



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



N° d'ordre :  
Série :

**THESE**  
Présentée en vue de l'obtention de Diplôme de  
**DOCTORAT LMD en Ecologie et Environnement.**  
Option : Eau, Environnement et Energies Renouvelables.

Par  
**Salima DJOUDI**

Intitulée

**VULNERABILITE ET RISQUE DE POLLUTION DES  
EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE  
F'KIRINA NORD EST ALGERIE**

Soutenu le

Devant le jury composé de

Président	KADI Kenza	MCA, Université de Khenchela
Rapporteur	HOUHA Belgacem	Professeur, Université de Khenchela
Examineur	GOUAIDIA Layachi	Professeur, Université de Tébessa
Examineur	KACHI Slimane	Professeur, Université de Guelma
Examineur	DARBOUCHE Abdelhk	Professeur, Université de Khenchela

Année universitaire 2017-2018

## *Dédicace*

*A la mémoire de mon très cher papa ;*

*Sans ta présence toute joie n'est qu'illusion éphémère ;*

*Sans toi rien ne sera plus comme avant que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.*

*A ma très chère mère*

*Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi.*

*Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études. Tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait.*

*Mon très cher époux*

*Ton encouragement et ton soutien étaient la bouffée d'oxygène qui me ressourçait dans les moments pénibles, de solitude et de souffrance. Merci d'être toujours à mes côtés, par ta présence, par ton amour dévoué et ta tendresse, pour donner du goût et du sens à notre vie de famille*

*A Mes cher enfants Iyad et Mayar*

*A Mes frères Ameer, Walid, Adel Mes sœurs Chamia et Hanaa Pour leur affection, encouragement et soutien moral.*

*Qu'Allah leur protège et leur offre tout le succès et le bonheur qu'ils méritent*

*A toute ma famille*

## **Remerciements**

*Avant tout, un très grand merci à **ALLAH** qui est toujours présent avec moi dans le bonheur et dans le pire. Au terme de ce travail, il m'est très agréable de remercier tous ceux qui m'ont aidé et contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.*

*Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur Monsieur **Houha Belgacem**, professeur à l'Université de Khenchela, qui m'a fait confiance, m'a proposé ce sujet et a bien voulu m'encadrer. Je le remercie de m'avoir fait bénéficier de ses connaissances, de ses orientations et de ses critiques et qui m'a beaucoup aidé à l'amélioration de ce travail.*

*Je suis honorée de compter aussi parmi les membres de mon jury Madame **Kenza Kadi**, Maître de conférences A à l'Université de Khenchela qui a bien voulu présider le jury.*

*Je remercie Monsieur **Abdelhak Derbouche**, professeur à l'université de Khenchela, qui a bien voulu faire partie du jury.*

*Je remercie également, Monsieur **Layachi Gouaidia**, professeur à l'Université de Tébessa, qui est bien voulu examiner ce travail.*

*J'adresse mes vifs remerciements à monsieur **Slimane Kachi**, professeur à l'université de Tébessa ; d'accepter examiner ce travail*

*Ma vive gratitude et mes remerciements s'adressent également à Monsieur **Boulabeiz Mahrez pour** leur amitié, aides précieuses et leur soutien moral ainsi que tous mes Enseignants du département d'écologie et environnement,*

*Je tiens à remercier également **mes collègues doctorants et docteurs** de l'université de Khenchela pour leur sympathie.*

## **Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la plaine de F'kirina (Nord Est Algerie)**

### **Résumé :**

Les eaux souterraines constituent l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable de la population et à l'irrigation des cultures de la région de F'kirina (sud est d'Oum el Bouaghi) et qui s'étend sur une superficie de 650 km<sup>2</sup>. La présente étude a permis d'avancer dans l'état de la connaissance hydrogéologique de cet aquifère, d'évaluer leur état d'affectation par la pollution et plus généralement d'apprécier le degré de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions. Après une étude exhaustive du cadre physique de la région d'étude rendant compte du contexte hydrogéologique du système aquifère étudié,

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe s'est basée sur l'interprétation des résultats d'analyses effectuées sur 45 échantillons d'eau prélevés au niveau de différents points d'eau lors d'une campagne d'échantillonnage réalisée en Mai 2015 qui définit trois faciès, les plus répandus sont le faciès bicarbonaté calcique, chloruré et sulfaté calcique.

L'étude statistique des différents paramètres analysés, de leur répartition spatiale et des principaux faciès a renseigné sur l'origine et l'évolution des minéralisations. Une dernière partie a été consacrée à l'établissement d'une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions à travers la mise en œuvre de la méthode G.O.D et DRASTIC qui montre que la nappe de la région de F'kirina a une vulnérabilité faible à modérée. Le couplage entre les outils géologique, physicochimique, et statistique dans l'étude de la qualité des eaux souterraines de la plaine de F'kirina, nous a permis, de déterminer l'origine de la minéralisation et son mode d'acquisition ainsi que sa répartition dans l'espace.

**Mots clés :** eau souterraine, F'kirina, hydrochimie, faciès chimique, qualité des eaux, vulnérabilité, pollution, GOD, DRASTIC.

## **vulnerability and risk of groundwater pollution case of the plain of F'kirina, Northeastern Algeria.**

### **Abstract:**

Groundwater is one of the main sources of drinking water for the population and irrigates crops in the F'kirina region (south-east of Oum el Bouaghi) which cover an area of 650 km<sup>2</sup>. This study has led to progress in the state of hydrogeological knowledge of the aquifer, assess their condition assignment by pollution and more generally to assess the degree of vulnerability of groundwater to urban pollution. After an exhaustive study of the physical part of the study area reflecting the hydrogeological context of the aquifer system studied. The hydrochemical study of the waters of the aquifer was based on the interpretation of the results of analyzes carried out on 45 water samples taken at different water points during a sampling campaign carried out in May 2015. which defines three facies, Ca-HCO<sub>3</sub> water types in carbonate outcrops as Ca-SO<sub>4</sub> and Cl-Ca type in the Plio-Quaternary filling in the direction of the Sabkha. The statistical study of the various parameters analyzed, their spatial distribution and the main facies provided information on the origin and evolution of mineralization.

A final part was devoted to establishing a mapping of the vulnerability of groundwater to pollution through the implementation of the GOD and DRASTIC method which shows that the water table of the F'kirina region has a low to moderate vulnerability. The coupling between the geological, physicochemical and statistical tools in the study of the groundwater quality of the F'kirina plain, allowed us to determine the origin of the mineralization and its mode of acquisition as well as its distribution in space.

Key words: groundwater, F'kirina, hydrochemistry, chemical facies, water quality, vulnerability, pollution, GOD, DRASTIC

## دراسة حساسية المياه الجوفية للتلوث لسهل فكيرينة ولاية ام البواقي (شرق الجزائر)

### ملخص

المياه الجوفية هي أحد المصادر الرئيسية لمياه الشرب للسكان وري المحاصيل في منطقة فكيرينة (جنوب شرق أم البواقي) والتي تغطي مساحة 650 كم<sup>2</sup>.

لقد مكنت هذه الدراسة من معرفة الطبيعة الهيدروجيولوجية في طبقة المياه الجوفية ، لتقييم حالة استخدامها وبشكل أعم لتقييم درجة تعرض المياه الجوفية للتلوث وذلك بعد دراسة شاملة للوضع الفيزيائي مع الأخذ بعين الاعتبار النظام الهيدروجيولوجي لطبقات المياه الجوفية .بالنسبة للدراسة الهيدروكيميائية اعتمدنا على تفسير نتائج تحاليل المياه التي اجريت على 45 عينة في شهر ماي 2015 والتي اخذت من مختلف نقاط المنطقة المدروسة .

من خلال الدراسة الاحصائية لمختلف المعادن وتوزعها الفضائي يسمح لنا من معرفة اصل الاملاح المعدنية ومسببات الملوحة في المنطقة المدروسة .

وخصص جزء أخير لرسم خريطة حساسية المياه الجوفية للتلوث من خلال تنفيذ طريقة GOD و DRASTIC التي تبين أن المياه الجوفية لمنطقة فكيرينة ذات درجة حساسية منخفضة إلى متوسطة. إن الربط بين الأدوات الجيولوجية والفيزيائية والبيانات الإحصائية في دراسة جودة المياه الجوفية لسهل فكيرينة سمح لنا بتحديد مصدر التمدن وطريقة اكتسابه.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية ، فكيرينة ، الهيدروكيمياء ، جودة المياه ، الضعف ، التلوث ، GOD ، DRASTIC

## ***Table des Matières***

<b><i>Sommaire</i></b> .....	
<b><i>Page</i></b> .....	
<b><i>Dédicace</i></b> .....	
<b><i>Remerciements</i></b> .....	
<b><i>Résumé</i></b> .....	
<b><i>Abstract</i></b> .....	
<b><i>ملخص</i></b> .....	
<b><i>Sommaire</i></b> .....	
<b><i>Liste des figures</i></b> .....	
<b><i>Liste des tableaux</i></b> .....	
<b><i>Liste des abréviations</i></b> .....	
Introduction générale .....	1
Structure de la thèse.....	2
<b><i>Chapitre I : Cadre Physique</i></b>	
1. Situation géographique.....	3
1.2. Aperçu sur le bassin versant de Garâat Et Tarf.....	4
1.3. Le climat .....	7
1.4. Le relief .....	8
1.5. Le Couvert Végétal .....	9
1.6. La topographie de la région .....	10
2. Contexte socio-économique .....	11
3. Conclusion .....	12
<b><i>Chapitre II : Cadre Géologique</i></b>	
1. Introduction.....	14
2. Description stratigraphique et lithologique.....	15
2.1. Le Secondaire.....	15

2.1.1. Le Trias .....	15
2.1.2. Le Crétacé Basal.....	16
2.1.3. Le Barrémien et l’Aptien .....	16
2.1.4. L’Aptien.....	16
2.1.4.1. L’Aptien inf.....	16
2.1.4.2. L’Aptien sup.....	16
2.1.5. L’Albien .....	16
2.1.5.1. L’Albien sup. à Cénomaniens inf .....	16
2.1.6. Cénomaniens sup.....	16
2.1.7. Turonien .....	16
2.1.8. Sénonien .....	16
2.1.8.1. Coniacien .....	16
2.1.8.2. Santonien.....	16
2.1.8.3. Campanien.....	17
2.1.8.4. Maestrichtien .....	17
2.1.8.4.1. Le Maestrichtien Inferieur à dominante marneuse.....	17
2.1.8.4.2. Le Maestrichtien Supérieur calcaire.....	17
2.2. Le Tertiaire .....	17
2.2.1. L’Eocène .....	17
2.2.2. Le Miocène .....	18
2.2.2.1. L’Aquitano-burdigalien.....	18
2.2.2.1. Le Langhien- Serravalien .....	18
2.3. Le Quaternaire .....	18
2.3.1. Les éboulis à blocs.....	18
2.3.2. Les alluvions actuelles ou récentes .....	18
2.3.3. Les sols salés de Sebka.....	18
2.3.4. Les terres arables et les alluvions anciennes.....	18

2.3.5. Les glacis polygéniques.....	19
3. Les styles structuraux .....	19
4. Les dépressions et fosses d’effondrement .....	19
5. Structure et tectonique .....	20
6. Conclusion.....	24

### ***Chapitre III : Hydroclimatologie***

1. Introduction .....	26
2. Analyse des facteurs climatiques .....	27
2.1. La pluviométrie .....	27
2.1.1. Représentation mensuelle des précipitations.....	27
2.1.1.1. Station de F’kirina.....	27
2.1.1.2. Station d’Oum El Bouaghi.....	28
2.1.1.2. Station d’Ain el Beida.....	28
2.2. La température .....	30
2.2.1. Station d’Oum el Bouaghi.....	31
2.2.3. Station d’Ain el Beida.....	31
3. Diagramme Ombrothermique.....	32
4. Les indices climatiques.....	34
4.1. Indice d’aridité de De Martonne.....	34
4.2. Indice d’aridité mensuel.....	35
4.3. Le quotient pluviométrique annuel de Moral.....	35
4.4. Climagramme d’Emberger.....	36
5. Comparaison des indices climatiques.....	37
6. Le bilan hydrique .....	38
6.1. Etude de l’évapotranspiration .....	38
6.1.1. Estimation de l’évapotranspiration potentielle (ETP).....	39
6.1.2. Estimation de l’évapotranspiration réelle (ETR) .....	39

7. Calcul du ruissellement (R):.....	40
8. Calcul de l'infiltration (I) .....	40
9. Estimation des réserves facilement utilisable (RFU).....	41
10. Conclusion.....	44

## ***Chapitre VI : Hydrogéologie***

1. Introduction.....	47
2. L'étude géophysique réalisée dans la région.....	47
3. Résultats de la prospection électrique .....	48
4. Extension et nature des nappes... ..	49
4.1. Etablissement et interprétation des coupes hydrogéologiques.....	49
4.2. Interprétation des coupes .....	49
4.2.1. Coupe hydrogéologique NE – SW (OL1 – GET).....	50
4.2.2. Coupe hydrogéologique NE SW (OL2 – E41).....	51
4.2.3. Coupe hydrogéologique N S (M20 -E41) .....	52
4.2.4. Coupe hydrogéologique E W (GET – A5).....	53
4.2. Type de nappe.....	54
4.2.1. La nappe du plioquaternaire .....	54
4.2.2. La nappe des calcaires du Maestrichtien supérieur.....	54
5. Piézométrie de la nappe.....	57
5.1. Inventaire des points d'eau.....	57
5.2. Carte piézométrique en période des hautes eaux (Juin 2012).....	58
5.3. Carte piézométrique en période des hautes eaux (Octobre 2012).....	59
6. Evolution spatio-temporelle de l'état piézométrique de l'aquifère.....	59
7. Logs stratigraphiques de quelques forages .....	61
8. Conclusion.....	65

## **Chapitre V : Hydrochimie**

1. Introduction .....	65
2. Matériels et moyens d'analyse .....	66
3. Caractéristiques physico-chimiques .....	67
4. Répartition spatiale des paramètres physico-chimique.....	67
4.2. Etude analytique des éléments chimiques :.....	67
4.2.1. L'erreur sur la balance ionique.....	67
4.2.2. Validation des données hydrochimique.....	68
4.2.3. Corrélation entre la somme des cations et la somme des anions.....	68
4.1. Les paramètres physiques .....	69
4.1.1. Température .....	69
4.1.2. Conductivité électrique (CE).....	70
4.1.3. Le potentiel d'hydrogène (pH) .....	70
4.1.4. La dureté totale .....	71
4.1.5. La minéralisation .....	72
4. 3. Les paramètres chimiques.....	73
4. 3.1. Les cations major.....	73
4. 3.1.1. Le calcium $Ca^{2+}$ .....	73
4.3.1.2. Le magnésium $Mg^{2+}$ .....	74
4.3.1.3. Sodium.....	75
4.3.2. Anions majeurs.....	76
4.3.2.1. Chlorure. . . . .	76
4.3.2.2. Sulfate.....	77
4.3.2.3. Les bicarbonates $HCO_3$ .....	78
4.3.2.4. Les nitrate .....	79
5. Faciès chimiques des eaux .....	80
5.1. Répartition graphique.....	80

5.2. Représentation de Piper.....	80
5.3. Classification de Schoeller– Berkaloff.....	83
6. Etude des processus hydrogéochimiques .....	86
6.1. Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure .....	86
6.2. Les rapports caractéristiques.....	86
6.2.1. Le rapport caractéristique $r_{Na^+} / r_{Cl^-}$ .....	86
6.2.2. Le rapport caractéristique $r_{Mg^{++}} / r_{Ca^{++}}$ .....	87
6.2.3. Le rapport caractéristique $r_{HCO_3^-} / r_{Ca^{++}}$ .....	87
6.2.4. Le rapport caractéristique $r_{SO_4^{--}} / r_{Ca^{++}}$ .....	88
6.2.5. Le rapport caractéristique $Sr^{+2} / Ca^{+2}$ .....	91
6.2.6. Le rapport caractéristique $Br / Cl$ .....	92
6.3. Indices de saturation.....	92
6.4. Diagrammes d'indices d'échange de base.....	94
6.5. Diagramme de Gibbs.....	95
7. Aptitude des eaux à l'irrigation .....	96
7.1. Classification des eaux par la méthode de Richards.....	96
7.2. Classification des eaux par Méthode de Wilcox .....	98
8. Analyse statistique multi variables.....	99
8.1.1. Statistiques élémentaires.....	100
8.1.2. Matrice de corrélation.....	100
8.2. Analyse en Composant Principale (ACP).....	101
8.2.1. Application de l'ACP.....	101
8.2.2. Diagonalisation (étude des valeurs propres) .....	101
9. Classification Ascendante Hiérarchisée.....	104
10. Conclusion.....	106

## ***CHAPITRE VI : Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution***

1.Introduction .....	108
2. Notion et historique de la vulnérabilité.....	108
3. Types de vulnérabilité.....	109
4. Les critères de vulnérabilité couramment pris en compte.....	109
5. Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.....	110
5.1. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC .....	112
5.1. 1. Réalisation des cartes thématique .....	115
5.1.1.1 Profondeur de la nappe .....	116
5.1.1.2 Recharge nette R .....	116
5.1.1.3 Lithologie de l'aquifère A .....	118
5.1.1.4 Type du sol S .....	119
5.1.1.5 Topographie T.....	120
5.1.1.6 : Zone non saturée I .....	121
5.1.1.7 Conductivité hydraulique C .....	122
5.1.2. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution) .....	123
5.2. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD.....	124
5.2.1. Acquisition et description des paramètres G.O.D.....	125
5.2.2 Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques CG .....	126
5.2.2.1. Impact de la zone vadose CO .....	127
5.2.2.2. Profondeur à la nappe CD .....	128
5.2.2.3. Carte de vulnérabilité GOD.....	129
5.3. Validation chimique .....	130
6. Conclusion .....	131
Conclusion générale .....	132
Perspectives.....	134

## Liste des Figures

Figure 01 : Situation géographique de la région d'étude.....	5
Figure 02 : Carte des sous bassins de la wilaya d'Oum el Bouaghi .....	6
Figure 03 : Le bassin versant Garâat El Tarf.....	7
Figure 04 : La carte climatique de la wilaya d'Oum el Bouaghi .....	8
Figure 05 : La carte hypsométrique de la wilaya d'Oum el Bouaghi.....	9
Figure 06 : Couverture végétale de l'Est algérien .....	10
Figure 07 : La carte de pente de la région de F'kirina .....	11
Figure 08 : La carte géologique de la zone d'étude.....	15
Figure 09 Les coupes géologiques.....	20
Figure 10 : Carte Structurale et tectonique de la région d'étude .....	21
Figure 11 : Log litho stratigraphique Synthétique .....	22
Figure 12 : Position géographique des différentes stations pluviométriques .....	27
Figure 13 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station de F'kirina (1986-2009).....	28
Figure 14 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Oum El Bouaghi (1995-2017 ).....	28
Figure 15 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain el Beida.....	29
Figure 16 : Précipitations mensuelles moyennes interannuelles .....	29
Figure 17 : Carte pluviométrique de la wilaya d'Oum el Bouaghi .....	30
Figure 18 : Variation des températures moyennes mensuelles dans la station d'Oum El Bouaghi (1995-2017).....	31
Figure 19 : Variation des températures moyennes mensuelles dans la station d'Ain el Beida (1993-2007).....	31

Figure 20 : Variations des amplitudes des températures moyennes mensuelles.....	32
Figure 21: Diagramme Ombrothermique de la station d'Oum El Bouaghi.....	33
Figure 22: Diagramme Ombrothermique de la station d'Ain el Beida.....	33
Figure 23: Abaque de l'indice de l'aridité de De Martonne .....	35
Figure 24: Climagramme d'Emberger de la station de F'kirina .....	37
Figure 24 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien .....	38
Figure 26 : Carte de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est Algérien....	39
Figure 27 : Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de C.W. Thornthwaite de la station d'Oum Elbouaghi .....	43
Figure 28 : Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de C.W. Thornthwaite de la station d'Ain el Beida.....	44
Figure 29 : plan de situation des zones.....	47
Figure 30 : Carte de position des sondages électriques.....	48
Figure 31 : carte de situation des forages.....	49
Figure 32: Coupe hydrogéologique I (NE – SW) .....	51
Figure 33 : Coupe hydrogéologique II NE – SW.....	52
Figure 34 : coupe hydrogéologique III, (N – S).....	53
Figure 35 : coupe hydrogéologique IV, (E – W).....	54
Figure 36 : Carte d'inventaire des points d'eau.....	57
Figure 37 : la carte piézométrique (Juin 2012) .....	58
Figure 38 : la carte piézométrique (Octobre 2012).....	59
Figure 39: Evolution spatio- temporelle de la piézométrie selon le sens d'écoulement.....	60
Figure 40 a : Logs stratigraphiques des forages.....	61
Figure 40 b : Logs stratigraphiques des forages.....	62
Figure 41 : Carte d'inventaire des points d'eau.....	66

Figure 42: Carte de la distribution des Conductivité dans les eaux souterraines .....	68
Figure 43 : Carte de la distribution des ph dans les eaux souterraines .....	69
Figure 44 : Carte de la distribution de la dureté totale dans les eaux souterraines.....	70
Figure 45 : Carte de la distribution minéralisation dans les eaux souterraines.....	71
Figure 46 : Somme des anions versus somme des cations .....	72
Figure 47 : Corrélation entre conductivité électrique mesurée et le pourcentage d'erreur.....	73
Figure 48 : Carte de la distribution des teneurs en calcium dans les eaux souterraines.....	74
Figure 49 : Carte de la distribution des teneurs en magnésium dans les eaux souterraines....	75
Figure 50 : Carte de la distribution des teneurs en sodium dans les eaux souterraines.....	76
Figure 51 : Carte de la distribution des teneurs en chlorure dans les eaux souterraines.....	77
Figure 52 : Carte de la distribution des teneurs en sulfate dans les eaux souterraines.....	78
Figure 53 : Carte de la distribution des teneurs en bicarbonates dans les eaux souterraines...	79
Figure 54 : Carte de la distribution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines.....	80
Figure 55 : Diagramme de Piper montrant la composition chimique des eaux du F'kirina.....	81
Figure 56 : Répartition des faciès chimiques selon les rapports caractéristiques.....	82
Figure 57 a : Classification de Schoeller- Berkaloff.....	83
Figure 57 b : Classification de Schoeller- Berkaloff.....	84
Figure 57 c : Classification de Schoeller- Berkaloff.....	84
Figure 57 d : Classification de Schoeller- Berkaloff.....	85
Figure 57 e : Classification de Schoeller- Berkaloff.....	85
Figure 58 : Relation entre $Ca^{++}$ , $Mg^{++}$ , $Na^+$ , $K^+$ , $SO_4^{-}$ et le $Cl^{-}$ des eaux souterraines.....	87
Figure 59 : Carte du rapport $rNa^+/rCl$ .....	88
Figure 60 : Carte du Rapport $rMg^{++}/rCa$ .....	89
Figure 61 : Carte du rapport $rSO_4^{-}/rCa$ .....	90
Figure 62 : Carte du rapport $rHCO_3^{-}/rCa$ .....	90

Figure 63 : Rapport molaire $Sr^{2+} / Ca^{2+}$ (‰).....	91
Figure 64 : Relation entre $Sr^{2+}$ et $Ca^{2+}$ .....	91
Figure 65 : Rapport molaire Br / Cl en fonction de conductivité.....	92
Figure 66 : Relation entre Br et Cl.....	92
Figure 67 : Évolution des indices de saturation (IS).....	93
Figure 68 : Diagrammes d'indices d'échange de base.....	95
Figure 69 : Mécanismes gouvernant la chimie des eaux souterraines.....	96
Figure 70 : Diagrammes de Richards.....	98
Figure 71 : Diagrammes de Wilcox.....	99
Figure 72 : Valeurs propres de la matrice de corrélation.....	102
Figure 73 : Variables (axes F1 et F2 : 71.5 %) .....	103
Figure 74 : Individus (axes F1 et F2 : 71.5 %).....	103
Figure 75 : Variables (axes F1 et F3 : 69,7%).....	104
Figure 76 : Individus (axes F1 et F3 : 69,7).....	104
Figure 77 : Classification ascendante hiérarchisée des eaux .....	105
Figure 78 : Elaboration des cartes de vulnérabilités par la méthode DRASTIC et GOD.....	112
Figure 79 : Profondeur de la nappe dans la zone d'étude.....	116
Figure 80 : Recharge nette de la nappe de F'kirina.....	118
Figure 81 : Lithologie de l'aquifère de F'kirina.....	119
Figure 82 : Texture des sols de la plaine de F'kirina.....	120
Figure 83 : Carte de pente de la plaine de F'kirina.....	121
Figure 84 : Carte de la lithologie de la zone vadose de la nappe de F'kirina.....	122
Figure 85 : Carte des conductivités hydrauliques de la plaine de F'kirina.....	123
Figure 86 : Carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC.....	124
Figure 87 : Système empirique GOD, paramètres et cotation.....	125

Figure 88 : Carte des types d'aquifères classés selon la cotation GOD.....	126
Figure 89 : Carte de la zone non saturée "vadose" (O) .....	127
Figure 90 : Carte de la profondeur du niveau piézométrique .....	128
Figure 91: Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du secteur d'étude par application de la méthode GOD.....	129
Figure 92 : Carte de la distribution de nitrate (mg /l) de la plaine de F'kirina.....	130

### **Liste des tableaux**

Tableau 01 : Distribution de la population par commune.....	11
Tableau 02 : Les coordonnées Lambert des stations de mesures.....	26
Tableau 03 : Les valeurs de l'indice d'aridité mensuel (I).....	34
Tableau 04 : Les valeurs de l'indice d'aridité annuelle (Ia).....	36
Tableau 05 : Valeurs de coefficient pluviométrique d'Emberger.....	36
Tableau 06 : ETR selon la C.W Thornthwaite.....	40
Tableau 07 : Bilan hydrique à la station d'Oum El Bouaghi (1995-2017) .....	41
Tableau 08 : Bilan hydrique à la station d'Ain Beida (1970-2011).....	42
Tableau 09 : Les principaux horizons aquifères Tertio- Quaternaire.....	55
Tableau 10 : Les principaux horizons aquifères du Crétacé supérieur.....	56
Tableau 11 : Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques.....	67
Tableau 12 : Estimation de la qualité de l'eau selon le Ph.....	69
Tableau 13 : Classification de Richards.....	97
Tableau 14 : Statistiques élémentaires des différents paramètres physico-chimiques.....	100
Tableau 15 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	101
Tableau 16 : Valeurs propres des axes et leurs contributions.....	101

Tableau 17 : Corrélacion entre les variables et les axes.....	102
Tableau 18 : Les critères de vulnérabilité.....	109
Tableau 19 : Principales méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux.....	111
Tableau 20 : Poids attribués aux paramètres DRASTIC.....	113
Tableau 21 : Notations accordées aux paramètres DRASTIC.....	114
Tableau 22 : Sources de données brutes et mode de traitement de chaque paramètre.....	115

### **Liste des abréviations**

ACP : Analyse en Composantes Principales.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique.

MNT : Modèle Numérique du Terrain.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONM : Office National de la Météorologie.

SIG : Système d'Information Géographique.

C.G.G : Compagnie Générale de Géophysique

$\mu$ S : micro-siemens.

SAR : Sodium absorption Ratio.

PH : potentiel hydrogène

EPA Environmental Protection Agency

## **Introduction**

A l'échelle du globe, les ressources en eau potable sont essentiellement composées de 69% des eaux de surface (glaciers, lacs et rivières) et 30% des eaux souterraines (Gleick, 1996). Contrairement aux eaux de surface qui sont facilement exploitables et cibles des pollutions anthropiques, les eaux souterraines sont moins exposées et globalement de meilleure qualité. Les périodes de sécheresse qui ont durement affecté de nombreuses régions dans le Monde, durant la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, ont mis en exergue la précarité des réserves en eaux souterraines et de surface dans les zones semi-arides et arides.

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets domestiques et industriels non contrôlés, l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau. Ces derniers produisent une modification chimique de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités. Il s'avère donc nécessaire de mettre en œuvre des études globales pour la reconnaissance des ressources en eau en vue d'une gestion durable. Sachant que l'accès à une eau de bonne qualité tant pour la consommation que pour l'agriculture est une condition essentielle au développement d'un pays, une meilleure connaissance de l'origine et des mécanismes de dégradation qualitative et quantitative des eaux, contribuerait à une gestion durable de l'eau. Et donc, une gestion qualitative et quantitative efficace et durable des ressources en eaux souterraines nécessite une bonne compréhension du fonctionnement du réservoir sollicité, notamment pour le cas des zones arides où la baisse pluviométrique pèse sur la recharge de la nappe.

Cette thèse a pour cadre ce type de région à climat semi-aride. Elle s'intéresse à la vulnérabilité et au risque de pollution chimique de la plaine de F'kirina, où l'on constate une dégradation progressive de la qualité des eaux souterraines.

Donc il est essentiel de développer des plans de protection des eaux souterraines aux différents polluants provient d la surface par infiltration. La meilleure approche pour la protection d'un aquifère à l'échelle régionale est d'utiliser des outils préventifs à sa contamination. Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité et le risque à la pollution des nappes permettent de répondre à ce besoin (Boulabiez 2017).

## **Structure de la thèse**

Le manuscrit de thèse s'articule autour de six chapitres précédés par une introduction qui décrit la problématique du sujet, les objectifs visés dans cette étude et les approches méthodologiques utilisées pour mener à bon port cette étude.

- Le chapitre I présente la situation géographique de la zone d'étude.
- Le chapitre II expose les caractéristiques des différentes formations géologiques rencontrées dans la zone en s'appuyant principalement sur la synthèse des études géologiques.
- Le chapitre III est consacré à caractéristiques climatiques telles que les précipitations et la température.
- Le chapitre IV s'intéresse au hydrogéologiques et le fonctionnement hydrodynamique de la nappe en utilisant les données des campagnes piézométriques en périodes de basses et de hautes eaux.
- Le chapitre V étudie la chimie des eaux souterraines, les différents processus géochimiques gouvernant la minéralisation des différents faciès d'eau rencontrés ; et l'origine des eaux de l'aquifère en utilisant les rapports caractéristiques et méthodes statistiques.
- Le chapitre VI est consacrée essentiellement à la vulnérabilité des eaux souterraines a la pollution en utilisant les deux méthodes DRASTIC et GOD.

Enfin, l'ensemble de ces différents résultats issus des différents chapitres constitue la synthèse qui fera l'objet de la conclusion générale à laquelle seront associées des perspectives.

# ***CHAPITRE I***

*Cadre physique et géographique*

## **1-APERÇU GEOGRAPHIQUE**

### **1.1- Situation géographique :**

La plaine de F'kirina est située au cœur des hautes plaines constantinoises. Cette zone se trouve à 55 km au sud-est du chef-lieu de wilaya d'Oum El Bouaghi ; à 40 km au Nord Est de Khenchela ; et à 18 km du siège de la Daïra de Ain Al Beida.

Elle se trouve entre les parallèles 35°49'42' N et 35°8'30"N et les méridiens 7 °0'18'' E et 7° 5'6''E (Fig.1).

Cette plaine couvre une superficie de 342.08 km<sup>2</sup>et elle est limitée ;

\_ Au Nord par djebel El Galaa Kebira (1246 m), Djebel Ammamrat El Kebira (1203 m), et le djebel El Forne (1184). A l'Est par la Chaîne de Montagnes formée par Djebel Fedjoudj et Merzeklal.

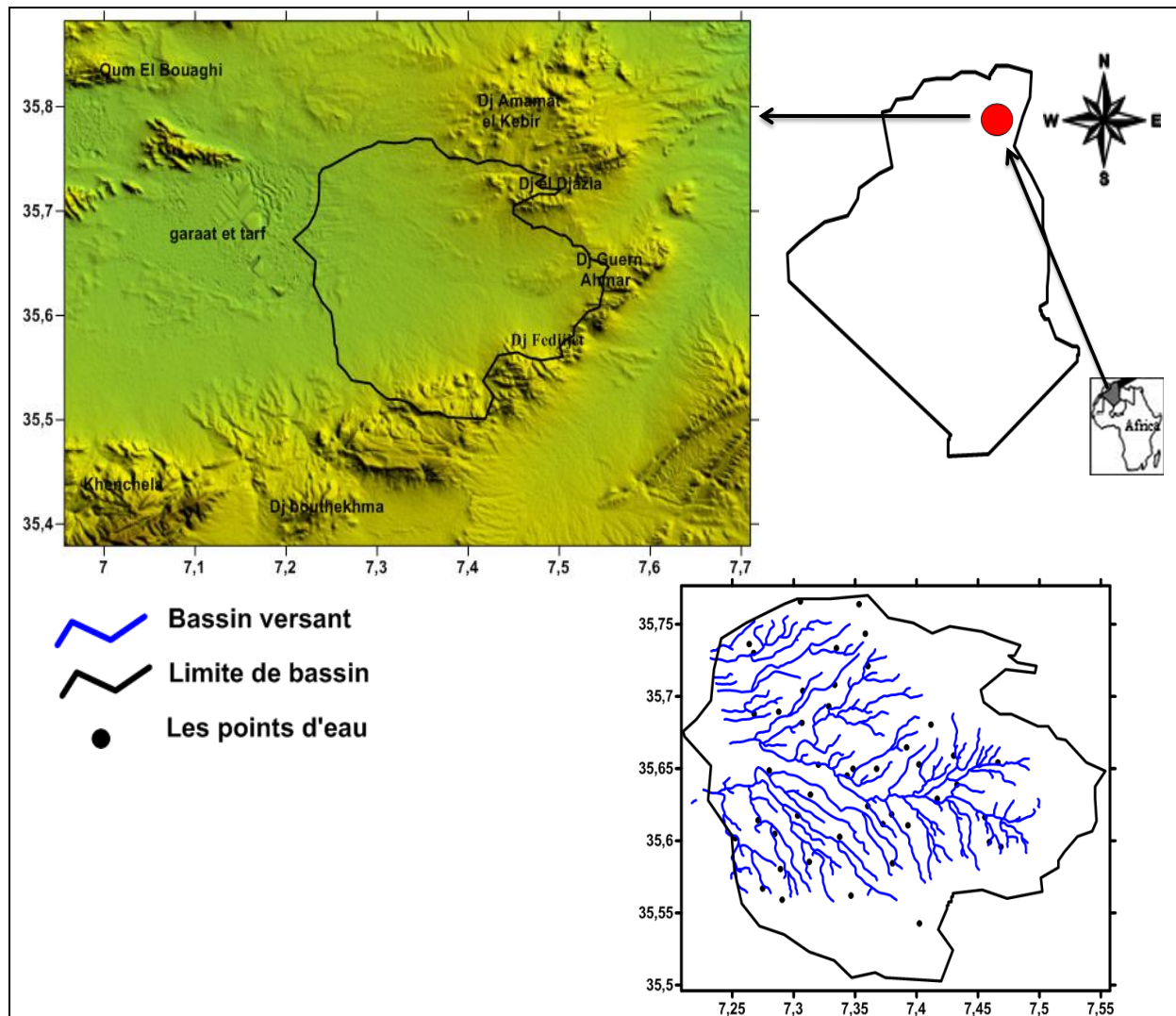
\_ Au Sud par djebel Boutekhma (1291m), djebel fedj Amer (1259m), et le Djebel Bou Tebina (1226m).

\_ A l'Ouest par djebel El Medjifla (1174m), le Djebel Fedjidjet (1291m), et le Kef El Assa (1117m).

A l'Ouest : une vaste zone plate limite des hautes plaines constantinoises et par la Garaet Et Tarf.

Administrativement, la région de F'kirina est limitée :

- Au Nord par Ain Beida, la commune de Zorg et la commune de Berriche
- Au Sud par La commune d'Oued Nini.,
- A l'Est par la commune d'El d'jazia
- A l'Ouest par la commune d'Oum El Bouaghi et Ain Zitoun.



**Figure 1 : Situation géographique de la région d'étude.**

La plaine de F'kirina appartient au sous bassin versant de Garaet Tarf (Fig.2) qui d'une superficie de 2430 km<sup>2</sup>, appartient aux bassins versant des hauts plains Constantinoises (9578 km<sup>2</sup> de superficie).il présente une dénivelée de 1269m, sa forme allongée, sa faible pente, la nature géologique des terrains d'affleurement, ses températures spécifiques et sa couverture végétale ; sont des paramètres qui favorisent l'évapotranspiration et l'infiltration sur le ruissellement.



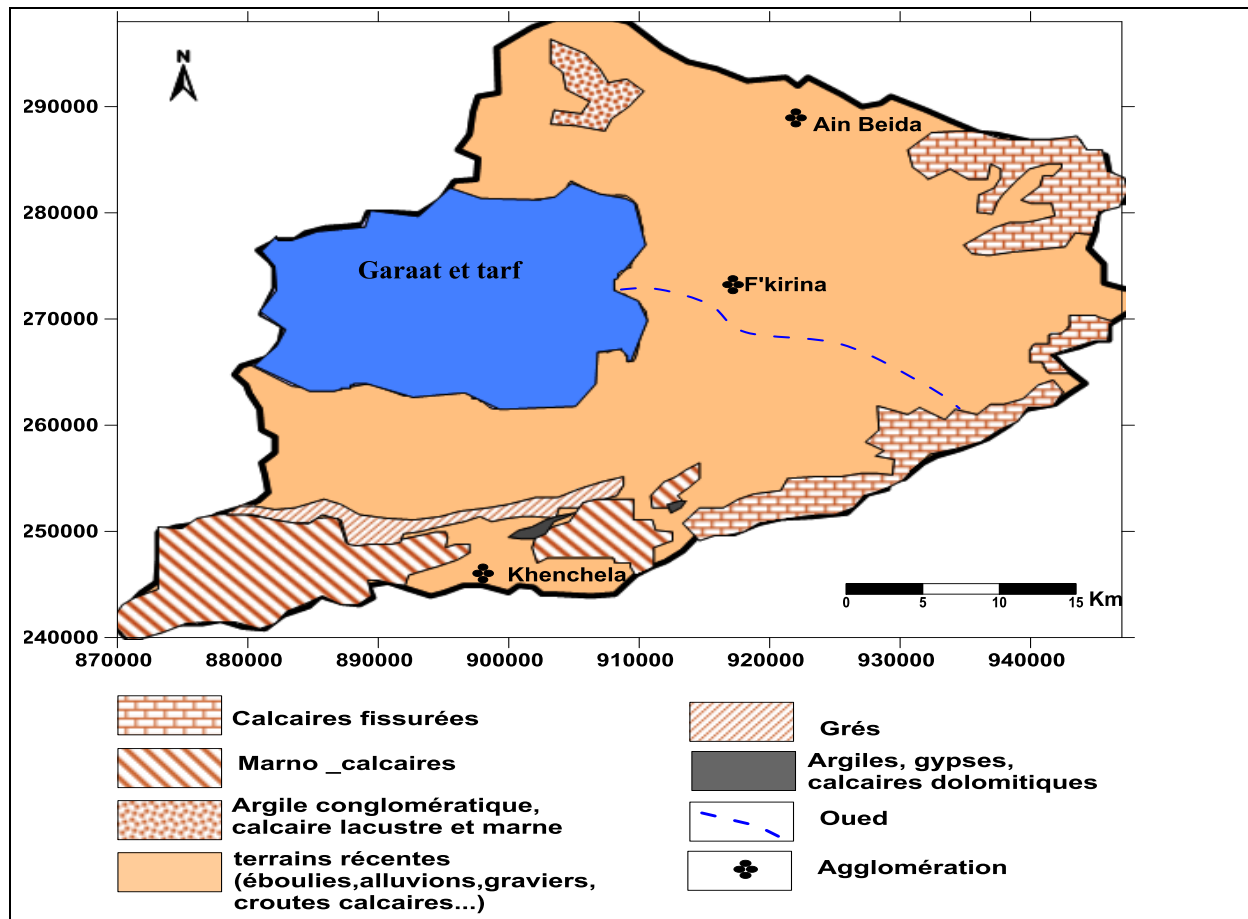
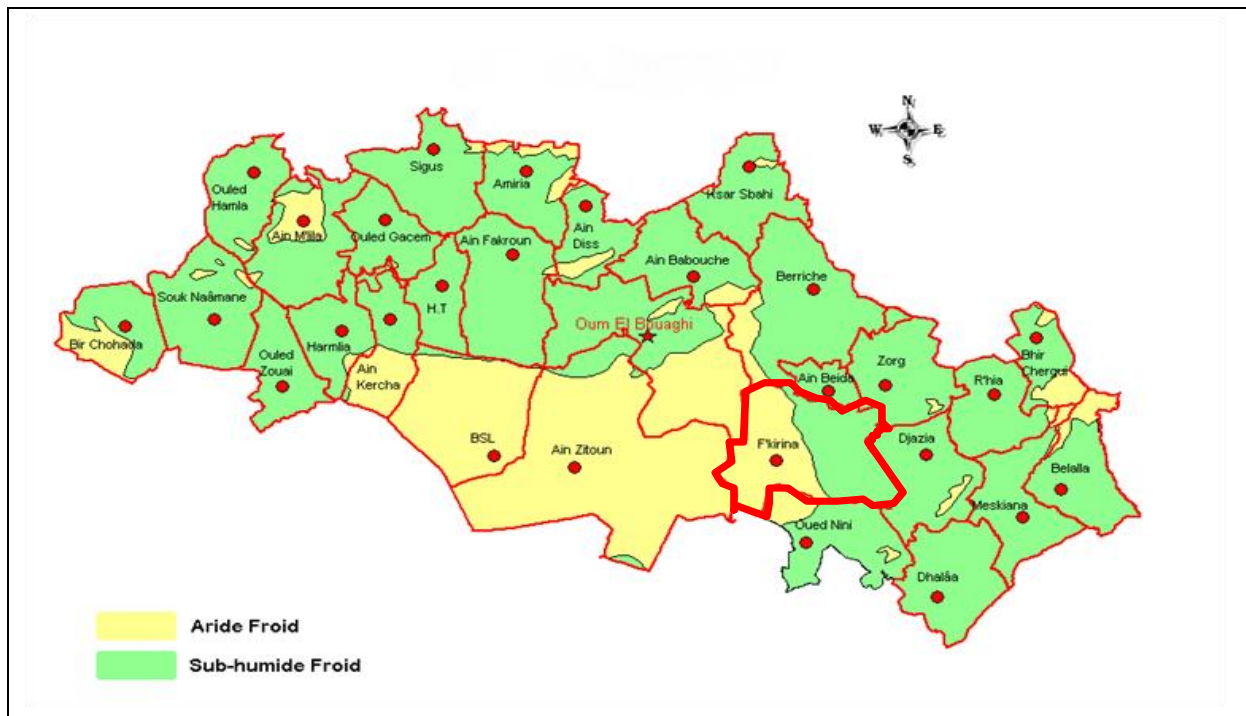


Figure 3 : Le bassin versant Garâat El Tarf.

1.4. Le climat :

La plaine de F'kirina se caractérise par deux types de climat (Fig.4) ; le Sud trop influencé par les courants d'air froid et humides en provenance des Aurès ou l'altitude dépasse les 1200 m, jouit d'un climat tempéré. Le Nord, qui est une vaste plaine ou l'altitude décent jusqu'à moins de 850 m est couvert par un climat semi-aride.



**Figure 5 : La carte climatique de la wilaya d'Oum el Bouaghi.**

### 1.5. Le relief :

Aux bordures de la plaine, sont réparties en plusieurs montagnes qui forment la principale ligne du relief (Fig.6) , d'altitudes très élevées et variables (supérieur à 1000m), et de direction générale NE-SW.

Parmi ces montagnes, les plus importantes sont : Djebel Guern Ahmar (1200m). Djebel Fedjidjet (1291m), Djebel Boutekhma (1349m), Djebel Djazia (1192m), Djebel Bardo (1110m), Djebel el Gala (1200m), Djebel el Zorg (1129m).

A partir de ces massifs de nombreux cours d'eaux temporaires donnent naissance ; et forment le réseau hydrographique.

D'une façon générale l'écoulement se fait de l'Est vers l'Ouest, en direction de la sebkha de Garaet Et Tarf.

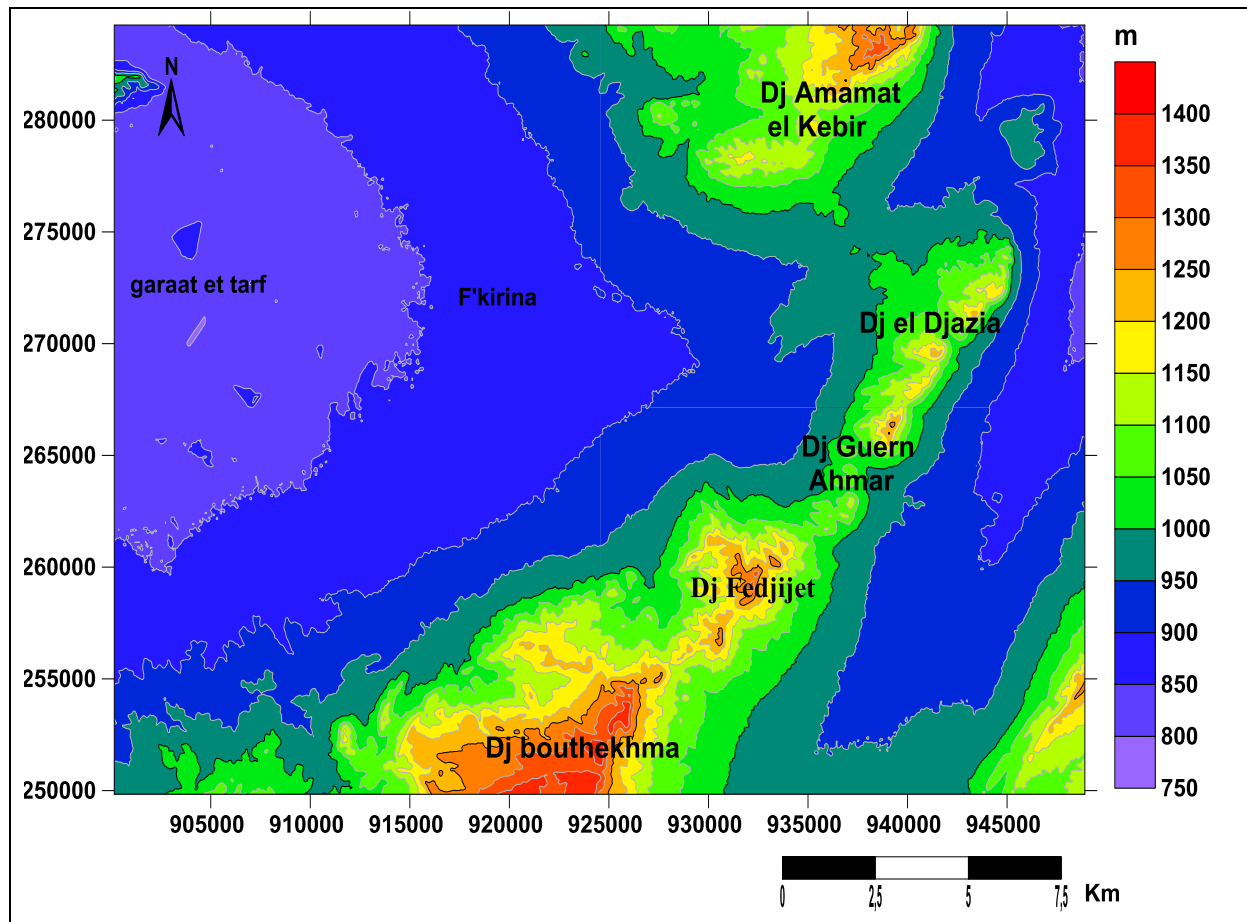


Figure 6 : La carte hypsométrique de la wilaya de la zone d'étude.

### 1.5. Couvert Végétal

La végétation ne trouve pas des conditions favorables pour sa croissance ( Fig.7), la couverture végétale est xérophile (adaptée à l'aridité), l'arbre est absent, seules les plantes steppiques comme le Diss (*Ampelodesma mauritanica*). En revanche, les cultures de blé et de l'orge peuvent se faire sans irrigation sur ces vastes hauts plains.

Les périmètres irrigués sont développés surtout dans la plaine de F'kirina et Remila.

Tout autour de la Sebka subsiste une végétation herbacée composée essentiellement d'Armoise blanche et d'Atriplex.

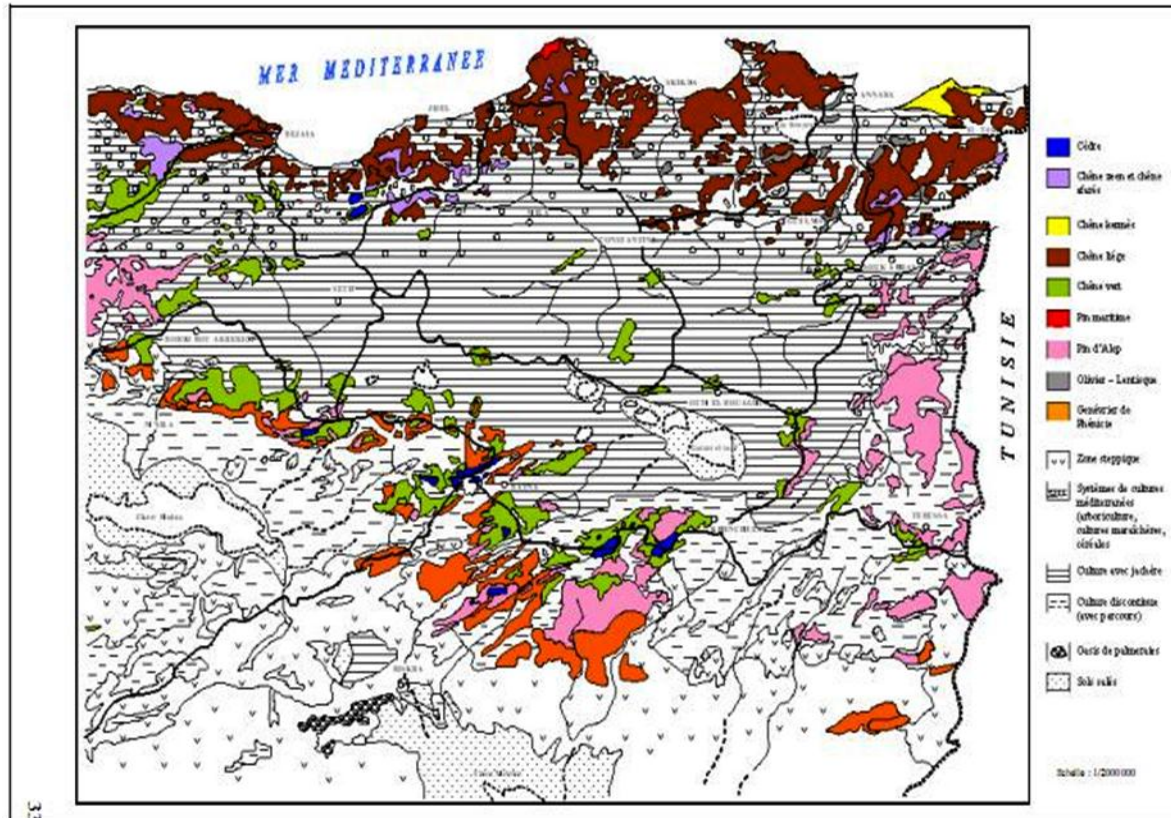


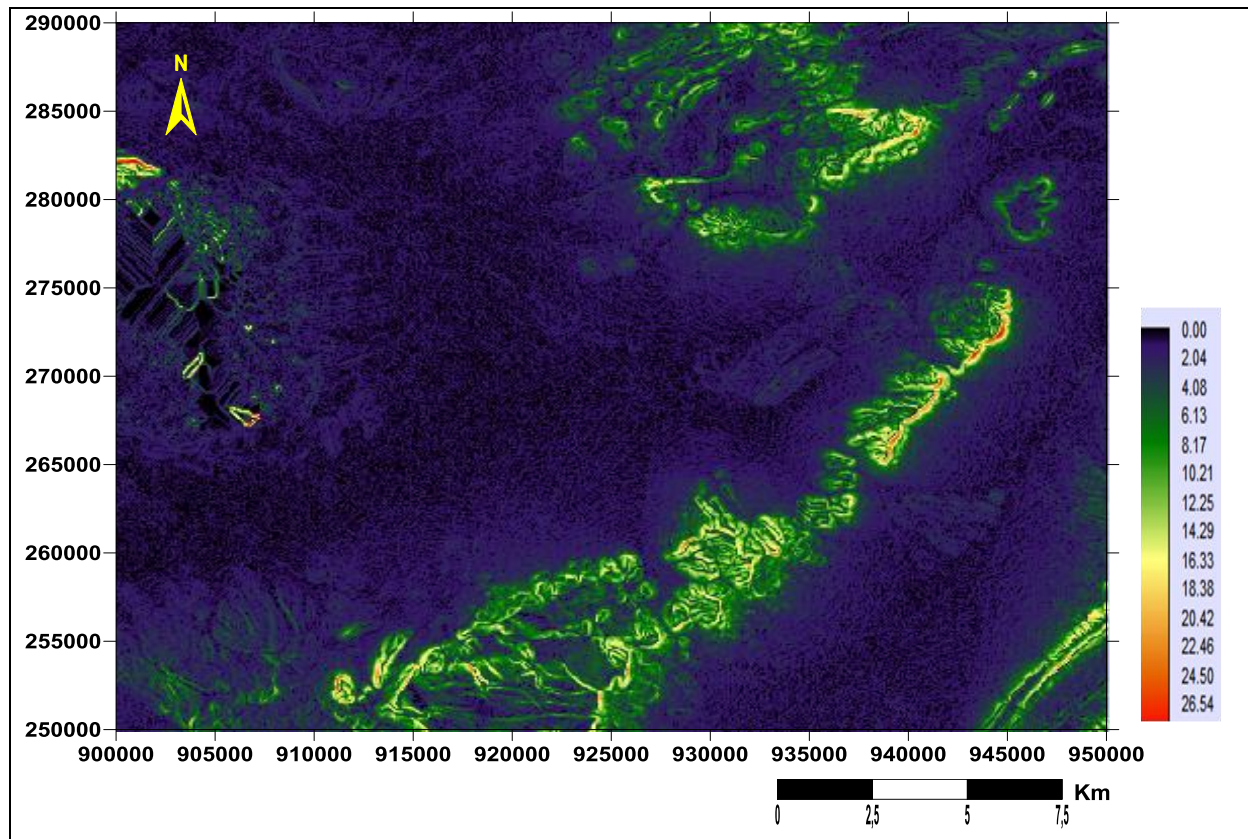
Figure 7 : Couverture végétale de l'Est algérien (d'après carte internationale du tapis végétal au 1/1000 000 feuilles Tunis-Sfax et Alger, complétées par Mebarki ; 2005).

### 1.6. La topographie de la région

La topographie joue un rôle déterminant dans la conception du réseau. F'kirina se caractérise par son site plat sans aucun accident apparent avec des pentes faibles variant entre 1 et 2%.

L'altitude moyenne est d'environ 850 (Fig.8).

La région de F'kirina est constituée de formation ci-après du bas vers le haut on constate une couverture de terrain constitué essentiellement de calcite intercalante, des couches plus minces, de marne dure et d'argile.



**Figure 8 : La carte de pente de la région de F'kirina**

## 2. Contexte socio-économique

Cette région est connue par sa grande activité agricole qui présente 79% de la superficie totale. L'agriculture est observée sur l'ensemble de la plaine, avec une très grande variété de cultures, céréalières et maraîchères.

La population qui se trouve sur la zone d'étude atteint 150 000 habitants, elle est concentrée généralement au niveau des communes (Tab.1).

Commune	Type de Commune	Nombre d'habitants	Superficie en (km <sup>2</sup> )	Densité (hab/km <sup>2</sup> )
Oued Nini	Rurale	5432	129	42
El Djazia	Rurale	2672	132	20
F'kirina	Rurale	13083	217	60
Zorg	Rurale	2025	130	16
Ain Beida	Urbaine	114711	34	3374
Berriche	Rurale	6230	223	28
Ain Zitoun	Rurale	7275	493	15

**Tableau 1 : Distribution de la population par commune.**

**Conclusion**

La plaine de F'kirina située à 40 km au Nord Est de Khenchela, caractérisée par une morphologie à faible altitude dans la plaine (850m) et accentuée pour les massifs (1230m), cette morphologie nous donne l'impression que la plaine est une dépression plane.

Elle est caractérisée par un couvert végétal maigre qui est le résultat du climat semi-aride de la région, la faible pluviométrie et aussi la forte salinité des eaux de la plaine.

# ***CHAPITRE II***

## *Cadre géologique*

**1.Introduction**

Toute étude hydrogéologique doit obligatoirement passer par une étude géologique elle permet de définir les formations et les structures susceptibles de constituer des réservoirs, et d'estimer leurs importances et capacités.

La feuille de F'kirina est située à la limite des Hautes Plaines constantinoises, des monts des Harectas, des monts du Mellegue et de ceux des Nementchas. Trois zones composent le paysage de cette feuille. A l'ouest une vaste zone plate est le dernier témoin des Hautes Plaines constantinoises. A l'Est de la feuille un arc montagneux boise se compose, du Nord au Sud, du Djebel el Djazia 1176 m, qui appartient aux monts des Harectas et d'une sierra qui va du Djebel Guern Aicha 1 326 m la Koudiat es Sayada, au Djebel Fedjidjet (1291 m) et au Djebel Boutekhma 1348 m puis rejoint les hauteurs de la feuille voisine de Delâa. L'angle sud-est de la feuille appartient à la vallée de l'Oued Meskiana, lui-même tributaire du haut Mellegue. Les eaux de surface de la plaine occidentale et du versant occidental des reliefs, drainées par le lit marécageux de l'Oued Nini se dirigent vers la Garaet et Tarf toute proche.

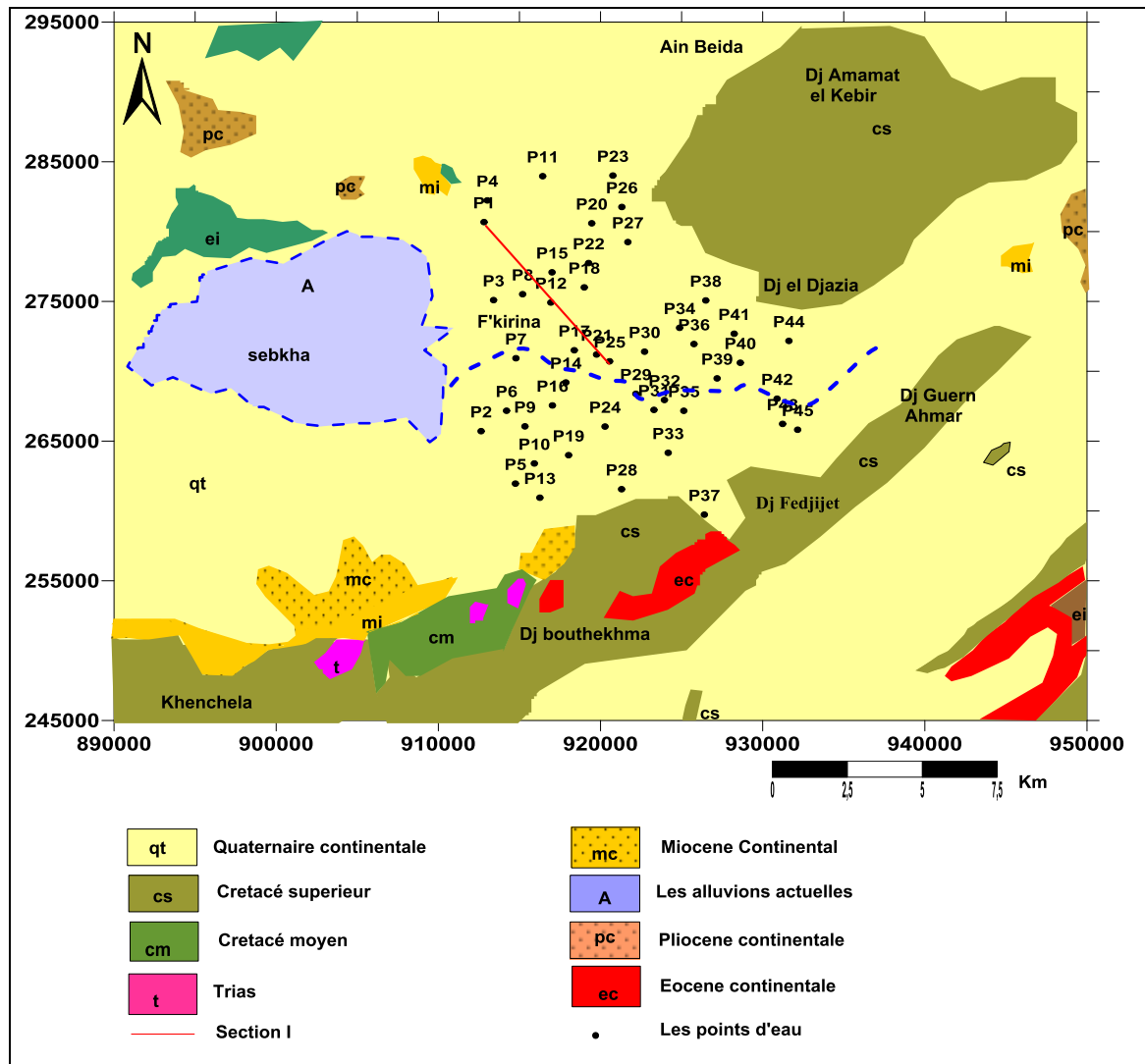


Figure 8 : La carte géologique de la zone d'étude.

## 2. Description stratigraphique et lithologique

### 2.1. Le secondaire

#### 2.1.1. Le Trias

Dans la zone d'étude (Fig.8) les formations triasiques sont représentées de façon très discontinue. Quelques affleurements du Trias ont été observés dans les zones Nord-est et Sud-ouest d'Ain Delâa et de F'kirina.

Dans les deux cas, ces affleurements sont très réduits et constituent vers le Nord-est leurs prolongements vers le Nord-est sont représentées par Djebel El Krouma et Knif, (Nord de Khenchela).

Le matériel triasique rencontré en ces différents points présente régulièrement la même composition lithologique, faite d'argiles versicolores représentées par des dolomies sombres, rubanées et crypto cris.

**2.1.2. Le Crétacé Basal : (Berriasien à Hauterivien) :** Le crétacé basal se retrouve rarement à l’affleurement.

### **2.1.3. Le Barrémien**

**2.1.3.1. Le Barrémien sup. :** Il est composé de marnes grises noires schisteuses et de grès blanc, fins argilo carbonatés à tendance quartzreuse. Son épaisseur est d’environ 80 m.

### **2.1.4. L’Aptien**

**2.1.4.1. L’Aptien inf. :** Il est représenté par des marnes gris noir à intercalations de marnocalcaires gris. Son épaisseur est de 100 m.

**2.1.4.2. L’Aptien sup. :** Il est formé de micrites et de biosparites et d’alternance de marnocalcaires, l’épaisseur atteint environ 300 m.

**2.1.5. L’Albien :** Représenté par des marnes, des grès ferrugineux et des biosparites.

**2.1.5.1. L’Albien sup. à Cénomaniens inf. :** composé par des marnes et des biomicrites grises.

**2.1.6. Cénomaniens sup. :** Il affleure dans la marge septentrionale de la feuille d’Ain Beida. Ce sont des marnes écrasées par la fracturation et des filons de calcite.

**2.1.7. Turonien :** Il est représenté par uniformément dans toute la zone montagneuse par un épais niveau de 200 à 300 m d’épaisseur, composé de calcaire cristallin de calcaire marneux et de calcaire dolomitique

Il affleure lui aussi dans la marge septentrionale de la feuille d’Ain Beida où il est fortement fracturé.

**2.1.8. Sénonien :** Du fait de l’importance de l’érosion antérieure au dépôt du Miocène marin, le Sénonien affleure de façon très irrégulière, il est très épais et atteint les 1200m à 2000m.

La partie supérieure de l’étage, formée régulièrement de calcaires massifs, donne des crêtes continues formant un des éléments caractéristiques de l’orographie de l’ensemble de la région.

Les séries Sénoniennes rencontrées, sont essentiellement marnocalcaires et souvent très fossilifères. Vers le Nord-est de Khenchela, elles montrent une nette variation de faciès qui se poursuit jusqu’au Djebel El Bardo sous forme de calcaires béchiques, récifaux et bioclastiques.

**2.1.8.1. Coniacien :** alternances de marnes grises et de calcaires noduleux beiges ou ocre contenant parfois des grains de quartz ; l’épaisseur de ce dernier est de centaine de mètre.

**2.1.8.2. Santonien :** dans l’angle nord-est de la feuille, le Santonien affleure dans quelques ravins au Sud de la Kouidiat en Naga.

Il s'agit de marnes sombres grises ou gris noirâtre, légèrement gypseuses (cristaux ), son épaisseur est de l'ordre de 100 à 150 mètres.

**2.1.8.3. Campanien :** le Campanien est constitué à la base par une barre de calcaires de 75 à 90 m. d'épaisseur surmontée par des marnes grises ou beige et des alternances de marne et de marnocalcaires 60m.

#### **2.1.8.4. Maestrichtien**

**2.1.8.4.1. Le Maestrichtien Inferieur à dominante marneuse. :** Il s'agit de 40 m environ de marnes grises- beiges, suivis d'une alternance de marnes beiges et de bio micrites argileuses ocre.

**2.1.8.4.2. Le Maestrichtien Supérieur calcaire. :** Ses niveaux déterminent la ligne principale des reliefs, ils sont représentés par :

Des biomicrosparites grises, noduleuses, phosphatées et gluconieuses à passage marneuses à la base, alors qu'au sommet ce sont des bio micrites gris blanchâtres, massives (cassure blanchâtre) à passées noduleuses et à rognons de silex, la puissance de cet ensemble est de 120 m.

Une diminution de la puissance du Maestrichtien supérieur du sud vers le Nord est à signaler. La séquence inférieure du Maestrichtien à marnes et bio micrites argileuses est régulièrement homogène, sa partie supérieure, du sud au nord, change de faciès, les biomicrosparites péri récifales, massives, passent rapidement dans la région d'Ain Delâa et de La Meskiana à des micrites crayeuses, au Dj. Taffrent (F'kirina), le toit du Maestrichtien est souligné par une surface ferrugineuse.

### **3.2. Le Tertiaire**

**3.2.1. L'Eocène :** La répartition de l'Eocène est irrégulière au sud (secteur d'étude) où de rares témoins subsistent à la suite des érosions successives.

Il a été reconnu sur les flancs Est et Ouest du vaste anticlinal de la Meskiana, à Garaet Said et au Djebel Taffrent où il affleure à la faveur de larges replis synclinaux.

Il s'agit des termes inférieurs de l'Eocène qui ne montent pas plus haut que l'Yprésien supérieur (du fait de l'érosion) et qui présentent une séquence marneuse et une séquence carbonatée séparées par une discordance légèrement gréseuse

La série inférieure de l'Eocène qui paraît la plus complète se situe à 1 Km au sud de la localité d'Ain Delâa. Ainsi, au-dessus du toit raviné du Maestrichtien supérieur, viennent en concordance :

- 70 m de marnes grises verdâtres à la base.

- Une alternance de marnes gris beiges et de bio micrites finement gréseuses, beige et noduleuses.

- 80 m d'une alternance de micrites gris blanchâtres à nodules phosphatés et de bio micrites, blanchâtres souvent noduleuses à grains de phosphates à nombreux rognons de silex.

**3.2.2. Le Miocène :** Les affleurements du Miocène sont de dimensions réduites et se répartissent dans la partie Nord de la plaine. Donc c'est une Série composée par un ensemble marno calcaire en haut, un ensemble de calcaires épais au centre de la série, et une série de stratification d'argile, calcaire, grés, Il est constitué de deux faciès différents :

**3.2.2.1. L'Aquitano-burdigalien :** Correspondant à la base du Miocène, il est discordant sur le Crétacé et est composé de conglomérats rouges dont l'épaisseur ne dépasse pas les 80 mètres. Un seul affleurement très réduit à El Majene a été rapporté à cette formation du fait de son faciès.

**3.2.2.2. Le Langhien- Serravalien :** Peu épais, environ 40 mètres, et discordant, il est composé par des marnes, des bio micrites et des grès blancs. Un minuscule affleurement a El Majene, allongé selon une direction NW-a été rapporté au Langhien-Serravalien.

Il s'agit de calcaires gréseux roux à Algues. Les seuls affleurements étendus sont situés dans l'angle roux nord-est de la carte à la Koudiat en Naga.

### **3.3. Le Quaternaire**

Il couvre la quasi-totalité de la plaine et est présenté par :

**3.3.1. Les éboulis à blocs :** ne sont alimentés que par les corniches calcaires du Maestrichtien supérieur.

**3.3.2. Les alluvions actuelles ou récentes :** ont une extension limitée aux vallées de l'Oued Nini à l'Ouest et surtout de l'Oued Meskiana dans l'angle sud-est de la feuille. Ce sont des limons gris et des graviers. Les Sol de Sebkhia Quelques hectares de sols salés de Sebkhia sont observables au milieu de la vallée de l'Oued Meskiana.

**3.3.3. Les sols salés de Sebkhia :** ils ont une extension de quelques hectares et ils sont observables au milieu de la vallée de l'Oued Meskiana.

#### **3.3.4. Les terres arables et les alluvions anciennes**

La moitié occidentale de la feuille est recouverte de limons sombres dans toutes les zones basses. Ils correspondent à des alluvions anciennes a morphologie très plate, sur lesquelles se

sont installés des sols Bruns qui permettent des cultures au rendement plus efficace que sur les glacis steppiques.

### **3.3.5. Les glacis polygéniques**

Glacis polygéniques nappant les reliefs. Ces glacis couvrent de très vastes surfaces. Leur organisation en pente dance est tout à fait caractéristique. Ils ravinent le cycle antérieur de glacis caractérisé par des croutes massives. Il s'agit d'un nappage complexe débris bien calibrés, parfois légèrement encroutés. L'aspect est alors celui des croutes calcaires rosâtres feuilletées, classiquement attribuées au Tensiftien.

### **3.3.6. Les croûtes calcaires**

Ces formations sont perchées au-dessus des glacis polygéniques. Leur aspect est celui de croûtes massives blanches, entaillées et karstifiées qui forment des surfaces taraudées, et des dépressions de formes variées.

Le réseau hydrographique quaternaire a été influencé de façon considérable par les mouvements tectoniques du Miocène et Pliocène.

## **4. Les styles structuraux**

Les formations paraautochtones Nord Auresiennes représentées dans la zone centrale par les Dj. Fedjoudj, Kef Gouriret et Dj. Tarf, les massifs à l'est d'Ain Beida ainsi que la ligne de reliefs monoclinaux des Dj. Boutekhma, Fedjidjet et Guern Ahmar illustrent les formations autochtones Nord Auresiennes.

Le secteur Sud-Ouest de la région étudiée au-delà de l'axe Kais – Baghaï – Koudiat El Mzara et Dj. Stih correspond aux formations autochtones Auresiennes. Tous ces massifs sont affectés de plissements parfois intenses selon la direction atlasique prédominante (Nord 40° Est) et cisailés par des failles type atlasique de directions majeures (NE – SO) qui leur donnent un aspect compartimenté.

## **5. Les dépressions et fosses d'effondrement**

Ces structures géologiques sont illustrées aussi bien par les grandes étendues comprises entre les massifs d'Ain Beida et le paraautochtone Nord Aurésien que par celles comprises entre les massifs d'Ain Beida, l'axe Fedjoudj – Tarf et l'axe des Djebels Guern Ahmar, Taffrent.

Ces dépressions et fossés ont été engendrés par le compartimentage dû aux failles atlasiques, du fait de la nature des matériaux les composants, le plus souvent marneuse ou marnocalcaires, formations ayant réagi plus facilement aux efforts tangentiels auxquels elles ont été soumises. Elles sont aujourd'hui comblées d'un matériel Moi-Plio-Quaternaire.

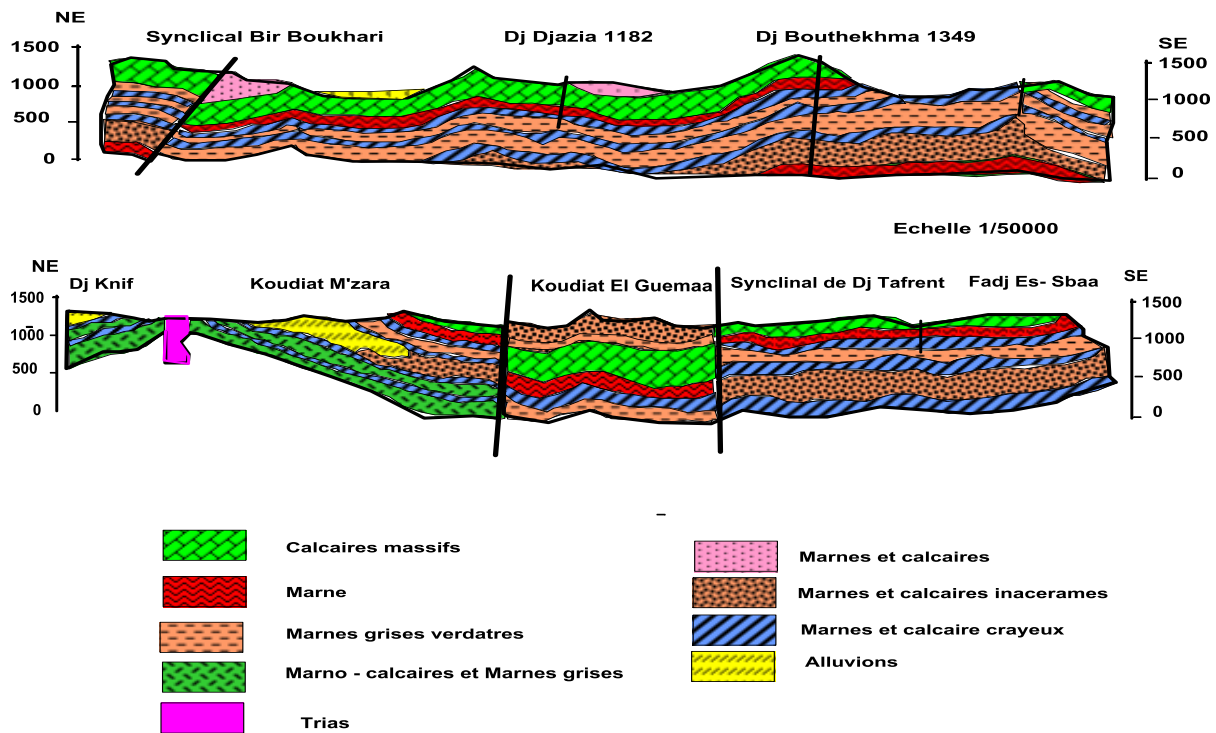


Figure 09 : Les coupes géologiques.

### 6. Structure et tectonique

Les différentes unités structurales en présence sont la résultante de deux importantes phases orogéniques tertiaire ayant engendré les structures et reliefs actuels (Fig.10). Il s'agit de la phase atlasique d'âge fini Lutétien et de la phase Alpine Miocène, de type tangentiel.

Les principales unités tectoniques sont les suivantes :

- L'anticlinorium du massif d'Ain Beida ;
- Le prolongement NW du grand anticlinal de Khenchela. Celui-ci, après s'être ennoyé sous la plaine de F'kirina, réapparaît vers le NW et est matérialisé par la structure anticlinale de Argoub Zeitoun jalonnée par des épointements Triasiques.
- L'anticlinal de la Meskiana.

Entre eux s'intercalent les synclinaux, tel que le synclinal perché de Mzara.

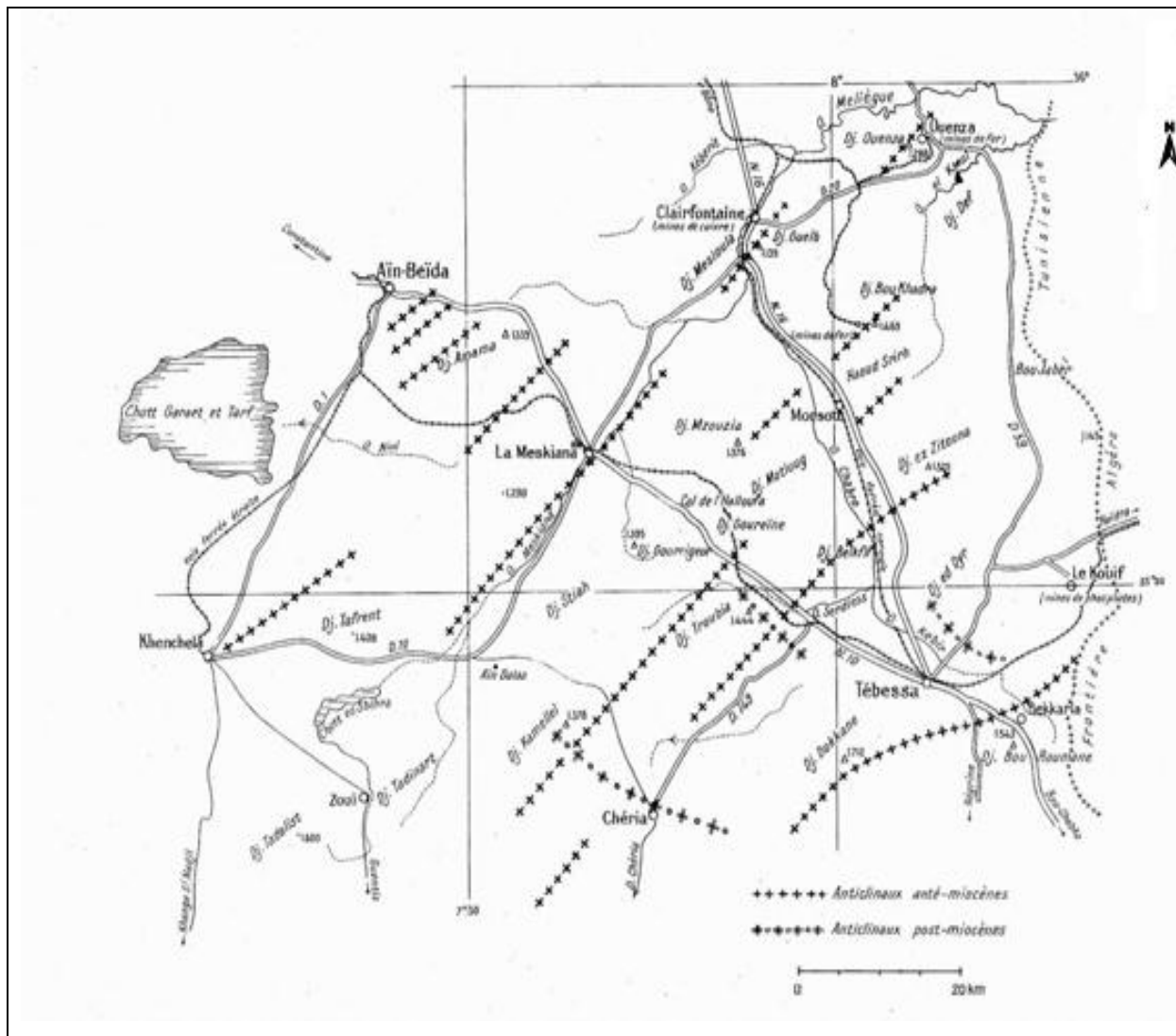
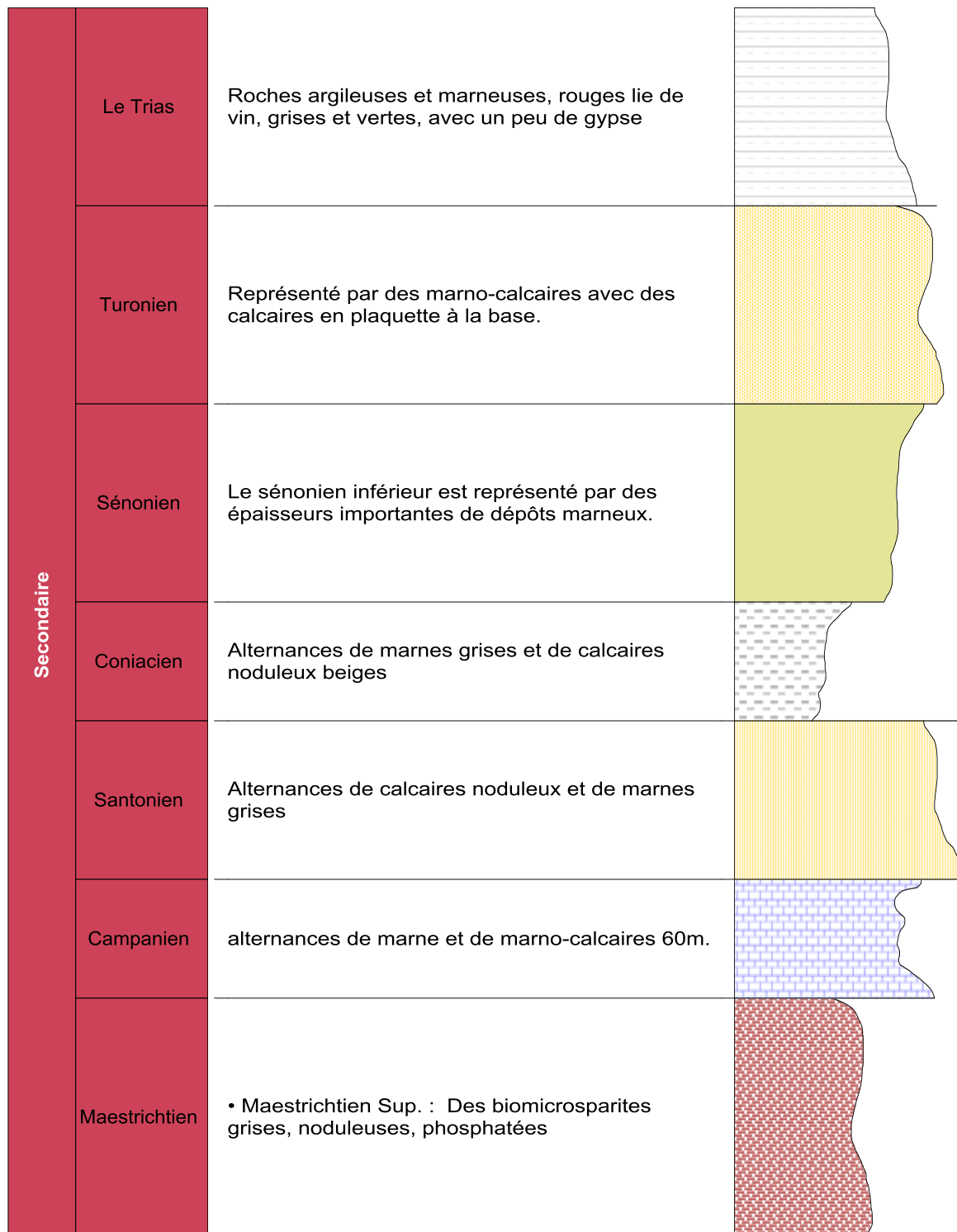


Figure 10 : Carte Structurale et tectonique de la région d'étude (Younssi ,2009).



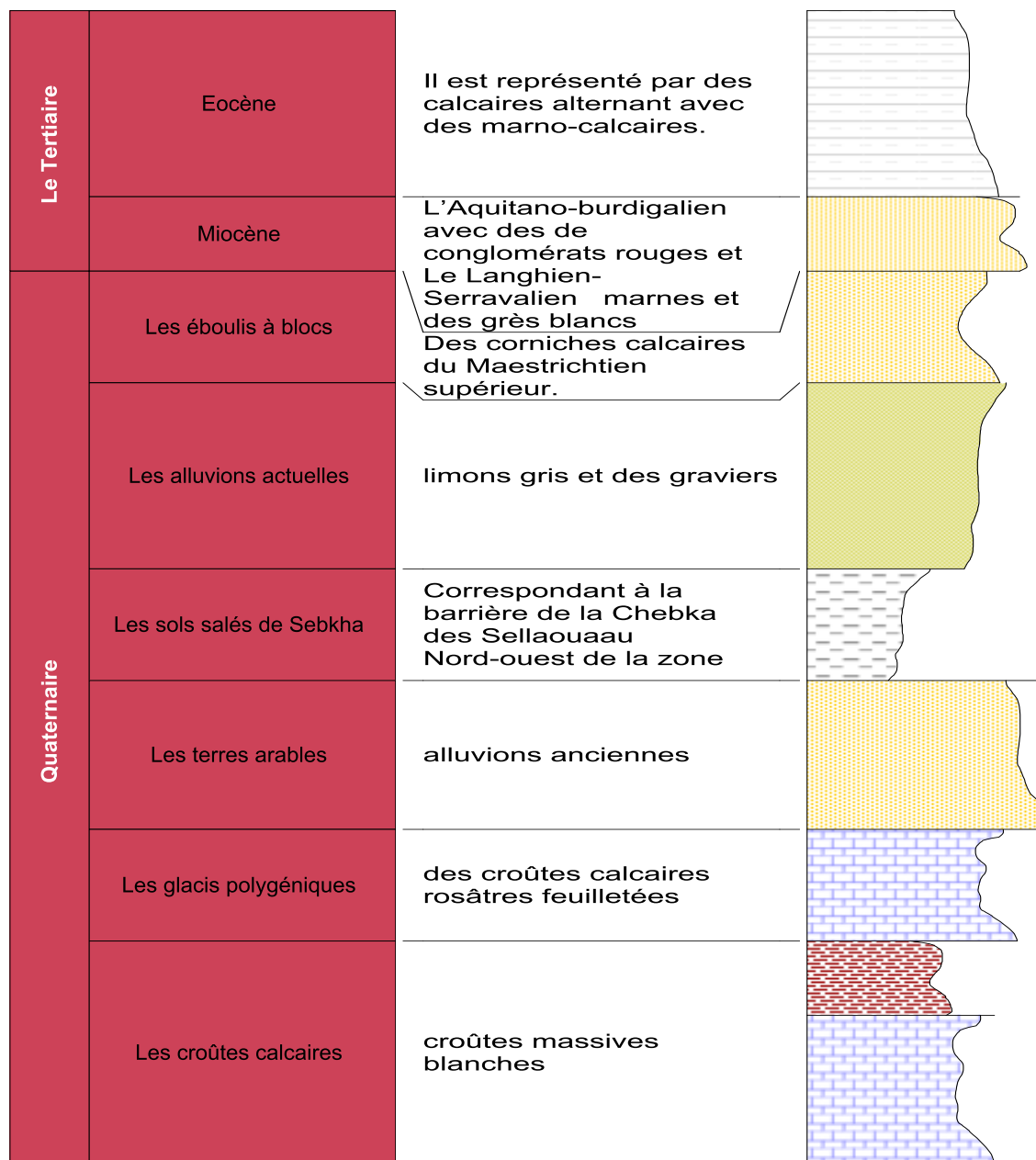


Figure 11 : Log litho stratigraphique Synthétique.

**7. Conclusion**

Sa localisation dans la partie orientale des hautes plaines constantinoises avec des affleurements de bordure d'âge Crétacé,

L'étude géologique de la plaine, basée sur la description géologique de la région a mis en évidence l'existence de trois structures d'importance hydrogéologique :

- Un substratum marneux du Maestrichtien inférieur observé au djebel Boutekhma dans la partie sud de la plaine. - Les assises marneuses constitueraient un substratum imperméable, que ce soit au niveau des bordures ou au centre de la plaine.
- Un ensemble appartenant au Crétacé et au Miocène caractérisé par des calcaires maestrichtiens, affleurent près des djebels (El Bardo, Djazia, Fedjidjet, Boutekhma, et Koudiat El Mzara.). Cet ensemble est d'un intérêt hydrogéologique important, car ces formations carbonatées peuvent former des karsts et emmagasinées des grandes quantités d'eaux. Il serait le siège d'une nappe profonde.
- Un bassin comblé d'une sédimentation hétérogène, notamment alluvionnaire, constitue le Quaternaire, avec une épaisseur de dizaines de mètres
- A l'intérieur de la plaine, on a des formations alluvionnaires qui se composent de galets, de cailloutis, de graviers, de sables et de limons, qui pourraient avoir une porosité primaire et former des nappes alluviales.
- La perméabilité est acceptable, permettant de stocker de l'eau, et suscitant un intérêt hydrogéologique, pour une éventuelle exploitation de cette nappe superficielle.

# *Chapitre III*

## *Hydroclimatologie*

### 1.Introduction

L'étude climatologique est très importante pour la connaissance des caractéristiques hydro climatologiques, qui est indispensable pour évaluer l'alimentation des ressources hydriques et des réserves souterraines. En effet, une grande partie de l'alimentation des réserves se fait par la remarquable contribution des précipitations, ou plus précisément les précipitations efficaces (PE), qui dépendent de plusieurs facteurs climatiques et hydrologiques. L'estimation des caractéristiques climatiques d'un bassin versant joue un rôle important dans la connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau. Les paramètres les plus intéressants dans l'identification du régime d'écoulement sont les précipitations (P) et la température (T). Comme la région d'étude est comprise entre deux régions bien définies et bien contrôlées par les agents de l'A.N.R.H. (Agence Nationale des Ressources Hydriques, W. Constantine) ainsi que par la station météorologique à Oum el Bouaghi.

Le tableau 2 présente les coordonnées Lambert des deux stations climatiques utilisées :

Stations	Code de station	Coordonnées			Périodes de mesure	Paramètres mesurés
		X	Y	Z		
Oum El Bouaghi		899	295	890	1995-2017	P et T
F'kirina	070708	917	272	856	1970-1997	P
Ain el beida	070707	224	288	1004	1970 -2011	P et T

**Tableau 2 : Les coordonnées Lambert des stations de mesures.**

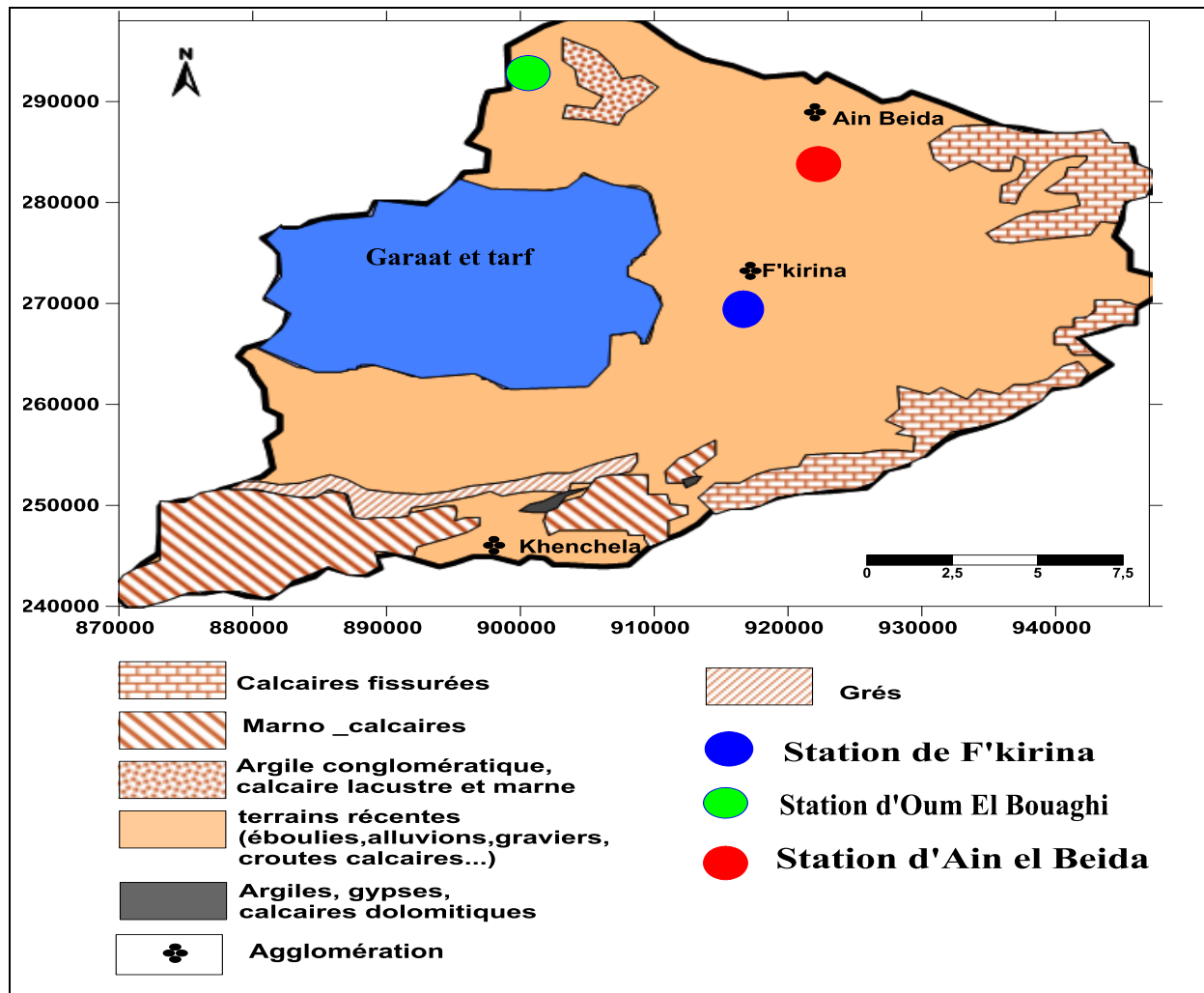


Figure 12 : Position géographique des différentes stations pluviométriques.

## 2. Analyse des facteurs climatiques

Les facteurs climatiques jouent un rôle déterminant dans l'alimentation des nappes souterraines par le biais de l'infiltration ; cette dernière dépend directement du taux des précipitations tombées dans la région

### 2.1. La pluviométrie

#### 2.1.1. Représentation mensuelle des précipitations.

Pour évaluer la variation des précipitations moyennes mensuelles, nous avons établi les histogrammes relatifs à chaque station

Les précipitations moyennes mensuelles sont calculées (en millimètres par mois) pour différentes stations météorologiques Oum el Bouaghi (1995-2017), F'kirina (1975-1997), Ain El Beida (1993-2011)

**2.1.1.1. Station de F'kirina** : la pluviométrie mensuelle varie de à 47 mm. Le minimum est enregistré au mois de juillet avec 7 mm (Fig.13).

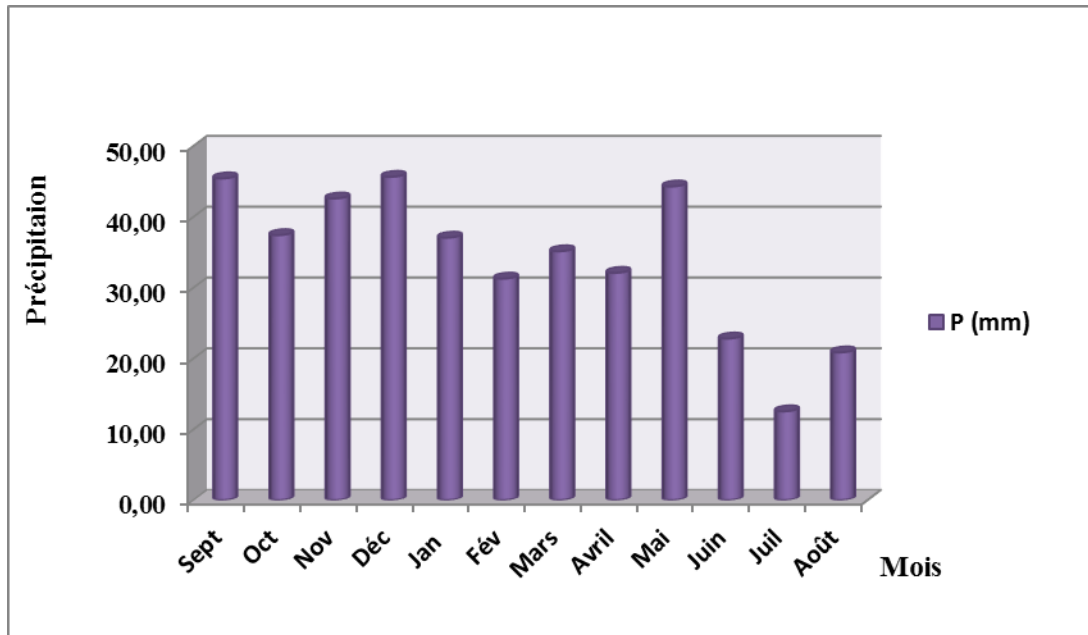


Figure 13 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station de F'kirina (1986-2009).

2.1.1.2. Station d'Oum El Bouaghi : le mois de Mai apparaît comme le mois le plus humide avec 54 mm. Juillet étant le moins pluvieux 11 mm (Fig.14).

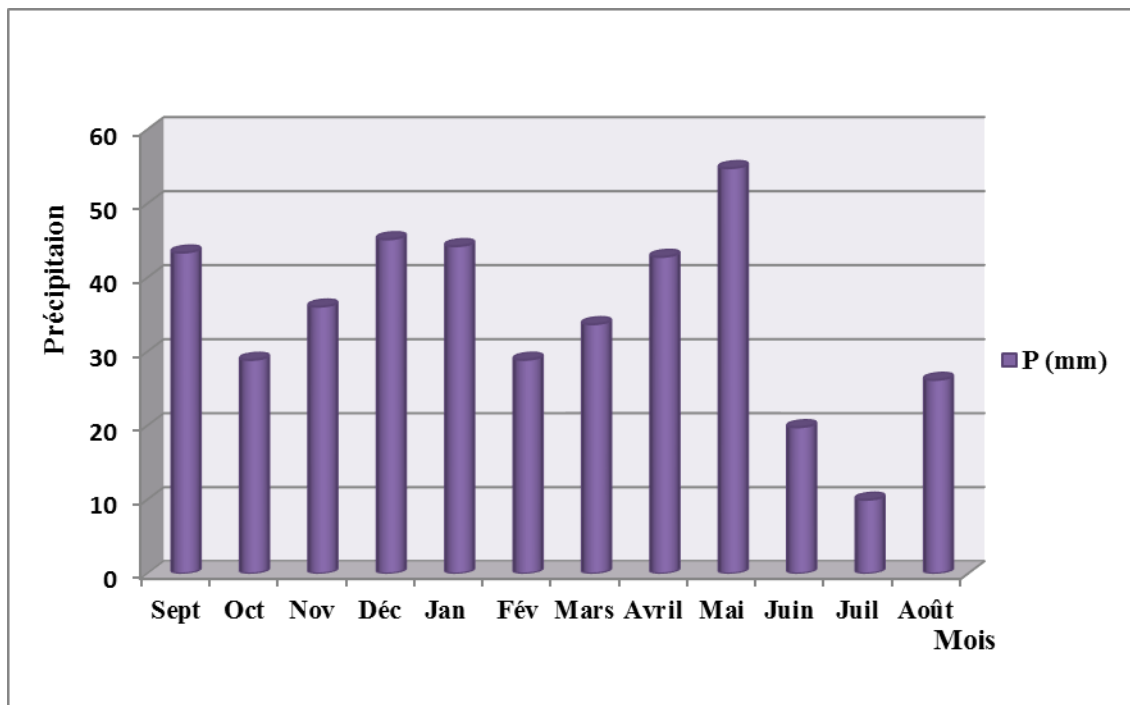


Figure 14 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Oum El Bouaghi (1995-2017).

2.1.1.3. Station d'Ain el Beida : elle enregistre un maximum de pluie de 45 mm au mois de Mai et un minimum de 9 mm au mois de Juillet (Fig.15).

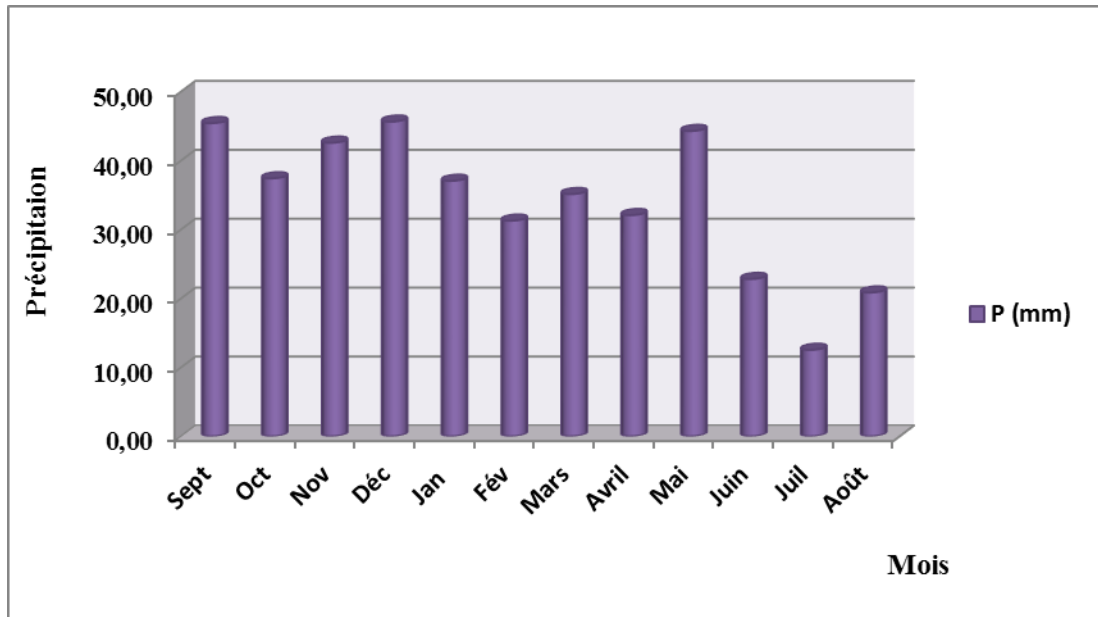


Figure 15 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain el Beida.

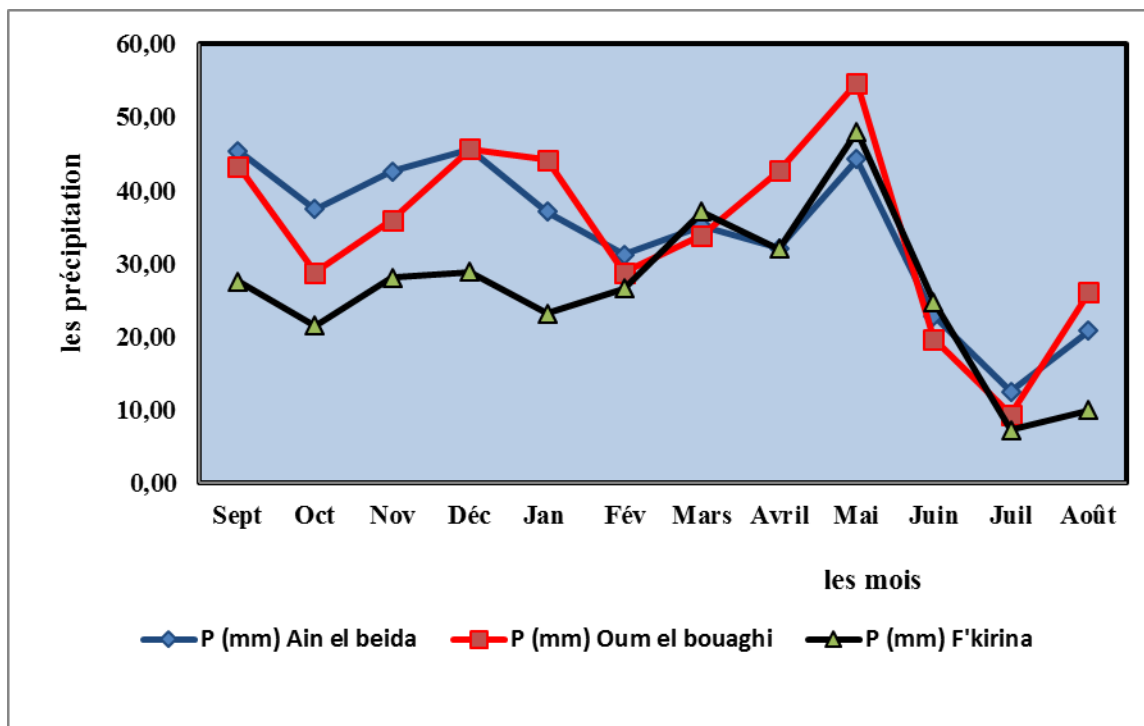
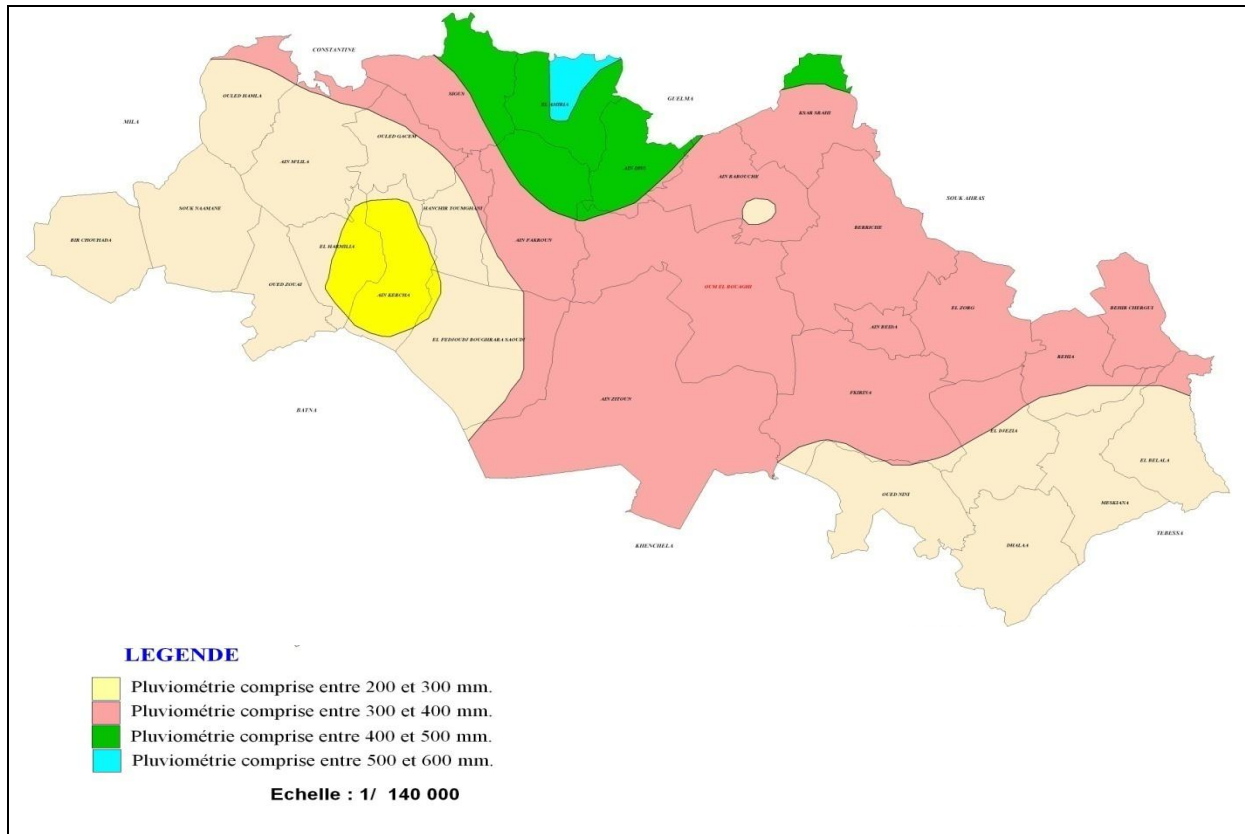


Figure 16 : Précipitations mensuelles moyennes interannuelles



**Figure 17 : Carte pluviométrique de la wilaya d'Oum el Bouaghi.**

## 2.2. La Température

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique.

Le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement moyen en hiver.

Le paramètre température est mesuré uniquement au niveau de deux stations : Ain el Beida (1993-2007) (Fig.18) et Oum El Bouaghi (1995-2017) (Fig.19).

Les histogrammes représentent la variation annuelle de la température montre des faibles valeurs sont mesurées aux mois de Janvier et février tandis que les plus fortes caractérisent les mois de Juillet et Août.

2.2.1. Station d'Oum el Bouaghi

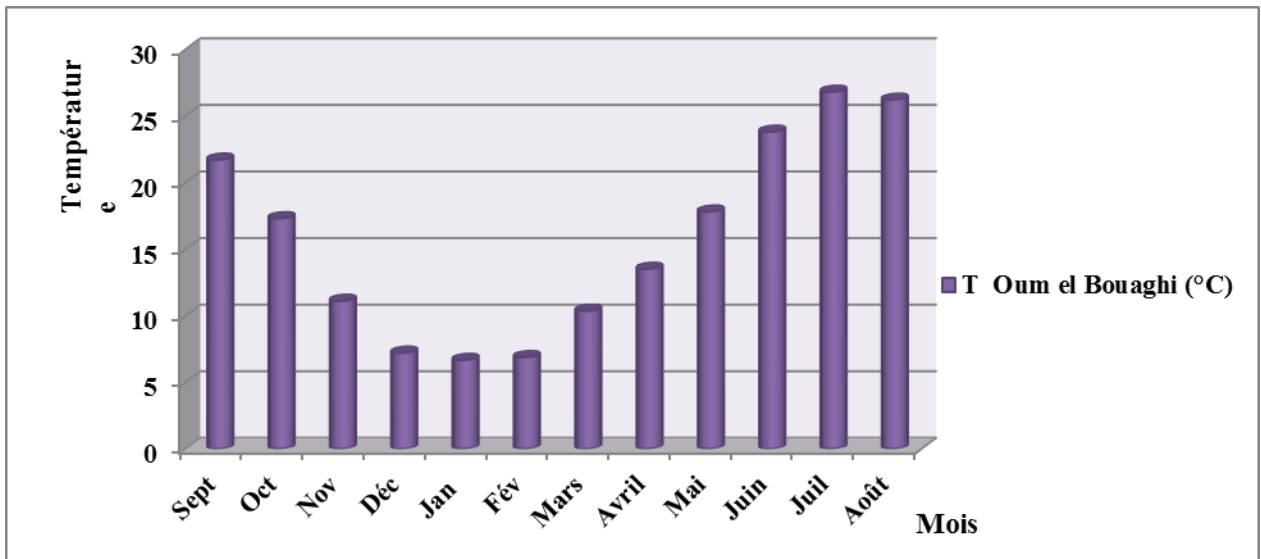


Figure 18 : Variation des températures moyennes mensuelles dans la station d'Oum El Bouaghi (1995-2017).

2.2.3. Station d'Ain el Beida

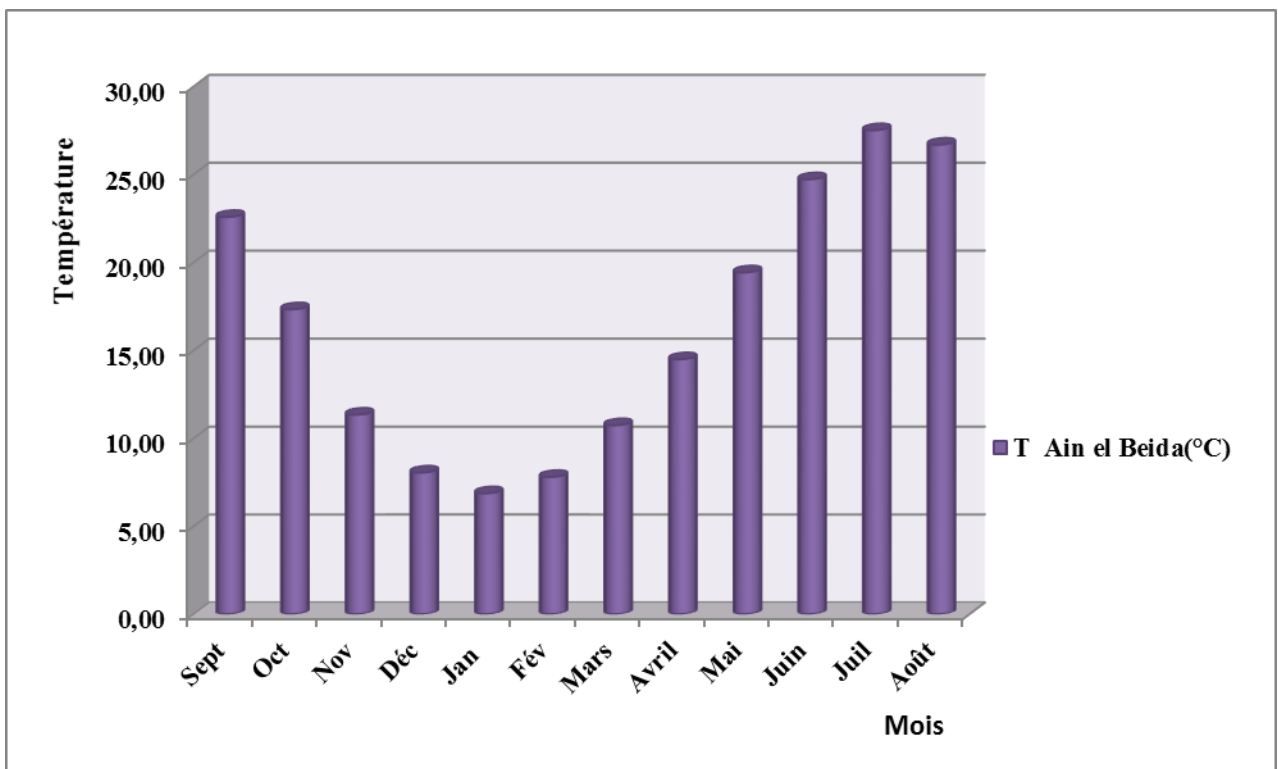
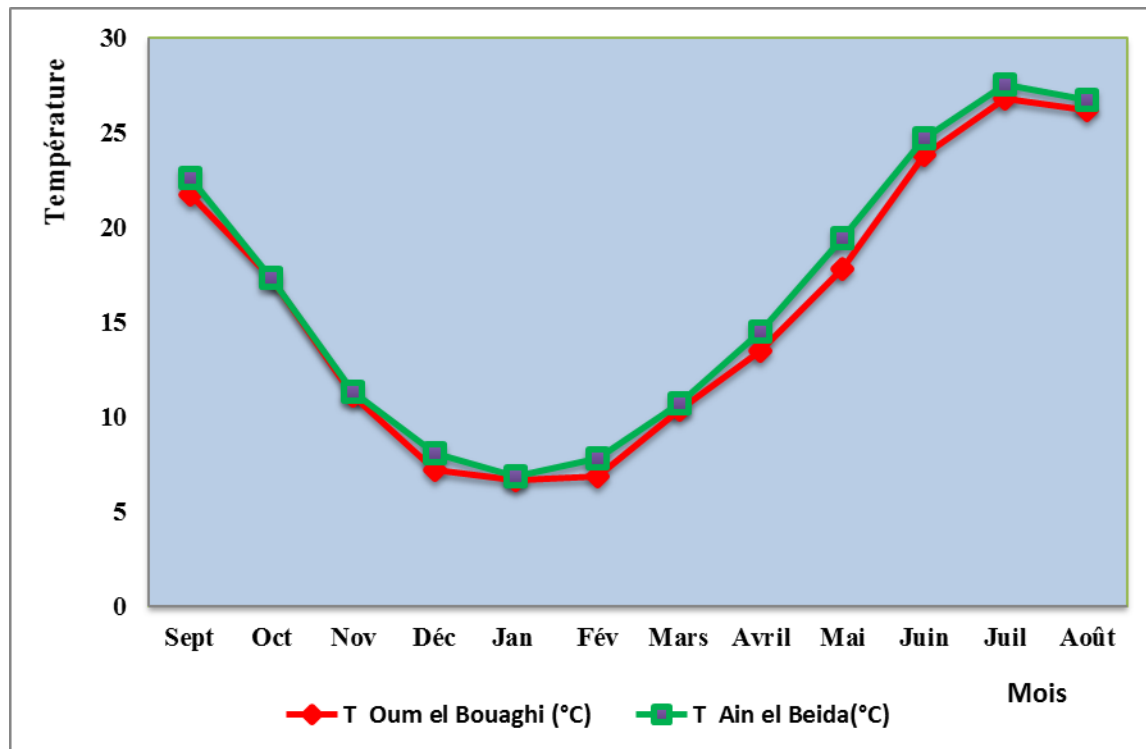


Figure 19 : Variation des températures moyennes mensuelles dans la station d'Ain el Beida (1993-2007).



**Figure 20 : Variations des températures moyennes mensuelles.**

### 3. Diagramme Ombrothermique

C'est encore à l'heure actuelle est considéré comme l'un des indices le plus utilisé. Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations ( $P$  en mm) et de la température ( $T$  en °C) et donne une expression relative à la sécheresse estivale en durée et en intensité (Gausсен et Bagnols, 1952). Un mois donné est considéré comme sec quand  $p < 2t$ , c'est-à-dire quand les pertes en eaux (supposées causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (précipitations).

On constate que la saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme de Gausсен permet de mettre en évidence une saison humide débutant au mois d'octobre qui se termine au mois de Mai, et une saison sèche qui s'étale du mois de jusqu'au mois de septembre.

Ces diagrammes pluviométriques montrent l'existence de deux saisons bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre, marquée par une forte évaporation provoquée par l'augmentation de la température.
- Une saison humide plus longue qui s'étend du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai, caractérisée par une précipitation importante qui atteint un maximum au mois de Mai avec respectivement 54 mm pour la station d'Oum el Bouaghi (Fig.21) et 45 mm pour Ain el Beida (Fig.22).

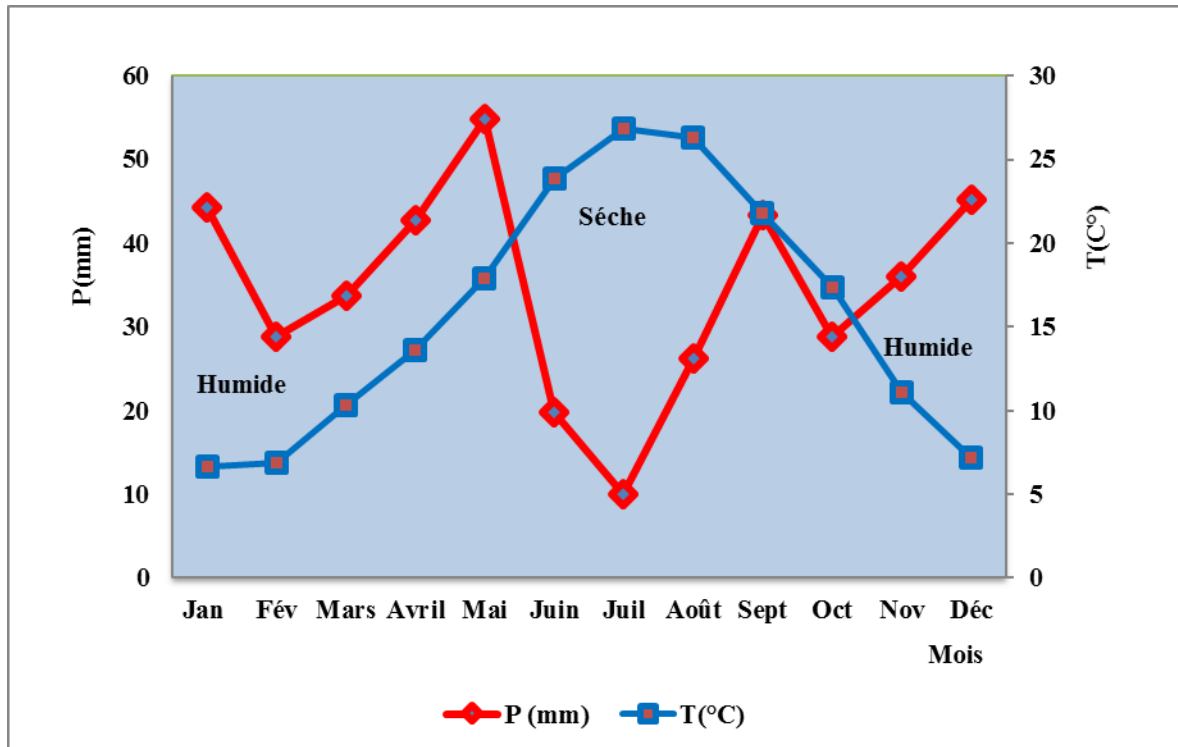


Figure 21 : Diagramme Ombrothermique de la station d'Oum El Boughi.

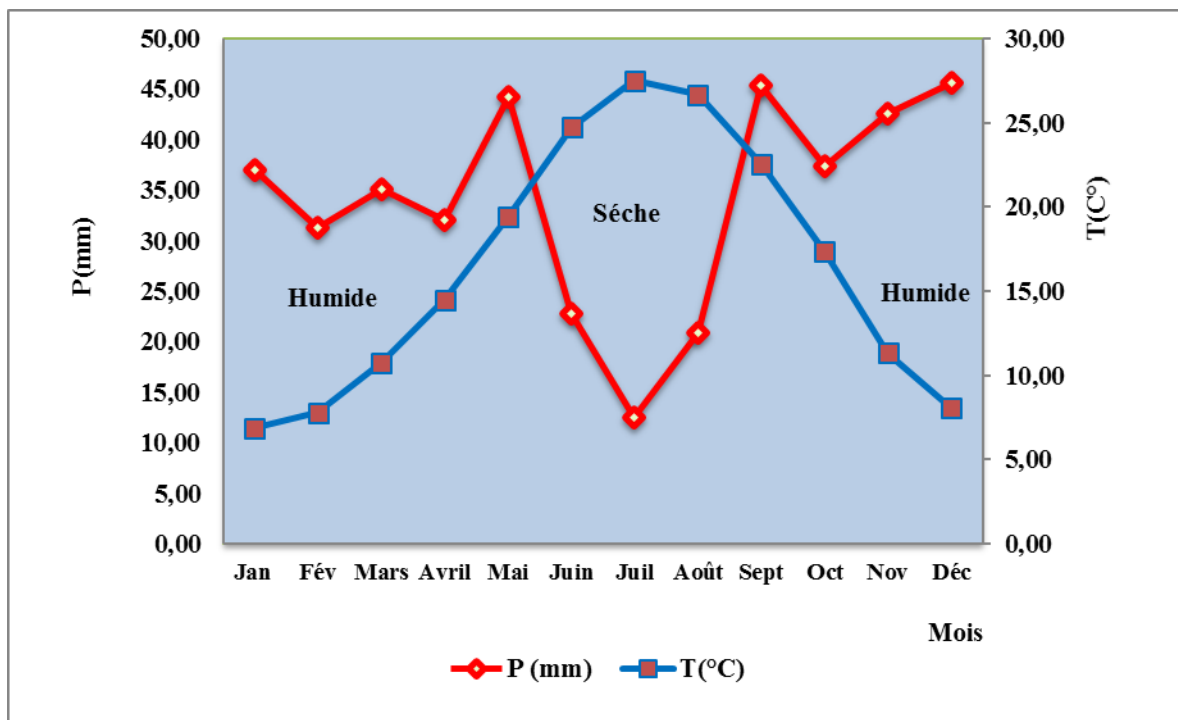


Figure 22 : Diagramme Ombrothermique de la station d'Ain el Beida.

#### 4. Les indices climatiques

Il existe beaucoup de méthodes et de formules qui permettent d'évaluer les indices climatiques, nous citons celle de Martonne, d'Emberger, de Moral, de Stewart et celle d'Everte.

Pour notre cas nous nous contenterons de calculer l'indice d'aridité annuel de Martonne et l'indice pluviométrique annuel de Moral.

##### 4.1. Indice d'aridité de De Martonne

Cet indice proposé par De Martonne en 1923 est fondé sur le régime des précipitations et sur les températures, il est calculé par la formule suivante

Où :  $I = P/T + 10$

I : indice d'aridité de Martonne

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

T : température moyenne annuelle (°C).

Selon De Martonne :

- Pour des valeurs de I inférieur à 5 on est en présence d'un régime hyper aride ;
- Pour des valeurs de I comprises entre 5 et 10 on est en présence d'un régime désertique .
- Pour des valeurs de I comprises entre 10 et 20 on est présence d'un régime semi-aride, Mai tout dépend de la répartition saisonnière des pluies.

Selon cet indice, la zone d'étude est une zone ayant un climat semi-aride (Fig.23).

Application (Tab.03) :

Stations	P(mm)	T(°)	I	Etage bioclimatique
Oum El Bouaghi	413	15,77	16	semi-aride
Ain El Beida	407	15,29	17	semi-aride

**Tableau 03 : Les valeurs de l'indice d'aridité mensuel (I).**

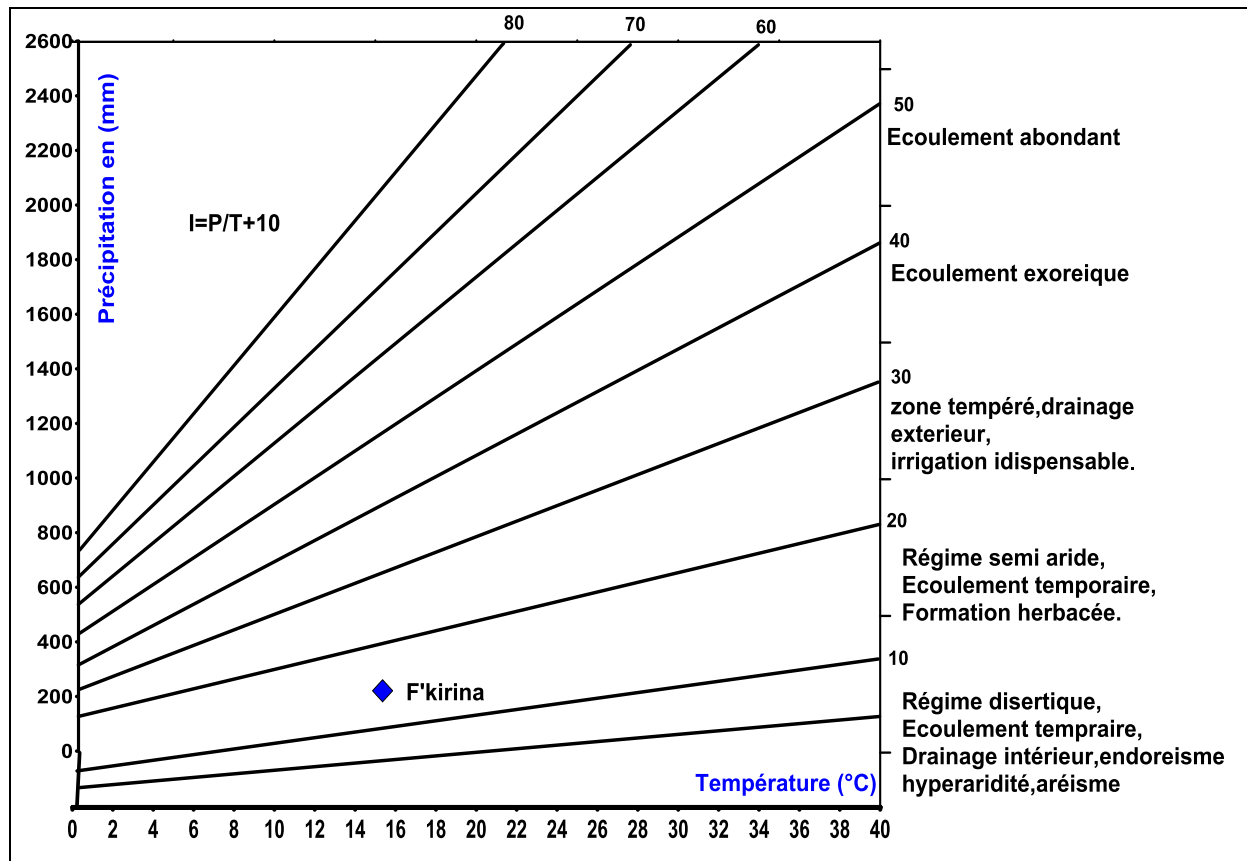


Figure 23 : Abaque de l'indice de l'aridité de De Martonne.

#### 4.2. Indice d'aridité mensuel

De Martonne a également défini un indice utilisable à l'échelle mensuelle. Pour un mois donné caractérisé par une précipitation et une température moyenne  $P$  en mm et  $T$  en °C, l'indice d'aridité mensuel est

- $I$  : Indice d'aridité mensuel
- $P$  : Précipitations moyennes mensuelles en mm.
- $T^\circ$  : Température moyenne mensuelle en °C.

L'application de la formule (2) a permis de dresser le Tab

#### 4.3. Le quotient pluviométrique annuel de Moral

Moral propose en 1964 d'utiliser la relation suivante :

$$IA = P/T^2 + 10T + 200$$

Où :

- IA : quotient pluviométrique de Moral ;
- P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;
- T : température moyenne annuelle (°C).

Cet indice pluviométrique utilise également la hauteur annuelle des précipitations ( $P$  en mm) et les températures moyennes annuelles ( $T$  en °C) pour délimiter le type de climat.

Si :

- IA=1, on est à la limite de la zone aride.
- IA<1, on est dans un climat sec.
- IA>1, on est dans un climat humide (Guyot 1999).

On peut dire que le climat de la plaine de F'kirina est à la limite sec-humide, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié de semi-aride(Tab.04).

Stations	P(mm)	T°	IM	Etage bioclimatique
Oum El Bouaghi	413	15,77	1,41	Semi-aride Frais
Ain El Beida	407	15,29	1,15	Semi-aride Frais

**Tableau 04 : Les valeurs de l'indice d'aridité annuelle (Ia).**

#### 4.4. Climagramme d'Emberger

Pour déterminer les types de climat de la zone, 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. Il propose donc la formule suivante :

$$Q2=1000 P / [(M+m) /2(M+m)]$$

**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).

L'application numérique donne les résultats suivants :

Stations	P(mm)	M (°K)	m (°K)	Q2	Etage bioclimatique
Oum El Bouaghi	413	310,8	278,2	43	Semi-aride Frais
Ain El Beida	407	302,5	268,9	41	Semi-aride Frais

**Tableau 05 : Valeurs de coefficient pluviométrique d'Emberger**

Le rapport de notre station sur la (Fig. .24) permet de dire que le climat de la région d'étude est de type semi-aride.

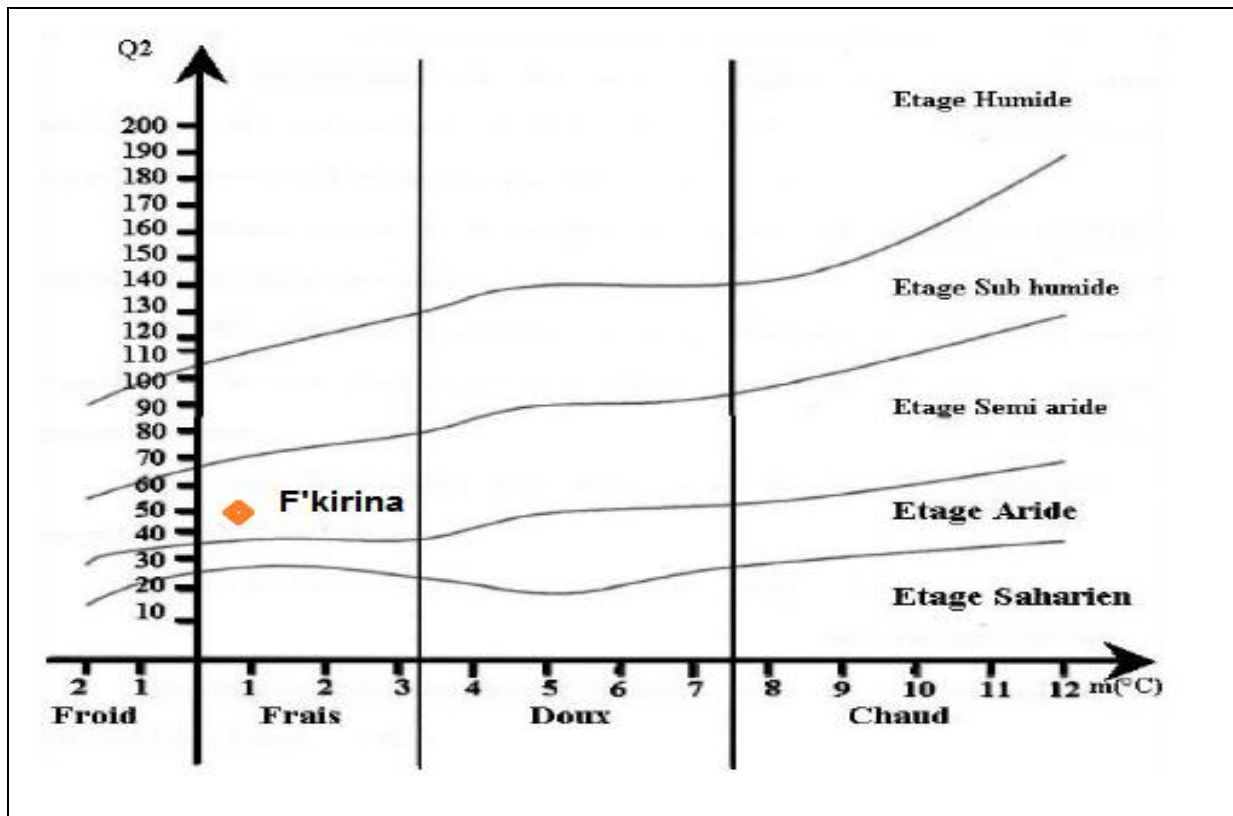
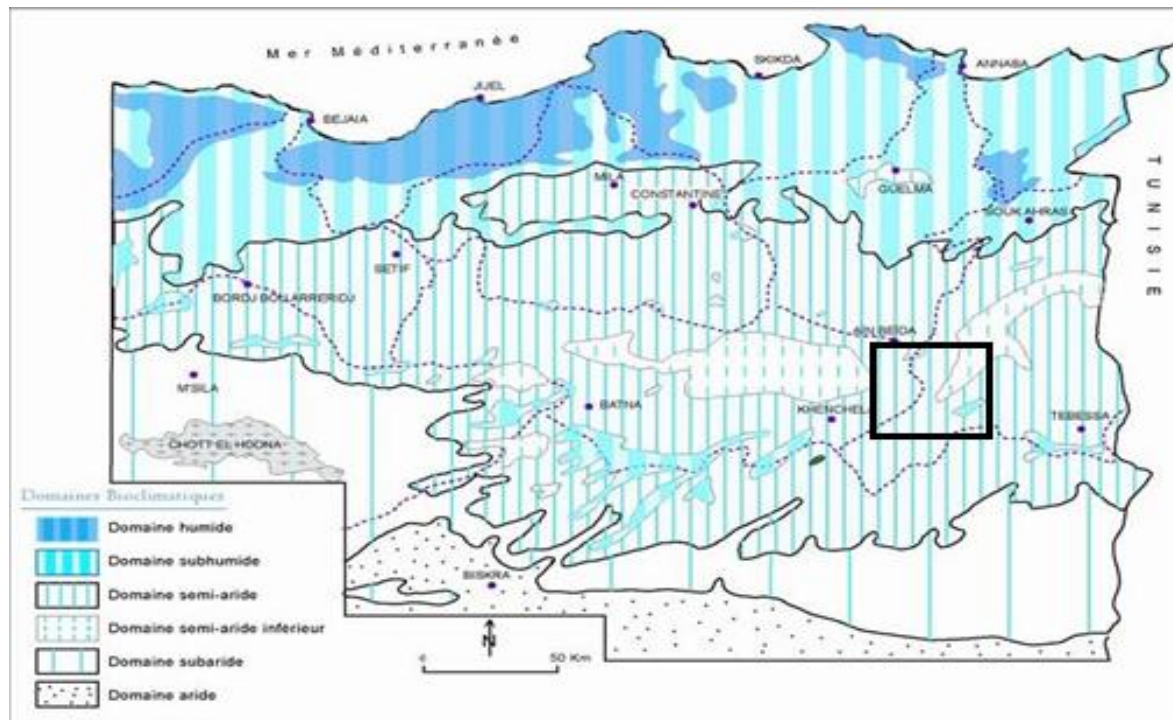


Figure 24 : Climagramme d'Emberger de la station de F'kirina.

### 5. Comparaison des indices climatiques

Sachant que les éléments climatiques les plus importants pour caractériser un climat sont les précipitations, les températures et l'évaporation ; les méthodes combinant ces éléments sont plus intéressantes que celles qui incluent un seul élément. Toutes ces méthodes ont qualifié le climat de la région de F'kirina comme étant semi-aride, ce qui est en conformité avec la carte des étages bioclimatiques (Fig. 25)



**Figure 25 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien établie d'après Côte M., 1998a ; in Mebarki ; 2005).**

## 6. 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.

### 6.1. Etude de l'évapotranspiration

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

#### 6.1.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

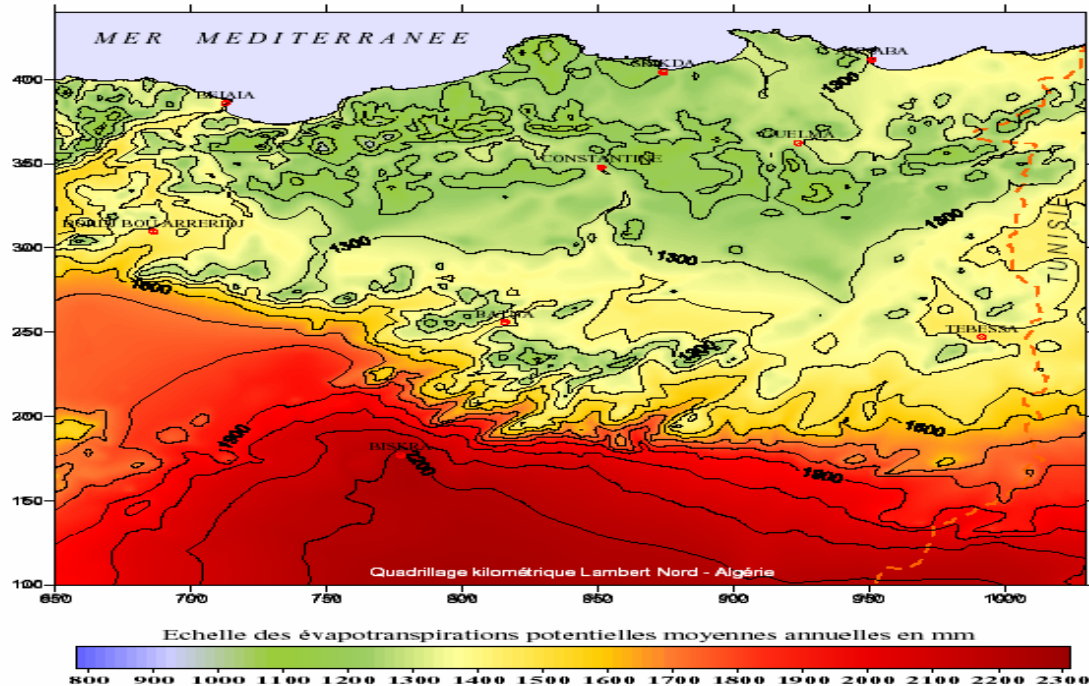
Pour l'estimation de l'ETP, on utilise la formule de Thornthwaite.

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

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

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

- T : température moyenne du mois considéré en °C
- ETP : évapotranspiration potentielle du mois considéré en mm.
- K : coefficient de correction de l'altitude.
- i : indice thermique mensuel.
- I : indice thermique annuel.



**Figure 26 : Carte de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est Algérien (D'après MEBARKI. A ; 2005 ; source : étude A.N.R.H).**

### 6.1.2. 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 (G. Castany). Cette estimation se fera à partir des formules de Turc, de Coutagne, et de Thornthwaite.

- Selon la formule de Turc : (Annuelle)

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.

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

- $L = 300 + 25 T + 0.005 T^3$ . (Facteur qui tient compte des échanges de chaleur) ;
- P : Précipitation moyenne annuelle en mm ;
- T : Température moyenne annuelle en °C.

- Selon la formule de G.W. Thornthwaite :
- Si  $ETP > 0$  :  $P > ETP \rightarrow ETR = ETP$
- Si  $P - ETP < 0 \rightarrow P < ETP$

Application numérique :

Stations	ETR (TURC) (mm/an)	ETR de bilan de C.W Thornthwaite (mm/an)
Oum el Bouaghi	449,15	396,43
Ain el Beida	87,35	70,73

**Tableau 06 : ETR selon la C.W Thornthwaite.**

### 7. Calcul du ruissellement (R)

D'après Tixeront et Berkaloff, le ruissellement est estimé par la formule suivante :

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

R : ruissellement (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

ETP : évapotranspiration potentielle (mm). Ce qui donne : R = 31 mm pour la station d'Oum el Bouaghi et R = 28,29 mm pour la station d'Ain el Beida.

### 8. Calcul de l'infiltration (I)

L'infiltration est calculée par la formule :  $I = P - (ETR + R)$  ou  $I = EX - R$

Ce qui donne : I = 40,47 mm pour la station d'Oum el Bouaghi et I = 45,91 mm pour la station d'Ain el Beida.

### 9. Estimation des réserves facilement utilisable (RFU)

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

- La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche parcourue par les racines ;
- La profondeur de niveau piézométrique de la nappe ;
- Le climat de la région ;
- Le type de la couverture végétale

Richard en 1979 a proposé une formule pour le calcul de la RFU, dans la partie Nord- Est de l'Algérie qui est la suivante :  $RFU = 1 / 3 (Da \cdot He \cdot P)$  où

**RFU** : réserve facilement utilisable en mm.

**Da** : densité apparente du sol (pour la plaine Da = 1,4)

**He** : humidité équivalente du sol (He = 25 %)

**P** : profondeur de la couche de la terre parcourue par les racines en m. (P = 0,225 m)

L'application numérique : RFU = 25 mm

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Total
<b>P (mm)</b>	43,30	28,80	36,00	45,70	44,20	28,80	33,90	42,70	54,70	19,70	9,38	26,10	<b>413,28</b>
<b>T (°C)</b>	21,70	17,30	11,10	7,20	6,67	6,88	10,36	13,50	17,80	23,80	26,80	26,20	
<b>K</b>	1,03	0,97	0,85	0,83	0,86	0,84	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	
<b>ETP (mm)</b>	100,89	64,88	26,93	12,69	11,56	11,90	29,06	48,46	84,90	139,60	173,28	156,04	<b>860,19</b>
<b>P-ETP</b>	-57,59	-36,08	9,07	33,01	32,64	16,90	4,84	-5,76	-30,20	119,90	-163,90	-129,94	
<b>RFU (mm)</b>	0,00	0,00	9,07	25,00	25,00	25,00	25,00	19,24	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>ETR (mm)</b>	43,30	28,80	26,93	12,69	11,56	11,90	29,06	48,46	73,94	19,70	9,38	26,10	<b>341,81</b>
<b>EX (mm)</b>	0,00	0,00	0,00	17,08	32,64	16,90	4,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>71,47</b>
<b>DA (mm)</b>	57,59	36,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,96	119,90	163,90	129,94	<b>518,38</b>

**Tableau 07: bilan hydrique selon C.W.Thornthwaite à la station d'Oum Elbouaghi (1995-2017)**

**Vérification**

$$P = \sum ETR + \sum EX = 341,81 + 71,47 = 413,28$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA = 341,81 + 518,38 = 860,19$$

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Total
<b>P (mm)</b>	45,43	37,42	42,59	45,65	37,06	31,28	35,14	32,09	44,29	22,82	12,54	20,86	407,17
<b>T (°C)</b>	22,58	17,33	11,34	8,05	6,87	7,80	10,74	14,49	19,43	24,72	27,51	26,69	
<b>K</b>	1,03	0,97	0,85	0,83	0,86	0,84	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	
<b>ETP (mm)</b>	105,34	62,33	25,93	13,87	10,88	13,28	28,56	51,61	95,05	146,29	179,41	159,15	891,69
<b>P-ETP</b>	-59,91	-24,91	16,66	31,78	26,18	18,00	6,58	-19,52	-50,76	-123,4	-166,8	-138,29	
<b>RFU (mm)</b>	0,00	0,00	16,66	25,00	25,00	25,00	25,00	5,48	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>ETR (mm)</b>	45,43	37,42	25,93	13,87	10,88	13,28	28,56	51,61	49,77	22,82	12,54	20,86	332,96
<b>EX (mm)</b>	0,00	0,00	0,00	23,44	26,18	18,00	6,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,21
<b>DA (mm)</b>	59,91	24,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,28	123,47	166,87	138,29	558,73

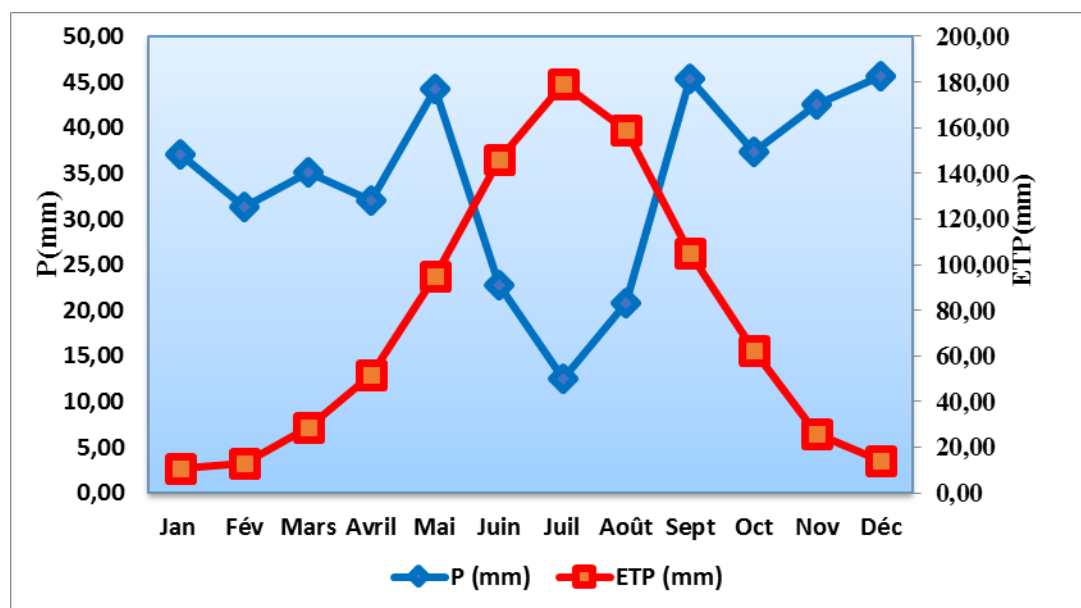
**Tableau 08 : bilan hydrique selon C.W. Thornthwaite à la station d'Ain Beida (1970-2011)**

**Vérification**

$$P = \sum ETR + \sum EX = 332,96 + 74,21 = 407,17$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA = 332,96 + 558,73 = 891,69$$

La représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de Thornthwaite de la station d'Oum el Bouaghi (Fig.27) montre que l'évapotranspiration maximale a été observée pendant le mois de Juillet avec une valeur de 173,2mm, ce qui produit un déficit agricole de 166,87 mm, nécessitant une irrigation pour les zones de culture. Cependant, durant les mois de Décembre jusqu'au mois de Mars, on remarque une recharge de la nappe. Lorsque celle-ci dépasse la RFU, le surplus d'eau va partir vers le ruissellement superficiel.



**Figure 27 : Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de C.W. Thornthwaite de la station d'Oum el Bouaghi**

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite pour la station d'Ain El Beida (Fig.28) montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (179,41 mm) et son minimum au mois de janvier (10,87 mm). La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (16,66 mm) et atteint son maximum (25 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'excédent égal à (74,21 mm/an) représentant 18,22 % des précipitations annuelles alors que l'ETR est de l'ordre de 332,96 mm représentant 81,77% des précipitations annuelles. Le déficit agricole DA débute au mois de Mai, et se poursuit jusqu'au mois d'octobre.

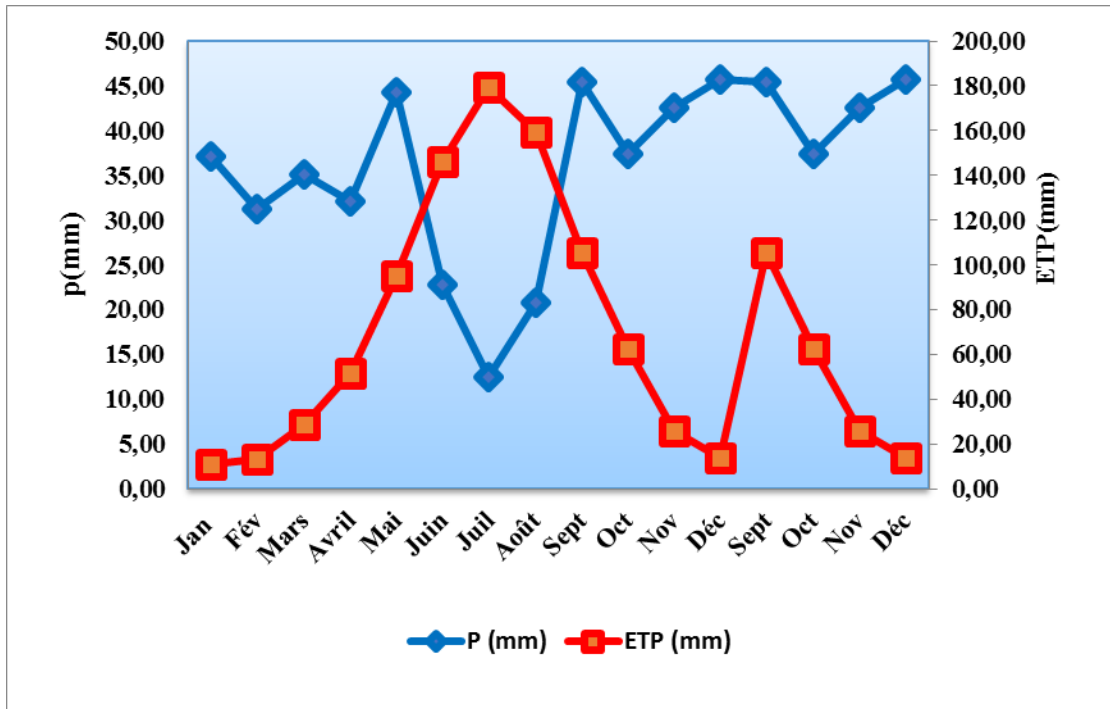


Figure 28 : Représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de C.W. Thornthwaite de la station d'Ain el Beida.

## 10. Conclusion

La région d'étude est soumise à un climat appartenant au domaine subhumide à semi-aride. Il est caractérisé par des irrégularités mensuelles et annuelles des précipitations. La répartition spatiale de ces dernières, montre une diminution des précipitations du Nord vers le Sud de la région d'étude.

- La température moyenne annuelle est de l'ordre 15,75°C de la station d'Ain el Beida de l'ordre de 16,46°C à la station d'Oum el Bouaghi. Ces résultats de température et de précipitations définissent deux saisons typiques du climat, une saison sèche et l'autre humide.
- La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 407,17 mm de la station d'Ain el Beida de l'ordre de 413,28 mm à la station d'Oum el Bouaghi.
- Pour le calcul du bilan hydrique, la valeur de la réserve facilement utilisable (RFU) a été choisie en fonction de la nature du terrain (RFU=25 mm).
- Le ruissellement ne représente que 7,50 % des précipitations, ce qui représente 28,30 mm pour la station d'Oum Elbouaghi et de 6,87 % mm pour la station d'Ain el Beida
- L'infiltration ne laisse percoler que 40 ,47 mm, pour la station d'Oum Elbouaghi et de 45,91 mm pour la station d'Ain el Beida.
- L'évapotranspiration réelle représente 82,70 % pour la station d'Oum el Bouaghi et de 81,77 % d'Ain el Beida des précipitations moyennes annuelles.
- L'estimation du bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite a montré qu'à partir du mois de novembre, l'apport considérable de la pluie, la chute de température et la diminution de l'évapotranspiration permettent la recharge du sol mais avec un déficit agricole enregistré à partir de mois du juin jusqu'au mois d'octobre.

# ***CHAPITRE IV***

## *Hydrogéologie*

**1.Introduction**

L'étude hydrogéologique est une étape indispensable dans notre étude, elle va nous permettre de déterminer le sens de l'écoulement des eaux et par la même occasion le chemin qui serait emprunté par un éventuel polluant dans la nappe. De même, par cette étude nous saurons la profondeur de la nappe qui est un facteur très important dans l'étude de la vulnérabilité de la nappe et aussi avoir une idée sur ses caractéristiques hydrodynamiques.

**2. L'étude géophysique réalisée dans la région**

En 1976, la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G.) a effectué une campagne de prospection par méthode électrique (sondages électriques) qui a couvert de larges territoires de la wilaya d'Oum El Bouaghi.

La zone qui fait l'objet de notre étude est celle dite (Zone : H / F'kirina) (Fig. 29). Elle est bordée à l'Ouest par Garaet Tarf, alors qu'à l'Est, au SE et au NE ce sont les affleurements du Crétacé supérieur qui la bordent 320 sondages électriques ont été exécutés en deux longueurs d'émissions AB = 3000 m. et AB = 400 m (Fig.30) .

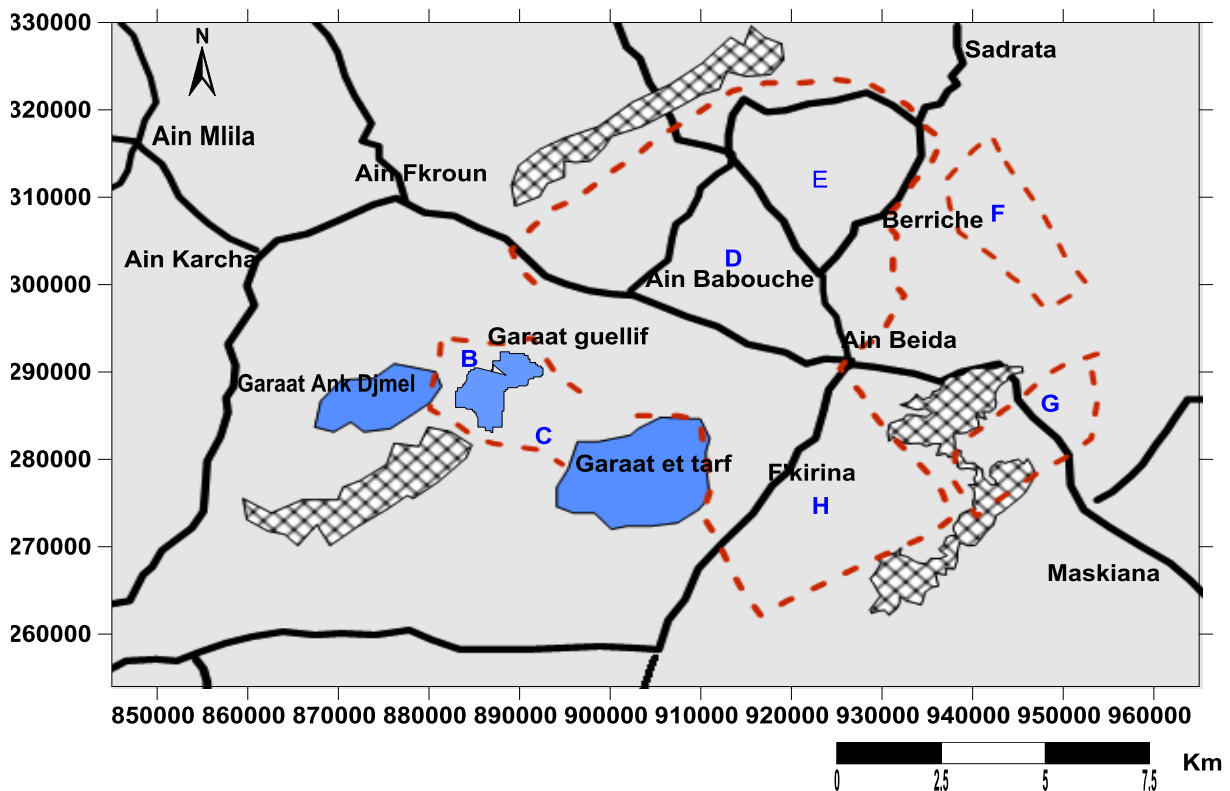


Figure 29 : plan de situation des zones.

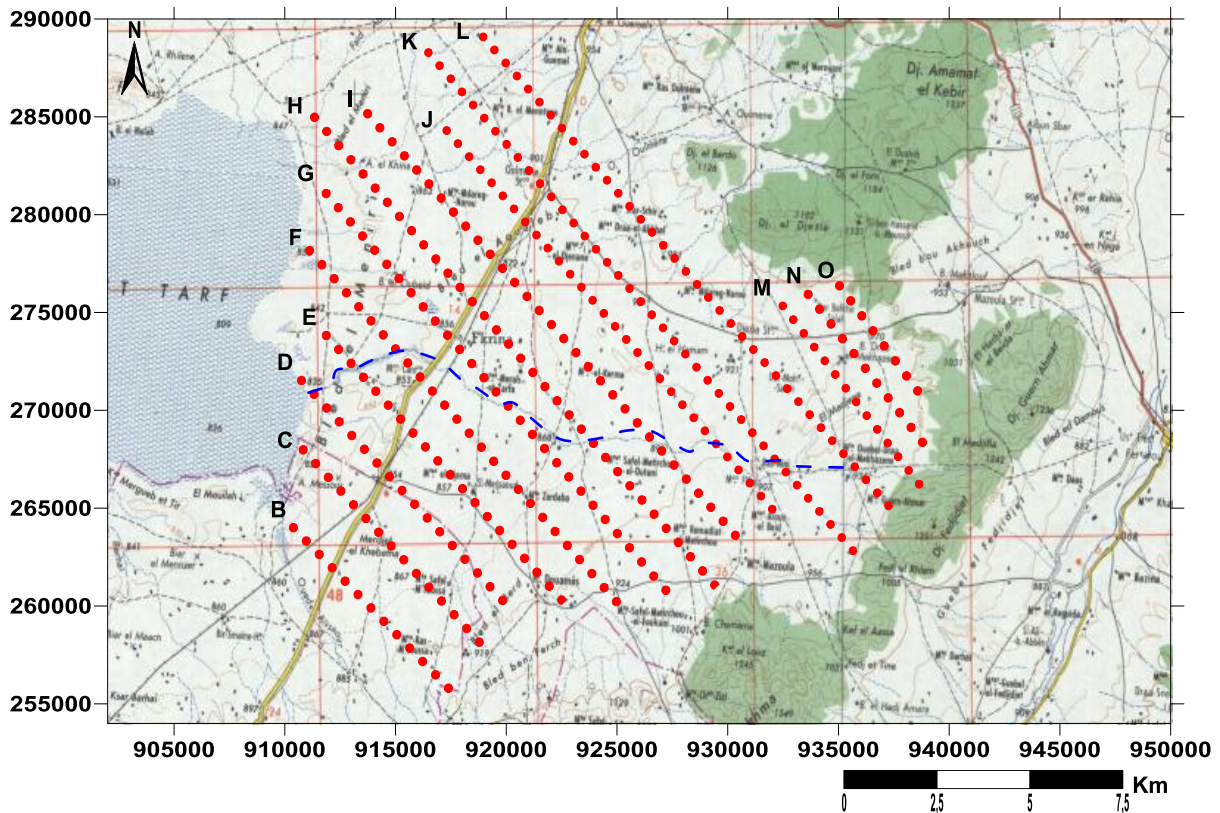


Figure 30 : Carte de position des sondages électriques

### 3. Résultats de la prospection électrique

Plusieurs cartes et coupes géo électriques ont été établies ; ces dernières ont mis en évidence :

- Les différents niveaux de résistivité et en particulier les horizons résistants superficiels ou profonds pouvant avoir un intérêt aquifère.
- Les zones conductrices sans intérêt aquifère représentées en générale par des marnes, des argiles ou des eaux plus ou moins salées.
- Les discontinuités électriques correspondantes à des failles, à de forts pendages ou à des changements de faciès. Suite à ces résultats, la C.C.G. a proposé quelques implantations de forages dans les zones pouvant être les plus intéressantes.

#### 4. Extension et nature des nappes

##### 4.1. Etablissement et interprétation des coupes hydrogéologiques

D'après (younssi, 2009) on peut établir 4 coupes hydrogéologiques (Fig. 31) qui vont nous permettre de connaître la position, la continuité et le caractère de la structure des aquifères dans la région. L'établissement de ces coupes se fait par corrélation des couches géologiques traversées par les forages, les couches de même nature lithologique et stratigraphique sont reliées entre elles.

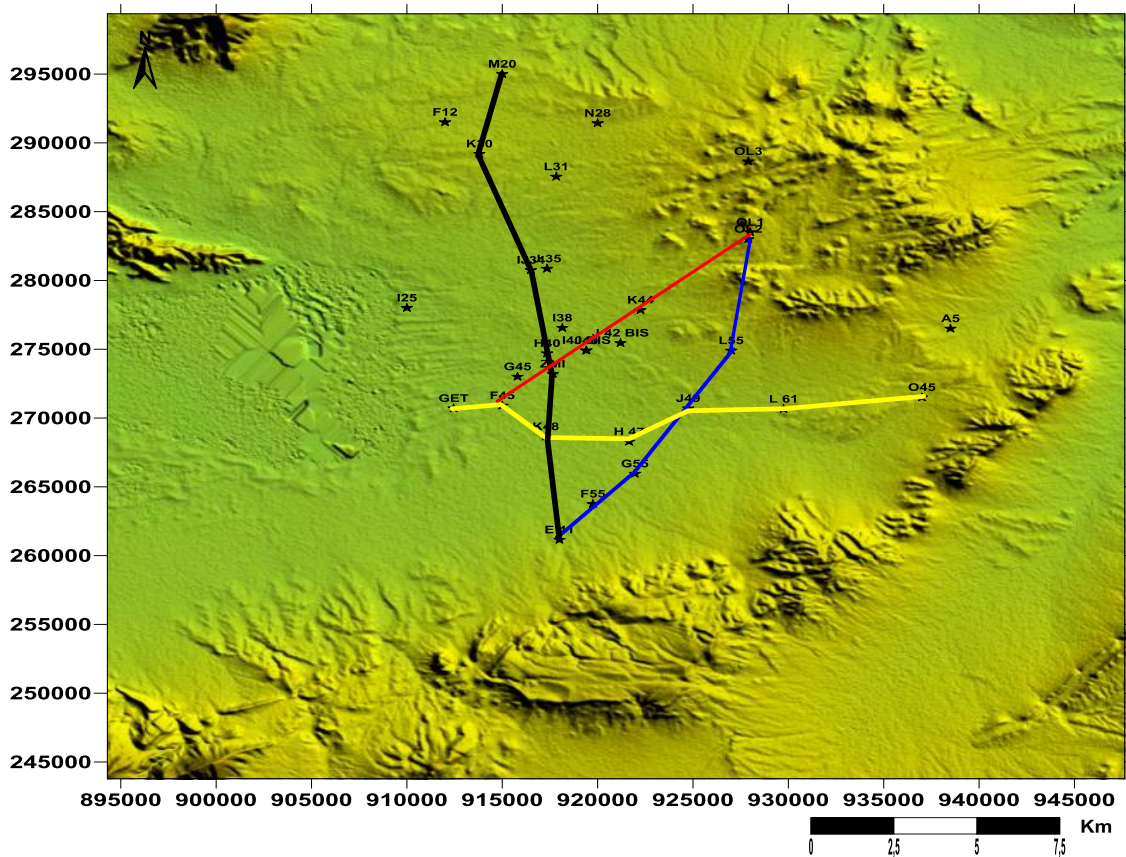


Figure 31 : carte de situation des forages

##### 4.2. Interprétation des coupes

Les formations dominantes dans le secteur étudié, sont représentées en leur totalité par des formations carbonatées du Crétacé supérieur recouvert par des formations plus récentes d'âge Mio-Plio-Quaternaire ; les formations du Crétacé supérieur ont été affectées par la phase tectonique alpine, ce qui engendré des formes de plissement très complexe (plis emboutis)

.Les calcaires du Crétacé supérieur sont fissurés et karstifiés et forment un milieu favorable à l'accumulation des eaux souterraines. Ils existent des zones où les calcaires sont totalement absents et remplacés par des marnes sur lesquels reposent les formations Mio-Plio-Quaternaire ; cette absence des calcaires ne peut être expliquée que par le phénomène d'érosion.

#### **4.2.1. Coupe hydrogéologique NE – SW (OL1 – GET)**

- Les forages I40 et OL1 mettent en évidence les deux types de nappes (Fig.32) (la nappes du plioquaternaire, et la nappe des calcaires du Maestrichtien supérieur).
- Les deux nappes sont en relation hydraulique directe, pour le forage I40, et indirecte au niveau de OL1, car il existe des marnes imperméables entre les deux nappes.
- Les autres forages, (K44, J40, H40, G45 et GET) montrent l'existence d'une seule nappe du plioquaternaire avec un substratum marneux pour J40 et K44, et argileux pour les forages : H40, G45 et GET vers Garaet Et Tarf.
- Le forage, GET est artésien, l'artésiennisme provient du fait qu'à ce niveau la nappe se trouve dans une cuvette dans laquelle toute l'eau va converger et se trouver sous pression.
- La nappe est captive au niveau du forage H40 et au GET, avec un toit argileux, et libre pour les autres forages.
- La nappe du plioquaternaire possède une continuité horizontale par contre la nappe des calcaires est horizontalement discontinue.
- La nappe du plioquaternaire a une puissance très variable avec 10 mètres pour le forage K44 au NE de la plaine ; 40 mètres au niveau de GET, 70 mètres au niveau de G45.

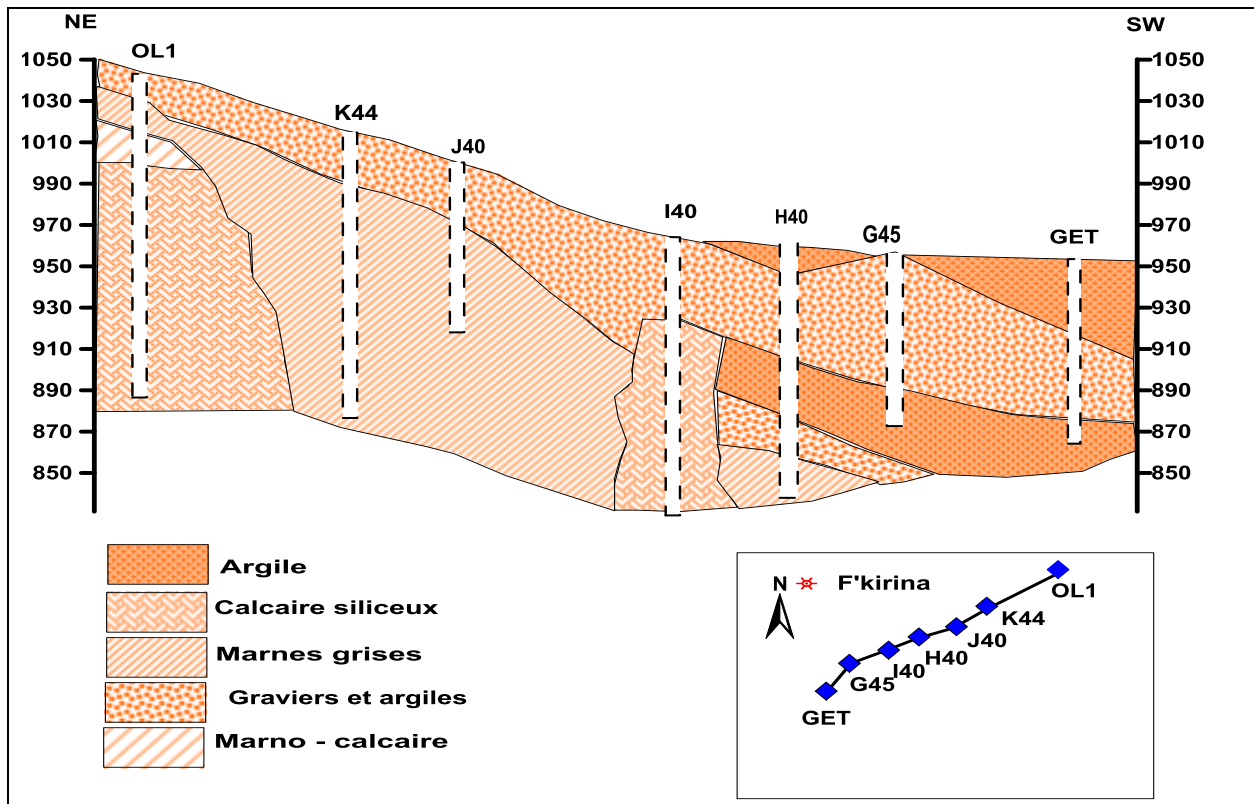


Figure 32 : coupe I (NE – SW)

#### 4.2.2. Coupe hydrogéologique NE SW (OL2 – E41)

Cette coupe est construite parallèlement à la première coupe (OL1 – GET) (Fig.33).

- Les forages J49, G55, et E41 montrent qu'il n'existe que la nappe de plioquaternaire avec un substratum marneux.
- La nappe est libre sauf dans la partie NE au niveau des forages J49 et L55.
- Les forages OL2 et F55 montrent l'existence des deux nappes mais qu'ils ne sont pas en relation hydraulique directe, au niveau de forage F55, (la présence d'une couche marneuse imperméable). Au niveau de forage OL2 au Djebel Djazia on remarque l'absence de la nappe du plioquaternaire.

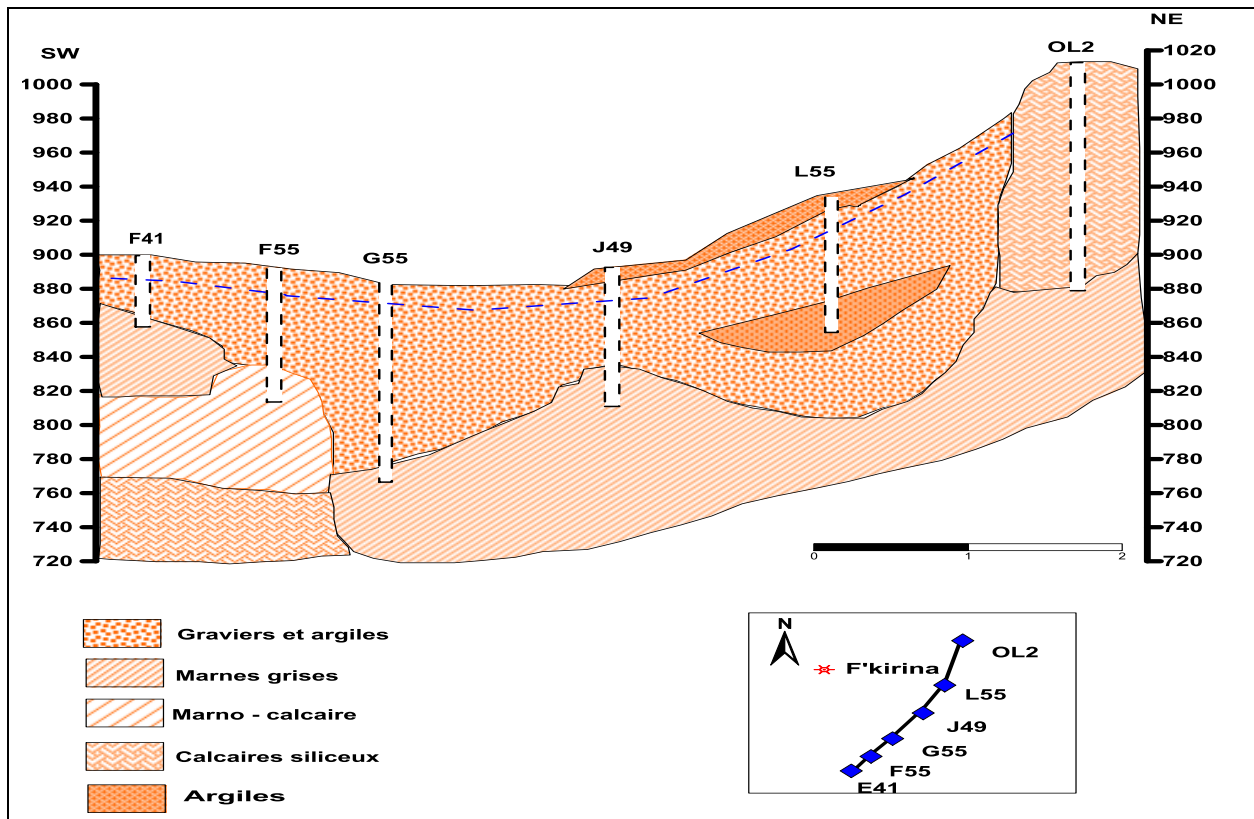


Figure 33 : Coupe hydrogéologique II (NE – SW).

4.2.3. Coupe hydrogéologique N S (M20 - E 41)

Cette coupe montre l'absence du 2<sup>em</sup> nappe (Fig.34) (nappe du calcaire du Maestrichtien supérieur) dans cette partie de la plaine.

- La nappe est captive dans la partie Nord de la coupe, avec un toit argileux (forages I38, M20 et ZMI). Elle est libre pour le reste (forages K30, G50 et E41).
- Le substratum est marneux (marnes du Maestrichtien inférieur) pour tous les forages (le forage ZMI est imparfait donc le substratum est inconnu).
- La coupe la nappe du plioquatenaire a de grande puissance dans la partie centrale (120 mètres d'épaisseur pour G50). Sa puissance diminue progressivement on va vers le Nord et le Sud (30 mètres au niveau de E41 et au niveau de M20 et K30 plus au nord de la région).

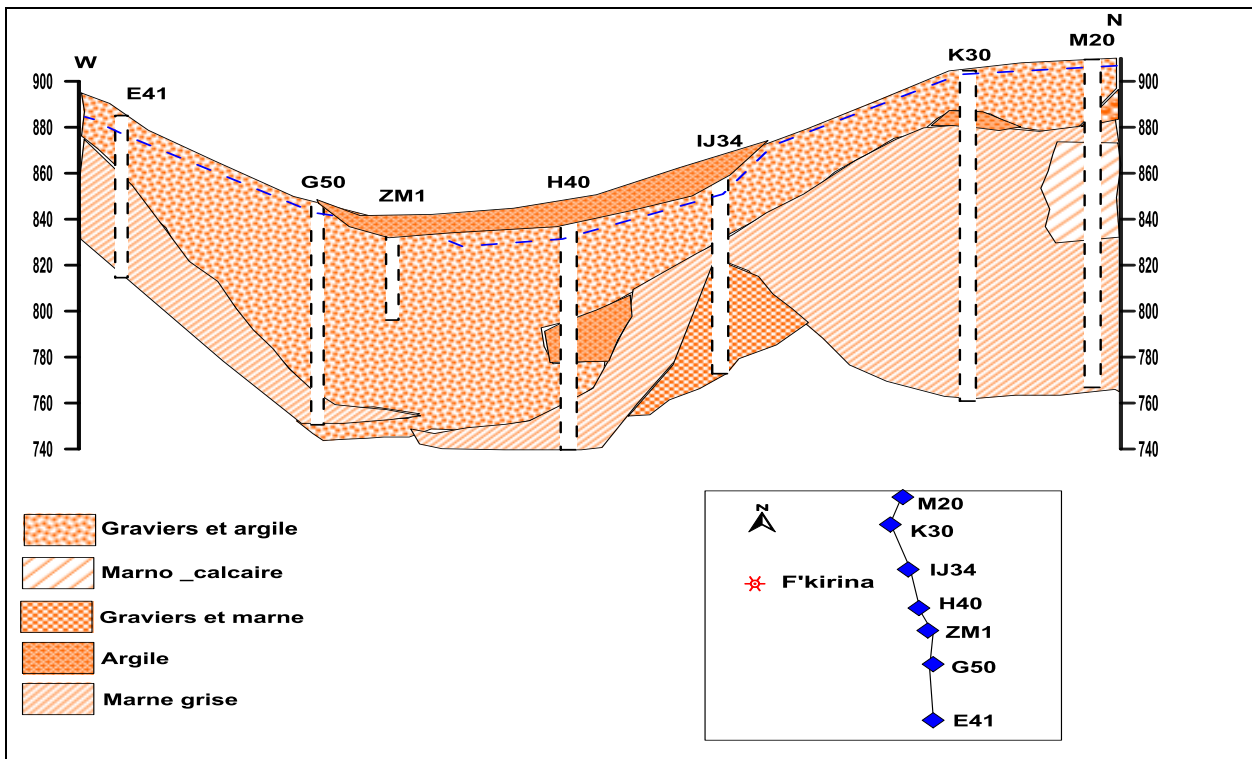


Figure 34 : Coupe hydrogéologique III, (N – S).

#### 4.2.4. Coupe hydrogéologique E W (GET – A5)

On remarque l’inexistence de la nappe des calcaires du Maestrichtien supérieur car cette coupe passe directement par la zone d’érosion.

- La nappe du plioquaternaire est captive au niveau de tous les forages (Fig.35), sauf au niveau de G50 et L61, avec un toit argileux.
- L’épaisseur de la nappe est très variable (100 m, 90 m, 50 m respectivement pour les forages F45, H47, J49). Le substratum est marneux du Maestrichtien inférieur, à l’Est de la région d’étude, et argileux vers le Garaet Et Tarf, (F45 et GET).

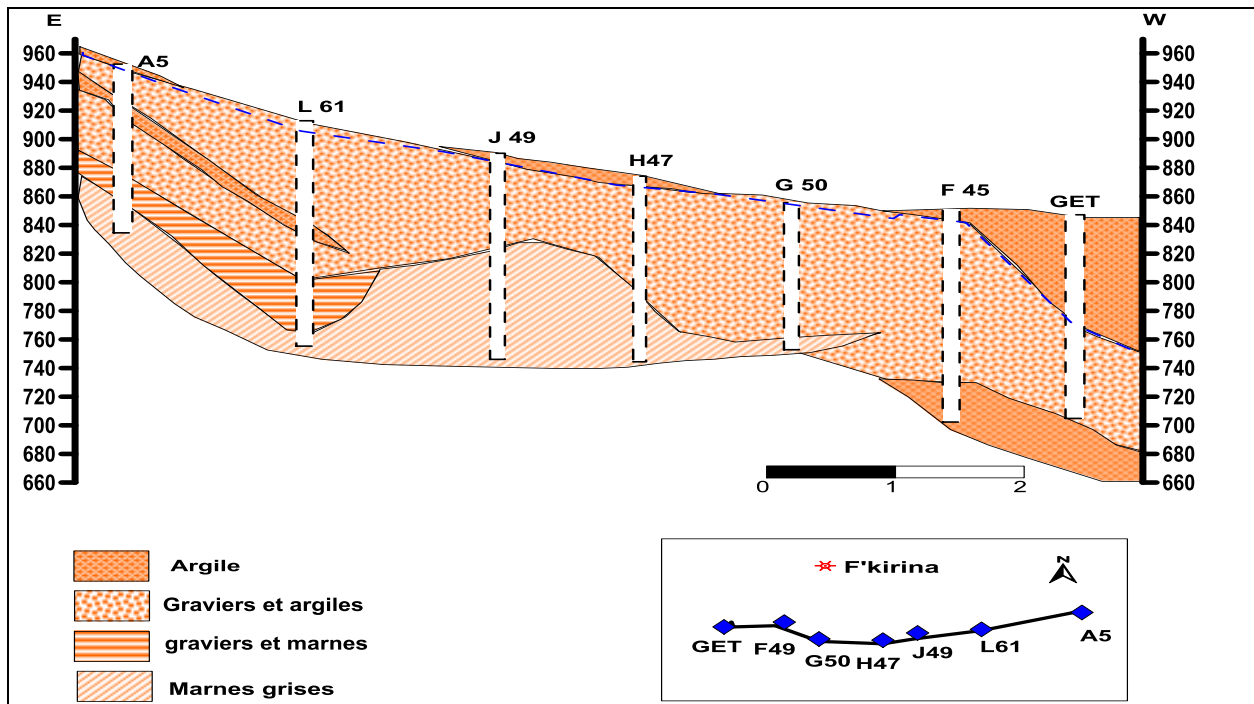


Figure 35 : coupe hydrogéologique IV, (E – W).

#### 4.3. Type de nappe

La définition du type de nappe exige une parfaite connaissance de la nature lithologique des formations qui déterminent d'une part, et celle de ses limites géométriques d'autre part.

Ainsi l'examen des coupes de plusieurs sondages et forages hydrogéologiques exécutés en divers points de la plaine a permis de distinguer deux nappes aquifères superposées de haut en bas.

##### 4.3.1. La nappe du plioquaternaire

Caractérisée par les formations lithologiques suivantes : graviers et argiles, graviers calcaires, galets. Cette nappe a une très grande extension horizontale vu que les formations du plioquaternaire recouvrent toute la plaine (Tab.9). La puissance de cette nappe varie entre 100 à 10 mètres. Dans les zones d'érosion le substratum de cette nappe est représenté par des marnes du Maestrichtien inférieur ou du campanien, par contre dans les zones non érodées cette nappe est superposée directement sur la nappe des calcaires.

##### 4.3.2. La nappe des calcaires du Maestrichtien supérieur

Cette nappe comme son nom l'indique se rencontre dans les calcaires du Maestrichtien supérieur. Son épaisseur véritable ne peut être déterminée vu que tous les forages qui l'exploitent sont imparfaits (ne dépassant pas 150 m de puissance) (Tab.10).

Age géologique probable d'après analogie avec les régions voisines étudiées		Lithologie générale		Principaux horizons aquifères	
Quaternaire Actuel	Couches de sol . Eboullis.	Argiles sableuses graviers. Formés par des blocs de calcaires du Maestrichtien.		<p><b>Horizon aquifère.</b></p> <p><b>Horizon aquifère d quaternaire</b> qui a emmagasine des eaux souterraines pour la nappe superficielle des couches locales <b>captives pour les nappes.</b></p>	
	Alluvions actuelles et récentes du fond des vallées .	Graviers grossiers parfois mal cimentés aux conglomérats friables, sables et limons ; généralement dépôts argilo - sableux dans les basses partie d la plaine			
Quaternaire ancien remplissage des dépressions .	Croûte calcaire principale sommet du quaternaire ancien Alluvions caillouteuses des plateaux. Sables .Argiles et pelites	Calcaires friables caverneux parfois durs recouverts par une mince couche argilo – sableuses.			
		Remplissage continental et lacustre , graviers et graviers grossiers Sables fins ou sables argileux avec des lentilles d'argiles sableuses. Argiles pelites ou limon argileux avec des lentilles conglomérats, sable ou grès friables.			
Néogène	Pliocène	Calcaires lacustre	Calcaires noduleux bréchinique à la base et travertineux au sommet.		<p><b>Horizon aquifère mais petits exutoires, extension limitée.</b></p> <p><b>Principal horizon aquifère pour les sources, localisé principalement dans la partie méridionale de la zone d'étude.</b></p>
		Argiles, grès , conglomérâtes .	Argile, grès, conglomérats localisés à la base.		
	Miocène	Calcaires gréseux. Conglomérâtes.	Calcaires gréseux roux d'aspect noduleux en banc à dominante gréseuse et rares intercalations marnenses. Conglomérâtes mal cimentés.		
Paléogène	Eocène	Calcaires	Des alternances de calcaires blanchâtres à nombreux rognons de silex 80 m.		
		Marnes, calcaires	Des alternances des marnes gris beiges et de bio micrites vers le finement gréseuses.		
		Marne	Des marnes grises - verdâtre à la base 70 m.		

**Tableau 09 : les principaux horizons aquifères Tertio- Quaternaire**

AGE GEOLOGIQUE PROBABLE D'APRES ANALOGIE AVEC LES REGION VOISINES ETUDIEES	LITHOLOGIE GENERALE	PRINCIPAUX HORIZONS AQUIFERES
<b>Maestrichtien sup.</b>  Calcaires marneux et marnes.  Calcaires.	Alternances de calcaires marneux beiges à cassure blanchâtre.  Calcaires gris- blanchâtres, crayeux à rognons de silex.	<b>Principal Horizon aquifère du crétacé supérieur.</b>
<b>Maestrichtien inf.</b>  Marnes.	Marnes gris- beige, suivies d'alternances de marnes de biomicrudites argileuses ocre.	.
<b>Campanien.</b>  Marnes  Calcaires marneux	Marnes gris- beige, suivies d'alternances de marnes de biomicrudites argileuses ocre.  Calcaires marneux plus au moins crayeux à cassure laiteuse alternance avec films de marnes grises.	<b>En général formation de très petite ressource.</b>
<b>Santonien.</b>  Marnes noires.	Marnes sombres grises légèrement gypseuse.	

**Tableau 10 :** Les principaux horizons aquifères du Crétacé supérieur.

## 5. Piézométrie de la nappe

L'étude piézométrique d'une nappe fournit des renseignements de première importance sur les caractéristiques de l'aquifère. Elle permet, en particulier, d'apprécier de façon globale les conditions d'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leurs conditions d'alimentation et de drainage, et la variation de leurs réserves. En effet, les eaux souterraines sont le moyen de transport de toute substance minérale ou organique, c'est d'après l'écoulement qu'on peut reconnaître les zones vulnérables ou contaminées.

### 5.1. Inventaire des points d'eau

Les mesures des niveaux piézométriques ont été effectuées par l'ANRH de Constantine pour l'année 2012 avec deux campagnes piézométriques, (basses et hautes eaux). Dans notre travail (Fig.36), La cartographie piézométrique a été réalisée à la base des relevés piézométriques effectués en utilisant le logiciel Surfer 12.

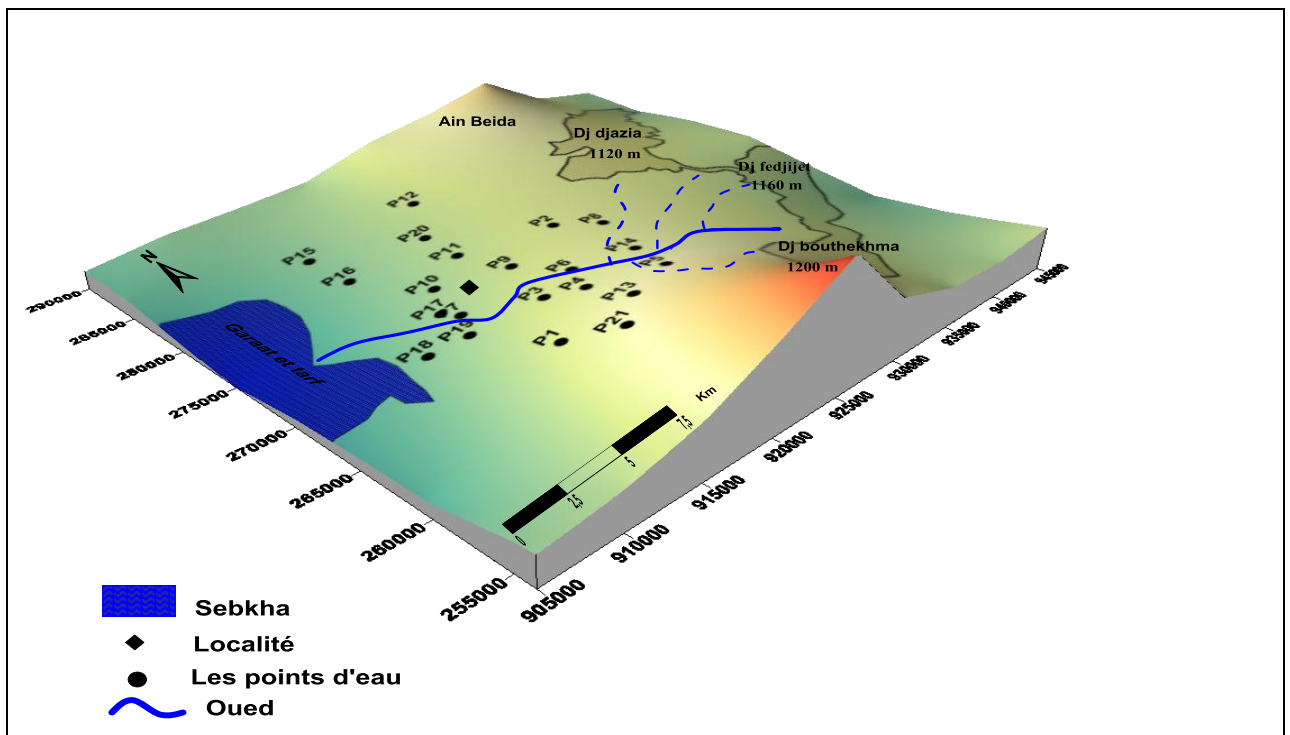


Figure 36 : Carte d'inventaire des points d'eau.

### 5.2. Carte piézométrique en période des hautes eaux (Juin 2012)

La direction principale de l'écoulement (Fig.37) se fait globalement des affleurements calcaires vers la Sebkhia (Garaet Et Tarf) selon trois directions NE-SW, SE-NW et N-S. Toutes les eaux de la nappe drainent vers la Sebkhia qui constitue un exutoire naturel. Les limites géologiques incarnées par les calcaires assurent l'alimentation en eau de la plaine. Cette alimentation se fait latéralement et par déversement souterrain à partir des massifs bordiers. Par ailleurs, l'analyse de cette carte piézométrique de hautes eaux révèle des altitudes très variables des courbes isopièzes, avec un minimum au centre de la dépression. Elle donne non seulement une vue globale sur le sens de l'écoulement des eaux souterraines mais aussi dans la mesure du possible des informations sur les caractéristiques géologiques du système aquifère.

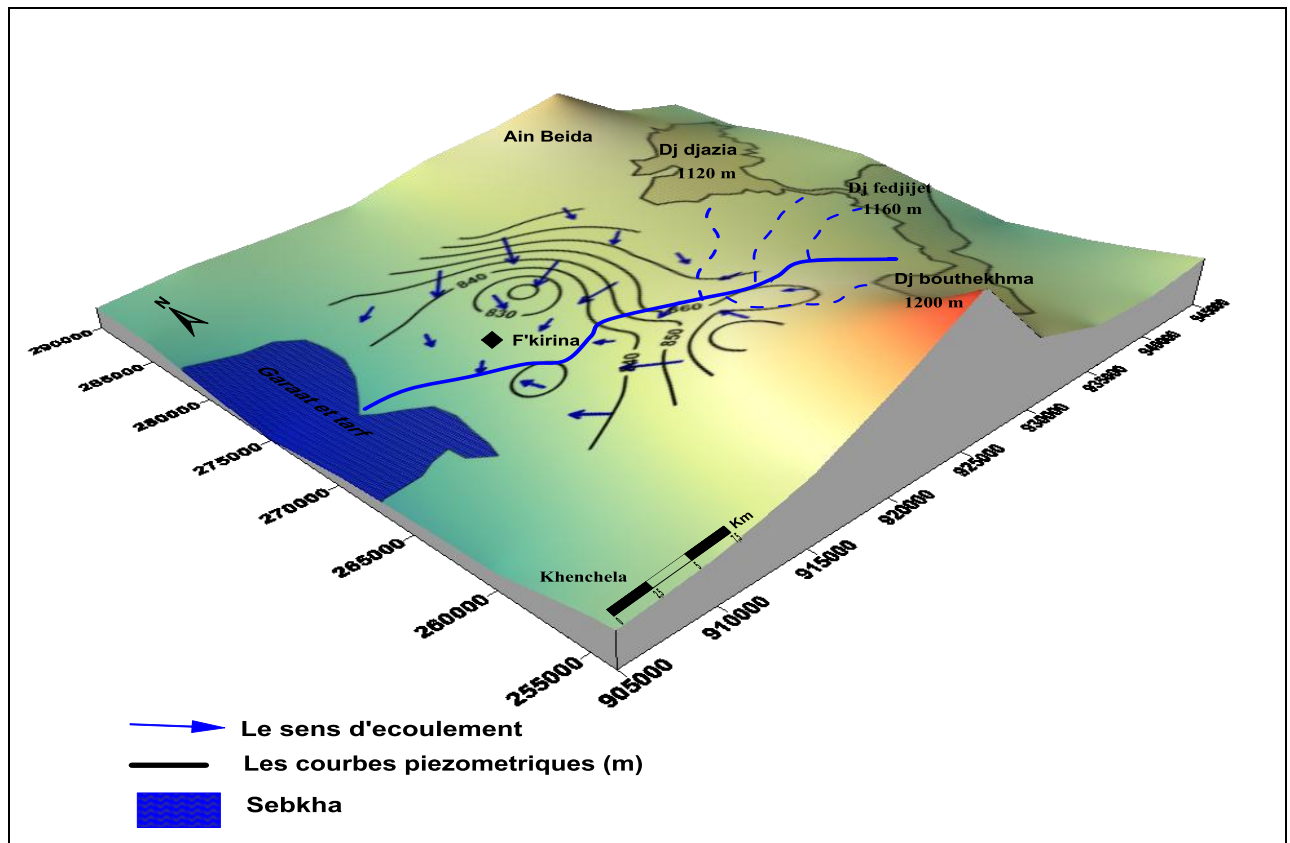


Figure 37 : la carte piézométrique (Juin 2012).

### 5.3. Carte piézométrique en période des hautes eaux (Octobre 2012)

Afin de voir l'évolution de la piézométrie de la nappe dans le temps, on a établi une deuxième carte piézométrique (Fig.38) durant la fin de la période des basses eaux pendant laquelle l'exploitation est intensive, sous des conditions climatiques très défavorables. La morphologie piézométrique de la nappe est identique à celle du mois de Juin.

Dans la zone méridionale de la nappe, les courbes isopièzes sont resserrées, indiquant un gradient hydraulique important, de l'ordre de 0.0065. Dans la zone centrale, les courbes se trouvent espacées suite à un gradient hydraulique faible, de l'ordre de 0.0032. A l'ouest de F'kirina, les courbes deviennent plus espacées car c'est la zone d'accumulation des eaux souterraines. On pense que la variation du gradient hydraulique est due, essentiellement, à l'hétérogénéité de la lithologie.

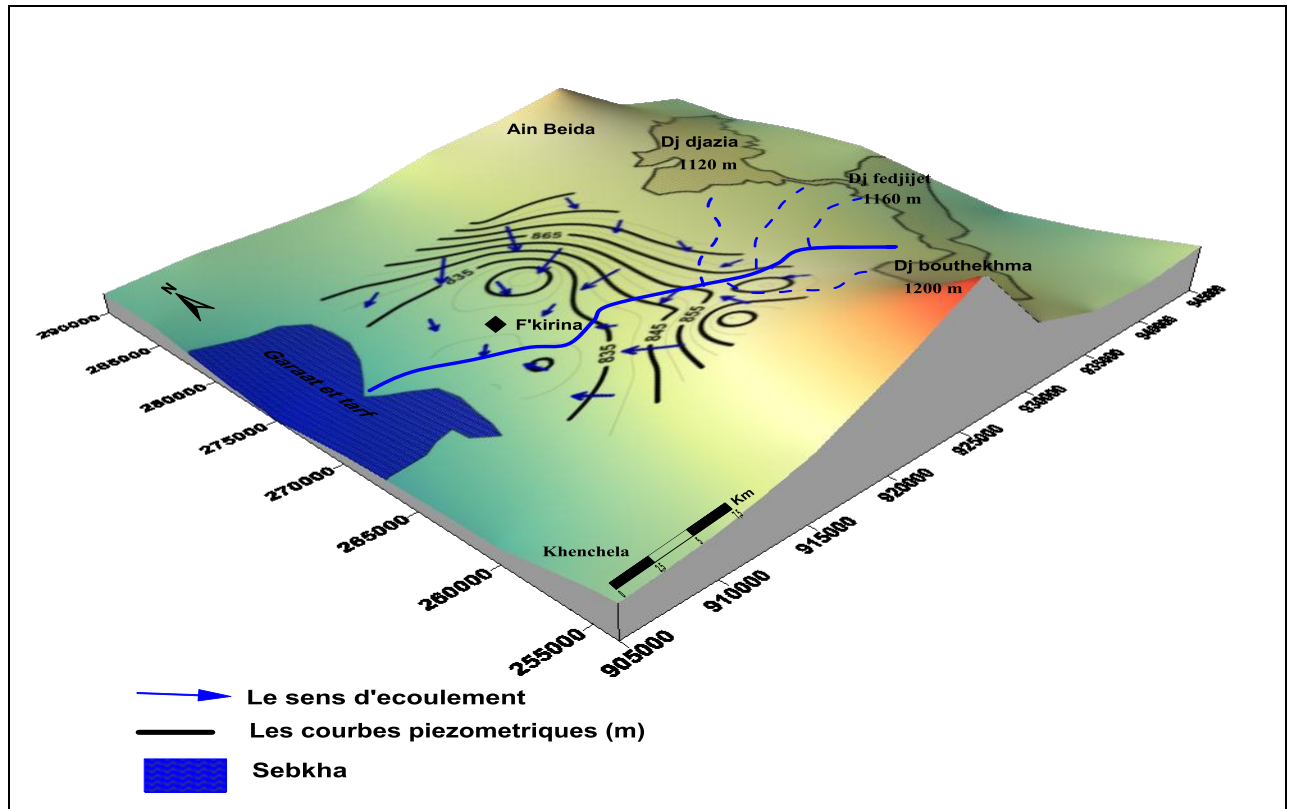


Figure 38 : la carte piézométrique (Octobre 2012).

### 6. Evolution spatio-temporelle de l'état piézométrique de l'aquifère

L'allure générale des isopièzes entre la période de 2004 et celle de 2012 reste presque identique (Fig.39), l'écoulement se fait généralement de l'Est vers l'Ouest. L'examen de ce diagramme a permis de noter que la nappe est influencée par la surexploitation à l'aide de pompage et la diminution de la pluviométrie durant ces dernières années. La nappe présente des faibles abaissements sont enregistrés dans la partie Est, estimée de 3 m.

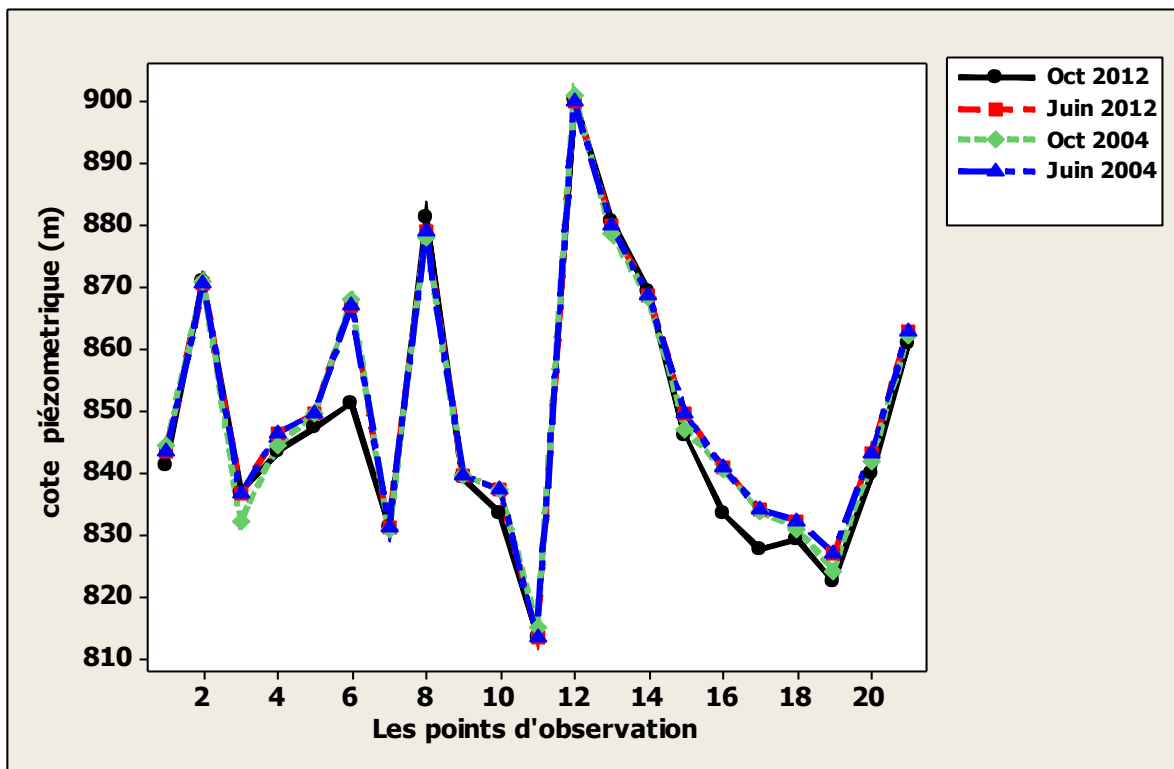


Figure 39. Evolution spatio- temporelle de la piézométrie selon le sens d'écoulement.

7. Logs stratigraphiques de quelques forages

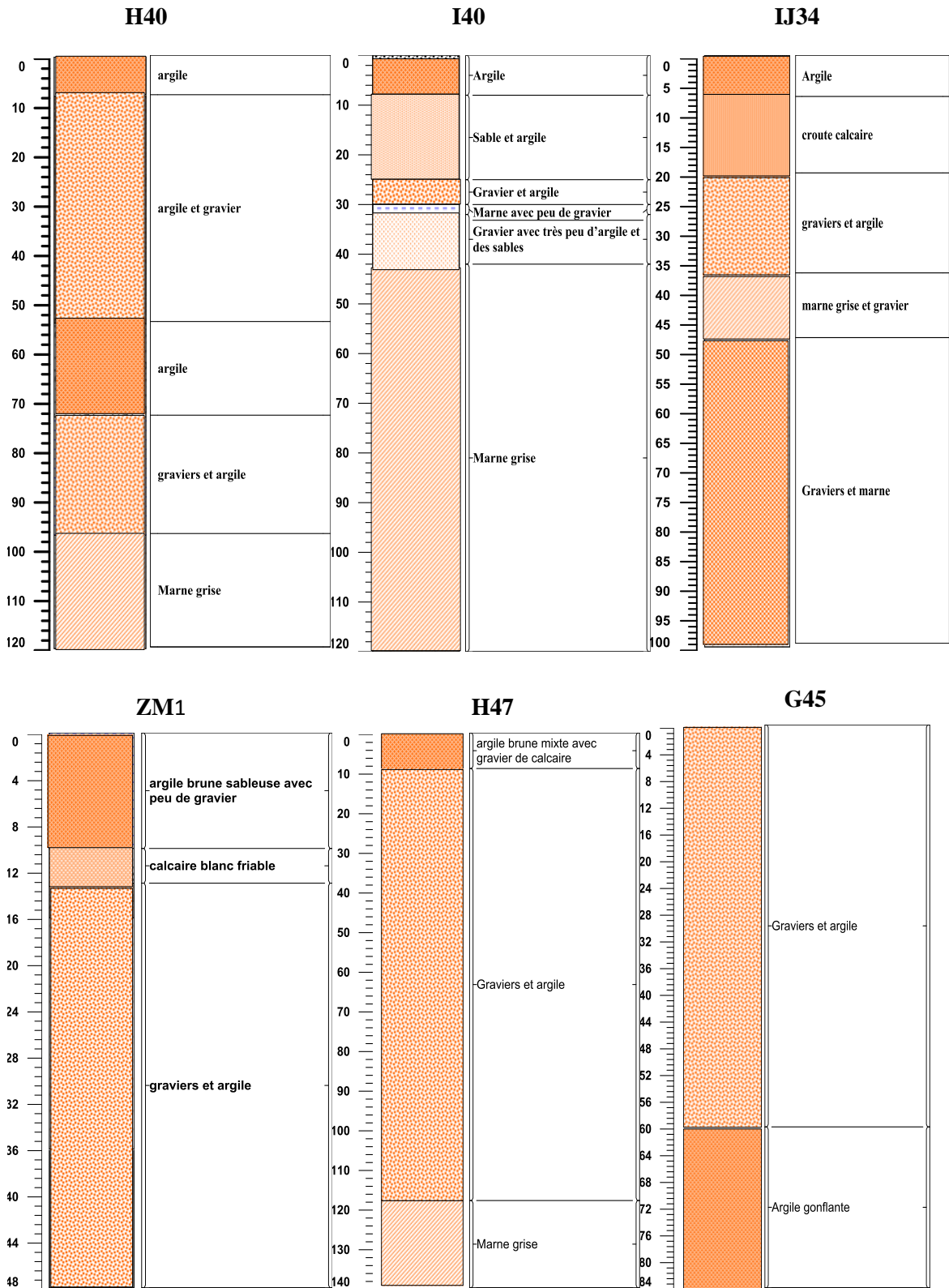


Figure 40 a : Logs stratigraphiques des forages.

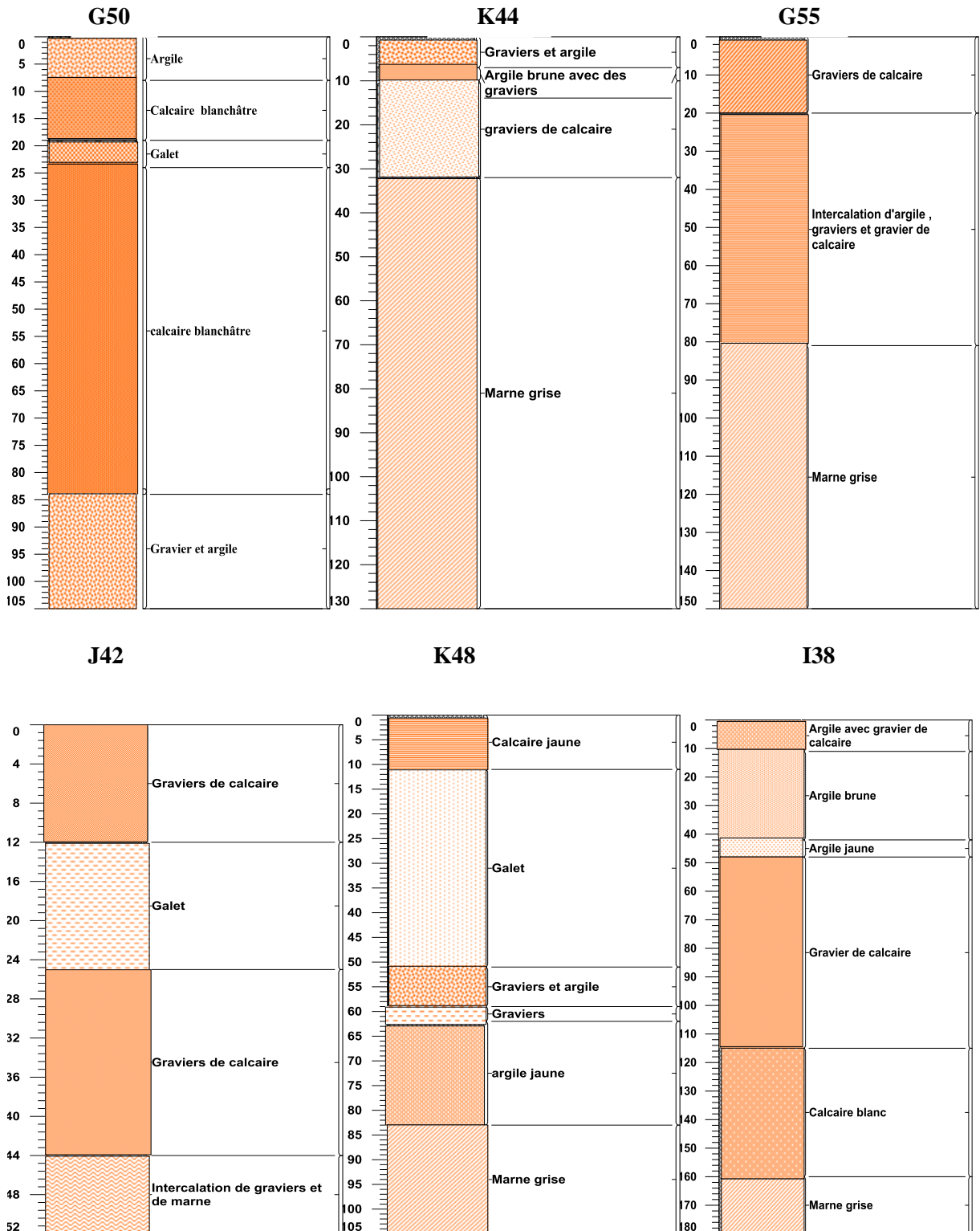


Figure 40 b : Logs stratigraphiques des forages.

**8. Conclusion**

De ce chapitre, il ressort que :

- La plaine de F'kirina est occupée en surface par un matériau alluvionnaire hétérogène formé d'argile, gravier, et sable.
- Le substratum constituant l'assise imperméable, est représenté par des calcaires des Maestrichtien supérieur. Mais il existe une zone où ces calcaires sont érodés et remplacés par des marnes de Maestrichtien inférieur. La nappe se rapproche de la surface au fur et à mesure que l'on se rapproche du Sebkh.
- L'analyse de la carte piézométrique montre que la direction principale de l'écoulement se fait globalement des affleurements calcaires vers la Sebkh (Garaet Et Tarf) selon trois directions NESW, SE-NW et N-S. Toutes les eaux de la nappe drainent vers la Sebkh qui constitue un exutoire naturel.
- Les limites géologiques incarnées par les calcaires assurent l'alimentation en eau de la plaine. Cette alimentation se fait latéralement et par déversement souterrain à partir des massifs bordiers.

# ***CHAPITRE V***

*Caractérisation hydrochimique des  
eaux souterraines*

### 1.Introduction

Tout travail hydrochimique consiste à recueillir des échantillons d'eau, tout en respectant les techniques de prélèvement prescrites. De procéder à un certain nombre d'analyse pour avoir une idée sur l'identité physico-chimique de l'eau et son mode de répartition spatiale dans le milieu environnant. (Khedidja ,2016)

L'étude de la chimie des eaux souterraines a une importance considérable, particulièrement dans les régions semi arides. Il s'agit en fait d'une méthode de prospection hydrogéologique qui permet la caractérisation des aquifères. En effet, la composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, de l'évolution hydrodynamique des écoulements de la nappe, de la profondeur de cette dernière et de la zone climatique. Elle donne de précieux renseignements sur les conditions de gisement et le mouvement des eaux souterraines. (Brinis, 2012)

Dans la présente partie, nous allons traiter les résultats d'analyse physico-chimiques disponibles pour déterminer l'origine ainsi que les mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux.

- Premièrement, une analyse d'ensemble des points d'eaux des différents prélèvements effectués dans de la plaine ainsi qu'un traitement statistique des paramètres mesurés.
- Deuxièmement, On donnera un détail des faciès chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude, ainsi que leurs répartitions spatiales dans la plaine et l'origine de chaque faciès puis on déterminera l'origine de la salinité des eaux et les mécanismes d'acquisition du chimisme en utilisant l'évolution des éléments chimiques et leurs relations les uns par rapport aux autres. Nous avons aussi exploité ces résultats pour donner un résumé sur l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation, (méthode de Richard et celle de Wilcox).
- Troisièmement, une interprétation globale des paramètres physico-chimiques sera présentée. On commencera par une analyse statistique des variables et des observations en utilisant l'analyse en composant principale (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (C.A.H).

2. Matériels et moyens d'analyse

La campagne de prélèvements d'échantillons a été effectuée durant la fin de la période de hautes eaux (Mai 2015). Ces prélèvements ont été effectués selon une répartition et une fréquence qui dépend de la disponibilité des ouvrages, du type des formations géologiques et de la profondeur des eaux. 45 échantillons ont été pris au niveau des points d'eau (Fig.41). Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire **LACILAP** Ain M'Lila. Les éléments chimiques qui ont été dosés sont :  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  et  $HCO_3^-$ . Les méthodes de dosage utilisées sont : la colorimétrie, la volumétrie et la spectrophotométrie (RODIER, 1996). La température (T), la conductivité électrique (CE) et le pH ont mesurés sur terrain à l'aide d'un appareil portatif multi paramètres de type **CONSORT C 931, version 2.4**.

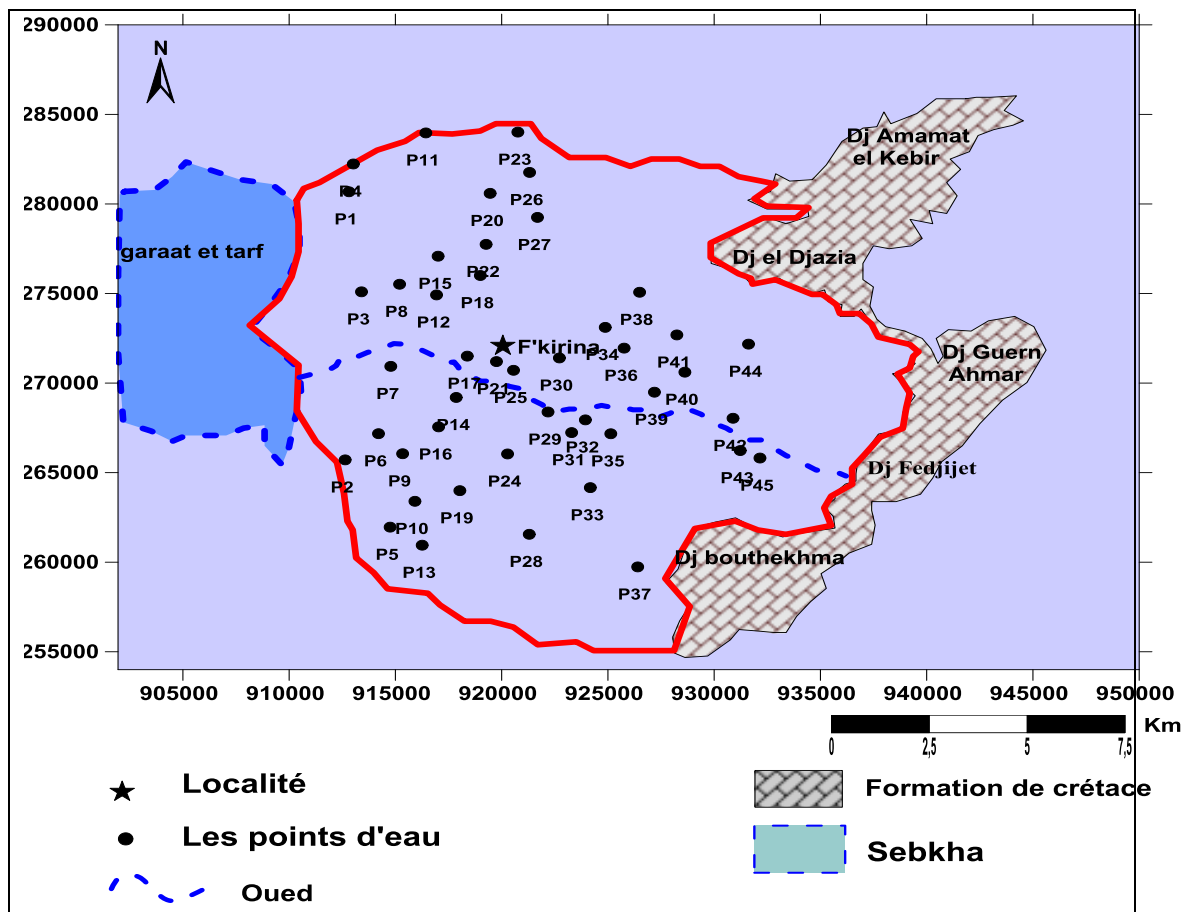


Figure 41 : Carte d'inventaire des points d'eau.

### 3. Caractéristiques physico-chimiques

La composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, du temps de séjour, de l'évolution hydrodynamique, de la profondeur du niveau statique et du climat. La qualité de l'eau peut également être influencée par l'activité de l'homme dans le domaine de l'urbanisation, de l'industrialisation et surtout les différentes activités agricoles. Un autre facteur qui a un effet considérable sur la qualité des eaux, surtout dans les régions arides et semi-arides, qui est l'augmentation de la salinité des eaux souterraines surtout pour les aquifères superficiels, résultant du phénomène de l'évaporation (Drever, 1997). Les résultats des analyses sont regroupés dans le tableau 7.

Variable	units	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Les normes OMS
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	116,000	1061,000	245,550	129,586	-
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/L	12,000	2660,000	272,933	363,893	400
Cl <sup>-</sup>	mg/L	25,000	1100,000	169,250	160,497	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,000	134,000	34,150	31,060	50
M.	mg/L	372,000	5704,000	912,433	741,640	-
Ca <sup>++</sup>	mg/L	52,000	720,000	131,133	98,496	100
Mg <sup>++</sup>	mg/L	8,000	427,000	53,933	52,212	0.50
Na <sup>+</sup>	mg/L	14,000	680,000	96,317	97,239	200
K <sup>+</sup>	mg/L	1,000	24,000	2,467	4,571	12
D.H.T.		5,000	71,600	11,053	8,965	-
Cond		437,000	6710,000	1068,083	862,253	2500
Ph		6,500	8,000	7,309	0,315	6.5 -8.5

**Tableau 11 : Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques des eaux la nappe de F'kirina (Mai 2015).**

### 4. Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques

La répartition spatiale des paramètres physico-chimiques, permet de mettre en évidence l'évolution de chaque élément et d'estimer l'origine de minéralisation.

#### 4.1. Etude analytique des éléments chimiques

##### 4.1.1. L'erreur sur la balance ionique

Sachant qu'une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative que lorsque la balance ionique est inférieure à 5%, les balances ioniques ont été systématiquement vérifiées pour l'ensemble des échantillons analysés.

Le calcul de la balance ionique est donné par la formule suivante :

$$\mathbf{BI\%} = \frac{\sum r \text{ cations} - \sum r \text{ anions}}{\sum r \text{ cations} + \sum r \text{ anions}} \times 100$$

**BI%** étant le pourcentage d'erreur.

On peut considérer une analyse comme :

- très bonne si  $e\% < 2$  ;
- acceptable si  $2 < e\% < 5$  ;
- mauvaise si  $e\% > 5$ .

#### 4.1.2. Validation des données hydrochimique

Pour confirmer la fiabilité des analyses nous allons soumettre les données hydrochimiques à un test statistique et mettre en évidence une corrélation linéaire si elle existe entre la somme des cations et celle des anions ainsi que la conductivité électrique. La figure 46 est un modèle représentant et témoignant des résultats d'analyses chimiques de 45 points d'eau prélevés au niveau de la nappe de F'kirina.

#### 4.1.3. Corrélation entre la somme des cations et la somme des anions

La corrélation entre la somme des cations et celle des anions (Fig.46) montre une évolution de la droite linéaire ; le coefficient de corrélation est proche de 1 ce qui permet de juger le modèle comme bon. Les analyses sont donc dans l'ensemble acceptables, cependant le test de la balance ionique reste obligatoire pour pouvoir éliminer les mauvaises analyses.

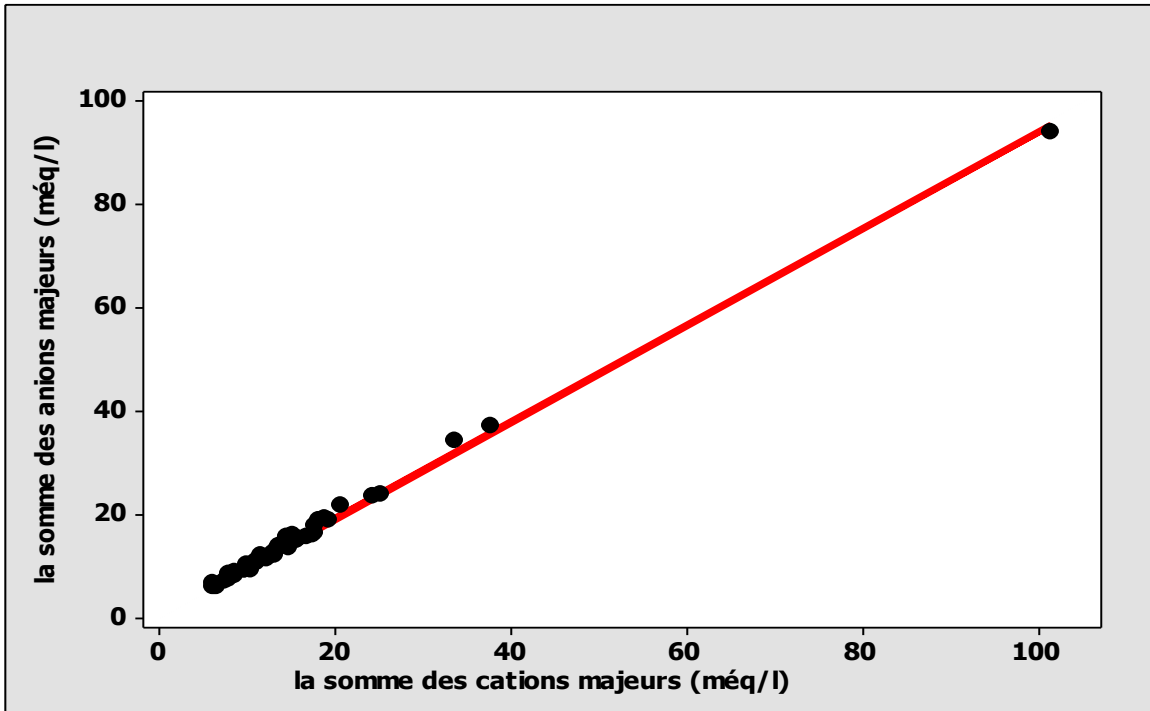


Figure 46 : Somme des anions versus somme des cations.

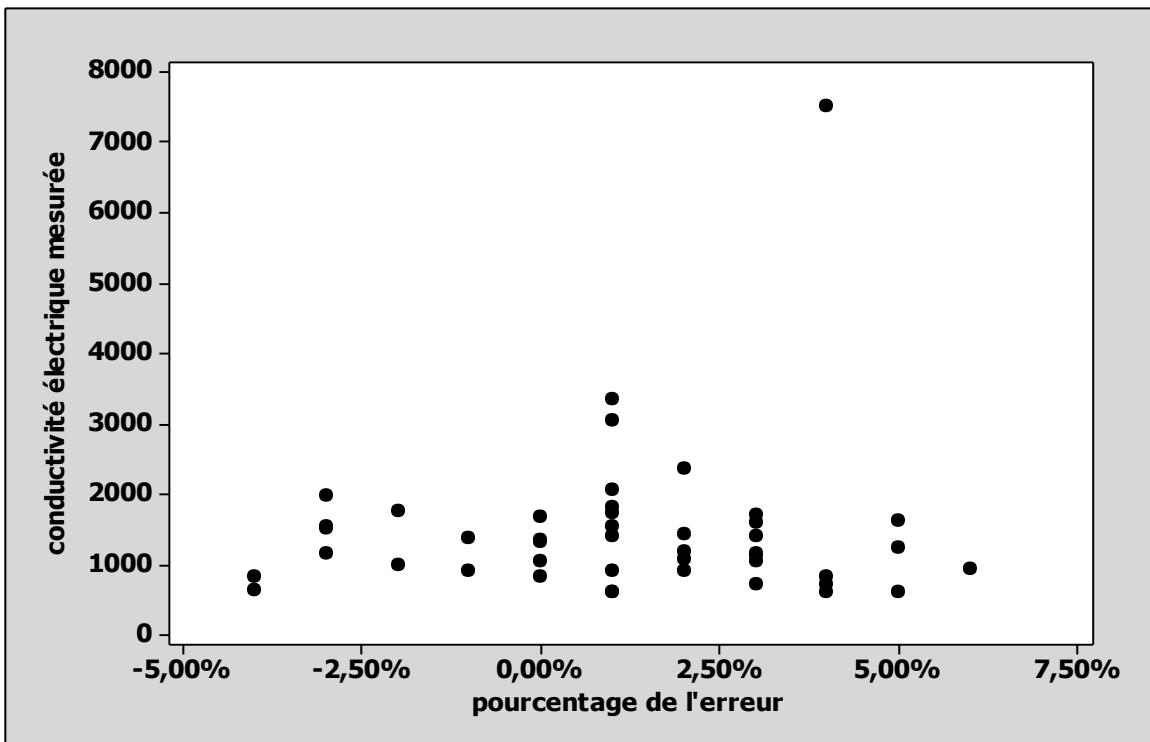


Figure 47 : Corrélation entre conductivité électrique mesurée et le pourcentage d'erreur.

## 4.2. Les paramètres physiques

Ces paramètres ont été mesurés in situ. Il s'agit des paramètres facilement mesurables et utiles pour la détermination de l'état chimique des éléments dans l'eau.

### 4.2.1. Température

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux, elle varie en fonction de la température extérieure de l'air. Elle nous renseigne sur la profondeur des eaux, sur les relations et les échanges inter-nappes, sur le temps de résidence.

Les valeurs de la température des eaux mesurées varient entre 14 et 23.0 °C

**4.2.2. Conductivité électrique (CE)**

Traduisant la capacité d'une eau (solution aqueuse) à conduire le courant électrique, la conductivité électrique est directement liée à la force ionique qui découle des formations traversées par cette eau dans le bassin hydrogéologique ainsi qu'à son temps de séjour dans le réservoir. Elle donne ainsi une bonne appréciation sur la minéralisation globale de cette eau. En effet, une eau est d'autant plus conductrice qu'elle est plus minéralisée. (Hamit ,2012).

Les valeurs de la conductivité de la zone d'étude sont très hétérogènes et sont comprises entre 500 et 6500µS/cm (Fig.42). Elles présentent des variations spatiales très importantes s'étalant de façon très hétérogène dans le secteur, même si en général, les fortes conductivités occupent la zone de la dépression. Nous constatons que la salinité des eaux augmente dans le sens d'écoulement.

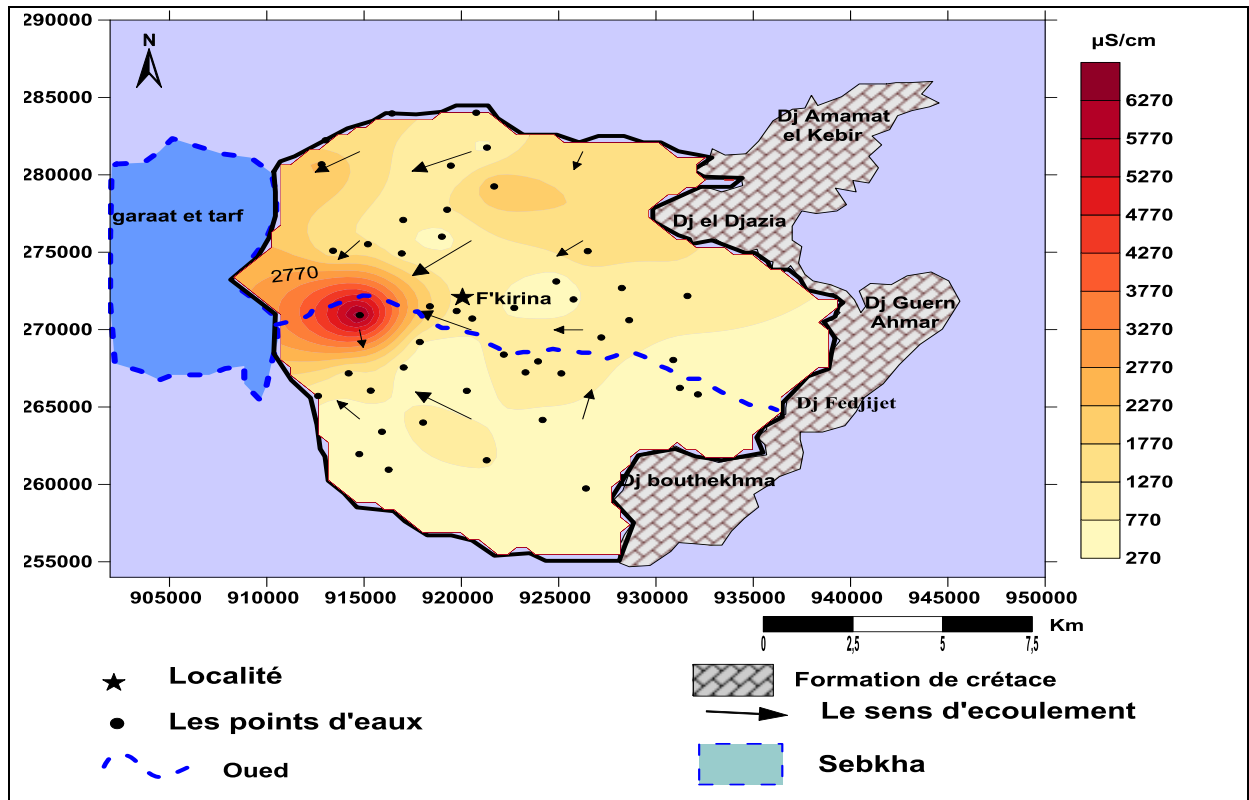


Figure 42 : Carte de la distribution des Conductivité dans les eaux souterraines.

**4.2.3. Le potentiel d'hydrogène (pH)**

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Dans l'ensemble des eaux échantillonnées, les pH mesurés sont homogènes et se situent autour de la neutralité. Ils

varient entre 6,5 et 8 avec une moyenne de 7,30. Les valeurs les plus faibles sont observées près des formations carbonatées et les plus élevées dans le centre et l'ouest (Fig.43). Cette augmentation serait due à une progression du faciès des eaux qui passe de bicarbonaté calcique au sulfaté calcique (zone centrale). Les pH les plus élevés sont caractéristiques des eaux chlorurées sodiques des zones situées autour du Garaat et tarf.

pH	Qualité de l'eau
pH < 5	Acidité forte
pH = 7	Neutralité (eau pure)
7 < pH < 8	Neutralité rapprochée (eau de surface)
5.5 < pH > 8	Majorité des eaux souterraines
pH > 8	Alcalinité, évaporation intense

Tableau 12 : Estimation de la qualité de l'eau selon le pH

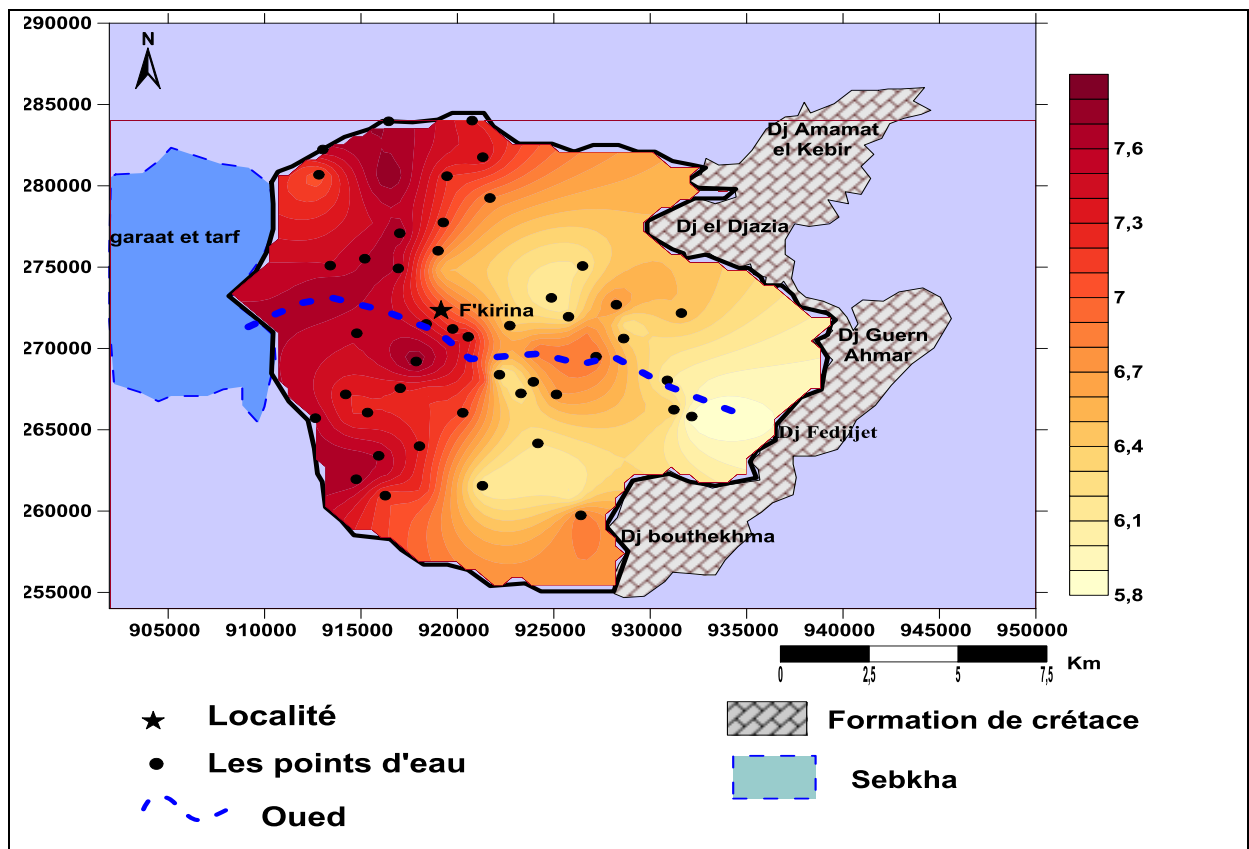


Figure 43 : La carte de la distribution des pH dans les eaux souterraines.

4.3.4. La dureté totale

La dureté hydrotimétrique totale de l'eau correspond à la somme des concentrations des ions Calcium (Ca<sup>2+</sup>) et de celle des ions magnésium (Mg<sup>2+</sup>), elle est donnée en degré français(°F).

$$DHT (°F) = (r Ca^{++} + r Mg^{++}) \times 5$$

Dans la région de F'kirina, la dureté des eaux varie entre (5 et 75°F), caractérisant une eau douce a moyennement douce de sud vers le Nord, A l'ouest l'eau devient dure (Fig.44).

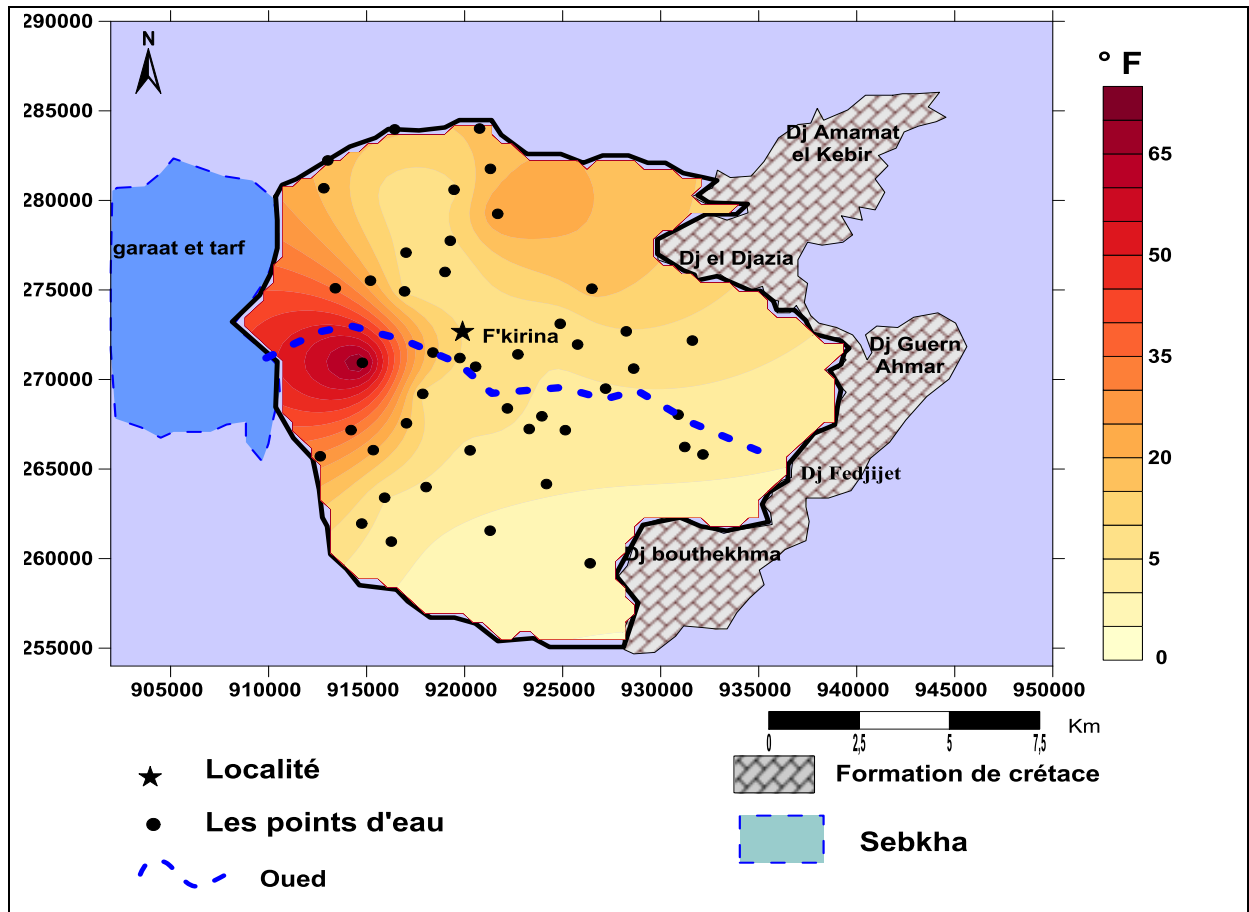


Figure 44 : Carte de la distribution de la dureté totale dans les eaux souterraines.

#### 4.2.5. La minéralisation

La minéralisation globale correspond à la teneur totale en sels dissous dans l'eau. Elle est en relation directe avec la conductivité électrique de la solution.

Dans le cas de la zone étudiée, les valeurs de la minéralisation se situent généralement entre 200 et 6000 mg/l (Fig.45). Cependant, cette gamme de valeurs peut être localement dépassée, sous l'effet de la lithologie ou de la pollution d'origine anthropique.

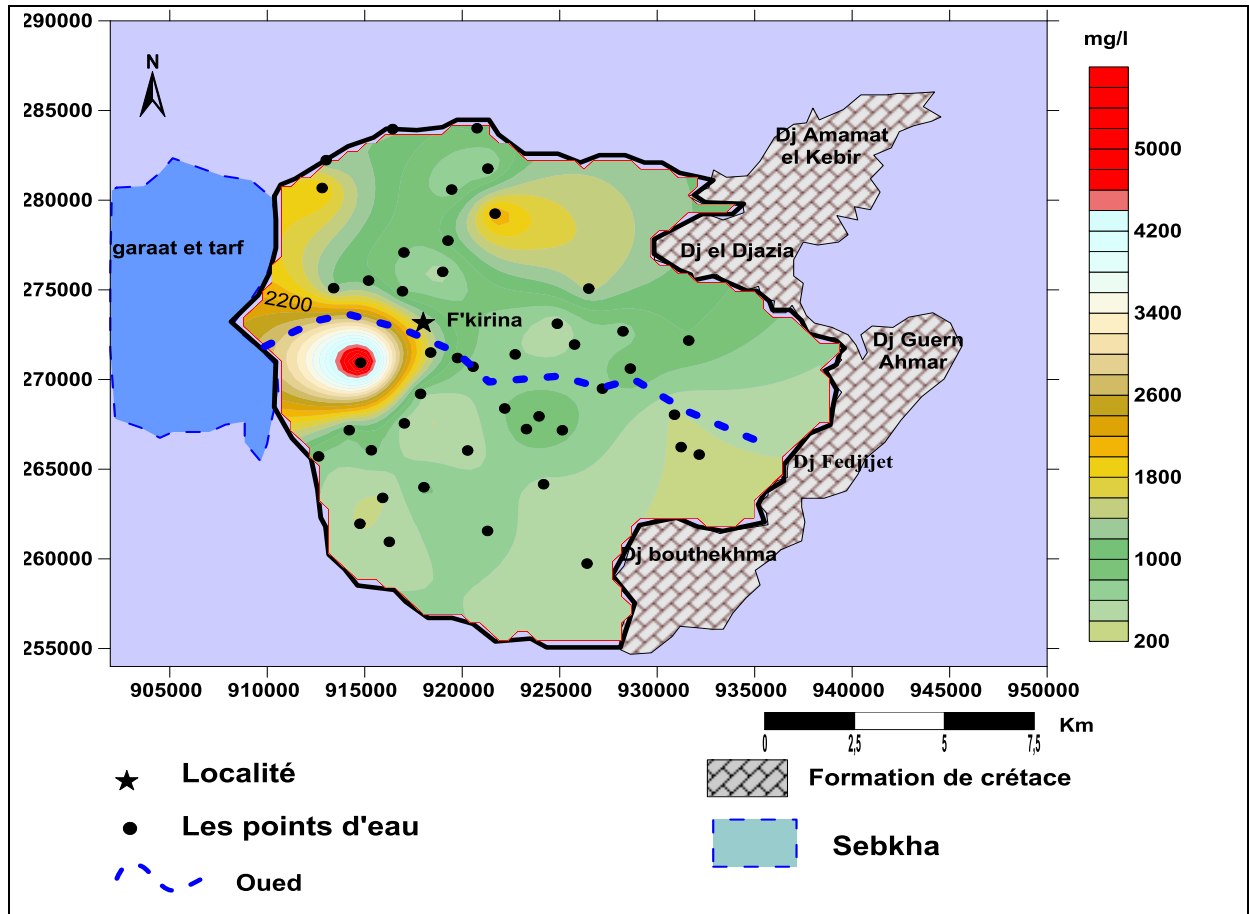


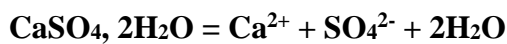
Figure 45 : Carte de la distribution minéralisation dans les eaux souterraines.

### 4. 3. Les paramètres chimiques

#### 4. 3.1. Les cations major

##### 4.3.1.1. Le calcium $Ca^{2+}$

Le calcium, élément principal de la dureté de l'eau, est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Dans les roches sédimentaires, il se présente sous forme de carbonates (calcite, dolomite et aragonite). (Drever, 1997). Le calcium fait partie de quelques minéraux évaporitiques à savoir le gypse et l'anhydrite (Hem, 1985).



Les résultats de mesure obtenus (Fig.48) montrent une valeur minimale de 50 mg/let une valeur maximale de 670 mg/l près du Djebel Djazia et Djebel Bardo liée à la présence des croûtes de calcaires.

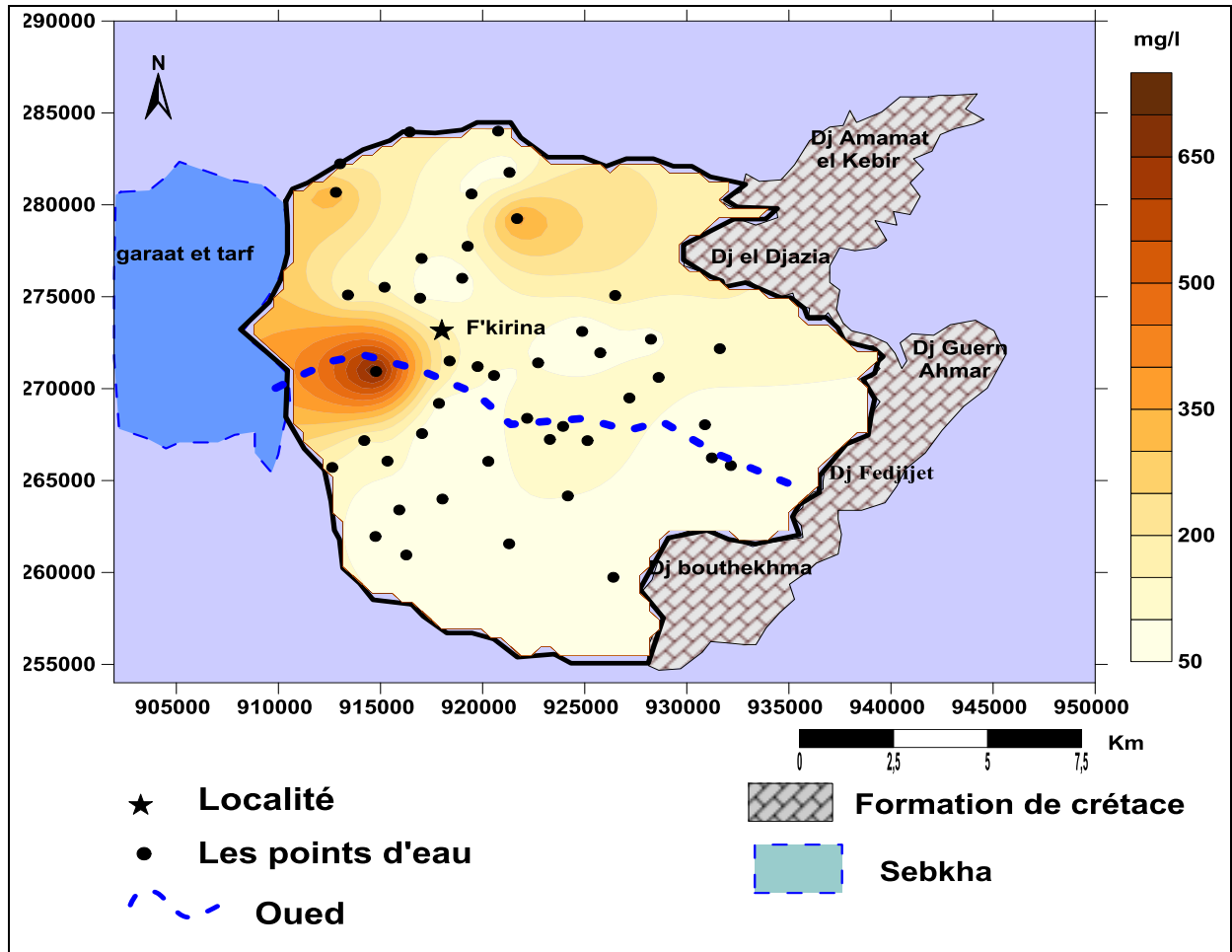
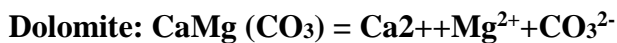


Figure 48 : Carte de la distribution des teneurs en calcium dans les eaux souterraines

#### 4. 3.1.2. Le magnésium $Mg^{2+}$ :

Le Magnésium provient principalement de la dissolution des dolomies, des calcaires et marnes dolomitiques. Il est faiblement présent dans les eaux de pluie en général. La présence du Magnésium, dont la cinétique d'acquisition chimique est lente, caractérisera des eaux qui ont séjourné longtemps dans les blocs capacitifs donc à transit lent



Les résultats de mesure obtenus (Fig.49). et la carte de magnésium montrent que la teneur en  $Mg^{++}$  est relativement faible dans la quasi-totalité de la plaine, sauf dans la partie Ouest de la carte, (proche du Garaet Et Tarf et de l'Oued Nini,). Ceci laisse supposer qu'il y a une contamination de la nappe par les eaux de l'Oued et du Garaet.

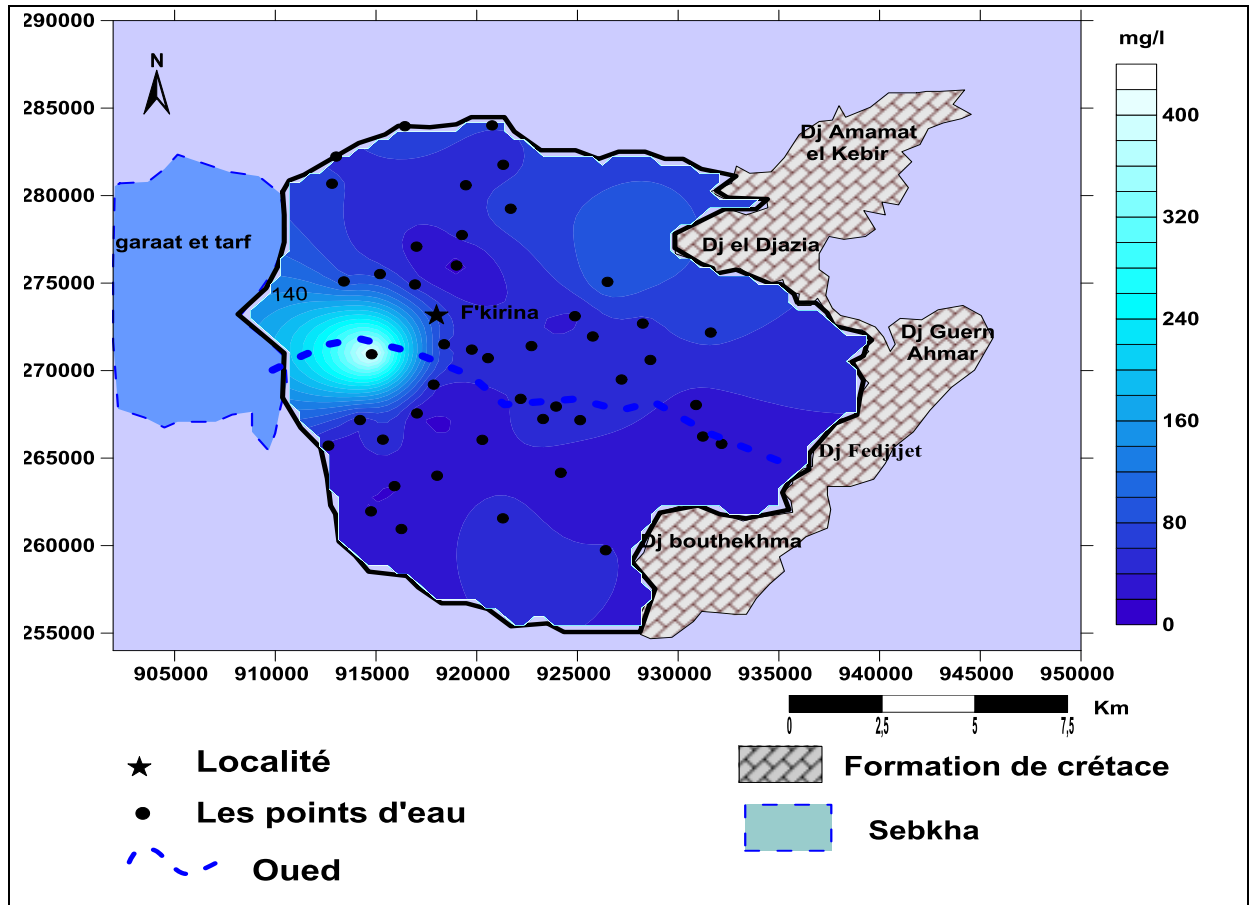


Figure 49 : Carte de la distribution des teneurs en magnésium dans les eaux souterraines.

#### 4. 3.1.3. Sodium

Le Sodium est toujours présent dans l'eau provenant du lessivage des formations géologiques riches en Na Cl et de la dissolution des formations argileuses et marneuses.

Les teneurs en sodium observées pour l'ensemble des points d'eaux de la plaine(Fig.50) varient entre 14 mg/l comme valeur minimale et 680 mg/l comme valeur maximale dans les eaux du point d'eau ; la moyenne de mesure est de 102 mg/l.

L'observation de la carte des teneurs en sodium montre que les concentrations les plus élevées sont observées autour du garât et tarf. Cette forte concentration pourrait résulter d'un effet d'évaporation de la nappe. Par contre, les teneurs les plus faibles sont observées dans le reste de la zone d'étude.

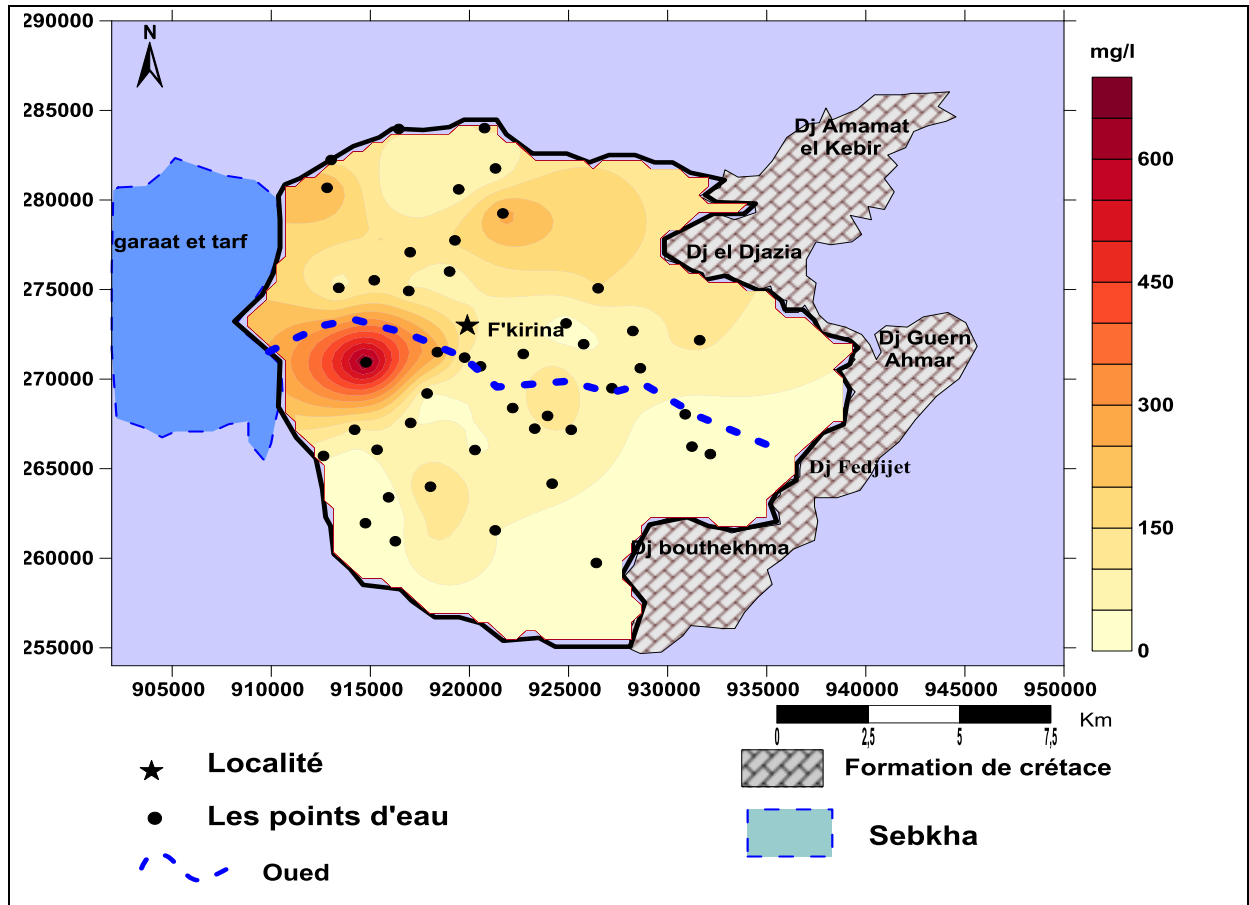


Figure 50 : Carte de la distribution des teneurs en sodium dans les eaux souterraines.

#### 4.3.2. Anions majeurs

##### 4.3.2.1. Chlorure

Les chlorures rencontrés en grande quantité dans les eaux souterraines, proviennent de la dissolution et lessivage des terrains salifères.

L'analyse de la carte d'égalité en Cl<sup>-</sup> (Fig.51), montre que les plus fortes teneurs en chlorures sont toujours situées dans la partie Ouest de la zone d'étude, et dans la partie Nord-Ouest. Les concentrations en chlorure sont comprises entre 25 mg/l (P 16) et 1000 mg/l, (P 14).

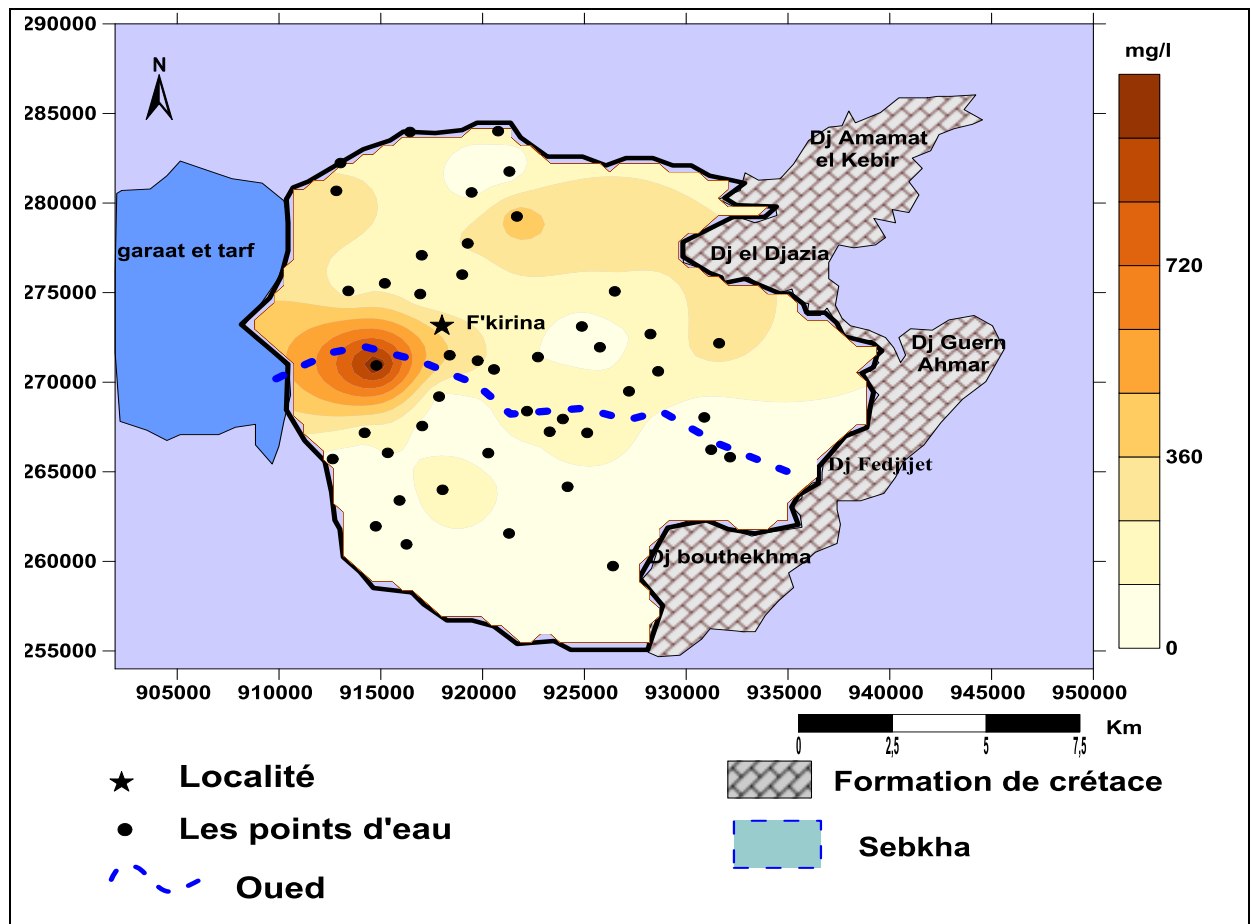


Figure 51 : Carte de la distribution des teneurs en chlorure dans les eaux souterraines.

### 3.3.2.2. Sulfate

Composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Une autre source de sulfates peut être attribuée à l’infiltration de sulfure utilisé comme fertilisant ou comme pesticide.

Les teneurs en sulfates observées pour l’ensemble des points d'eaux de la plaine (Fig.52) varient entre 12 mg/l comme valeur minimale mesurée près des affleurements calcaires et 2660 mg/l comme valeur maximale ceci peut être lié à une dissolution des formations riches en  $\text{SO}_4$ , ou à une contamination de la nappe soit par les eaux de l’Oued Nini ou du Garaet. Cette carte rappelle également la carte des teneurs en chlorures montrant ainsi une origine presque commune à celle des chlorures.

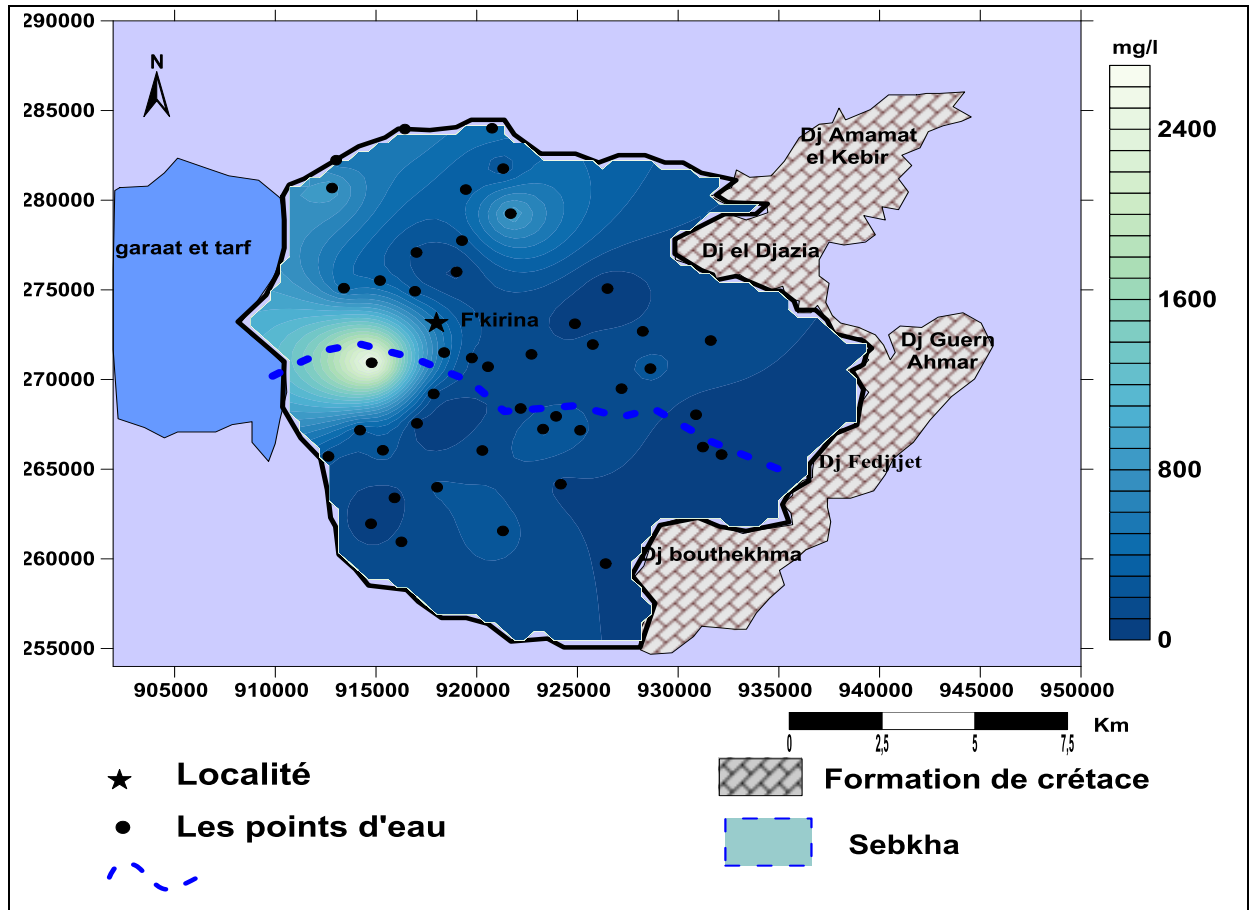


Figure 52 : Carte de la distribution des teneurs en sulfate dans les eaux souterraines

4.3.2.3. Les bicarbonates HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> :

Ils proviennent de la dissolution des roches carbonatées dans l'eau, en fonction de la teneur en CO<sub>2</sub> de la température, du pH et de la nature lithologique des terrains traversés.

La carte de bicarbonates (Fig.53) montre une diminution de teneurs au sens d'écoulement avec une moyenne de mesure de 245mg/l. les valeurs maximales sont de 1050 mg/l, celle minimale est de 116mg/l mesurée près des affleurements calcaires. L'accroissement de la teneur des bicarbonates juste à la sortie des calcaires maestrichtien est attribué à leur grande solubilité. En s'éloignant des affleurements, les eaux deviennent saturées et les carbonate précipitent et leur teneur diminue dans les eaux.

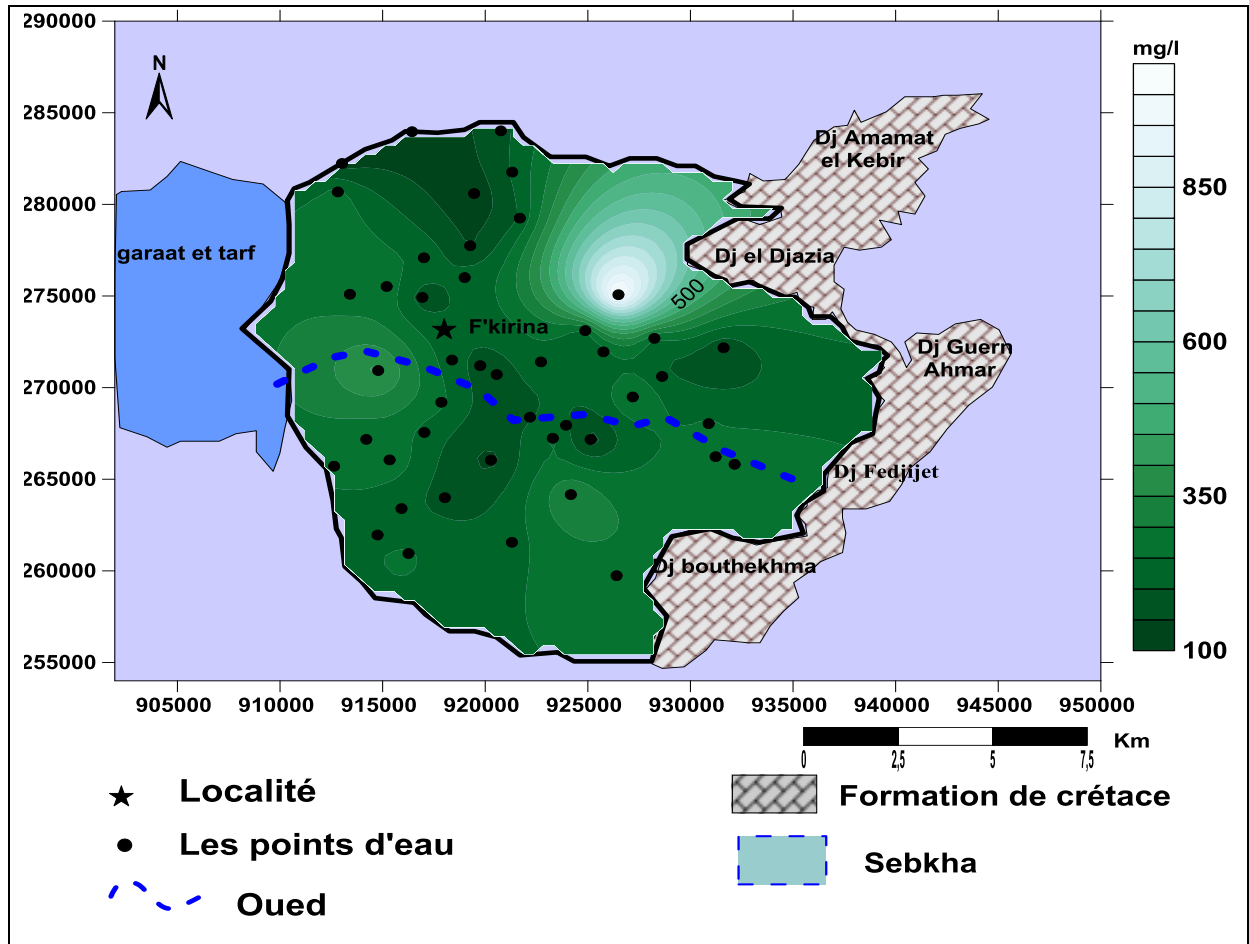


Figure 53 : Carte de la distribution des teneurs en bicarbonates dans les eaux souterraines.

4.3.2.4. Les nitrates :

La présence des nitrates est généralement associée aux signes de pollution d'origine anthropique (agricole, égouts, fosses septiques,). Les nitrates sont extrêmement mobiles dans les sols et s'accumulent, après infiltration dans les nappes phréatiques.

Les teneurs maximales sont observées au niveau du point P11 (124 mg/l) (Fig.54) qui est supérieure à la norme de potabilité (50mg/l), Cette présence de nitrates constitue un facteur de risque pour la santé humaine, surtout pour la population la plus vulnérable (nourrissons, femmes enceintes) là où on a une activité intense de l'agriculture.

Au Nord et au nord-ouest, la contamination des eaux serait attribuée aux eaux usées domestiques de l'agglomération de F'kirina.

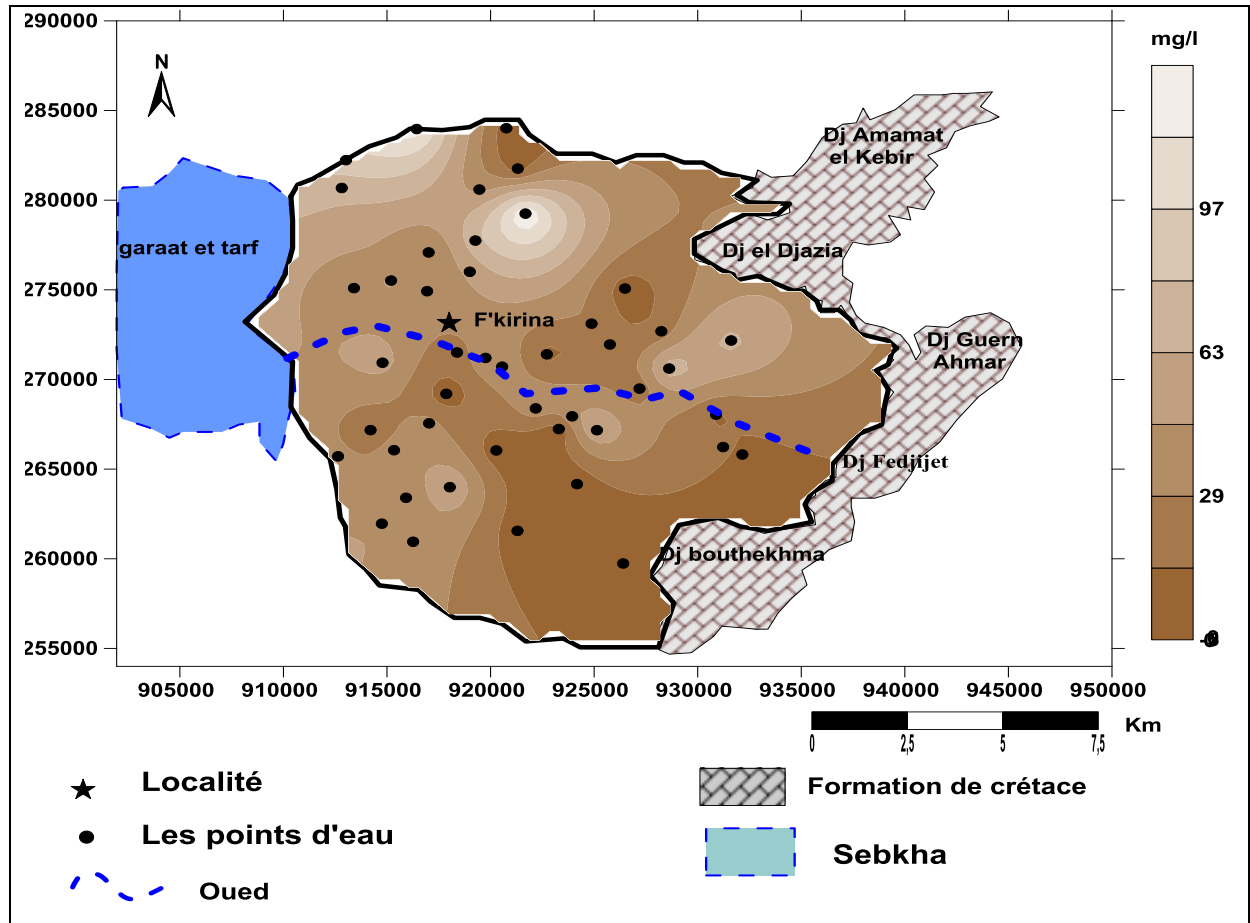


Figure 54 : Carte de la distribution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines.

## 5. Faciès chimiques des eaux :

### 5.1. Répartition graphique :

L'interprétation des résultats des analyses a pour but de déterminer les Faciès chimiques et d'effectuer une comparaison spatio-temporelle. Parmi les méthodes graphiques les plus utilisées, celle de SCHOELLER et BERKALOFF (1935-1938) et celle de PIPER (1944).

### 5.2. Représentation de Piper :

Le diagramme de Piper en figure 55 a été construit avec le programme Piper issu du logiciel DIAGRAMME (Simler, 2004), ceci afin de déterminer les faciès chimiques. En effet, ce diagramme permet de représenter sur un même graphique des nombreuses analyses autorisant des regroupements des faciès chimiques. La projection des résultats des analyses chimiques dans ce diagramme fait apparaître clairement une très grande variation de la chimie des eaux souterraines. Il découle de cette projection des résultats des analyses que tous les trois faciès du diagramme de Piper sont représentés : Faciès bicarbonaté calcique, Faciès sulfaté calcique et Faciès chloruré calcique.

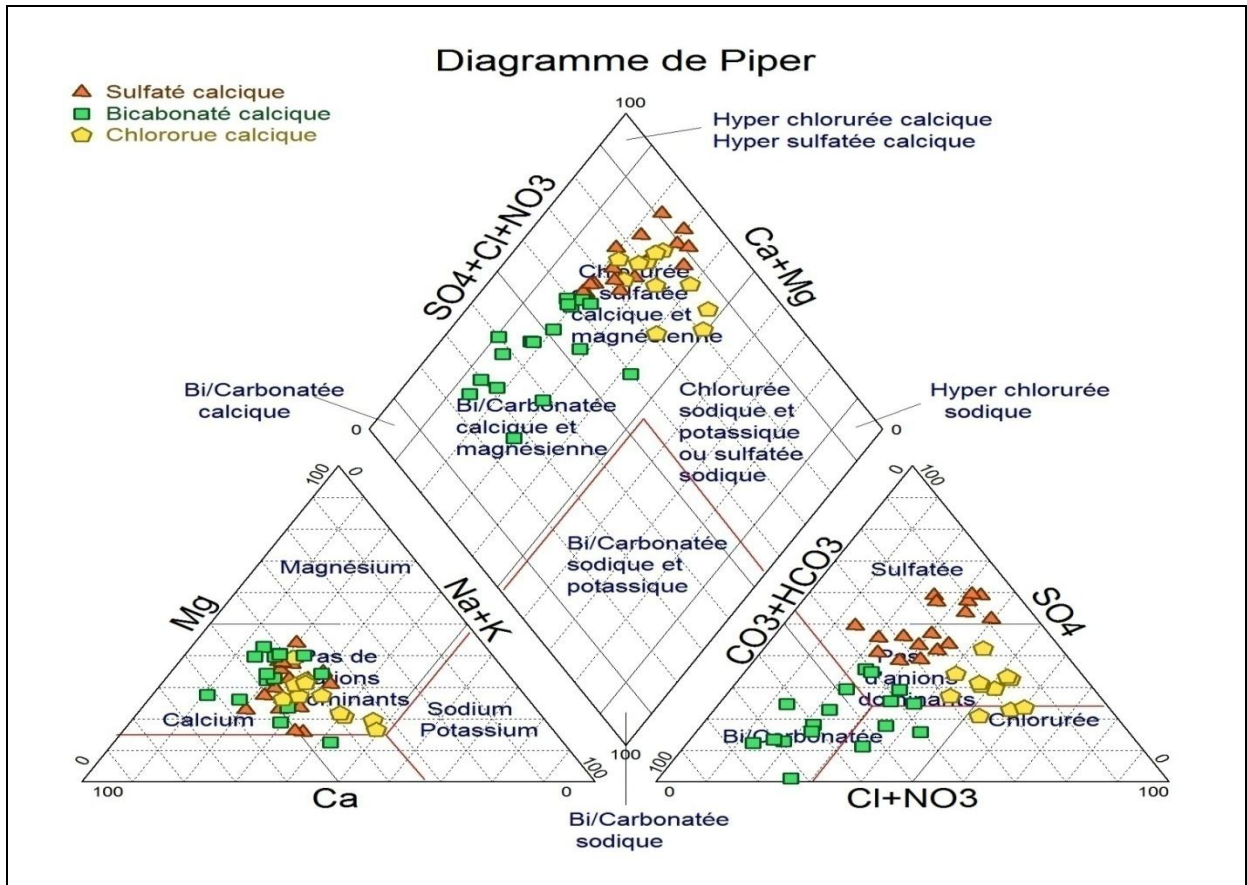


Figure 55 : Diagramme de Piper montrant la composition chimique des eaux du F'kirina.

Un autre moyen pour mieux apprécier l'origine des faciès caractéristiques des eaux de la région est l'étude des rapports caractéristiques :  $SO_4 / HCO_3$ ,  $Ca / Mg$  et  $SO_4 / Cl$ ,  $Ca / Mg$ , afin d'avoir une idée sur la répartition et l'évolution des faciès chimiques.

L'examen des deux relations des rapports caractéristique nous a permis de révéler la dominance des ions sulfatés, chlorures et bicarbonatés avec le pôle cationique calcique, ce qui explique l'origine de ces eaux est de nature diverse (Fig.56).

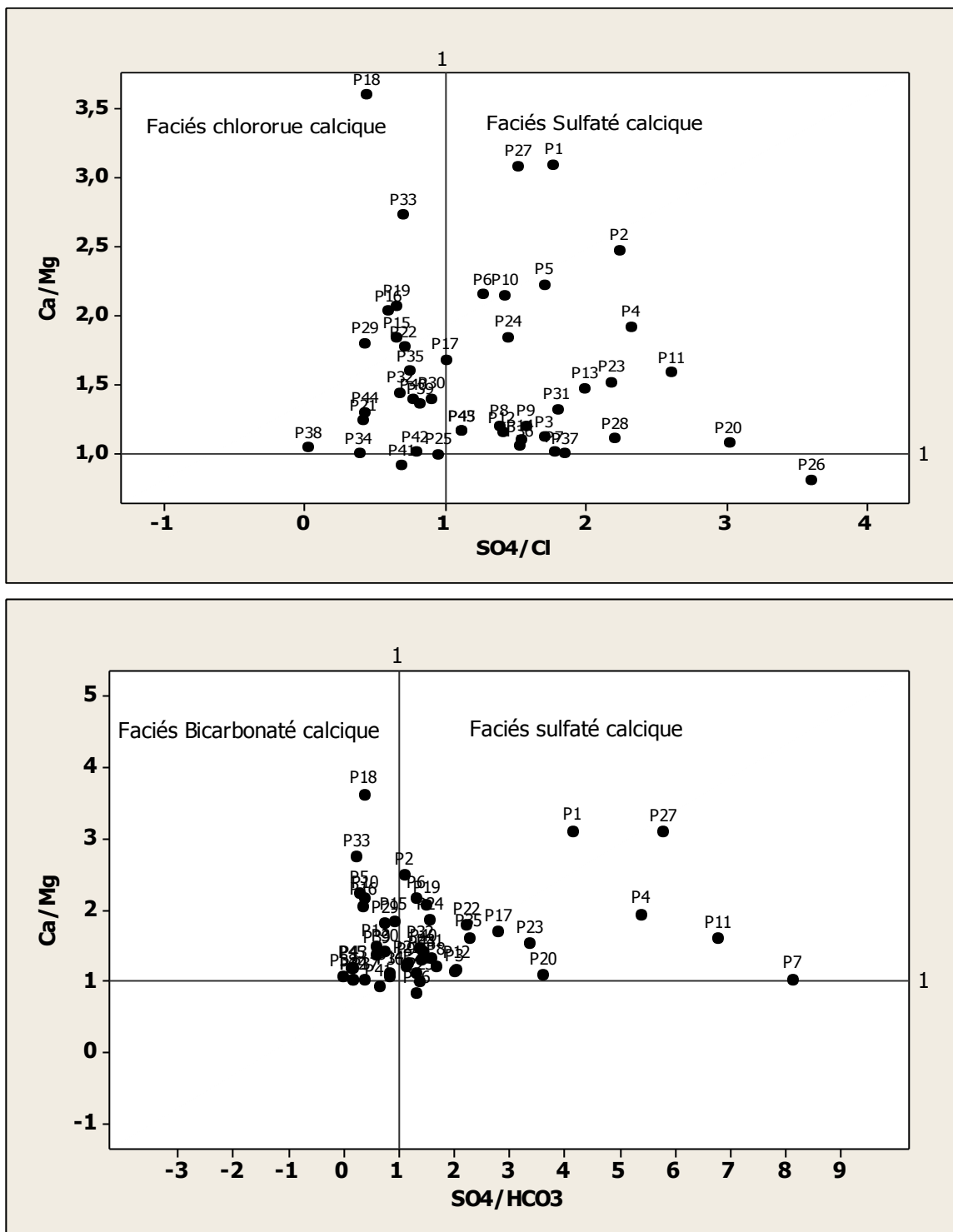


Figure 56 : Répartition des faciès chimiques selon les rapports caractéristiques.

**5.3. Classification de Schoeller– Berkaloff,**

Ce diagramme (Fig.57) est composé de sept échelles logarithmiques verticales équidistantes, correspondant aux principaux éléments chimiques obtenus par l'analyse.

Cette représentation permet de :

- Représenter sur un même diagramme plusieurs eaux, ce qui favorise la corrélation ainsi que la comparaison.
- Déterminer le pH d'équilibre, qui donne une idée sur le caractère agressif, neutre ou incrustant de l'eau.
- Si le pH mesuré est supérieur au pH d'équilibre, on dit que l'eau est incrustante.
- Si le pH mesuré est égal au pH d'équilibre, on dit que l'eau est neutre.
- Si le pH mesuré est inférieur au pH d'équilibre, on dit que l'eau est agressive.

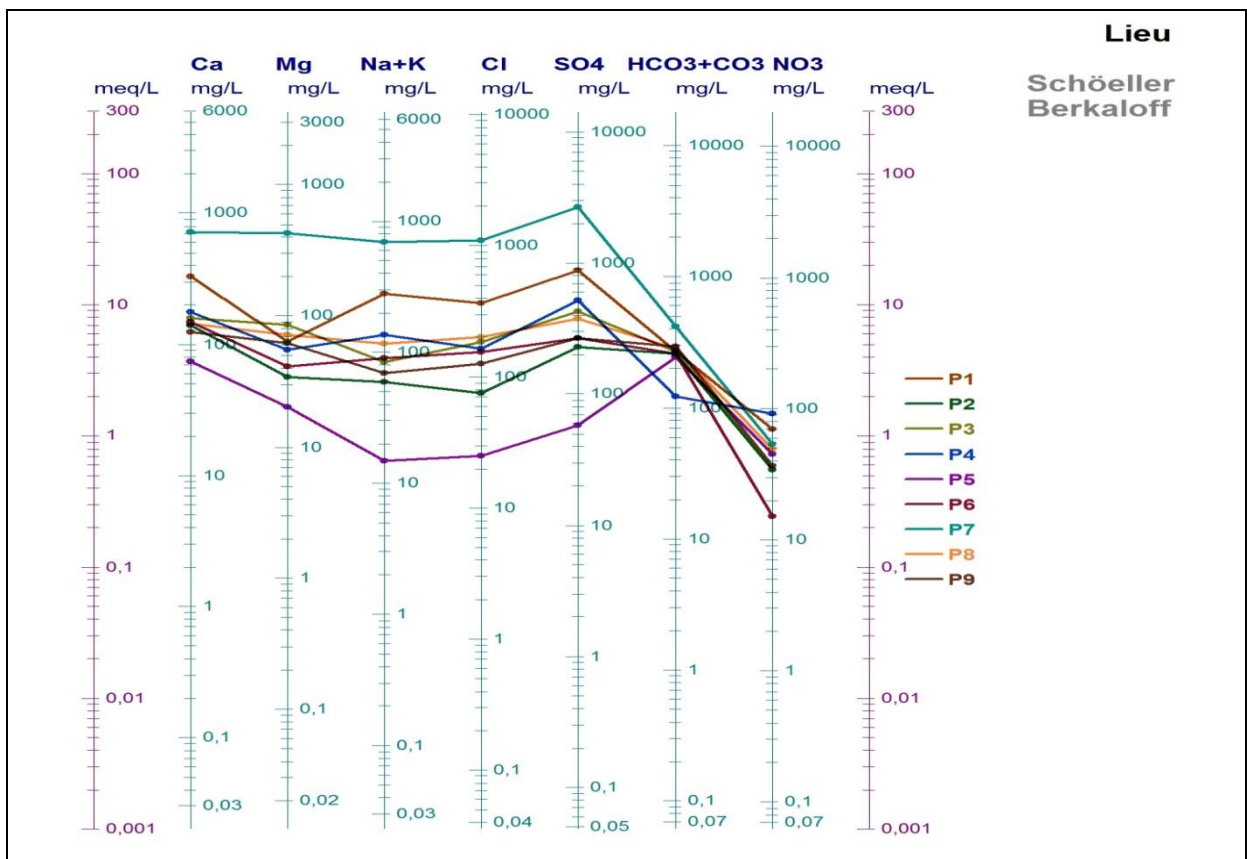


Figure 57 a : Classification de Schoeller- Berkaloff.

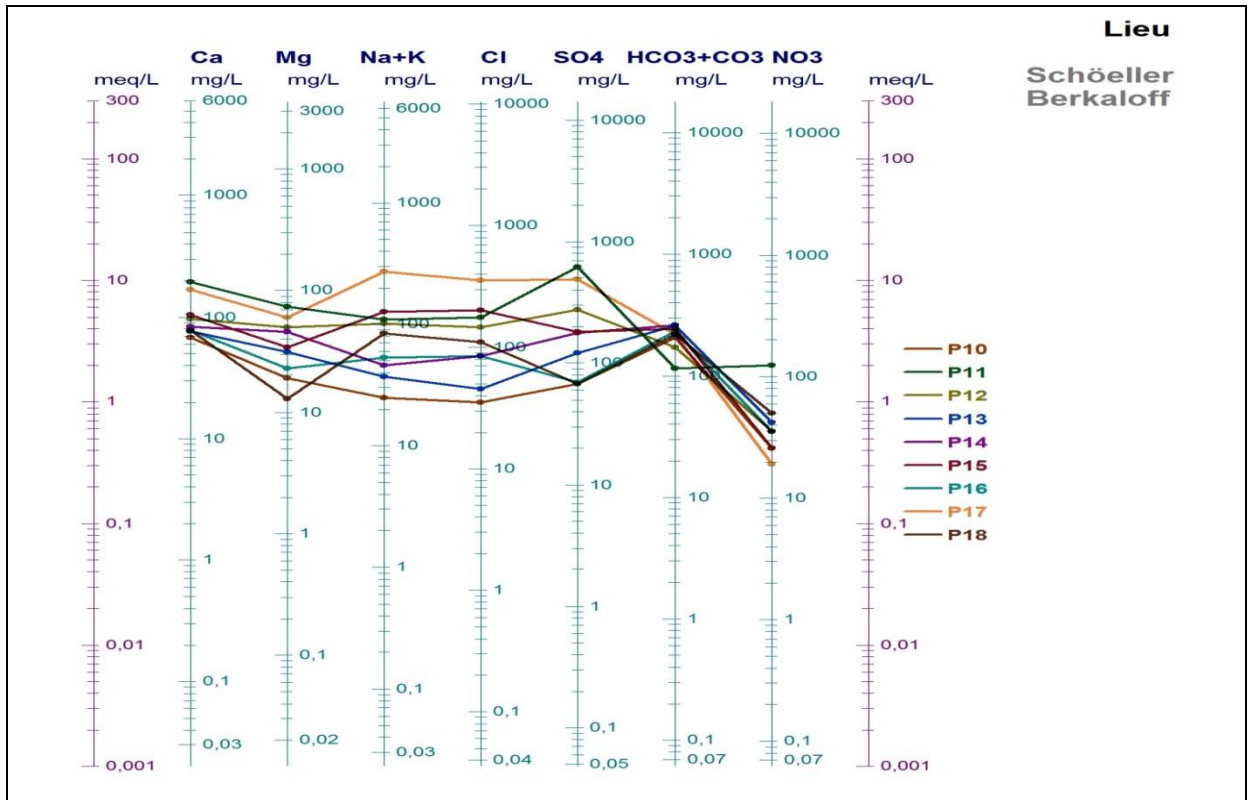


Figure 57 b : Classification de Schoeller- Berkaloff

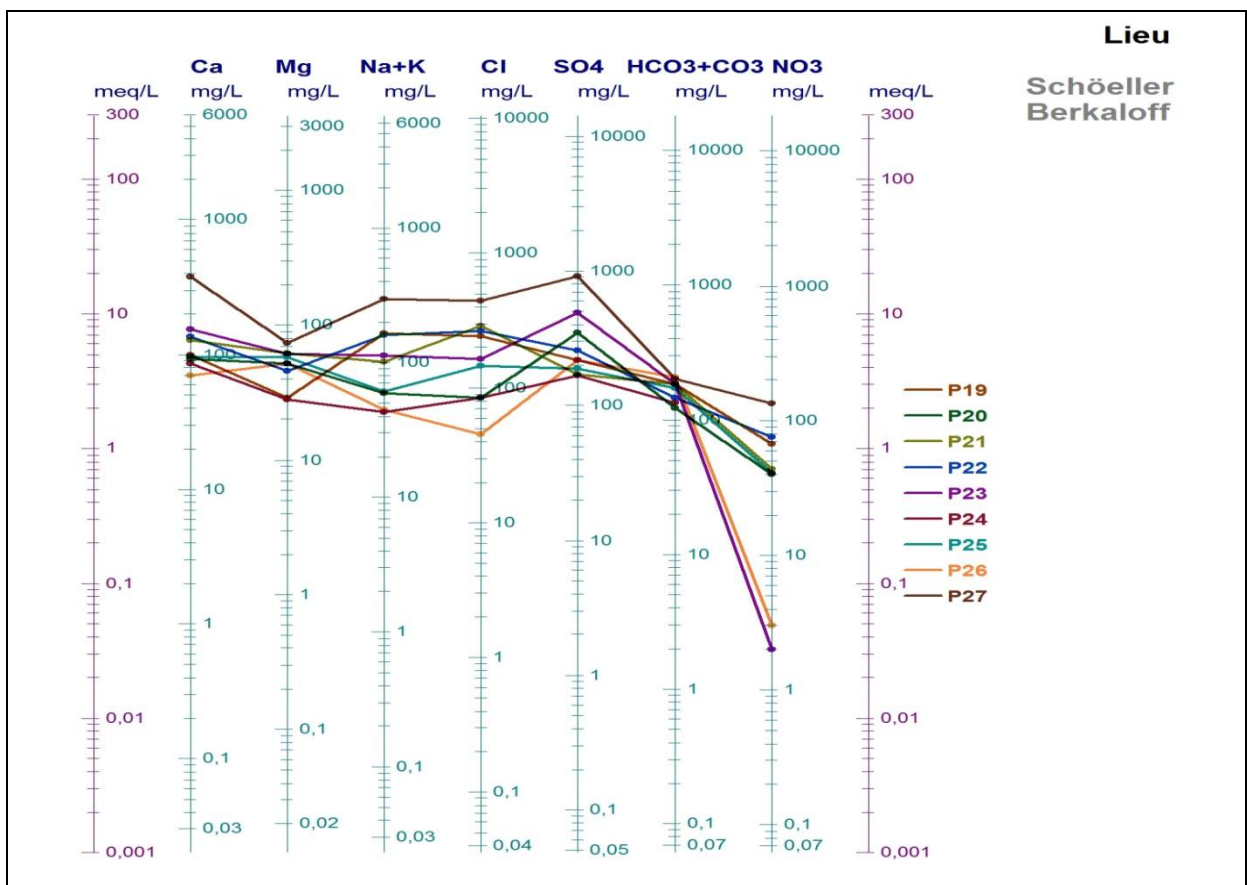


Figure 57 c : Classification de Schoeller- Berkaloff.

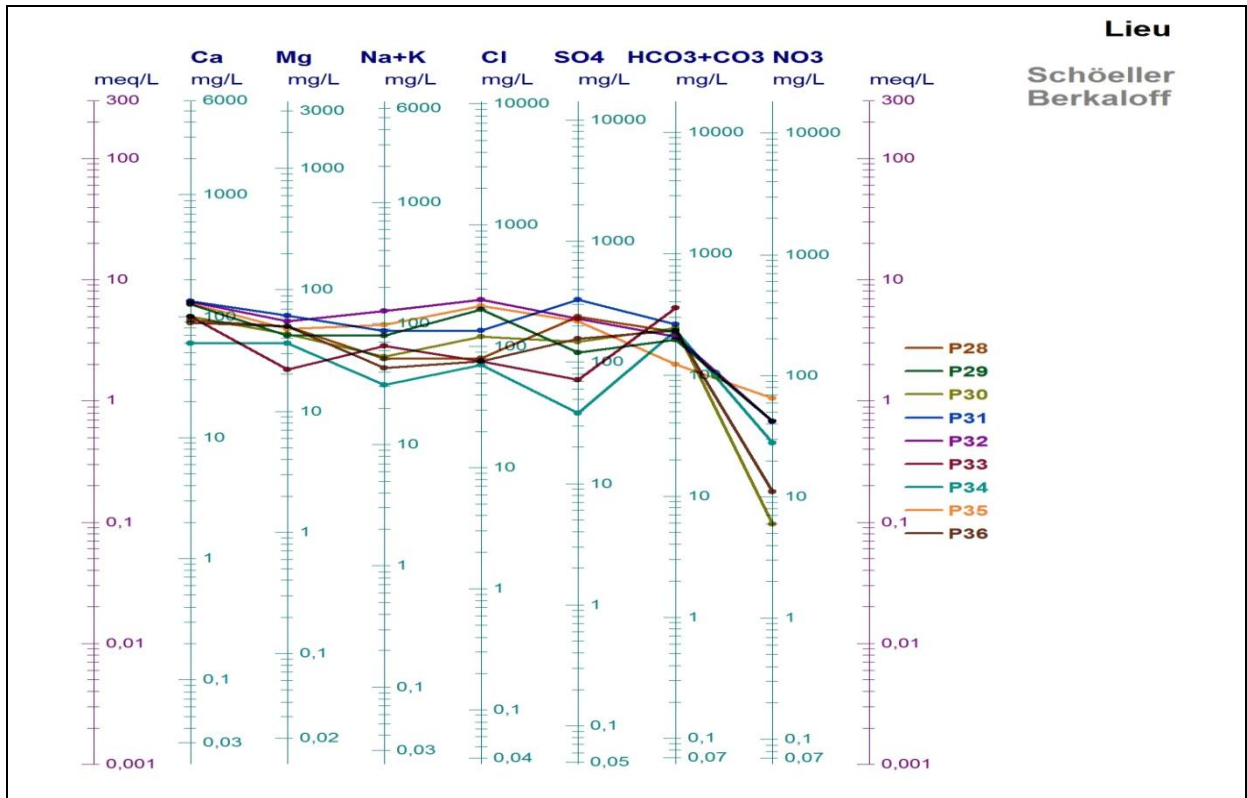


Figure 57 d : Classification de Schoeller- Berkaloff

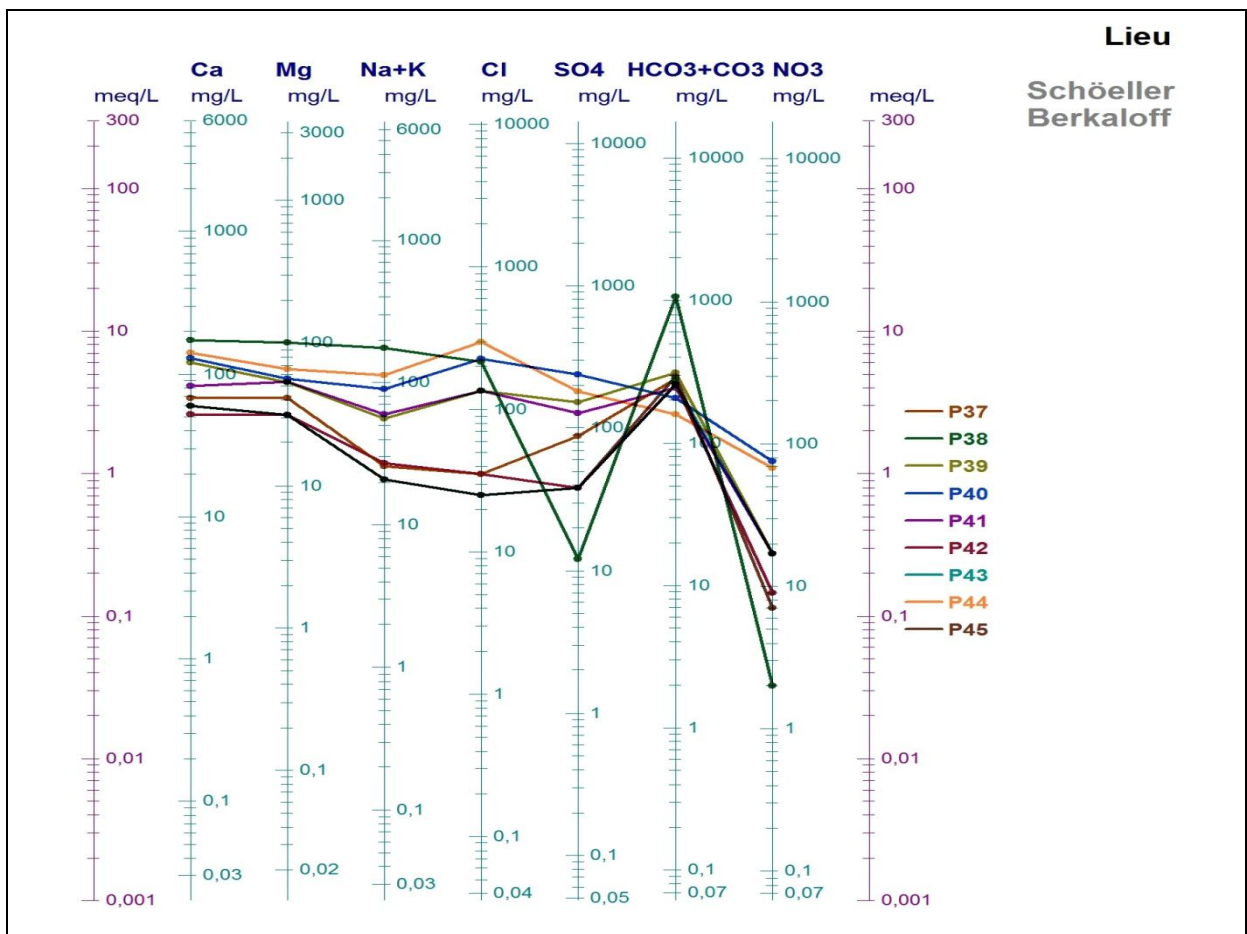


Figure 57 e : Classification de Schoeller- Berkaloff

## 6. Etude des processus hydrogéochimiques

### 6.1. Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure

Pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, nous avons représenté les éléments majeurs en fonction des chlorures (Fig.58). Ce dernier est un élément conservé, ne participe pas aux interactions eau-roche, caractérise l'origine de la salinité des eaux et constitue un traceur de mélange (Tellam, 1995 et Fidelibus et al., 1996). La disposition des différents points d'eaux analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée (eau de pluie-eau de mer) peut être de grande utilité pour identifier d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange.

La Figure montre la relation entre les chlorures et les éléments majeurs ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) des points d'eau prélevés dans les différentes zones de la région d'étude.

La relation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  (fig. A) montre que tous les points se trouvent en dessous de la droite de mélange. Etant donné que la teneur en  $\text{Na}^+$  devrait équilibrer la teneur en  $\text{Cl}^-$ , le déficit en  $\text{Na}^+$  est expliqué par les échanges cationiques entre la solution et le minéral se traduisant par une adsorption de  $\text{Na}^+$  et une libération de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .

Les diagrammes Ca -Cl (fig. B) et Mg-Cl (fig. C) montrent un enrichissement des eaux en alcalino-terreux. Ceci indique le phénomène d'échanges cationiques où l'argile adsorbe le sodium et libère le calcium et le magnésium dans la solution. L'apport en ion calcium serait attribué aussi à la dissolution du gypse

La relation entre  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Cl}^-$  (fig. D) montre que tous les points se trouvent au-dessus de la droite de mélange eau douce-eau salée. L'enrichissement des points en sulfates est lié à la présence des évaporites, dissolution du gypse et une contamination d'origine agricole. Dans cette région l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en sels et fertilisants se trouve facilitée par la bonne perméabilité du sol et une faible profondeur de la nappe.

La relation entre  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$  (fig. E) indique que la majorité des points se trouve au-dessus de la droite de mélange à l'exception de quelques points qui se rapprochent de cette droite montrant que l'origine la plus probable du  $\text{K}^+$  est la pollution agricole et la dissolution de la sylvite.

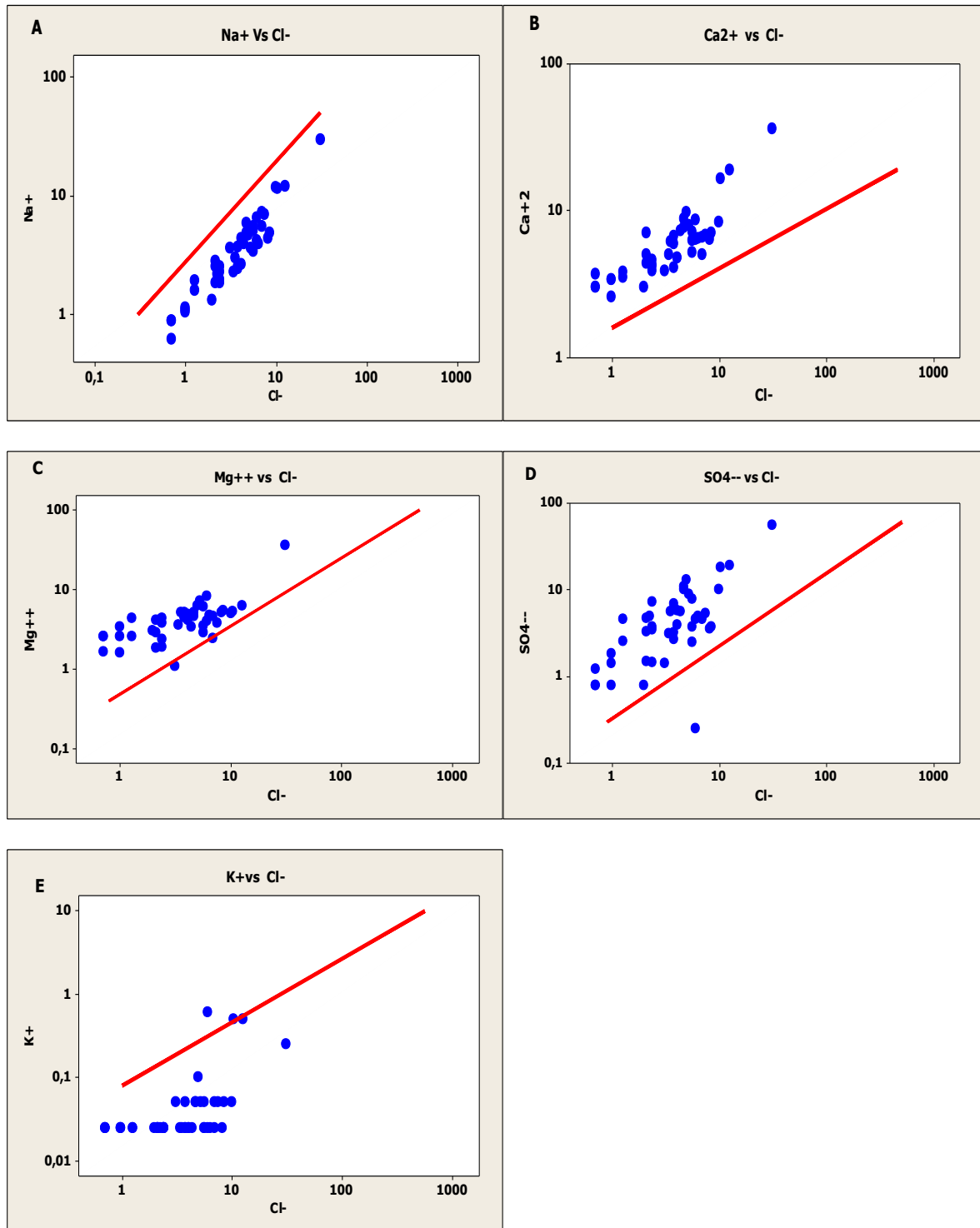


Figure 58 : Relation entre Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>--</sup> et le Cl<sup>-</sup> des eaux souterraines.

## 6.2. Les rapports caractéristiques

On appelle rapport caractéristique, le rapport de certains éléments chimiques exprimés en milliéquivalent. Les rapports étudiés sont :  $rMg^{++}/rCa^{++}$ ,  $rSO_4^{--}/rCl^-$ ,  $rNa^+/rCl^-$ ,  $rHCO_3^-/rCa^{++}$ ,  $rSr/rCa^{++}$  et  $rBr/rCl^-$ . L'étude des variations de ces rapports donne de précieuses indications sur l'alimentation et la circulation des eaux souterraines, elle permet aussi de voir l'évolution des eaux d'un stade à un autre pendant leur trajet souterrain.

### 6.2.1. Le rapport caractéristique $rNa^+$ et $Cl^-$

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite ( $NaCl$ ). L'évolution de  $Na^+$  est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites. D'après la carte du rapport  $rNa^+/rCl^-$  (Fig.59) nous observons que pour la majorité de la plaine on a une dominance des chlorures ceci est probablement due au lessivage des terrains salifères. Dans la partie Nord et Sud, il y a une dominance du sodium près du massif carbonaté.

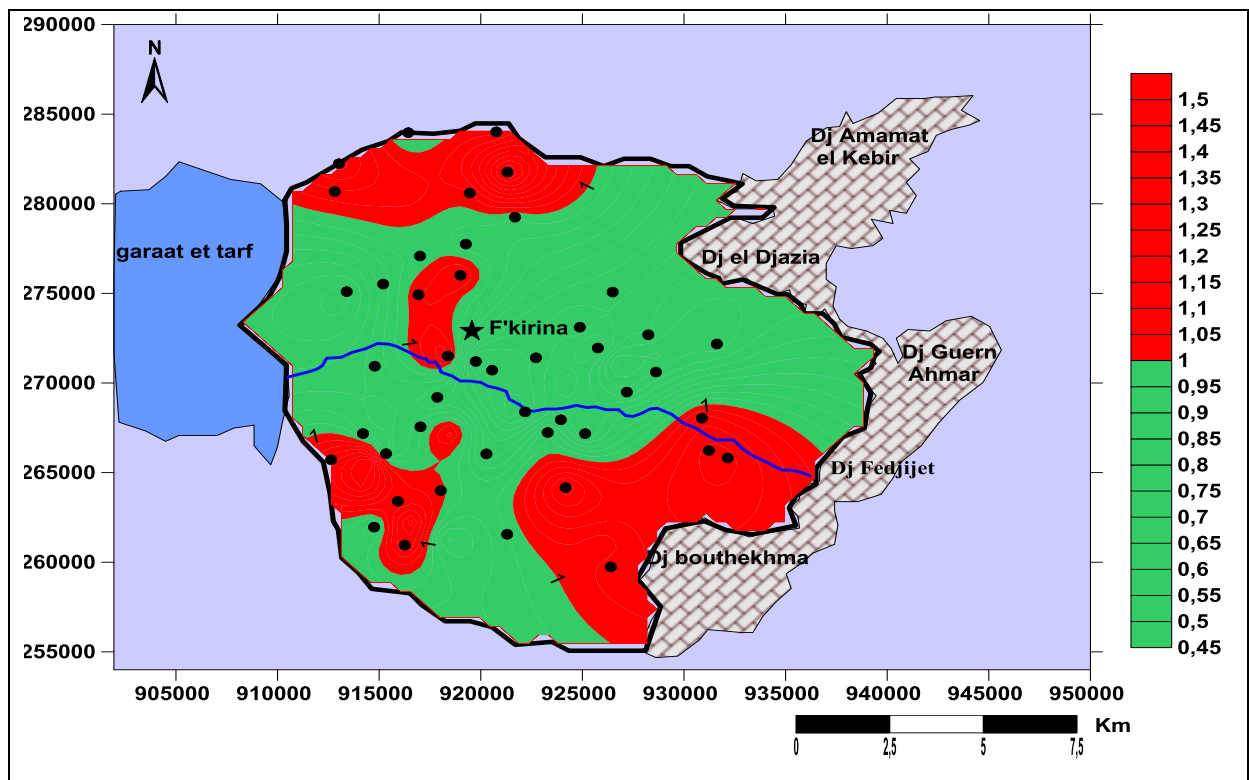
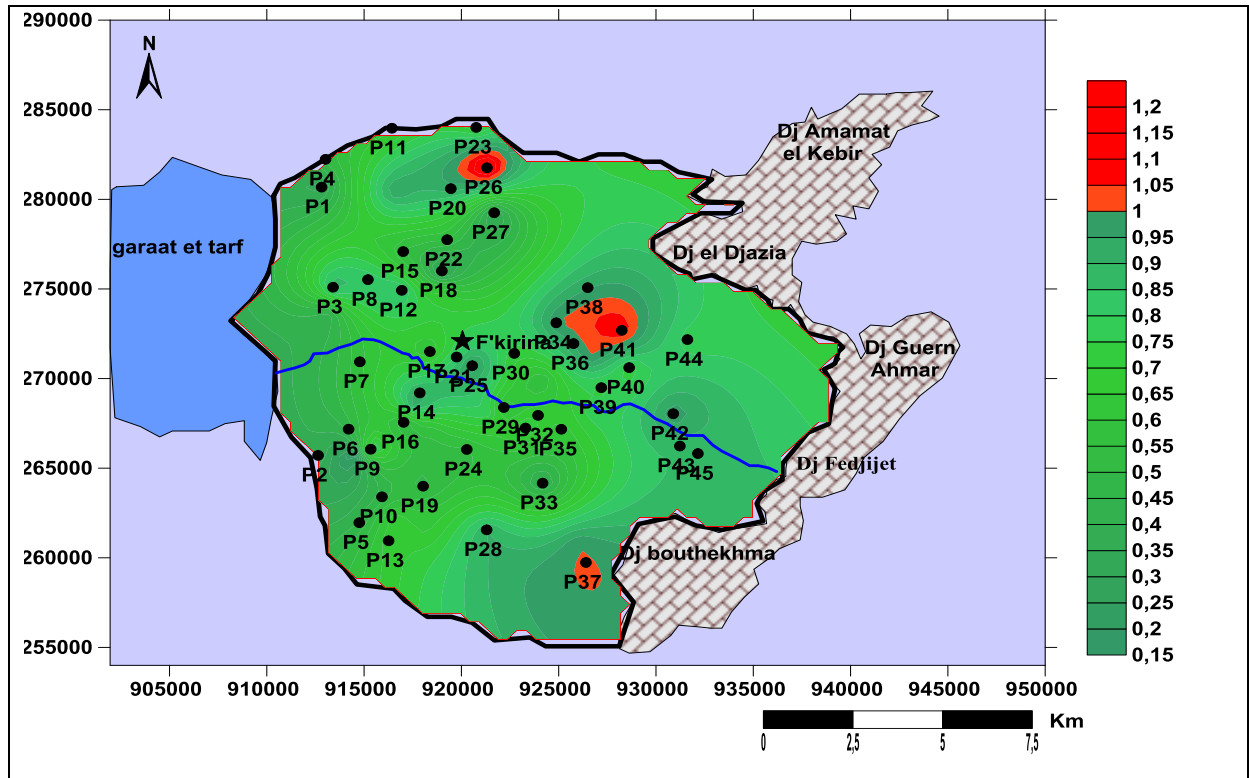


Figure 59 : Carte du rapport  $rNa^+/rCl^-$

**6.2.2. Le rapport caractéristique  $r Mg^{2+}/r Ca^{2+}$**

Le rapport  $r Mg^{2+}/r Ca^{2+}$  est inférieur à 1 pour l'ensemble des points situés dans la plaine (Fig.60) ce qui traduit un enrichissement en calcium par désorption du calcium. Les valeurs supérieures à 1 expliquent la dissolution rapide des dolomies par rapport aux calcaires et à la fixation du calcium par précipitation de la calcite.



**Figure 60 : Carte du Rapport  $rMg^{++}/rCa^{++}$**

**6.2.3. Le rapport caractéristique  $rSO_4^{-}/rCa^{++}$ ,**

Lorsque ce rapport est inférieur à 1, on aura donc la prédominance du calcium, ceci apparaît dans la majorité de la plaine (Fig.61).

Lorsque ce rapport est supérieur à 1, c'est-à-dire une prédominance des Sulfates, ce qui apparaît dans la partie Nord-Ouest de la plaine, près du Garaet Et Tarf ceci indique qu'il existe une contamination de la nappe par la sebkha dans la partie Nord.

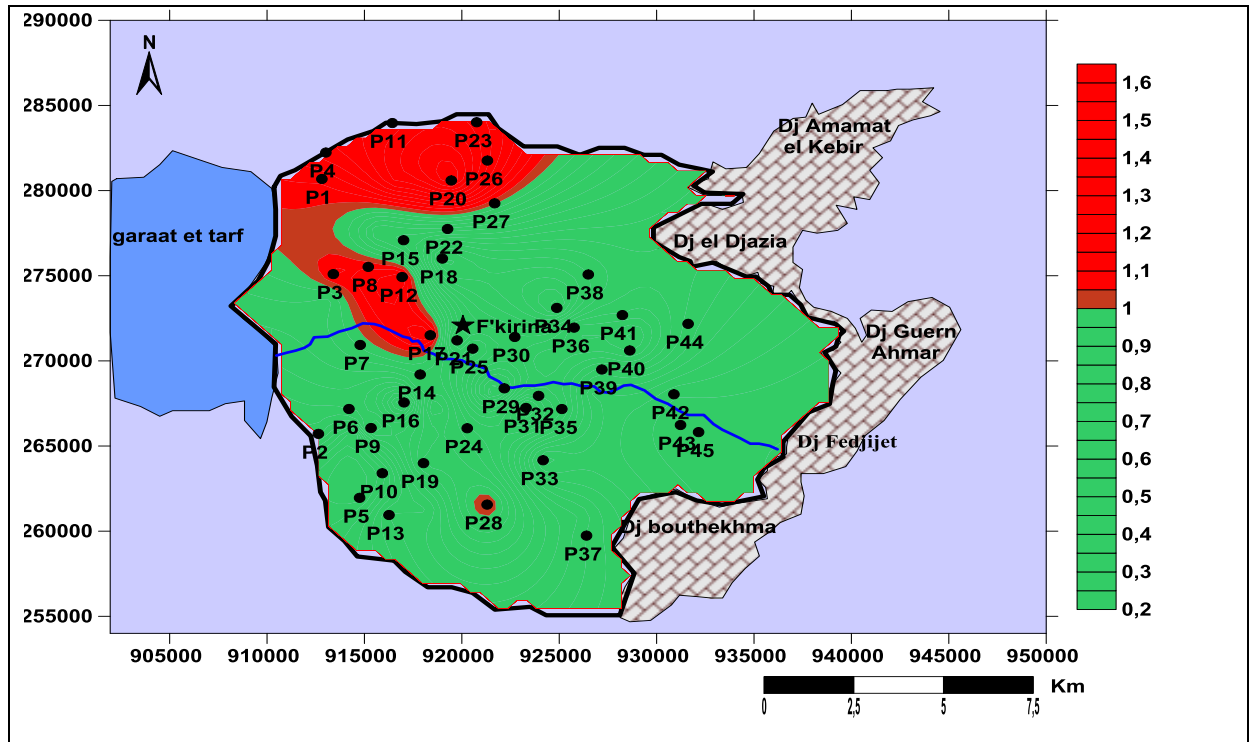


Figure 61 : Carte du rapport  $rSO_4^-/rCa^{++}$ .

#### 6.2.4. Le rapport caractéristique $rHCO_3^-/rCa^{++}$

L'examen de ce rapport (Fig.62) montre que les eaux ont une même origine près des affleurements calcaires par dissolution simultanée de la calcite et du gypse, dans le remplissage alluvionnaire, les eaux s'enrichissent davantage en calcium et s'appauvrissent en sulfate.

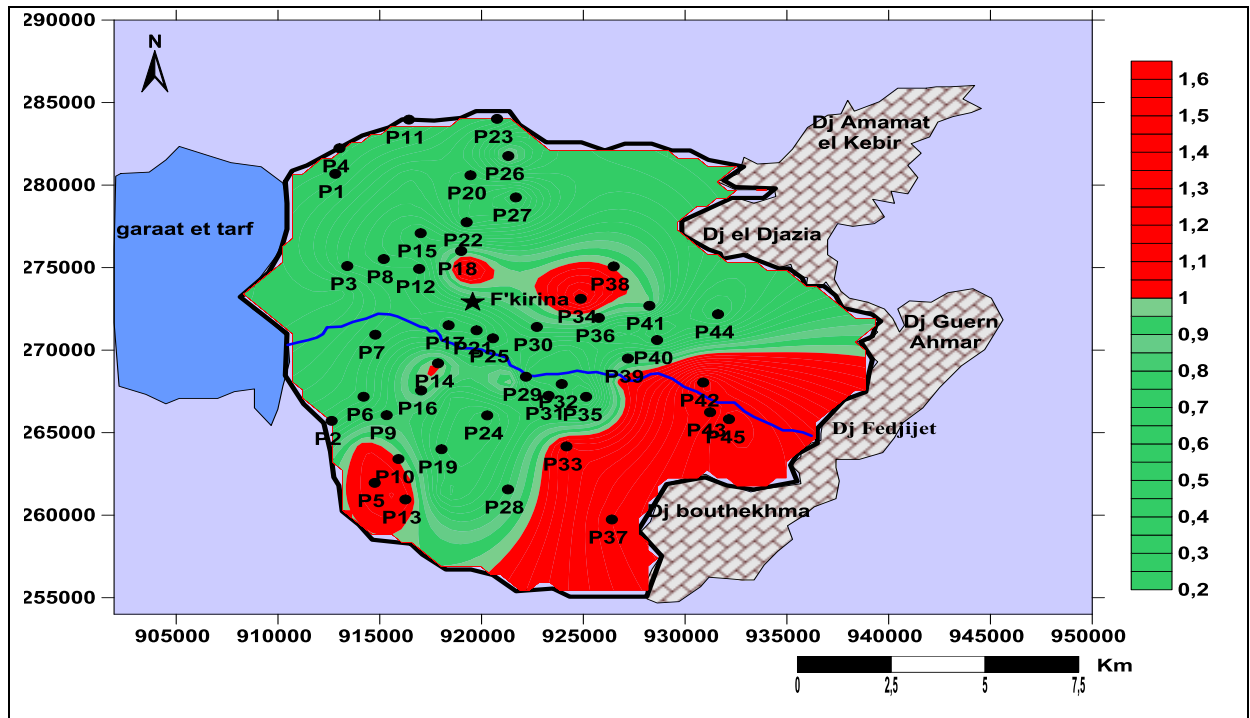


Figure 62 : Carte du rapport  $rHCO_3^-/rCa^{++}$ .

### 6.2.5. Le rapport caractéristique $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

Le strontium est le seul élément trace qui est couramment utilisé pour l'étude des eaux souterraines (Meybek, 1974 ; Starinski et al. 1983 ; Bakalowicz 1988 ; Hsissou 2002), L'analyse de la variation spatiale des concentrations en strontium permet de déterminer l'origine évaporitique des eaux souterraines. Dans la nature le strontium est présent surtout dans les roches volcaniques et évaporitiques (Bakalowicz 1994). Dans les évaporites, il s'y rencontre sous forme de célestite ( $\text{SrSO}_4$ ), minéral souvent associé au gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Il peut remplacer le calcium dans la structure cristalline des minéraux carbonatés, car ces deux éléments possèdent des rayons ioniques très voisins

Le rapport  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  permet de démontrer l'origine évaporitique des fortes teneurs en sulfates dans les eaux (Hsissou et al., 1999, Abdesselam et al., 2000). De même, d'après Meybeck (1984), les rapports des concentrations molaires  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  supérieurs à 1‰ sont caractéristiques des eaux gypsifères. De plus, comme chaque ensemble évaporitique possède sa propre valeur du rapport  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  les teneurs en  $\text{Sr}^{2+}$  et en  $\text{Ca}^{2+}$  des eaux, ayant dissous les formations d'une région, devraient permettre d'identifier les circulations souterraines et de distinguer leurs origines. Le calcul du rapport  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  a révélé que la majorité des points d'eau possède des valeurs supérieures à 1‰ (Fig.63) ; ce qui traduit l'influence des formations gypsifères sur la présence du strontium.

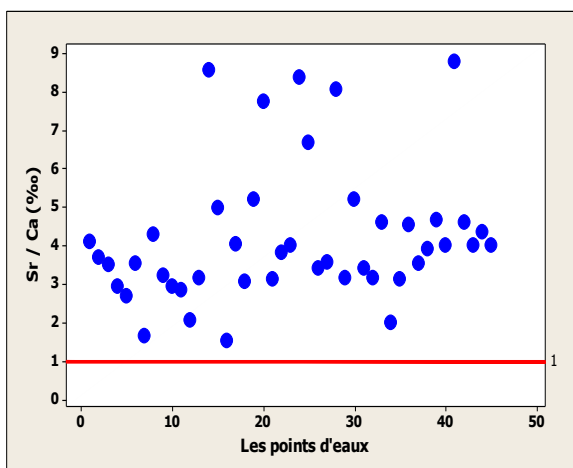


Figure 63 : Rapport molaire  $\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$  (‰).

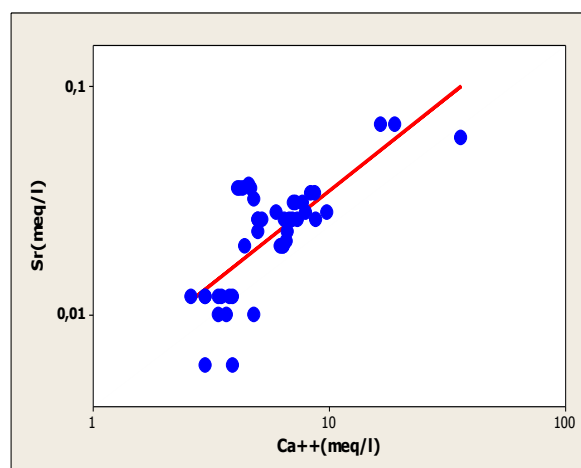
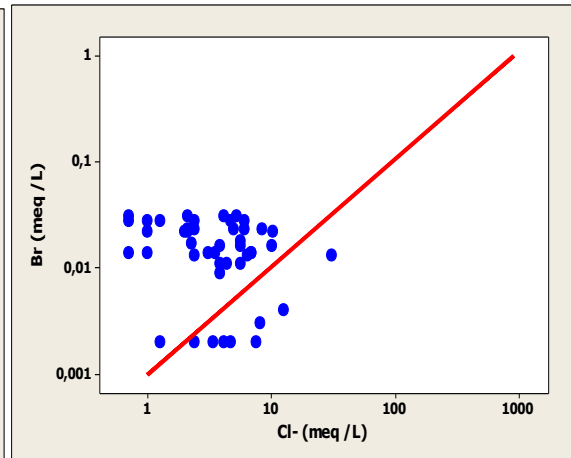
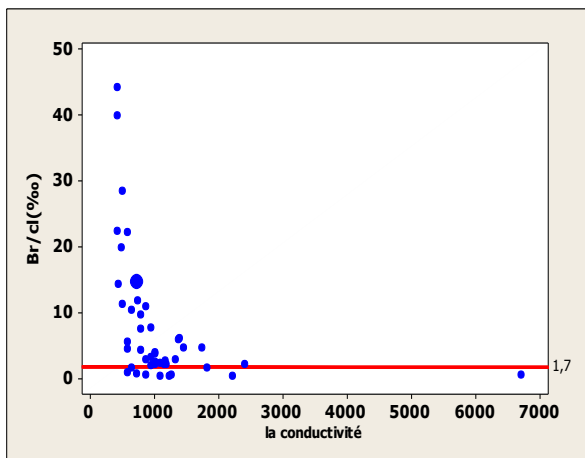


Figure 64 : Relation entre  $\text{Sr}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ .

**6.2.5. Le rapport caractéristique Br-/Cl**

Dans le but de comprendre l'origine de la salinité des eaux, due en grande partie aux chlorures, les chlorures et les bromures, qui sont des bons traceurs conservatifs d'un système aquifère, ont été étudiés. En effet, du fait qu'ils ne participent pas aux réactions d'oxydoréductions et qu'ils ne forment pas aussi des précipités insolubles (Fetter, 1994). C'est pourquoi, le rapport Br-/Cl- est généralement utilisé pour la détermination de l'origine de la salinité. En effet, il est le moyen le plus souvent pertinent pour expliquer la salinité des eaux des nappes (Fedrigoni et al., 2001, Samira et al., 2004 ; Usho et al., 2005). Cette étude permet grâce au rapport molaire Br-/Cl- de distinguer les zones sous influence évaporitique

L'interprétation du graphique de l'évolution du rapport Br-/Cl- en fonction de la conductivité électrique des eaux souterraines (Fig.65) a montré que, l'ensemble des points d'eau présente un rapport Br-/Cl- d'environ 1% inférieur à 5 ‰ et environ 95% supérieur à 1,7‰ (supérieurs à celui de la dissolution de l'halite). Ce qui permet d'exclure aussi l'hypothèse de la dissolution de l'halite qui existerait dans la matrice de l'aquifère comme des études similaires l'ont fait observer dans d'autres régions du monde (Hsissou et al., 1999). Cette forte salinité semble avoir son origine dans le phénomène évaporatoire.



**Figure 65 : Le rapport Br/Cl en fonction de CE      Figure 66 : Relation de Br- versus Cl**

**6.3. Indices de saturation**

L'état d'équilibre des minéraux par rapport à la solution, L'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux peut être déterminé par l'étude de leurs indices de saturation et d'équilibre.

L'état de saturation (I.S) est défini par le logarithme du rapport des produits d'activité ionique (PAI) sur le produit de solubilité (K) lors de l'échantillonnage :

Alors, l'indice de saturation exprimé est :

$$ISc = \log \frac{PAI}{KCaCO_3}$$

Si,

$IS = 0$ , l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite

$IS > 0$ , l'eau est sursaturée par rapport à la calcite

$IS < 0$ , il montre que l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite

De la même manière, les indices de saturation vis-à-vis du gypse, de l'anhydrite, de la calcite, de la dolomite, de l'aragonite sont calculés.

L'utilisation du logiciel diagramme nous a permis de calculer les indices de saturation (Fig. 67) de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite, du gypse, de l'anhydrite, et de l'halite.

Les résultats significatifs de tous les échantillons d'eau souterraine analysés montrent que ; ces derniers sont saturés à sursaturés par rapport à la calcite, la dolomite, et l'aragonite, mais ils sont plutôt sous-saturés en ce qui concerne l'halite, le gypse, et l'anhydrite ; seuls, les minéraux carbonatés tendent à précipiter. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de dissolution.

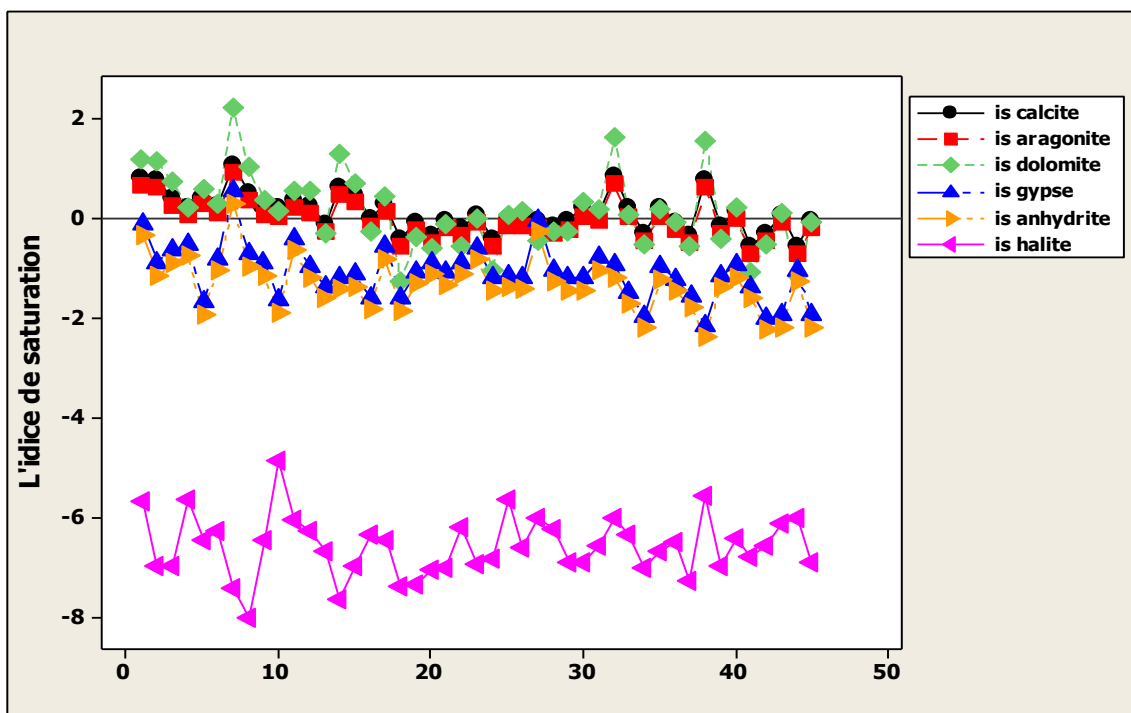


Figure 67 : Évolution des indices de saturation (IS).

**6.4. Indice chloro-alkalin (ex i.e.b : indice d'échange de bases) :**

Pour permettre de suivre le chimisme des eaux de l'aquifère de la zone d'étude et de définir le sens d'échange ionique entre l'eau et les terrains encaissants, l'indice d'échange de base (i.e.b) est utilisé. L'expression de cet indice est la suivante :

$$\text{I.C.A.} = \frac{r \text{ Cl}^- - r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r \text{ Cl}^-}$$

- Ce rapport est positif quand la teneur en sodium et en potassium est faible. En d'autres termes quand l'eau a été faiblement en contact avec des minéraux capables de céder facilement ces cations interchangeables. Ces échanges d'ions contenus dans la matrice avec ceux présents dans la solution sont très variables et dépendent, entre autres, de la nature du substrat.
- Ce rapport est négatif quand la teneur en sodium et en potassium est élevée, c'est-à-dire que l'eau a été fortement en contact avec des minéraux capables de céder facilement ces cations interchangeables.

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain.

De même, l'analyse du diagramme  $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  versus  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  (Fig.68) révèle qu'environ 65% des eaux ont subi le processus d'échange de bases, 43% des eaux présentent un déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  et en  $\text{Na}^+$  et 2 % des eaux présentent un excès en  $\text{Ca}^{2+}$  par rapport au  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ . L'excès de  $\text{Na}^+$  qui s'accompagne par le déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  témoigne de la responsabilité de l'échange de bases dans l'augmentation des teneurs en  $\text{Na}^+$  (Ghebouli et Elhocine, 2008)

En résumé, malgré la spécificité des conditions hydrogéologiques du secteur d'étude, l'indice d'échange de base (i.e.b) et l'analyse du diagramme  $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  versus  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  ont permis de comprendre que le contact des eaux avec les différentes formations traversées a favorisé l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}^+$  par le processus d'échange de base.

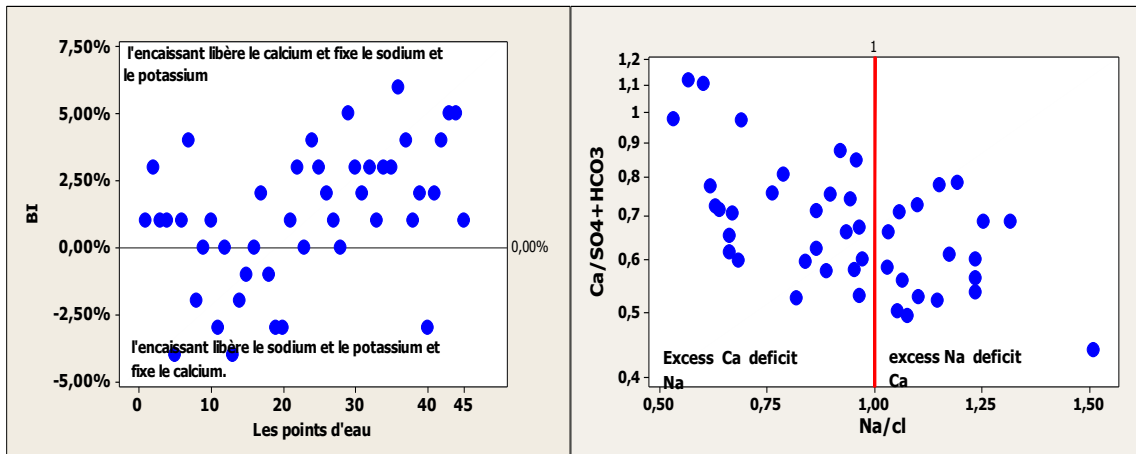


Figure 68 : Diagrammes d'indices d'échange de base.

#### 6.4. Diagramme de Gibbs

La région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, où l'évaporation peut également contribuer à la chimie de l'eau. Gibbs (1970) a suggéré une simple méthode de projection de TDS en fonction du rapport de  $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+)$  et en fonction de  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  qui pourrait fournir des informations sur l'importance relative des mécanismes naturels majeurs qui contrôlent la chimie des eaux souterraines. Ce diagramme est utilisé dans plusieurs littérateurs (Singh et al., 2011 ; Ahmed et al., 2013 ; Varol and Davraz, 2014 ; Chaudhuri et Ale, 2014 ; Bouzourra et al., 2015). Les deux diagrammes de Gibbs sont largement utilisés pour évaluer les sources fonctionnelles des constituants chimiques dissouts, tels que la dominance de la précipitation, de l'interaction eau-roche et de l'évaporation.

Les données de nos résultats sont projetées aussi dans les diagrammes de Gibbs (Fig.69) les points d'eau sont situés dans la zone de roche-dominance, mais aussi ont une tendance vers le processus d'évaporation. Donc la minéralisation de nos eaux est dominée par la dissolution des roches évaporitiques et aussi sont influencé par les eaux de Sebkhah qui sont exposées à une évaporation intensive.

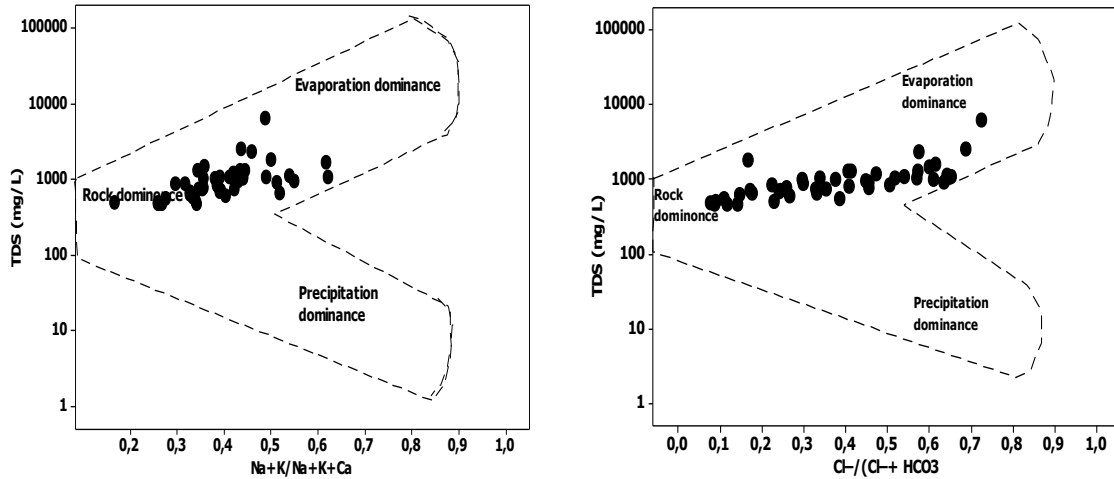


Figure 69 : Mécanismes gouvernant la chimie des eaux souterraines.

### 7. Aptitude des eaux à l'irrigation :

L'irrigation avec des eaux riches en sels peut entraîner la fixation du sodium par le complexe adsorbant du sol, donc un processus de salinisation, avec ses conséquences éventuelles pour les propriétés du sol : tendance à la dispersion des argiles, à la dégradation de la structure, à la perte de perméabilité et à l'asphyxie des plantes. L'intensité du processus de salinisation dépend des caractéristiques du sol, de la qualité des eaux utilisées, des conditions de leur emploi et en particulier de l'efficacité du système de drainage. Cependant ces pratiques d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité en Algérie (Gouaidia, 2012).

#### 7.1. Classification des eaux par la méthode de Richards

Cette classification a été proposée par Richards, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1954, elle a été très utilisée et l'est encore de nos jours. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de sodisation.

Le diagramme de Richards propose seize classes les plus caractéristiques sont quatre (Tab.13) L'abondance du sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et la destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium. Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque de salinité est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable : « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le S.A.R est plus élevé. Ce dernier est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau :

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

Avec

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

Ca : concentration de l'eau en ions calcium en méq/l

Mg : concentration de l'eau en ions magnésium en méq/l

Trois classes de risque alcalin ont été définies en relation avec le risque salin.

$SAR \leq 10$  Risque faible

$10 \leq SAR \leq 18$  Risque moyen

$SAR \geq 18$  Risque élève.

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1	Excellente	C1 – S2	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart du sol.
2	Bonne	C2 – S1 C2 – S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité.
3	Admissible	C3 – S1 C3 – S2 C2 – S3	En général, eau convenant l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4	Médiocre	C4 – S1 C4 – S2 C3 – S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3 – S4 C4 – S3 C4 – S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisé sous certaines conditions : sol très perméable, bon lessivage et plantes tolérantes très bien au sel.

**Tableau 13 : Classification de Richards (DAHAILI S, 2013).**

L'examen du diagramme du SAR (Fig. 70) permet de dire que le danger d'alcalinisation est faible mais le danger de salinité est élève. Dans le détail, on constate que les eaux ne conviennent pas à l'irrigation des cultures dans des conditions normales et peut être utilisée si les espèces ont une bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.

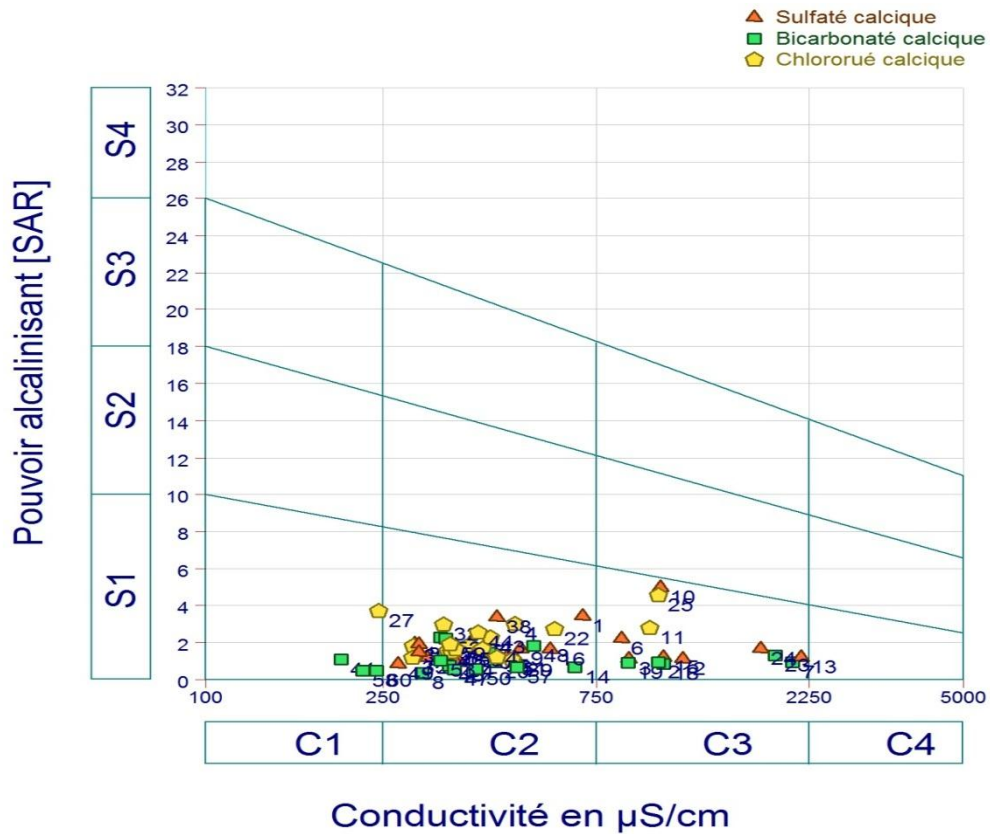


Figure 70 : Diagrammes de Richards

### 7.2. Classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau (Méthode de Wilcox)

Généralement il est connu que le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturés en sodium. En effet, dans un sol salé imprégné de NaCl, la perméabilité reste bonne tant que la solution saline percolant présente une charge élevée en électrolyte, charge qui maintient les argiles floculées. Si l'eau d'irrigation est chargée en sodium, le nombre d'ions Na combiné avec le sol, augmente, cependant une quantité équivalente en cations et essentiellement en Ca sera déplacée. On assiste alors à une dégradation de la structure, avec un gonflement des argiles ce qui entraîne une imperméabilisation du milieu. Le processus de dessalement et de drainage risque alors d'être complètement stoppé. Dans le cas où le calcium est le cation dominant, l'échange se fait dans le sens inverse, créant ainsi un sol plus floculé et plus perméable. L'apport de  $\text{CaSO}_4$  au sol peut par l'échange de base, améliorer la texture du sol ainsi que son drainage. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau, généralement connue en pourcentage du sodium, est définie par la relation :  $\text{Na}\% = \text{Na} / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K})$  Où tous les éléments sont exprimés en  $\text{még/l}$ .

Le diagramme de Wilcox montre que la quasi-totalité des points d'eau sont dans les normes : 14 points d'eau sont rangés dans la classe excellente, 25 points dans la classe bonne et uniquement 3 points dans la classe mauvaise

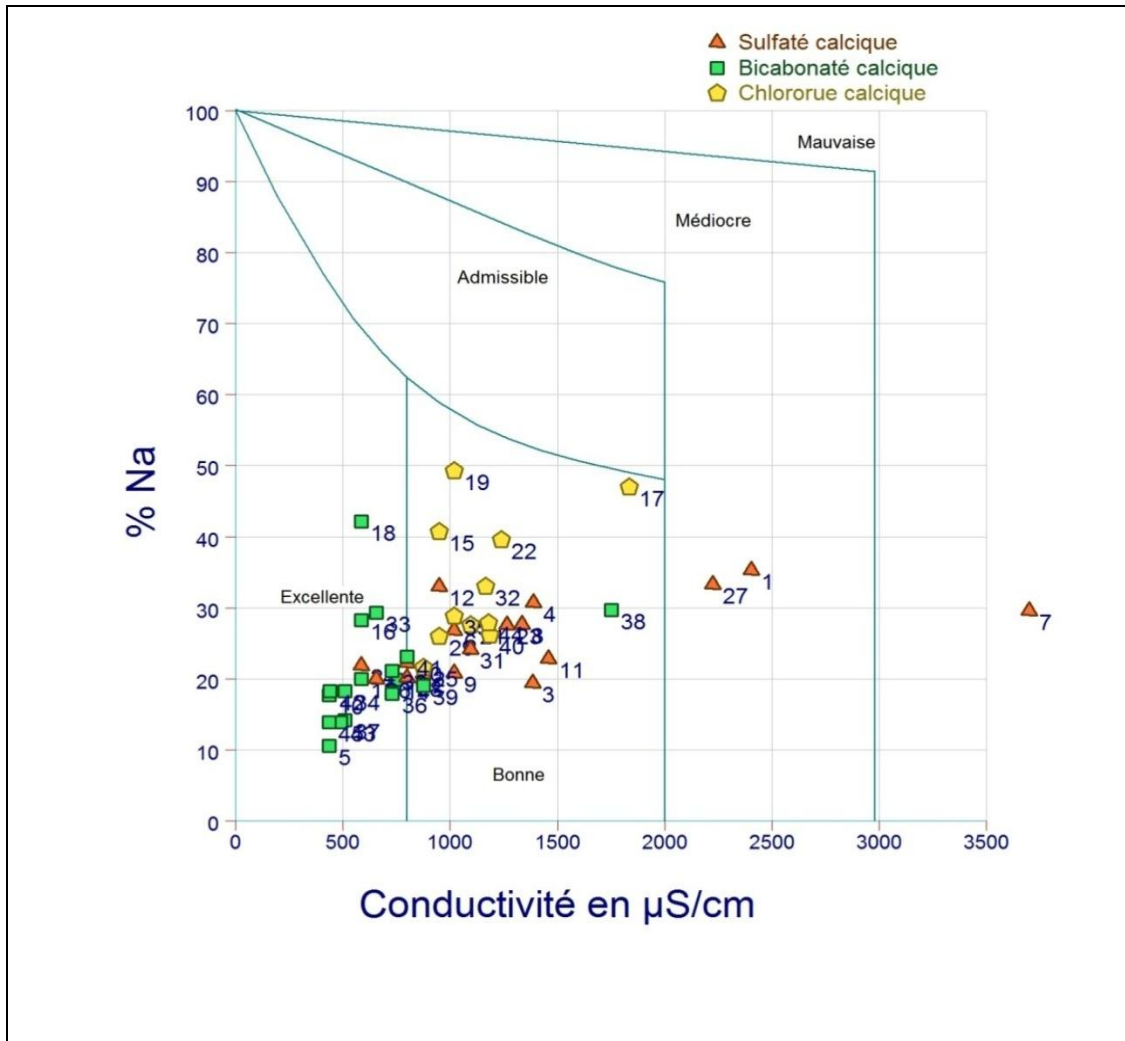


Figure 71 : Diagrammes de Wilcox.

### 8. Analyse statistique multi variables

Nous avons effectué une étude statistique par analyse en composante principale sur les échantillons prélevés. Nous avons pris en considération les éléments majeurs suivants :  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , ainsi que la dureté totale, la minéralisation, la conductivité et le pH.

Nous avons utilisé pour l'analyse en composante principale le logiciel MINITAB.

## 8.1. Etude statistique en composantes principales

### 8.1.1. Statistiques élémentaires

Dans le tableau 14 nous avons présenté le calcul des moyennes et des écarts-type de la série de différents éléments chimiques.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
HCO3--	116,000	1061,000	245,550	129,586
SO4--	12,000	2660,000	272,933	363,893
CL-	25,000	1100,000	169,250	160,497
NO3-	0,000	134,000	34,150	31,060
Minéralisation	372,000	5704,000	912,433	741,640
CA++	52,000	720,000	131,133	98,496
Mg++	8,000	427,000	53,933	52,212
Na+	14,000	680,000	96,317	97,239
K+	1,000	24,000	2,467	4,571
D.H.T.	5,000	71,600	11,053	8,965
PH	6,500	8,000	7,309	0,315
CE	201,000	2162,000	602,617	447,377

**Tableau 14 : Statistiques élémentaires des différents paramètres physico-chimiques mesurés.**

### 8.1.2. Matrice de corrélation

L'analyse du tableau 15 de la matrice de corrélation- donne les résultats suivants :

- Les sulfates sont bien corrélés avec les chlorures ( $r = 0,878$ ), la minéralisation ( $r = 0,959$ ), le calcium ( $r = 0,953$ ), le magnésium ( $r = 0,905$ ), le sodium ( $r = 0,919$ ) et la dureté totale ( $r = 0,962$ ).
- Les Chlorures est bien corrélé avec la minéralisation ( $r = 0,950$ ), le calcium ( $r = 0,923$ ), et également avec le magnésium ( $r = 0,854$ ), le sodium ( $r = 0,963$ ) et la dureté totale ( $r = 0,922$ ).
- Le calcium est bien corrélé avec le magnésium ( $r = 0,867$ ), le sodium ( $r = 0,942$ ).
- La minéralisation est bien corrélé avec le calcium ( $r = 0,978$ ) le magnésium ( $r = 0,932$ ) le sodium ( $r = 0,970$ ) et la dureté totale ( $r = 0,990$ )

Nous figurons les valeurs des coefficients de corrélation entre les teneurs des différents éléments majeurs :

Variables	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CE	CA <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	D.H.T.	PH
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1										
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,034	1									
Cl <sup>-</sup>	0,124	0,878	1								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,239	0,340	0,380	1							
CE	0,235	0,959	0,950	0,346	1						
CA <sup>++</sup>	0,202	0,951	0,923	0,404	0,978	1					
Mg <sup>++</sup>	0,267	0,905	0,854	0,166	0,932	0,867	1				
Na <sup>+</sup>	0,177	0,919	0,963	0,371	0,970	0,942	0,852	1			
K <sup>+</sup>	0,558	0,412	0,442	0,294	0,528	0,568	0,358	0,516	1		
D.H.T.	0,240	0,962	0,922	0,303	0,990	0,970	0,962	0,931	0,486	1	
PH	-0,157	0,167	0,050	0,145	0,097	0,099	0,063	0,103	0,046	0,085	1

**Tableau 15 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.**

## 8.2. Analyse en Composant Principale (ACP)

L'analyse en Composante Principale (ACP) exprime un ensemble de variables en un ensemble de combinaisons linéaires de facteurs non corrélés entre eux, ces facteurs rendant compte d'une fraction de plus en plus faible de la variabilité des données. Cette méthode permet de représenter les données originelles (individus et variables) dans un espace de dimension inférieure à l'espace originel, tout en limitant au maximum la perte d'information. La représentation des données dans des espaces de faibles dimensions (ici 2 dimensions) en facilite considérablement l'analyse.

### 8.2.1. Application de l'ACP

#### 8.2.1.1. Diagonalisation (étude des valeurs propres)

La diagonalisation nous a permis de distinguer les axes suivants :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	8,056	1,575	1,109	0,976	0,730	0,281	0,165
Variabilité (%)	61,969	9,718	7,928	6,506	5,616	2,160	1,271
% cumulé	61,969	71,088	80,616	90,122	95,739	97,899	99,169

**Tableau 16 : Valeurs propres des axes et leurs contributions**

Le calcul a été arrêté à trois axes, à savoir les axes F1, F2 et F3. Ainsi, le facteur **F1** exprime **61,9 %** de la variance, le facteur **F2 : 9,11 %**, et le facteur **F3 :7,52 %**. Ces trois facteurs expriment donc **80 %** de la variance totale. Donc nous sélectionnons les 3 premières valeurs propres, qui expliquent ensemble plus de **80 %** de l'inertie totale du nuage de points.

La figure présente une courbe décroissante du pourcentage de l'ensemble des facteurs, c'est une représentation graphique qui permet aussi de déceler le nombre de facteurs nécessaires pour mieux visualiser les résultats :

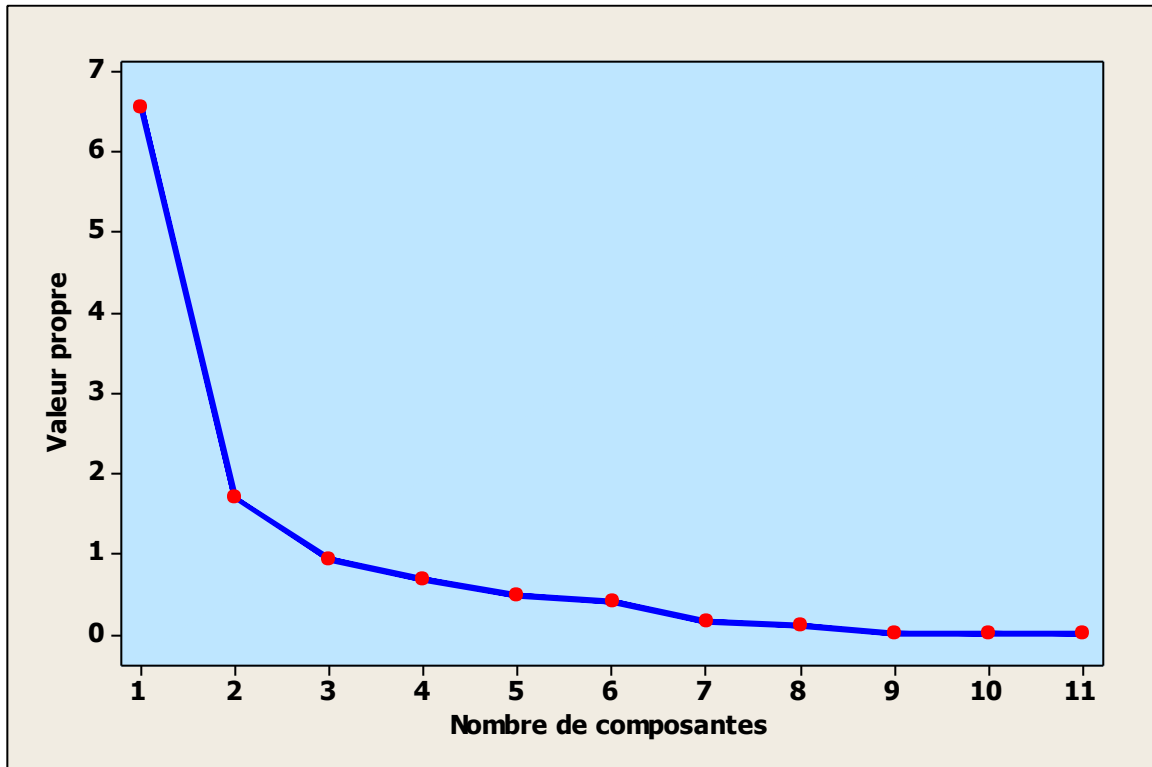


Figure 72 : Valeurs propres de la matrice de corrélation

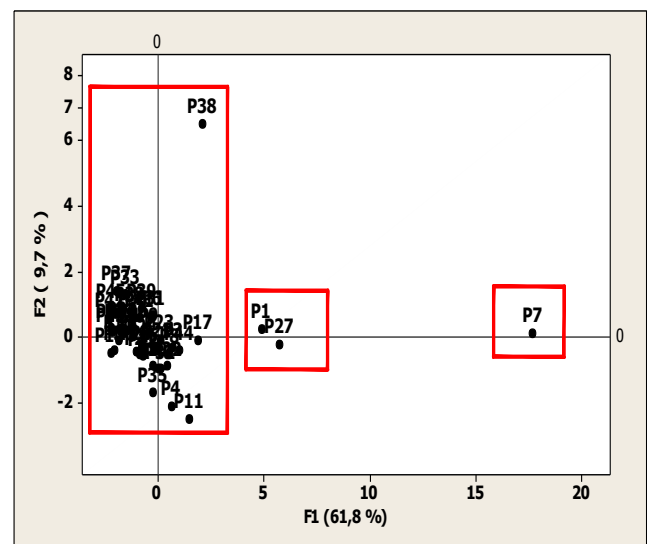
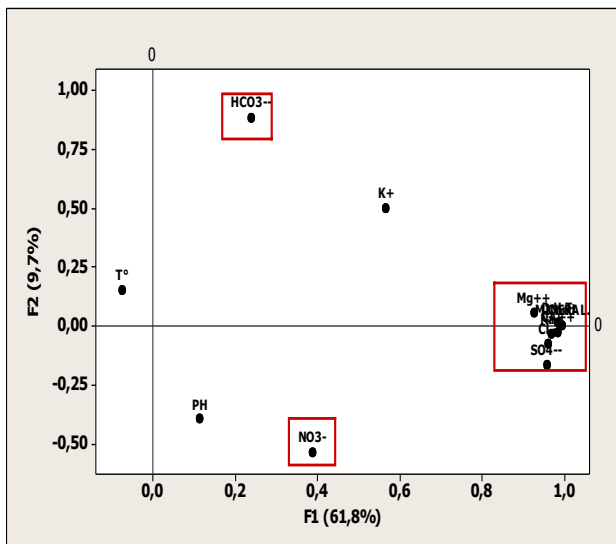
Le tableau permet de voir la corrélation entre les facteurs et les variables :

	F1	F2	F3
HCO3--	0,238	<b>0,804</b>	-0,443
SO4--	<b>0,955</b>	-0,159	0,089
Cl-	<b>0,949</b>	-0,059	0,118
NO3-	0,381	<b>-0,446</b>	0,069
M	0,998	0,006	0,020
CA <sup>++</sup>	0,982	-0,020	0,008
Mg <sup>++</sup>	0,922	0,052	0,042
Na+	0,969	-0,024	0,072
K+	0,560	<b>0,441</b>	-0,356
D.H.T.	<b>0,987</b>	0,014	0,026
Cond	<b>0,995</b>	0,001	0,012
PH	0,108	<b>-0,590</b>	<b>-0,467</b>
T°	-0,056	0,395	<b>0,730</b>

Tableau 17 : Corrélation entre les variables et les axes.

L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels (Fig. 73,74) est la suivante

- Le facteur F1 exprime 61,8% de la variance totale, montre une corrélation positive avec les éléments ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ). C'est un axe de minéralisation. La projection des individus montre que ce groupe est bien présenté par les points (P7).
- Le facteur 2 représente 9,7 % de la variance, il représente l'opposition de deux pôles. Eaux douces aux eaux polluées. Le premier est formé par les bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$ . Traduisant des eaux douces qui s'opposent aux eaux polluées menées par les ions nitrates.
- Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel puisque leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation sauf : ( $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{T}^\circ$ ).
- Le premier axe factoriel semble opposé aux :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , C.E, Mg,  $\text{Cl}^-$ , et d'un degré moindre aux  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ . C'est le pôle des minéralisations, il est en bonne partie issus de l'interaction eau-roche.
- Le second axe factoriel semble opposé au :  $\text{T}^\circ$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et corrélé positivement au pH et  $\text{NO}_3^-$ .
- La température est dissociée aux autres paramètres



**Figure 73 : Variables (axes F1 et F2 : 71.5 %)**      **Figure 74 : Individus (axes F1 et F2 : 71.5 %)**

L'examen de cet espace factoriel (Fig.74) montre des groupements d'individus formant ainsi différentes familles d'eaux, où nous remarquons que presque tous les points d'eau sont regroupés excepté un point qui s'écarte clairement. Aussi, il semble se dégager 3 groupes :

**Groupe 1** : regroupe les puits qui se caractérisent par une faible minéralisation.

**Groupe 2** : regroupe les points d'eau qui se caractérisent par des eaux moyennement minéralisées.

**Groupe 3** : P7 c'est le groupe d'eau se caractérisant par une minéralisation très élevée.

L'axe F3 représente 7,9% de la variance expliquée (Fig.75). Il est déterminé dans sa partie positive par la température et dans sa partie négative par le pH. Il s'agit d'une opposition entre les eaux profondes et circulation lentes aux eaux superficielles aérées

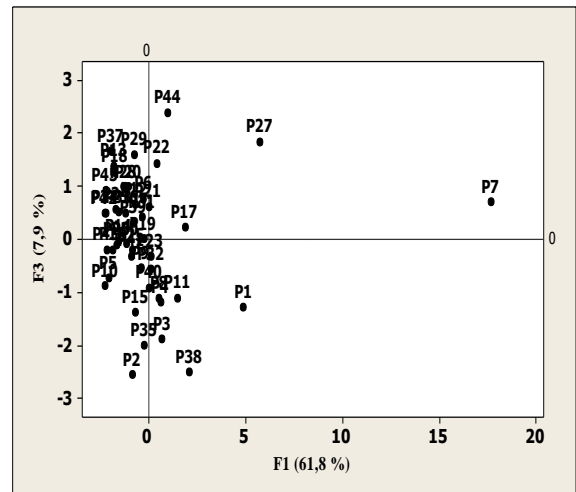
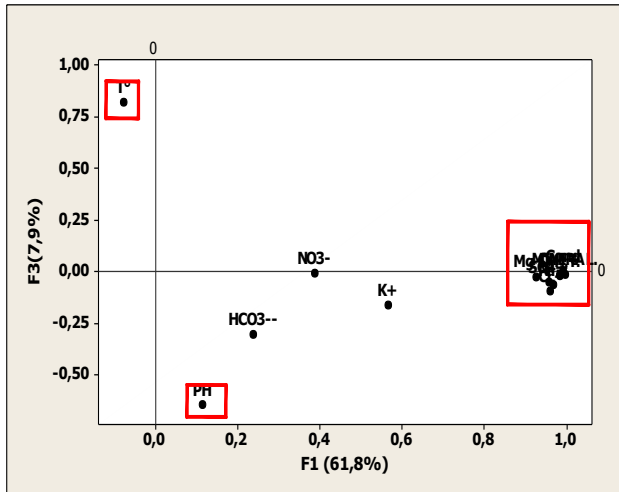


Figure 75 : Variables (axes F1 et F3 : 69,7%)

Figure 76 : Individus (axes F1 et F3 : 69,7).

**9. Classification Ascendante Hiérarchisée**

Au vu de ces différentes analyses, la classification ascendante hiérarchisée des données physico-chimiques a été réalisée à partir de 10 paramètres présentant une meilleure corrélation entre eux. La classification ascendante hiérarchisée réalisée montre trois grandes familles représentant sept sous familles. On distingue :

- La famille (F1) est composée d'une seule famille F1. Cette famille d'eau regroupe les eaux très minéralisées dans les zones où le gradient hydraulique est relativement faible (Fig.77) mettant ainsi en relief un processus de minéralisation.
- La famille (F2) est constituée de trois sous familles. Cette famille d'eau représente les eaux moins minéralisées en transition vers la dépression.
- La famille F3 rassemble deux sous familles et représente des eaux moyennement minéralisées.

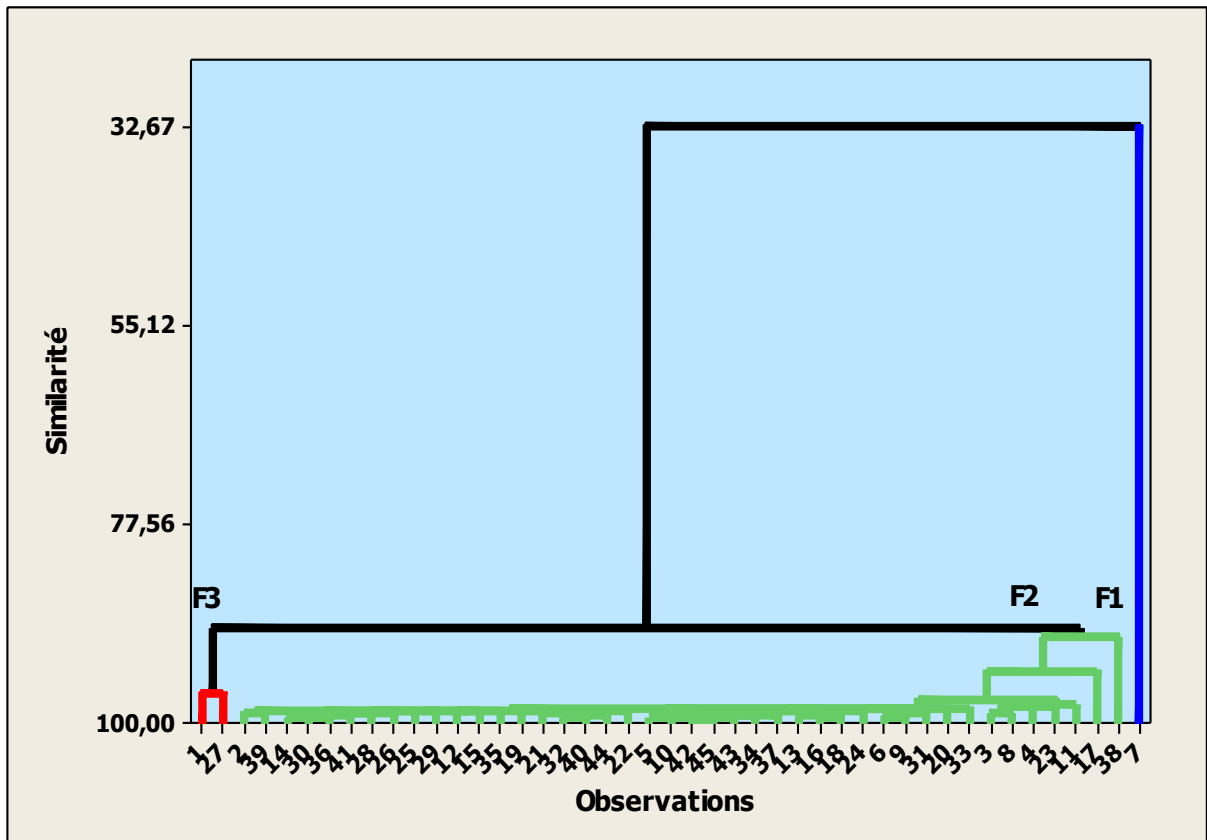


Figure 77 : Classification ascendante hiérarchisée des eaux.

**10. Conclusion :**

L'étude hydrochimique des eaux de la plaine de F'kirina, nous a permis de mettre en évidence plusieurs constatations :

D'après les résultats des analyses chimiques et leurs classifications, nous remarquons que les eaux de la plaine ont une minéralisation élevée. Cette minéralisation est due essentiellement à :  
L'influence du Garaet Et Tarf sur les eaux souterraines.

Le lessivage des formations géologiques (argiles, roche carbonatée et les évaporites).  
Les faibles valeurs de la minéralisation se localisent près des massifs calcaires, et les fortes valeurs sont observées dans la partie Nord Est et surtout près du Garaet.

Selon les diagrammes de piper et Schoeller Berkloff nous avons permis de classer les eaux en trois familles : bicarbonatée, sulfatée, et chlorurée calcique.

D'une manière générale, la qualité des eaux de la nappe du plioquaternaire est moyennement potable malgré les fortes concentrations en bicarbonates ou en chlorures et en sulfates

L'étude statistique, par analyse en composante principale (ACP) et Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a confirmé et bien précisé les affinités entre les différents ions renseignant sur l'origine ainsi que les regroupements spatiaux des échantillons étudiés. La méthode par a débouché quant à elle à une classification par niveau de minéralisation.

## ***CHAPITRE VI***

### *Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution*

## **1.Introduction**

La prise de conscience de la nécessité de protection de la ressource en eau est présente depuis très longtemps dans nos sociétés en raison d'une part de leur rareté et d'autre part de leur confrontation aux multiples sources de pollution. Mais depuis quelques décennies, l'exigence de planification du territoire selon des modalités tolérables pour l'environnement souterrain a contribué au développement de la notion d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, on peut le remarquer par le développement de nombreuses méthodes d'estimation de la vulnérabilité. La nécessité de classer les sources de contamination, et de définir les conditions de protection des eaux souterraines se sont fait sentir dans les années 1960 quand Vladirnirskij suggéra le développement d'une méthode, précurseur des cartes de vulnérabilité, permettant la construction de cartes de potentiel de contamination des eaux souterraines.

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe étudiée par approche cartographique.

## **2. Notions générales et méthodologie**

Le terme vulnérabilité date des années 1960 et a été choisi afin de sensibiliser la population au fait que même si la notion d'eau souterraine est associée à une image de pureté, cette ressource n'en reste pas moins sensible aux agents extérieurs et susceptible d'être polluée. Selon la nature et la structure des sols et aquifères le concept de vulnérabilité pourra prendre des formes et des degrés variés de manière à mettre en évidence les capacités de résistances naturelles diverses des milieux (Margat, 1991). D'après Albinet et Margat (1970), les cartes de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine servent à montrer quelles sont les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les aquifères en tenant compte de la nature des 6 terrains rencontrés en surface et les conditions hydrogéologiques. Cependant, il n'existe aucune définition officielle de la vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994) de même qu'il n'existe aucune technique standard d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines, ce qui rend difficile la comparaison des diverses évaluations. En effet, la notion de vulnérabilité des eaux souterraines n'est pas une propriété absolue mais un indicateur complexe (Maxe et Johnson, 1998) et le manque d'unicité dans la définition ou plutôt le manque d'acceptation d'une définition du terme « vulnérabilité des eaux souterraines », contribue à la complexité de cette notion.

Le concept de vulnérabilité peut se définir à 3 niveaux :

- aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé.

- intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination.
- prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant ce qui fait appel aux concepts de normes et de seuils de toxicité. (Lafrance *et al.* 1989).

**3. Types de vulnérabilité**

On peut distinguer deux types de vulnérabilité :

- 1) La vulnérabilité intrinsèque, qui fait intervenir les conditions physiques naturelles du milieu. Selon les auteurs on parlera de vulnérabilité intrinsèque (Vrba et Zaporozec, 1994), de sensibilité (EPA, 1993) ou encore de susceptibilité à la contamination.
- 2) La vulnérabilité spécifique, qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels, mais également les propriétés relatives au contaminant (nature, mise en place), aux activités humaines ou mêmes aux populations à risque.

**4. Les critères de vulnérabilité couramment pris en compte.**

VULNERABILITE INTRINSEQUE		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée
Topographie ( <i>pente</i> )	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe ( <i>libre ou captive</i> )
Pédologie ( <i>perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols</i> )	Temps de transfert ( <i>perméabilité verticale</i> )	Temps de résidence ( <i>dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères</i> )
Bilan hydrique ( <i>ruissellement et infiltration efficace</i> )		Relation eaux souterraines/eaux superficielles
	Structure de la ZNS ( <i>variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile</i> )	Piézométrie ( <i>sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique</i> )
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Epaisseur de l'aquifère ( <i>quantité de réserve</i> )
		La recharge ( <i>recharge annuelle nette</i> ).
		Type de système hydrogéologique ( <i>caractères plus ou moins capacitif et transmissif</i> )
Battement de nappe		
Fracturation ( <i>directions et densité</i> )		

**Tableau 18 : Les critères de vulnérabilité.**

### **5. Méthodes de vulnérabilité**

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, chaque auteur élaborant sa méthode selon ses besoins. La multiplicité des méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés (la réglementation, les activités humaines, les polluants etc.), que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode pour une utilisation spécifique à leur pays, province ou état.

Les méthodes peuvent être réparties en trois groupes :

- 1 - Les méthodes de cartographie des complexes hydrogéologiques (HCS)
- 2 - Les méthodes à cotation numérique (MS, RS, PCSM)
- 3- les méthodes analytiques qui se réfèrent aux équations mathématiques de base.

D'après Vrba et Zaporozec (1994), in Murat et al. (2000), d'un point de vue qualitatif, il est possible d'indiquer la corrélation entre trois facteurs par rapport au type de méthode (la densité de points, la quantité d'information sécuritaire pour les points, le dénominateur d'échelle). Ainsi les modèles analytiques complexes s'utilisent à petite échelle et nécessitent une densité de points importante. Pour une densité de points moyenne, une méthode à cotation numérique sera préférablement utilisée. Enfin, dans les zones où la quantité d'information est moindre, c'est une méthode cartographique à grande échelle qui sera recommandée. Il est difficile de sélectionner une méthode d'évaluation de la vulnérabilité. Diverses raisons peuvent motiver le choix d'une méthode par rapport à une autre.

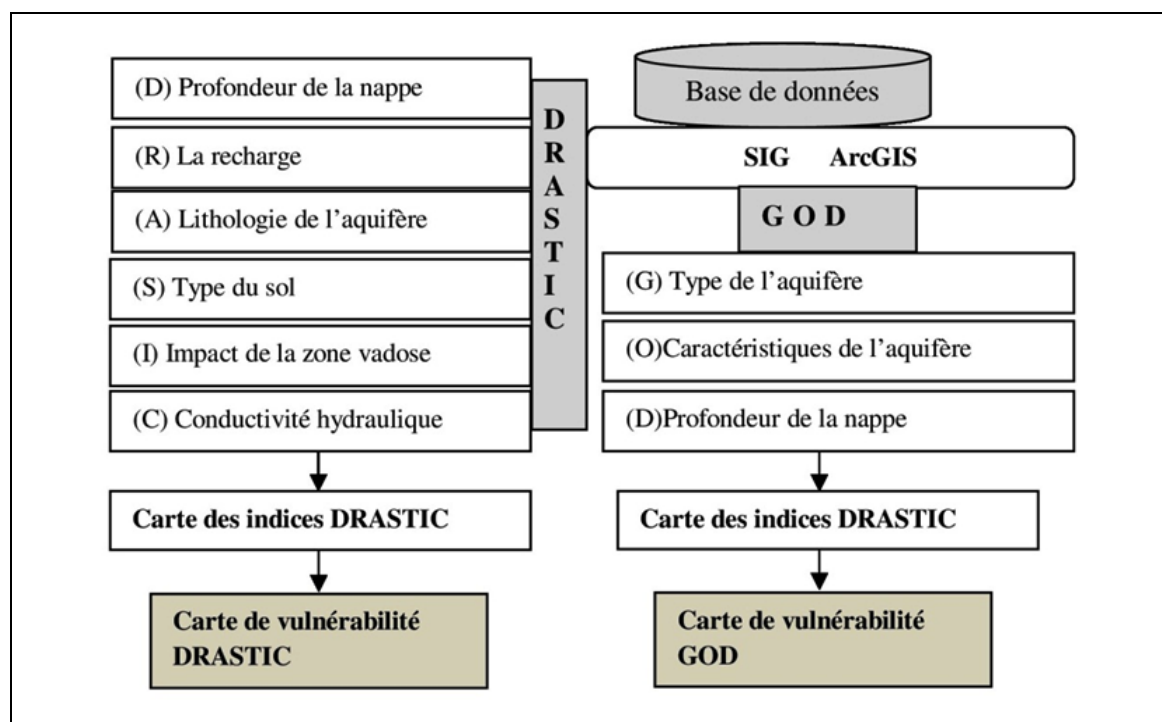
Les paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité sont répertoriés dans le tableau :

<b>DRASTIC</b>	7 critères : <b>Depth to groundwater, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topographie, Impact of the vadose zone, Conductivity</b>	Développée par l'EPA (Environmental Protection Agency) en 1985 et <i>Aller et al.</i> en 1987. Utilisée pour la cartographie à petite échelle
<b>SINTACS</b>	7 critères (cf. DRASTIC)	Dérivée de la méthode DRASTIC, 1990, utilisée pour une cartographie à moyenne et grande échelle
<b>AVI (Aquifer Vulnerability Index)</b>	2 critères : Epaisseur et conductivité hydrauliques de chaque couche sédimentaire	Développé par National Hydrology Research Institute Echelle régionale
<b>EPIK</b>	4 critères : <b>Epikarst, Protective Cover, Infiltration Conditions, Karst network development</b>	Développée par Doerfliger en 1996 puis Doerfliger et Zwahlen, en 1997. Destinée aux aquifères karstiques.
<b>RISKE</b>	5 critères : <b>Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst</b>	Dérivée de EPIK, pour les aquifères karstiques .
<b>DISCO</b>	3 paramètres : <b>Discontinuités, Couverture protectrice, Ruissellement</b>	Développée pour définir des zones de protection.
<b>GOD</b>	3 critères: <b>Groundwater occurrence ; Overall aquifer class, Depth to groundwater table</b>	Développée par Foster en 1987. Ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.
<b>Autres</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Z. Alamy et C. Langevin (1989)</b></li> <li>- <b>J. Ricour (1988)</b></li> <li>- <b>S. Munoz (1989) et S. Munoz, C. Langevin (1991)</b></li> <li>- <b>M.F. Suais (1990)</b></li> <li>- <b>Méthode COP, laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Malaga</b></li> <li>- <b>Méthode PI, développée par le BGR</b></li> <li>- <b>Approche européenne LEA</b></li> </ul>	

Tableau 19 : Principales méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines (Civita, 1993).

Il est difficile de sélectionner une méthode d'évaluation de la vulnérabilité. Diverses raisons peuvent motiver le 'Choix d'une méthode par rapport à une autre (Fig.78). Dans la présente étude, le choix est porté sur les méthodes DRASTIC et GOD dans l'optique de l'application à la gestion du territoire. Trois raisons ont motivé notre choix :

- 1- la méthode DRASTIC est la plus utilisée pour la réalisation des cartes de vulnérabilité ; elle est standardisée et prend en compte beaucoup de paramètres ;
- 2- la densité des points étudiés par rapport à l'étendue de notre zone d'étude est moyenne et pour cela c'est la méthode de cotation numérique qui est recommandée d'après Vrba et Zaporozec (1994).
- 3- les informations disponibles dans les banques de données ou recueillies au cours des travaux de terrains sont relatives aux paramètres utilisés par ces méthodes.



**Figure 78 : Elaboration des cartes de vulnérabilités par la méthode DRASTIC et GOD.**

### 5.1. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'Environmental Protection Agency (EPA) aux Etats-Unis en 85 et Aller et al. En 87, afin d'estimer le potentiel de pollution et d'évaluer la vulnérabilité verticale des eaux souterraines. Elle se base sur sept paramètres qui sont :

[D] : Depth to groundwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)

[R] : Recharge de l'aquifère

[A] : Aquifer media (nature de la zone saturée)

[S] : Soil media (nature du sol)

[T] : Topography (topographie, pente en %)

[I] : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)

[C] : Conductivité (perméabilité de l'aquifère).

L'importance relative de chaque facteur est évaluée par un poids fixe, variant entre une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs qui sont le moins. Chaque paramètre se voit attribuer une cote variante entre 1 et 10 en fonction des conditions locales ; les conditions de moindre vulnérabilité procurent des cotes faibles tandis que celles qui l'augmentent procurent des cotes élevées.

A l'intérieur d'une même unité hydrogéologique, un paramètre est rarement constant. Il prend donc des cotes différentes selon sa variabilité spatiale.

Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (Id) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (Id) calculé est élevé. Cet indice est défini de la manière suivante :

$$ID = Dn.dp + Rn.Rp + An.Ap + Sn.Sp + Tn.Tp + In.Ip + Cn.Cp$$

Où

D, R, A, S, T, I, C sont les paramètres cités plus haut.

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

n : notation accordée à chaque paramètre

Le tableau ci-après contient les poids attribués à chacun des paramètres ci-dessus. Les poids les plus élevés (5) sont attribués à la nature lithologique et à l'épaisseur de la zone non saturée. Les poids les plus faibles (1 et 2) sont attribués respectivement à la pente et à la nature lithologique du sol. (Tab. 19).

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
<b>D</b>	Profondeur de la nappe	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface	5
<b>R</b>	Recharge nette	Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination	4
<b>A</b>	Lithologie de l'Aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	3
<b>S</b>	Sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.	2
<b>T</b>	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissèlement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible,	1
<b>I</b>	Zone non saturée	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable (graviers, sables grossiers ...)	5
<b>C</b>	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.	3

**Tableau 20 : Poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al, 1987)**

<p>D : distance à la nappe Épaisseur de la ZNS</p> <p>Valeurs en m notation</p> <p>0 à 2                    10 2 à 4                    9 4 à 6                    8 6 à 8                    7 8 à 11                  6 11 à 14                5 14 à 18                4 18 à 25                3 25 à 33                2 &gt; à 33                1</p>	<p>R : Recharge</p> <p>Valeurs en cm                    notation</p> <p>0 à 5                    1 5 à 10                  3 10 à 15                6 15 à 25                8 &gt;à 25                  9</p>
<p>A : Nature de la zone saturée</p> <p>Calcaire karstique            10 Basalte                    9 Sable et gravier            8 Calcaire massif            6 Grés massif                6 Shales en séquence        6 Métamorphique altérée, grés 4 Métamorphique            3 Shale massif                2</p>	<p>S : Type de sol</p> <p>Peu épais ou absent            10 Gravier                    10 Sable                      9 Argile, agrégats            7 Limon sableux              6 Limon                      5 Limon silteux               4 Limon argileux            3 Argile non agrégé et non fissuré 1</p>
<p>Pente en %</p> <p>0 à 2                    10 2 à 6                    9 6 à 8                    8 8 à 10                  7 10 à 12                5 12 à 18                3 &gt;à 18                  1</p>	<p>I : Impact de la zone vadose</p> <p>Calcaire karstique            10 Basalte                    9 Sable et gravier            8 Sable et gravier avec silt et argile 6 Calcaire lité, grés, shale    6 Grés                      6 Calcaire                    6 Shale                      3 Silt/Argile                1</p>
<p>C : Conductivité hydraulique</p> <p>Valeur m/s                    Notation</p> <p>&gt;9,4 10<sup>-4</sup>                    10 4,7.10<sup>-4</sup> à 9,4 10<sup>-4</sup>            8 32,9.10<sup>-5</sup> à 4,7.10<sup>-4</sup>            6 14,7.10<sup>-5</sup> à 32,9.10<sup>-5</sup>            4 4,7.10<sup>-5</sup> à 14,7.10<sup>-5</sup>            2 4,7.10<sup>-7</sup> à 4,7.10<sup>-5</sup>            1</p>	

Tableau 21 : Notations accordées aux paramètres DRASTIC (Lallemand-Barrès 1994).

### 5.1. 1. Réalisation des cartes thématiques

Pour chacun des sept paramètres utilisés par la méthode "DRASTIC", une carte thématique est réalisée. Sur chacune de ces cartes, sont délimitées les zones caractérisées par un indice de vulnérabilité partiel du paramètre correspondant.

La méthode DRASTIC s'applique suivant un logique "raster" c'est-à-dire que la zone d'étude est subdivisée en grilles régulières constituées de petites zones appelées cellules ou pixels dont la forme géométrique est carrée, donc les sept paramètres de DRASTIC sont homogènes (système de projection UTM, même résolution).

Le Système d'Information Géographiques (SIG) est l'outil idéal pour cette application. A cet effet, on a utilisé le logiciel *Arcgis* pour établir les cartes paramétriques et pour la superposition des cartes paramétriques (multiplication).

Paramètre	Source de données	Type de données	Mode de traitement
Profondeur de la nappe	Compagne piézométrique sur 21 points de mesures (Juin 2012)	Point	Interpolation
Recharge nette	Études hydroclimatiques (P, ETP) (1995-2017)	Point	Interpolation
Lithologie de l'aquifère	Cartes géologiques 1/50000 Coupes lithologiques des forages (DHW) Études géophysiques(CGG)	Polygone	Interpolation
Sol (Texture)	Cartes pédologiques	Polygone	Digitalisation
Topographie	Cartes des pentes de la région MNT	Polyline	Digitalisation
Zone non saturée	Cartes géologiques 1/50000 Coupes lithologiques des forages (DHW) Études géophysiques (CGG)	Polygone	Interpolation
Perméabilité (conductivité hydraulique)	Études hydrogéologiques Essais par pompages	Points	Interpolation
Occupation du sol	Plan d'occupation du sol POS (2014) Imagerie satellitaire	Polygone, point, polyline	Digitalisation

**Tableau 22 : Sources de données brutes et mode de traitement de chaque paramètre.**

### 5.1. 1. 1. Profondeur de la nappe (D)

Ce paramètre détermine l'épaisseur de matériaux que doit traverser un contaminant avant d'arriver à la nappe. Il permet de déterminer le temps de contact avec le milieu et donc l'influence du milieu et l'efficacité des processus chimiques, de dégradation et d'atténuation d'un contaminant, plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met du temps à atteindre la surface piézométrique. Pour la nappe de F'kirina, ce paramètre a été déterminé pendant les relevés Piézométriques du mois de Juin 2012.

L'observation de la carte (Fig.79) montre que les plus faibles indices sont répartis dans les affleurements calcaires, leurs valeurs ne dépassent pas 15, alors que les plus importants indices se situent dans la zone centrale et ouest près de Garâat et tarf avec des valeurs de 35 à 45.

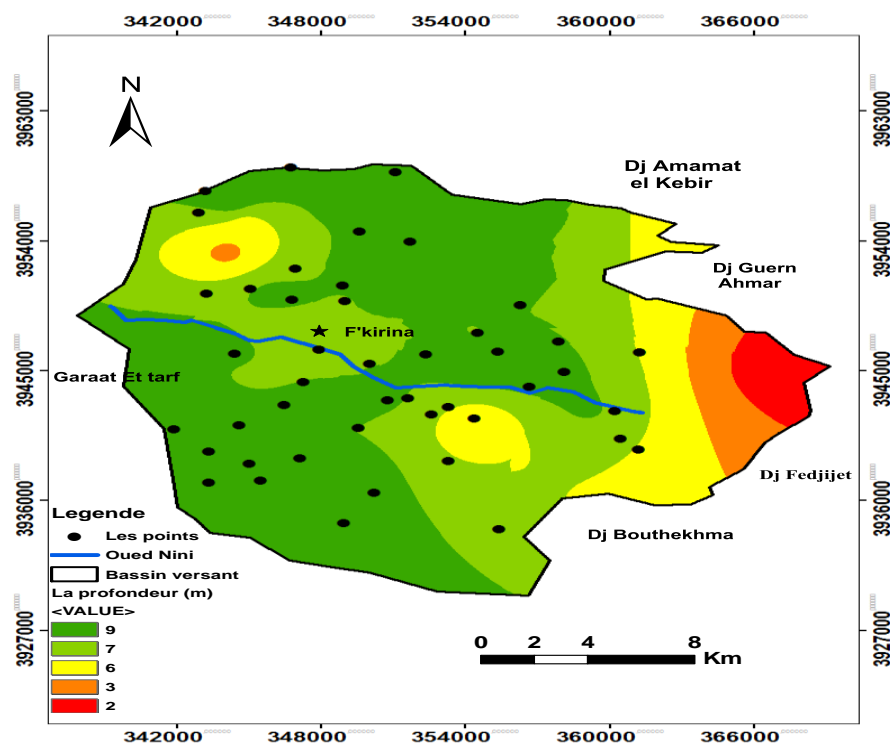


Figure 79 : Profondeur de la nappe dans la zone d'étude.

#### 5.1.1.2. La recharge efficace (R)

Définit la quantité de l'eau par unité de surface qui s'infiltré et atteint la zone saturée. Elle dépend du climat (précipitations et ETP), mais également de la topographie et de la nature des formations. Cette eau constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines en traversant la zone vadose. Généralement plus la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée.

La méthode utilisée pour élaborer la carte de la recharge nette de la nappe de F'kirina est celle de Williams and Kissel (1991). La recharge est obtenue selon ce procédé avec les équations suivantes correspondant à différents groupes hydrologiques de sols :

$$R = (P - 10.28)^2 / (P + 15.43) \rightarrow \text{groupe hydrologique A.}$$

$$R = (P - 15.05)^2 / (P + 22.57) \rightarrow \text{groupe hydrologique B.}$$

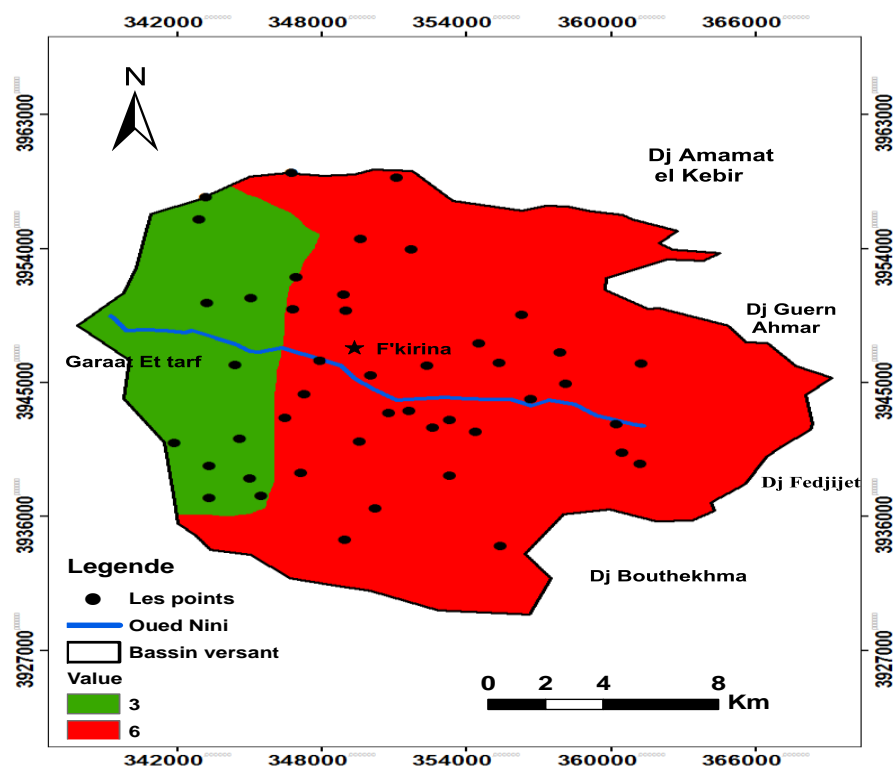
$$R = (P - 19.53)^2 / (P + 29.29) \rightarrow \text{groupe hydrologique C.}$$

$$R = (P - 22.67)^2 / (P + 34.00) \rightarrow \text{groupe hydrologique D.}$$

Où P est la somme des précipitations annuelles et irrigation, exprimée en pouces. Les quatre groupes hydrologiques A, B, C et D (Viessmann et al. 1977) correspondent aux types de sols classés en fonction de leur infiltration :

- Groupe A : les sols qui ont un taux d'infiltration très élevé même si elles sont complètement mouillées
- Groupe B : Les sols avec une vitesse d'infiltration modérée lorsqu'il est complètement mouillé.
- Groupe C : les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration lente lorsqu'il est complètement mouillé
- Groupe D : les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration très lente lorsqu'il est complètement mouillé.

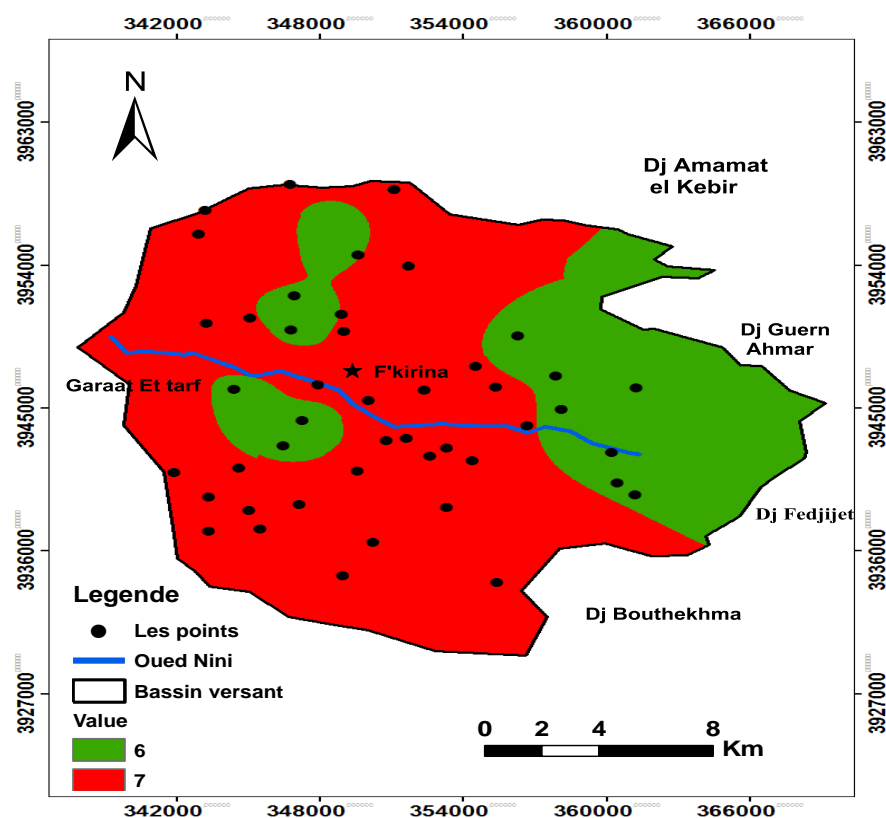
Dans la zone d'étude (Fig.80) la recharge est de l'ordre de 75 mm/an a l'ouest de la plaine, à l'est la recharge est de l'ordre de 145,46 mm/an ou les sols sont à faibles perméabilités.



**Figure 80 : Recharge nette de la nappe de F'kirina.**

### 5.1.1.3. Nature de la zone saturée (A)

Ce paramètre désigne la lithologie de l'aquifère. Son identification a été basée sur les logs des forages et des puits creusés pour le captage de la nappe. Les rapports de prospections géophysiques (CGG 1973) et les coupes géo-électriques interprétatives ont été également exploités. Ces documents (Fig.81) ont montré que la nature lithologique de notre aquifère d'étude est constituée essentiellement des alluvions, graviers, sables, argiles sableuses, limons et calcaire lacustre.



**Figure 81 : Lithologie de l'aquifère de F'kirina.**

#### 5.1.1.4. La nature du sol (S)

La nature du sol a un impact considérable sur la contamination des nappes phréatiques par les polluants provenant de la surface. Elle peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.

Les informations recueillies à partir des études et cartes pédologiques ont permis de définir la nature du sol (Fig.82).

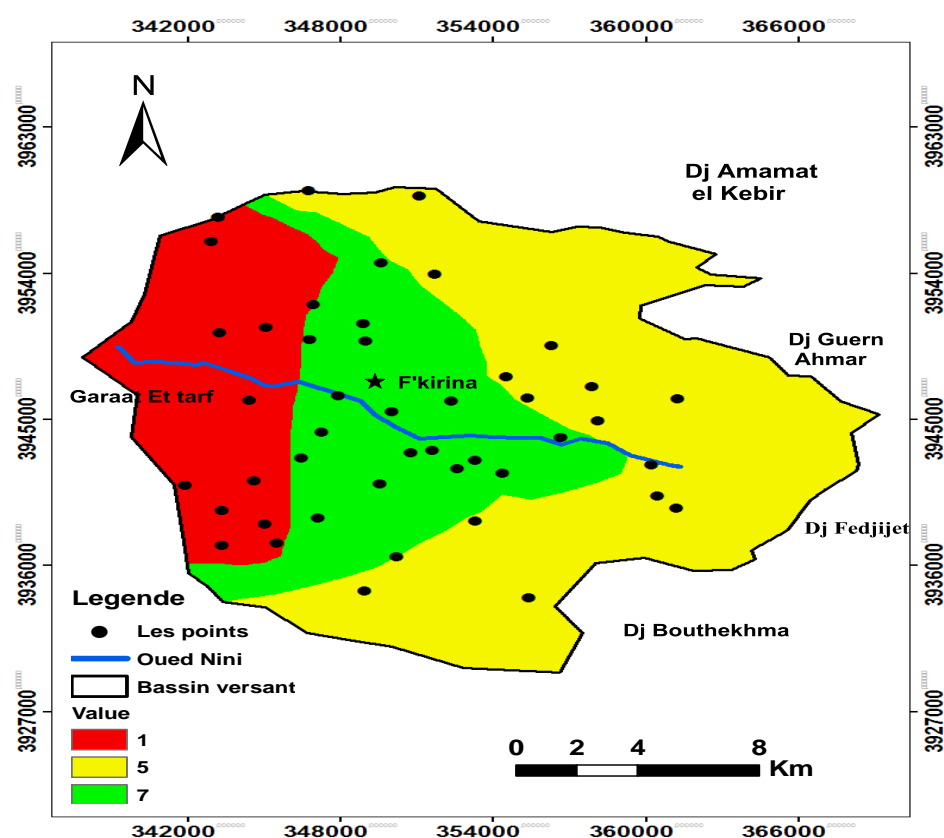
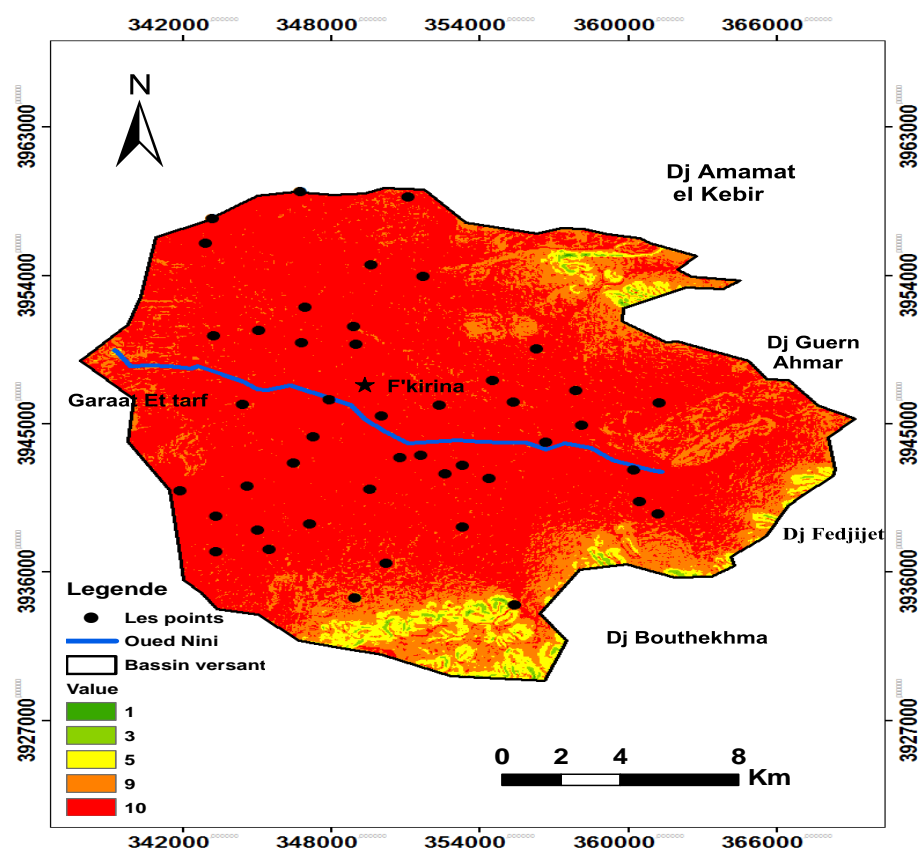


Figure 82: Texture des sols de la plaine de F'kirina.

#### 5.1.1.5. Topographie

Le terme de topographie fait référence à la pente et à la variation du niveau de la pente de la surface du sol. Souvent le gradient et la direction d'écoulement peuvent subir une influence due à la pente. La topographie influence le développement des sols donc indirectement l'importance de l'atténuation d'un contaminant par le sol. Les pentes qui procurent des conditions favorables à l'infiltration, et donc -un faible coefficient de ruissellement des polluants (surface importante, peu de pente) seront considérés comme fortement vulnérables. Le modèle numérique de terrain sous le format MNT a été utilisé pour calculer la pente en tous points dans la zone d'étude. Ce modèle a été généré à l'aide de l'extension 3D de Global Mapper. La quasi-totalité de la région (Fig.83) (à l'exception des reliefs) est caractérisée par une très faible pente comprise entre 0 et 2%.



**Figure 83 : Carte de pente de la plaine de F'kirina.**

#### 5.1.1.6. Nature de la zone non saturée (I)

L'impact de la zone non saturée est considéré comme étant un paramètre très important dans l'application de la méthode DRASTIC avec un poids ( $I_p = 5$ ). Ainsi cette partie du sol est le siège de nombreux phénomènes tels que l'oxydation, l'infiltration, l'évaporation ...etc. Son fonctionnement, ressemble à celui du milieu aquifère, autrement dit que l'atténuation des contaminants est liée principalement à la granulométrie des matériaux meubles ou au degré de fracturation de la roche.

La consultation des différents documents géologiques et géophysique (cartes et coupes), (Fig.84) nous a permis de dire que le milieu non saturé est constitué par un matériau détritique de granulométrie très hétérogène, répartie sur la totalité de la plaine d'étude (sable et gravier avec limon et argile).

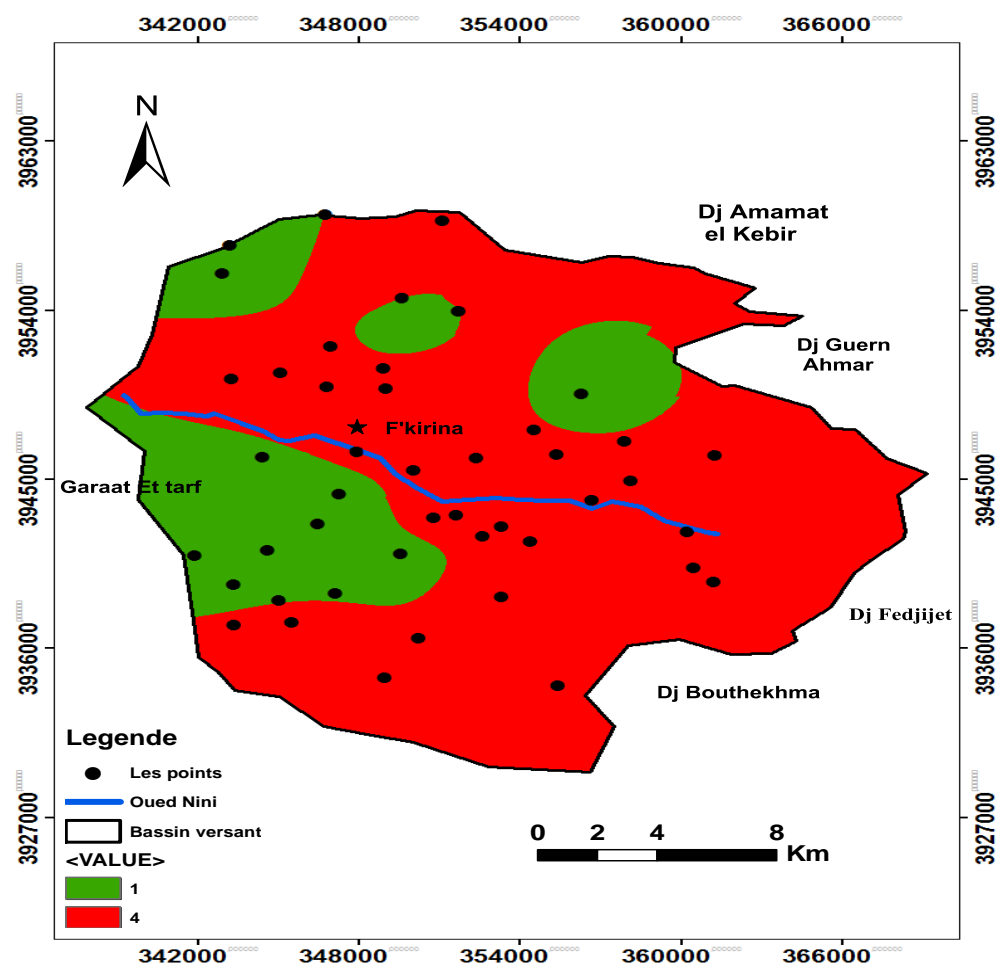


Figure 84 : Carte de la lithologie de la zone vadose de la nappe de F'kirina.

#### 5.1.1.7. Conductivité hydraulique de l'aquifère (C)

La conductivité hydraulique de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de migration des polluants et leur dispersion dans la nappe du point d'injection, à la surface, jusqu'à la zone saturée et, par conséquent, leurs concentrations dans la nappe aquifère. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide.

Les valeurs des conductivités hydrauliques utilisées pour calculer les degrés de vulnérabilité dans notre zone d'étude, sont obtenues à partir des essais de pompage, sont disponibles sous forme de transmissivités. Les perméabilités sont calculées en divisant les transmissivités par la puissance de la nappe. (Fig.85) Les valeurs ainsi obtenues sont faibles à moyennes dans leur ensemble et l'interpolation de ces données ponctuelles nous a permis d'établir la carte du paramètre « C ».

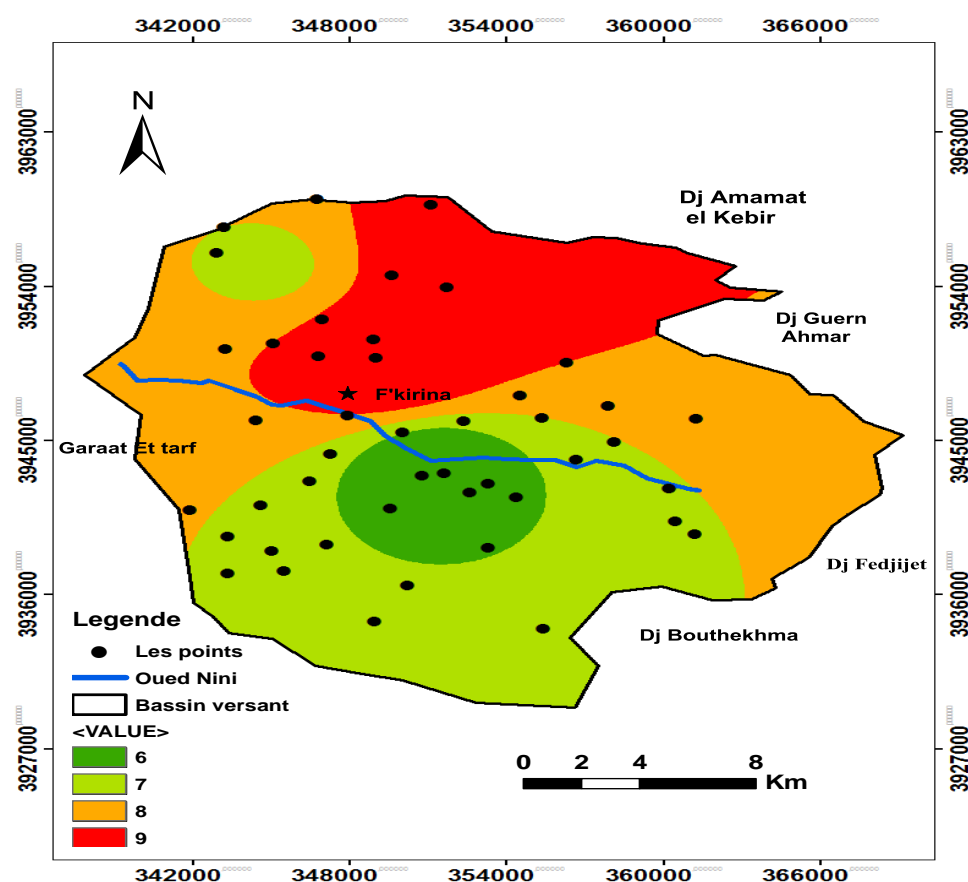


Figure 85 : Carte des conductivités hydrauliques de la plaine de F'kirina.

### 5.1.2. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution)

La superposition des sept cartes thématiques relatives aux paramètres DRASTIC, nous a permis de calculer l'indice DRASTIC ( $I_d$ ) à partir de laquelle nous pouvons obtenir une carte de vulnérabilité de l'aquifère en question (Fig.86).

Selon la classification adoptée par le ministère de l'environnement du Québec trois classes de degré de vulnérabilité différentes peuvent être distingués :

- $150 < I$  : vulnérabilité forte
- $100 < I < 150$  : vulnérabilité moyenne ;
- $I < 100$  : vulnérabilité faible.

La carte de vulnérabilité obtenue montre deux classes de vulnérabilité :

- **Vulnérabilité modérée** : couvrant 65 % de la superficie totale de la zone d'étude et localiser surtout à l'est et au centre de la zone d'étude.
- **Vulnérabilité faible** : couvrant 35 % de la zone d'étude. Elle est localisée à l'ouest de la plaine. Cette vulnérabilité est associée à la couverture argileuse du toit de la nappe dans cette partie de la plaine.

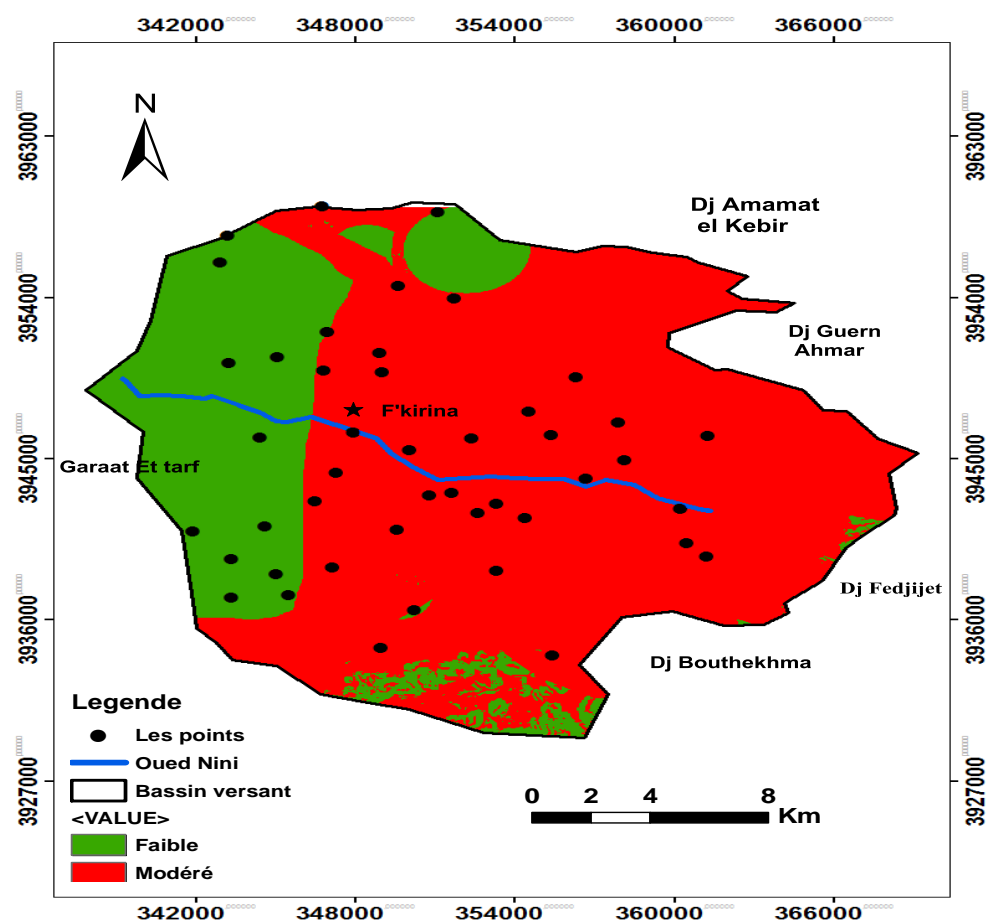


Figure 86 : Carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC.

## 5.2. Evaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD

La méthode a été proposée par S. Foster (1987). Elle utilise une approche où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée (au sens de pénétration du polluant) et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée.

L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres :

- Le premier réside dans l'identification du type d'aquifère, en fonction de son degré de confinement (**G**roundwater occurrence) (**G**).
- Le deuxième est défini par les caractéristiques des couches surmontant la zone saturée de l'aquifère en ce qui a trait à leur degré de porosité relative, à leur perméabilité et à leur contenu en eau (**O**verall Aquifer class) (**O**).
- Le troisième correspond à la profondeur à la nappe (**D**epth to groundwater table) (**D**).

L'indice de vulnérabilité (IGOD) est obtenu par la multiplication des indices de chacun de ces trois paramètres(Fig.87).

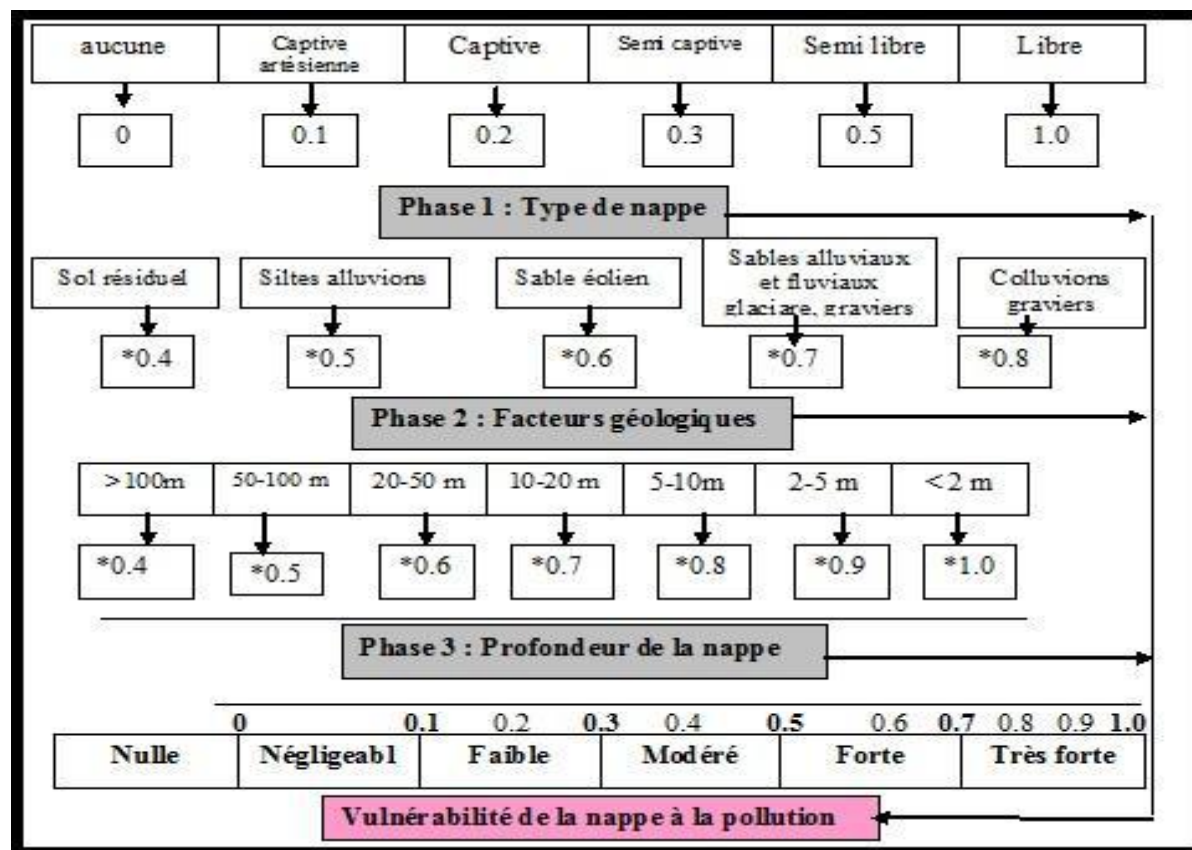


Figure 87 : Système empirique GOD, paramètres et cotation.

5.2.1. Acquisition et description des paramètres G.O.D :

Il s'agit ici de présenter les différentes données utilisées pour l'évaluation des différents paramètres.

L'identification et évaluation des paramètres requièrent des connaissances de la géologie et de l'hydrogéologie du secteur investigué. Ces informations sont le plus souvent contenues dans des rapports, des mémoires ou des banques de données.

Dans certains cas, les données disponibles pour la réalisation des cartes de vulnérabilité étant peu nombreuses ou imprécises, il a fallu faire des campagnes de terrain ou poser des hypothèses, comme c'est le cas dans l'identification de l'influence de la zone non saturée, où on dispose des coupes lithologiques au niveau des forages et des sondages et des coupes géologiques à travers le secteur d'étude, ce qui nous a permis de délimiter les matériaux et donc de déterminer le paramètre (O).

**5.2.1.1. Type d'aquifère (G) :**

Le type d'aquifère constitue l'un des facteurs importants contrôlant la vulnérabilité des aquifères. Les nappes libres sont les plus vulnérables par rapport aux pollutions de surface que les nappes semi-captives ou captives. La présence d'une couche à faible perméabilité peut rendre l'aquifère captif et donc limiter la traversée du polluant vers l'aquifère.

D'après L'observation des données piézométriques, des coupes des sondages réalisés dans le cadre de l'étude ECG (1997) ainsi que les coupes hydrogéologiques réaliser dans l'étude de (younssi 2009) on a obtenu deux classes (Fig.88).

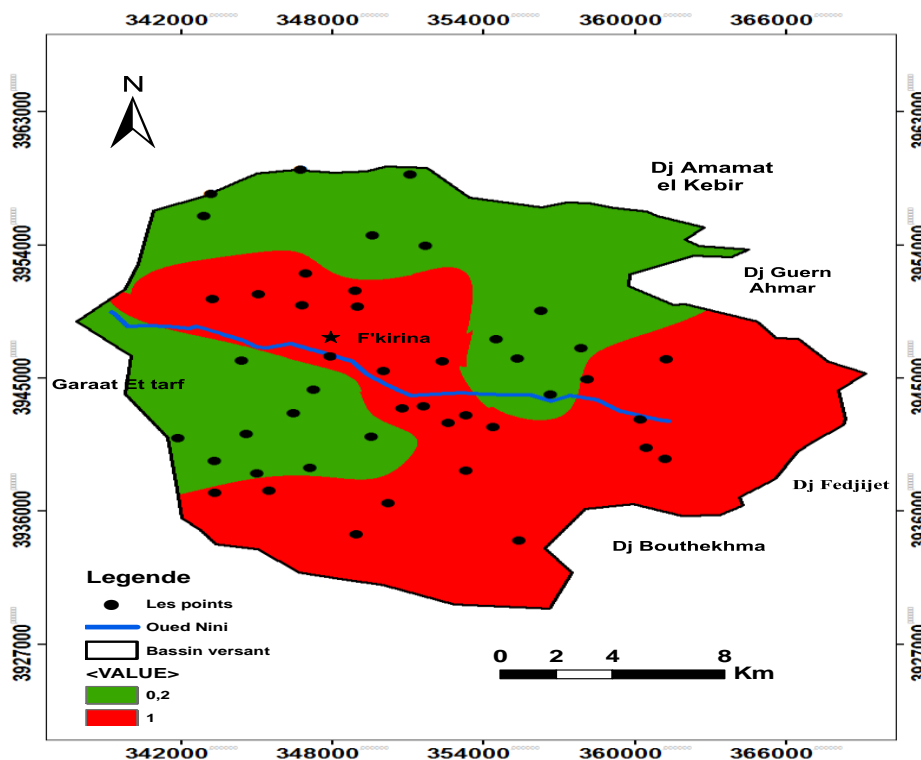


Figure 88 : Carte des types d'aquifères du secteur d'étude classés selon la cotation GOD.

### 5.2.1.2. Impact de la zone vadose (O) :

C'est un paramètre très important dans la méthode G.O.D. La zone vadose comprend l'ensemble des niveaux du sous-sol et du sol situés au-dessus de la nappe. Cette zone est aussi caractérisée par un fort degré d'hétérogénéité qui peut rendre très aléatoire la transposition à des bassins de plusieurs dizaines de km<sup>2</sup> de valeurs de paramètres obtenues sur échantillons à l'échelle d'une parcelle par exemple.

Pour l'application de la méthode G.O.D, la zone vadose correspond à la portion souterraine du terrain comprise entre le sol et le niveau de la nappe d'eau souterraine.

Deux côtes sont dominantes dans cette carte (Fig.89). :

- La cote = 0,5 correspondant à la zone non saturée constituée par les formations argile, essentiellement dans les parties centrale et méridionale du secteur,
- La cote = 0,6 correspondant aux zones constituées par les formations gravier et argile.

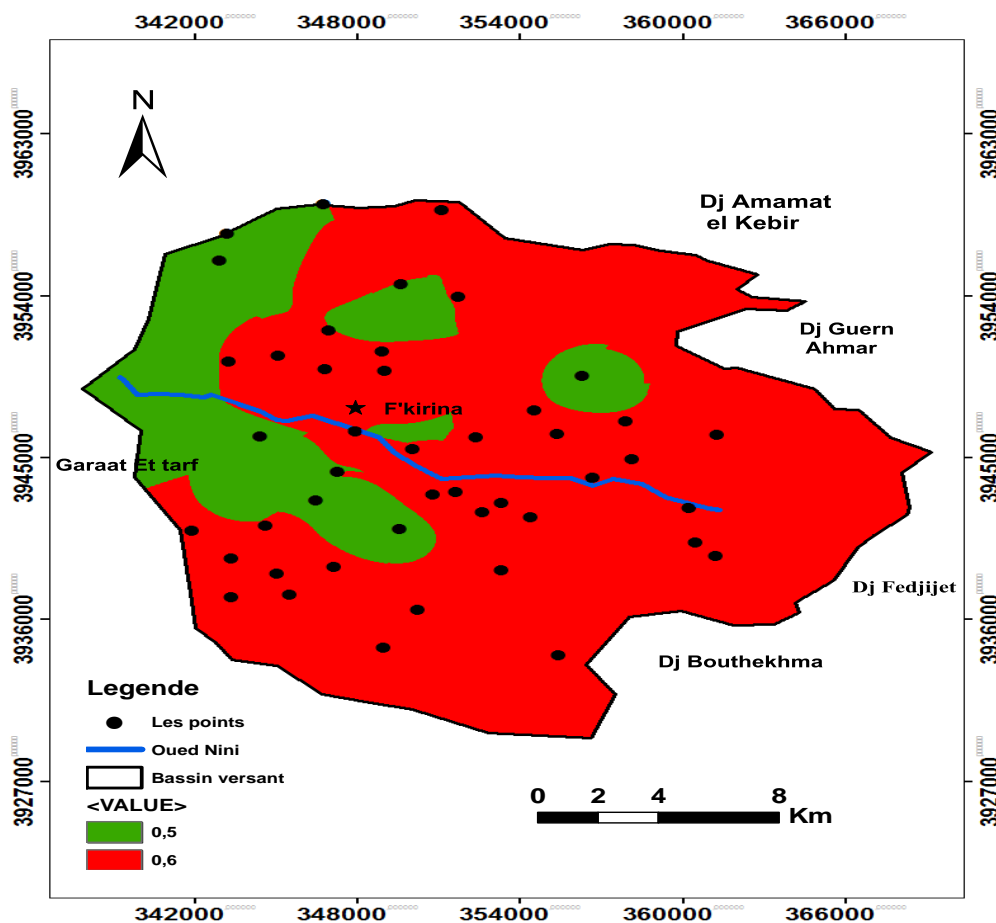


Figure 89 : Carte de la zone non saturée "vadose" (O) de la région d'étude en Fonction de la cotation GOD.

### 5.2.1. 3. Profondeur de la nappe (D) :

Elle est représentée par la distance séparant le niveau du sol et le niveau piézométrique de la nappe. Dans le cas d'une nappe libre, la profondeur de l'eau représente la portion du sol entre la limite de la couche végétale, à la surface du sol, et la surface libre de la nappe ; alors que dans le cas d'une nappe captive, elle représente la tranche du sol entre la couche végétale et le substratum supérieur (toit) de l'aquifère.

La profondeur de l'eau, est un paramètre très important de la méthode GOD, parce qu'il représente l'épaisseur que va traverser un polluant avant d'arriver à l'aquifère.

La méthode GOD suppose que le polluant est déversé à la surface du sol, entre dans le sol, traverse la zone non saturée et atteint le niveau piézométrique soit l'aquifère (S.S).

L'évaluation de ce paramètre a été directement effectuée à partir de la campagne piézométrique réalisée en Octobre 2012 (ANRH, 2012) (Fig. 90).

L'interpolation est réalisée par la méthode du "IDW" incluse dans la fonction "Interpolation" de "ARCGIS 10". Une classification de chaque pixel est ensuite effectuée en fonction du système de cotation de la méthode GOD à l'aide de fonctionnalité "Reclass". Le résultat de l'interpolation est une carte en courbes exprimée par l'indice correspondant de la méthode GOD : (Fig. 90).

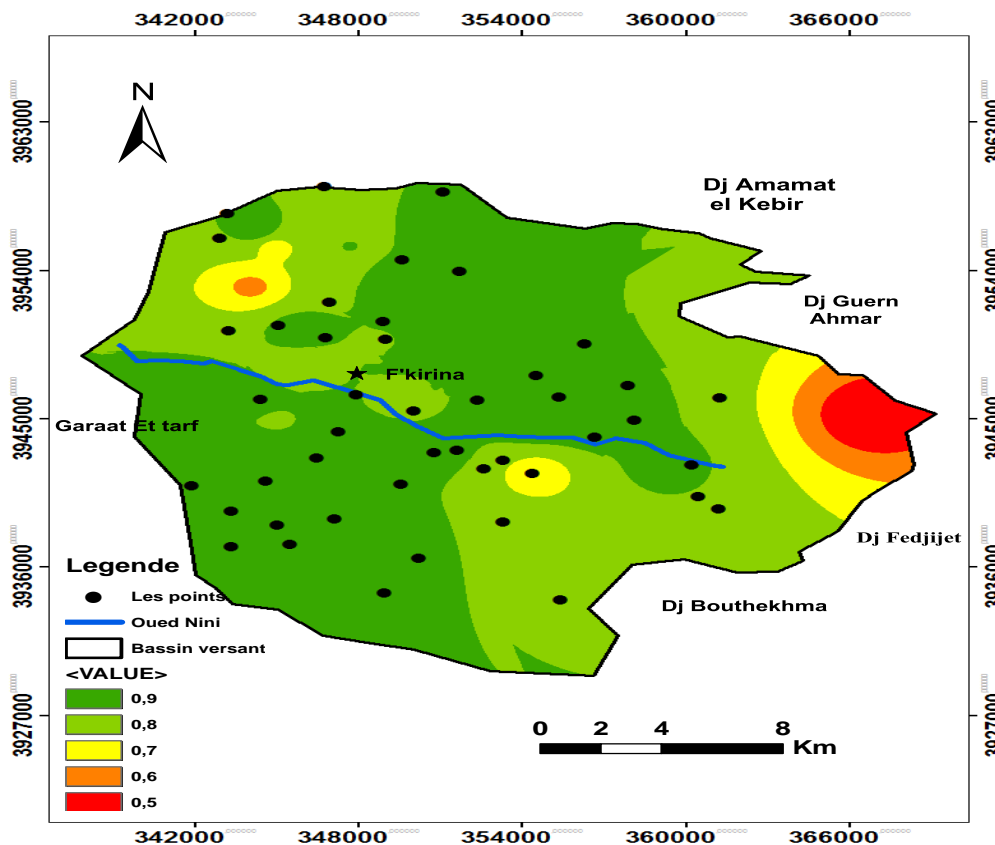


Figure 90 : Carte de la profondeur du niveau piézométrique de la région d'étude.

### 5.2.2. Etablissement de la carte de vulnérabilité GOD

L'indice de vulnérabilité (IG) relative à la méthode GOD est calculé par la multiplication des trois paramètres indiciels. La valeur de l'indice est comprise entre 0 et 3. L'intérêt de la codification des classes GOD correspondantes est lié aux choix de l'utilisateur dans la caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines. L'analyse de la carte de vulnérabilité établie par la méthode GOD pour la région étudiée révèle deux indices principaux de vulnérabilité.

Une faible vulnérabilité à la pollution (indice compris entre 0 et 0,2) occupe la partie nord et ouest de la plaine. Cela correspond à la nature lithologique de la zone non saturée assez perméable à imperméable ou l'aquifère devient captive

Les zones à vulnérabilité modérée (indice compris entre 0,2 et 0,3) correspondent à la zone qui occupe le centre et le sud de la plaine. La zone vadose est semi-perméable.

La carte finale de vulnérabilité par la méthode GOD est présentée en figure 91 :

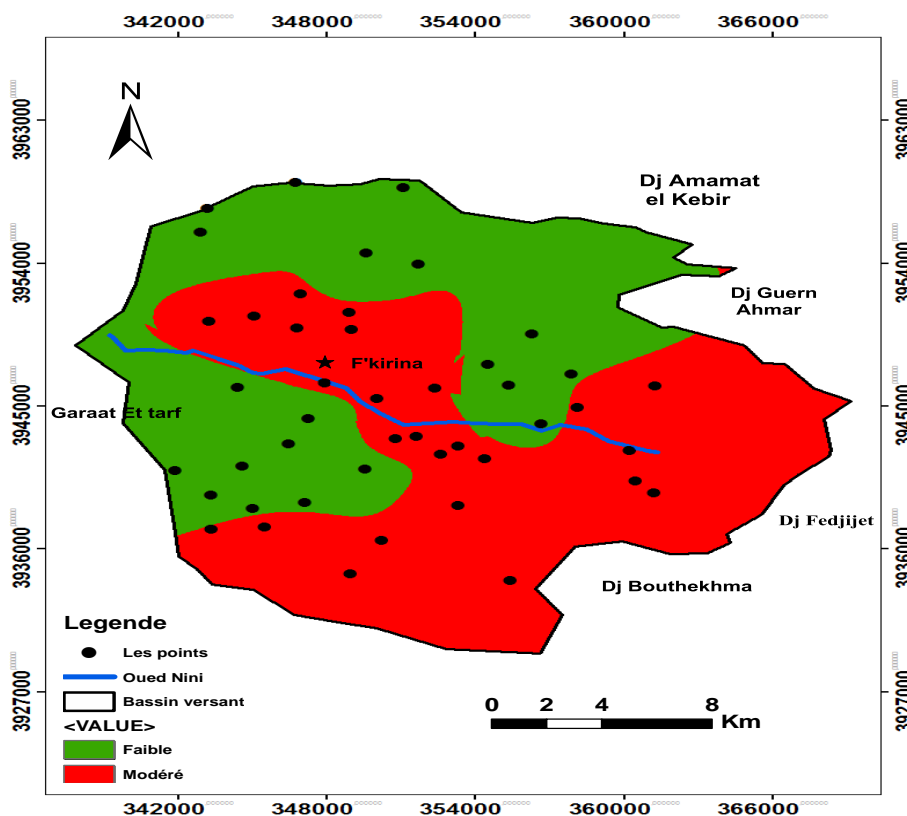


Figure 91 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du secteur d'étude par application de la méthode GOD.

## 6. Validation chimique :

Il y a deux méthodes pour la validation des cartes de vulnérabilités obtenue :

- Validation basée sur les méthodes statistiques.
- Validation basée sur les données chimiques des eaux souterraines (notamment les nitrates et les chlorures).

La comparaison des cartes de vulnérabilité avec les cartes de distribution des nitrates constitue la deuxième méthode de validation. Les zones réellement contaminées doivent correspondre à celle où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés, et en tient en considération qu'une zone vulnérable peut également avoir un faible indice de vulnérabilité du fait que la notion de vulnérabilité n'est pas synonyme d'une pollution actuellement, mais plutôt d'une prédisposition de ces zones à une contamination éventuelle.

Dans cette étude la carte de distribution des nitrates est utilisée pour la comparaison avec les cartes de vulnérabilité DRASTIC, GOD.

La distribution spatiale des nitrates (Fig.92) montre un décroissement des teneurs du sud vers le nord. La carte obtenue concorde un peu avec les modèles DRASTIC, mais avec le modèle GOD elle concorde seulement dans sa partie ouest.

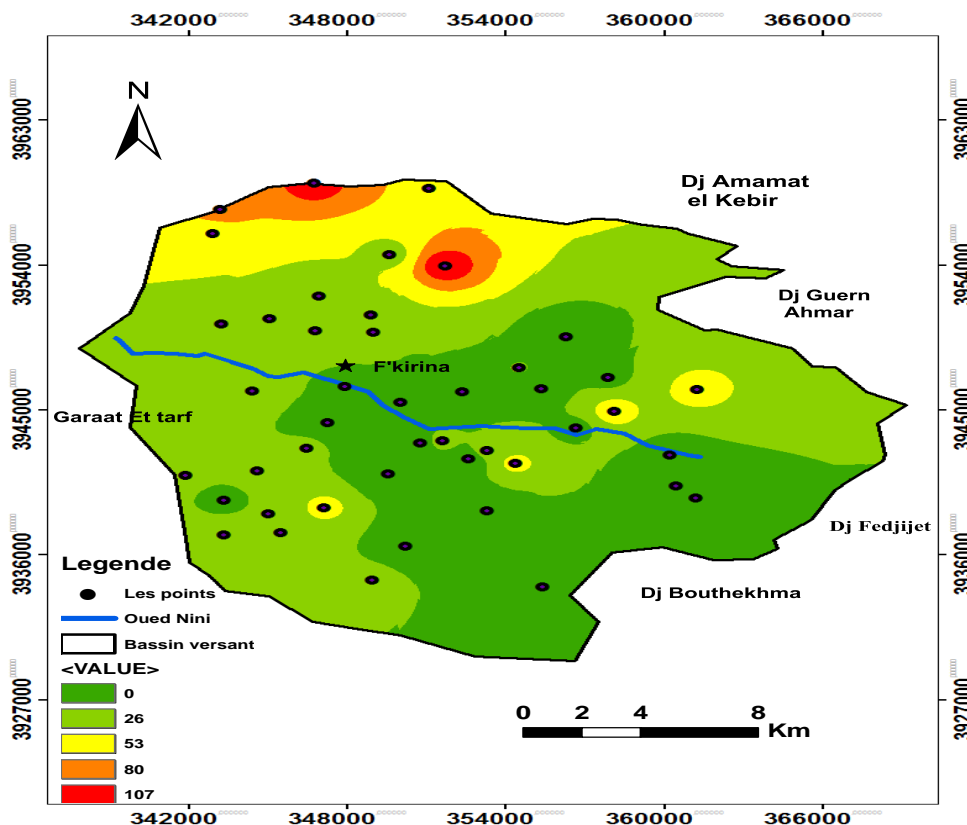


Figure 92 : Carte de la distribution de nitrate (mg/l) de la plaine de F'kirina

**7- Conclusion**

La cartographie par les méthodes DRASTIC et GOD de la vulnérabilité de la nappe de F'kirina a permis d'établir une estimation rapide de la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Dans cette étude, nous avons évalué la vulnérabilité à la pollution à partir de 2 méthodes DRASTIC, GOD. La vulnérabilité de l'aquifère de F'kirina déterminée par les méthodes DRASTIC, et GOD révèle une tendance à la vulnérabilité faible à moyenne, dont la répartition est la suivante :

Pour la méthode DRASTIC :

35% de la zone d'étude, ont une vulnérabilité faible qui occupe la partie Est de la plaine.

65 % occupe la zone Est et centrale de la zone d'étude ont une vulnérabilité modérée

Pour la méthode GOD 48 % de la zone d'étude ont une faible vulnérabilité, 52 % une vulnérabilité modérée.

## **Conclusion générale**

A travers ce travail, nous avons commencé par présenter le cadre physique de la région d'étude incluant les contextes géographiques, climatiques morphologiques, hydrologiques. L'étude géologique, basée sur les travaux de plusieurs auteurs ayant étudié la région, a permis de distinguer les principales formations géologiques de cette région ; à savoir :

- Un substratum marneux du Maestrichtien inférieur observé au djebel Boutekhma dans la partie sud de la plaine.
- Un ensemble appartenant au Crétacé et au Miocène caractérisé par des calcaires maestrichtiens, affleurent près des djebels (El Bardo, Djazia, Fedjidjet, Boutekhma.)
- Un bassin comblé d'une sédimentation hétérogène, notamment alluvionnaire, constitue le quaternaire, avec une épaisseur de dizaines de mètres.

Sur le plan hydrogéologique, les aspects lithologiques et structuraux des grandes formations géologiques de la zone d'étude déterminent les principaux systèmes aquifères présents, à savoir :

- Qu'il existe une continuité latérale au niveau de la nappe du plioquaternaire, et que la nappe des calcaires du Maestrichtien supérieur présente une discontinuité locale qui est dictée par la présence large zone d'érosion qui sépare la nappe en deux.
- Dans l'ensemble la nappe du plioquaternaire est captive mais il existe une large bande de direction N S où la nappe devient libre.
- La nappe du plioquaternaire se situe dans les dépressions du toit des calcaires (dues aux plissements et aux ondulations de celui-ci), ou dans les zones d'érosion.
- Il existe une liaison hydraulique directe entre les deux nappes.
- La nappe du plioquaternaire présente une hétérogénéité latérale et verticale.
- L'analyse de la carte piézométrique montre que la direction principale de l'écoulement se fait globalement des affleurements calcaires vers la Sebka (Garaet Et Tarf) selon trois directions NESW, SE-NW et N-S. Toutes les eaux de la nappe drainent vers la Sebka qui constitue un exutoire naturel

L'étude hydrochimique a permis de caractériser les principaux paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés au cours de la campagne de terrain du Mai 2015. D'après les résultats des analyses chimiques et leurs classifications, nous remarquons que

- Les eaux de la plaine ont une minéralisation élevée. Cette minéralisation est due essentiellement à :

## *Conclusion générale*

- Le lessivage des formations géologiques (argiles, roche carbonatée et les évaporites). Les faibles valeurs de la minéralisation se localisent près des massifs calcaires, et les fortes valeurs sont observées dans la partie Nord Est et surtout près du Garaet
- Trois types de faciès hydrochimique se dégagent :
  - Un faciès bicarbonaté calcique qui caractérise les eaux des formations carbonatées
  - Un faciès sulfaté calcique dans le centre de la plaine.
  - Un faciès chloruré calcique près de la Garaat
- De l'observation de la carte de répartition spatiale des différents paramètres étudiés, il ressort qu'au niveau de la zone d'étude, la nature hydrochimique des eaux est déterminée essentiellement par la nature lithologique des formations des zones de recharge.

L'étude statistique, par analyse en composante principale (ACP) :

- A confirmer et bien précisé les affinités entre les différents ions renseignant sur l'origine ainsi que les regroupements spatiaux des échantillons étudiés.
- La méthode par "Classification Ascendante Hiérarchique" a abouti à une classification par niveau de minéralisation.

Du point de vue de la qualité des eaux pour l'irrigation, la majorité des eaux des points étudiés présentent des risques de salinisation de sol.

Le 5<sup>ème</sup> chapitre a été consacré à l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions. Le choix pour l'établissement d'une cartographie de ce paramètre s'est porté sur la méthode DRASTIC et GOD en raison de sa structuration simple et qu'elle soit peu demandeuse en données difficiles à générer ou à estimer correctement.

- L'établissement, par méthode DRASTIC de la carte de vulnérabilité de la nappe de F'kirina a permis d'établir une estimation rapide de la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Deux classes principales de vulnérabilité ;
- Une classe à vulnérabilité modérée qui occupe la majorité de la zone cartographiée correspondant aux secteurs où les profondeurs du niveau piézométrique restent supérieures à 5 m.
- Une classe à vulnérabilité faible caractérisant la zone de sebkha peut être due à la nature lithologique non perméable.

### **Perspectives :**

Pour une bonne compréhension du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère de F'kirina, diverses perspectives semblent être nécessaires :

- Sur le plan hydrodynamique : il est nécessaire de suivre les fluctuations des niveaux piézométriques de la nappe. En effet, le manque d'un réseau piézométrique de surveillance de la nappe constitue un problème majeur pour caractériser de façon précise le fonctionnement hydrodynamique de la nappe pour l'estimation de la recharge
- L'étude hydrochimique réalisée dans ce travail a permis de définir les interactions entre les eaux et les roches encaissantes et aussi d'aborder la question de l'origine de la minéralisation et de la salinité des eaux. Cependant, il serait très intéressant de compléter cette étude par des études isotopiques pour une meilleure compréhension du temps de transit des eaux dans l'aquifère et les sources susceptibles de recharger la nappe et l'impact du changement climatique sur la nappe.
- En entamant cette thèse, l'ambition était de contribuer à une meilleure connaissance du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du F'kirina. Au terme de ces travaux de recherches, j'espère avoir apporté une modeste contribution au côté de la communauté scientifique pour la compréhension des différents processus régissant le fonctionnement de la nappe aussi bien sur la plan hydrogéologique qu'hydrochimique. Ceci malgré toutes les difficultés rencontrées lors de la collecte des données et les différentes missions de terrains réalisées dans des conditions exceptionnelles.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- 📖 **Aller, L. et al (1987)** DRASTIC : A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, EPA/600/2-87-036, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Washington, D.C.
- 📖 **ANRH (Agence nationale des ressources hydriques). (1974)** Etude hydrogéologique de la plaine de Collo. Rapport (Agence nationale des ressources hydrique Constantine.
- 📖 **Albinet, M. and J. Margat (1970)** Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull. BRGM Paris, 2, 3, 4. pp. 13-22.
- 📖 **Boulabiez 2017** Evaluation de la pollution dans la plaine de Collo, interaction nappe-rivière, thèse de doctorat université Baji Mokhtar d'Annaba.
- 📖 **Brinis. N, (2011).** Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en zone aride cas de l'aquifère d'El-Outaya, région Nord-Ouest de Biskra. Algerie. Thèse de doctorat, Univ. Mohamed Kheider – Biskra, 191p.
- 📖 **Bakalowicz, M., 1979.** Contribution à l'étude de la géochimie à la connaissance de l'aquifère Karstique et de la Karstification. Thèse, Université de Paris Sud, Orsay, 275p.
- 📖 **Civita, M., De Regibus, C. (1995)** Sperimentazione di alcunemetdologie per la valutazione del la vulnerabilita degli aquifer. Q Geol Appl Pitagora Bologna 3:63–71
- 📖 **Castany. G, (1982):** Principes et méthodes en hydrogéologie .Dunod édit.Paris. pp.173 - 187.
- 📖 **Drever. J. I, (1997).** The geochemistry of natural waters. 3rd ed. New York – Prentice-Hall INC. 1997; 436 pp.
- 📖 **Dahali s. (2013)** - étude hydrogéologique et hydrochimique de la nappe du continentale intercalaire de la région de touât (wilaya d'Adrar). Mémoire master, Univ. Ouargla, 78p.
- 📖 **Dali, 2007** Ressources et gestion intégrée des eaux du bassin de Garaet el tarf (w. Khenchela) Mémoire magistère , Univ. Annaba,
- 📖 **Foster et al. (1988)** Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data, Pan Amer. Cent. for Sanit. Engin. And Envir. Scienc. (CEPIS), Lima.
- 📖 **Fidelibus M. D. et Tulipano L.,** Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy). 14th Salt Water Intrusion Meeting.

Rapporter och meddelanden nr 87.pp. : 230-241, 1996. Margat, 1991 Williams and Kissel (1991)

📖 **Fedrigoni, L., Krimissa, M., Zouaric, K., Malikic, A. et Zuppi, G.M., 2001.** Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie) C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences 332 (2001) 665–671.

📖 **Fetter, C.W., 1994.** Applied hydrogeology. Prentice Hall Inc., New Jersey (USA), 691p

📖 **Gouaidia Let al, (2012)** - Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). P.141-160

📖 **Gleick, 1996** Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs. Water International, 21, 83-92. <http://dx.doi.org/10.1080/02508069608686494>

📖 **Hsissou Y. (1999)** : Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride : cas de la plaine du souss. Thèse d'état Es-Sciences Université Ibnou Zohr Agadir 228p.

📖 **Hsissou Y., Chauve P., Mania J., Mangin A., Bakalowicz, Gaiz (1996)** : Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla par le rapport des concentrations molaires  $Sr^{2+}/Ca^{2+}$ . J. Hydrolo. 183 : 445-451.

📖 **Hsissou Y., Mudry J., Mania J., Bouchaou L., Chauve P. (1997)** : Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et

📖 **Hem. J. D, (1985).** Study and interpretation of the chemical characteristic of natural water. US Geological Survey. Water-Supply. Paper 2254, 263 pp ; Weinheim

📖 **Hamit Abderamane ,2012** Étude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad) Thèse de doctorat, université de Poitiers.

📖 **Khedidja ,2016** Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Tadjnant –Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines

📖 **Lallemand-Barrès. A, (1995).** Méthodes de dépollution des eaux souterraines. Manuels et Méthodes. Orléans. BRGM. pp 60102.

📖 **Murat, V. (2000)** Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution, application aux aquifères de piémont Laurentien. Mémoire de maîtrise université de Québec INRS – Géo ressources, Québec 127p.

📖 **Plummer.L.N., Jones. B.F. and Trudell. A.H., (1976) (revised 1978, 1984):** WATEQF, a FORTRAN IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of naturel Investigations paper 76- 13.

📖 **Piper. A. M, (1944).** A graphic procedure in geochemical interpretation of water analysis. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol 25 (6): pp. 914-928; Richmond,

📖 **Rodier. J, (1996).** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8ème édition, Dunod, Paris.

📖 **Richards. L .A, (1954).** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, Agric. Handbook 60; USDA, Washington D.C., 160p.

📖 **R. J. Gibbs,** "Mechanisms controlling world water chemistry," Science, Vol. 17 (1970)

📖 **Richard L. (2000)** ; Sur l'origine des ions chlorures dans les eaux salines des massifs granitiques CR Acad. Sc. Paris 331 : 783-788.

📖 **Samira, K., Michelot, J.L., Bouchaou, L., Mudry, J. et Hsissou, Y., 2004.** Sur l'origine par l'altération du substratum schisteux de la minéralisation chlorurée des eaux de la nappe cotière sous climat aride (Chtouka-Massa, Maroc). C.R.Geosciences 336 (2004) 1363-1369.

📖 **Schoeller H. (1962)** : Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. Editions 1962. 642

📖 **Singh K., Hundal H.S., Singh D., 2011.** Geochemistry and assessment of hydrogeochemical processes in groundwater in the southern part of Bathinda district of Punjab, northwest India. Environ Earth Sci (2011) 64. Pp 1823-1833.

📖 **Schoeller. H, (1962).** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. Editions, 642 pages.

- 📖 **Schoeller. H, (1962).** Les eaux souterraines : Géochimie, eaux du gypse et des terrains salifères , Masson et Cie édition Paris IV, 362 pages.
- 📖 **Simler, R., 2004.** Diagrammes. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon, Logiciel d'hydrochimie multi langage en distribution libre.
- 📖 **Servant. J, (1975).** Contribution à l'étude des sols halomorphes. L'exemple des sols sales du Sud et du Sud-Ouest de la France. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Montpellier.
- 📖 **Tellam, J.H.,** Hydrochemistry of the saline groundwaters of the lower Mersey Basin Permo-Triassic sandstone aquifer, UK. *Journal of Hydrology.*165: 45-84,1995.
- 📖 **Thornthwaite C.W. (1948)** An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1. pp. 55-94.
- 📖 **Usho, R., Kur, H., Jessica, S., Ian, E., Michael, N.F., Stephen, J.S. and Andrea, L.H., 2005.** The use of <sup>36</sup>Cl and Chloride/Bromide ratios in discerning salinity sources and fluid mixing patterns: a case study at Saratoga Springs. *Chemical geology* 222: 94-111.
- 📖 **Viessmann, W., Knapp, J.W., Lewis G.L. (1977)** Introduction to hydrology. Haper and Row publishers, NY, pp. 618-625. Moral 1964
- 📖 **Vrba, J., Zaporozec, A. (1994)** Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Int. Association of Hydrogeologists. Int. Contributions to Hydrogeology; 16. Verlag Heinz Heise, Hannover.
- 📖 **Varol S., Davraz A., 2014.** Assessment of geochemistry and hydrogeochemical processes in groundwater of the Tefenni plain (Burdur/Turkey). *Jor Environ Earth Sci* 2014/71. Pp 4657-4673
- 📖 **younssi 2009** Epuisement de la nappe aquifère de la région de F'kirina (W. d'Oum El Bouaghi), et ces répercussions sur la gestion des ressources en eau Thèse de Majistère, Université de Badji Mokhtar Annaba.
- 📖 **Wilcox. L.V, .** The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture TechBull 962, Washington DC.
- 📖 **Wilcox.L.V,(1 )**.Classification and use for irrigation waters. USDA, Circ.969,Washington,.

N	x	y	11/06/2012-15/06/2012	Octobre 2012
1	915,9	263,4	10,02	10,55
2	924,85	273,1	17,67	18,10
3	918,5	267,275	12,57	14,00
4	920,275	266,05	15	17,45
5	924,175	264,15	34,30	37,6
6	921,4	268,2	2,56	16,51
7	915,25	269,95	10,67	9,60
8	926,85	271,15	10,67	8,70
9	920,05	271,35	13,15	12,70
10	916,2	273,1	10,65	12,30
11	919,25	274,85	25,58	24,12
12	921,75	281,7	13,04	11,88
13	920,65	263,15	6,95	7,28
14	925,135	267,175	13,19	13,54
15	914	281,35	7,60	11,8
16	914,1	277,8	7,65	14,25
17	914,775	268,547	7,30	13,13
18	911,9	268,547	6,24	7,42
19	914,2	268,1	12,65	15,40
20	919,525	277,95	23,55	24,05
21	918,25	261,35	18,65	14,95

Nature	Y (lamb)	Z (m)	Jun-05	Oct-05	Jun-06	Oct-06	juin-07	nov-07	
915,9	F1	263,4	866,531	861,98	859,47	857,63	854,65	855,08	
924,85	P1	273,1	908,507	890,68	891,23	892,33	891,31	891,59	891,16
918,5	P2	267,275	864,039	852,06	849,89	852,84	852,46	852,82	852,44
920,275	P3	266,05	876,32	862,5	862,2	865,12	863,36	862,87	862,27
924,175	F2	264,15	918,187	887,17	889,03	886,27	883,39	879,19	881,18
915,25	P4	269,95	853,395	845,2	843,52	845,38	843,35	844,65	
926,85	P5	271,15	898,739	890,48	891,44	891,46	891,39	891,64	892,04
920,05	P6	271,35	864,697	852,49	851,84	853,22	853,21	853,2	853,45
916,2	P7	273,2	856,387	848,58	844,99	847,97	847,09	847,24	847,19
920,65	P8	263,15	896,769	890,47	890,6	892,22	871,17	888,49	884,89
925,15	P9	267,175	896,471	883,92	884,08	884,36	883,63		

919,525	P10	277,95	887,559	868,19	868,36	869,06	869,89	868,56	875,84
918,25	P11	261,35	897,769	889,29	890,6	889,92	888,39	885,89	889,67
921,75	P12	281,7	924,67	914,25	913,11	913,65	913,02	918,22	
914	P13	281,35	869,327	863,31	860,83	863,03	861,62	863,07	
914,1	P14	277,8	861,655	857,41	856,21	856,41	855,45	852,91	856,81
914,775	P15	270,95	851,749	845,85	846,13	843,23	844,05	845,83	841,75
914,2	P16	268,1	854,728	847,23	843,53	847,73	849,33	845,13	840,55

Variation du niveau piézométrique

#### FORAGE (H40)

COMMUNE : F'kirina

Carte : F'kirina N°176

X : 919.500 Y : 274,000 Z : 830 m

Prof forée : 120 m prof équipée : 100 m

Débit mob: 03 l/s , débit exp :03 l/s , ND:49 m , NS :11 m

Date des travaux : 2002

Etat du forage : fructueux

<p><b>COUPE GEOLOGIQUE</b>  0-08m : terre arable.  08-11m : argile jaune sableuse avec peu de gravier.  11-26m : argile jaune sableuse et gravier .  26-43m : argile jaune sableuse et gravier grossiers.  43-46m : argile jaune (présence de la craie) .  46-54m : argile sableuse avec des gravier.  54-73m : argile jaune.  73-97m : argile jaune sableuse avec des passage de gravier et qlq passage de sable .  97-120m : marne grisâtre .</p>	<p><b>EQUIPEMENT</b>  0-6 m : tube guide Ø20"  0-10m : tube plein Ø13"3/ 8  10-20m : tube crépiné Ø13"3/ 8  20 - 25 : tube plein Ø13"3/ 8  25-40 m : tube crépiné Ø13"3/ 8  40-45 m : tube plein Ø13"3/ 8  45-60m : tube crépiné Ø13"3/ 8  60-75m : tube plein Ø13"3/ 8  75-95m : tube crépiné Ø13"3/ 8  95-100m tube plein Ø13"3/ 8 avec sabot</p>
---	---

#### FORAGE J35 ou (J37)

COMMUNE : F'kirina

Carte : Ain Beida N°147

X : 917,350 Y : 280.850 Z : 882m

Prof forée : 250 m prof équipée : 250 m

Débit mob: 25 l/s , débit exp : 17 l/s , ND/ m , NS/ 15 m

Date des travaux : 2005

Etat du forage : fructueux

<p><b>COUPE GEOLOGIQUE</b>  0-08m : argile sableuse avec très peu de gravier .  08-25m : sable avec des passage d'argile.  25-30m : gravier avec peu d'argile et sable.  30-32m : marne avec peu de gravier.  32-42m : gravier avec très peu d'argile et des</p>	<p><b>EQUIPEMENT</b>  0-5 m : tube guide Ø20"  0-25m : tube plein Ø13"3/ 8  25-50m : tube crépiné Ø13"3/ 8  50 - 60 : tube plein Ø13"3/ 8  60-80 m : tube crépiné Ø13"3/ 8</p>
--	--

sables. 42-78m :marne grise et des gravier. 78-96m :marne grise avec très peu de gravier. 96-120m :marne grise. 120-150m : marne grise avec très peu de gravier. 150-200m :marne et des gravier. 200-225m :marne grise avec très peu de gravier. 225-233m :marno calcaire et gravier . 233-241m :gravier grossier marno calcaire. 241-250m :marne grise (présence de craie).	80-85 m : tube plein Ø13"3/ 8 85-95 m : tube crépiné Ø13"3/ 8 95-105m : tube plein Ø13"3/ 8 105-125m : tube crépiné Ø13"3/ 8 125-130m : tube plein Ø13"3/ 8 130-131m : cone de reduction 131-140m : tube plein Ø8" 140-160m : tube crépiné Ø8" 160-175m tube plein Ø8" 175-200m : tube crépiné Ø8" 200-220m : tube plein Ø8" 220-245m : tube crépiné Ø8" 245-250m : tube plein Ø8"avec sabot.
---	---

**FORAGE (IJ34)**

<b><u>COUPE GEOLOGIQUE</u></b>	<b><u>EQUIPEMENT</u></b>
0-7m : argile rosâtre avec des graviers de calcaire blanchâtre et jaunâtre	0-5m : tube guide Ø20"
1-10 : Argile brune avec des graviers de calcaire	0-10m : tube plein Ø13" <sup>3/8</sup>
10-32m : gravier de calcaire siliceux blanchâtre (ou conglomérat)	10-35m : tube crépiné Ø13" <sup>3/8</sup>
32-130m : marne grise de compacité variable	35-40 m : tube plein Ø13" <sup>3/8</sup>
	40-130m : troue nu :-Ø12" <sup>1/4</sup> de (40-117m) - Ø8" <sup>1/2</sup> de (117-130m)

**FORAGE (I40)****COMMUNE : F'kirina****Carte : F'kirina N°176****X : 919.400****Y : 214.900****Z : 870m****Prof forée : 257 m****prof équipée : 226 m****Débit mob: 268.6m<sup>3</sup>/h , débit exp : / l/s , ND/ 5.3 m , NS/ 11.22m****Date des travaux : 9/07/77 au 5/09/77****Etat du forage : fructueux**

<u>COUPE GEOLOGIQUE</u>	<u>EQUIPEMENT</u>
0-7m : argile brune et calcaire	0-6 m : tube guide Ø20"
7-11m : blocs de calcaire cimentés avec des débris de calcaire siliceux	0-7m : cimentation Ø13" <sup>3/8</sup>
11-14m : graviers de calcaire siliceux : blanc, rosâtre et grisâtre	7-46m : tube crépiné Ø13" <sup>3/8</sup>
14-28m : argile rougeâtre contenant beaucoup de gravier blanc	46-52m : tube plein Ø8"
28-32m : dépôt de graviers, galets de calcaire siliceux	52-95m : tube crépiné Ø8"
32-100m : calcaire siliceux blanchâtre, rosâtre et grisâtre	95-100 m : tube plein Ø8"
100-101m : calcaire argileux gris foncé compact	

**Tableau de la pluviométrie (mm). Station de Fkirina(1975-1997).**

années	Sep	oct	nov	Déc	Jan	Fév	Mars
	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout		
1987	12,5	60,9	127,8	21,0	5,7	25,9	32,4
	29,2	15,4	4,5	17,5	23,4		
1988	66,1	21,6	15,1	21,8	26,2	20,5	12,2
	12,7	19,5	15,3	8,7	7,2		
1989	12,7	15,6	17,6	16,5	6,3	37,1	16,5
	27	21,1	72,2	8,8	54,8		
1990	55,6	18,7	88,4	49,1	25,3	29	76,4
	54,1	16	26,8	6	5		
1991	26,2	75,9	28,6	15,1	41,6	66,2	88,2
	61,2	82,9	3,4	50,2	15,1		
1992	9,6	38,1	27,9	123,2	11,4	42,4	16
	7,2	41,5	3,1	0,9	13,5		
1994	11,3	40,6	12,3	63,8	42,9	33,1	15,4
	20,1	9,9	0,6	0,5	0		
1995	138,3	79,8	23,2	21,3	72	121,7	64,9
	36,2	48	28,8	21,4	20,8		

1996	27,4	3,3	5,4	23,7	30	6,3	23,8
	19,9	8	40	5,1	25,3		
1997	100,3	54,8	71,8	55,0	5,1	25,9	32,4
	67,4	27,6	27,2	1,1	24,2		
1998	53,5	42,4	53,3	21,1	74,3	14,6	45,4
	10,9	34,1	19,2	28,8	18,4		
1999	65,9	15,3	47,1	53,7	6,4	0	10,8
	8	68,2	46,2	0	15,2		
2000	89,1	40,5	12,4	24,2	52,4	17,9	12,5
	18,9	64,7	0	1,6	15,3		
2001	65,7	41	49,8	12,5	6,3	19,3	5,6
	25,5	41,9	11,6	46,2	83,4		
2002	26,6	25,6	64,4	46,4	184,6	59,3	30,1
	90,1	34,8	26	0	6,2		
2003	45,6	90,1	26,8	72,4	30,6	5	44,4
	25,8	145,2	56	10,9	37,7		
2004	10,4	8,4	127	138,7	19,1	48,5	15,4
	46,8	22,6	28,8	5,8	10		
2005	35,4	16,2	21,6	44,4	81,3	26,7	12,5
	33	78,2	8,1	17,9	24,7		
2006	10,9	24,9	15,9	47,8	9	14,8	104,7
	30,6	32,8	8,5	0	2,5		
2007	46,7	34,6	15,4	41,2	10,6	11,4	43,2
	17,2	73,3	30	15,6	14,5		

**Données pluviométrique moyenne mensuelle station d'Ain el Beida 1987-2007**

1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
	1995	1996	1997	1998	1999		
Septembre	26,2	22,0	23,1	21,5	20,40	20,2	21,5
	22,3	30,6	21,35	21,58			
octobre		16,1	17,4	13,9	12,10	14,1	16,3
	18,5	17,7	16,09	16,78	15,23		
novembre	10,1	10,1	14,8	11,3	10,20	9,4	11,2
	12,3	12,5	12,51	11,32			

Décembre	8,1	7,5	12,0	9,5	7,90	6,2	10,6
	8,8	9,0	9,66	8,30			
Janvier	6,1	6,3	6,4	6,9	6,60	6,6	5,8
	6,7	8,1	9,20	7,80	6,99		
Février	5,9	4,4	7,7	12,8	9,40	6,7	6,1
	5,7	6,9	9,64	8,33	5,95		
Mars	9,3	6,0	13,2	11,9	14,50	7,9	7,0
	7,7	9,0	10,19	9,85	10,77		
Avril	13,7	11,8	14,6	13,5	17,60	13,3	14,0
	15,4	14,8	13,46	15,13	14,72		
Mai	16,8	17,0	17,9	10,3	23,70	16,3	16,2
	18,8	19,5	22,98	17,69	32,20		
Juin	23,2	20,8	23,0	25,5	24,20	25,3	23,3
	25,0	26,8	28,48	26,07	26,72		
Juillet	26,6	25,2	26,3	25,9	26,00	25,7	25,0
	27,8	29,6	28,43	28,19	28,38		
Aout	26,5	26,5	28,2	23,7	15,33	26,6	26,4
	27,5	29,1	27,23	27,12	30,48		

**Températures moyennes annuelles de la station d'Ain Beida (1987-2007)**



Articles et communications :

***Publication***

Article :

Djoudi Salima, Houha Belgacem 2017. The hadrochemical characterization of the upper plains aquifers: case of the plain of F'kirina Ain-Beida, Northeastern Algeria 92 (2017) 90–97 October doi: 10.5004/dwt.2017.21507.

***Participation au colloque***

- Séminaire nationale, défis agricole **SNDA Khenchela 2013.**
- Séminaire nationale de biotechnologie, biodiversité et développement durable **Khenchela 2013.**
- Séminaire nationale eau environnement et biodiversité **Khenchela 2014.**
- Séminaire nationale sur l'eau et l'environnement dans les zones arides Ouargla **2015.**
- Séminaire internationale sur les biotechnologie appliquées a l'agriculture, la santé et l'environnement **Khenchela 2016**



## The hydrochemical characterization of the upper plains aquifers: case of the plain of F'kirina Ain-Beïda, Northeastern Algeria

Djoudi Salima<sup>a,\*</sup>, Houha Belgacem<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Faculty of Natural and Life Sciences, Department of Ecology and Environment, Laboratory Water, Environment and Renewable Energy, University of Abbes Laghrour, Khenchela, BP 40000, Algeria, Tel. +213 663837937; email: Djoudi.ecologie@gmail.com

<sup>b</sup>Laboratory Water, Environment and Renewable Energy, University of Abbes Laghrour, Khenchela, BP 40000, Algeria, email: bhouha@yahoo.fr

Received 27 January 2017; Accepted 29 September 2017

### ABSTRACT

Groundwater is one of the main sources of drinking water supply for the population and crops irrigation in the F'kirina area, which is located in the northeastern part of Algeria, characterized by a semi-arid climate. This work aims to evaluate the hydrochemical characteristics of an aquifer located between carbonated formations and salt lake (Garâat Ettarf). Hydrochemical, multivariate statistical, and thermodynamics techniques were used to investigate the hydrochemical evolution within the aquifer. A total of 45 groundwater samples were collected from this area during May 2015 and analyzed for various physical and chemical parameters. The results indicate that this water is classified as Ca-HCO<sub>3</sub> water types in carbonate outcrops as Ca-SO<sub>4</sub> and Cl-Ca type in the Plio-Quaternary filling in the direction of the Sebkha. The hydrochemical study shows that the electrical conductivity of the water ranges from 220 to 6,700 µS/cm. Chemical tracing had focused on the major elements and some traces to the process responsible for water mineralization acquisition. The intersection of the major elements with the chloride ion showed that the salinity of the water is due to water–rock interaction, cation exchanges and anthropogenic pollution. The principal component analysis reveals three factors that express 61.8% of the total variance in water quality datasets. The first factor is salinization, which shows strong associations between SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, CE, M, TH, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and Na<sup>+</sup>. The second factor represents the opposition of two poles, freshwater to polluted water, the first is constituted of bicarbonates HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> reflecting freshwater that opposes polluted water caused by nitrate. The third factor is determined in its positive part by temperature and in its negative part by pH. It should be noted that aquifers waters are oversaturated with respect to calcite, dolomite and aragonite, but they are rather undersaturated with respect to halite, gypsum and anhydrite.

*Keywords:* Groundwater; Water chemistry; Salinity; Saturation; F'kirina; PCA

### 1. Introduction

Groundwater is the major source of water for drinking, irrigation and industrial uses in many arid and semi-arid regions of the world [1]. Growing population, agricultural expansion and urbanization placed a heavy demand on water resources which are among the challenging issues especially in arid and semi-arid regions where the fresh

water resources are limited [2]. Long-term and large-scale exploitation of mineral resources and rapid development of agricultural production dramatically contributed to the deterioration shallow groundwater ecological environment deterioration, aquifers destruction, groundwater level decline, surface runoff decrease, spring cutoff, groundwater pollution and so on [3].

Many workers have monitored the groundwater quality and tried to correlate it with the natural processes that affect groundwater quality such as precipitation chemistry nature

\* Corresponding author.

and amount of recharge, type of rock/soil in the region, degree of rock weathering, etc. [4,5]. The presence of a salt lake hydraulically connected to groundwater also changes the water salinity by reversing the flow to groundwater due to overexploitation of this latter [6]. Studies of the major ions have been used to identify the hydrochemical facies of the water. Several researchers evaluated the groundwater chemistry and considered hydrogeochemical processes by developing geochemical modeling and adopting graphical methods for the interpretation of water quality indices [7–9].

The studied area is located within the semi-arid zones of Algeria, it is characterized by scarcity and uneven distribution of water resources and groundwater is the main supplier for domestic industrial and agricultural purposes. This paper aims to identify the main processes controlling the hydrochemistry of the groundwater of F'kirina, to meet this objective; we used geographic information system (thematic maps), conventional graphical plots, geochemical equilibrium modeling (PHREEQC) and statistics (correlation matrix, principal component analysis (PCA). The combination of hydrogeochemical tools and statistical analysis was applied to investigate the properties of groundwater among the sampling sites. The results of this study help to understand F'kirina aquifer and to give insights for a better management of the groundwater sources.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Study area

The study area is located in the North of Algeria between 35°49'42"N to 35°8'30"N and 7°0'18"E to 7°5'6"E. This region

covers an area of approximately 540 km<sup>2</sup>. It is limited to the North by the line of water formed by Djebel El Galaa Kebira (1,246 m) and Djebel Ammamrat El Kebira (1,203 m), on the South by the line of water formed by Djebel Boutekhma (1,291 m) and Djebel Amer (1,259 m) to the East by the watershed line formed by Djebel El Medjifla (1,174 m) and Djebel Fedjidjet (1,291 m) and to the West by a large flat area marking the limit of the Constantine upper plains and by Garâat Ettarf (Fig. 1).

### 2.2. Geology and hydrogeology

The lithostratigraphy of the study area extends from Triassic to Quaternary series presented as follows (Fig. 2). In the study area, Triassic outcrop was observed Northeast and Southwest of Ain Delâa and F'kirina. Cretaceous formations are represented by marl-limestone with platelet limestone at the base; they also outcrop on the surface in the northern margin of Ain Beïda where they are highly fractured. The Eocene formations show marl and a carbonate sequence separated by slight sandstone. Miocene outcrops are of small dimensions and are distributed in the southern part of the plain. So it is a series composed of a set of marl-limestone at the top and a set of thick limestone at the center of the series.

Pliocene is made up of continental detrital deposits of sand, conglomerates, marls and reddish clays. Quaternary deposits covered most of the plains; these deposits are very varied. Sedimentation, however, is mainly made up of clay and marl.

The dominant formations in the study area (Fig. 3) are represented in their entirety by carbonate formations of the

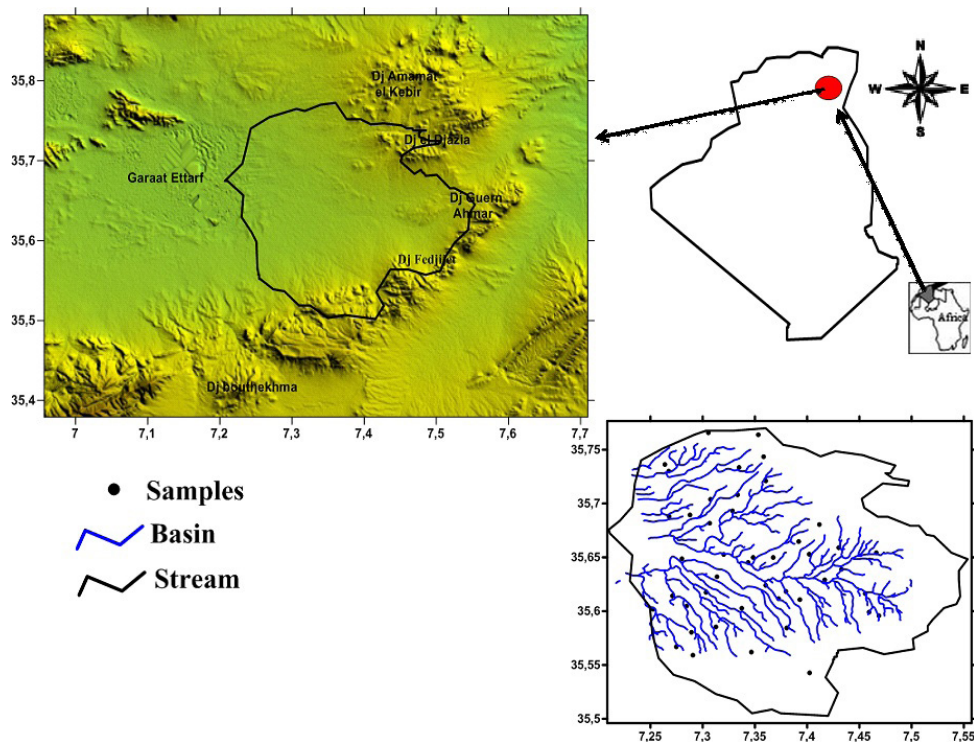


Fig. 1. Location of the study area.

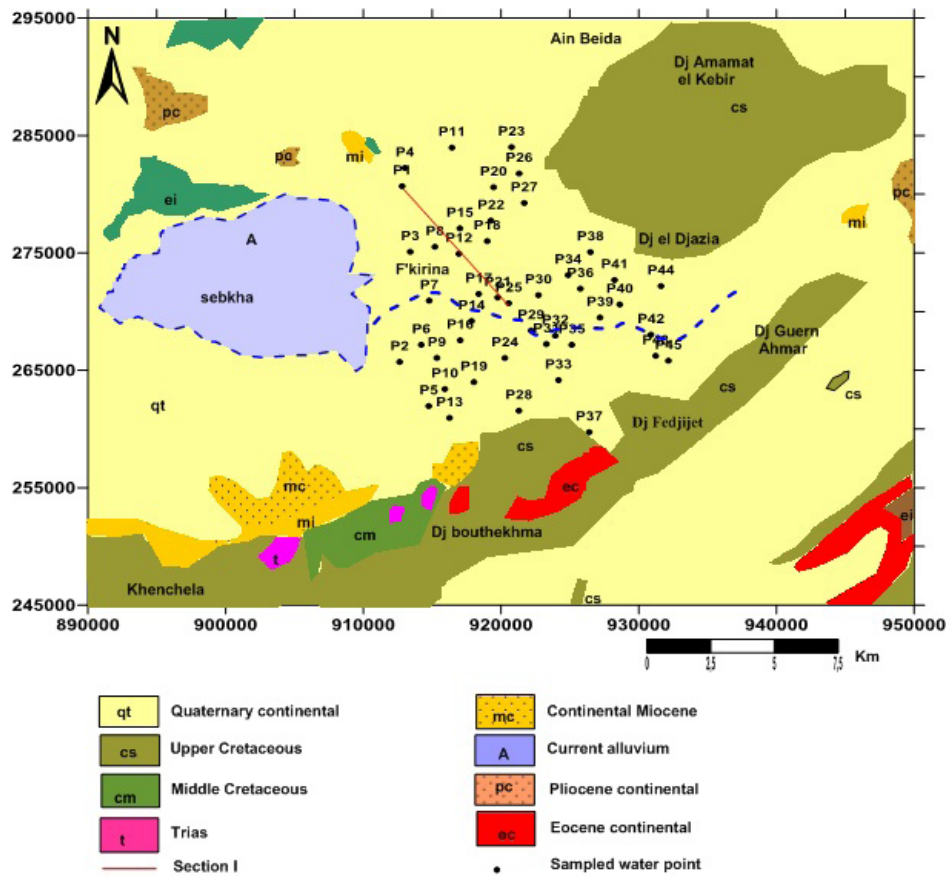


Fig. 2. Geological map of the study area.

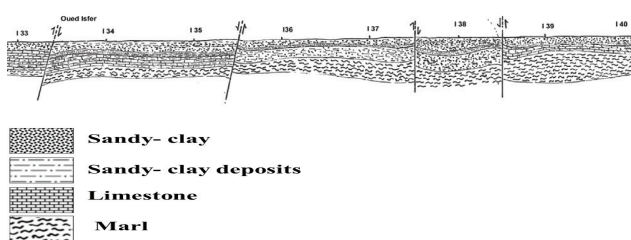


Fig. 3. Hydrogeological cross section located in the F'kirina plain Profile I (source: ANRH).

Upper Cretaceous covered by more recent age formations Mio-Plio-Quaternary; the training of the Upper Cretaceous formation is cracked and forms a supportive environment for the accumulation of groundwater [10].

### 2.3. Method of sampling and analysis

Groundwater samples can provide a lot of information on a water source such as nutrient content, pollution detection and bacterial counts. Water sampling is a technique used to analyze water from a variety of sources [11–13].

This study is based on analysis of 45 samples and the monitoring of the 21 piezometers covering the whole study

area. Hydrochemical analyses were performed in LACILAP Laboratory (Ain M'lila, Algeria, May 2015) by the ion chromatography method. This method was used to determine concentrations of major elements; some physicochemical parameters were measured onsite such as water temperature, electrical conductivity (EC) and pH. Interpretation of the results (Table 1) is displayed numerically and graphically as saturation index (SI) by means of PHREEQC [14] and the chemical facies by the program DIAGRAM of the University of Avignon to better understand hydrochemical processes occurring in the aquifer.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Piezometric study

The hydrodynamic study allowed us to characterize the flow and get a first grasp of the aquifers. This relationship has been further clarified in the hydrochemical study [15]. The piezometric study is in large part based on piezometric data collected during June 2012 campaign.

Analysis of the piezometric map (Fig. 4) shows that all water is drained by the Sebkhia of Garâat at – Tarf which form the natural discharge area of the plain along an axis of direction SE-NW.

The disposition of the heads with respect to the limestone outcrops suggests that water comes from the carbonate formations.

### 3.2. Hydrogeochemical investigation

#### 3.2.1. Electrical conductivity

EC is a measure of water capacity to convey electric current [16]. The value of EC may be an approximate index of the total content of dissolved substance in water. It depends upon temperature, concentration and types of ions present [17].

The spatial variation in measures of EC (Fig. 5) suggests that water salinity increases in the flow direction to reach very high values of EC and exceeds 1,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  within the confines of the Sebkhah. In limestone outcrops, the EC shows relatively low and consistent values.

#### 3.2.2. Hydrochemical facies

As water flows through an aquifer it acquires a characteristic chemical composition as a result of interaction with the surrounding rock and soil. The term “hydrochemical facies”

is used to describe the bodies of groundwater in an aquifer, which is different from their chemical composition [18].

The concept of hydrochemical facies is based on the assumption that the chemical composition of groundwater at any point tends toward chemical equilibrium with the matrix rocks under the prevailing conditions. Hydrochemical facies interpretations are useful tools for determining the flow patterns origins and chemical histories of groundwater masses [19].

The evolution of hydrochemical parameters of groundwater can be understood by plotting the concentration of major cations and anions in the Piper trilinear diagram [20].

The representation of the results of chemical analyses on the Piper diagram defines three families of water: starting from the limestone outcrops, water is  $\text{Ca-HCO}_3$  type in the Plio-Quaternary filling passes through  $\text{Ca-SO}_4$  water type and finishes as  $\text{Ca-Cl}$  water type near the Sebkhah (Fig. 6).

### 3.3. Mechanisms controlling groundwater chemistry

Gibbs plot [21] is mainly used to understand the relationship between water compositions with their respective aquifer characteristics such as water–rock interaction, rainfall dominance (chemistry of precipitated water) and evaporation dominance (rate of evaporation) for groundwater chemistry. In the present study area the dominant anions ( $\text{Cl}$  and  $\text{HCO}_3$ ) and cations ( $\text{Na}$ ,  $\text{K}$  and  $\text{Ca}$ ) are plotted against their respective total dissolved solids (Fig. 7). The Gibbs plot suggests that most of the samples fall into weathering zone and gives an indication of chemical weathering of rock-forming minerals influencing the groundwater quality by dissolution of rock through which water is circulating under the subsurface [22] and the chemistry of the groundwater is mainly controlled by complex geochemical mechanisms. The samples falling on evaporation dominance area may be due to semi-arid environmental climate conditions and surface contamination sources, primarily an excessive use of fertilizers in irrigation return flow. Industrial outflows and domestic discharges may also be the associated factors which ultimately lead to the increase in salinity with  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  due to evaporation. This study reveals that both evaporation and rock weathering (e.g., granitic rocks) are responsible for groundwater chemistry.

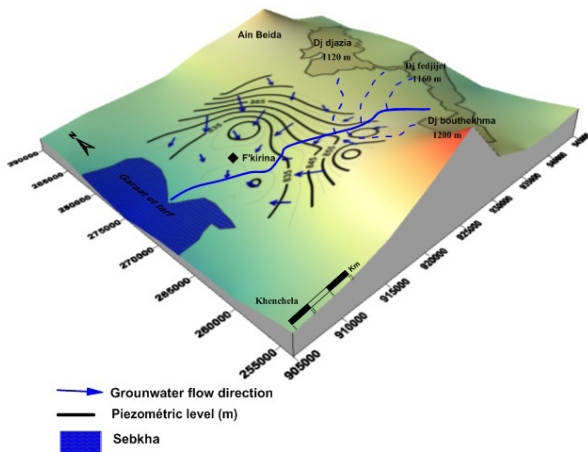


Fig. 4. Piezometric map of F'kirina aquifer in June 2012.

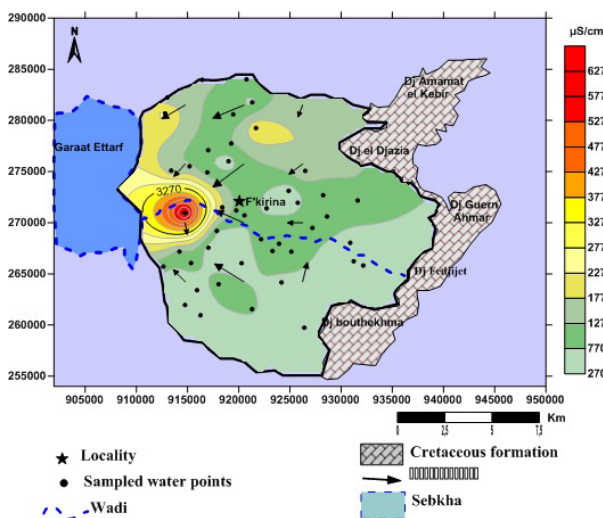


Fig. 5. Distribution map of electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) in the study area.

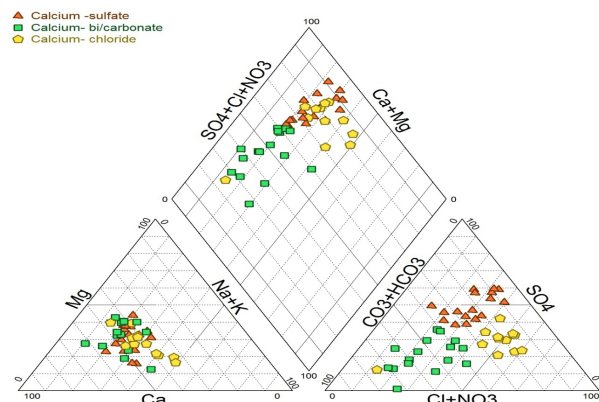


Fig. 6. Piper diagram of the groundwater samples.

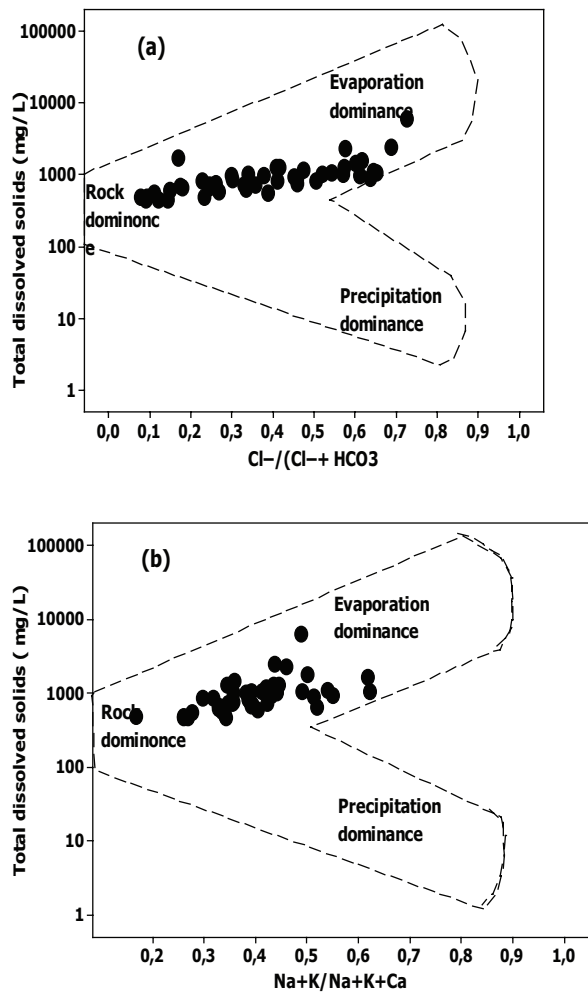


Fig. 7. Mechanism controlling the chemistry of groundwater (after Gibbs [21]): (a) dominant anion  $Cl^-$  and  $HCO_3^-$ , (b) dominant cation  $Na^+$ ,  $K^+$  and  $Ca^{2+}$ .

### 3.4. The saturation index

Chemical equilibrium of groundwater for a particular mineral can be identified by calculating saturation indices.

$SI = \log(IAP/K_s)$ ; where IAP is the ion activity product and  $K_s$  is the solubility product of the mineral. Saturation indices were calculated for calcite, halite, dolomite and gypsum. The saturation indices describe quantitatively the deviation of water from equilibrium with respect to dissolved minerals. If the water is exactly saturated with the dissolved mineral, SI equals zero; SI positive values indicate saturation, and negative ones indicate under saturation.

The use of WATEQ-F [23] program allowed us to calculate the SI (Fig. 8) of calcite, aragonite, dolomite, gypsum, anhydrite and halite (Table 2).

According to the saturation indices table, all groundwater samples are supersaturated with respect to calcite and dolomite and aragonite, whereas gypsum, anhydrite and halite are undersaturated, only the carbonate minerals tend to rush; however, the evaporate minerals are always in dissolution state.

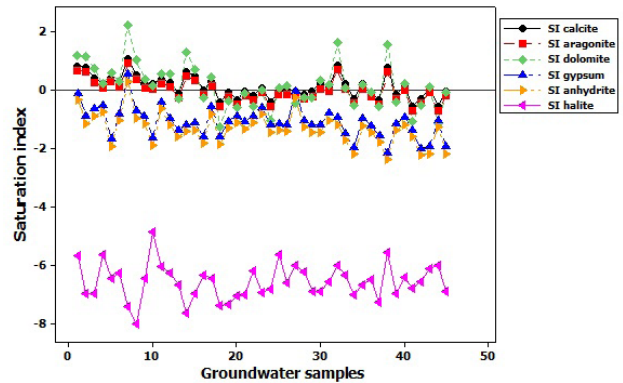


Fig. 8. Saturation index evolution (SI).

### 3.5. Origin of salinity

To highlight different mechanisms contributing to groundwater mineralization, bivariate diagrams of major elements and chloride were investigated (Fig. 9). The  $Na^+ - Cl^-$  relationship has often been used to identify mechanisms responsible for the origin of water salinity in arid and semi-arid regions [24].

The relationship between  $Na^+$  and  $Cl^-$  (Fig. 9(A)) shows that all the points are below the dissolution line. As the  $Na^+$  content should balance the  $Cl^-$  content, the deficit in  $Na^+$  is explained by the cationic exchange between the solution and the mineral resulting in a  $Na^+$  adsorption and release of  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  (Fig. 9(F)).

The diagrams  $Ca^{2+} - Cl^-$  (Fig. 9(B)) and  $Mg^{2+} - Cl^-$  (Fig. 9(C)) show an enrichment of water in earth alkali. This indicates the phenomenon of cation exchange where the clay absorbs sodium and free calcium and magnesium in the solution. Calcium ion intake would also be attributed to the gypsum dissolution. The relationship between  $SO_4^{2-}$  and  $Cl^-$  (Fig. 9(D)) shows that all the points are above the mixing line of fresh and saline water. The enrichment of the sulfates points is related to the presence of evaporates dissolution of gypsum and/or an agricultural contamination. In the study area the infiltration of irrigation waters loaded with salt and fertilizers is facilitated by good permeability of the soil and a shallow depth of the water. The relationship between  $K^+$  and  $Cl^-$  (Fig. 9(E)) indicates that the majority of points are located at the bottom of the mixing line except a few points that are closer to the line showing that the most likely origin of the  $K^+$  is an agricultural pollution and the sylvite dissolution.

### 3.6. Statistical analysis

#### 3.6.1. Correlation matrix

Multivariate statistical analysis was applied for 13 water parameters utilizing correlation matrix and PCA. First the relationships between different water variables were determined using Pearson's correlation coefficient (Table 3).

#### 3.6.2. Principal component analysis

PCA is a powerful technique for pattern recognition that attempts to explain the variance of a large set of intercorrelated

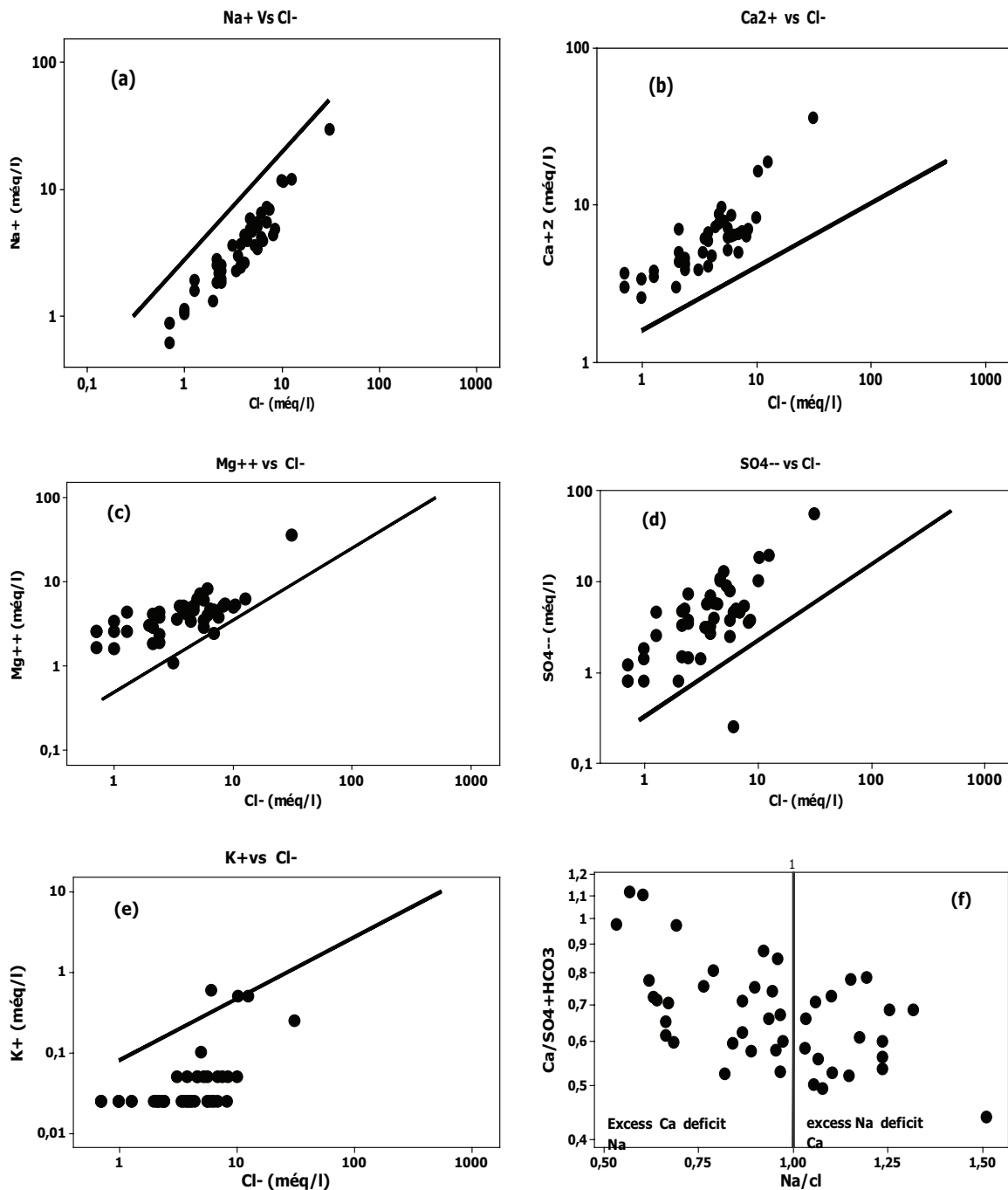


Fig. 9. Relationships between major elements in the analyzed groundwater samples: Na/Cl (A), Ca/Cl (B), Mg/Cl (C), SO<sub>4</sub>/Cl (D), K/Cl (E) and Ca/SO<sub>4</sub>+HCO<sub>3</sub>/Na/Cl (F).

variables. It indicates association between variables, thus reducing the dimensionality of the dataset [25].

The projection of the variables and individuals on the factorial axes F1 – F2 allows extracting figures.

The factor F1 (Fig. 10) expresses 61.8% of the total variance and shows a positive correlation with the elements (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CE, M, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>). It is an axis of mineralization. The screening of individuals (Fig. 11) shows that this group is well presented by the points (P7).

The factor F2 expresses 9.7% of the variance; it represents the opposition of two poles freshwater formed by the bicarbonates HCO<sub>3</sub> to the polluted water formed by nitrate ions.

The factorial axis F3 (Figs. 12 and 13) expresses 7.9% of the total inertia; it is determined in its positive part by temperature and negative part by pH. It is a contrast between the deep slow water to airy surface water.

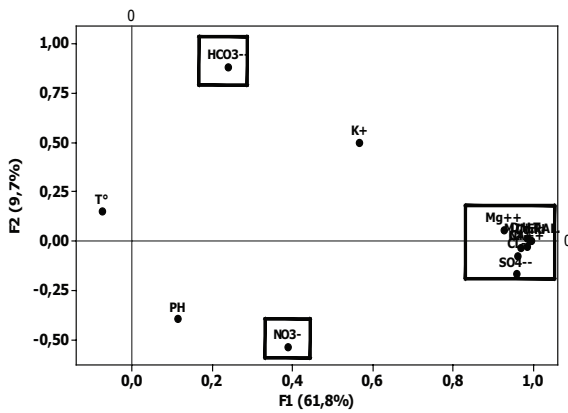


Fig. 10. Variables (axes F1 and F2: 71.5 %).

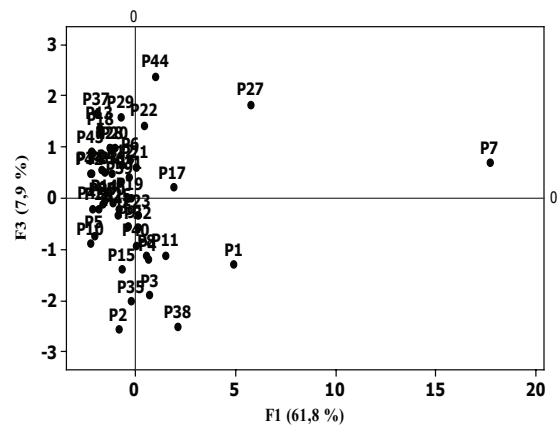


Fig. 13. Individual (axes F1 and F3: 69.7%).

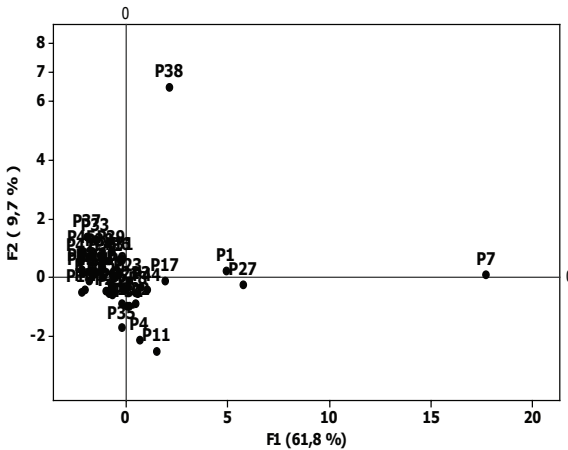


Fig. 11. Individuals (axes F1 and F2: 71.5 %).

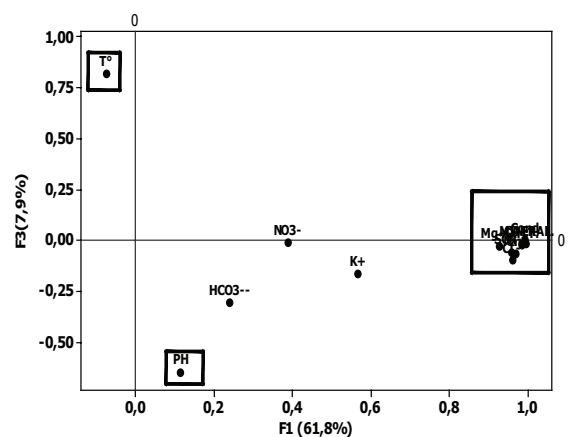


Fig. 12. Variables (axes F1 and F3: 69.7%).

4. Conclusion

The study of hydrogeochemical characteristics of water in the F'kirina area was conducted from the combination of chemical, hydrogeological and statistical multivariable analysis methods. The hydrochemical study of the F'kirina plain showed that water is moderately to highly mineralized;

Table 1  
Statistical parameters of the chemical elements in groundwater

	Min	Max	Mean	SD	WHO
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/L	101	1,046	229.578	138.760	–
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , mg/L	3	2,645	278.711	412.770	400
Cl <sup>-</sup> , mg/L	10	1,085	157.111	172.586	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/L	0	124	35.222	30.956	50
M, mg/L	372	5,704	945.156	831.624	–
Ca <sup>++</sup> , mg/L	37	705	119.533	108.931	–
Mg <sup>++</sup> , mg/L	2	412	41.600	59.298	0.50
Na <sup>+</sup> , mg/L	1	665	85.644	108.036	–
K <sup>+</sup> , mg/L	1	20	2.756	4.872	–
TDS, mg/L	451	6,100	1,047.38	884.460	–
EC, μS/cm	437	6,710	1,106.356	965.560	2,500
pH	6.7	8	7.323	0.302	6.5–8.5

Min, minimum; Max, maximum; SD, standard deviation.

Table 2  
Statistical summary of thermodynamic speciation (saturation indices of some minerals calculations using PHREEQ

Variable	Min	Max	Mean	SD
Calcite	-0.560	1.080	0.126	0.382
Aragonite	-0.710	0.940	-0.022	0.382
Dolomite	-1.260	2.250	0.142	0.756
Gypsum	-2.150	0.550	-1.088	0.541
Anhydrite	-2.390	0.310	-1.326	0.540
Halite	-7.88	-5.58	0.566	-6.712

conductivity is generally high and oscillates between 320 μS/cm and 6,500 μS/cm. The hydrochemical classification of water from Piper diagram shows that water fall into three water types. These are Ca-HCO<sub>3</sub>, Ca-SO<sub>4</sub> and Ca-Cl types. The use of SI and binary diagram allowed us to understand that the waters mineralization process comes from water–rock interaction, evaporates leaching, agricultural pollution and cation exchange. The PCA and Gibbs diagram clearly reveal that the major factors affecting the chemical budget of water are anthropogenic activities

Table 3  
Matrix of Spearman's correlation coefficients between the physicochemical parameters

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	M	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	TH	EC	PH	T°
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1												
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.041	1											
Cl <sup>-</sup>	0.138	0.902	1										
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.319	0.364	0.411	1									
M	0.235	0.964	0.963	0.351	1								
Ca <sup>++</sup>	0.190	0.961	0.936	0.423	0.982	1							
Mg <sup>++</sup>	0.279	0.912	0.881	0.160	0.939	0.886	1						
Na <sup>+</sup>	0.182	0.925	0.972	0.377	0.972	0.946	0.865	1					
K <sup>+</sup>	0.600	0.410	0.469	0.308	0.535	0.589	0.354	0.523	1				
TH	0.238	0.966	0.937	0.307	0.990	0.974	0.968	0.934	0.491	1			
EC	0.241	0.962	0.960	0.326	0.998	0.973	0.949	0.969	0.510	0.990	1		
PH	-0.068	0.158	0.058	0.099	0.110	0.102	0.088	0.103	-0.064	0.098	0.129	1	
T°	-0.075	-0.052	-0.027	-0.113	-0.062	-0.065	-0.056	-0.011	-0.056	-0.063	-0.074	-0.260	1

and water–rock interaction. The use of the SI and binary diagram allowed us to understand the process of mineralization of waters comes from water–rock interaction. The leaching of evaporates agricultural pollution and cation exchange. The main component analysis and Gibbs diagram clearly reveal that the major factor affecting the chemical budget of water is due to anthropogenic activities in addition to rock–water interaction.

## References

- [1] K. Arina, U. Rashid, H. Haris, Hydrochemical characterization of groundwater in lower Kali watershed, Western Uttar Pradesh, *J. Geol. Soc. India*, 86 (2015) 195–210.
- [2] M. Al-Ahmadi, Hydrochemical characterization of groundwater in wadi Sayyah, Western Saudi Arabia, *Appl. Water Sci.*, 3 (2013) 721–732.
- [3] Y. Qingchun, W. Luchen, M. Hongyun, Y. Kun, D. Jordi, Hydrochemical characterization and pollution sources identification of groundwater in Salawusu aquifer system of Ordos Basin, China, *Environ. Pollut.*, 216 (2016) 340–349.
- [4] R. Umar, F. Alam, Assessment of hydrogeochemical characteristics of groundwater in parts of Hindon–Yamuna interfluvial region Baghpat District, Western Uttar Pradesh, *Environ. Monit. Assess.*, 184 (2012) 2321–2336.
- [5] S. Atal, P. Negrel, H. Pauwels, C. Mascré, S. Ahmed, Double correction technique for characterizing groundwater quality zones: a case study from granitic setting, India, *Water Qual. Exposure Health*, 2 (2011) 133–146.
- [6] A. Boudoukha, D. Khammoudj, L. Djabri, Consequence of an overexploitation of aquifers in semi-arid countries: the case of the superficial aquifer El Eulma (Eastern Algeria). Groundwater in Mediterranean countries, *Pub. Inst. Geol. Min. Esp. Series Hydro. Aguas Subt.*, 17 (2006) 459–465.
- [7] M. Jalali, Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example from Tajarak, Western Iran, *Environ. Geol.*, 6 (2007) 1133–1149.
- [8] N.C. Mondal, V.P. Singh, V.S. Singh, V.K. Saxena, Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry, *J. Hydrol.*, 388 (2010) 100–111.
- [9] E. Wanda, M. Monjerezi, F. Mwatseteza, L.N. Kazembe, Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality from weathered basement aquifers in Northern Malawi, *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C*, 361 (2011) 1197–1207.
- [10] ANRH études de formation aquifère de la région de Fkirina, Agence national des ressources hydrique, 2012.
- [11] Z. Chen, Z. Bai, B.K. Sinha, *Ranked Set Sampling Theory and Applications*, Springer, New York, 2004.
- [12] A.G. Dehnavi, R. Sarikhani, D. Nagaraju, Impact of arsenic on environmental geochemistry of South East of Kurdistan Iran, *Nature Environ. Pollut. Technol.*, 10 (2011) 473–480.
- [13] R. Sarikhani, Z. Kamali, Ghassemi, A. Dehnavi, R.Z. Sahamieh, Correlation of lineaments and groundwater quality in Dasht-e-Arjan Fars SW of Iran, *Environ. Earth Sci.*, 72 (2014) 2369–2387.
- [14] D.L. Parkhurst, C.A.J. Appelo, PHREEQC for Windows Version 1.4.07, A Hydrogeochemical Transport Model, US Geological Survey Software, Washington, 1999.
- [15] R. El Moukhar, M. Bahir, P. Carreira, Estimation of groundwater recharge in arid region through hydrochemistry and isotope case study Kourimat basin morocco, *Larhyss J.*, 23 (2015) 1112–3680.
- [16] WHO (World Health Organization), *Guidelines for Drinking-Water Quality*, Vol. 1, 4th ed., World Health Organization, Geneva, 2006.
- [17] J.D. Hem, *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters*, 3rd ed., USGS Water Supply Paper 2254, 1985, pp. 117–120.
- [18] P. Ravikumar, R. Somashekar, A geochemical assessment of coastal groundwater quality in the Varahi river basin Udipi district Karnataka state India, *Arabian J. Geosci.*, 6 (2013) 1855–1870.
- [19] S. Ramin, G.D. Artimes, A. Zeinab, K. Nasrollah, Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment in Bushehr Province, SW Iran, *Environ. Earth Sci.*, 74 (2015) 6265–6281.
- [20] A.M. Piper, A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses, *Trans., Am. Geophys. Union*, 25 (1994) 914–923.
- [21] R.J. Gibbs, Mechanisms controlling world water chemistry, *Science*, 17 (1970) 1088–1090.
- [22] S. Selvakumar, K. Ramkumar, N. Chandrasekhar, N.S. Magesh, S. Kaliraj, Groundwater quality and its suitability for drinking and irrigational use in the southern Tiruchirappalli district, Tamil Nadu, India, *Appl. Water Sci.*, 7 (2017) 411–420.
- [23] L.N. Plummer, B.F. Jones, A.H. Truesdell, WATEQ-A FORTRAN IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters, Vol. 76, U.S. Geological Survey Water Resources. Washington, D.C., 1976, Revised (1978, 1984), pp. 13–61.
- [24] A. Guendouz, A. Moulla, W. Edmunds, K. Zouari, P. Shand, A. Mamou, Hydro geochemical and isotopic evolution of water in the complex terminal aquifer in the Algerian Sahara, *Hydrogeol. J.*, 11 (2003) 483–495.
- [25] P. Ravikumar, R. Somashekar, Principal component analysis and hydrochemical facies characterization to evaluate groundwater quality in Varahi river basin Karnataka state, India *Appl. Water Sci.*, 7 (2017) 745–755.

*Prénom: Salima*

*Nom: DJOUDI*

*Diplôme*  
*Doctorat LMD en Ecologie et Environnement*

*Intitulé*  
**VULNERABILITE ET RISQUE DE POLLUTION DES  
EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE  
F'KIRINA NORD EST ALGERIE.**

**Résumé**

Les eaux souterraines constituent l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable de la population et à l'irrigation des cultures de la région de F'kirina (sud est d'Oum el Bouaghi) et qui s'étend sur une superficie de 650 Km<sup>2</sup>, son contexte naturel et l'aridité de son climat, la plaine de F'kirina est un espace vulnérable et difficile à gérer.

La présente étude a permis d'avancer dans l'état de la connaissance hydrogéologique de cet aquifère, d'évaluer leur état d'affectation par la pollution et plus généralement d'apprécier le degré de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions. Après une étude exhaustive du cadre physique de la région d'étude rendant compte du contexte hydrogéologique du système aquifère étudié. L'étude hydrochimique des eaux de la nappe s'est basée sur l'interprétation des résultats d'analyses effectuées sur 45 échantillons d'eau prélevés au niveau de différents points d'eau lors d'une campagne d'échantillonnage réalisée en Mai 2015 qui définit trois faciès, les plus répandus sont le faciès bicarbonaté calcique, chloruré et sulfaté calcique. Le taux de nitrates est au-dessus des normes de l'OMS pour l'eau de boisson à cause à l'activité agricole.

L'étude statistique des différents paramètres analysés, de leur répartition spatiale et des principaux faciès a renseigné sur l'origine et l'évolution des minéralisations.

Une dernière partie a été consacrée à l'établissement d'une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions à travers la mise en œuvre la méthode G.O.D et DRASTIC qui montre que la nappe de la région de F'kirina à une vulnérabilité faible à modérée.

Le couplage entre les outils géologique, physicochimique, et statistique dans l'étude de la qualité des eaux souterraines de la plaine de F'kirina, nous a permis, de déterminer l'origine de la minéralisation et son mode d'acquisition ainsi que sa répartition dans l'espace.

**Mots clés** : eau souterraine, F'kirina, hydrochimie, faciès chimique, qualité des eaux, vulnérabilité, pollution, GOD, DRASTIC.

<b>Président</b>	<b>KADI Kenza</b>	<b>MCA, Université de Khenchela</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>HOUHA Belgacem</b>	<b>Professeur, Université de Khenchela</b>
<b>Examineur</b>	<b>GOUAIDIA Layachi</b>	<b>Professeur, Université de Tébessa</b>
<b>Examineur</b>	<b>KACHI Slimane</b>	<b>Professeur, Université de Guelma</b>
<b>Examineur</b>	<b>DARBOUCHE Abdelhk</b>	<b>Professeur, Université de Khenchela</b>