploitation des nappes souterraines de la partie aval de Medjerda entre 1990 et 2016 montre deux périodes d'évolution:

La première, entre 1990 et 2000, marquée par un faible nombre de forage ne dépassant pas 2 forages, 6 puits et 9 sources.

La deuxième, entre 2000 et 2016, est marquée par une augmentation intensive des nombres de source d'alimentation en eau potable et du volume d'eau exploité durant les 15 ans. En effet, le nombre de forages dépasse 57 forages, 93 puits domestiques et 38 sources et l'exploitation a passé de 2 Mm³ en 1990 à 15 Mm³ (DRE.,2016).

Ce pendant on peut classer ces nappes en trois familles selon le nombre de sources hydriques et le degré d'exploitation de ces réserves.

IV.8.3. Les nappes surexploitées

- Ce sont les nappes de Taoura (Maestrichtien, Campanien et Turonien)
- La majorité des forages sont équipés et exploités
- L'exploitation très importante parfois dépasse les ressources exploitables.
- résulte une baisse continue de la piézométrie
- risque d'amener à une détérioration de la qualité des eaux par augmentation du taux de minéralisation.
- la nappe de Taoura est gérée par l'Algérienne des Eaux (ADE)

IV.8.3.1 Commune de Souk-Ahras

La population de la ville de Souk-Ahras est estimée 174068 Hab, la consommation domestique moyenne, varie entre 120 et 160 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont soit refoulés vers les réservoirs de stockage (capacité de stockage de 37700 m³) soit injectés directement dans les différents réseaux de distribution. La plus grande partie des quantités d'eau produites, estimées en 2016 à 50000 m³ /j avec différentes sources d'alimentation (Figure IV.30) et 4h/j plage horaire de distribution et 20h de pompage. Les besoins de la ville de Souk Ahras sont estimés à 26400 m³.

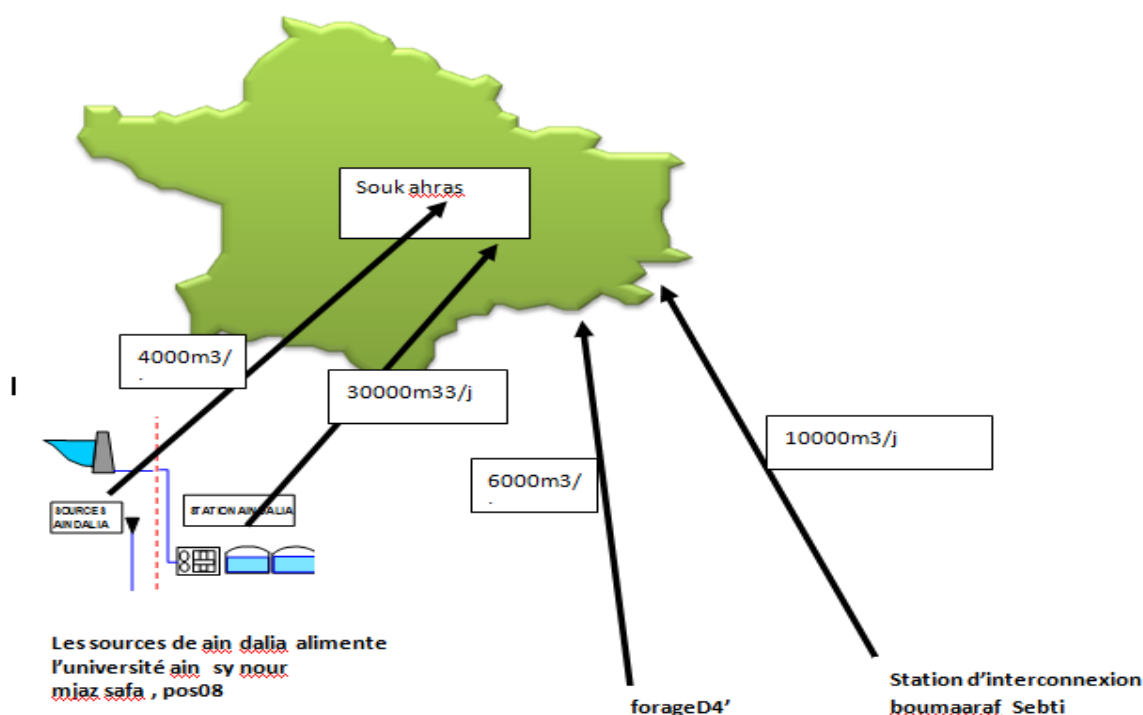


Figure IV.30 : Schéma d'alimentation en eau potable de la ville de Souk Ahras

Tableau IV.7 : L'alimentation en eau potable de la ville de Souk Ahras

Ouvrage de stockage	Source d'alimentation	Nombre d'heures de pompage	Production m ³ /j
24 réservoir de capacité de 42 700,00 m ³	Forages de TAOURA		6000m ³ /j
	Station d'interconnexion boumaaraf Sebti	20h	10000m ³ /j
	Les sources deAin dalia		4000m ³ /j
	Barrage de Ain dalia		30000m ³ /j
			Soit un total de 14000m ³ /j

IV.8.3.2 Commune de Merahna

La population de la commune de Merahna est estimée 18137 hab, la consommation domestique moyenne, varie entre 60 et 100 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont 1400 m³ /j à partir de la station de pompage Boummaraf (Figure IV.31) et 4h/j avec plage horaire de distribution et 8h de pompage. Avec une capacité de stockage de 2400 m³. Les besoins de la commune de Merahna sont estimés à 1200 m³.



Figure IV.31 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Merahna

Tableau IV.8 : L'alimentation en eau potable de la ville de Merahna

Ouvrage de stockage chef lieu	Source d'alimentation	Nombre d'heures de pompage	Nombre d'abonnés	Organisme gestionnaire	Production m ³ /j
2400	Station De Pompage De Taoura 1800m ³ /j Dont 200m ³ affecte au chef lieu de sidi fradj	08heures	2561	ADE	1600m ³

IV.8.3.3 Commune d'Ouillen

La population de la commune d'Ouillen est estimée 751.00 hab, la consommation domestique moyenne, varie entre 70 et 120 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont 288 m³ /j à partir de station de la pompe Boummaraf (Figure IV.32) et 4h/j avec plage horaire de distribution et 6h de pompage. Avec une capacité de stockage de 780 m³. Les besoins de la commune d'Ouillen sont estimés à 200 m³.

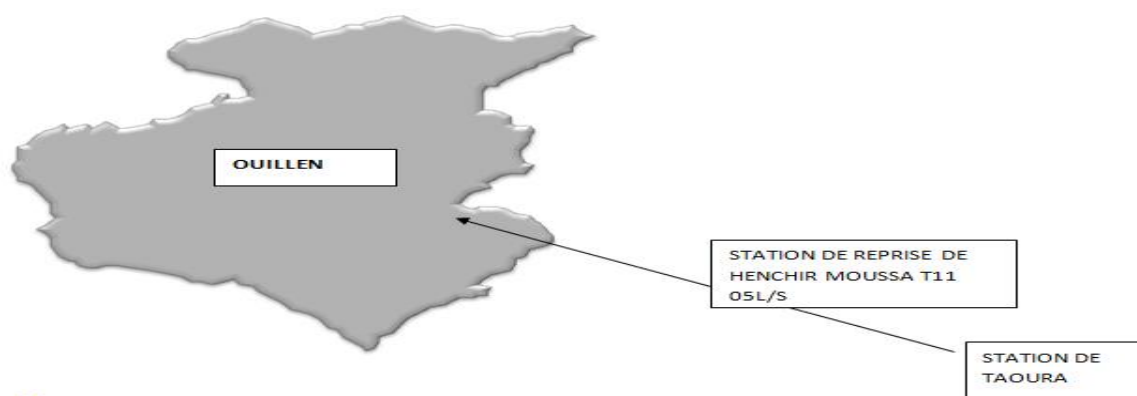


Figure IV.32 : Schéma d'alimentation en eau potable de la ville d'Ouillen

Tableau IV.9 : Source d'alimentation en eau potable commune d'Ouillen

Ouvrage de stockage chef lieu	Source d'alimentation	Nombre d'heures de pompage	Nombre d'abonnés	Organisme gestionnaire	Production m ³ /j
500M ³ Dont 50m ³ est affecté aux mechtas bouzaroura et cordina	station de pompage de taoura 20l/s au niveau de la station de reprise de henchir moussa 10l/s	08heures	290	ADE	288m ³

IV.8.3.4. Commune de Taoura

La population de la commune de Taoura est estimée 180000 habitant la consommation domestique moyenne, varie entre 100 et 180 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont 1872 m³ /j à partir de la station de pompage Boummaraf (Figure IV.33) et 8h/j avec plage horaire de distribution et 20h de pompage. Avec une capacité de stockage 3920 m³. Les besoins de la commune de Taoura sont estimés à 660 m³.



Figure IV.33 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Taoura

Tableau IV.10 : Source d'alimentation d'un ouvrage de Taoura

Ouvrage de stockage chef lieu	Source d'alimentation	Nombre d'abonnés	Organisme gestionnaire	Nombre d'heures de pompage	Production m ³ /j
2300 m ³	Station Interconnexions 40 l/s	1900	ADE	Au quotidien 13h	1872 m ³

IV.8.3.5. Commune Zaarouria :

La population de la commune de Zaarouria est estimée à 5294 habitants, la consommation domestique moyenne, varie entre 70 et 130 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont 330 m³ /j à partir de la station de pompage Boummaraf (forage D4) (Figure IV.34) et 3h/j Plage horaire de distribution et 6h de pompage. Avec capacité de stockage 1500 m³. Les besoins de la commune de Zaarouria sont estimés à 220 m³.



Figure IV.34 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Zaarouria

Tableau IV.10 : source d'alimentation en eau potable de la commune de Zaarouria

Ouvrage de stockage chef lieu	Source d'alimentation	Nombre d'abonnés	Organisme gestionnaire	Nombre d'heures de pompage	Production m ³ /j
1500 m ³	FORAGE D4'	1050	ADE	quotidien	330 m ³

IV.8.3.6 Commune de Sidi Fredj

La population de la commune de Sidi Fredj est estimée à 7580 hab, la consommation domestique moyenne, varie entre 40 et 120 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont soit refoulés vers les réservoirs de stockage, (capacité de stockage de 1890 m³) soit injectés directement dans les différents réseaux de distribution estimées en 2016 à 280 m³ /j avec différentes sources d'alimentation (Figure IV.35) et 4h/j, plage horaire de distribution et 10h de pompage. Les besoins de la commune de Sidi Fredj sont estimés à 680 m³

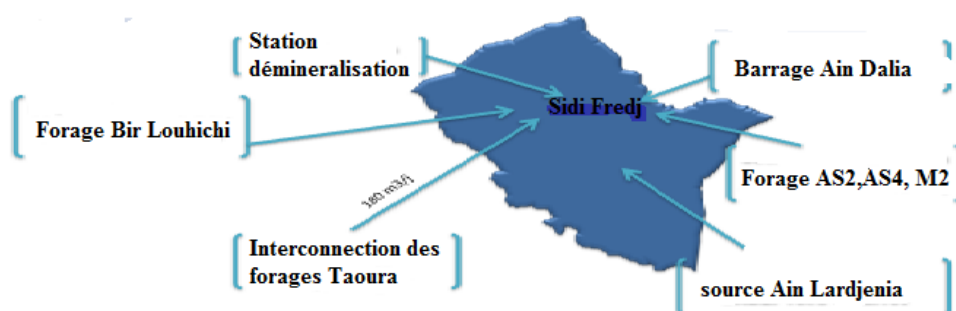


Figure IV.35 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Sidi Fredj

IV.9.4. Les nappes moyennement exploitées

Ce sont les nappes de Heddada-Merahna. Ces nappes sont exploitées dans des zones très sollicitées. Cependant elles peuvent être le siège d'une éventuelle surexploitation prochainement en absence des moyens de contrôle.

La région de Heddada (Bir Louhichi) caractérisée par des ressources en eau peu abondantes. Elles dépendent essentiellement des conditions climatiques, géologiques et hydrogéologiques.

L'installation d'une stations de pompage des eaux souterraines dans la zone de Bir Louhichi, s'inscrit dans le programme de l'état à l'appui de la gestion durable des eaux souterraines . Ce projet a été financé par la direction des ressources en eaux (Projet en cour réalisation 2017). Production de débit d'eau d'environ 6000 m³/j, en raison de 24h de marche par jour. Les quatre (04) forages qui seront raccordés à la station de pompage de Bir Louhichi projetée sont les suivants : M12, M1Bis, T2 Bis et M11.Avec un debit de 78 m³/s.

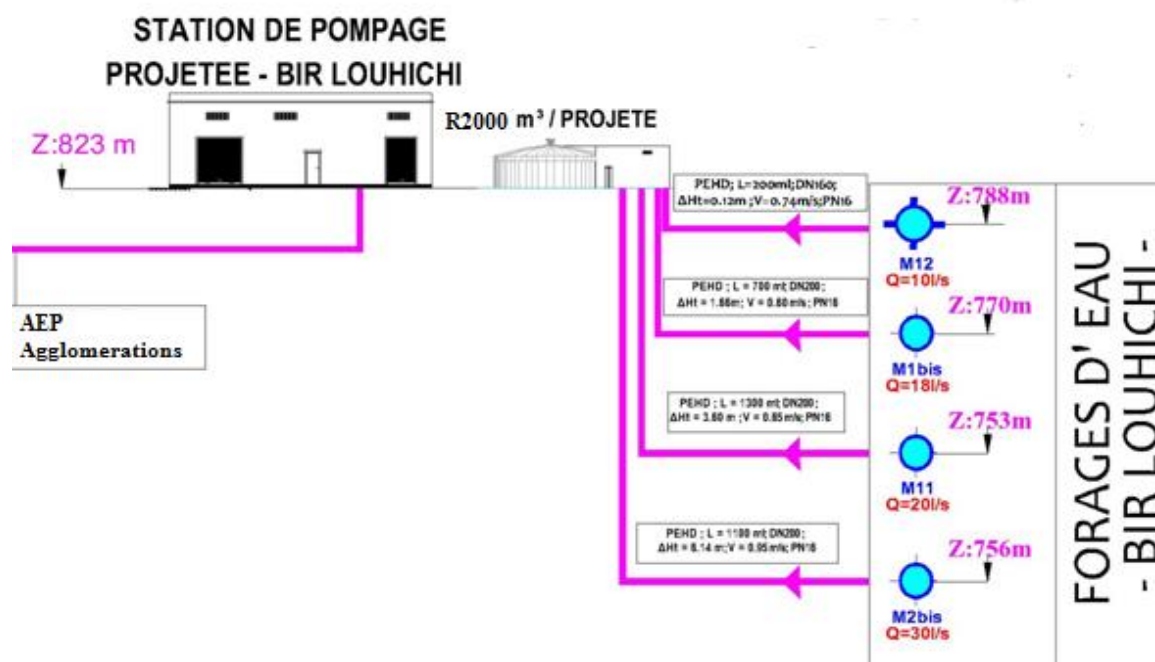


Figure IV.36 : Interconnexion des forages dans la nappe de Bir Louhichi

IV.8.4.1 Commune de Heddada

La population de la commune de Heddada est estimée à 8700 habitant, la consommation domestique moyenne, varie entre 120 et 200 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont 950 m³ /j à partir du forage et source Boussebt avec 6h/j, plage horaire de distribution et 10h de pompage. Avec une capacité de stockage de 2600 m³. Les besoins de la commune de Heddada sont estimés à 80 m³.

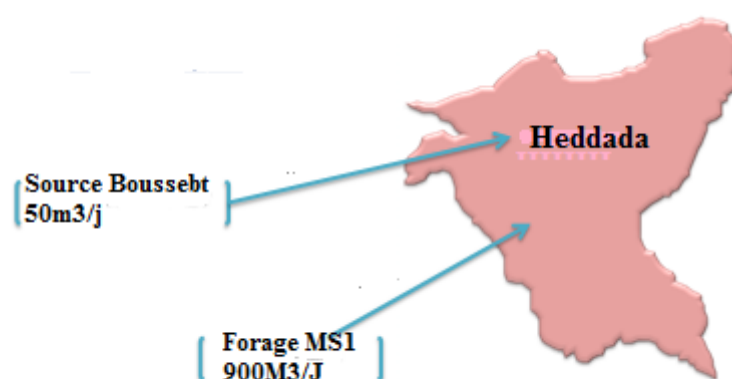


Figure IV.37 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Heddada

IV.8.4.2 Commune de Khedara

La population de la commune de Khedara est estimée à 8300 habitant, la consommation domestique moyenne, varie entre 90 et 110 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont $450 \text{ m}^3 / \text{j}$ à partir du forage MS2 avec 4h/j, plage horaire de distribution et 10h de pompage. Avec une capacité de stockage de 450 m^3 . Les besoins de la commune de Khedara sont estimés à 500 m^3 .

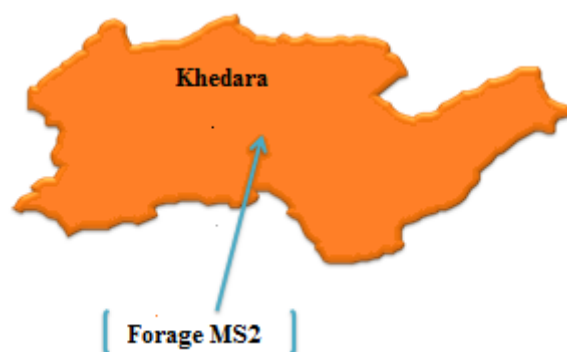


Figure IV.38 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune de Khedara

IV.8.4.3. Commune d'Ouled Moumen

La population de la commune d'Ouled Moumen est estimée à 3500 habitant, la consommation domestique moyenne, varie entre 90 et 160 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont $550 \text{ m}^3 / \text{j}$ à partir du forage Hok₂, Forage El Hemissi et source Mougras avec 4h/j plage horaire de distribution et 10h de pompage. Avec capacité de stockage

1000 m³. Les besoins de la commune d'Ouled Moumen sont estimés à 100 m³.

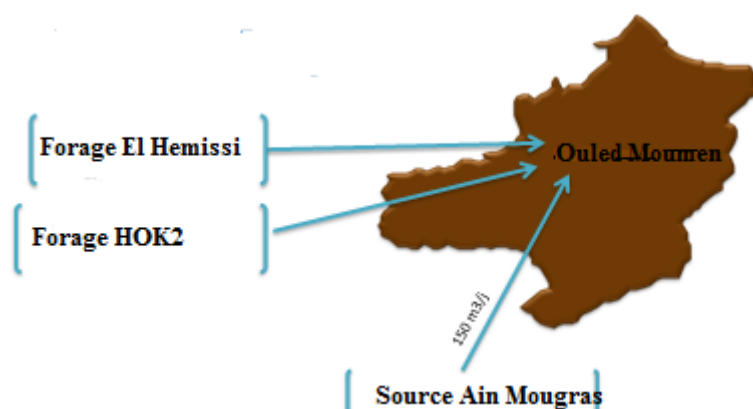


Figure IV.39 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune d'Ouled Moumen

IV.8.5. Les nappes faiblement exploitées

Ce sont les nappes d'Ain Zana et d'Ouled Driss. Ces nappes de faible débit sont exploitées par un nombre limité des puits équipés ce qui entraîne un taux d'exploitation relativement faible par rapport aux autres nappes.

IV.8.5.1. Commune d'Ouled Driss :

La population de la commune d'Ouled Driss est estimée à 7400 habitant, la consommation domestique moyenne, varie entre 45 et 100 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont 750 m³ /j à partir du forage OLD1, OLD5 et source Ain Souda avec 3h/j plage horaire de distribution et 10h de pompage. Avec une capacité de stockage de 800 m³. Les besoins de la commune d'Ouled Driss sont estimés à 790 m³.

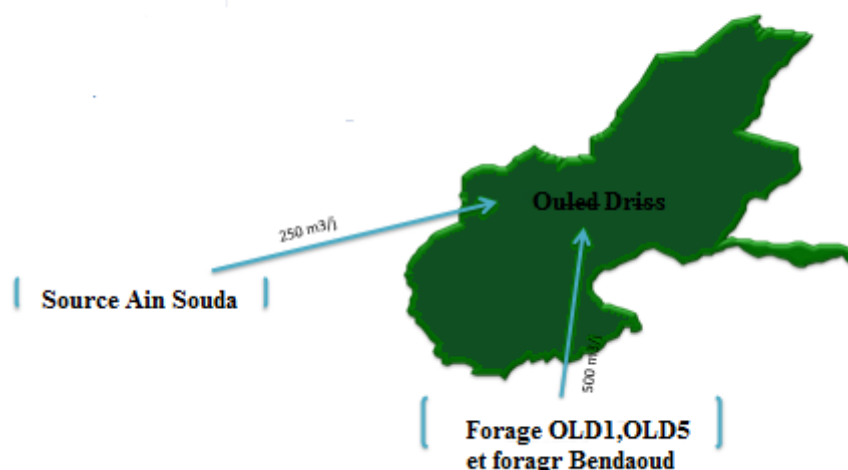


Figure IV.40 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune d'Ouled Driss

IV.8.5.2 Commune d'Ain Zana :

La population de la commune d'Ain Zana est estimée à 6400 habitants, la consommation domestique moyenne, varie entre 30 et 70 l/j/personne. Les volumes d'eau produits sont 350 m³/j à partir du forage AZ1, AZ3 et source EL Boua avec 2h/j plage horaire de distribution et 14h de pompage. Avec une capacité de stockage 500 m³. Les besoins de la commune d'Ain Zana sont estimés à 920 m³.

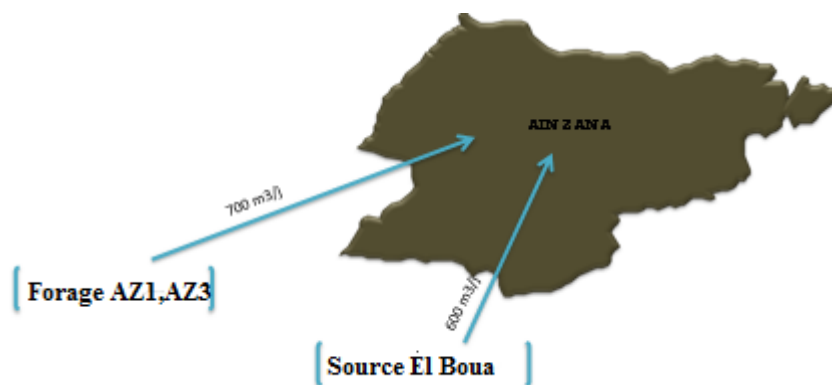


Figure IV.41 : Schéma d'alimentation en eau potable de la commune d'Ain Zana

IV.9 Conclusion

La région d'étude caractérisée par des ressources en eau peu abondantes. Les caractéristiques de ces ressources varient d'une zone à une autre. Elles dépendent essentiellement des conditions climatiques, géologiques et hydrogéologiques.

L'installation de deux stations de pompage des eaux souterraines dans les deux communes Taoura (réalisée en 2013) et Heddada (réalisée en 2017), s'inscrit dans le programme de l'état à l'appui de la gestion durable des eaux souterraines. Ces projets ont été financés par la direction des ressources en eaux.

Dans la première, la production de débit d'eau d'environ 13000 m³/j, en raison de 24h de marche par jour, cette eau de très bonne qualité donnant la satisfaction de la population bénéficiaire de cette ressource vitale. Cependant, si on considère une consommation croissante en 2020 et 2050, la situation pourrait s'aggraver davantage et le rabattement du niveau piézométrique de la nappe serait encore plus évident. Pour cela, on recommande d'ajouter d'avantages des ouvrages d'alimentation artificielle et d'aménager le bassin versant de Medjerda par des ouvrages de conservation des eaux et des sols pour augmenter la recharge de la nappe, compenser l'exploitation anarchique et réduire le déficit pluviométrique dans la région.

Chapitre V : Hydrochimie

V. Introduction

En Algérie, les ressources en eau souterraines dépendent des précipitations et de la nature du sol qu'elles traversent. Au cours des dernières années, nous avons remarqué une baisse des taux de précipitations due aux méfaits des changements climatiques. Cette faiblesse des pluies s'accompagne d'un accroissement de la demande en eau provoquant un déséquilibre de plus en plus important entre l'offre et la demande, ceci s'est traduit par une surexploitation des nappes et des ouvrages de captages allant jusqu'à l'assèchement de quelques barrages.

Au niveau de la région de Taoura, l'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable de la population de la région aval du bassin de la Medjerda. Cependant, le manque de suivi de l'évolution de la qualité de cette eau et la méconnaissance des caractéristiques hydrochimiques est à noter.

Pour suivre l'évolution spatiotemporelle de la qualité chimique des eaux de la partie aval d'Oued Medjerda, nous nous sommes basés sur les résultats des données d'analyses chimiques issus de six campagnes d'échantillonnages effectuées en 2011 (Décembre, Avril et Juillet) et la même chose pour l'année 2012.

Objectif : Cette étude propose d'améliorer les connaissances sur ces ressources en eaux les plus exploitées et déterminer l'origine de la minéralisation des eaux souterraines et le mécanisme de recharge de la nappe à partir d'une combinaison des méthodes hydrochimiques.

.

V.1. Matériels utilisés, échantillonnage et conditionnement

Pour réaliser notre travail, nous avons prélevé 108 échantillons d'eau souterraine échelonnée sur six campagnes à raison de 18 prélèvements par campagne, les prélèvements réalisés se rapportent aux mois de Mars, de Juillet et de Décembre pour les années 2011 et 2012, ce qui nous permettra d'établir un comparatif.

Pour pouvoir expliquer les éventuelles variations de la composition chimique des eaux, les prélèvements effectués ont été accompagnés des mesures piézométriques.

Les eaux à analyser sont prélevées dans des flacons en polypropylène (pp) de 500 ml.

Notons que les paramètres physico-chimiques (Température, Conductivité, et pH), ont été mesurés sur site à l'aide d'un appareil multi variable WTW (P3 pH/LF-SET) [19]. Le dosage des cations et des anions a été réalisé au laboratoire selon les processus suivants :

Pour doser les anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), nous avons utilisé la colorimétrie. Le dosage des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) a été réalisé par spectrophotométrie d'absorption atomique. Pour chaque échantillon, nous avons prélevé deux bouteilles, la première acidifiée et va servir au dosage des cations et la seconde non acidifiée pour les anions. Les bouteilles ont été stockées dans un frigo à 4°C avant leur transport au laboratoire d'analyses.

Les analyses chimiques ont été réalisées au Laboratoire de l'algérienne des eaux (A.D.E), et au niveau du laboratoire d'analyse du sol et des eaux (AGROSOL).

L'objectif de l'échantillonnage porte sur les caractéristiques des paramètres physico-chimiques des eaux et leur variation spatio-temporelle ainsi que la détermination des facies chimiques des eaux par différents diagrammes et déterminer l'influence des contextes hydrogéologiques et géologiques sur la géochimie des eaux souterraines.

V.2. Caractérisation physico-chimique des eaux

Cette partie sera consacrée à la détermination des caractéristiques propres aux eaux de la région. Les analyses déterminées donnent un bilan ionique n'excédant pas 10% d'erreur ce qui nous amène à considérer les résultats obtenus. Le tableau suivant, condense les résultats obtenus.

Tableau V.1 : Des paramètres mesurés dans les eaux (meq/l).

	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Unités
pH	108	7	7.9	7.4	0.73	-
T°	108	12	37	18.5	6.42	°C
Cond	108	582	2864	551	587,85	µs/cm
Ca	108	2,55	18,75	5,77	3,501	meq/l
Na	108	2,63	8,08	0,23	1,749	meq/l
K	108	0,005	2,4	0,22	0,254	meq/l
Mg	108	0,04	8,72	2,36	1,458	meq/l
Hco3	108	0,14	19,13	4,6	3,563	meq/l
so4	108	0,31	7,09	2,81	1,519	meq/l
Cl	108	0,17	10,33	2,7	1,687	meq/l
No3	108	0,12	2,07	0,51	0,425	meq/l

▪ **La température de l'eau :** ce paramètre varie entre 12 et 37 °C. Les fortes températures trouvent leur explication dans le fait que la zone recèle des eaux thermales tel que Hammam Tassa. D'une manière générale les températures varient entre 12°C-26°C, oscillant avec les variations saisonnières.

- **Le pH des eaux :** La majorité des échantillons présentent un pH variant entre 7 et 8, le pH des sources et des eaux issues des aquifères vraisemblablement profonds est, par contre, très largement inférieur à 7,4. Cette faible alcalinité des eaux s'explique par l'abondance du CO_2 dissout dans les aquifères.

- **la conductivité :** les mesures réalisées montrent un écart important entre la valeur minimale (583 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et la valeur maximale (2964 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Nous remarquons que les conductivités les plus élevées sont mesurées à la fin des périodes d'étiage par contre les plus faibles sont enregistrées, pendant les périodes de hautes-eaux. Cette situation s'explique en partie par le fait que durant la période pluvieuse on assiste à une dilution se traduisant par une baisse sensible de la minéralisation.

- **Le Calcium (Ca^{2+}) :** on remarque que c'est le cation le plus présent dans l'eau. La concentration moyenne avoisine 5,77 meq/l. L'observation du tableau 1, montre une forte variation entre les concentrations extrêmes ainsi la concentration minimum atteint 2,55 meq/l alors que la maximale oscille autour de 19 meq/l.

Cette tendance serait liée à la nature (géologie) de l'encaissant des points d'eau.

- **Le Magnésium (Mg^{2+}) :** les concentrations en magnésium sont nettement inférieures à celles du calcium elles varient entre 0,04 meq/l (Décembre 2012) et 8,72 meq/l (Décembre 2011). Les teneurs moyennes en magnésium se situent entre 1,7 à 2,5 meq/l.

- **Le Sodium (Na^+) :** les concentrations oscillent entre 0,23 meq/l et 8,08 meq/l. Les fortes concentrations sont liées à la présence des roches gypsifères affleurant au niveau de la région.

- **Le potassium (K^+) :** les teneurs sont faibles, elles n'excèdent pas 2,4 meq/l.

- **Les Sulfates (SO_4^{2-}) :** caractérisent les eaux peu profondes par contre au niveau des forages l'ion sulfate reste faible, sa concentration atteint 0,31 meq/l, enregistrée au niveau des forages T15, T8 au mois de Juillet 2011 en saison d'étiage, elle est bien représentée dans les points de prélèvements, El khengua, Ain trab, Ain lardjenia et Hammam Tassa. Durant la période Juillet-Décembre 2012 les valeurs de SO_4^{2-} dépassent 7,09 meq/l. Dans les sources et les puits localisés dans la partie Nord les teneurs en sulfates ne montrent pas des variations perceptibles entre les deux saisons.

- **Le bicarbonate (HCO_3^-) :** comparativement aux autres éléments, il est le plus présent dans les eaux, la concentration maximale est de 19,22 meq/l par contre la plus faible est de 3,46 meq/l. La présence de cet élément en quantité importante montre la présence d'une interaction entre les eaux et les formations calcaires présentes dans la région.

- **Les chlorures** : Ils sont peu présents dans les eaux de la région. Les concentrations déterminées varient entre 0.17 meq/l et 10.33 meq/l. La présence des chlorures est probablement liée au lessivage des formations triasique présentes dans la région.
- **Les nitrates** : Sont présents partout dans la région d'étude avec des teneurs variant de 2 à 128 meq/l. Les concentrations déterminées montrent que les nitrates ne présentent aucun danger pour l'être humain.

V.3. Etude des processus hydrogéochimiques

Lors de son écoulement dans la nappe, l'eau au contact de la roche peut s'enrichir ou s'appauvrir en éléments chimiques. Cet échange serait à l'origine des variations de la minéralisation. Pour déterminer l'origine de la minéralisation, nous allons développer les parties suivantes :

V.3.1. Classification des eaux

Pour identifier les familles des eaux, nous avons utilisé les représentations les plus usuellement utilisées ainsi nous avons réalisé un traitement de nos données à l'aide du logiciel diagramme, ceci nous a permis d'élaborer deux diagrammes :

- ❖ le diagramme de Piper, dont l'objectif principal est la détermination des familles des eaux,
- ❖ le diagramme de Schoeller-Berkaloff, renseigne sur le faciès chimique de chaque échantillon analysé.

V.3.1.1. Dépouillement des résultats donnés par le logiciel diagramme :

V.3.1.1.a Interprétation du triangle de PIPER

Il s'agit d'un diagramme triangulaire constitué de deux triangles des cations et des anions et un diagramme losangique. Ce dernier représente la répartition synthétique des ions majeurs. En effet, le diagramme de Piper (Figure. V.1) permet de classer les eaux selon les éléments dominants, ainsi dans le cas des eaux de la région, nous avons défini cinq grandes familles :

- ❖ eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes ; (45 échantillons),
- ❖ eaux chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques ; (9 échantillons),
- ❖ eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes ; (46 échantillons),
- ❖ eaux Carbonatées sodiques et potassiques (2 échantillons),
- ❖ eaux hyper chlorurées et hyper sulfatées calcique (6 échantillons).

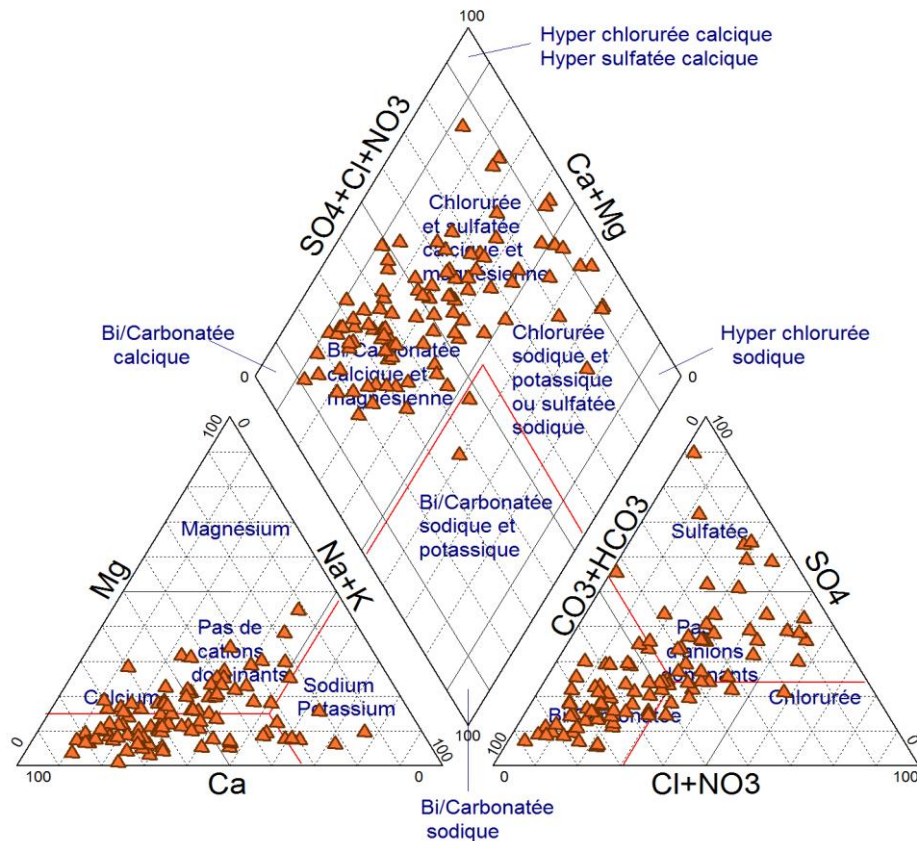


Figure V.1 : Diagramme de Piper globale (campagne 2011,2012).

En observant le diagramme de Piper (Figure V.1), nous remarquons une parité entre la famille des eaux bicarbonatées calciques et ou magnésiennes et la famille des eaux chlorurées calciques et ou sodiques. Cette situation nous amène à dire que les eaux ne proviennent pas du même horizon aquifère. Les eaux bicarbonatées proviendraient de la nappe captive du calcaire Maestrichtiens par contre les sulfatées ou chlorurées sont issues de la nappe libre du Mio-Plio-Quaternaire.

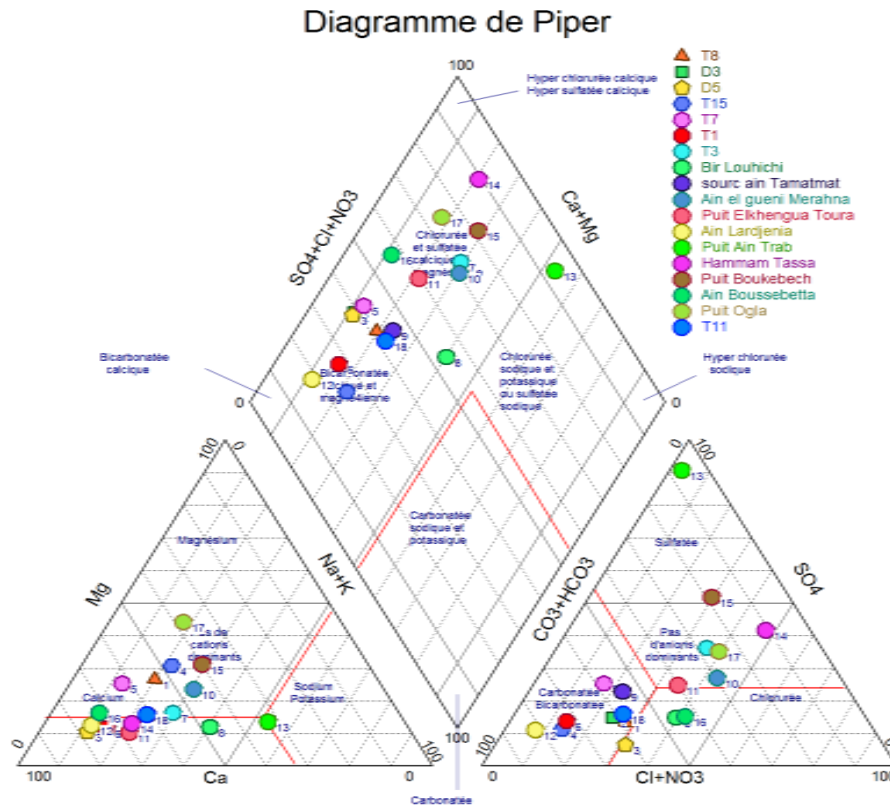
Nous remarquons que la géologie impacte la qualité des eaux et se traduit par les familles déterminées. Pour étayer l'hypothèse de l'impact des formations géologiques sur la qualité des eaux, nous allons étudier les variations de la qualité des eaux selon les périodes d'analyses.

• **Diagramme de Piper Juillet 2011**

Les analyses effectuées portent sur dix huit (18) échantillons. L'observation du diagramme de Piper (Figure V.2), relatif à une période de basses eaux, montre la même répartition des échantillons que pour le diagramme de piper global. On retrouve les trois familles suivantes :

- ❖ famille des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes (8 échantillons),

- ❖ famille des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (9 échantillons),
- ❖ famille des eaux hyper chlorurées et hyper sulfatées calcique (1 échantillon).



• **Diagramme de Piper Décembre 2012.**

On dénombre les familles suivantes :

- ❖ la famille des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (6 échantillons),
- ❖ la famille des eaux chlorurées, sulfatées calciques et magnésiennes (6 échantillons),
- ❖ la famille des eaux sodiques (01 échantillon),,
- ❖ la famille des eaux fortement minéralisées (3 échantillons).

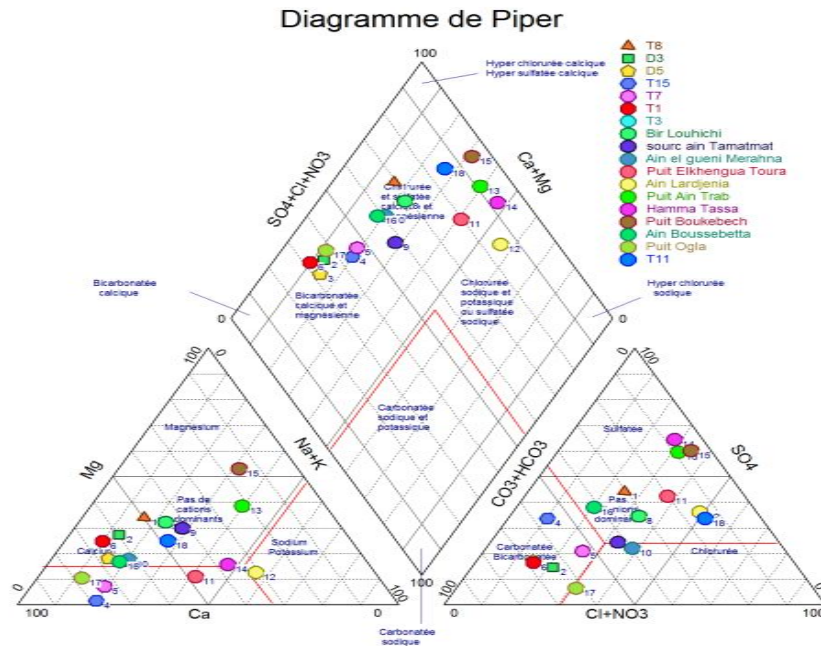


Figure V.3 : Diagramme de Piper Décembre 2012.

L'observation des deux diagrammes montre une légère variation entre les deux périodes d'observation, ainsi on note un accroissement de la minéralisation des eaux, démontré par la présence des eaux sodiques et les eaux chlorurées.

V.3.1.1.b Détermination des faciès chimiques à partir du Diagramme Schöeller – Berkaloff:

Le diagramme de Schoeller- Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Le diagramme (Figure V.4), donne la répartition des faciès chimiques des eaux de la région pour quatorze échantillons (14), le dépouillement de diagramme montre la présence des faciès suivants :

- ❖ bicarbonaté calcique : 6 d'échantillon,
- ❖ bicarbonaté magnésien : 4 d'échantillons,
- ❖ chloruré sodique : 4 d'échantillons.

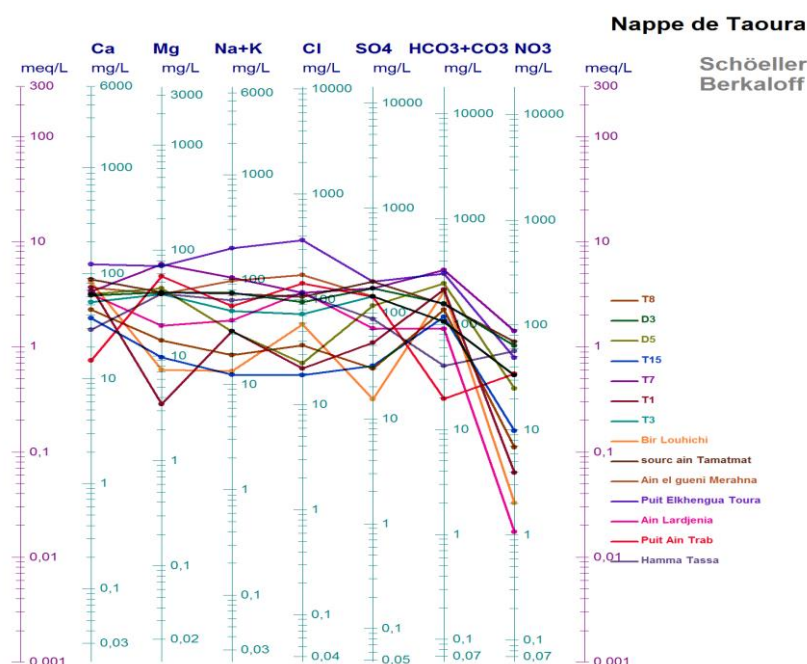


Figure V.4 : Diagramme de Schoeller Berkaloﬀ,.

Pour l'ensemble des périodes d'analyse, nous avons récapitulé les faciès déterminés dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Faciès Chimique

Faciès Chimique Période d'analyse	Mars 2011	Juillet 2011	Décembre 2011	Mars 2012	Juillet 2012	Décembre 2012
Bicarbonaté calcique	06	09	08	06	10	07
Chloruré sodique	05	04	05	04	04	05
Sulfaté calcique	04	04	04	06	03	05
Sulfaté sodique	01	01	00	01	00	01
Chloruré sodique	01	00	01	01	01	00
Bicarbonate sodique	01	00	00	00	00	00

L'observation du précédent tableau montre pour toutes les périodes d'analyse la domination du faciès bicarbonaté calcique, en seconde position viennent les faciès mettant en évidence l'impact des formations salifères. Cette répartition montre que les eaux de la zone d'étude n'ont pas la même origine. Nous allons utiliser d'autres méthodes (ACP, CH, la méthode des rapports, la thermodynamique, ...), pour déterminer les origines des eaux.

V.4. Analyse en composantes principales

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'information contenu dans un tableau de données. Pour réaliser notre travail, nous avons utilisé les éléments chimiques dosés au

laboratoire et mesurés in situ (pH, T°, CE, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, K⁺ et SiO₂). L'ACP, a été réalisé en utilisant le logiciel XLSTAT. Les résultats issus de l'ACP, nous permettront de mieux comprendre les origines de la compétition observée à partir du diagramme de Piper.

V.4.1. ACP globale 2011/2012

V.4.2. La matrice de corrélation

L'ACP, réalisée, comprend, 108 analyses, le coefficient de corrélation acceptable sera de l'ordre de $r = 0.55$, ce qui nous permet de dégager les associations suivantes (tableaux 3 & 4).

Tableau V.3 : Matrice de corrélation Taoura.

	CE	Ca ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
CE	1,00								
Ca ⁺	0,80	1,00							
Na ⁺	0,13	0,14	1,00						
K ⁺	0,05	0,30	0,60	1,00					
Mg ⁺	0,44	0,32	0,62	0,46	1,00				
HCO ₃ ⁻	0,86	0,96	0,28	0,27	0,34	1,00			
SO ₄ ²⁻	0,28	0,27	0,65	0,38	0,85	0,27	1,00		
Cl ⁻	0,11	0,05	0,91	0,45	0,62	0,18	0,59	1,00	
NO ₃ ⁻	0,11	0,17	0,61	0,65	0,68	0,16	0,72	0,52	1,00

Tableau V.4 : Associations entre les éléments chimiques selon la valeur de r.

Couple	Valeur r	Couple	Valeur r	Couple	Valeur r
Conductivité-Ca	0.80	Na-SO4	0.65	Mg-Cl	0.62
Conductivité-HCO3	0.86	Na-Cl	0.91	Mg-NO3	0.68
Ca-HCO3	0.96	Na-NO3	0.65	SO4-Cl	0.59
Na-K	0.60	K-NO3	0.65	SO4-NO3	0.72
Na-Mg	0.62	Mg-SO4	0.85	Cl-NO3	0.55

L'observation des précédents tableaux (V.3 & V.4), montre une bonne corrélation entre la conductivité et certains éléments (bicarbonates, calcium), on note également une bonne corrélation entre les bicarbonates et le calcium, traduisant probablement la même origine de ces deux éléments. Nous notons également une bonne corrélation entre les chlorures, les sulfates et le sodium, ce qui laisse penser à une même origine de ces éléments. Les chlorures présentent les corrélations les moins significatives avec le magnésium.

V.4.3. L'analyse du cercle ACP

L'observation du cercle ACP, (Fig. V.5) formé par les axes F1-F2 (42.33%), montre selon l'axe F1 (25.41%), une opposition entre les eaux fortement minéralisées caractérisée par la présence de tous les éléments intervenant dans la composition chimique des eaux et les eaux faiblement minéralisées occupant la partie négative de l'axe.

Selon l'axe F2 (16, 92 %), on note une opposition entre les bicarbonatées calciques (partie positive de l'axe) et les eaux riches en sodium, chlorures, sulfates et magnésium. Nous remarquons que ces eaux sont polluées par les nitrites, ce qui laisse supposer la présence d'eaux usées. .

D'une manière générale, nous retrouvons la répartition suivante :

- Des eaux issues des formations évaporitiques et ou salifères, dont la dissolution enrichie les eaux en anhydrite et gypse.
- Des eaux issues de la dissolution des carbonates (calcaires yprésiens et du Campanien-Maestrichtien). Ces formations présentes au Sud-ouest et au Nord-est de la zone d'étude, sont lessivées entraînant l'apparition des eaux bicarbonatées.

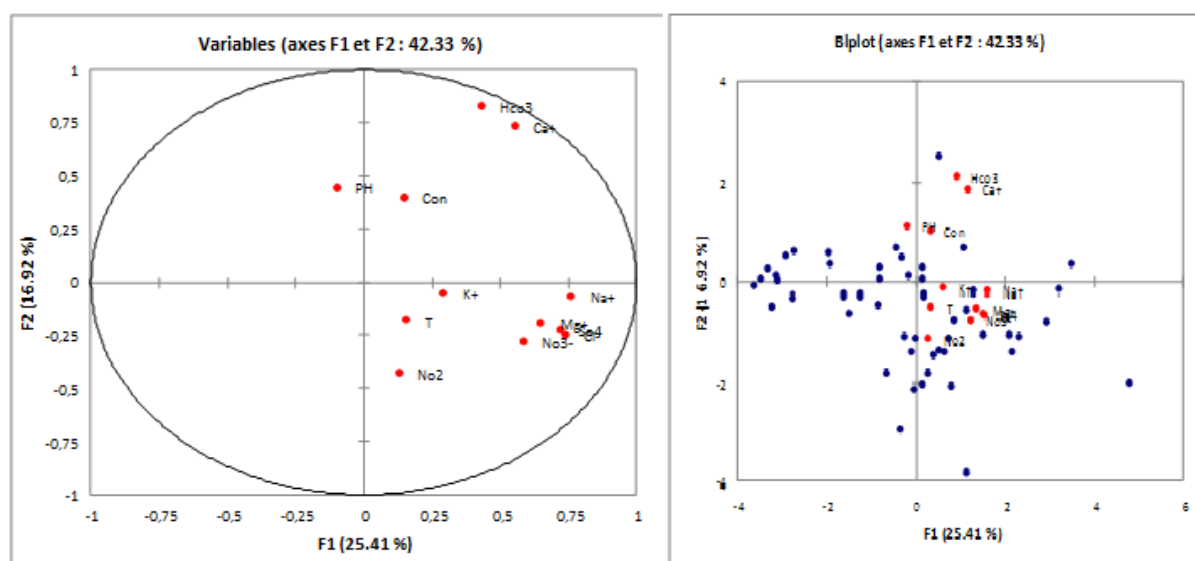


Figure V.5 : ACP Globale

V.4.3.1. Cercle ACP, analyses Décembre 2012

Le cercle formé par les deux axes F1/F2 (68.05 %), montre selon l'axe F1 (46.65 %), une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie positive de l'axe) et les eaux faiblement minéralisées (partie négative de l'axe).

Selon l'axe F2 (26.40 %), on note une opposition entre les éléments naturels d'origines endogènes, provenant de la dilution des formations géologiques et les éléments exogènes d'origines anthropiques (NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-}) dont les origines seraient liées aux pratiques

agricoles (Djabri L. 1987), par ailleurs nous notons que les sulfates peuvent provenir soit de la roche soit des intrants utilisés en agriculture.

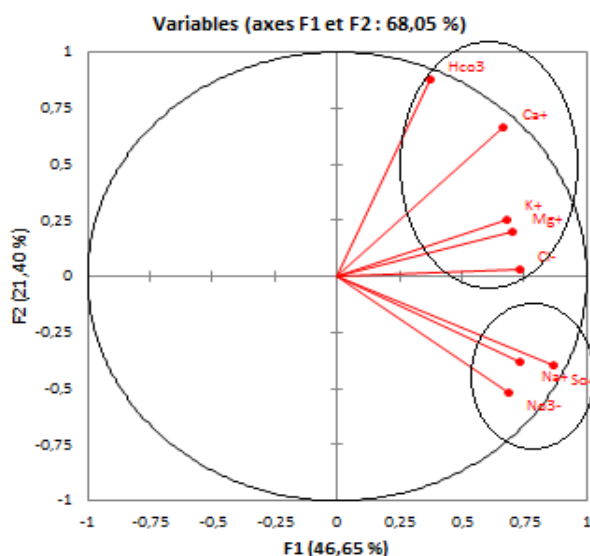


Figure V.6 : Cercle ACP, analyses 2012

V.4.3.2. Cercle ACP, analyses Mars 2011

Le cercle ACP, formé par les axes F1/F2, fournit 65.52 % de l'information. Selon l'axe F1 (47.63 %), il y a toujours opposition entre les eaux fortement minéralisées et les eaux faiblement minéralisées.

En observant l'axe F2 (16.89 %), on note une opposition entre les eaux bicarbonatées et les eaux soit sulfatées sodiques soit chlorurées sodiques. Cette répartition résulte de la dilution qui se produit au cours de cette période particulièrement arrosée.

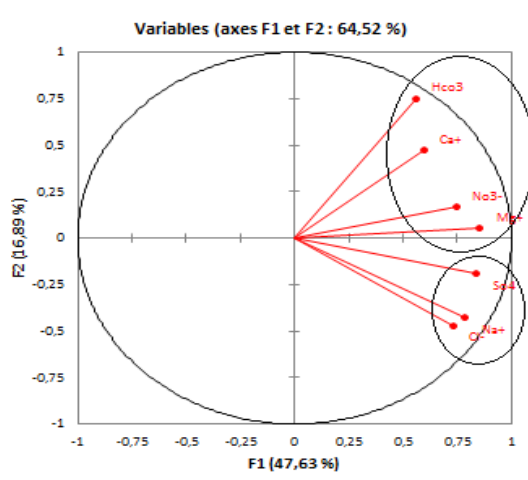


Figure V.7 : Cercle ACP, Mars 2011

V.4.4. Apports de la classification Ascendante hiérarchique ou C.A.H

Le diagramme réalisé (Figure V.8) fait ressortir à l'échelle des observations trois tendances basées sur l'importance de la minéralisation, la lithologie des nappes et l'écoulement des eaux.

- Un premier groupe qui montre une dépendance entre Calcium et Bicarbonate qui présente le pole de la minéralisation évaporitiques, le lessivage et l'altération du calcaire fissuré d'âge maestrichtien. Le lessivage des roches évaporitiques est bien marqué.
- Un deuxième groupe représentant une étroite liaison entre le Sodium, Sulfates et les Chlorures qui sont liés au remplissage de la formation Quaternaire.
- Un troisième groupe est constitué par le Potassium, Magnésium et Nitrates traduit la dégradation anthropique de la qualité, peuvent être conséquence d'une utilisation intensive d'engrais chimiques.

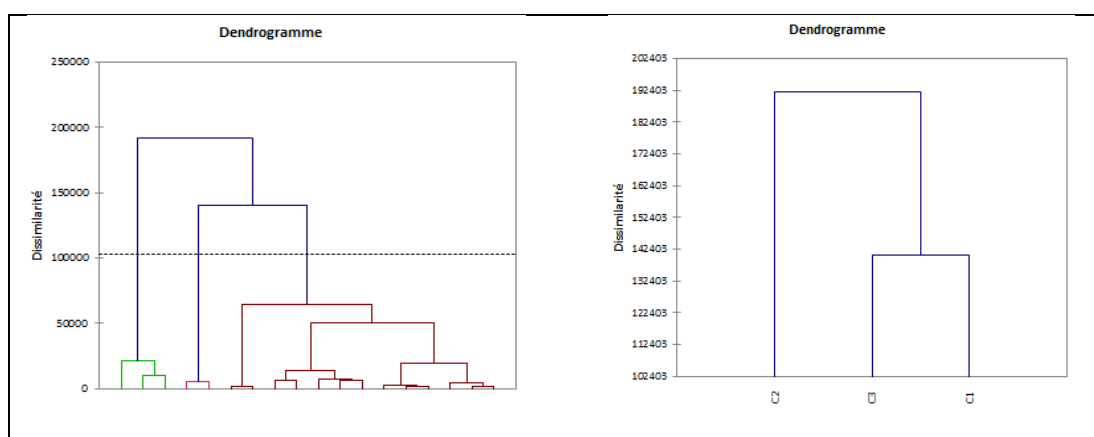


Figure V.8 : Dendrogramme visualisant les relations entre les variables physico-chimiques.

V.5. Essai de détermination des origines de la qualité des eaux

V.5.1. Apports de la méthode des rapports

V.5.1.1. Diagramme Ca^{2+} Versus HCO_3^- :

Le diagramme réalisé montre que la majorité des points s'alignent sur la droite de la pente 1. Cependant quelques point indiquent un excès de bicarbonates indiquant que les deux éléments n'ont pas la même origine. Les deux éléments ainsi considérés proviendraient en grande partie de la dissolution des carbonates.

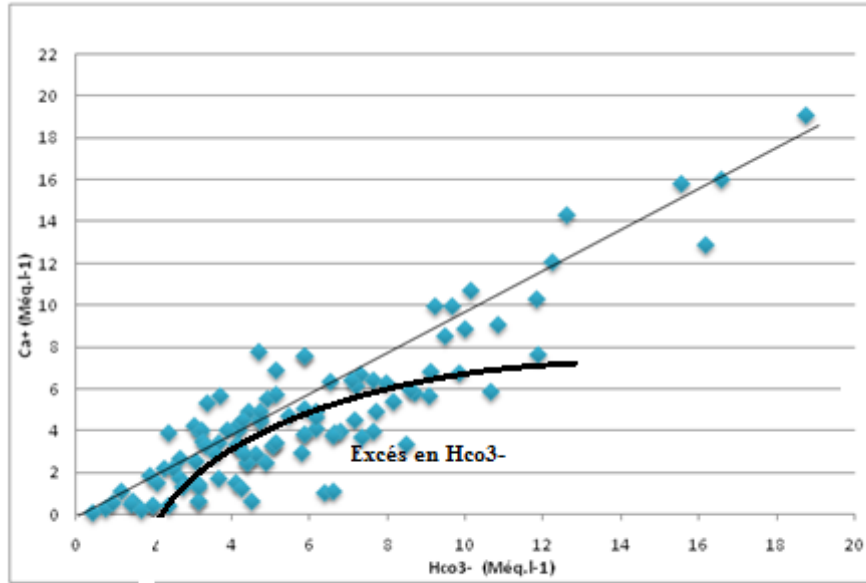


Figure V.9 : Diagramme Ca^{2+} Versus HCO_3^-

V.5.1.2. Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus Ca^{2+}

Le graphe de la Figure V.10, montre les deux tendances suivantes :

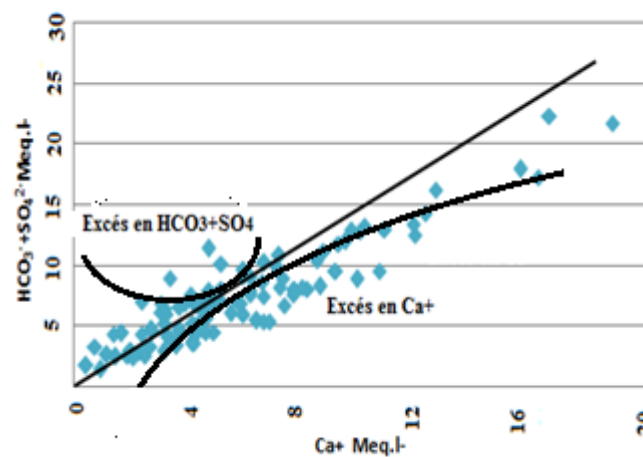


Figure V.10: Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ Versus Ca^{2+}

- Une première famille dont l'origine est considérée comme mixte, cela concerne les échantillons, situés sur la droite. Cette famille s'étale sur la première partie du graphe (0 à 8 meq/l en calcium),
- au delà de cette valeur le calcium évolue seul indiquant la présence d'une autre source de calcium (Athmani A.S., 2011).

V.5.1.3. Diagramme Na^+ versus Cl^-

L'observation du diagramme de la Figure V.11, indique la présence de trois origines des éléments considérés :

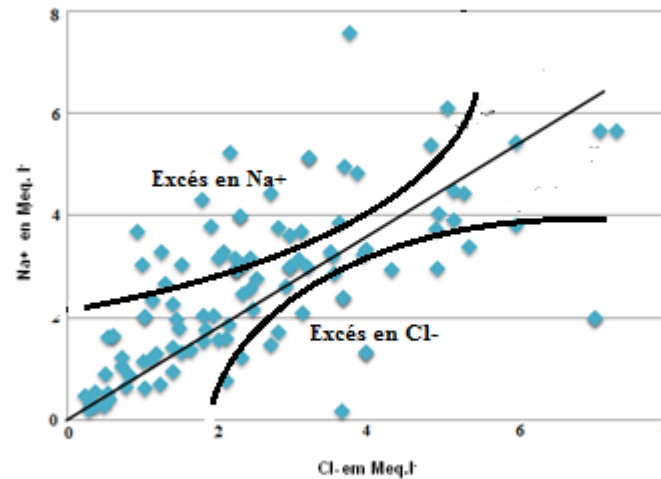


Figure V.11 : Diagramme Na^{2+} versus Cl^-

- la première montre une origine commune des deux éléments et caractérisée par les points situés, sur et autour de la droite,
- la seconde concerne les points situés au dessus de la droite, montrant un excès de sodium. Cette famille englobe un grand nombre d'échantillons (65 %).
- la troisième correspond aux eaux riches en chlorures. Elle comprend les échantillons situés en dessous de la droite.

L'observation du diagramme, indique que le Na^+ et le Cl^- peuvent avoir une origine commune, provenant de la dissolution des formations triasiques, riches en sel (Debieche TH., & al., 2004) ou d'autres facteurs, comme l'échange de base, l'infiltration des eaux usées et du recyclage des eaux d'irrigation.

V.5.1.4. Diagramme HCO_3^- versus SO_4^{2-}

L'observation du diagramme de la Figure V.12,

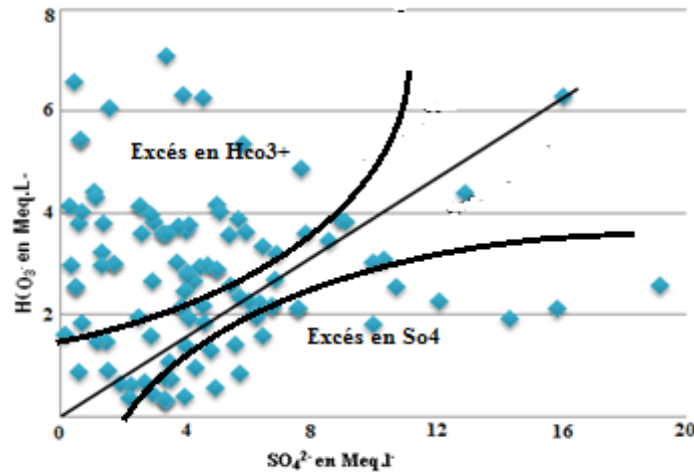


Figure V.12 : Diagramme HCO_3^- versus SO_4^{2-}

Le diagramme réalisé montre une dispersion montrant que les deux éléments n'ont pas la même origine. Cette situation proviendrait de la vitesse de dissolution des formations à l'affleurement (Gouaidia L., & al., 2004).

V.5.2. Explications des origines des répartitions observées

La méthode des rapports, montre que les éléments intervenant dans la composition chimique ont diverses origines. Nous avons remarqué que certains éléments provenaient de la dissolution des formations par contre la présence de certains est liée à l'action anthropique. Pour lever toutes ambiguïtés, nous avons testé d'autres méthodes, tel que l'indice d'échange de base, le calcul de l'indice de saturation...

V.5.2.1. Calcul de l'indice d'échange de base

L'IEB représentant l'indice d'échange de base est sans unité. Il définit le sens des échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants. Il est donné par l'expression suivante :

$$\text{IEB} = \text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^-$$
 les concentrations sont exprimées en meq/l.

- si I.E.B. = 0 alors il n'y a pas d'échanges,
- si I.E.B. < 0 alors Ca^{2+} et Mg^{2+} sont échangés par Na^+ et K^+
- si I.E.B. > 0, alors Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau V.5.

IEB\ Période	Basses eaux 2011	Hautes eaux 2011	Basses eaux 2012	Haute eaux 2012	Observations
IEB>0	11	04	06	07	27/72
IEB<0	09	14	12	11	45/72

- ❖ la première située aux alentours, de la ville de Taoura, caractérisée par un échange de base excessif,
- ❖ la seconde occupant la zone de Merahna, au niveau de cette localité les IEB, sont positifs et l'échange se fait dans le sens alcalins vers alcalino terreux.

124

- ❖ la zone de Merahnaa, située sur le sommet du synclinal, comprend de nombreux forages, ces derniers captent les formations profondes et hétérogènes, tel que les calcaires, le Trias salifère, de nombreux ouvrages sont implantés dans cette zone. Les formations salifères, enrichissent les eaux en sodium, ce dernier peut être échangé avec le calcium,
- ❖ la zone de Taoura, située au centre du synclinal, composée par des formations Quaternaires (sables, argiles sableuses,...), les eaux de cette zone ont des compositions diverses d'où un échange de base important.

V.5.3. Apports de la thermodynamique :

Les indices de saturation calculés indiquent une sous saturation des eaux vis-à-vis des minéraux carbonatés l'anhydrite ($-1.3 < IS < -2.4$), l'aragonite ($-0.3 < IS < -0.9$), la calcite ($-0.2 < IS < -0.7$) et la dolomite ($-0.8 < IS < -1.8$). Les formations triasiques interviennent également dans l'acquisition de la minéralisation, c'est surtout le gypse ($-1.3 < SI < -2.3$), qui intervient dans la minéralisation des eaux.

V.6. Utilisation des eaux en irrigation

La zone d'étude est à vocation agricole, d'où la nécessité d'irriguer à partir des eaux disponibles (oueds, puits, forages...), cependant ces eaux ne sont pas souvent de bonne qualité et leur utilisation pourra induire des répercussions négatives sur le sol et sur la plante. Ce qui implique une connaissance parfaite de la qualité des eaux avant leurs utilisations. Partant du corollaire qu'il est admis qu'une irrigation à partir d'une eau riche en sodium peut entraîner une baisse de la perméabilité, ce qui aura pour conséquence une mauvaise irrigation de la plante pouvant la conduire jusqu'à son asphyxie d'où la perte de la culture. Pour éviter cela un contrôle continu de l'origine et de la qualité de l'eau sont nécessaires et dans les zones à climat et à géologie contrasté, le contrôle devient obligatoire. L'aptitude de l'eau à l'irrigation peut être jugée non seulement à partir de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et les ions qui la constituent. Il est donc impératif d'étudier les paramètres qui définissent les caractéristiques des eaux destinées à l'irrigation.

Par ailleurs les progrès réalisés en matière de recherche en sciences agronomiques ont permis de mieux connaître les conduites à tenir vis-à-vis de la qualité des eaux. Autrefois et par méconnaissance les agriculteurs étaient contraint d'abandonner leurs champs aujourd'hui avec les avancées technologiques cela n'est plus permis.

Les premiers travaux portant sur la classification des eaux à l'irrigation remontent à 1954, travaux réalisés par Richards.

V.6.1. Risque de retour des eaux d'irrigation :

Dans les contrées où l'irrigation est importante, le retour des eaux d'irrigation constitue un danger pour le sol et la ressource.

V.6.1.1. Impact du retour des eaux d'irrigation sur le sol :

Les méthodes élaborées (Richards, Wilcox...), sont basées sur le sodium, or un excès de sodium dans les eaux entraîne une baisse de la perméabilité du sol, entraînant une mauvaise irrigation, se caractérisant par une asphyxie des plantes (morts), d'où des pertes d'argent énormes.

V.6.1.2. Impact du retour des eaux d'irrigation sur la ressource :

Souvent les agriculteurs utilisent des engrais riches en pesticides, en irrigant les intrants vont percoler vers la nappe entraînant ainsi une pollution des eaux, c'est pourquoi les contrôles de la qualité des eaux doivent être fréquents.

Le schéma suivant (Figure V.14), élaboré par Sameh Habes en 2003, montre bien les mécanismes de circulation des eaux d'irrigation.

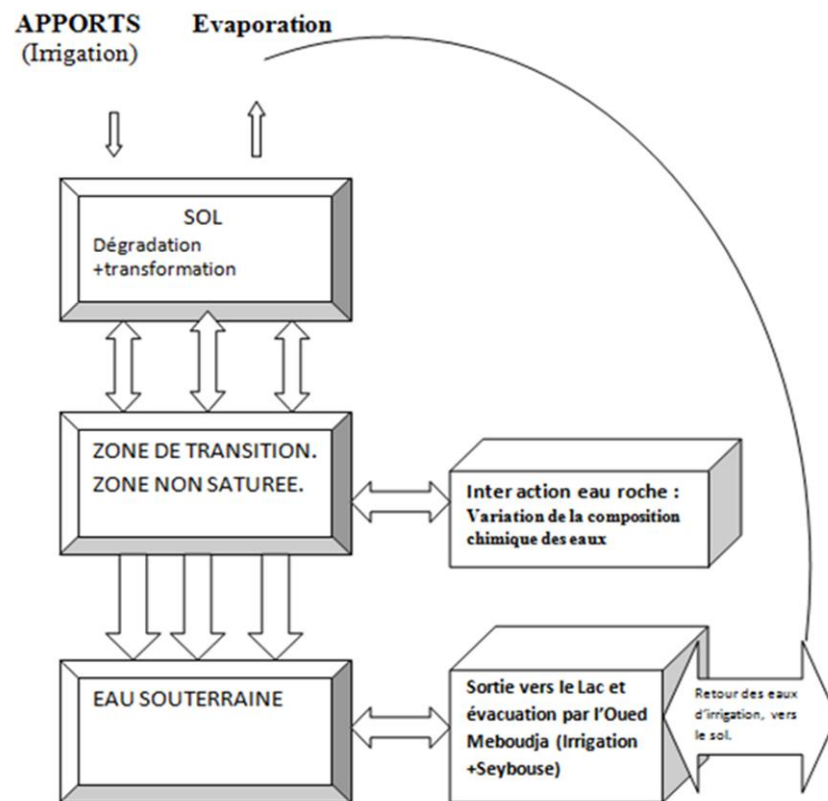


Figure V.14 : Mécanismes régissant le retour des eaux d'irrigation (In Habes S, 2003)

V.6.2. Méthodes utilisées pour la classification des eaux d'irrigation :

Depuis de nombreuses méthodes ont été développées, ces méthodes tiennent compte de la nature du sol, de la composition chimique des eaux, du climat... Cependant malgré la multiplication de ces méthodes, les problèmes liés à l'irrigation des sols restent posés, particulièrement la dégradation de la qualité des eaux liée au retour des eaux d'irrigation. Actuellement les agriculteurs utilisent des engrais, riches en pesticides. L'eau destinée à l'irrigation sera fractionnée en trois grandes parties :

- une première utilisée par les végétaux,
- une seconde évaporée, donc retourne vers l'atmosphère,
- une troisième va percoler vers les nappes entraînant avec le reste des engrais une pollution des eaux des nappes et des cours d'eau.

Le tableau suivant, donne un aperçu des paramètres pouvant influencer l'utilisation des eaux pour l'irrigation.

Tableau V.6 : Méthodes élaborées pour l'irrigation des eaux.

Equation	Référence
$SAR = Na^+ / \sqrt{Ca^{+2} + Mg^+} / 2$	Richards (1954)
$Na(\%) = 100 * ((Na^+ + K^+) / (Ca^{+2} + Mg^+ + Na^+ + K^+))$	Wilcox (1955)
$SSP = (Na^+ * 100) / (Ca^{+2} + Mg^+ + Na^+ + K^+)$	Eaton (1950)
$RSC = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{+2} + Mg^+)$	Richards (1954)
$MH = [(Mg^+) / Ca^{+2} + Mg^+] * 100$	Szabolcs and Darab (1964)
$PI = [Na^+ + \sqrt{HCO_3^-} / Ca^{+2} + Mg^+ + Na^+] * 100$	Doneen (1964)
$ESP = 100 * (-0.0126 + 0.0147 SAR) / (1 + (-0.0126 + 0.0147 SAR))$	Abdul Ilameed et al. (2010)
$KI = (Na^+) / (Ca^{+2} + Mg^+)$	Kelly (1963)

Nous remarquons que les trois premières méthodes (Richards, Wilcox et Eaton), tiennent compte des mêmes paramètres, ce qui rend la comparaison des résultats obtenus à partir de ces trois méthodes réalisables.

V.6.2.1. Calculs des paramètres obtenus pour chaque méthode

Le tableau 2 suivant, condense les résultats obtenus après calcul des différents paramètres donnés par les formules du tableau 1

Tableau V.7 : Résultats obtenus après application des différentes méthodes : cas des puits de la zone d'étude.

NOM	SAR	Na%	SSP	RSC	MH	PI%	ESP	KI
P 1	0,55	18,78	17,17	-1,16	33,59	53,78	-0,451	0,21
P2	1,628	32,91	30,66	-3,77	51,88	48,70	1,12	0,45
P3	0,66	16,33	15,11	-2,80	53,27	40,21	-0,28	0,18
P4	0,45	16,80	16,53	-0,76	29,91	59,70	-0,58	0,19
P5	1,62	30,44	26,10	-4,03	64,47	45,19	1,12	0,37
P6	0,73	24,11	19,87	-0,45	7,21	58,30	-0,18	0,26
P7	1,05	25,78	23,01	-4,09	54,31	40,87	0,29	0,31
P8	0,34	10,66	10,14	-1,35	12,70	45,11	-0,75	0,11
P9	1,51	28,85	27,47	-5,14	42,79	42,80	0,95	0,38
P10	2,08	37,35	35,36	-5,09	46,36	48,37	1,77	0,56

P11	3,30	41,39	39,66	-6,97	48,62	51,49	3,47	0,67
P12	0,81	24,74	19,86	-3,26	33,42	41,14	-0,06	0,26
P13	1,39	50,53	49,41	-5,08	86,33	37,11	0,78	0,42
P14	1,45	55,26	52,89	-3,99	68,73	44,13	0,873	0,47
P15	4,39	68,38	62,55	-1,30	53,59	81,11	4,94	1,97
P16	1,44	26,70	23,91	-5,32	51,93	40,87	0,85	0,32
P17	5,22	66,41	59,41	-3,37	34,46	68,88	4,80	0,79
P18	1,22	25,28	22,21	-4,44	50,79	41,17	0,53	0,29
P 19	0,26	9,26	8,71	-0,92	6,64	49,31	-0,87	0,09
P20	1,15	27,23	23,07	-1,03	25,93	51,15	0,43	0,31
P21	1,03	26,32	23,90	-0,11	12,35	57,66	0,25	0,32
P22	0,24	9,40	9,25	-0,74	16,10	54,95	-0,90	0,10
P23	1,45	23,06	22,37	-3,87	23,94	40,759	0,86	0,29
P24	3,22	42,18	41,16	-4,42	15,21	55,34	3,36	0,71
P25	1,61	30,8	28,223	-3,98	25,42	46,75	1,10	0,40
P26	1,56	27,61	25,45	-3,54	34,11	44,85	1,03	0,35
P27	0,67	14,79	13,08	-3,46	25,73	35,64	-0,26	0,15
P28	0,73	18,68	15,64	-2,68	35,17	40,84	-0,18	0,19
P29	0,47	11,35	9,70	-5,31	18,06	29,22	-0,56	0,10
P30	1,03	20,56	18,12	-6,60	29,00	33,79	0,26	0,22
P31	2,65	47,27	46,79	-3,84	29,83	56,43	2,57	0,88
P32	2,93	46,25	43,30	-5,04	38,50	55,12	2,96	0,80
P33	1,56	30,04	27,76	-3,50	60,76	47,43	1,02	0,39
P34	1,71	24,22	23,05	-8,20	25,24	36,70	1,24	0,30
P35	1,35	27,69	27,08	-3,99	25,11	44,97	0,72	0,37
P36	0,64	14,40	11,83	-4,96	21,72	31,774	-0,30	0,13
P 37	0,26	16,25	12,35	-0,95	40,58	56,14	-0,88	0,14
P38	0,42	13,03	10,53	-1,74	31,34	41,43	-0,64	0,12
P39	0,42	14,70	14,04	-0,66	21,34	56,08	-0,63	0,16
P40	0,46	19,90	18,24	-0,58	1,91	66,24	-0,57	0,22
P41	0,93	19,28	16,79	-3,18	8,96	38,82	0,10	0,20
P42	0,54	10,08	9,30	-3,28	27,64	30,56	-0,45	0,10
P43	1,07	22,69	20,06	-5,35	41,71	37,25	0,32	0,25
P44	1,07	22,69	20,06	-5,35	41,71	37,25	0,32	0,25
P45	1,54	28,21	27,53	-3,11	41,69	47,65	0,99	0,38
P46	0,75	20,32	17,62	-3,02	22,16	41,65	-0,14	0,22

P47	3,09	41,12	39,83	-7,052	18,84	50,86	3,18	0,67
P48	3,54	47,27	45,73	-2,51	29,01	69,23	3,79	1,27
P49	1,66	49,59	46,14	-3,30	63,95	49,57	1,17	0,59
P59	2,65	56,31	56,1	-3,84	29,83	56,43	2,57	0,88
P51	0,86	61,61	60,61	-1,69	77,56	45,22	0,004	0,44
P52	0,76	18,37	15,95	-3,61	20,62	38,30	-0,12	0,19
P53	0,39	11,55	11,41	-1,37	11,94	45,83	-0,68	0,12
P54	1,27	26,98	25,99	-5,12	34,18	39,36	0,61	0,35
P 55	1,57	31,75	30,44	-2,18	48,59	53,14	1,05	0,44
P56	1,51	28,85	27,47	-5,14	42,79	42,80	0,95	0,38
P57	0,73	21,94	18,68	-1,15	30,27	51,77	-0,18	0,23
P58	0,25	8,69	8,12	-0,23	43,89	51,69	-0,88	0,08
P59	1,45	23,51	23,02	-1,76	21,69	43,80	0,87	0,30
P60	0,52	11,82	8,58	-4,04	17,80	29,24	-0,49	0,09
P61	3,89	52,69	51,35	1,38	27,44	72,86	4,27	1,08
P62	1,61	30,80	28,22	-3,98	25,42	46,75	1,10	0,40
P63	0,61	14,50	13,77	-2,60	15,70	39,45	-0,35	0,16
P64	1,56	26,06	24,54	-6,03	47,21	40,15	1,02	0,33
P65	0,47	11,39	8,68	-5,84	21,31	27,75	-0,57	0,09
P66	1,07	22,52	19,91	-5,29	41,30	37,33	0,31	0,25
P67	2,93	53,21	50,74	-3,37	54,58	59,06	2,96	1,08
P68	0,97	59,79	57,83	-8,62	34,11	26,84	0,17	0,22
P69	4,29	65,20	62,48	-2,37	31,14	72,89	4,80	1,79
P70	1,91	27,97	26,14	-9,34	48,63	37,90	1,529	0,36
P71	1,00	22,49	21,33	-2,60	41,95	45,30	0,21	0,27
P72	2,87	46,70	44,88	-1,31	26,73	65,49	2,88	0,84
P 73	0,64	19,82	16,24	-1,67	33,21	47,19	-0,31	0,20
P74	0,47	11,35	9,70	-2,85	18,06	34,44	-0,56	0,10
P75	0,39	11,44	11,30	-1,422	11,82	45,40	-0,68	0,12
P76	0,79	21,81	17,95	-0,35	39,40	50,73	-0,08	0,22
P77	0,73	12,60	12,08	-5,17	29,04	30,77	-0,18	0,13
P78	0,92	15,61	14,60	-2,12	13,84	35,62	0,09	0,17
P79	1,43	29,32	26,20	-4,58	23,14	43,67	0,84	0,37
P80	2,79	40,48	38,98	-2,36	19,90	56,81	2,76	0,65
P81	1,50	23,51	22,11	-4,49	20,49	39,63	0,94	0,28
P82	1,58	30,66	29,39	-4,04	33,94	47,01	1,05	0,42

P83	1,08	21,80	17,18	-6,34	13,28	34,27	0,33	0,21
P84	0,70	11,64	10,28	-2,25	14,13	30,11	-0,23	0,11
P85	2,80	53,41	50,53	-2,89	29,24	61,68	2,79	1,08
P86	0,96	60,99	59,12	-6,79	16,56	30,20	0,15	0,24
P87	1,28	58,83	57,36	-4,21	43,92	42,89	0,625	0,38
P88	0,48	11,56	10,61	-4,32	18,39	32,15	-0,54	0,120
P89	0,82	17,83	15,72	-6,47	53,80	31,30	-0,04	0,19
P90	0,97	23,32	20,18	-2,09	20,65	46,02	0,17	0,26
P 91	1,41	29,40	26,208	-1,52	29,32	51,11	0,81	0,37
P92	0,35	8,38	7,57	-3,86	12,64	30,79	-0,74	0,08
P93	1,75	32,13	28,63	-1,06	32,29	52,04	1,30	0,42
P94	2,04	35,33	31,35	-2,45	20,36	51,87	1,71	0,48
P95	0,77	13,64	13,01	-3,32	27,34	33,74	-0,11	0,15
P96	1,13	17,80	16,84	-0,91	17,25	37,61	0,40	0,20
P97	0,39	8,32	7,6912	-6,10	30,44	26,31	-0,68	0,08
P98	1,11	20,60	20,15	-3,31	17,02	41,07	0,37	0,25
P99	1,75	23,12	22,40	-5,15	10,46	37,97	1,29	0,29
P100	1,75	32,13	28,63	-1,06	32,29	52,04	1,30	0
P101	2,31	28,15	27,43	-2,29	9,65	43,44	2,09	0,38
P102	0,32	10,20	9,01	-4,40	11,81	23,88	-0,79	0,10
P103	0,14	55,84	52,70	-3,81	14,07	28,20	-1,06	0,03
P104	1,42	53,25	50,71	-6,93	62,98	36,20	0,82	0,26
P105	0,83	55,83	54,48	-4,93	15,76	33,65	-0,03	0,17
P106	1,11	22,84	20,73	-4,87	23,43	38,88	0,38	0,262
P107	1,81	21,78	21,61	-2,40	12,918	37,56	1,38	0,27
P108	0.93	22.04	19.4	-2.09	20.88	46.12	0.13	0.18

L'observation du précédent tableau, nous permet de faire les constatations suivantes :

- ❖ la valeur du SAR, oscille entre 0.24 et 4.29, ce qui permet de définir la classe suivante,
 - S1 : SAR < 10 : eau faiblement sodique avec peu de danger d'alcalinisation des sols
- ❖ le Na%, présente des valeurs allant de 8 à 68, d'où on détermine les classes suivantes
 - 0 > Na % < 20 Eau d'une qualité excellente
 - 20 > Na % < 40 Eau d'une bonne qualité
 - 40 > Na % < 60 Eau d'une qualité permmissible
 - 60 > Na % < 80 Eau d'une mauvaise qualité

- ❖ le SSP montre les valeurs variant entre 7 et 62. Les variations observées indiquent une dégradation de la qualité des eaux au niveau de la zone d'étude. C'est les mêmes indications que pour le % de Na.

Au terme de ces classifications, nous remarquons que les eaux de la région, sont de qualités variables, leur utilisation pour l'irrigation doit se faire de manière selon certaines conditions. Nous allons étudier dans le détail cartographie à l'appui les résultats obtenus à partir de l'utilisation des méthodes de Richards, Wilcox et SSP.

V.6.2.2. Diagramme de Richards :

- Ce diagramme, combine la conductivité et la valeur du SAR. Cette combinaison, nous a permet d'élaborer le diagramme suivant (Figure V.15).

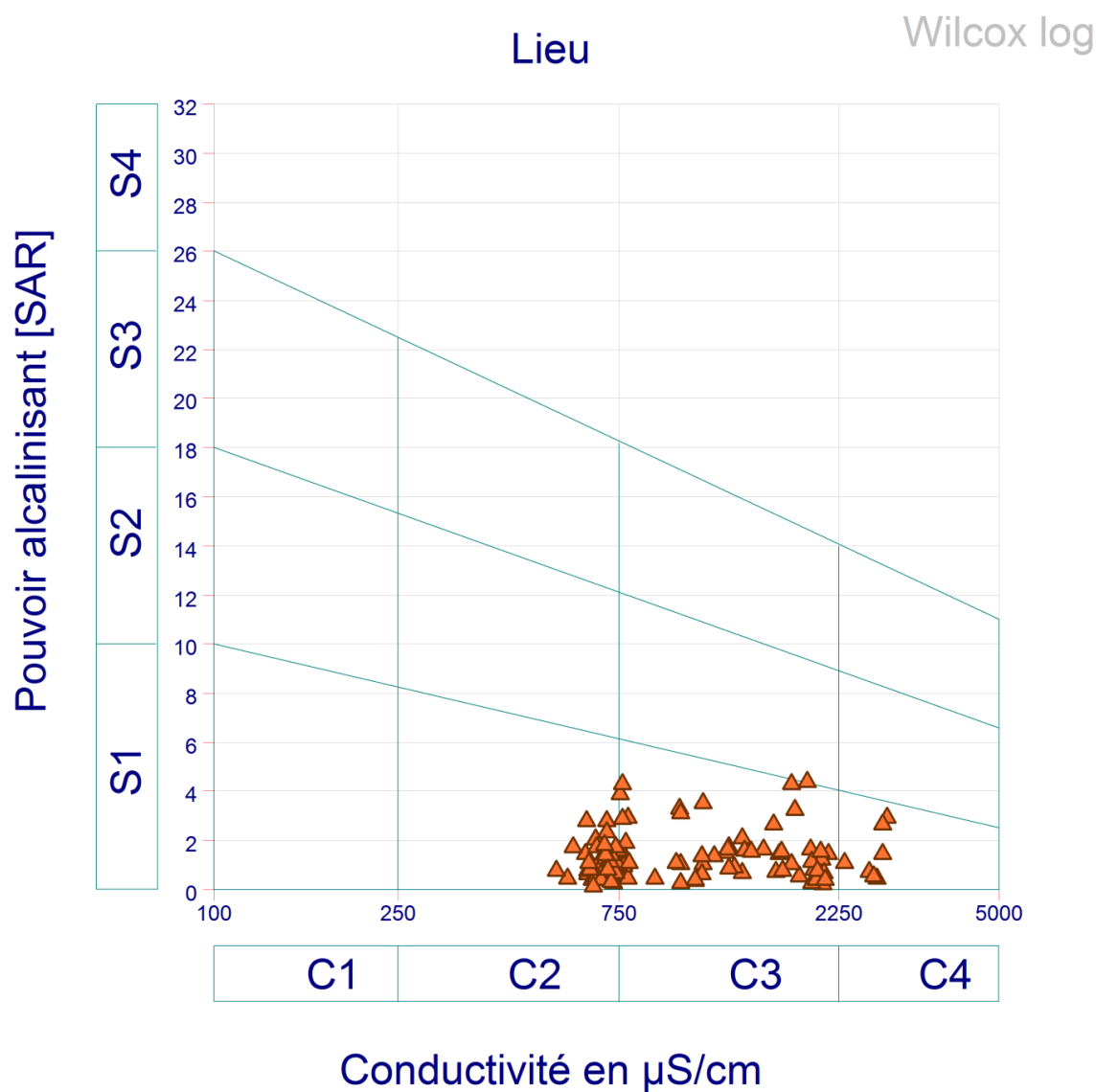


Figure V.15 : Diagramme de Richards-Eau de la partie aval de Medjerda

L'observation de la figure V.15, montre que les eaux de la région se répartissent au niveau des classes suivantes : C2S1, C3S1 et C4S1. Dans le détail et on se référant à l'interprétation globale de la méthode, nous pouvons réaliser les constatations suivantes :

- C2S1 : caractérise des eaux d'assez bonne qualité, pouvant être utilisées sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels.
- C3S1 : désignent des eaux médiocres, utilisables seulement pour l'irrigation de cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité, avec une salinité qui doit être contrôlée.
- C4S1 : indiquent des eaux de mauvaise qualité, fortement minéralisées, qui ne peuvent convenir qu'à des espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés.

A partir de cette classification, nous pouvons déterminer la répartition des puits de la région en fonction du diagramme de Richards.

Tableau V.8 : Classification des puits de la région en fonction du diagramme de Richards.

N°	Classe	Point d'eau
1	C2S1	P1, P3, P5,P11, P12,P16, P18, P19, P20,P21, P39, P40, , P46,P47 , P56, P37,P38, P41, P44, P45,P48, P49, P56, P58, P59, P60,P63, P64, P65 ,P666, P68,P70, P71, P72. P73, P74, P75, P76, P77, P78,P79, P80, P81, P82,P83, P84,P85, P87, P89,P90, P91, P92, P93, P94, P95, P96,P97,P98 , P99, P100, P101, P102,P103 , P104, P105,P106, P107.
2	C3S1	P2, P4, P6,P7, P8,P9, P10, P13,P15, P17, P19, P22, P23, P24, P25,P26,P27 , P30, P31, P33, , P34,P35 , P36, P37,P38, P41, P44, P45,P48, P49, P51, P52, P53, P54,P55,P57, P61, P62 ,P67, P69,P86, P88, P108.
3	C4S1	P14, P28, P29, P32, P42, P43, P50.

V.6.2.2.1. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation issue du diagramme de Richards

En utilisant la répartition des échantillons déterminée à partir du diagramme de Richards, nous avons réalisé la carte d'aptitude des eaux à l'irrigation (Figure V.15). L'observation de cette carte montre, que les eaux de la région, peuvent être considérées comme d'assez bonne qualité, cette catégorie d'eau est présente sur toute l'étendue de la zone.

Les eaux des deux classes c'est-à-dire de qualité médiocre et de mauvaises qualité apparaissent sur les bordures de la plaine et au niveau des zones de rejets ainsi sous l'influence des formations géologiques qui sont chargées en sel (GOUAIDIA L et al. 2006). (Trias). C'est le cas de la zone d'Ouillen où on note une dégradation ponctuelle des eaux.

L'interprétation de la carte montre que les eaux conviennent à l'irrigation, cependant des contrôles réguliers doivent être effectués particulièrement au niveau des zones montrant une dégradation de la qualité des eaux.

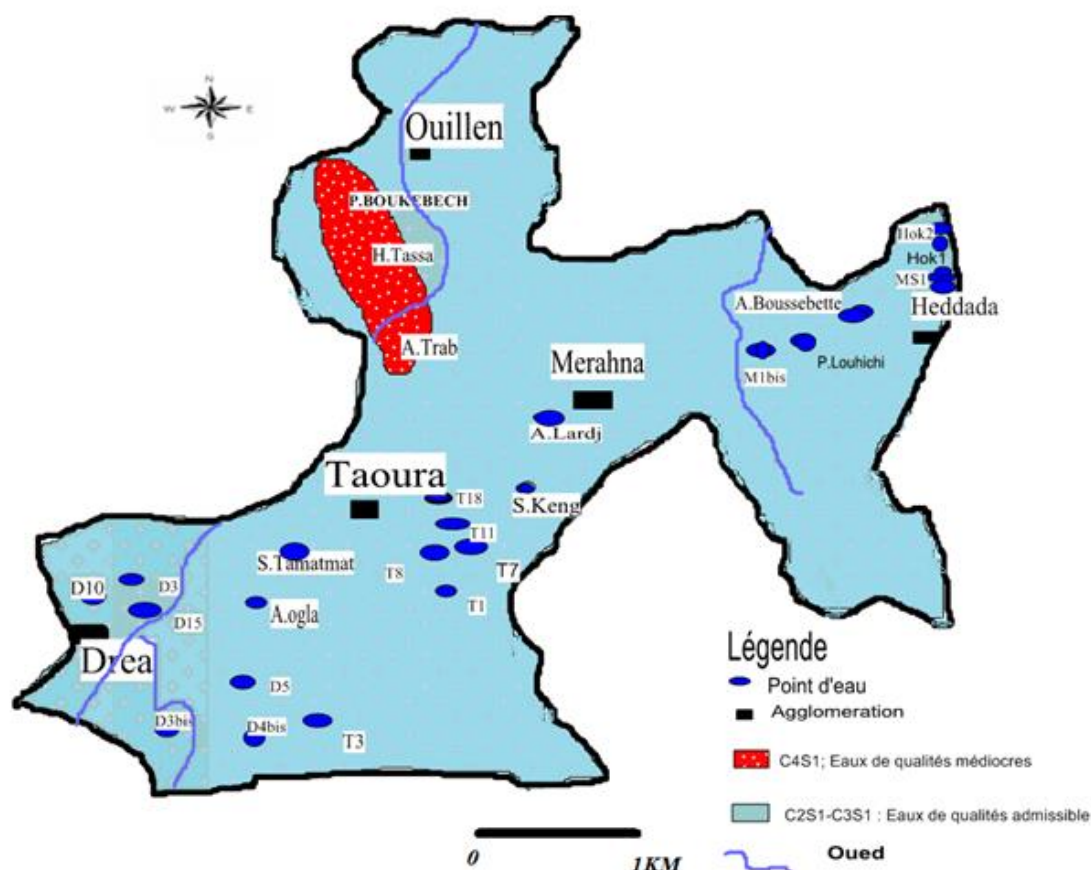


Figure V.16 : Classification des eaux d'irrigation selon la méthode de Wilcox

Le Na% est donnée par la formule suivante :

$$\%Na = \left\{ \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \right\} \times 100$$

- $0 < Na \% < 20$ Eau d'une qualité excellente (T8, D3, D10, T15, T7, T11)
- $20 > Na \% < 40$ Eau d'une bonne qualité (source Ain khengua, sourc ain Tamatma, Ain Bousebett)
- $40 > Na \% < 60$ Eau d'une qualité permmissible (Bir Louhichi, Puit Ogla, Ain el Gueni Merahna, Puit Elkhengua TAOURA, Ain Lardjenia)
- $60 > Na \% < 80$ Eau d'une mauvaise qualité : puit Ain trab, Hamma Tassa , puit Boukbech.

V.6.2.3. Interprétation du diagramme %Na en fonction de la conductivité (figure V.4) :

Le diagramme réalisé montre que les eaux analysées, se répartissent respectivement au niveau des classes suivantes :

- eau d'excellente qualité, contient le maximum de puits, 56 puits,
- eau de bonne qualité, cette classe contient 33 puits,
- eau de qualité admissible, cette classe contient 4 puits,
- eau de qualité médiocre, avec 15 puits,
- eau de mauvaise qualité contenant 0 puits.

Nous pouvons déduire que les eaux des puits analysées, sont de bonne qualité pour l'irrigation.

V.6.2.4. Diagramme de Wilcox (Figure V.17)

Pour réaliser ce diagramme, nous avons combiné le %Na et la conductivité. L'observation du diagramme montre les quatre (04) classes d'eau suivantes :

- les eaux d'excellente qualité, cette classe contient (56) échantillons, soit 51.85%,
- les eaux de bonne qualité, comprend trente trois (33) échantillons soit le maximum soit 30.5 %,
- les eaux de qualité admissible, cette classe contient 04 échantillons, soit 3.7%
- les eaux de qualité médiocre, caractérisée par quinze (15) échantillons soit 13.8 %

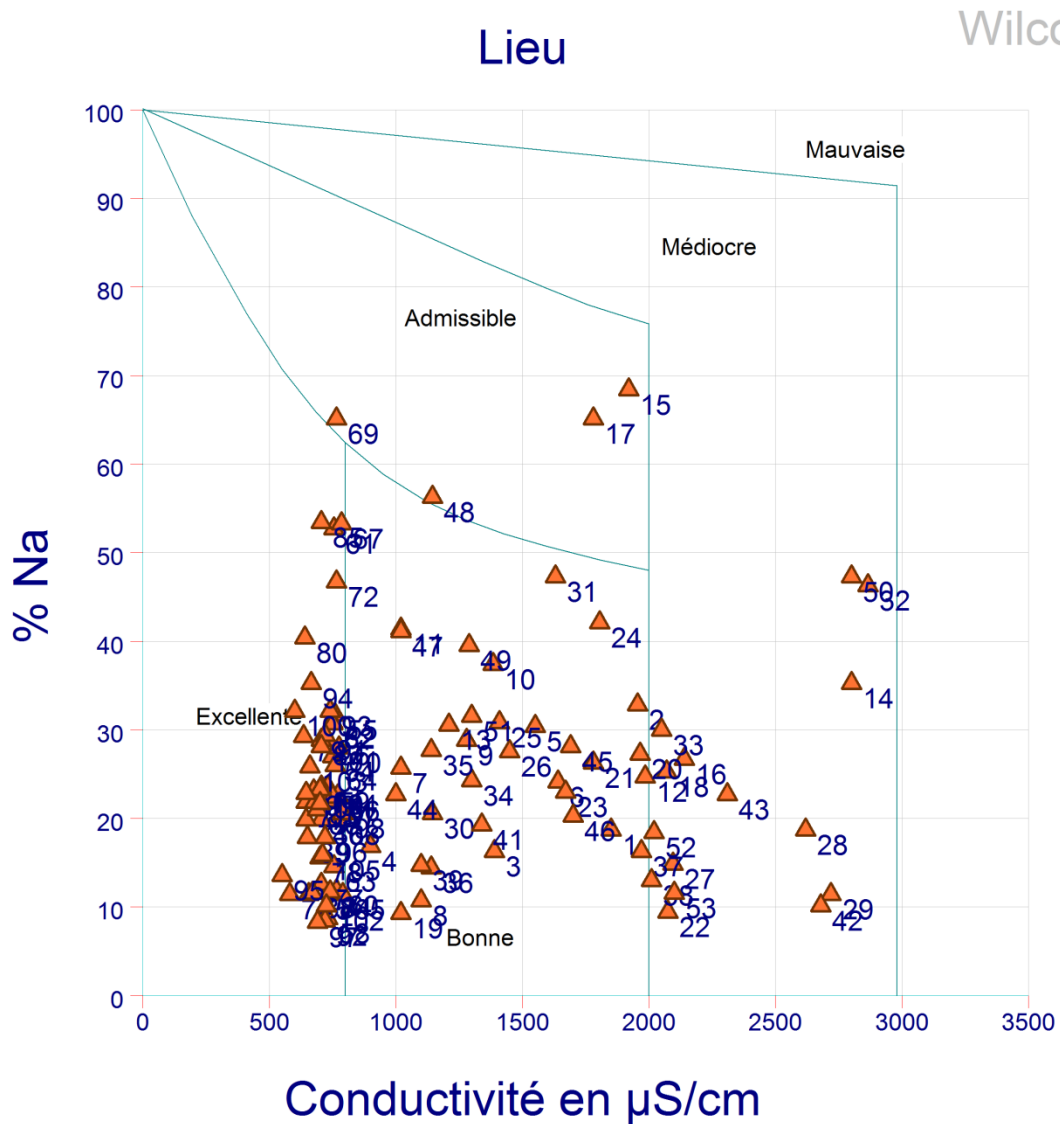


Figure V.17 : Diagramme Wilcox, eau de la partie aval de Medjerda

V.6.2.4.1. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation (méthode Wilcox) :

L'observation de la carte (Figure V.5), réalisée montre que :

- les eaux de bonne qualité sont localisées dans la zone Ain Tamatmat et sur les bordures de la plaine de Heddada (Ain Boussebbett).
- . Les eaux d'excellente qualité se localise au niveau de la partie synclinale de la region de Taoura vers la zone de Dréa.
- Les eaux de mauvaise qualité occupent la zone exutoires de la zone d'étude.

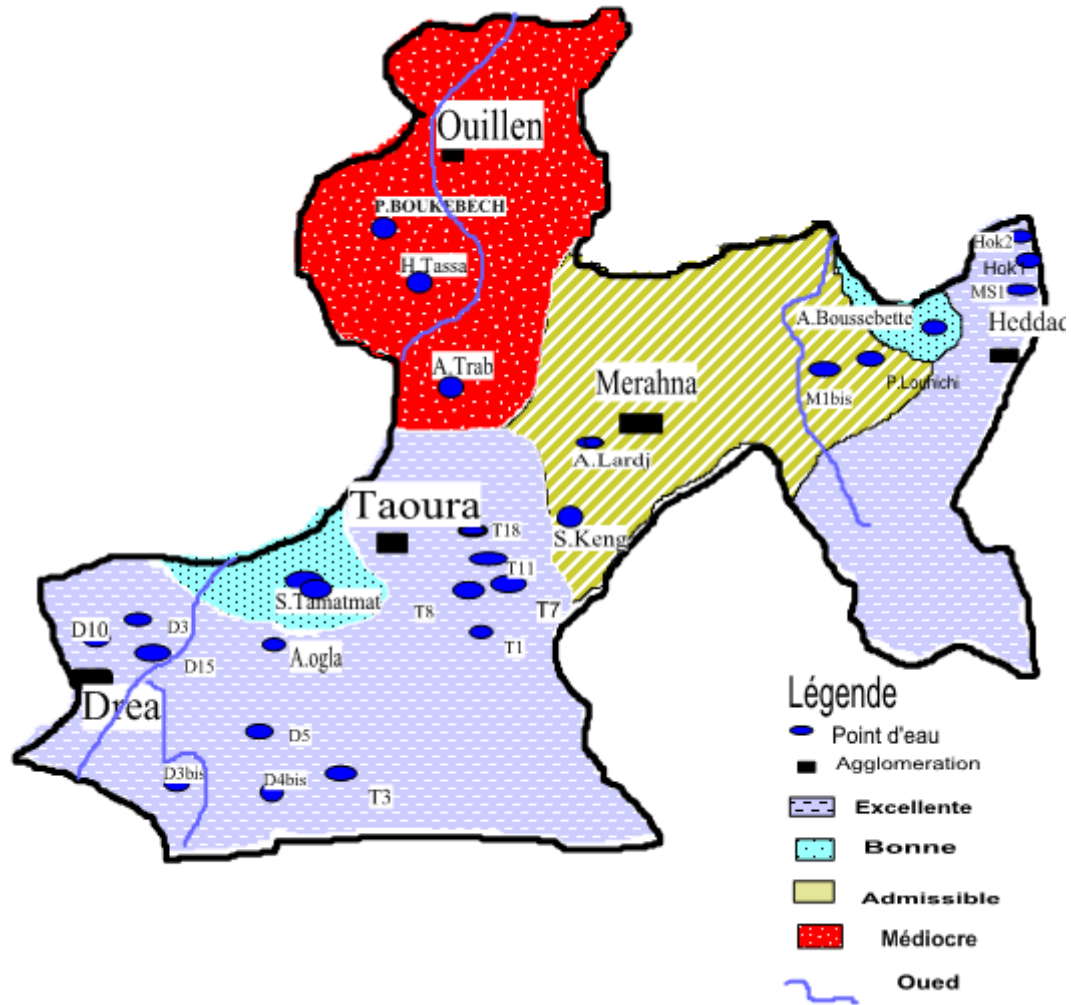


Figure V.18 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation (diagramme de Wilcox),

V.6.2.5. Diagramme d'EATON (SSP) :

Pour réaliser, ce diagramme, nous avons combiné le %Na et la conductivité. Le %Na est donné par la formule

$$\%Na = \left\{ \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \right\} \times 100$$

Le diagramme réalisé (fig.23), montre que les échantillons sont distribués sur cinq (05) classes de qualité comme suit :

- eau d'excellente qualité, contient cinq (62) échantillons, soit 58 %
- eau de bonne qualité, contient trente deux (32) échantillons, soit 29%
- eau de qualité médiocre contient quatorze (14) échantillons, soit 13 %

Cette première observation, montre que les eaux de la région sont de bonne qualité dans leur majorité. Seuls 13 % des eaux peuvent poser problème quant à leur utilisation

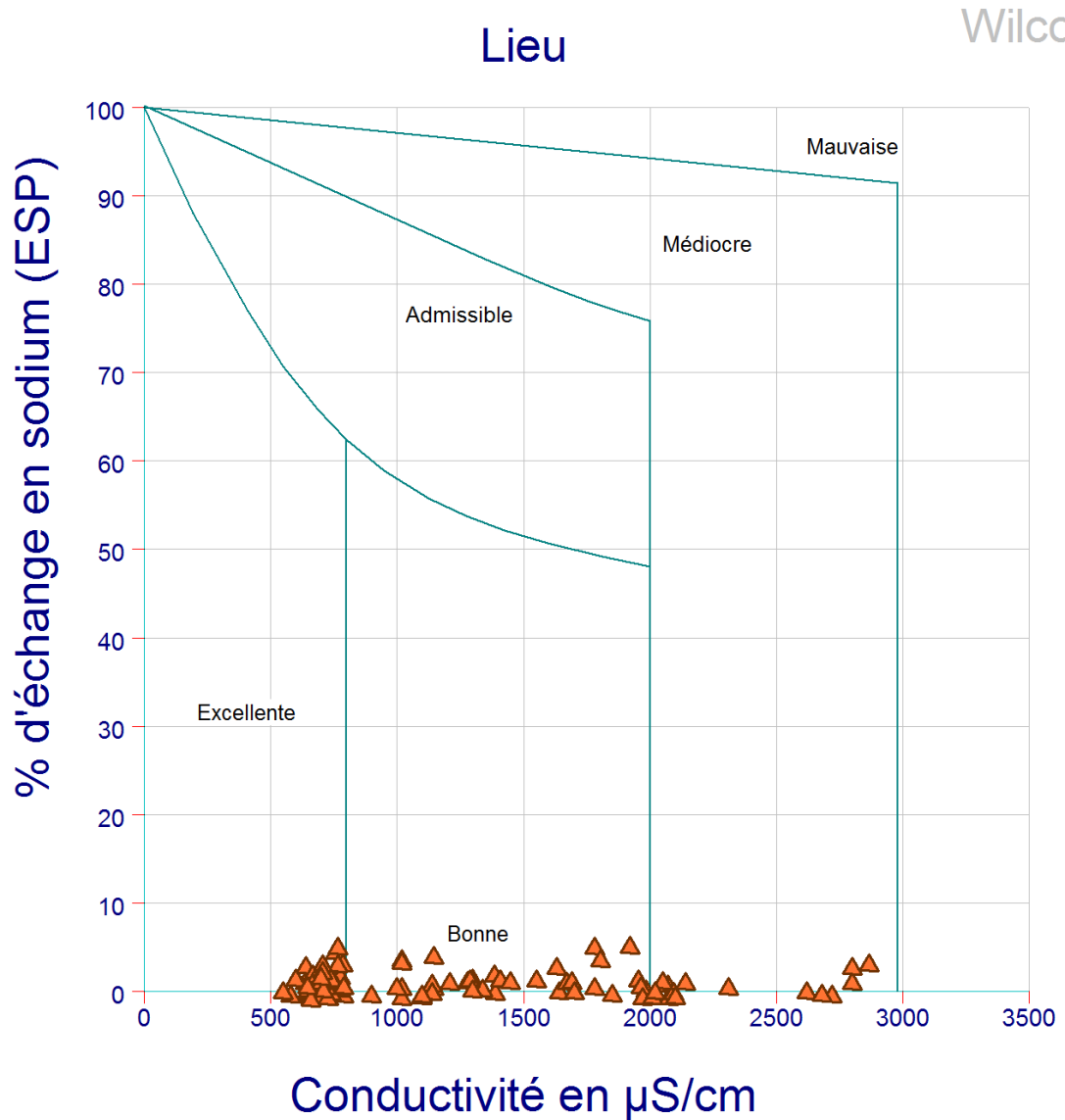


Figure V.19 : Diagramme d'EATON (SSP), Taoura

V.6.3. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation :

Cette carte (Figure V.20) est élaborée à partir du diagramme d'EATON, son observation montre une répartition des eaux en deux compartiments ;

- le premier caractérise les eaux de bonne qualité, ces dernières occupent la partie Nord et la partie Ouest de la zone d'étude,
- le second caractérise les eaux de qualité admissible, ces dernières sont localisées dans la zone Sud-est. Entre les deux communes de Merahna-Heddada,

- Les eaux d'excellente qualité se localise au centre de synclinale Taoura-Dréa et au extrême Est de la commune de Heddada,
- Les eaux de mauvaise qualité se localisent à l'aval du terrain. Elles s'expliquent par la nature des formations en ces deux endroits.

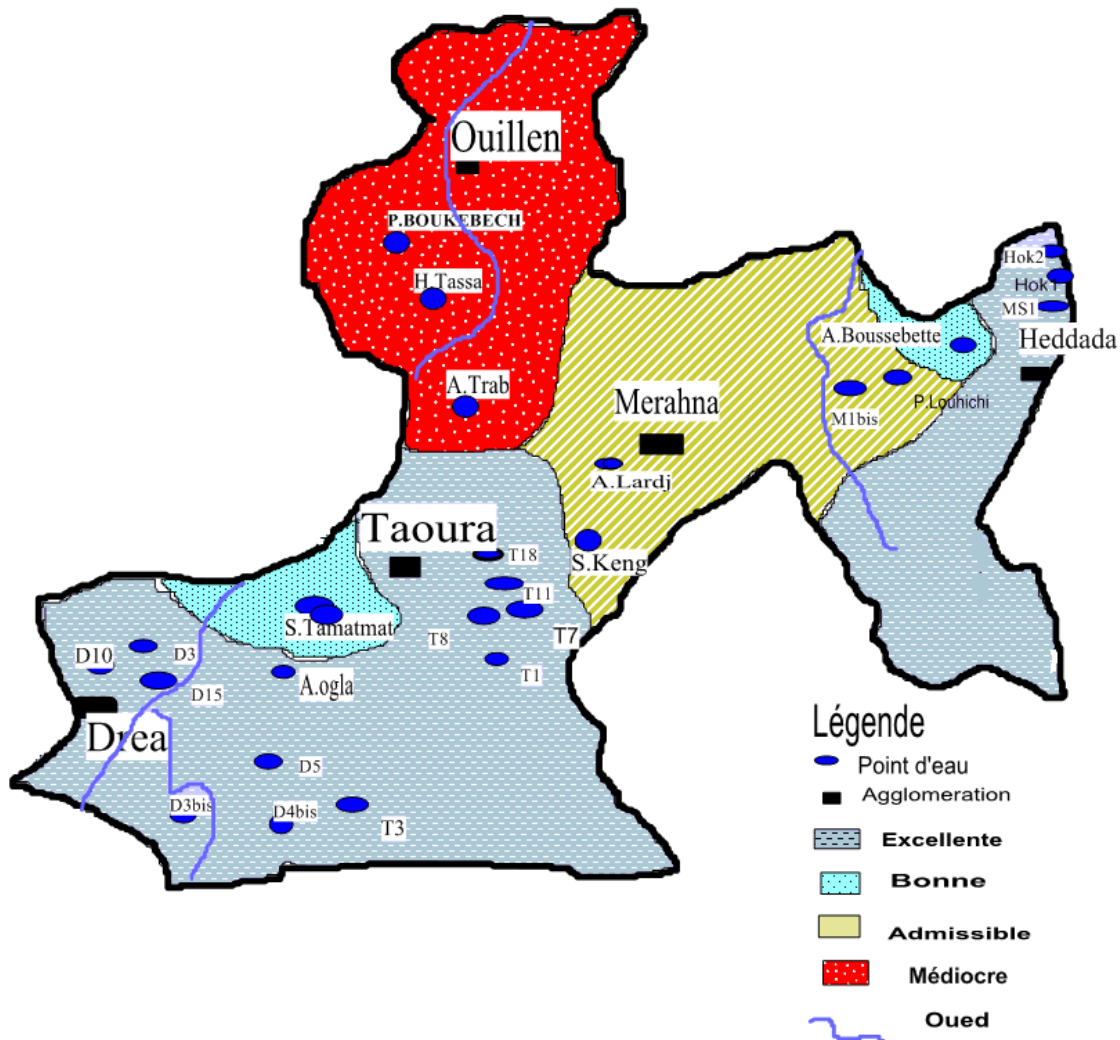


Figure V.20 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation issue de la méthode SSP

V.7. Conclusion

Le travail réalisé porte sur une région à vocation agricole où interfèrent des eaux de différentes origines d'où un risque d'utilisation de ces eaux pour l'irrigation. Les méthodes détaillées dans ce travail sont les plus usuellement utilisées. Les résultats obtenus montrent que les eaux de la région conviennent à l'irrigation dans leur globalité, cependant des contrôles durant la période estivale sont nécessaires, car au cours de cette période les pluies sont rares d'où un risque de détérioration de la qualité des eaux.

Chapitre VI : Modèle Réseaux de neurones artificiels

VI.1. Application du modèle de RNA (ou ANN)

Les réseaux de neurones artificiels, connus généralement sous l'acronyme **ANN** (Artificial Neural Network), sont des modèles mathématiques non linéaires de type "boîte noire" capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système.

Les performances de ces derniers dans la modélisation non linéaire ont été prouvées dans plusieurs domaines de l'ingénierie et de la science.

Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain (McCulloch et Pitts, 1943) en se basant principalement sur le concept des neurones.

VI.2. Connexions entre les neurones

Les réseaux de neurones sont organisés en couches ; ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation. Des entrées ($X_1, X_i, \dots, X_n$) sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connections entre les neurones se font par des poids ($W_1, W_i, \dots, W_n$) (Figure VI.1).

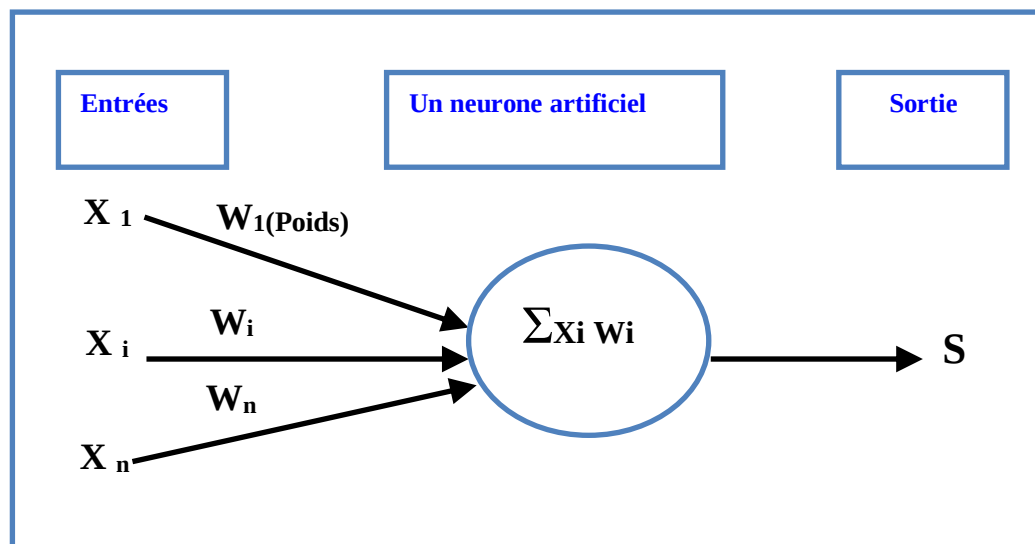


Figure VI.1 : Schéma d'un neurone artificiel

Il existe une grande variété d'agencements possibles de neurones artificiels (Lippmann, 1987), mais le type de réseau le plus utilisé est le Perceptron Multicouche (PMC). Ce réseau comporte une ou plusieurs couches de neurones artificiels pour capter les entrées, une ou

plusieurs couches cachées (MLP ou MultiLayers Perceptron) et une couche de neurones artificiels pour émettre les sorties du modèle.

Chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à d'autres neurones par la voie des poids (W_{ij}) [Najjar and Zhang (2000), Najjar and Ali (1998a) & (1998b)].

La fonction de transfert ou d'activation de non linéarité peut avoir plusieurs formes différentes. La fonction la plus utilisée est en général une somme pondérée de type sigmoïde car il s'agit d'une fonction continue, non décroissante, différentiable et bornée, mais aussi elle introduit de la non linéarité et dérivée d'elle-même.

À chaque connexion entre les neurones de deux couches successives est associé un poids modifiable au cours de l'apprentissage en fonction des jeux de données en entrée et en sortie.

Un PMC peut contenir autant de couches cachées que l'on désire mais il a été montré que quel qu'en soit le nombre, il existe un MLP équivalent avec une seule couche cachée. Ainsi, on se limitera dans cette étude à l'utilisation de MLP comportant une seule couche cachée.

Si les états des neurones de la couche d'entrée sont déterminés par les variables à l'entrée du réseau, les autres neurones (de la couche cachée et de sortie) doivent évaluer l'intensité de la simulation en provenance des neurones de la couche précédente par la relation suivante :

$$S_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} + b_j, \text{ Avec}$$

S_j : somme des poids entre les entrées du j ème neurone de la couche cachée ;

X_i : valeur de sortie du i ème neurone de couche précédente ; W_{ij} : poids synaptique du neurone i de la couche d'entrée au neurone j de la couche cachée, b_j est le biais ou le seuil d'activation du neurone j .

La réponse des neurones est une fonction d'activation non linéaire de type sigmoïde qui est défini par la formule suivante :

$$f(S_j) = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}, f(S_j) \text{ est pratiquement linéaire entre 0 et 1.}$$

Les valeurs des variables d'entrée ont été normalisées entre [0, 1] par le modèle selon l'équation suivante :

$$\bar{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \text{ Avec :}$$

X est la valeur de la variable d'entrée, $X_{\min}$ est sa valeur minimale, $X_{\max}$ est sa valeur maximale et $\bar{X}$ est la valeur de la variable normalisée.

VI.3. Architecture du réseau

L'architecture du réseau précise le nombre de couches qui le composent et le nombre de neurones dans chaque couche, ainsi que le poids des connexions. Un réseau de neurones artificiels est organisé en couches, chacune de ces couches comportant plusieurs neurones. Chacun de ces neurones qui se présente comme unité de calcul autonome, est relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes par l'imposition de poids.

VI.4. Création du modèle

Les données des paramètres de qualité des eaux de surface analysés au laboratoire Hydrosol et au laboratoire de l'Algérienne des Eaux; ont été employées pour créer le modèle du RNA en utilisant le logiciel STATISTICA neural network version 4.0.

Dans ce travail, un réseau de Perceptron multicouche a été choisi comme modèle du système.

À l'entrée du réseau nous avons utilisé les paramètres suivants : La concentration en ion de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), de chlorure (Cl^-), de sulfate (SO_4^{2-}), de bicarbonate (HCO_3^-), de Nitrites (NO_2), de Nitrates (NO_3), de potentiel hydrogène (pH), et de température, la sortie du réseau sera la conductivité électrique (CE).

Les paramètres statistiques utilisés dans ce travail sont : L'erreur moyenne des carrés RMSE (Root Mean Square Error), et le coefficient de détermination R^2 . Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(CE_i - \hat{CE}_i)^2}{N}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (CE_i - \hat{CE}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (CE_i - \overline{CE_i})^2}$$

Où CE_i est la valeur mesurée de la conductivité électrique, $\hat{CE}_i$ est la conductivité calculée par le modèle, $\overline{CE}$ est la moyenne de la conductivité mesurée et N le nombre de données de l'ensemble de calage.

R^2 montre la variation de la valeur de la conductivité électrique calculée ou estimée par le modèle de la régression linéaire.

En outre, le RMSE a été employé pour comparer l'exécution de MLP à d'autres types communs du RNA comprenant le RBF, le GRNN et linéaire.

Le réseau de MLP peut être représenté par la forme suivante :

$\{CE\} = ANN [Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} + K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, pH, NO_2, NO_3, Temperature,].$

Un schéma de ce réseau est donné sur la figure 2. Il montre une structure typique avec des signaux qui découlent des nœuds d'entrée, traversant les nœuds cachés, atteignant par la suite le nœud de sortie. La couche d'entrée n'est pas vraiment neurale : ces nœuds servent simplement à présenter les valeurs normalisées des variables d'entrée à la couche cachée voisine sans n'importe quelle transformation. Les nœuds des différentes couches ; cachées, de sortie et même d'entrée sont reliés entre eux. Cependant, les nœuds dans chaque couche ne sont pas reliés.

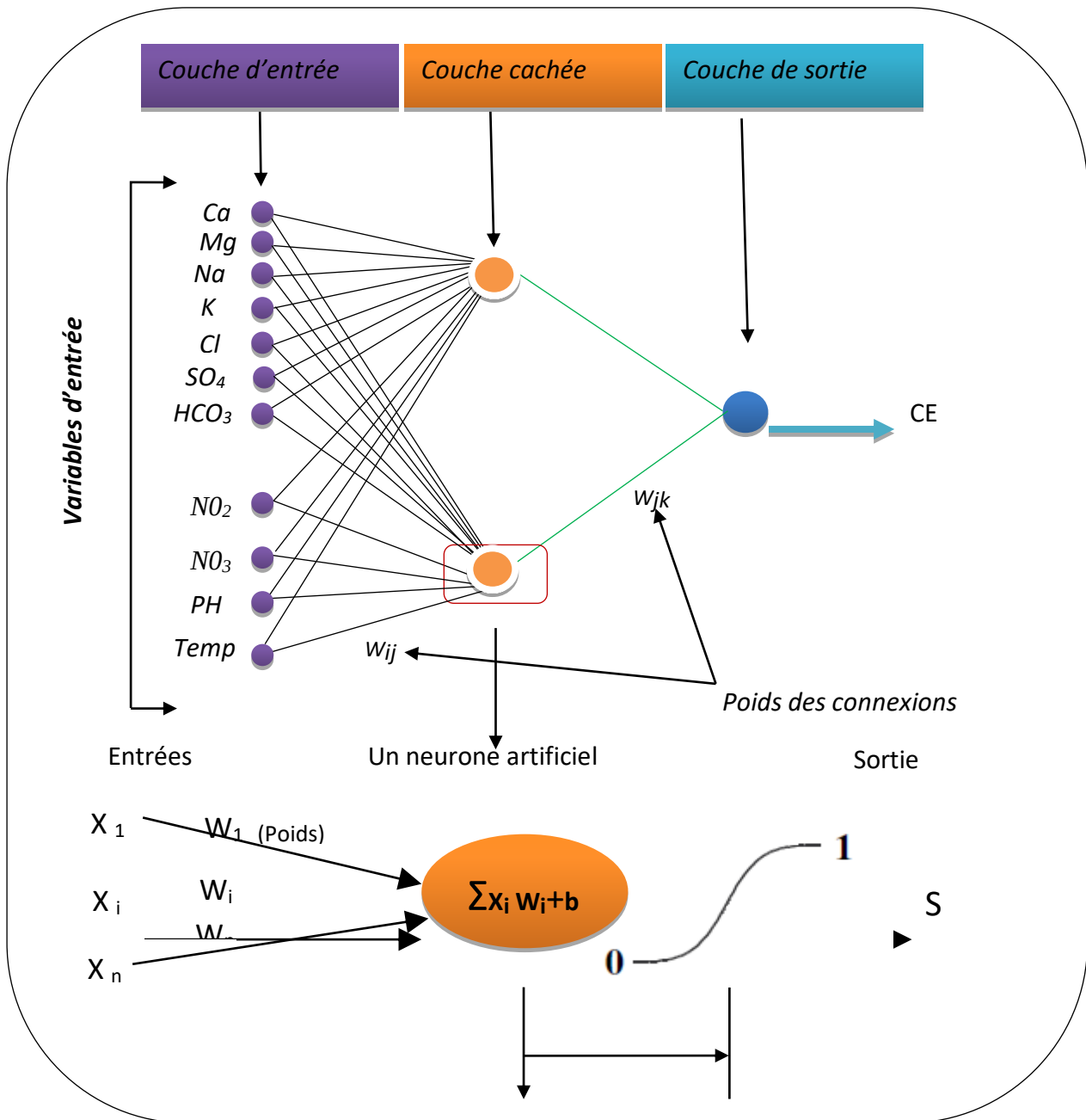


Figure.VI.2 : Illustration du réseau à 3 couches (MLP)

Un poids numérique est associé à chacun de raccordements d'entre-nœud. Le poids de W_{ij} représente la force des raccordements des nœuds entre l'entrée et la couche cachée tandis que W_{jk} représente la force des raccordements des nœuds entre la couche cachée et de sortie. Chaque nœud caché (j) reçoit des signaux de chaque nœud d'entrée (i) qui porte des valeurs standard (X_i) d'une variable d'entrée. Chaque signal vient à travers une connexion à un poids (W_{ij}). Le signal entrant net reçu par un nœud caché (Net_j) est la somme de poids des signaux

entrants, X_i , et les poids correspondants (W_{ij}), plus une constante reflétant la valeur seuil de nœud (TH_j).

$$Net_j = \sum_{i=1}^n \overline{X_i} W_{ij} + TH_j.$$

Le signal net dans un nœud caché (Net_j) est transféré de sa part à un nœud de sortie (O_j), en utilisant une fonction de transfert non linéaire (f) de type sigmoïde, donnée par l'équation

suivante:

$$O_j = f(Net) = \frac{1}{1 + e^{-Net_j}}$$

O_j passe comme signal au nœud de sortie (k).

Les signaux nets d'un nœud de sortie (Net_k)

$$Net_k = \sum_{j=1}^n O_j W_{jk} + TH_k$$

Les signaux nets d'un nœud de sortie (Net_k) sont transformés en utilisant une fonction de type sigmoïde à un résultat standard ou de mesure (OK) qui est :

$$\overline{OK} = f(Net_k) = \frac{1}{1 + e^{-Net_k}}$$

$\overline{OK}$: Standard pour produire le résultat de sortie.

$$OK = \overline{OK}(O_{\max}(k) - O_{\min}(k) + O_{\min}(k)).$$

La fonction sigmoïde devrait être continue, différentiable et limitée entre un intervalle de [0, 1]. (Riad et al 2004). La figure VI.3 montre le graphique de la fonction sigmoïde. L'erreur calculée entre la valeur réelle observée et la valeur calculée de la même variable est propagée par le réseau et les poids sont ajustés.

Les processus cycliques de l'alimentation et de la propagation d'erreur sont répétés jusqu'à ce que l'erreur de vérification soit minimale (Liu et al, 2003).

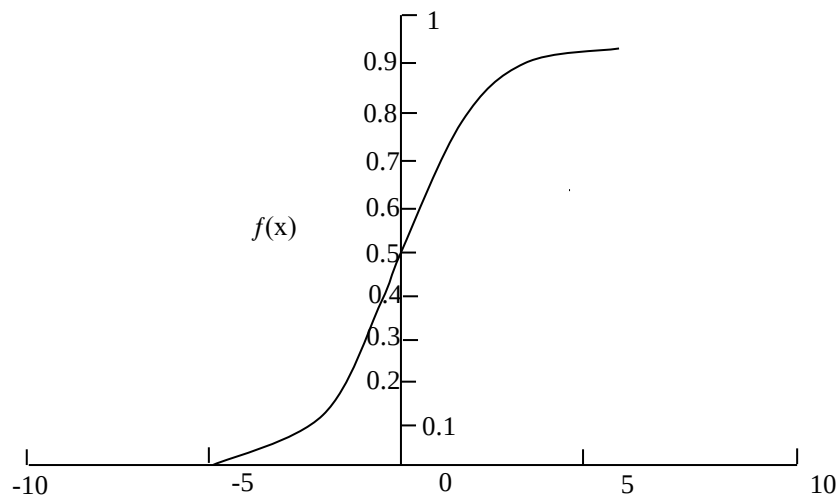


Figure VI. 3 : Fonction de transfert sigmoïde

VI.4.1. Calibrage et vérification du modèle

La vérification a été employée pendant l'arrêt des critères de détermination du nombre optimal de nœuds de la couche cachée (Braddock, Kremmer et Sanzogni, 1997) tout en évitant l'excès dans l'apprentissage (Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999)). La vérification en travers est une technique utilisée généralement en modèles d'ANN, elle a prouvé un impact significatif sur la division des données (Bruden, Brereton et Walsh, 1997).

Cette technique vise à former le réseau en utilisant un ensemble de données, et à comparer la performance par rapport à un modèle vérifié non utilisé dans l'apprentissage. Ceci examine la capacité du réseau de généraliser correctement sur l'ensemble des données en observant si l'erreur de vérification est raisonnablement basse.

L'apprentissage sera arrêté quand l'erreur de vérification commence à augmenter (Lallahem et Mania, 2002). Le Modèle a été divisé en sous-ensembles, un pour le calibrage (apprentissage), un pour la vérification en travers du réseau et un pour l'essai (validation). Cinquante pour cent des données ont été choisis pour la formation, 25% pour la vérification et les 25% restant pour examiner la validité de la prévision de réseau.

VI.4.2. Détermination des modèles d'entrées

Les modèles d'ANN ont la capacité de déterminer quelles entrées sont critiques. Ils sont utiles principalement pour des problèmes complexes où le nombre d'entrées est grand où aucune connaissance *a priori* n'est disponible pour déterminer les entrées appropriées (Lachtermacher et Fuller, 1994).

Dans ce travail, une analyse de sensibilité a été effectuée pour identifier l'importance des variables d'entrée. Ceci a indiqué quelles variables sont considérées les plus utiles pour être maintenues par le modèle RNA.

Les modèles RNA ont également la capacité d'éliminer les variables de basse sensibilité (c'est-à-dire qui n'ont aucun effet significatif sur l'exactitude du modèle).

VI.4.3. Résultats et discussion

Les types de réseaux considérés sont : MLP (3 et 4 couches), RBF, GRNN, et linéaire. Le meilleur modèle optimal du RNA trouvé est le MLP (3 couches) avec 13 nœuds cachés (figure VI. 4).

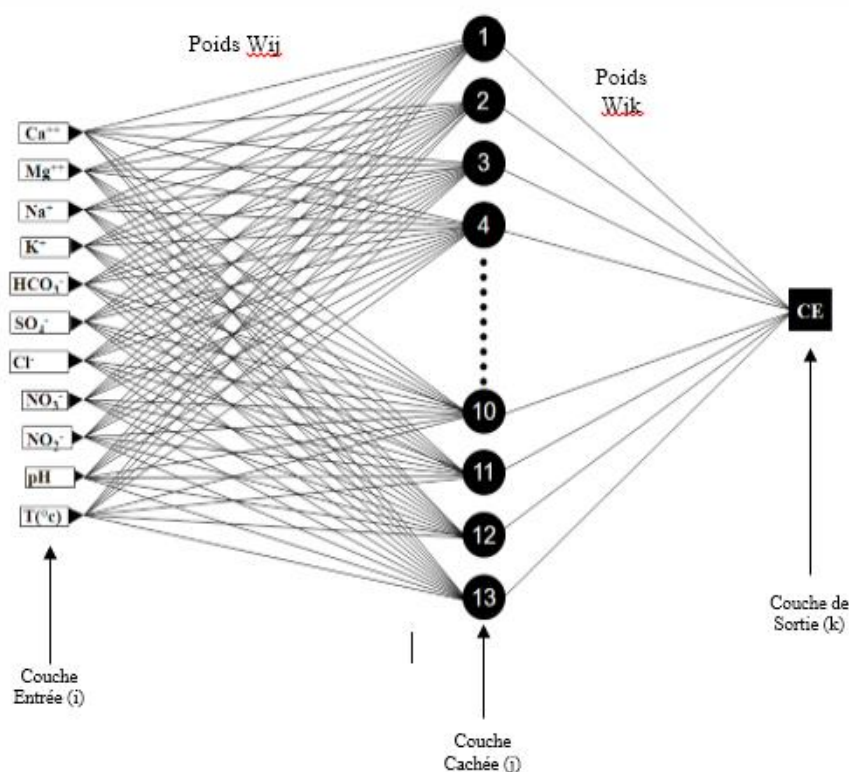


Figure VI. 4 : Architecture du modèle

L'erreur minimale est de 0,01387 comparée aux autres types de réseaux RNA (tableau 1).

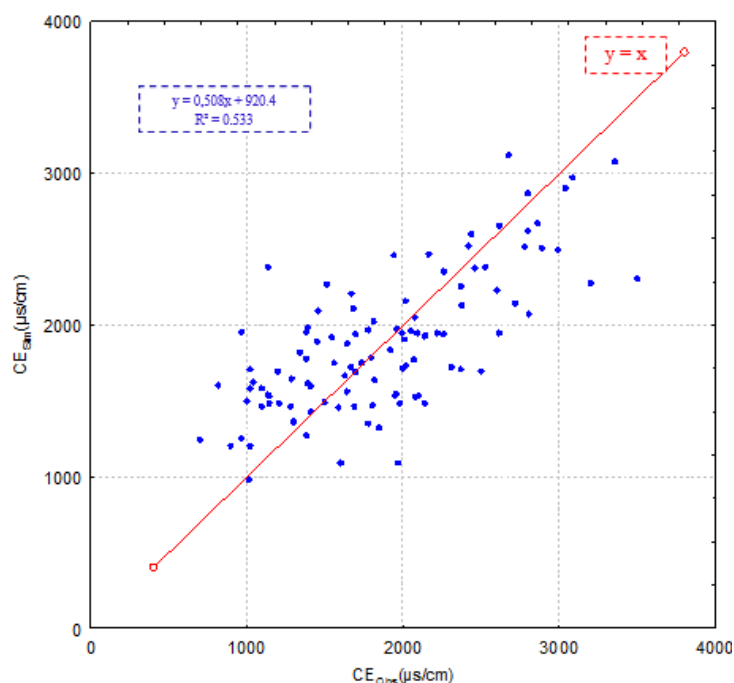
Tableau VI. 1 : L'erreur SOSE dans différents réseaux de neurone

ANN	Architecture	SOSE
RBF	11-12-1	0,02821
MLP (CG 47)	11-8-1	0,0195
MLP (BFGS 37)	11-13-1	0,01387

Le modèle a une performance acceptable dans la vérification avec un coefficient de corrélation de 74% pour l'apprentissage, et 65% pour la validation (tableau 2) ;il montre un bon accord entre la conductivité observée et simulée (Fig. VI.5).

Tableau VI. 2 : Paramètres statistiques de régression

	Min	Max	Standard residual		SOSE	Corre. coeff
			Min	Max		
Training	974,11	3117,49	-2.83	2.93	0.01145	0.74
Testing	1319,14	2898,43	-1.24	2.11	0.01387	0.65


Figure VI. 5 : Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée

L'analyse de sensibilité du RNA des variables de qualité de l'eau en phases d'apprentissage et de vérification indique que 6 sur 11 éléments respectivement selon le degré de sensibilité à savoir : le sodium (Na^+), la température, les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}), les chlorures (Cl^-) et le potassium (K^+), sont les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux étudiées. (Tableau VI. 3).

Tableau VI. 3 : Classement des variables par analyse de sensibilité

	Na^+	T	HCO_3^-	SO_4^-	Cl^-	K^+
Rang	1	2	<u>3</u>	4	5	6
Ratio	1,59	1,54	<u>1,23</u>	1,12	1,03	1,01

VI.5. Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que ce sont les réseaux de MLP qui s'avèrent être la meilleure structure du RNA pour modéliser et prévoir l'interaction des éléments influençant la qualité des eaux.

L'originalité de ce travail de modélisation réside dans l'utilisation des réseaux neuronaux (approche connexionniste) qui sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexions des neurones.

L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. C'est pourquoi le choix et l'application d'un modèle neuronal demeure un domaine de recherche très actif contrairement aux modèles stochastiques classiques.

Conclusion Générale et recommandations

Conclusion Générale

Cette étude nous a permis de déterminer la variabilité de la minéralisation globale des aquifères qui y sont contenus constituent la principale ressource en eau de la région. Ces ressources sont largement mobilisées et exploitées par plus de 122 point d'eau (forages, puits et sources).

L'étude de la géomorphologie a montré que le sous bassin d'Oued Medjerda appartient au grand bassin du Medjerda - Mellègue, il occupe dans sa partie Algérienne une superficie de 1411 Km², une longueur totale de 120 km se trouve en territoire Algérien et 340 km en territoire Tunisien.

Les formations géologiques sont très hétérogènes, caractérisées par des formations sédimentaires dont l'âge le plus ancien est le Trias jusqu'au Quaternaire; constituées généralement par des calcaires, des grès, des marnes, des cailloutis et des alluvions.

La région de Taoura est une cuvette d'effondrement entourée par des massifs karstifiés dont l'axe de direction NE –SW.

L'aperçu tectonique met en relief une tectonique souple (plis sous forme d'anticlinaux et de synclinaux) et une tectonique cassante (failles) au quelle s'ajoute une tectonique triasique très importante.

L'étude hydro-climatologique montre que la région d'étude est soumise à un climat tempéré à semi aride, caractérisé par deux saisons, l'une humide et froide allons du mois de Novembre au mois de Mai et l'autre sèche et chaude allant de mois de Juin au mois d'Octobre. Ce climat est influencé par une précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 568.6 mm /an et de 704 mm/an respectivement pour les stations de Souk-Ahras et de Ain Dalia, la température moyenne annuelle est de l'ordre de 16.01 °C. L'estimation du bilan hydrique nous donne une quantité d'évapotranspiration réel de 387.1 mm, une lame d'eau ruisselée environ de 71.89 mm et un volume d'eau infiltré de l'ordre de 23.90 million m³/an;

Les données hydro-géologiques montrent que la zone d'étude est caractérisée par quatre principaux aquifères :

- ☐ Un aquifère carbonaté profond à débit important.
- ☐ Un aquifère hétérogène peu profond à débit faible.
- ☐ Un aquifère alluvionnaire superficiel perméable.
- ☐ Un aquifère thermal.

L'importance de la minéralisation des eaux est en relation avec la nature géologique des terrains, qui influe fortement sur la composition chimique des eaux.

Les eaux souterraines sont des ressources nombreuses avec des débits très variables 60 à 0.5l/s, la plupart sont localisées dans les calcaires karstifiés de la nappe de Taoura. Ces eaux sont destinées essentiellement à l'alimentation des localités en AEP et en irrigation.

Les courbes piézométriques montrent une même morphologie dans toutes les cartes, ce qui traduit le même régime d'écoulement. Cependant, on note une diminution des cotes piézométriques dans les points d'eau en période d'étiage par rapport au période pluvieuse, due à la faible recharge de la nappe suite à la faible pluviométrie. Au cours de la période des basses eaux, entre le mois de Juin et le mois de Septembre le niveau statique atteint un rabattement, dû à l'exploitation intensive des forages pour utiliser leur eaux dans divers usages.

L'étude hydrochimique dans notre zone d'étude, montre la dominance des ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) par rapport aux ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) et aux ions salifères (Na^+ , Cl^-).

Ainsi les eaux bicarbonatées, ont pour origine le karst de Taoura, elles sont captées par les forages du synclinal de Taoura (T7, T8, T11) et ceux de Drea (D3, D5) avec une profondeur qui varie entre 100 à 250 m. Elles sont contenues dans les formations du Maestrichtien inférieure, du Campanien supérieur et du Turonien, à lithologie calcaire avec intercalation de marnes.

Les faciès chloruré et sulfaté calcique résultant des formations évaporitiques et les dépôts du remplissage Mio-Plio-Quaternaire sont très hétérogènes surtout en périodes d'observations, dans la partie Nord de l'aquifère (Merahna-Ouillen-Heddada), ce qui leur permet d'acquérir des concentrations importantes en Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} .

Les classifications de Richards et celles de Wilcox ont montré, que les eaux de la région, peuvent être considérées comme d'assez bonne qualité, cette catégorie d'eau est présente sur toute l'étendue de la zone. Dans la partie aval apparait une forte contamination de celle-ci par des nutriments d'origine agricole et par les rejets urbains, qui sont déversés sans aucun traitement préalable, ce qui contribue à la dégradation de la qualité des eaux. C'est le cas de la zone d'Ouillen, cependant des contrôles durant la période estivale sont nécessaires, car au cours de cette période les pluies sont rares d'où un risque de détérioration de la qualité des eaux. Les résultats obtenus d'après le modèle appliqué indiquent que l'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. C'est pourquoi le choix et l'application d'un modèle neuronal demeure un domaine de recherche très actif contrairement aux modèles stochastiques classiques.

Recommandations

Enfin, il reste à signaler que tout les axes de la présente étude nécessitent d'autres études d'approfondissement qui pourront faire l'objet d'autres travaux de recherche.

- ❖ Installer un réseau de piézométrie à travers la nappe, pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique .
- ❖ Rentabiliser et équiper les infrastructures d'observation et de mesure des paramètres climatiques, et ce en évitant les ruptures durant les observations.
- ❖ actualisation des cartes de vulnérabilité et à risque en fonction de l'évolution de la société et des pressions anthropiques qui s'y exercent. En effet un plan de gestion est un outil vivant.
- ❖ une étude socio-économique détaillée, argumentée et achevée de prévisions doit être menée afin de protéger les ressources en eaux pour une gestion, espérons durable.

Références Bibliographiques

- [1] A.B.H, (2001). Les cahiers de l'agence des bassins hydrographiques «A.B.H» ;
« Le bassin versant Medjerda Mellegue », N° 6. 24p.
- [2] A.N.B. (Agence nationale des barrages), (1998) : Etude de faisabilité des barrages
Rnem et Djedra. Volume 2 : notes explicatives, 155p
- [3] A.N.B & D.H.W., (2009). Données sur le barrage d'Ain Dalia, Souk-Ahras.
- [4] A.N.R.H., 2002. Atlas des températures et des évapotranspirations de l'Algérie du
Nord.
- [5] Aggoun B., (1993) . Etude hydrogéologique de la région de Terreguel en vue de
l'alimentation en eau potable de la ville de Sedrata. Mémoire d'Ingénieur I.S.T.
Université d'Annaba.
- [6] Alieva ZA (1977) Geothermal cross-section of forerunner of superdeep Saatly borehole.
Izv AN Azerb SSR, Ser: Earth Sci 6:115–117 (in Russian)
- [7] Aouadi & Zeghadnia S., (1990) : Approche hydrogéologique de la plaine de
Sedrata-Tiffech et estimation approximative des ressources et réserves en eau souterraine.
Mémoire d'Ingénieur I. S. T. Université d'Annaba.
- [8] Aoudjehane M., Bouzenoune A., Rouvier H. & Thibieroz J., (1992) : Halocinèse et
dispositifs d'extrusion du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). Géologie
Méditerranéenne, Marseille, t. XIX, pp. 273-287.
- [9] Araibia A.S ., (2009) Utilisation des SIG comme outil d'aide à la prise de décision dans
la gestion des bassins versants (cas de la région de Souk-Ahras, Algérie). Mémoire de
magistère, option hydraulique, centre universitaire Souk-Ahras, 123 p.
- [10] Athmani A.S., 2011. Evaluation de la qualité des eaux de surface cas du bassin versant
Oued Medjerda. Souk-Ahras. Thèse magistère en Environnement, Centre universitaire de
Souk-Ahras, pp 126.16 pages.
- [11] Aunay B., 2003. Evolution géologique, mise en place de la karstification et
thermalisme des aquifères périméditerranéen. pp 22.
- [12] AVINI G. (1969) – Méthodes statistiques appliquées aux Sciences de la Terre :
résistivités électriques et vitesses sismiques des molasses de Suisse romande et de
Savoie. Thèse de Doctorat. Univ. de Lausanne. 212 p.

- [13] Bakalowicz M., 2002. Hydrogéologie karstique. Cours DEA H.H.G.G. Université Paris-6. Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active, 278 p.
- [14] BCEOM, (2008). L'étude de diagnostic et de réhabilitation des systèmes d'alimentation en eau potable de la ville de Souk-Ahras. Rapport de l'étude du bureau d'étude français chargé de la réhabilitation des systèmes en eau potable de la ville de Souk-Ahras, pp14.
- [15] B.N.E.D.E.R. (Bureau national des études pour le développement rural), (1999) Etude d'aménagement Hydro-Agricole de la Medjerda. Phase I et II. 105p
- [16] B.N.E.D.E.R. (Bureau national des études pour le développement rural), (2007) : Etude d'exécution des périmètres irrigués de Sidi Badr et Hemissi. Mission I et II : Etude préliminaire et hydrologique, 25p.
- [17] B.N.E.D.E.R. (Bureau national des études pour le développement rural), (2007) : . Etude des périmètres irrigués de Sidi Badr et Hemissi. Mission III : Schéma d'aménagement. 18p
- [18] Boukari S., Djebbar Y., Abida H, (2014). Prix de l'eau en Algérie, un outil de gestion durable. 4^{ème} conférence internationale sur les ressources en eau dans le bassin méditerranéen, Sousse-Tunisie ,22-23 Mars.
- [19] Boulkenafet Z. (2008). Ressources en eau et perspective de gestion intégrée dans le bassin versant d'el-Kebir ouest. Thèse de magistère, option hydrologie, discipline : Ressources en eau, gestion intégrée, environnement et le développement durable, université de Annaba, pp109.
- [20] Bouroubi Y., 2009. Etude hydrogéologique du synclinal de la Taoura : fonctionnement et évaluation des ressources en eaux souterraines. Memoire de Magister en Hydrogeologie, Université mentouri Constantine, 182p
- [21] Bourouga M., 2015 Déminéralisation des eaux de forage de la région d'Ouled Abbès et son impact sur l'environnement (Souk Ahras, extrême Nord-Est Algérien). Memoire de Magister en Hydrogeologie, Université badji Mokhtar Annaba, Algérie pp120.
- [22] Bousnoubra H., (2002) : Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma, Souk-Ahras (N-E Algérien) (Evaluation, gestion et perspective ; Vulnérabilité et protection), Thèse de doctorat d'état, 159p.
- [23] Bouzenoune A., Rouvier H. & Thibieroz J., (1995) : Trias de l'Ouenza : contexte diapirique, zonation minéralogique et conséquences métallogéniques. Bulletin du service Géologique de l'Algérie, Vol. 6, N°1, pp. 3-24.
- [24] Braddock, R.D., Kremmer, M.L. and Sanzogni, L.: 1997, Feed-forward artificial neural network model for forecasting rainfall run-off. Proceedings international

- congress on modelling and simulation (Modsim). The modelling and simulation society of Australia Inc., Hobart, Australia, pp. 1653-1658.
- [25] Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research* 35 : 1191-1197.
- [26] Chouabi A., (1987) : Etude géologique de la région de Hammam N'Bail sud-est de Guelma, Algérie, secteur des zones externes de la chaîne de Maghrébines. Thèse de doctorat 3ème cycle, université Paul Sabotier, Toulouse.
- [27] Dairi S. (2009). Fonctionnement des stations d'épuration à boue activée à faible charge cas de la Step de Souk-Ahras. Mémoire de magistère, option ressources hydrique, centre universitaire de Souk-Ahras, pp48.
- [28] Dahdouha N., 2012. Etude diagnostique des forages partie essai par pompage. Bureau d'étude. Rapport de fin de sondage . Forage nappe de Taoura, Wilaya de Souk Ahras. Algérie .
- [29] David L., 1953. L'importance des déplacements tangentiels dans la zone sud-tellienne des environs de Souk Ahras. pp 287-289.
- [30] David. L., (1956) : Etude géologique des Monts de la haute Medjerda. Thèse de doctorat, paris, 289p
- [31] Debieche TH., & al., 2004. Utilisation des rapports caractéristiques dans la détermination de la salinité des eaux souterraines. Colloque international Terre et Eau. Université de Annaba 04,05 & 06 décembre 2004.
- [32] D.H.W., (2002) : Activité du service des eaux et de l'assainissement. Direction de l'hydraulique de la wilaya de Souk-Ahras « D.H.W ».
- [33] D.H.W., (2014 ; 2016) : Inventaire des différentes ressources en eau existantes rapport 12p
- [34] Djaba H., (2010) : Ressources en eau et perspectives de gestion intégrée dans le bassin versant de Medjerda (Souk-Ahras, Nord-Est d'Algérie) Mémoire de Magistère Universitaire Badji Mokhtar, Annaba. Algérie 150p.
- [35] Djabri L. (1987): Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tébessa - Essai de modélisation -Thèse de Doc. Ing. de l'Univ. des Sci. et Tech. de Franche-Comté - Besançon - 176 pages.

- [36] Djabri L. (1996): Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse - Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines - Doctorat ès-Sciences del'Université de Annaba - 280 pages.
- [37] Djebbar M., 2006.Le système karstique hydrothermal constantinois (algérie nord orientale) : structure et fonctionnement. Acte8 èmecolloque d'hydrogéologie en pays calcaire, AISH, -UNESCO, Neuchâtel, pp 89-92
- [38] DONEEN L.D (1962) The influence of crop and soil on percolating water. Proc. 1961 Biennial Conf. on groundwater recharge. P10.
- [39] D.R.E ., A.D.E. ,A.N.B., (2017) Ressources en eau et perspective de gestion intégrée dans le bassin versant Medjerda. Rapport sur les données de barrage d'Ain Dalia, Souk-Ahras: Ressources en eau, gestion intégrée, environnement et le développement durable, 42p.
- [40] Drogue C., (1969). Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques, d'après l'exemple de quelques karsts péri-méditerranéens. Thèse d'Etat, Montpellier, 455 p.
- [41] D.S.A., (2006) : Données sur le domaine d'agriculture. D.S.A. Souk-Ahras.
- [42] FAO. (2001).CropWat Model, version7.0, [ttp://www.fao.org/ag/AGL/aglw/cropwat.stm](http://www.fao.org/ag/AGL/aglw/cropwat.stm)
- [43] Ferraga A., 1986 . Ressources en eau des karsts du Nord Est Algérien- thèse pour obtenir le grade de docteur-Ingénieur. 166 p.
- [44] Friane F., (2000) : Ressources et approvisionnement en eau dans la région de SoukAhras (Essai de synthèse). Mémoire d'Ingénieur en hydrogéologie. Université BadjiMokhtar, Annaba, Algérie. 82p
- [45] Gouaidia L., & al. 2004. Application des méthodes statistiques pour expliquer le chimisme de la nappe alluvionnaire de Meskiana. Colloque international Terre et Eau. Université d'Annaba 04,05& 06décembre 2004
- [46] Guasmi I., (2005) : Dégradation de la qualité de l'eau dans le bassin versant de L'Oued Medjerda « Souk-Ahras ». Mémoire de Magister. Université El Hadj-Lakhdar, Batna, Algérie. pp 90.
- [47] GUASMI I, DJABRI. L, HANI. A, LAMOUROUX. C : POLLUTION DES EAUX DE L'OUED MEDJERDA PAR LES NUTRIMENTS. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, nÅ 05, Juin 2006, pp.113-119
- [48] Guebaili A., Djebbar Y. (2008). Approche non conventionnelle récupération des eaux de pluie (Souk-Ahras). 4ème conférence internationale sur les ressources en eau dans le bassin Méditerranéen, l'hôtel Aurassi-Alger, pp8, 22-23 Mars 2008.

- [49] Habes S., 2013. Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie, cas du lac Fetzara. Thèse de Doctorat, Université Badji Morkhtar, Annaba, pp. 217.
- [50] KhouldiaL, W _Djebbar Yassine and Yahia Hammar (2014) Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de La Medjerda (Nord-Est algérien). Revue des Sciences et de la Technologie, Synthèse Univ-Annaba, 29(), 6-23
- [51] Lachtermacher, G., & Fuller, J.D., (1994). Backpropagation in hydrological time series forecasting. In : K. W. Hipel, A.I. MacLeod, U.S. Panu & V. P. Singh (eds), Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering, Vol. 3, Time series analysis in hydrology and environmental engineering : 229-242.
- [52] Lallehem, S. & Mania, J., (2002). A linear and non-linear rainfall-runoff model using neural network technique : Example in fractured porous media. Journal of Mathematical and Computer Modelling. N°1, Vol. 55, N° 615.
- [53] Lannani. K., & Abdouni. L., 2008. Etude géo-électrique par sondage électrique dans la région de Taoura. Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Annaba, 81p
- [54] Lippmann, R.P., (1987). An Introduction to Computing with Neural Nets. IEEE ASSP Magazine, April 1987, 4 (2), 4-22. données hydrologiques. Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/ Inst. Nat. Polytech. De Lorraine, 95 p.
- [55] Mangin A, 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct. ès Sciences, Université de Dijon. 601 p.
- [56] Marsaud B., 1996. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse Doct. en Sciences, Université de Paris XI Orsay. 301p
- [57] Mebarki A., (2005) : Hydrologie des bassins de l'Est Algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état. Université de Constantine. 360 p.
- [58] Mrad D, Djebbar Y, Habib A and Dairi S (2015) Detection of trends and changes in monthly maximum daily rainfall in North Eastern Algeria. Conference sur l'hydrologie des grands bassins fluviaux de l'Afrique, Hammamet-Tunisie
- [59] Najjar, Y and Ali, H., (1998a). On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. Artificial Intelligence and Mathematical Methods in Pavement and Geomechanical Systems, Attouh-Okine (Editor): pp. 55-63.

- [60] Najjar, Y. and Ali, H., (1998b). CPT-Based Liquefaction Potential Assessment : A Neuronet Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No.75, Dakoulas, P. et. Al. (Editors), (1) : pp. 542-553.
- [61] Najjar, Y. and Zhang, X., (2000). Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors) : pp. 43-57.
- [62] O.R.G.M (1976): Rapport sur les résultats des travaux de recherche et d'estimation sur la fluorine de la fluorine dans les confins algéro-tunisiens Rapport. Inéd. (Jakentaieve).
- [63] O.R.G.M (1996): Rapport sur les résultats des travaux de prospections des polymétaux dans les confins algéro-tunisiens (El Ouasta, El Khanga, Dj. Ladjbel, Elma Labiod et Selsoul El Agab). Rapport. Inédit. (Bounames, A.).
- [64] O.R.G.M., (2002) : Projet de prospection des polymétaux dans le secteur de Dj. Harraba, Méridef, Dj. Def, et Es Souabaa (Région de Ouenza-El Aouinet). Rapport annuel 2002 (D. Bessekri et M. Benzeroual)
- [65] Ouled Zaoui S., 2010 Gestion et planification des eaux superficielle de la région de Souk-Ahras. Mémoire de magistère, option hydraulique, centre universitaire Souk-Ahras, 112
- [66] PERSON J. (1978) Irrigation et drainage en Tunisie problème posé par la salinité des sols et des eaux. Bull. BRGM (2ème série) section III, n°2 : 143-151.
- [67] Perthuisot V., Aoudjehane M., Bouzenoune A., Atira N., Laatar E., Mansouri A., Rouvier H., Smati A. & Thibièroz J., (1998) : Les corps Triasiques des monts du Mellegue (confins algéro-tunisienne) sont-ils des diapirs ou des Glaciers de sel ? Bulletin de la société géologique de France, t. 169, N° 1, pp 53-61.
- [68] Peyraube N., Lastennet R. & Denis A., 2012. Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using the PCO₂— sics relationship. J. Hydrology, 430-431
- [70] Piper A. M., (1944): A graphique procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Trans. Amer. Geophys. Union, 25, 914-923.
- [70] Riad, S., Mania, J. et Bouchaou, L., (2003). Variabilité hydroclimatique dans les bassins versants de du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). Revue de Sécheresse. (sous press).

- [71] RICHARDS L. A. (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handbook 60, USDA, Washington D.C, p160.
- [72] Rodier J-A., Colombani J., Claude J., Kallel R., 1981, Le bassin de la Medjerda, Monographies hydrologiques, ORSTOM, DRES (Tunisie), 451 p.
- [73] Rouabhia A., Baali F., Kherici N. & Djabri L., (2004): Vulnérabilité et impacts des activités anthropiques sur les eaux souterraines de la région d'El Ma El Abiod. Revue vecteur environnement. Volume 37, N°3.
- [74] Rouaibia F., (2009). La valorisation des eaux usées épurées dans l'irrigation à partir d'Oued Medjerda STEP-Sidi Bader. Thèse de magistère, option hydraulique, centre universitaire Souk-Ahras, pp. 39.
- [75] Senani S., 2011. Estimation et gestion des eaux souterraines de la wilaya de Souk-Ahras région de Taoura Memoire de Magister en Hydraulique, Universite Mohamed Cherif messaudi , 182p.
- [76] Soud, A. K. (1983) Etude tectonique et microtectonique des injections du Trias du bassin d'Essaouira pendant les compressions alpines dans l'avant-pays atlantique (Maroc). Thèse de 3ème cycle, Univ. Montpellier, France
- [77] Strojexport Prague., & progress (1977) modifie Progress (2010). Bureau d'étude Prospection Geophysique sur le synclinal de Taoura-Bordj M'raou, Souk-Ahras Algeria 87p.
- [78] Thibiéroz J. et Madre M. (1976): Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord, 67, 3-4, pp.
- [79] Thornthwaite C. W., (1954): The measurement of Potential Evapotranspiration: Seabrook, New-Jersey, 225p.
- [80] Todd K. (1980). Groundwater hydrology, J. Wiley & Sons, 2nd Edition, New York, USA.
- [81] Younsi A. (2001). Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salures des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée. Chaouia côtière, Maroc. Thèse de doctorat d'état, Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc.
- [82] Toubal A. W., (1993) : Etude du forage T1 dans le synclinal de Taoura. Mémoire d'Ingénieur I.S.T Université Badji-Mokhtar, Annaba
- [83] Vila J. M. et Charrière A. (1993): Découverte d'Albien calcaire et du Trias resédimenté au Dj. Boujaber (partie ouest Algérie); corrélation avec les forages et

- conséquences sur l'organisation du Crétacé inférieur des confins algéro-tunisiens. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t.316, Série II, pp. 243-249.
- [84] Vila, J.M. (1993) : Livret-guide Trias'93. Société Alg. Sci. Géol. Centre de Recherche et Développement, Boumerdès (11-12 septembre 1993). 26.
- [85] Vila J. M. (1994): Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens: Trias allochtone « glacier de sel » sous marins et vrais diapirs. Mémoire du Service Géologique de l'Algérie, N° 6, pp. 105-152.
- [86] Wilcox L.V (1948) The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture Tech. Bull. 1962, Washington DC
- [87] Wildi W., 1983. La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. 586 p

Cartes consultées:

- Cartes géologique et topographique de Souk-Ahras au 1/200000.
- Carte structurale au 1/500000 de la chaîne Alpine d'Algérie Nord orientale et des confins Algéro-tunisiens-1978.
- Cartes géologique et topographique de Souk-Ahras au 1/50000 avec notice explicative.
- Carte géologique et topographique de Oued Mougras au 1/50000.
- Carte géologique et topographique de Taoura au 1/50000 avec notice explicative.
- Carte géologique et topographique de M'Daourouch au 1/50000 avec notice explicative.
- Carte topographique de Oued Kébarit au 1/50000.
- Carte géologique et topographique de Djebel Ouenza au 1/50000.
- Carte Pluviométrie de l'Algérie du Nord au 1/500000, ANRH-1993.
- Carte des Évapotranspirations de l'Algérie du Nord au 1/500000, ANRH-2003.
- Carte des Écoulements moyens annuels de l'Algérie du Nord au 1/500000, ANRH-2005.

Annexe

Annexe Tableau 1 : des besoins en eau de la ville de Taoura

Dénomination	Unité	Horizons de calcul				
		2010	2015	2020	2025	2030
1. Population	Hab	12456	13419	14456	15573	16777
2. Dotation spécifique	l / j / hab	110	120	130	140	150
3. Besoins domestiques	m ³ / j	1370	1610	1879	2180	2517
4. les fuites	%	30	5	5	5	5
	m ³ / j	411	81	94	109	126
5. Besoins des équipements (20%)	m ³ / j	274	322	376	436	503
6. Besoins domestiques et des équipements Q _{moy j}	m ³ /j	2055	2013	2349	2725	3146
	l/s	23.79	23.30	27.19	31.54	36.41
Q _{max. j}	m ³ /j	2466	2415	2819	3270	3775
	l/s	28.55	27.96	32.63	37.85	43.69
Q _{min.j}	m ³ /j	1644	1610	1879	2180	2517
	l/s	19.03	18.64	21.75	25.23	29.13

Tableau 2: des besoin en eau récapitules de la ville de Merahna

Dénomination	Unité	Horizons de calcul				
		2010	2015	2020	2025	2030
1. Population	Hab	16836	18137	19539	21049	22676
2. Dotation spécifique	l / j / hab	110	120	130	140	150
3. Besoins domestiques	m ³ / j	1852	2176	2540	2947	3401
4. les fuites	En %	30	5	5	5	5
	m ³ / j	556	109	127	147	170
5. Besoins des équipements (20%)	m ³ / j	370	435	508	589	680
6. Besoins domestiques et des équipements Q _{moy j}	m ³ /j	2778	2721	3175	3684	4252
	l/s	32.15	31.49	36.75	42.63	49.21
Q _{max. j}	m ³ /j	3334	3265	3810	4420	5102
	l/s	38.58	37.79	44.10	51.16	59.05
Q _{min.j}	m ³ /j	2222	2176	2540	2947	3401
	l/s	25.72	25.19	29.40	34.11	39.37

Tableau3: des besoin en eau récapitules de la ville de Zarouria

Dénomination	Unité	Horizons de calcul				
		2010	2015	2020	2025	2030
1. Population	Hab	4864	5240	5645	6081	6551
2. Dotation spécifique	l / j / hab	110	120	130	140	150
3. Besoins domestiques	m ³ / j	535	629	734	851	983
4. les fuites	En %	30	5	5	5	5
	m ³ / j	161	31	37	43	49
5. Besoins des équipements (20%)	m ³ / j	107	126	147	170	197
6. Besoins domestiques et des équipements $Q_{moy\ j}$	m ³ /j	803	786	917	1064	1228
	l/s	9.29	9.10	10.62	12.32	14.22
$Q_{max.\ j}$	m ³ /j	963	943	1101	1277	1474
	l/s	11.15	10.92	12.74	14.78	17.06
$Q_{min,j}$	m ³ /j	642	629	734	851	983
	l/s	7.43	7.28	8.49	9.85	11.37

Annexe sondage électrique

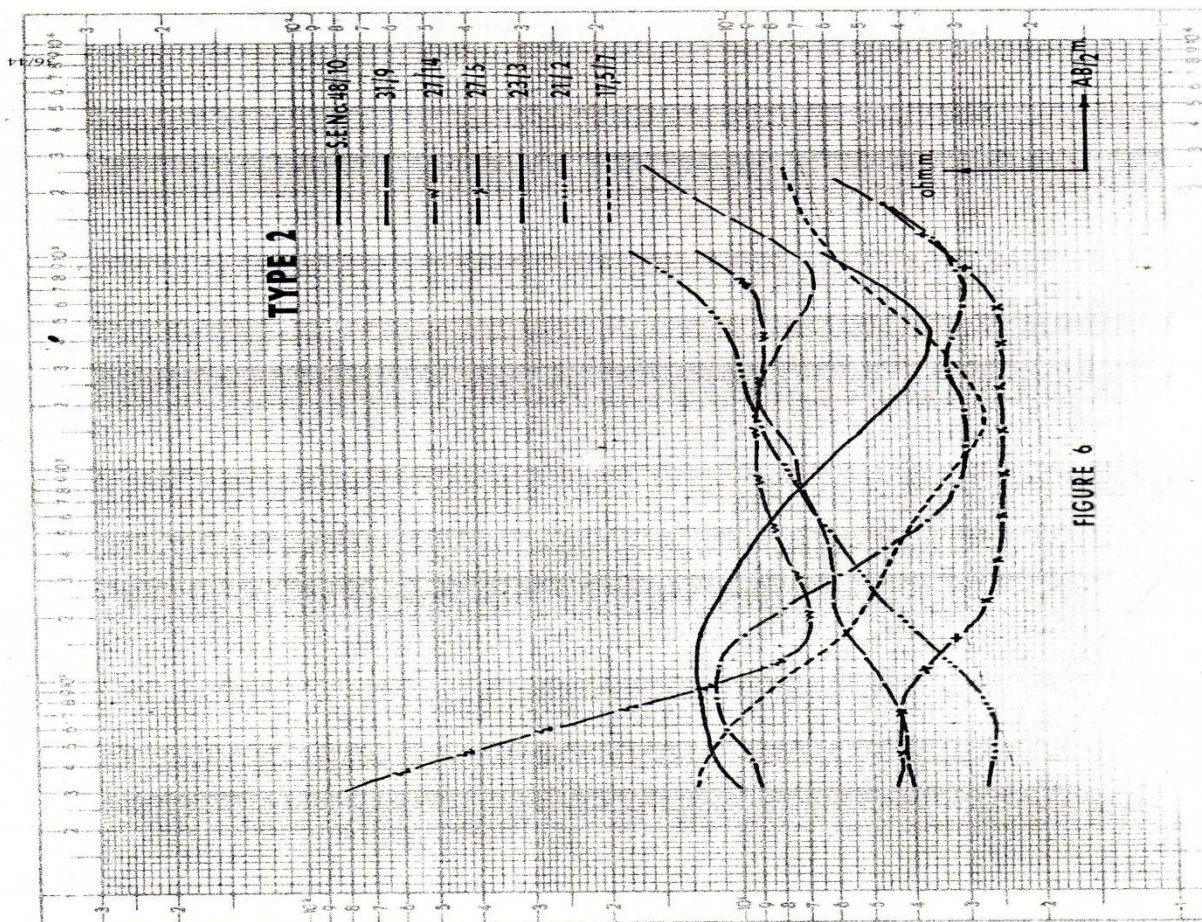


FIGURE 6

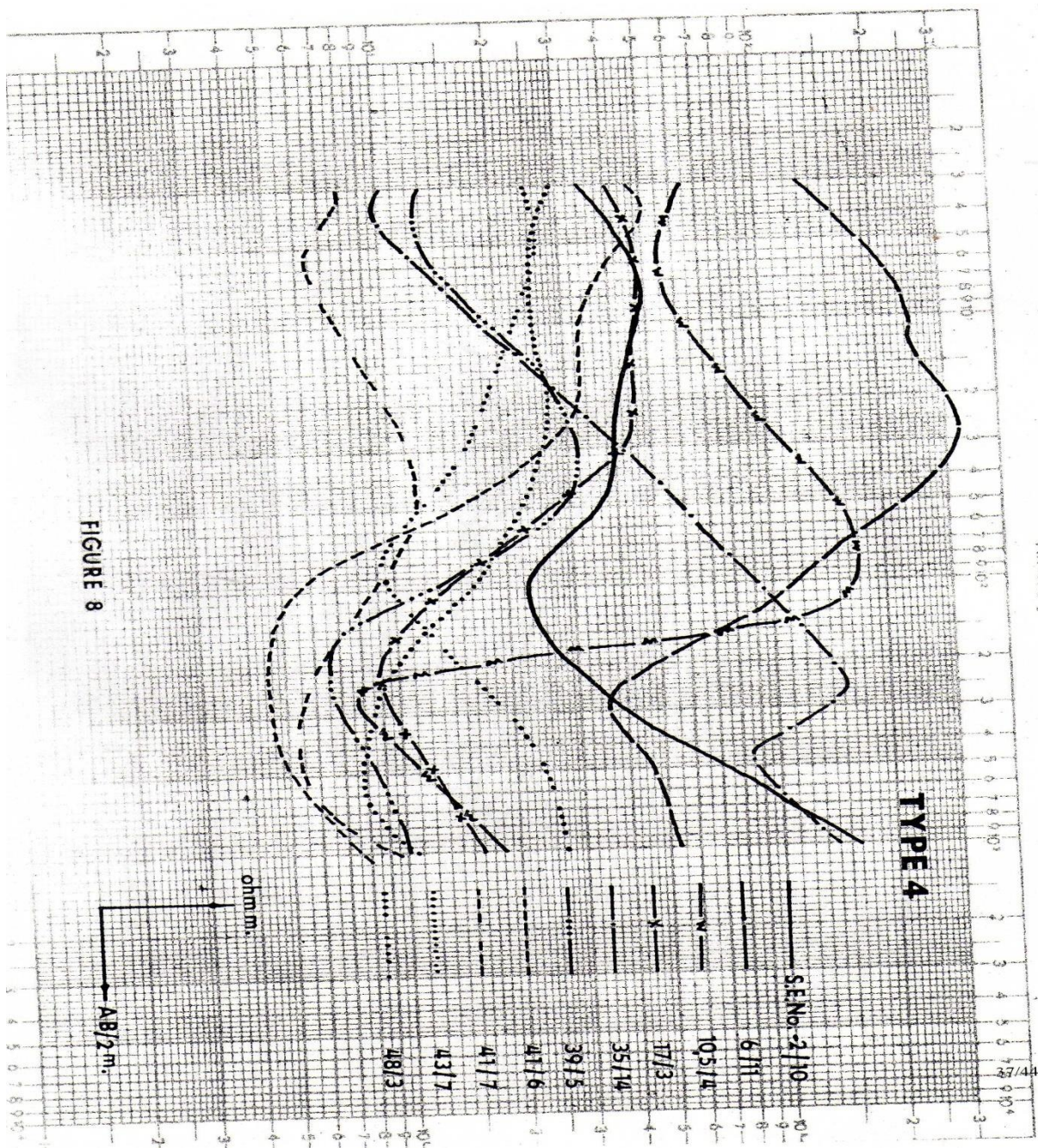


FIGURE 8

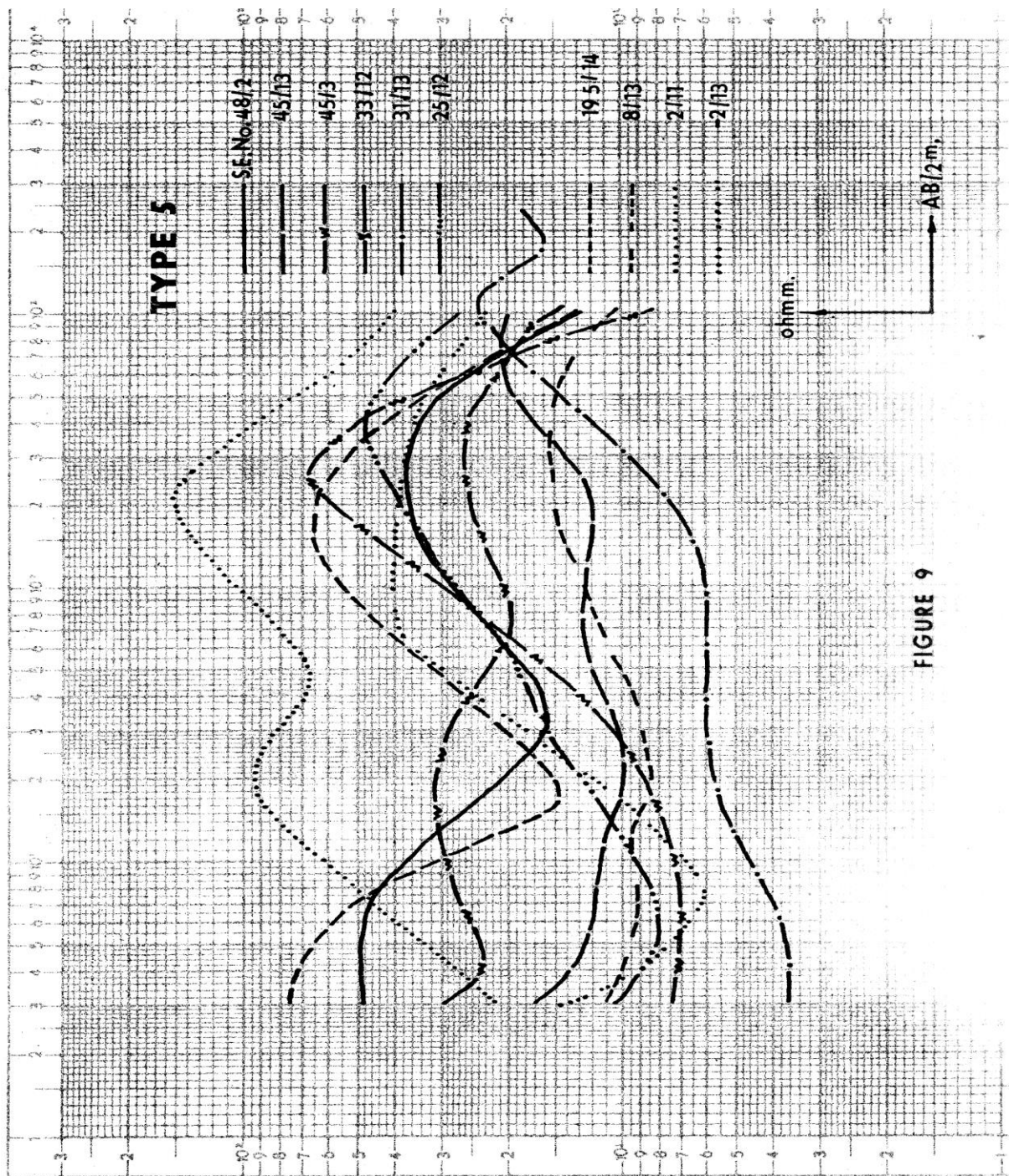


FIGURE 9

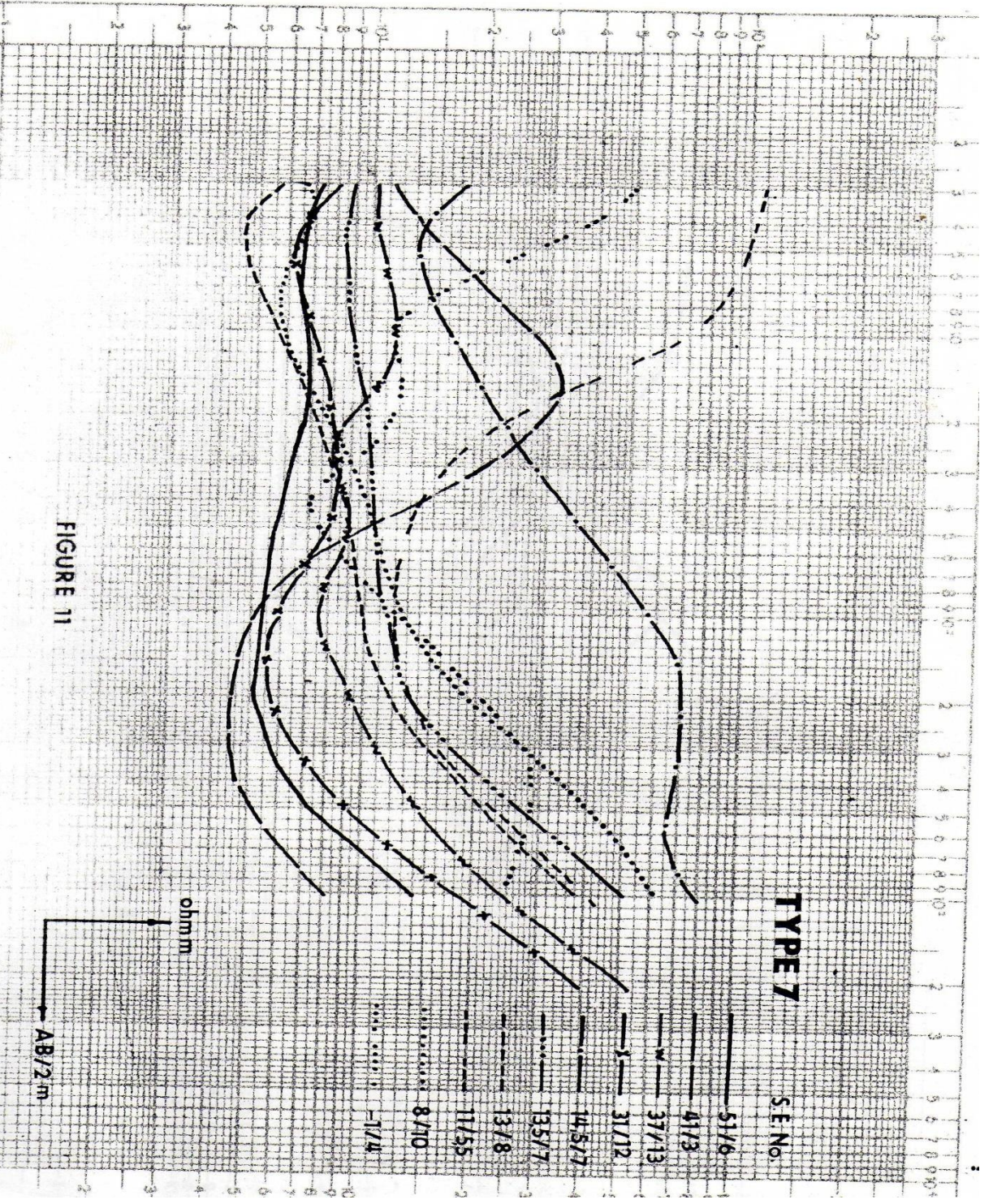


FIGURE 11

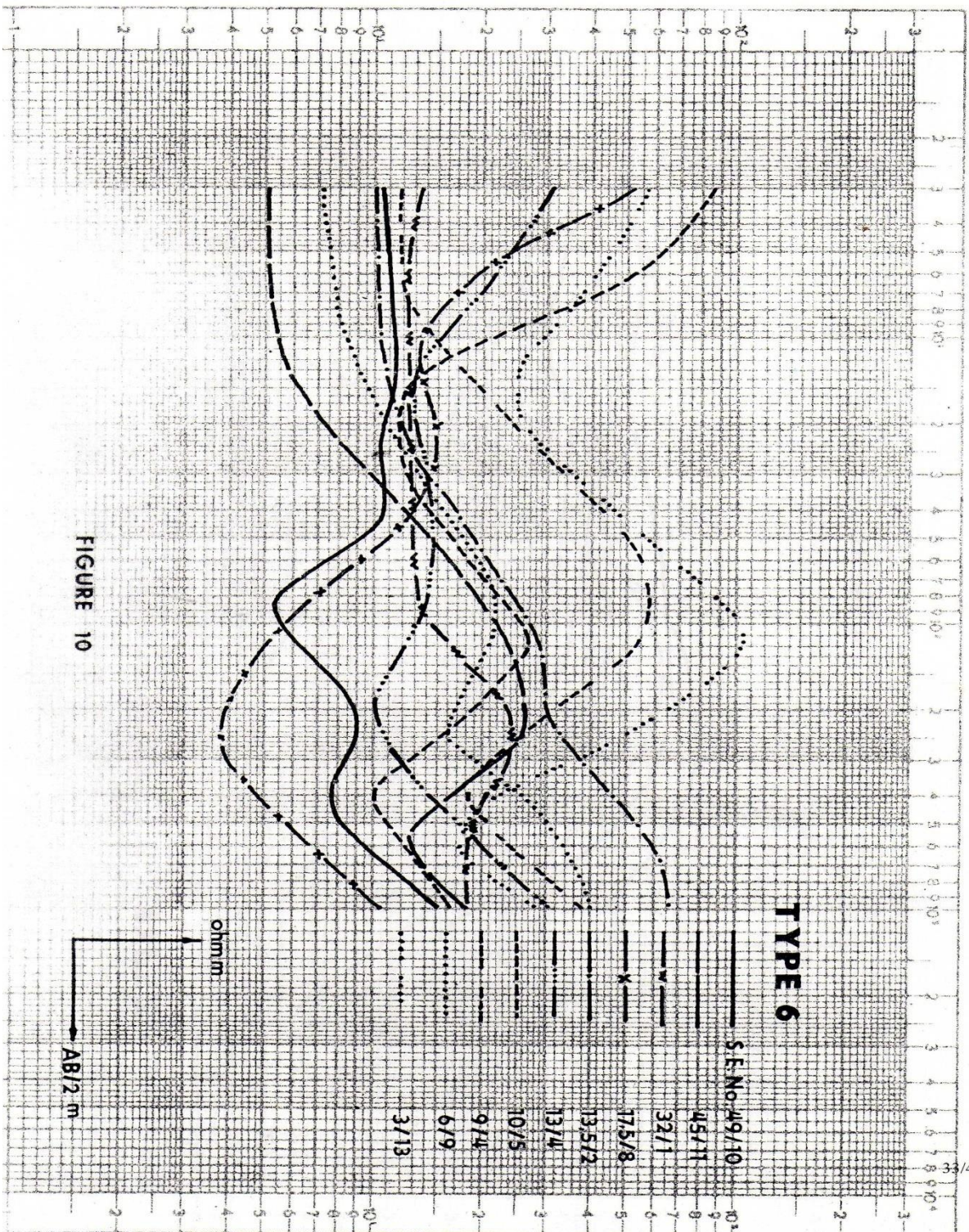


FIGURE 10

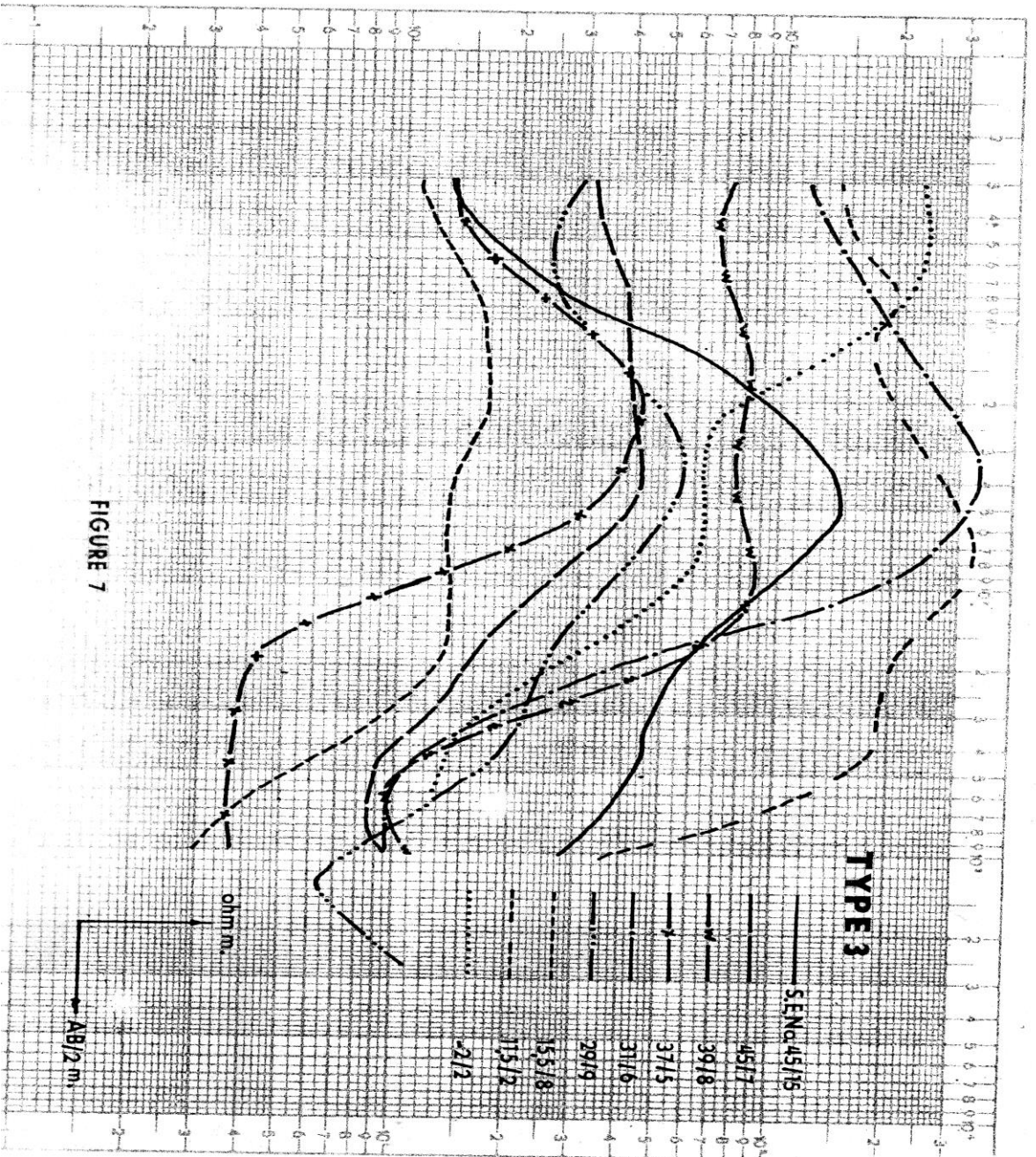


FIGURE 7

Caractéristiques chimiques des eaux de la nappe du synclinal de Taoura, Souk Ahras (Nord-Est de L'Algérie).

Chemical characteristics of waters aquifer of the syncline of Taoura, , Souk Ahras (North-east of Algeria)

Farid Rouaibia ^{1*} & Larbi Djabri ^{1,2}

¹ *Département d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.*

² *Laboratoire de Ressources en Eau et Développement Durable, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie*

Soumis le : 16/01/2017

Révisé le 21/07/2017

Accepté le : 26/09/2017

ملخص

نوعية المياه الباطنية مشروطة بالمكونات التي تخترقها أثناء تدفقها كذلك المياه التي تعبر المكونات الكلسية تكون غنية بالبيكربونات والتي تعبر المكونات الملحية تكون غنية بالكبريتات أو بالكورابر. هذه الملاحظة يمكن أن تطبق على المياه الباطنية الكلسية لمدينة تاورا الممونة من طرف مياه الأمطار أو من طرف المياه الآتية من مختلف المناطق المنحدرة التي تصب في اتجاه الحوض الهيدروغرافي مجردة-ملاق جنوب شرق مدينة سوق أهراس. الدراسات الجيولوجية المنجزة تبين بأن المكونات الظاهرة تكون شكل مقعر هذه الأخيرة تحتوي على مستوى من المياه الباطنية ما يخفي الطبقة الكتومة التي يتم استغلالها عن طريق الآبار الارتوازية (T1, T3, T7, D3 D5). ملاحظة السلال الطبقة تبين عدم تجانس في البنية ما يعطي للمياه تنوع في تركيبها الكيميائي. إن دراسة وتحليل العينات تبين بأن مياه المنطقة المدروسة غنية بنسبة كبيرة بالبيكربونات و الكالسيوم في حين بعض النقاط تتميز بغناها بالكورابر و الكبريتات , هذه الأيونات يتبعها الصوديوم و الكالسيوم مما يثبت أثر المكونات على نوعية المياه التي تخترقها. المياه المأخوذة تستعمل في السقي و الشرب وبهذا خطر التلوث لا يمكن تجاوزه وهذا ما يثبت تركيز النترات (< 50 مغ/ل).

الكلمات المفتاحية: طبقة كراسية- مجردة-ملاق- الجيولوجية- التلوث- نوعية المياه .

Résumé

La nappe karstique de Taoura est alimentée à partir des eaux de précipitations ou par les eaux en provenance des différentes zones drainant le bassin versant transfrontalier Medjerda-Mellegue dans la partie Sud-est de la ville de Souk Ahras. Les études géologiques réalisées ont montré que les formations à l'affleurement forment un synclinal, ce dernier contient un niveau aquifère, qui recèle une nappe captive, exploitée par plusieurs forges (T1, T3, T7, D3, D5). L'observation des logs stratigraphiques montre une hétérogénéité lithologique. Les prélèvements et les analyses réalisés, ont montrés que les eaux de la zone d'étude sont en grandes partie riches en bicarbonates et en calcium. Cependant quelques points se caractérisent par la domination des chlorures et des sulfates. Ces anions s'accompagnent de sodium ou de calcium, confirmant ainsi l'impact des formations traversées sur la qualité des eaux. Les eaux prélevées sont utilisées pour l'irrigation et l'AEP. De ce fait les risques de pollutions sont quasi inévitables, confirmée par les concentrations élevées des nitrates (> 50 mg/l).

Mots Clés : *Nappe karstique- Medjerda-Mellegue- Géologique-Pollution- Qualité des eaux.*

Abstract

The karst aquifer of Taoura is fed from waters of rainfall or by waters from the different draining zones the basin pouring cross-border Medjerda-Mellegue in bet it south of the East of the city of Souk Ahras. Accomplished geological studies showed that trainings in outcrop form a synclinal, this last contains a water-bearing level, which conceals a captive tablecloth. This last is exploited by several smithy (T1, T3, T7, D3, D5). The observation of logs stratigraphic shows lithological heterogeneity, what is going to confer on water a variation of its chemical composition. Sample and analyses accomplished, showed that waters of the zone of study are in big left rich in and in calcium, bicarbonate however some points are characterized by the domination of chlorides, sulphates, these anions are accompanied by sodium or by calcium. Confirming so the impact of trainings crossed on the quality of waters. Taken a sample waters are used for irrigation and AEP. Of this fact risks of pollutions are quasi unavoidable, are confirmed by concentration of nitrates (> 50 mg / l).

Keywords: *Karst aquifer- Medjerda-Mellegue- Geological- pollution-Quality of waters.*

* Auteur correspondant : rf_0310@hotmail.fr

1. INTRODUCTION

Les eaux sont emmagasinées dans deux types de milieux, le premier dit poreux et le second dit fissuré. Le second type est particulièrement présent en Europe mais peu développé au Maghreb. En Algérie le karst a une extension limitée, il est présent au Nord dans quelques régions telles que Tlemcen (B. Colignon, 1986) [1], la Kabylie (A. Abdeslam, 2001) [2], Constantine (M. Djebbar, 2005) [3], Tébessa (H. Zerrouki, 2014) [4], Chéra (F Baali, 2006) [5] et Souk Ahras (Y. Bouroubi, 2009) [6]. Par contre dans le Sud Algérien, le karst est présent dans la région de Biskra (A. Messameh, 2012) [7], Ouargla (M. Djidel, 2012) [8]. Le réservoir karstique se caractérise par sa discontinuité et doit répondre à certaines conditions, telles que obéir au schéma du karst élaboré par C. Drogue (1969, 1971) [9]. Ce dernier définit le karst comme étant un paysage qui résulte de processus particuliers d'érosion, voire la karstification. Ces processus sont gouvernés par la mise en solution des roches carbonatées par l'infiltration de l'eau des pluies chargée en CO_2 gazeux atmosphérique et biologique. En surface les carbonates karstifiés offrent différentes formes telles que les dolines, les poljés. Les paysages souterrains tels que les grottes et les gouffres, sont sculptés par les écoulements d'eau souterraine. Dans les carbonates karstifiés, les eaux circulent et émergent des exutoires avec un débit assez important.

La genèse et la structure originale du karst sont connues à travers différents travaux de recherches sur le karst, anciens et récents, sur le fonctionnement du système karstique [9-12].

Les mécanismes responsables de la constitution d'un karst [13], relèvent deux ensembles de processus :

- les processus chimiques de dissolution de la roche (l'eau solvant).
- le moteur fournissant l'énergie nécessaire au transport et à l'évacuation du soluté (l'eau agent de transport).

Ces deux ensembles de processus constituent le potentiel de karstification d'un massif carbonaté. Le solvant est l'eau contenant du CO_2 pédologique dissous, le moteur est la gravité (charge Hydraulique).

Le présent travail porte sur un système, caractérisé par l'interférence de deux nappes :

-la première, contenue dans des formations sédimentaires, caractérisant ainsi un milieu poreux reposant sur un karst.

-la seconde karstique recouverte par le karst situé au niveau d'un synclinal comblé par des formations sédimentaires (sables, argiles...). Ce comblement fait que les formations karstiques se trouvent dissimulées sous les formations à l'affleurement rendant toute interprétation difficile.

Le synclinal de Taoura, occupe un sous bassin d'environ 826 km^2 de superficie, il est situé aux confins de la frontière Algéro-Tunisienne, au Sud-est de Souk Ahras [14]. Le système est à lithologie et structuration complexe (terminaison Nord-est de l'avant pays atlasique) comprend plusieurs aquifères qui mettent à jour de nombreuses sources froides et très peu de sources chaudes [15].

La nappe de Taoura est de type karstique et est située au Sud-est de la ville de Souk Ahras. Cet aquifère s'étend jusqu'à la frontière Tunisienne [16]. Les eaux issues de cette nappe sont destinées à l'alimentation en eau potable de plusieurs localités et à l'irrigation de nombreux périmètres, d'où un double risque :

- le premier est lié à la surexploitation de la nappe,
- le second reste l'exposition des eaux de la nappe à la pollution par le retour des eaux d'irrigation.

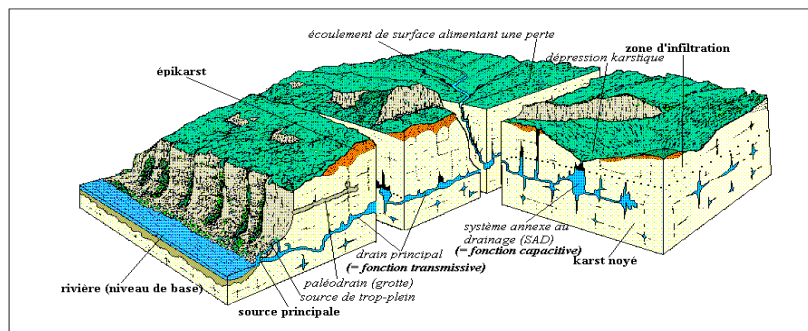


Figure 1. Représentation schématique d'un aquifère karstique [10].

2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone d'étude est située à trente kilomètres au Sud de la ville de Souk Ahras (Fig.2). Elle est limitée :

- au nord par les communes de Khedara, Ouled Moumen, Ain Zana et Ouled Driss,
- au sud par la commune de Sidi Fredj et la Wilaya de Tébessa,
- à l'est par la frontière algéro-tunisienne et
- à l'ouest par le chef-lieu de la wilaya, Zarrouria, M'Daourouch et Oued Kebrit.

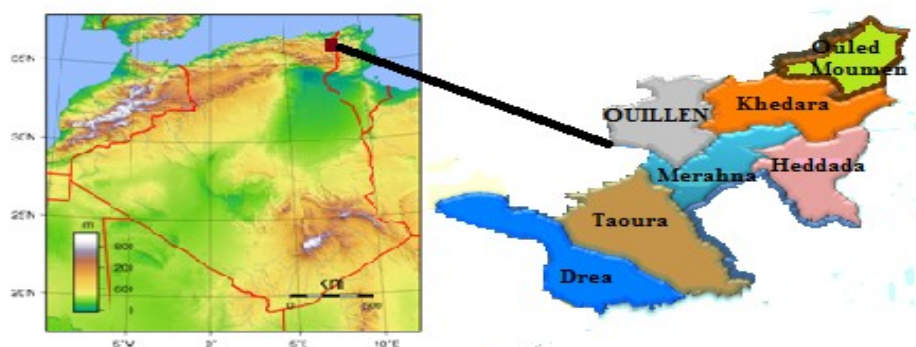


Figure 2. Situation géographique de la zone d'étude

3. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE : (Notion de Karst, de Piézométrie, d'Hydrodynamique et de Géophysique)

3.1 Géologie

Les données géologiques combinées aux informations extraites des colonnes litho- stratigraphiques des forages, indiquent la superposition de plusieurs formations géologiques, ces dernières peuvent receler des nappes d'eau. La paléo-géologie de la région montre que ces formations se sont formées lors de l'orogénèse des chaînes tello-rifaines ou Maghrébides, au moment de l'édifice alpin. De ce fait, les formations d'âges Mésozoïque et Cénozoïque ont subi les effets des phases tectoniques en succession caractérisant la région de Souk Ahras [17]. Ainsi, la zone d'étude comprend au Nord des terrains allochtones composés d'unités du domaine interne, du domaine des Flyschs et du domaine externe, au Sud et à l'Est jusqu'aux confins Algéro-tuniens, affleure un ensemble intensément plissé et fracturé de l'avant pays atlasique [18]. La région de Taoura, se caractérise par des structures anticlinales de direction SW-NE. Ces structures sont d'âge allant du Crétacé à l'Eocène [19]. Les failles de direction NW-SE et NE-SW (Fig. 3), sont de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Les failles verticales ont structuré l'ensemble des terrains en effondrements au cours du Plio-quatérnaire. Ce qui explique la discontinuité des nappes et la disparition de l'aquifère karstique au niveau de la plaine Drea - M'Daourouch.

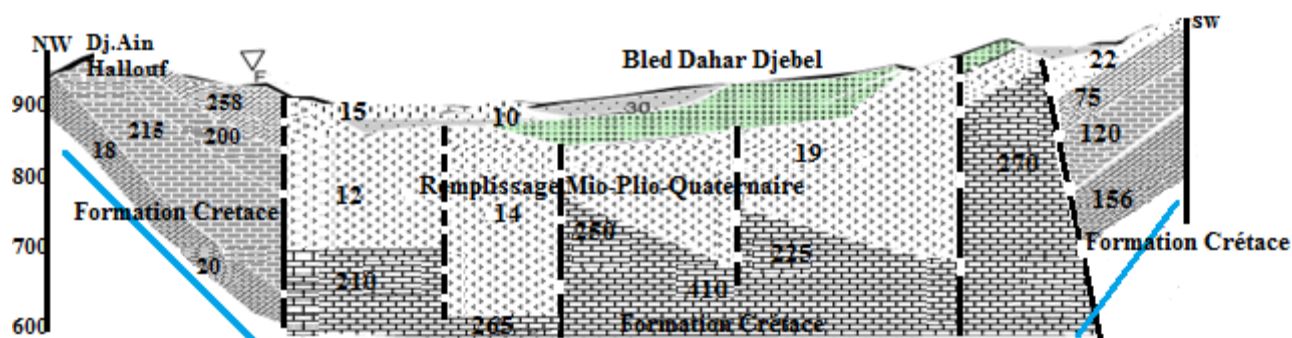


Figure 3. Une tectonique cassante entraînant la discontinuité des nappes.

3.2 Hydrogéologie de la zone d'étude

Les études réalisées, montrent la présence de deux nappes (Fig. 3 et 4) :

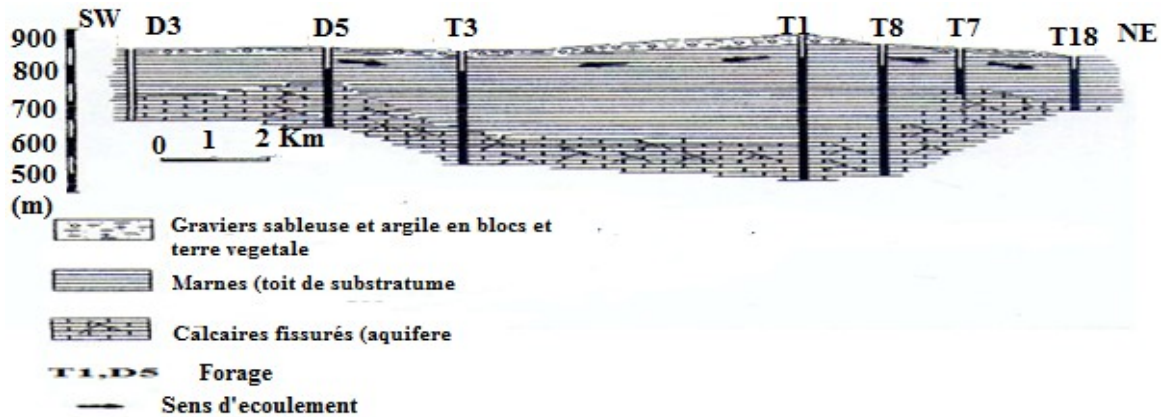


Figure 4. Coupe hydrogéologique dans le synclinal de Taoura.

- la première, libre (d'environ 40 m d'épaisseur) contenue dans les formations Mio-Plio-Quaternaire, riches en marnes, conglomérats, sables, graviers ... constituant le remplissage du synclinal de Taoura. Cette nappe est surtout captée par les puits domestiques dans la partie Nord-est vers Merahna [20].
- la seconde considérée comme captive, constituée par des marnes et des calcaires fissurés, datés du Maestrichtien inférieur au Campanien moyen. La nappe occupe le centre de Taoura et disparaît vers le Sud-ouest lors la formation de la chaîne anticlinale vers Madour.

3.3 Indications Piézométriques

Le présent travail porte sur la nappe libre. Les cartes piézométriques réalisées se rapportent aux années 2011 et 2012. L'observation de ces cartes (Fig. 5 et 6), montre un écoulement dirigé des bordures vers le centre de la plaine, ce qui laisse supposer un apport latéral des eaux. Nous remarquons également une convergence des écoulements à l'ouest de Heddada et Merahna, traduisant une exploitation de l'aquifère au niveau de ces deux contrées.

Par ailleurs, nous notons une variation saisonnière, avec des maxima hivernaux et des minima à la fin de l'été, entre les deux périodes considérées. La zone Sud est caractérisée par la présence d'un dôme piézométrique (T3, D3, D4, D9 bis), traduisant ainsi l'existence d'une ligne de partage des eaux qui serait à l'origine des deux écoulements présents au niveau de la région. L'alimentation faite à partir de la zone comprise entre les reliefs et la plaine au Nord du synclinal est bordée par la chaîne montagneuse (Djebels Draâ Snouber 1064 m et Boussessou 1087m).

On constate un abaissement notable du niveau statique de la nappe provoqué par :

- * la surexploitation, pour rappel les forages (T1, T3, T4, T7 T8, T11, T18, D3, D5, D10) sont tous productifs et captent la nappe karstique de Taoura.
- * une faible recharge, l'infiltration efficace calculée est de l'ordre de 12 mm/an.
- * la drainance ayant entraîné un abaissement des niveaux piézométriques de la nappe superficielle, démontant une perte des eaux vers la profondeur. Les analyses chimiques effectuées par nos soins indiquent le même faciès chimique (dominant bicarbonaté calcique, au niveau des deux nappes. Cela est confirmé par l'appartenance des bicarbonates et du calcium au même quadrant, dans le cercle de l'ACP.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Statistique élémentaire

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 1.

Tableau 1. Statistique générale des paramètres mesurés dans les eaux

Variable	Min	Max	Moy	Ecart -type
Cond. ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	705,0	3500,0	1871,2	624,4
PH	6,8	8,3	7,8	0,3
T ($^{\circ}\text{C}$)	9,0	46,0	16,2	6,4
Ca^{2+} (mg/l)	8,3	376,0	115,8	70,1
Na^{+} (mg/l)	5,3	186,0	60,5	40,2
K^{+} (mg/l)	0,2	94,2	8,8	9,9
Mg^{2+} (mg/l)	0,5	106,0	28,7	17,7
HCO_3^{-} (mg/l)	8,9	1167,0	285,1	217,3
SO_4^{2-} (mg/l)	15,2	341,0	135,1	72,9
Cl^{-} (mg/l)	6,1	367,0	95,8	59,8
NO_3^{-} (mg/l)	0,001	128,8	31,8	26,3
NO_2^{-} (mg/l)	0,0	6,8	0,685	1,2

L'observation du tableau 1, montre une importante minéralisation. En effet, la valeur moyenne de la conductivité est de l'ordre de $2000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, ce qui laisse supposer que les eaux sont chargées en cations et en anions. Le pH mesuré à la sortie des eaux, avec des valeurs oscillant entre 6,8 et 8,3 reste stable et est proche de la neutralité. Les concentrations en ions, montrent une domination des bicarbonates (anions) et du calcium (cations).

5.2 Apports de l'analyse en composantes principales (ACP)

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur des variables centrées réduites. Les données portent sur l'ensemble des 18 points de prélèvement issus de la nappe souterraine de Taoura (2011-2012). Pour déterminer les origines de la minéralisation et les liens existants entre les différents éléments, nous avons réalisé une ACP. Cette dernière prend en considération toutes les analyses effectuées par nos soins. La matrice utilisée comprend 54 analyses et 9 éléments chimiques (Conductivité, calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates et bicarbonates ...). L'ACP a été réalisé en utilisant le logiciel statistica.

5.2.1 Matrice de corrélation

Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau 2. L'observation du tableau montre une bonne corrélation entre les bicarbonates et la conductivité, le calcium et la conductivité, le calcium et les bicarbonates ce qui confirme l'origine de la dissolution d'apports des eaux karstiques mobilisées. La corrélation entre la conductivité et les deux éléments : calcium et bicarbonate est expliquée par la profondeur de la nappe; la minéralisation des eaux pouvant être liée à un long temps de contact entre l'eau – roche qui s'observe presque dans tout les forages localisés dans le synclinal. Par ailleurs, il existe une bonne corrélation entre les chlorures, les sulfates et le sodium ; les chlorures se corrélaient bien au sodium, ce qui laisse penser à une origine commune des deux éléments par dissolution de l'halite et les sulfates - sodium par de l'anhydrite et du gypse provenant des formations marneuses et évaporitiques et les activités agricoles. Enfin, les chlorures se corrélaient avec les nitrates, les sulfates et le magnésium, indiquant un autre pôle de minéralisation.

Tableau 2. Matrice de corrélation Taoura

	CE	Ca ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
CE	1,00								
Ca ⁺	0,80	1,00							
Na ⁺	0,13	0,14	1,00						
K ⁺	0,05	0,30	0,60	1,00					
Mg ⁺	0,44	0,32	0,62	0,46	1,00				
HCO ₃ ⁻	0,86	0,96	0,28	0,27	0,34	1,00			
SO ₄ ²⁻	0,28	0,27	0,65	0,38	0,85	0,27	1,00		
Cl ⁻	0,11	0,05	0,91	0,45	0,62	0,18	0,59	1,00	
NO ₃ ⁻	0,11	0,17	0,61	0,65	0,68	0,16	0,72	0,52	1,00

La présence des nitrates (provenant des engrais) dans ce pôle indique une influence des formations de surface sur la qualité des eaux. Ainsi et comme l'indique le tableau 3, le nombre d'échantillons étant de 54, le coefficient de corrélation sera $r = 0,55$ ce qui nous permet de dégager les associations suivantes selon le tableau 3.

Tableau 3. Associations entre chimiques les éléments selon la valeur de r

Couple	Valeur r	Couple	Valeur de r
Conductivité-Ca	0,80	K-NO ₃	0,65
Conductivité-HCO ₃	0,86	Mg-SO ₄	0,85
Ca-HCO ₃	0,96	Mg-Cl	0,62
Na-K	0,60	Mg-NO ₃	0,68
Na-Mg	0,62	SO ₄ -Cl	0,59
Na-SO ₄	0,65	SO ₄ -NO ₃	0,72
Na-Cl	0,91	Cl-NO ₃	0,55
Na-NO ₃	0,65		

Par conséquent comme le montre le tableau 3, les eaux de la nappe du Mio-plio-Quaternaire peu profonde représentées par les puits et les sources, présentent une faible minéralisation. Les éléments de cette zone Cl⁻, NO₃⁻, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻ et Mg²⁺ sont corrélés positivement entre eux montrant qu'elle augmente progressivement dans le sens de l'écoulement [26]. De même, dans les eaux souterraines l'origine du Cl⁻, Mg²⁺ et Na⁺ est due aux effets de stockage dans l'épikarst et dans le sol.

Le synclinal de Taoura montre une certaine zonalité chimique liée à la nature lithologique des terrains traversés. Le caractère lithologique dominant, est le calcaire et l'épaisseur atteint 100 mètres.

5.2.2 Analyse du cercle ACP

Le cercle ACP (Fig. 7) formé par les axes F1/F2, fournissant 72 %, de l'information, montre selon l'axe F1 (51%) une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie négative de l'axe) et les eaux faiblement minéralisées situées sur la partie positive de l'axe.

En observant le cercle selon l'axe F2 (21 %), de l'information, nous remarquons, une opposition entre les eaux bicarbonatées et les eaux chlorurées ou sulfatées. Nous constatons que la conductivité accompagne les eaux bicarbonatées calciques. Donc la minéralisation est provoquée par la dilution des formations calcaires, ceci est en conformité avec la période de réalisation des analyses d'eau ; ces

dernières sont effectuées au mois de décembre (période de pluie). Nous remarquons également une pollution des eaux par les nitrates, ces derniers s'accompagnent du potassium, mettant en évidence une pollution des eaux par les engrais de type NPK [27].

Nous remarquons que le magnésium se situe presque sur l'axe et n'accompagne pas franchement les chlorures et les sulfates, ce qui laisse supposer différentes origines de cet élément.

La précédente interprétation a mis en évidence différentes associations, pour confirmer ces liens nous allons nous intéresser aux origines des ces associations.

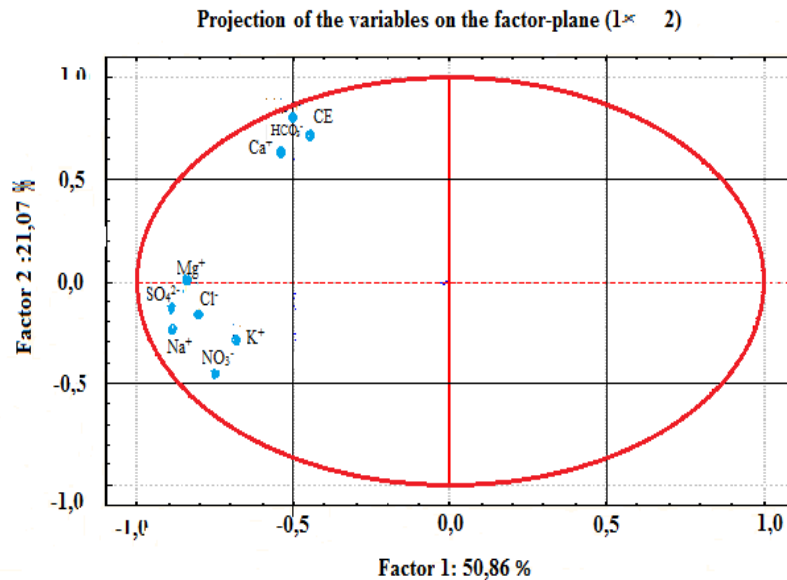


Figure 7. Cercle de l'ACP.

5.3 Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants

5.3.1 Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus Ca^{2+}

Le graphe de la Figure 8 montre la présence de trois familles d'eau :

- une première famille dont les eaux ont une origine carbonatée caractérisée par les échantillons situés sous la droite, cela concerne un grand nombre d'échantillon.
- une deuxième famille où les eaux ont une origine sulfatée caractérisée par les échantillons situés au dessus la droite. Dans ce cas le nombre d'échantillon est faible,
- une famille dont l'origine est considérée comme mixte, cela concerne les échantillons, situés sur la droite. Il s'avère que ces échantillons sont peu nombreux par rapport à la première famille. Les bicarbonates présentent les corrélations les moins significatives avec les différents cations du fait que les cations ne proviennent pas uniquement des roches carbonatées mais également des évaporites [28].

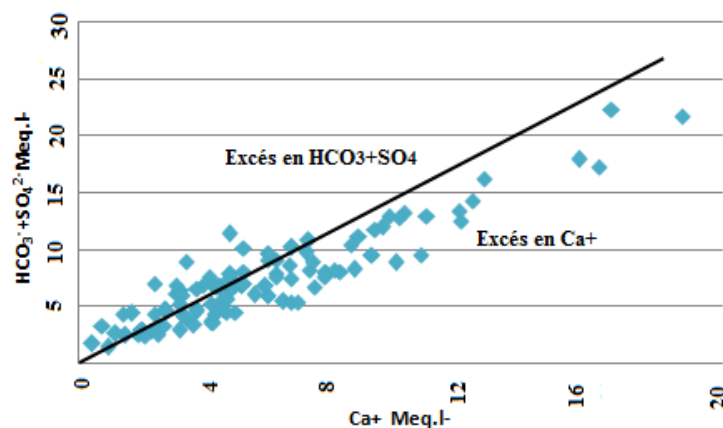


Figure 8. Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ en fonction de Ca^{2+}

5.3.2 Diagramme Na^+ versus Cl^-

L'observation du diagramme de la figure 9, indique la présence de trois origines des éléments considérés :

- la première montre une origine commune des deux éléments ; elle concerne les points situés sur et autour de la droite,
- la seconde concerne les points situés au dessus de la droite ; elle concerne les points d'eau riche en sodium. Cette situation, porte sur un grand nombre d'échantillon, autour de 65%,
- la troisième correspond aux eaux riches en chlorures ; elle concerne les échantillons situés en dessous de la droite. Le diagramme indique que Na^+ et Cl^- peuvent avoir une origine commune, provenant de la dissolution des formations triasiques, riches en sel ou d'autres facteurs tels que l'échange de base, l'infiltration des eaux usées et du recyclage des eaux d'irrigation.

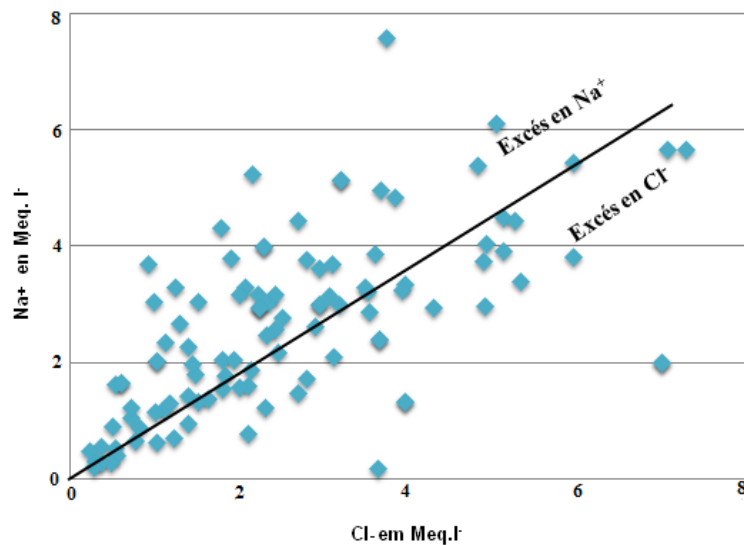
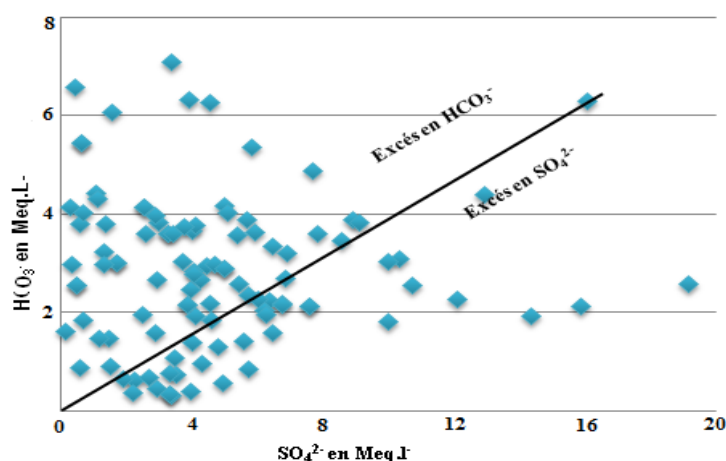


Figure 9 : Diagramme Na^{2+} en fonction de Cl^-

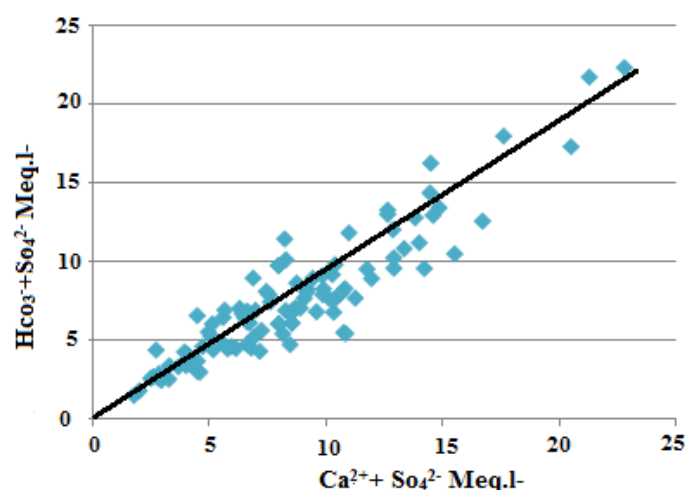
5.3.3 Diagramme HCO_3^- versus SO_4^{2-}

L'observation du diagramme de la figure 10, montre que les eaux sont très riches en carbonates. Ces dernières proviendraient de la dissolution des calcaires ou des échanges existant entre les deux nappes par drainante ascendante [29]. De ce fait il y a enrichissement des eaux par les carbonates. En effet les eaux des forages T1, T3, T7, T8, D5 et D3 sont très chargées en calcium, qui a une origine minéralogique due à la dissolution carbonatée, argile et dolomite, et SO_4^{2-} , Cl^- proviennent de la dissolution des formations salifères gypse et anhydrite (les affleurements du trias) [30], dont les indices de saturation indiquent une sous saturation des eaux vis-à-vis des minéraux carbonatés l'anhydrite ($-1.3 < \text{IS} < -2.4$), l'aragonite ($-0.3 < \text{IS} < -0.9$), la calcite ($-0.2 < \text{IS} < -0.7$) et la dolomite ($-0.8 < \text{IS} < -1.8$). Les formations triasiques interviennent également dans l'acquisition de la minéralisation, c'est le cas du gypse ($-1.3 < \text{IS} < -2.3$), la halite ($-6.6 < \text{IS} < -8.1$), ne joue pas un grand rôle dans la minéralisation observée.

Figure 10. Diagramme HCO_3^- en fonction de SO_4^{2-}

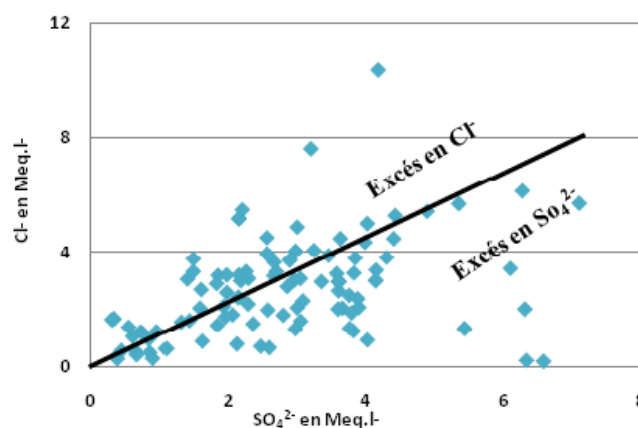
5.3.4 Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$

Le figure 11 montre un alignement des éléments considérés suivant la droite, ce qui confirme l'hétérogénéité des formations constituant l'aquifère.

Figure 11. Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ en fonction $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$

5.3.5 Graphe $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$

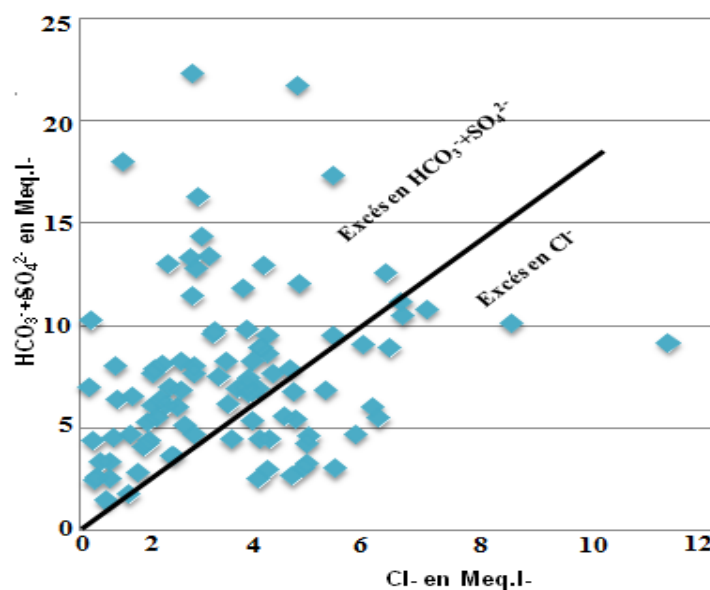
Ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le SO_4^{2-} provient du gypse et le Cl^- provient de la dissolution de l'halite et probablement d'une pollution anthropique [31]. L'interprétation du graphe (Fig.12.), montre qu'il y a des points qui présentent un rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) supérieur à 1, indiquant une dominance des ions salifères par rapport à ceux des gypses. Et d'autres points d'eau présentent des valeurs du rapport inférieures à 1, indiquant une origine gypsifère comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles du Mio-Plio-Quaternaire [32].

Figure 12. Evolution de $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$.

5.3.6 Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ Versus Cl^-

Le graphe de la figure 13, montre une compétition entre les formations calcaires et les formations salines. Sur le graphique, on observe que les bicarbonates s'accompagnent de sulfates et s'opposent aux chlorures. Ces derniers ont deux origines possibles :

- naturelles, les formations à l'affleurement,
- anthropiques, par le retour des eaux d'irrigation.

Figure 13. Diagramme $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ en fonction de Cl^-

5.4 Détermination des faciès chimiques

5.4.1 Diagramme $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ et SO_4^{2-} - f (Na^+/Cl^-)

L'observation du diagramme de la figure 14, montre la présence de deux faciès chimiques, le premier indiquant des eaux bicarbonatées et ou sulfatées sodiques, par contre le second faciès montre des eaux chlorurées calciques. La présence des eaux bicarbonatées s'accompagnent par le sodium issu de l'échange de base.

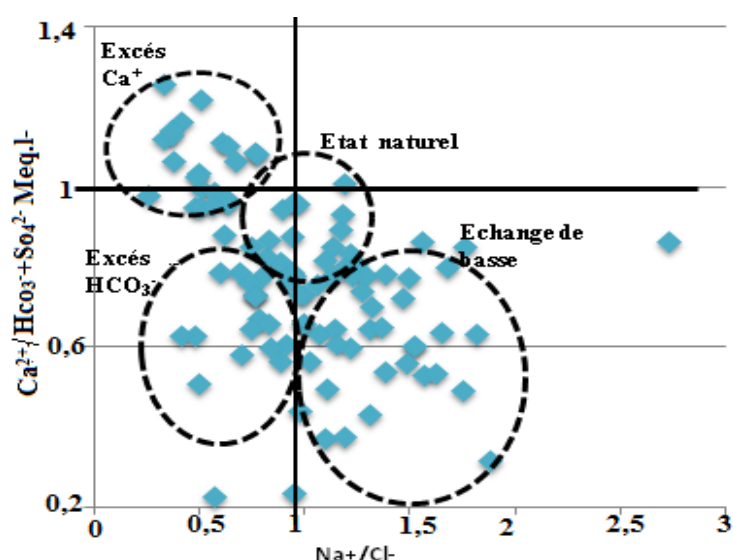


Figure 14. Faciès chimique des eaux.

5.4.2 Confirmation de l'échange de base

IEB représentant l'indice d'échange de base, est sans unité, Cl^- est la concentration en milliéquivalent des ions chlorures, $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ est la concentration en milliéquivalent de la somme des ions sodium et potassium. Cet indice définit le sens des échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants. Il est donné par l'équation 1.

$$\text{IEB} = \text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^- \quad (1)$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l.

- si I.E.B. = 0 ; cela implique qu'il n'y a pas d'échanges,
- si I.E.B. < 0 ; Ca^{2+} et Mg^{2+} sont échangés par Na^+ et K^+
- si I.E.B. > 0 ; Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau 4. L'observation de ce tableau montre que les valeurs des IEB sont en majorité négatives, ce qui démontre un échange de base entre les alcalins et les alcalino-terreux, conduisant ainsi à un enrichissement en sodium au niveau des forages T1, T11, D3 et D5. Les eaux échangent donc les ions (Ca^{2+} et Mg^{2+}) contre les ions Na^+ des argiles. Seuls les forages T3, T7 et T15 présentent des IEB positifs, où les ions Na^+ des eaux sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de la roche réservoir. L'existence des échanges de base entre le Na^+ et le Ca^{2+} ou Na^+ et le Mg^{2+} , est confirmée par les valeurs de l'indice d'échange ; elles sont comprises entre - 7,06 et + 4,19 (Fig.15). Notons qu'aucune valeur de l'IEB n'est nulle, confirmant ainsi une interaction entre l'eau et la roche.

Tableau 4. Valeurs de l'indice d'échange

Ouvrage\ Périodes	Période basse Eaux 2011	Période Haute Eaux 2011	Période basse Eaux 2012	Période Haute Eaux 2012	Période basse Eaux 2013	Période Haute Eaux 2013
T1	0,28	-0,07	0,29		-0,82	-0,49
T7	1,45	-0,76	-0,34		-0,15	-1,29
T8	0,36	-0,18	-0,06	-0,55	0,36	0,03
T3	1,95	-0,22	2,15	-0,67	-0,47	-1,95
T11	4,19	-0,59	0,78	0,69	0,66	3,42

D3	1,05	0,24	0,56	1,31	-0,2	0,13
D5	0,71	0,008	1,44	0,25	0,92	1,21
Puit Ogla	-1,59	-2,36	-2,18	-2,54	-1,48	-1,59
Ain El Geni	-1,19	-2,66	-1,72	-1,61	-1,59	-1,44
Puit Boukbech	1,07	-2,04	1,73	3,24	-1,64	1,63
Bir Louhichi	1,44	1,98	2,1	0,68	2,40	-0,1
Hamma Tassa	-2,31	-2,04	-1,64	-1,59	-1,73	-1,02
Ain Boussebetta	-2,31	-2,59	0,86	0,28	-0,10	-0,66
Puit EL khengua	-0,85	-0,32	-1,19	-1,32	-0,82	-1,31
Ain Tamatmat	1,96	-0,67	-0,14	1,07	-0,22	-1,73
Ain Laredjenia	1,96	0,001	-0,47	-0,043	-1,32	1,06
Ain Trab	0,02	-7,06	-4,46	-3,24	-1,73	-4,4

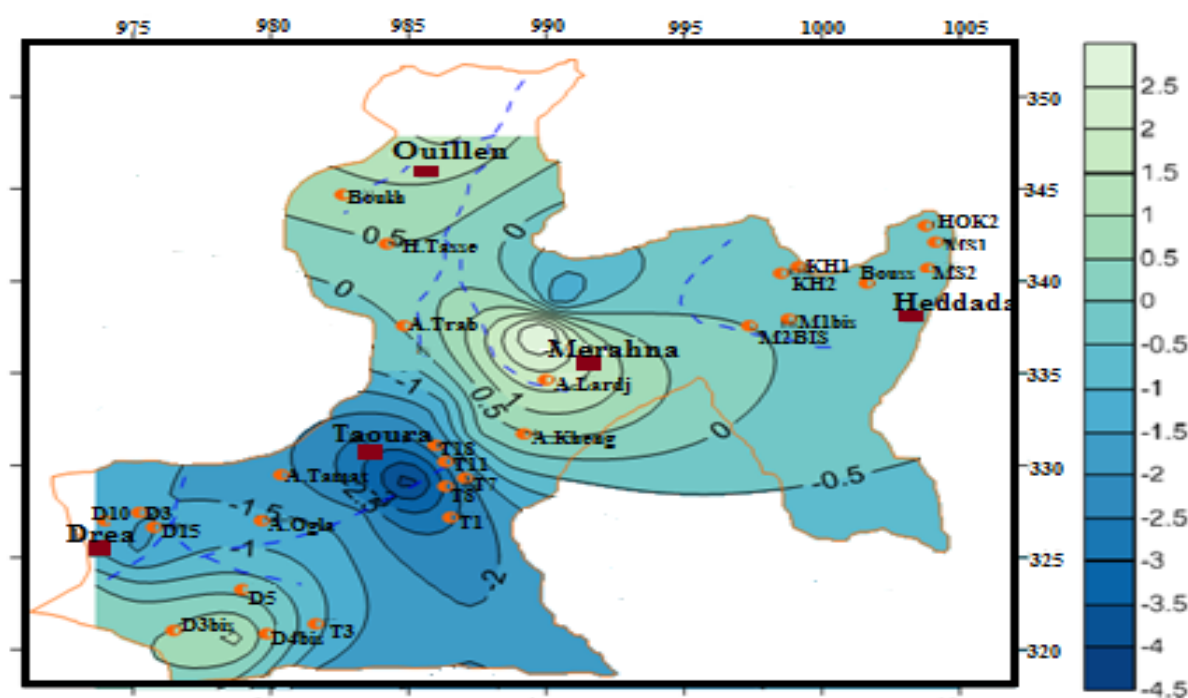


Figure15. Carte d'échange de période basse 2012.

5.4.2.1 Répartition géographique des indices d'échange de base

L'observation de la carte (Fig. 15), montre que les échanges de base sont plus prononcés au niveau de Merahna et de Taoura. Au niveau de ce secteur, les écoulements sont lents et la perméabilité importante (carte piézométrique) facilite ainsi l'échange de base.

La prédominance des valeurs négatives de l'IEB indique un échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent le calcium présent dans les eaux de la nappe après libération du sodium.

5.5 Relations entre les ressources en eau et la lithologie

Les relations entre les éléments chimiques Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et HCO_3^- qui caractérisent les formations géologiques de la région, montrent la dominance des ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) par rapport aux ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) et aux ions salifères (Na^+ , Cl^-). Ainsi, les eaux bicarbonatées ont pour origine le karst de Taoura, elles sont captées par les forages du synclinal de Taoura (T7, T8,

T11) et ceux de Drea (D3, D5) avec une profondeur qui varie entre 100 à 250 m [33]. Le karst est contenu dans les formations datées du maestrichtien inférieur au Turonien à lithologie calcaire et à intercalations marneuses [34]. Les eaux captant l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire, cet aquifère est constitué de formations hétérogènes. Dans ces formations sont implantés les puits domestiques caractérisés par une forte conductivité $2700\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ traduisant une salinité élevée. C'est le cas des puits de Bir Louhichi, Ain Tamatmat, Ain El Geni, El Khengua et Ain Laredjenia qui sont très chargés en sulfates et en chlorures, ils sont situés au niveau de la partie Est et Nord- Est de la région. Cela reste favorisé par l'épaisseur de la formation de transit des eaux de surface (zone non saturée) qui atteint plus de 20 m, notons également que l'encaissant (Substratum) de la nappe est constitué par les argiles calcaires appartenant au maestrichtien supérieur, ce qui donne les valeurs contrastées de l'indice d'échanges de base. Le pôle gypseux caractérisé par des eaux sulfatées calciques présentes au niveau des puits Boukhebech, Hamma Tassa et Ain Trab, est situé au NE de la nappe au pied des monts de Djebel Boukebech contenant les affleurements gypsifères triasiques.

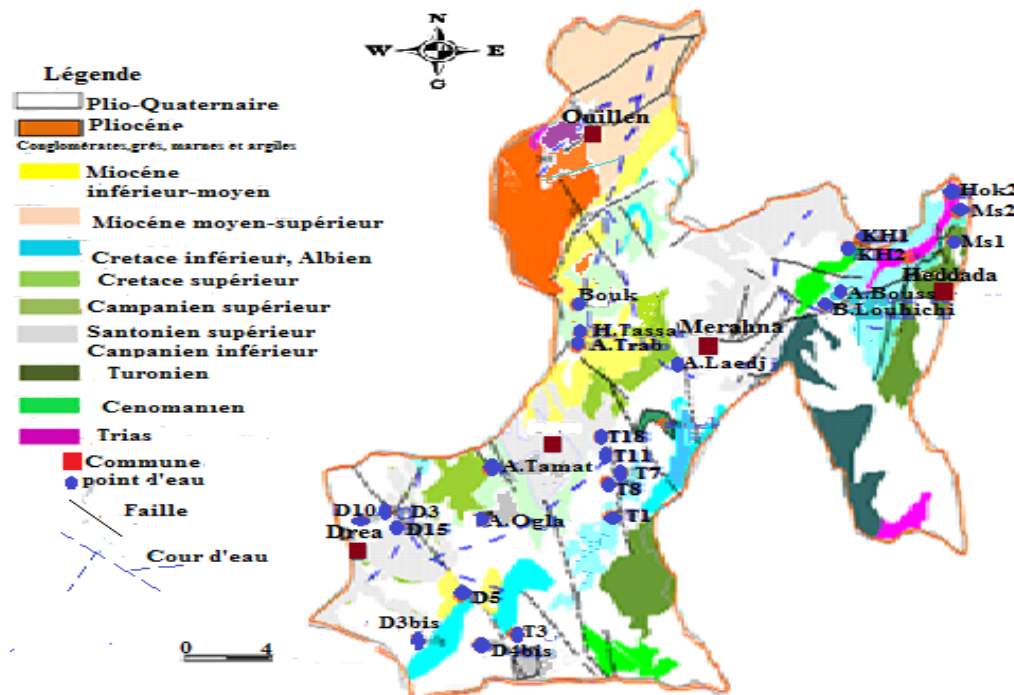


Figure 16. Carte géologique et la position des points de ressource en eau de la nappe de Taoura.

6. CONCLUSION

Le présent travail porte sur une zone caractérisée par la présence de deux nappes superposées et appartenant à deux milieux différents ; le premier est poreux et caractérise la nappe contenue dans les formations Mio Plio Quaternaire, par contre le second milieu est de type fissuré et se rapporte à la nappe karstique profonde.

Ainsi en examinant la géologie du terrain, nous remarquons que les formations Mio Plio Quaternaire, constituées de matériel hétérogène (sable, argiles marnes, graviers...), recouvrent les calcaires karstiques mais de manière discontinue. Cette discontinuité est liée à la tectonique cassante présente dans la région. En l'effet, les jeux de faille ont entraînés un compartimentage de la zone d'étude, ce qui a eu pour conséquence une variation de la profondeur du karst, c'est-à-dire tantôt il est proche de la surface du sol, tantôt il est profond. La présence de ces failles, favorise le phénomène de drainance, confirmant ainsi les résultats issus des essais par pompage.

Les cartes piézométriques réalisées mettent en évidence une alimentation de la nappe superficielle par les bordures. Cet apport latéral va influencer la composition chimique des eaux des nappes.

Cette situation nous a conduits à utiliser plusieurs méthodes pour la détermination de la qualité des eaux et son origine. En premier, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) et qui a démontré une opposition entre les eaux bicarbonatées calciques à l'origine de la minéralisation observée et le reste des éléments. Dans une seconde phase, nous avons recherché les liens éventuels entre les éléments chimiques. Ainsi, des plusieurs graphiques qui ont été réalisés, nous avons remarqué l'existence de bonnes correspondances entre $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ versus $\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$ et Na^+ versus Cl^- . La présence du sodium dans les eaux est liée au processus d'échanges de bases, cette tendance est confirmée par les indices calculés.

De plus, cette présente étude a révélé, que la qualité des eaux de la zone d'étude reste influencée par les facteurs naturels, particulièrement les formations géologiques présentes au niveau de la zone. Nous avons également remarqué une baisse des niveaux d'eau dans les puits ceci s'explique par la drainance et ou les aléas climatiques.

REFERENCES

- [1] Collignon B., (1986). Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Algérie). Thèse de doctorat, Université d'Avignon, France. 282 p.
- [2] Abdesselam M., Mania J., Mudry J., Gélard J.P., Chauve P., Lami H. et C. Aigoun (2000). Arguments hydrogéochimiques en faveur de Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (dorsale kabyle, élément des Maghrébides). Rev. Sci. Eau 13 (2) : 155-166.
- [3] Djebbar M., (2005). Caractérisation du système karstique hydrothermal Constantine-Hamma Bouziane -Salah Bey dans le Constantinois central (Algérie nord orientale) Thèse de doctorat d'état de l'Université de Constantine. 250 p.
- [4] Zerrouki H., (2013). Aspects quantitatifs et qualitatifs de la source de bouakkous : impact le champ captant d'ain chabro (zone semi-aride Tebessa). Doctorat de l'Université d'Annaba. 168 p.
- [5] Baali F. (2001). Etude hydrogéologique hydrochimique de la région karstique de Chéria N-E Algérien. Magister Univ. Annaba Algérie, 100 p.
- [6] Bouroubi Ouadfel Y., & Djebbar, M., (2014). Characterization of Taoura's multilayers system by the geochemical tracers of carbonates and the evaporites (oriental extreme Algeria). Am. J. Sci. Ind. Res., 3 (5): 305-314.
- [7] R. Kardache, R Lounis, M Abdesselam, N Hannachi, L Djabri (2013) : Karstologie en zone aride : formations karstifiées du Sud Est Algérien. Méthodes et Outils. Revue Courrier du Savoir – N°17, Décembre 2013, pp.71-76
- [8] Djidel M., (2008). Alteration of the Aquifer Water in Hyperarid Climate, by Wastewater: Cases of Groundwater from Ouargla (Northern Sahara, Algeria) American Journal of Environmental Sciences 4 (6): 569-575.
- [9] Mangin A., (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doctort. Sciences, Université de Dijon. 601 p.
- [10] Drogue C., (1969). Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques, d'après l'exemple de quelques karsts péri-méditerranéens. Thèse d'Etat, Montpellier, 455 p.
- [11] Bakalowicz M., (2002). Hydrogéologie karstique. Cours DEA H.H.G.G. Université Paris-6. Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active, 278 p.
- [12] Marsaud B. ; (1996). Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse Doct. en Sciences, Université de Paris XI Orsay. 301p.
- [13] Peyraube N., Lastennet R. & Denis A., (2012). Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using the PCO_2 —sics relation ship. J. Hydrology, 430 p.
- [14] Senani S., (2011). Estimation et gestion des eaux souterraines de la wilaya de Souk-Ahras région de Taoura Memoire de Magister en Hydraulique, Université Mohamed Cherif Messaadia , 182 p.
- [15] Djabri L., Zerrouki H., Bouhsina S., Hani A., Mudry J., Djabri Y., (2011). Aspects quantitatifs et qualitatifs des eaux transitant par la grotte. 9 th conférence on limestone hydrogeology, 2011, Besancon, France. pp 125-127.
- [16] Guasmi I., (2009). Pollution des eaux et pouvoir auto-épurateur de l'Oued Medjerda (Nord Est Algérien).Thèse de doctorat de l'Université d'Annaba, 240 p.
- [17] David L., (1953). L'âge Pliocène d'une partie des formations continentales de la région de Souk Ahras. Rapport de Première édition Etude géologique des monts de la haute Medjerda. Carte géol. Algérie, pp 216-218.
- [18] Aunay B., (2003). Evolution géologique, mise en place de la certification et thermalisme des aquifères péri-méditerranéen., colloque international montpellier avril 2003 Publ. no. 278, pp 22
- [19] Bahir, M., Jalal, M., Mennani, A. & Laftouhi, N. , (2001), Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc) . Estudios Geol. , 57, pp 47-52.

- [20] Bourouga M., (2015). Déminéralisation des eaux de forage de la région d'Ouled Abbés et son impact sur l'environnement (Souk Ahras, extrême Nord-Est Algérien). Mémoire de Magister en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie 120 p.
- [21] Dahdouha N., (2012). Etude diagnostique des forages partie essai par pompage. Bureau d'étude. Rapport de fin de sondage « Forage nappe de Taoura, Wilaya de Souk Ahras. Algérie .
- [22] Lannani. K.,& Abdouni. L., (2008). Etude géo-électrique par sondage électrique dans la région de Taoura. Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Annaba, 81p.
- [23] Strojexport Prague., & progress. ;(1977). modifie Progress (2010). Bureau d'étude Prospection Geophysique sur le synclinal de Taoura-Bordj M'raou, Souk-Ahras .Algeria 87p.
- [24] Bousnoubra H., (2002). Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma, Souk-Ahras (N-E Algérien) (Evaluation, gestion et perspective; Vulnérabilité et protection), Thèse de doctorat d'état, 159 p.
- [25] Rodier J., (2009). L'Analyse de l'eau, 9ème édition, DUNOD, 1527 p.
- [26] Issiaka S., Aristide DG. & Innocent KK., (2006). Vulnerability assessment of Abidjan Quaternary Aquifer using the DRASTIC method. In Groundwater pollution in Africa, Xu Y, USHER B
- [27] Mudarra M., & Andreo B., (2011). Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). J. Hydrology, N° 397, pp 26380.
- [28] Gouaïdia L.Guefaïfia O, Boudoukha A, Hemila M.L (2004) Application des méthodes statistiques pour expliquer le chimisme de la nappe alluvionnaire de Meskiana. Colloque international Terre et Eau. Université d'Annaba 04,05& 06 décembre 2004, pp 30-34.
- [29] Debieche TH., J Mania, J Maudry (2004).Utilisation des rapports caractéristiques dans la détermination de la salinité des eaux souterraines. Colloque international Terre et Eau. Annaba 4, 5 & 6 Décembre 2004, pp 20-24
- [30] Amrani S. & Hinaje S., (2014). Utilisation des analyses hydro-géochimiques et des analyses en composantes principales (A.C.P) dans l'explication du chimisme des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire entre Timahdite et Almis Guigou (Moyen Atlas, Maroc). Science Lib Editions Mersenne : volume6, N° 140306, 14p.
- [31] Danquigny C., Emblanch C., Blondel T., Garry B., Roche A. & Sudre, C. ; (2010). Influence of Great Flood on the Functioning of Karst Aquifer: Example of the Fontaine de Vaucluse Karst System (SE France), 4th International symposium on karst, Malaga, pp 115-121.
- [32] Athmani A.S., (2011). Evaluation de la qualité des eaux de surface cas du bassin versant Oued Medjerda Souk-Ahras, Mémoire de Magister, Université Mohamed Cherif Messaadia Souk-Ahras, 162 p.
- [33] B.N.E.D.E.R. (Bureau national des études pour le développement rural), (2012). Etude d'exécution des périmètres irrigués de Sidi Badr et Hemissi. Mission I et II : Etude préliminaire et hydrologique, 25 p.
- [34] Chadi M., (2004). Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du constantinois (Est- Algérien). Thèse de doctorat. Université Mentouri Constantine. 180 p.