



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة زيان عاشور-الجلفة

Université Ziane Achour -Djelfa

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم العلوم الفلاحة و البيطرية

Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master académique

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Eau et Environnement

Thème :

Vulnérabilité des ressources en eaux souterraines à la pollution, cas de la nappe du Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa.

Présenté par : Boudiaf Zineb.

Kamel Hayat Faouzia.

Soutenu devant le jury :

M ^f Bouleknafet Zohir	M.C.B. Université de Djelfa	Président.
M ^f Haied Nadjib	M.C.A. Université de Djelfa	Promoteur.
M ^f Fougou Atif	M.C.B. Université de Djelfa	Co-promoteur.
M ^{me} Khadri Samira	M.C.B. Université de Djelfa	Examinatrice.
M ^f Mebarki Abdelouahab	M.A.A. Université de Djelfa	Examineur.

Année Universitaire : 2018/2019

ملخص :

ينتمي الجيب الجوفي لطبقة الميوسين-البليوسين-العصر الحديث (Mio-plio-quaternaire) للجيب الجوفي للطبقة المقعرة للجلفة إلى منطقة من مناطق الجزائر التي تتميز بمناخ شبه جاف. و لأن الجيوب الجوفية المكونة من الطمي، و من بينها الجيب الجوفي الذي هو بصدد الدراسة، هي الأكثر حساسية للتلوث لأنها تتأثر مباشرة بنوعية المياه النافذة. هذا العمل يهتم بتحديد مدى حساسية مياه جيبنا الجوفي للتلوث. هناك عدة طرق تستعمل لهذا الغرض، من بينها الطريقة المسماة DASTIC والمنجزة بالإستعانة بنظام المعلومات الجغرافية. أظهرت النتائج المتحصل عليها بوضوح أن المنطقة شديدة الحساسية للتلوث تقع جنوب مدينة الجلفة و ذات مساحة جد محدودة، المنطقة الجنوبية الغربية التي تتميز بإمكانياتها المائية المحدودة تنسم بحساسية متوسطة في حين المنطقة الشمالية الشرقية ذات الإمكانيات المائية العالية تعتبر ذات حساسية عالية للتلوث.

الكلمات المفتاحية : الجيب الجوفي لطبقة الميوسين-البليوسين-العصر الحديث، الجيب الجوفي للطبقة المقعرة للجلفة، حساسية، تلوث، الطريقة المسماة DASTIC.

Résumé :

La nappe Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa fait partie d'une région de l'Algérie qui se caractérise par un climat semi-aride. Puisque les nappes alluviales, et parmi eux notre nappe, sont les plus vulnérables à la pollution parce qu'elles sont directement influencées par la qualité des eaux infiltrées. Ce travail s'intéresse à la détermination de la vulnérabilité des eaux de notre nappe à la pollution. Plusieurs méthodes sont ainsi utilisées pour cet effet, parmi eux la méthode DRASTIC cartographié, dans notre cas, à l'aide d'un SIG. Les résultats obtenues montrent clairement que la zone fortement vulnérable se situe au Sud de la ville de Djelfa d'une superficie très limitée, la zone Sud-Ouest caractérisée par de faibles potentialité hydrique est moyennement vulnérabilité, alors que la zone Nord-Est présentant des potentialités hydriques considérables est fortement vulnérable à pollution.

Mot clés : Nappe Mio-plio-quaternaire, Synclinal de Djelfa, Vulnérabilité, Pollution, Méthode DRASTIC.

Abstract :

The Mio-plio-quaternary aquifer of the Djelfa Syncline is part of a region in Algeria which is characterized by a semi-arid climate. Since alluvial aquifers, and among them our aquifer, are the most vulnerable to pollution because they are directly influenced by the quality of the infiltrated water. This work focuses on the determination of the waters vulnerability to pollution of our aquifer. Several methods are thus used for this purpose, among them the DRASTIC method mapped, in our case, using a GIS. The results obtained clearly show that the highly vulnerable zone is located in the south of the Djelfa town with a very limited area, the South-West zone characterized by low water potentialities is moderately vulnerable, while the North-East zone with considerable water potentialities is highly vulnerable to pollution.

Key words: Mio-plio-quaternary aquifer, Djelfa syncline, Vulnerability, Pollution, DRASTIC method.

REMERCIEMENT

Avant toute chose je tiens à remercier Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience.

Un remerciement spécial à mes encadreurs, Monsieur **HAIED Nadjib** et Monsieur **FOUFOU Atif**. On ne peut pas jamais les remercier assez pour la confiance qu'il nous ont toujours accordée durant ce travail. Je les remercie aussi pour leurs aides précieuses, ces conseils judicieux, leur patience et surtout leur disponibilité.

Nous adressons nos remerciements aussi à Monsieur **Zohir Bouleknafet** et Monsieur **Abdelouahab Mebarki** et Madame **Samira Khadri** d'avoir accepter de faire partie du Jury.

On tiens à exprimer notre reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce modeste travail.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la mémoire

De mon frère : Boudiaf Samir

A ma mère : Dahdouh Khéira, mon ange gardien, ma source de tendresse d'amour et de foi en dieu.

A ma sœurs : Halima Saadia

A mon fiancé : Khatouti Riadh

A tous mes amis et à toute la famille.

A toute chère personne dans ma vie.

Boudiaf Zineb



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

Aux personnes les plus chers du monde et les plus chers à mon cœur, si patients, si nobles avec moi pendant mes années d'étude.

*A ma mère **Touahri Fatiha** source de force et de courage, qui a toujours été présente à mes côtés, avec sa tendresse et son amour n'a jamais cessé de donner de sa sympathie et de son éducation.*

*A mon frère **Djaloule** et ma sœur **Amel** qui m'ont entouré et soutenu.*

A tous ceux qui occupent une place dans ma vie, dans mon cœur

Que Dieu Les protèges

Kamel Hayat Faouzia

SOMMAIRE

Résumé.

Remerciement.

Dédicace.

Sommaire.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste des abréviations et des paramètres.

Introduction générale..... 01

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude.

I.1. Localisation.....	03
I.1.1.Situation géographique de la zone d'étude.....	03
A. 1- Caractéristiques physiques	03
B- Localisation du Synclinal de Djelfa	05
I. 2. Géologie et géomorphologie	05
I. 2. 1. Généralité	05
I. 2. 2. Aperçu géologique	07
I. 2. 3. Stratigraphie	09
I. 3. 1. Trias	09
I. 3. 2. Crétacé	10
I. 3. 2. 1. Néocomien	10
I. 3. 2. 2. Barrémien	09
I. 3. 2. 3. Aptien	11
I. 3. 2. 4. Albien	12
I. 3. 2. 5. Cénomaniens	12
I. 3. 2. 6. Turonien	12
I. 3. 2. 7. Sénonien	13
I. 3. 3. Néogène	13
I. 3. 3. Mio-pliocène	13
I. 3. 4. Quaternaire	13
I. 3. 4. 1. Quaternaire ancien	13
I. 3. 4. 2. Quaternaire moyen	13
I. 3. 4. 3. Quaternaire récent	14
I. 2. 3. Tectonique	14
I. 2. 3. 1 La partie centrale (axiale)	14
I. 2. 3. 2. Les flancs Nord et Sud du Synclinal	14

Le flanc Nord.....	14
Le flanc Sud	15
I. 2. 3. Géomorphologie	17
A- Les montagnes	17
B- Les dépressions	17
C- Les piémonts	17
D- Les plateaux	17
E- Les pentes	18
F- Sismicité	18
G- Le couvert Végétal	18
La steppe	19
Le matorral	19
I. 3. Conclusion	19

Chapitre II : Hydroclimatologie.

II. 1 Introduction	20
II. 2. Caractérisation du climat	20
II. 2. 1. Diagramme ombrothermique	20
II. 2. 2. Climagramme de Louis Emberger	21
II. 2. 3. Calcul de l'indice d'aridité de De Martonne	23
II. 2. 4. Calcul de l'indice d'aridité mensuel	23
II. 3. Les facteurs climatiques	25
II. 3. 1. Les précipitations	25
II. 3. 1. 1. Les précipitations moyennes mensuelles	26
II. 3. 1. 2. Répartition saisonnière des précipitations	26
II. 3. 1. 3. Les précipitations moyennes annuelles	26
II. 3. 2. La Température	31
II. 3. 2. 1. La température moyenne mensuelle	31
II. 4. Estimation des paramètres du bilan hydrique	32
II. 4. 1. Définition de l'évapotranspiration	33
II. 4. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	33
A- Formule de Turc	34
B- Formule de Coutagne.....	34
II. 4. 3. Interprétation du bilan hydrique	35
II. 4. 4. Comparaison des résultats des deux méthodes	37
II. 5. Estimation de la lame d'eau écoulée	38
II. 5. 1. Le ruissellement	38
Formule de Tixerant-Berckaloff.....	38
II. 5. 2. Infiltration efficace	38
II. 6. Conclusion	39

Chapitre III Hydrogéologie

III. 1. Introduction	40
III. 2. Inventaire des points d'eau	40

III. 3. Géométrie de la nappe	41
III. 3. 1. Aperçu géophysique	41
III. 3. 2. Formations Aquifères	43
III. 3. 1. 1. Grès du Barrémien	43
III. 3. 1. 2. Grès de l'Albien	44
III. 3. 1. 3. Calcaire du Turonien	44
III. 3. 1. 4. Mio-plio-quadernaire (zone d'étude)	44
III. 4. Etude piézométrique	44
III. 4. 1. Piézométrie de la nappe du Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa	44
III. 5. Détermination des paramètres hydrodynamiques	47
III. 5. 1. Les essais par pompage	47
III. 5. 2. Méthode d'interprétation de C.E Jacob (1950)	48
a- Puits P55	48
Courbe de descente du P55	48
Courbe de remontée du P55	48
b-Forage du 05 Juillet	49
Courbe de descente du forage du 05 Juillet	50
Courbe de remontée du forage du 05 Juillet	50
III. 6. Conditions aux limites.....	51
III. 7. Conclusion	51

Chapitre IV Hydrochimie

IV. 1. Introduction	53
IV. 2. Echantillonnage et analyses Hydrochimiques	53
IV. 2. 1. Méthode de prélèvement	53
IV. 2. 2. Les méthodes d'analyse	54
IV. 3. Etude des paramètres physiques	54
IV. 3. 1. Le potentiel d'hydrogène (pH)	54
IV. 3. 2. Conductivité électrique	54
IV. 4. Etude des paramètres chimiques	56
IV. 4. 1. Calcium (Ca^{++})	56
IV. 4. 2. Magnésium (Mg^{++})	57
IV. 4. 3. Sodium (Na^+)	58
IV. 4. 4. Potassium (K^+).....	58
IV. 4. 5. Les chlorures (Cl^-)	59
IV. 4. 6. Bicarbonates (HCO_3^-)	60
IV. 4. 7. Sulfates (SO_4^{2-})	60
IV. 4. 8. Nitrates (NO_3^-).....	61
IV. 5. Interprétation des analyses chimiques par les diagrammes de Stabler, Stiff, Piper et de Durov	61
IV. 5. 1. Diagrammes de Stabler et Stiff	62
IV. 5. 2. Diagramme de Piper	65
IV. 5. 3. Diagramme de Durov	66
IV. 6. Qualité chimique des eaux	68
IV. 6. 1. La potabilité des eaux souterraines (AEP)	68
IV. 6. 2. Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation(Diagramme de Richards)	70
IV. 7. Indice de la qualité de l'eau (WQI)	71

IV. 7. 1. Estimation de l'indice de la qualité de l'eau	71
IV. 8. Conclusion	75

Chapitre V Vulnérabilité des eaux souterraines

V.1. introduction	76
V. 2. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	76
V. 2. 1. Définition d'une pollution d'eau	76
V. 2. 2. Vulnérabilité à la pollution	76
A- Origine de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines	76
B- Concept de la vulnérabilité	77
C- Type de vulnérabilité	77
D- Critères de vulnérabilité	77
D- 1. Critères relatifs au sol	77
D- 2. Critères relatifs à la Zone Non Saturée	78
D- 3. Critères relatifs à la zone saturée	78
D- 4. Critères communs à la zone non saturée et à la zone saturée	79
V. 3. Objet de la cartographie de la vulnérabilité.....	79
V. 4. Outils et Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	80
V. 4. 1. Les Systèmes d'information géographique	80
V. 5. Evaluation et cartographie de la vulnérabilité de la nappe du mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa	80
V. 5. 1. La méthode DRASTIC	80
V. 5. 2. Description des paramètres et élaboration des cartes thématiques	82
V. 5. 2. 1. Profondeur de la nappe (D).....	82
V. 5. 2. 2. Recharge efficace de la nappe (R).....	83
V. 5. 2. 3. Nature du milieu aquifère (A).....	84
V. 5. 2. 4. Type de sol (S).....	86
V. 5. 2. 5. Topographie (T).....	87
V. 5. 2. 6. Impact de la zone vadose (I).....	89
V. 5. 2. 7. Conductivité hydraulique (C).....	91
V. 5. 3. Carte de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC.....	93
V. 6. Conclusion.....	95
Conclusion générale.....	96
Références bibliographique.....	98

Liste des figures

N°	Titre de la figure	Page
Fig.n° 1	Carte de situation de la ville de Djelfa.....	04
Fig.n° 2	Situation géographique de la région d'étude.....	06
Fig.n° 3	Situation du sous bassin versant de l'oued Djelfa-Hadjia.....	07
Fig.n° 4	Coupes géologiques traversant la région d'étude.....	08
Fig.n° 5	Carte géologique de la zone d'étude.....	09
Fig.n° 6	Log stratigraphique de la région d'étude.....	11
Fig.n° 7	Schéma tectonique du monts des Ouled Nail et bassin des Zahrez.....	16
Fig. n° 8	Diagramme ombrothermique de la station de Djelfa (1975 – 2018).....	21
Fig. n° 9	Climagramme d'Emberger de la station de Djelfa	22
Fig.n° 10	Abaque de l'indice d'aridité annuel de Martonne.....	24
Fig. n°11	Abaque de l'Indice d'aridité mensuel De Martonne.....	24
Fig.n° 12	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles au station de Djelfa (1975 – 2018).....	26
Fig.n° 13	Répartition saisonnière des précipitations à la station de Djelfa (1975-2018).....	27
Fig.n° 14	Les variations du coefficient pluviométrique de la station Djelfa (1975-2018).....	30
Fig.n° 15	Les variations des précipitations annuelles de la station de Djelfa (1975-2018).....	30
Fig.n° 16	Variation des températures moyennes mensuelles pour la station de Djelfa (1975-2018).....	31
Fig.n° 17	Variation des températures moyennes annuelles pour la station de Djelfa (1975-2018).....	33
Fig.n° 18	Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station de Djelfa pour la période (1975/2018).....	36
Fig.n° 19	Diagramme de la variation de la RFU, du déficit agricole et de l'excédent à la Station de Djelfa (1975-2018).....	37
Fig.n°20	Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du Synclinal de Djelfa.....	40

Fig.n° 21	Étude géophysique de la zone d' Ain Msekka.(Chibane B., 2010).....	41
Fig.n° 22	Log synthétique des sondages mécaniques du site El-Mekimen (REPAL S. N., 1979).....	43
Fig.n° 23	Colonne hydrogéologique du synclinal de Djelfa Echelle : 1/20 000 (Chibane B., 2010).....	45
Fig.n° 24	Carte piézométrique de la nappe du Mio-plio-quaternaire du synclinale de Djelfa pour la période des basses eaux (Octobre 2014).....	46
Fig.n° 25	Carte piézométrique de la nappe duMio-plio-quaternaire du synclinale de Djelfa pour la période des hautes eaux (Avril2015).....	47
Fig.n° 26	Courbe de descente du Puits (P55).....	49
Fig.n° 27	Courbe de remontée du puits (P55).....	49
Fig.n° 28	Courbe de descente du forage 05 Juillet.....	50
Fig.n° 29	Courbe de remontée du forage 05 Juillet.....	51
Fig.n° 30	Histogramme de la variation du pH (Octobre 2014).....	55
Fig.n° 31	Histogramme de la variation du pH (Avril 2015).....	55
Fig.n° 32	Histogramme de la variation de la conductivité électrique $\mu\text{s/cm}$ (Octobre 2014).....	56
Fig.n° 33	Histogramme de la variation de la conductivité électrique $\mu\text{s/cm}$ (Avril 2015)	56
Fig.n° 34	Histogramme de la variation de calcium Ca^{2+} (Octobre 2014).....	57
Fig.n° 35	Histogramme de la variation de calcium Ca^{2+} (Avril 2015).....	57
Fig.n° 36	Histogramme de la variation de magnésium (Mg^{2+}) (Octobre 2014).....	57
Fig.n° 37	Histogramme de la variation de magnésium (Mg^{2+}) (Avril 2015).....	57
Fig.n° 38	Histogramme de la variation de sodium (Na^+) (Octobre 2014).....	58
Fig.n° 39	Histogramme de la variation de sodium (Na^+) (Avril 2015).....	58
Fig.n° 40	Histogramme de la variation de potassium(K^+) (Octobre 2014).....	59
Fig.n° 41	Histogramme de la variation de potassium (K^+) (Avril 2015).....	59
Fig.n° 42	Histogramme de la variation de chlorure (Cl^-) (Octobre 2014).....	59
Fig.n° 43	Histogramme de la variation de chlorure (Cl^-) (Avril 2015).....	59
Fig.n° 44	Histogramme de la variation des bicarbonates (HCO_3^-) (2014).....	60
Fig.n° 45	Histogramme de la variation des bicarbonates (HCO_3^-) (2015).....	60
Fig.n° 46	Histogramme de la variation des Sulfates (SO_4^{2-}) (Octobre 2014).....	61
Fig.n° 47	Histogramme de la variation des Sulfates (SO_4^{2-}) (Avril 2015).....	61
Fig.n° 48	Histogramme de la variation des Nitrates (NO_3^-) (Octobre 2014).....	61

Fig.n° 49	Histogramme de la variation des Nitrates (NO ₃ ⁻) (Avril 2015).....	61
Fig.n° 50	Diagrammes de Stabler et Stiff(Octobre 2014).....	63
Fig.n° 51	Diagrammes de Stabler et Stiff(Avril 2015).....	64
Fig.n° 52	Diagramme de Piper (Octobre 2014).....	65
Fig.n° 53	Diagramme de Piper (Avril 2015).....	65
Fig.n° 54	Diagramme de Durov (Octobre 2014).....	67
Fig.n° 55	Diagramme de Durov (Avril 2015).....	68
Fig.n° 56	Diagramme de Richards campagne (Octobre 2014).....	71
Fig.n° 57	Diagramme de Richards campagne (Avril 2015).....	71
Fig.n° 58	Distribution spatiale du WQI (Octobre 2014).....	74
Fig.n° 59	Distribution spatiale du WQI (Avril 2015).....	74
Fig.n° 60	Schéma représentant les paramètres intervenants dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par la méthode DRASTIC (Sinan et Bouibrine, 2007).....	81
Figure 61	Carte de répartition de la profondeur de la nappe.....	83
Figure 62	Carte de répartition des valeurs de la recharge efficace de la nappe.....	85
Figure 63	Carte de la Nature du milieu aquifère.....	86
Figure 64	Carte du type de sol.....	88
Figure 65	Carte de la topographie de la nappe.....	89
Figure 66	Carte de la zone vadose.....	91
Figure 67	Abaque de Freeze et Cherry représentant la gamme des valeurs de perméabilité (Freeze R. A. & Cherry J. A., 1979).....	92
Figure 68	Carte de répartition des valeurs de la conductivité hydraulique.....	93
Figure 69	Carte de répartition des valeurs de l'indice de vulnérabilité.....	94

Liste des Tableaux

Tableau n° 01 :	Caractéristiques de la station de Djelfa. (ONM de Djelfa).....	20
Tableau n° 02 :	Paramètres du climagramme d'Emberger.....	22
Tableau n° 03 :	Indices d'aridité mensuels (IDM) à la station de Djelfa.....	25
Tableau n° 04 :	Les précipitations moyennes mensuelles (mm)	26
Tableau n° 05 :	Variation saisonnière des précipitations au station de Djelfa (1975-2018).....	27
Tableau n° 06 :	Précipitations moyennes annuelles et les coefficients pluviométriques (1975-2018).....	28
Tableau n° 06 :	Précipitations moyennes annuelles et les coefficients pluviométriques (1975- 2018) (Suite).....	29
Tableau n° 07 :	Températures moyennes mensuelles pour la période (1975-2018)	31
Tableau n° 08 :	Température moyenne annuelle (1975 – 2018).....	32
Tableau n° 09 :	ETR annuelle selon la méthode de Turc.....	34
Tableau n° 10 :	ETR selon la méthode de Coutagne.....	35
Tableau n° 11 :	Bilan hydrique à la station de Djelfa pour la période (1975/2018).....	36
Tableau n° 12 :	Résultats des valeurs de l'ETR selon les méthodes.....	37
Tableau n° 13 :	Ruissellement selon la formule de Tixerant-Berckaloff.....	38
Tableau n° 14 :	Les valeurs de l'infiltration efficace.....	39
Tableau n° 15 :	Résultats des résistivités obtenues par sondage électrique (Chibane B.,2010).	42
Tableau n° 16 :	Coordonnées géographiques des deux forages d'eau testés par pompage.....	47
Tableau n° 17 :	Normes et classification des eaux selon leur conductivité.....	54
Tableau n° 18 :	Relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997).....	55
Tableau n° 19 :	Classification de l'eau de la plaine de l'Oued Zied basée sur le diagramme de Durov (Lloyd etHeathcoat, 1985).....	66
Tableau n° 20 :	Normes de potabilité des eaux d'après l'OMS (2006).....	68
Tableau n° 21 :	Classification des eaux en fonction de leur dureté (d'après RODIER J. 1980).	69
Tableau n° 22 :	Dureté des eaux souterraines de la zone d'étude (Octobre 2014).....	69
Tableau n° 23 :	Dureté des eaux souterraines de la zone d'étude (Avril 2015).....	69
Tableau n° 24 :	Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation (Méthode de SAR).....	70
Tableau n° 25 :	Poids et poids relatif de chaque paramètre chimique (Ketata et al., 2011).....	72

Tableau n° 26 :	Classification des eaux souterraines selon le WQI.....	73
Tableau n° 27 :	Critères de vulnérabilité (Zwahlen, 2004).....	79
Tableau n° 28 :	Poids des paramètres dans la version DRASTIC standard (Aller et al. 1987)..	81
Tableau n° 29 :	Côtes et poids DRASTIC du paramètre profondeur de l'eau (D).....	82
Tableau n° 30 :	Cotation du paramètre recharge efficace de la nappe de la nappe (R).....	82
Tableau n° 31 :	Côtes et poids DRASTIC du paramètre recharge efficace de la nappe (R).....	84
Tableau n° 32 :	Cotation du paramètre recharge efficace de la nappe de la nappe (R).....	84
Tableau n° 33 :	Côtes et poids DRASTIC du paramètre nature du milieu aquifère (A).....	85
Tableau n° 34 :	Cotation du paramètre nature du milieu aquifère (A).....	86
Tableau n° 35 :	Côte et Poids DRASTIC du paramètre type de Sol (S).....	87
Tableau n° 36 :	Cotation du paramètre type de Sol (S).....	87
Tableau n° 37 :	Côte et Poids DRASTIC du paramètre topographie (T).....	88
Tableau n° 38 :	Cotation du paramètre topographie (T).....	88
Tableau n° 39 :	Côte et Poids DRASTIC du paramètre impact de la zone vadose (I).....	90
Tableau n° 40 :	Cotation du paramètre impact de la zone vadose (I).....	92
Tableau n° 41 :	Côte et Poids DRASTIC du paramètre conductivité hydraulique (C).....	91
Tableau n° 42 :	Cotation du paramètre Conductivité hydraulique (C).....	92
Tableau n° 43 :	Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (Engel et al.1996 in Sbagoud, 2011).....	93
Tableau n° 44 :	Classes de vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe Moï plioquaternaire du Synclinale de Djelfa.....	94

Liste des abréviations

$\mu\text{s/cm}$	Microsémens par centimètre.
%	Pourcentage
AEP	Alimentation en eau potable.
ANRH	Agence Nationale de Ressources en Eau.
BV	Bassin Versant
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius.
C	Concentration
CE	Conductivité électrique
CP	Coefficient Pluviométrique.
C_n-S_n	Classe
Ca^{2+}	Calcium
CaMg	Dolomite
CaSO ₄	Gypseuse
CaSO ₃	Carbonate
Cl	Chlorure
Ci	Concentration de chaque paramètre chimique
DA	Déficit Agricole
Def	Déficitaire
D.H.W	Direction d'Hydraulique de la Wilaya
D.P.A.T	Direction de Planification et Aménagement du Territoire
E	Est
ETP	Evapotranspiration potentielle
ETR	Evapotranspiration Réelle
Exc	Excédent en eau du sol.
g/l	Gramme par litre
ha	Hectare.
hab	Habitant.
hab / km ²	Habitant par kilomètre carré.
HCO ₃	Bicarbonates
I	Infiltration
Ie	Infiltration efficace
IMD	Indice d'aridité de Marathon

Liste des abréviations

It	Infiltration totale
j	Jour
K	Kelvin
K ⁺	Potassium
Km	Kilomètre
Km ²	Kilomètre carré.
l	Litre
M	Température max
m	Température min
m	Mètre
m ³	Mètre cube.
m ³ /an	Mètre cube par année.
m ³ /ha/an	Mètre cube par habitant.par année
Méq/l	Milliéquivalent par litre
mg/l	Milligramme par litre.
Mg ⁺	Magnésium
MgCO ₃	Magnésite
mm	Millimètre.
mm/an	Millimètre par an.
N ^o	Nombre
N	Nord
NE	Nord Est
NW	Nord West
Na ⁺	Sodium
NH ₄ ⁺	Ammoniums
No ₃ ⁻	Nitrates
NPK	Azote, Phosphore, Potassium
OMS	Organisation mondial de la santé
ONM	Office Nationale de Météorologie.
P	Précipitation
PH	Potentiel d'hydrogène
P.E.H.A	Printemps, Eté, Hiver, Automn
Q	Climagramme de louis Emberger

Liste des abréviations

Qi	Classe de qualité
R	Ruissellement
RFU	Réserve Facilement utilisable.
RU	Réserve utilisable
s	Second
SE	Sud-Est
S.N.R.E.P.A.L	Société Nationale de recherche et d'exploitation des pétroles en Algérie
SO ₄ ⁻²	Sulfates
T	Température
TH	Hydrotimétrique (durette de l'eau)
TDS	Total dissolved solids
Wi	Poids de chaque paramètre.
Wi	Poids relatif
WQI	Water quality index (indice de qualité de l'eau)



Introduction

générale

Introduction générale :

En milieu aride à semi-aride les eaux souterraines sont fortement sollicitées. La rareté et l'irrégularité de la pluviométrie et l'augmentation de la demande pour satisfaire les besoins croissants pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et l'industrie accentueront les contraintes sur cette ressource. La diminution des réserves des aquifères aggrave les problèmes liés à la pollution de cette ressource (Hamide L., 2014).

La pollution des ressources en eau constitue une source d'inquiétudes qui requiert un intérêt universel, surtout à cause de l'accroissement des activités anthropiques. Ceci peut conduire à une altération de la qualité et une diminution de la quantité de l'eau potable. Ainsi les ressources en eau qui constituent un facteur primordial en termes de développement, représentent des réserves limitées, renouvelables mais fragiles, car menacées par de multiples pollutions. Ces pollutions sont la conséquence de la démographie galopante et de l'intensité des activités anthropiques, qu'elles soient industrielles, agricoles ou minières (Allechy F. B. et al 2016).

Le dérèglement climatique est une réalité qui s'impose de plus en plus. Les études scientifiques montrent clairement qu'il y'a une augmentation des températures de la planète et des perturbations climatiques telles que l'accentuation des phénomènes climatiques extrêmes. Ce changement climatique a des impacts directs sur les ressources naturelles (Ministère Délégué chargé de l'Eau, Maroc, 2016). D'après les modèles climatiques, les effets attendus du changement climatique global sur les ressources en eau indiquent une aggravation de leur vulnérabilité (Taabni M. & El Jihad M. D., 2012)

La notion de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution a été initialement introduite par Margat dans les années soixante (Margat, 1968; Albinet et Margat, 1970 in Amharref M. et al., 2007). La cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine est un outil qui permet d'évaluer et de prévenir les risques de contamination (Duchaine D., 1998). La méthode DRASTIC est une méthode américaine de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Cette méthode consiste à la superposition des cartes des sept paramètres pour l'obtention d'une carte de l'indice de vulnérabilité de la région étudiée. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) permet d'augmenter la rapidité et la précision de la cartographie.

Ce travail s'intéresse à la détermination et à la cartographie de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa. Ce mémoire contient cinq chapitres et une introduction et une conclusion générales :

- Le premier chapitre : présentant la zone d'étude, en traitement sa localisation, sa géomorphologie et sa géologie.
- Le deuxième chapitre : consacré à l'étude Hydroclimatologique, dans laquelle les caractéristiques du climat et les paramètres du bilan hydrique sont déterminés.
- Le troisième chapitre : comportant l'étude hydrogéologique de notre nappe en donnant une idée sur sa géométrie et sur ces caractéristiques hydrodynamiques.
- Le quatrième chapitre : traitant la chimie des eaux de la nappe (l'hydrochimie) en se basant sur les analyses des éléments chimiques afin de déterminer le faciès chimique dominant et son origine à l'aide de différents diagrammes, de déterminer la qualité chimique des eaux (pour l'AEP et l'irrigation) et de déterminer l'indice de qualité de l'eau (WQI).
- Le cinquième chapitre : nous le consacrerons à la détermination de l'indice de vulnérabilité en appliquant la méthode DRASTIC ainsi qu'à l'élaboration d'une carte de synthèse basée sur la cartographie des indices de qualité de l'eau et de vulnérabilité.



CHAPITRE I

Présentation de la zone d'étude

I. 1. Localisation :**I. 1. 1. Situation géographique de la zone d'étude :****A- Aperçu sur la wilaya de Djelfa :**

La wilaya de Djelfa est située dans la partie centrale de l'Algérie (voir figure 01) du Nord, au de là des piémonts Sud de l'Atlas Tellien en venant du Nord.

Elle est située entre 2° et 5° de longitude Est et entre 33° et 35° de latitude Nord. Elle compte 36 communes et 12 daïras, s'étale sur une superficie de 32.256,35 km² (Figure 01), représentant 1.36% de la superficie totale du pays avec une population estimée en 2017 à 1 453 523 habitants soit une densité 45.15 hab/km².

Ces limites sont:

- Au Nord, les wilayas de Médéa et de Tissemsilt.
- A l'Est, les wilayas de M'sila et de Biskra.
- A l'Ouest, les wilayas de Laghouat et de Tiaret.
- Au Sud, les wilayas de Ouargla, El Oued et Ghardaïa.

A. 1- Caractéristiques physiques :**❖ Le relief :**

La wilaya de Djelfa est formée du Nord au Sud par plusieurs lignes de reliefs qui sont :

- La plaine de Ain Ouassera avec une altitude moyenne de 850 m ;
- Les dépressions de Zahrez El Gharbi et El Chargui avec une altitude de 850 m ;
- Les monts de Ouled Naïls, les plaines de Maïaleba et Mouilah à l'Est du chef lieu d'une altitude de 900 à 1200 m ;

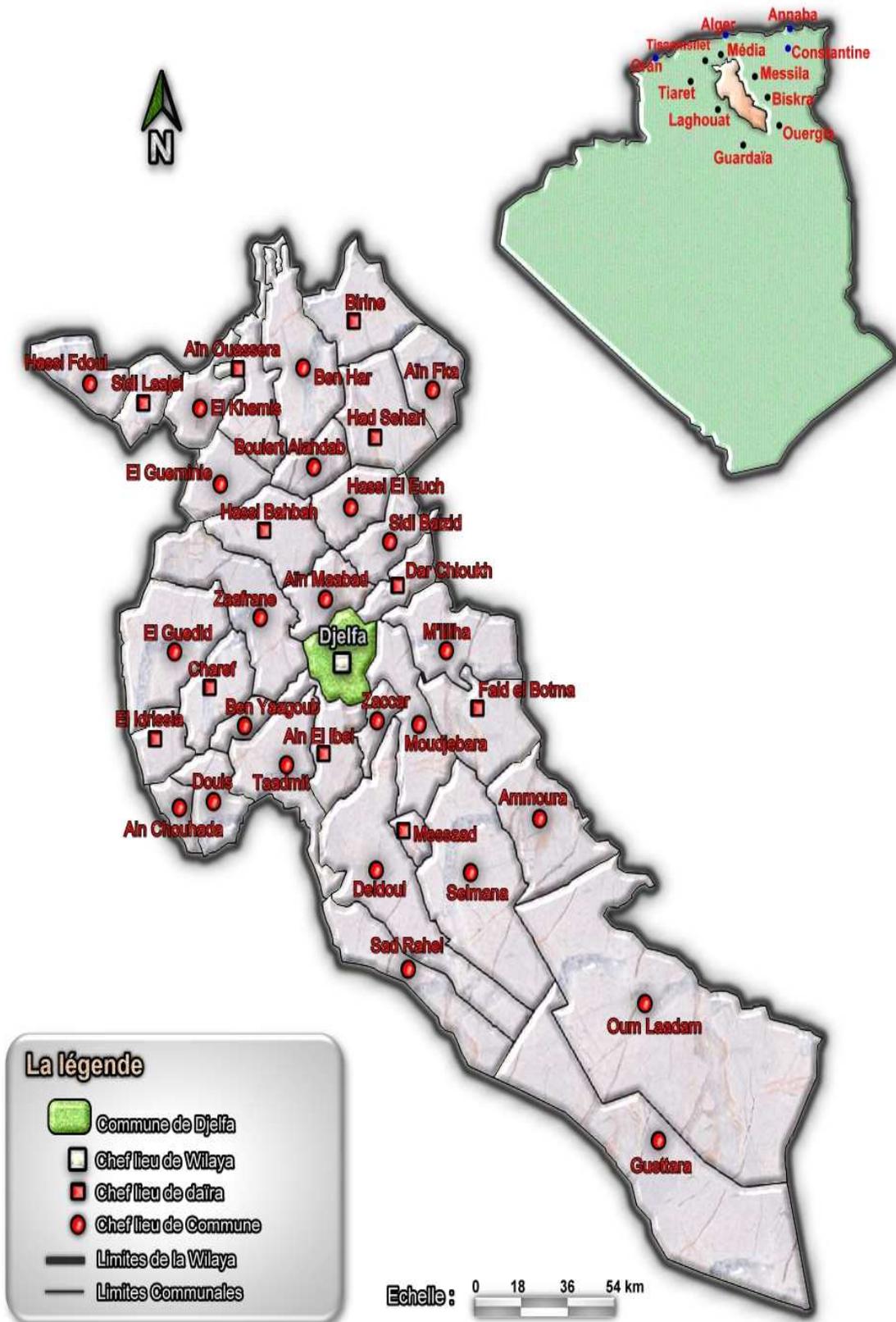


Figure 01 : Carte de situation de la ville de Djelfa (in D.P.A.T 2006).

- Au sud, il y a un plateau dont l'altitude varie de 400 à 800 m, ce vaste plateau comporte dans sa partie Nord-Est le Djebel Boukhil avec 1422 m d'altitude.

B- Localisation du Synclinal de Djelfa :

Le Synclinal de Djelfa occupe la partie centrale de l'Atlas Saharien précisément, aux monts de Ouled Nail au Nord de la Wilaya de Djelfa, il est situé à 300 Km au sud de la capitale Alger (Figure 02), à 110 Km au Nord de la wilaya de Laghouat et à 110 Km au Sud-Ouest de Boussaada (Wilaya de M'sila). Il s'étend sur 80 Km de long et 25 Km de large en maximum, entouré par les massifs des Djebels: Senalba, Dj.Djellal Gharbi et Dj.Djellal Chargui. Il est limité par les coordonnées géographiques suivantes :

- Latitude : 34° 24' à 34° 59' Nord
- Longitude : 2° 44' à 3° 25' Est

Le Synclinal appartient principalement au grand bassin des Zahrezs codé 17(Figure 03), plus exactement, dans la partie amont du sous bassin versant de l'Oued Djelfa-Hadjia codé (17-02) et dans une partie du sous bassin versant Daiet Mefiteg codé 17-04 (Rahmani B., 2016).

I. 2. Géologie et géomorphologie :

I. 2. 1. Généralité :

La zone d'étude appartient aux hautes plaines steppiques, elle occupe la partie centrale de l'Atlas saharien par sa position méridionale dans l'Atlas saharien (Monts des Ouled Nail) ce qui lui confère la transition entre le Nord du pays et le Sahara, c'est-à-dire une région limitée au Nord par l'Atlas Tellien et au Sud par l'Atlas Saharien.

Le Synclinal de Djelfa fait partie du sous bassin versant d'Oued Djelfa-Hadjia qui se localise dans la partie centrale de la wilaya de Djelfa, il est l'un des sous bassins constituant le bassin versant de Zahrez.

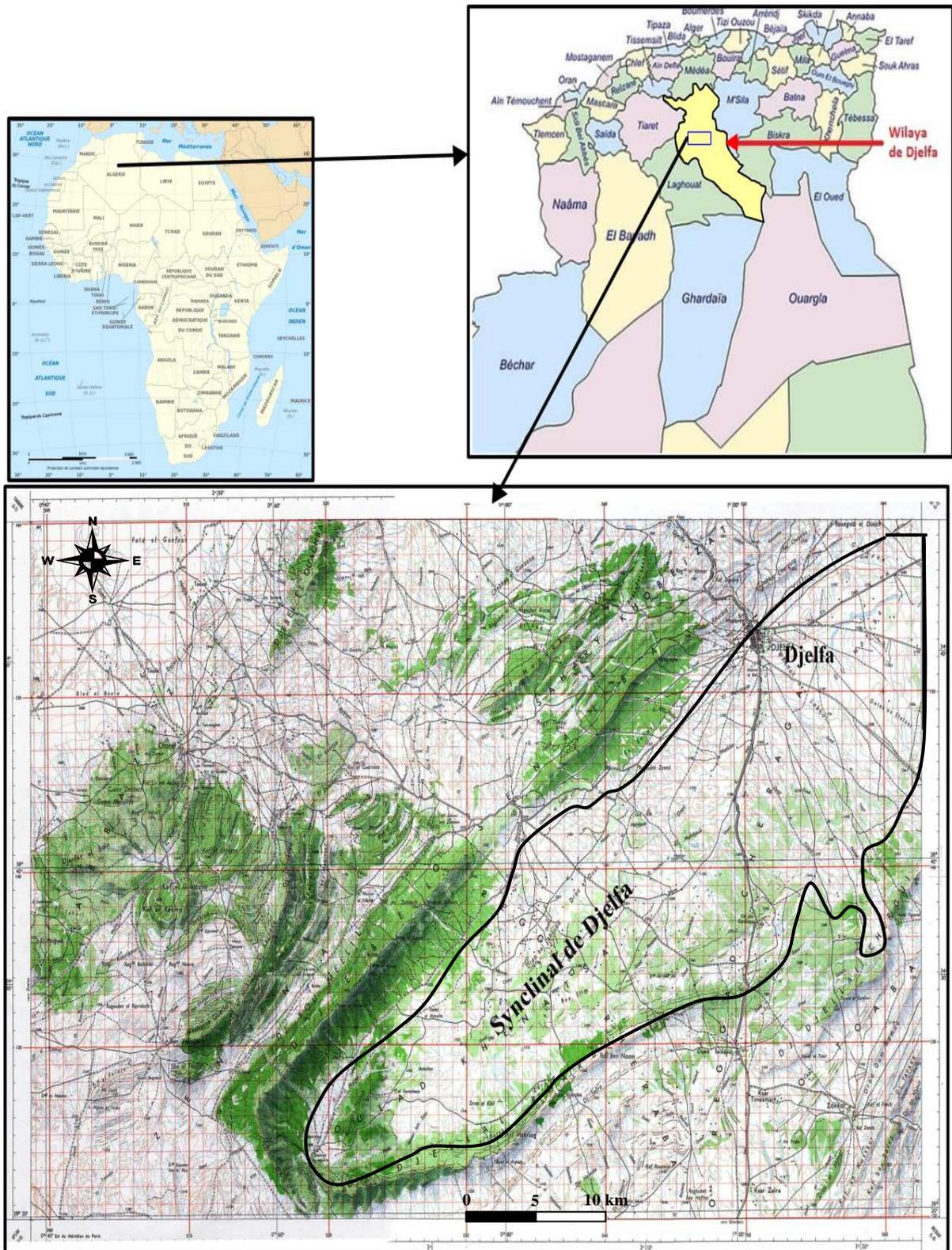


Figure 02 : Situation géographique de la région d'étude (in Bendjaoual F. et Toumi N., 2017).

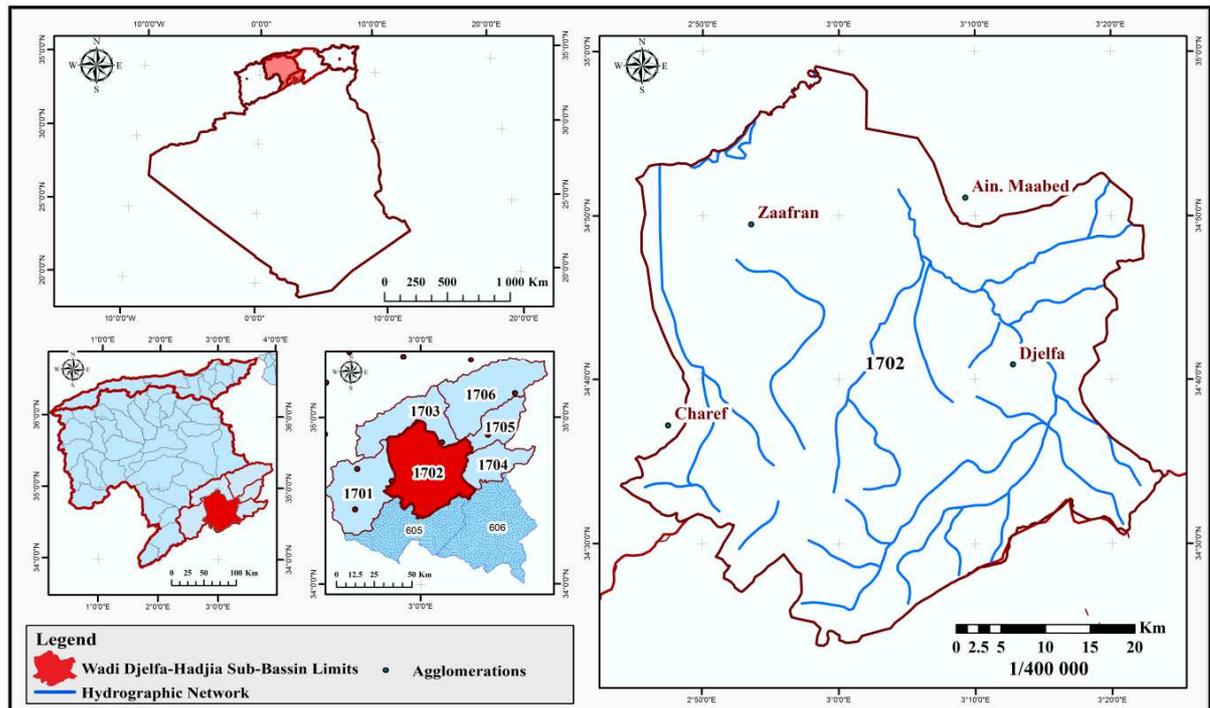


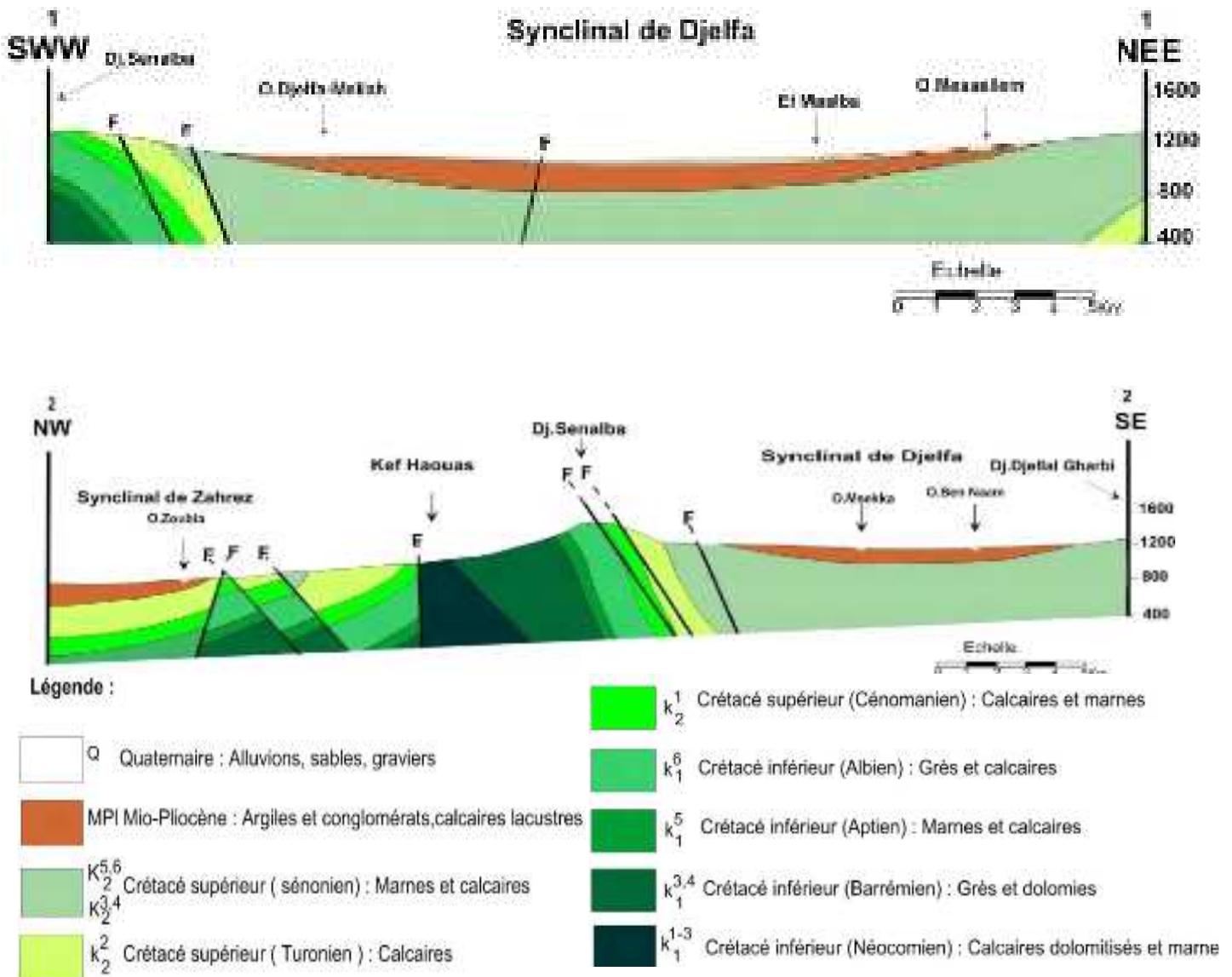
Figure 03 : Situation du sous bassin versant de l'oued Djelfa-Hadjia

(in HAIED, N. et al, 2017).

I. 2. 2. Aperçu géologique :

A partir de la carte géologique (1/500.000) (Figure 05) établie par l'Agence des Ressources Hydrauliques, Agence régionale de Djelfa, il apparaît que la région se trouve dans la zone de transition de deux unités structurales:

- le grand Synclinal Sud de Djelfa dont l'axe s'oriente dans le sens Est et Nord-Est et s'incline vers le Nord- Est.
- le petit Synclinal nord suivant la même orientation que le précédent mais caractérisé par des diapirs rapprochés.
- affleurements et formations: cette zone est constituée par les sédiments du crétacé supérieur.



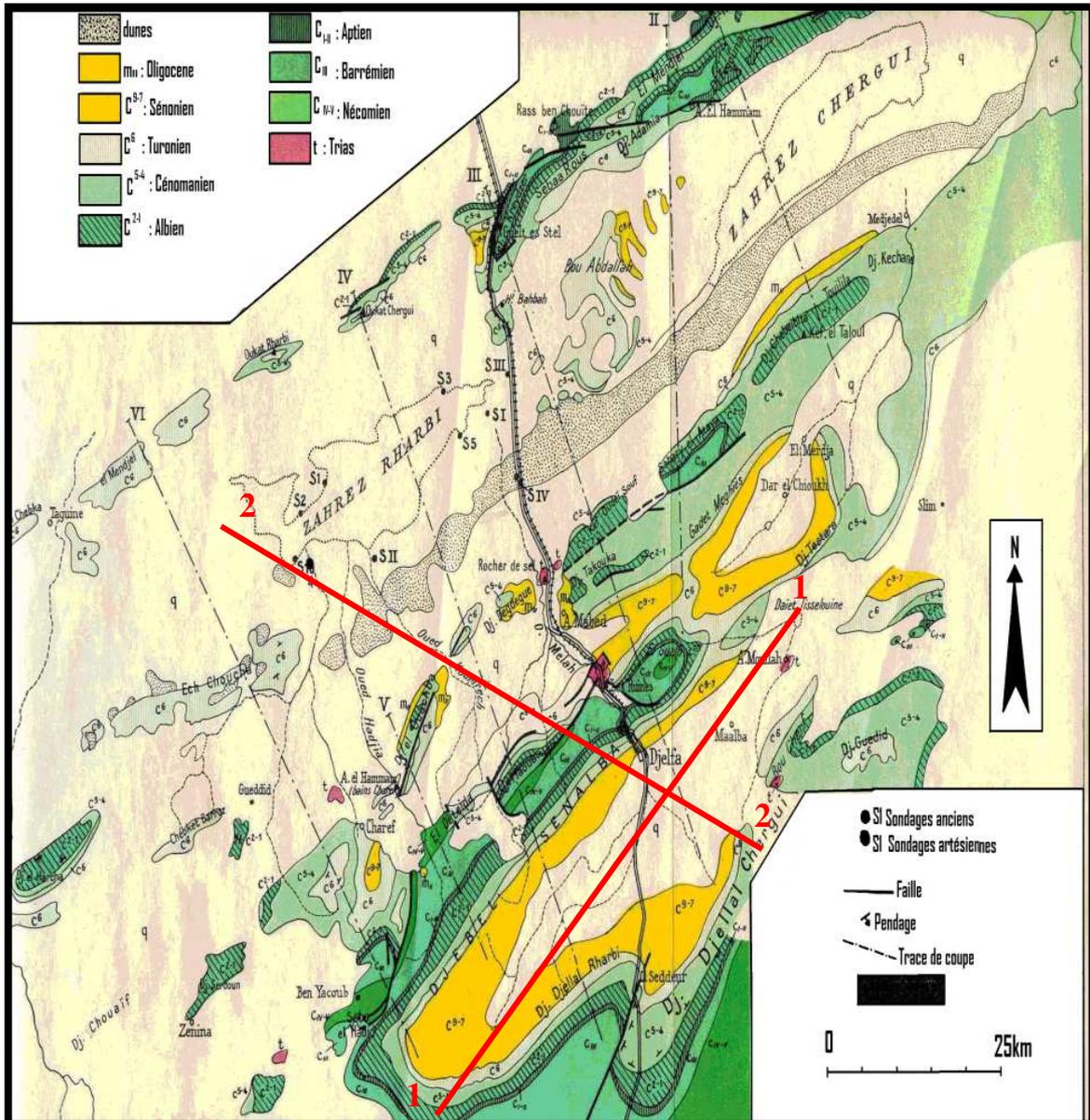


Figure 05 : Carte géologique de la zone d'étude (in A.N.R.H. 2008 Modifiée)

I. 2. 3. Stratigraphie :

Les principales unités lithologiques qu'on observe dans la zone d'étude sont les suivantes (Figure 06) :

I. 3. 1. Trias :

Il est représenté par des diapirs liés à des accidents tectoniques. le plus important de ces diapirs est le «Roche de sel»,situé à une vingtaine de Kilomètres au Nord de Djelfa.

Il existe également d'autres affleurements visibles le long de la route (Alger-Djelfa), à l'entrée de la ville de Djelfa. Ils sont de faciès évaporitique constitués de sel gemme, de gypse lamellaire, d'anhydrite, de marnes bariolées, de grès argileux de couleur lie de vin de schistes versicolores. Avec une inclusion de conglomérats

Le trias est sans intérêt hydrogéologique; au contraire, il peut constituer un problème de salinité des eaux (Deramchi M et Moussa M., 1993).

I. 3. 2. Crétacé :

Le crétacé apparaît niveau des crêtes (Djebel Senalba, Djebel Aïssa et Kef Haouas). Constitué de calcaires, de marnes et grès.

I. 3. 2. 1. Néocomien :

Il affleure et forme les reliefs du Kef-Haouas et Djebel Aïssa qui sont situés au Nord à proximité de Djebel Senalba. Il est représenté par des argiles gréseuses, sur lesquelles reposent des bancs décamétriques de calcaires dolomitiques, riches en polypiers diaclasés avec des figures de dissolution en surface. Vers le sommet on trouve des calcaires gréseux, des calcaires à térébratules et échinidés. L'ensemble atteint une épaisseur de 800 m (Rahmani B., 2016).

I. 3. 2. 2. Barrémien :

Ces formations affleurent au Kef-Haouas et dans l'Est de la carte, avec des épaisseurs allant jusqu'à 1500m à l'Ouest et plus de 2000m à l'Est. Ces formations sont représentées par des dépôts continentaux où nous y trouvons des alternances de



Figure 06: Log stratigraphique de la région d'étude (Chibane B., et al, 2010).

grès et d'argiles gréseuses rouges. Les grès sont durs à stratifications entrecroisées, constitués de grains fins très consolidés. Vers la partie sommitale, les bancs de grès sont moins épais (de l'ordre métrique). Les diaclases sont fréquentes et conformement à la direction des failles (Rahmani B., 2016).

I. 3. 2. 3. Aptien :

Cette formation est bien représentée dans la région puisqu'elle affleure tout autour du Synclinal de Djelfa .L'aptien forme une bande étroite ,continue bien visible dans le paysage ,parfois elle est discontinue quand elle est cachée par le quaternaire et

sa couleur est grise blanchâtre. L'aptien est essentiellement carbonaté, il est formé de marnes est verdâtres à grisâtres marno-calcaire.

Parfois on rencontre des bancs de calcaire fin argileux ou gréseux avec une épaisseur moyenne de 50 m au niveau de Djebel Djellal et Senalba Chargui (Deramchi M et Moussa M., 1993).

I. 3. 2. 4. Albien :

Sa partie inférieure est d'une épaisseur de 400m, formée de grès massifs fin de couleurs rouges, parfois blancs pâles, tachetés de points noirs. Ils sont intercalés par des passées d'argiles grisâtres.

Sa partie supérieure est d'une épaisseur, d'environ 200m, constituée de calcaires et marnes en alternance. Les deux parties présentent un intérêt hydrogéologique. L'Albien est caractérisé par une perméabilité d'interstices (Rahmani B., 2016).

I. 3. 2. 5. Cénomaniens :

Ces formations sont bien représentées dans la partie Nord au niveau de Djebel Senalba, avec une épaisseur moyenne de 350m. Cette série est formée essentiellement par des marnes jaunes à jaunes verdâtres avec parfois des argiles jaunâtres, dans la partie sommitale, on y trouve aussi des intercalations de bancs calcaires, peu épais (Rahmani B., 2016).

I. 3. 2. 6. Turonien :

Ces formations affleurent tout au tour du Synclinal, avec une épaisseur moyenne 400m. Cette série est formée dans la partie sommitale de calcaires durs de couleur blanche claire ou grisâtre, très diaclasés et fissurés avec des figures de dissolution. Les fissures non concrétionnées, sont en communication directe, ce qui implique son intérêt hydrogéologique.

Vers la partie médiane, on rencontre un ensemble marneux gris verdâtre, fossilifère avec des intercalations des niveaux de calcaires organiques. Cet étage s'achève par des calcaires en plaquettes et des gypses (Rahmani B., 2016).

I. 3. 2. 7. Sénonien :

Cette formation est constituée d'une alternance de calcaire avec des couches marneuses jaunes, avec une épaisseur d'environ 100m.

La limite inférieure est matérialisée par l'apparition des alternances marneuses calcaires et la limite supérieure est indéterminée.

Du point de vue hydrogéologique, le sénonien est une formation caractérisée par une faible perméabilité et peu productive (Deramchi M et Moussa M.,1993).

I. 3. 3. Néogène :**I. 3. 3. Mio-pliocène :**

Cette formation est caractérisée par des marnes, argiles rouge à jaune verdâtre, de banc de calcaire peu épais à massifs, de conglomérats à éléments calcaires et de gypse. Le Mio-pliocène se dépose sur les séries sous jacent (Deramchi M et Moussa M.,1993) .

I. 3. 4. Quaternaire :**I. 3. 4. 1. Quaternaire ancien :**

Représenté par un premier glaciaire, constitué d'une croute très épaisse et très dure presque dépourvue du matériel grossier. Il existe cependant un deuxième glaciaire, reposant sur les formations sablo-limoneuses du Néogène. Ils sont dans un premier lieu en discordance sur l'horizon de limon carbonaté blanc pulvérulent. Par dessus, on passe à un horizon bréchiq ue très fortement consolidé par une croute carbonatée (Debabeche A ,et chibanie B ,2002).

I. 3. 4. 2. Quaternaire moyen :

Représenté par le troisième glaciaire, qui est caractérisé par une superposition de deux horizons carbonatés ; l'un limoneux à la base, pulvérulent à faciès gréseux, l'autre de type bréchiq ue englobant une forte proportion de galets et de calcaires et recouvert d'une croute zonaire, son épaisseur varie de 0,5 à 1,5 m (Rahmani B., 2016).

Les terrasses à poudings sont fortement consolidées, deux sont visibles le long de l'oued Djelfa-Melah et de ces affluents principaux (O.Msekka et O.Ben Naam). L'épaisseur de ces terrasses est de 2 à 3 m en moyenne (Rahmani B., 2016).

I. 3. 4. 3. Quaternaire récent :

Il apparaît en amas ou taches irrégulières de grise ou clair et il est discordant, présent dans toute la carte. Il donne l'aspect de veines, car il suit l'allure des oueds ou des dépressions et discordant (Debabeche A ,et chibanie ,2002).

I. 2. 3. Tectonique selon (Rahmani B., 2016):

La structure géologique actuelle des monts des Ouled Nails et la région des Chott est issue des plissements tertiaires de l'orogénèse Alpine. Les séries du Crétacé qui constituent l'ossature de ces monts ont été plissées selon une direction SW-NE (TRAYSSAC J., 1981).

En effet, dans le sous bassin versant de Oued Djelfa-Hadjia nous rencontrerons une série d'axes synclinaux et anticlinaux (Figure 07).Le Synclinal est subdivisé en deux parties :

- La partie centrale (axiale)
- Les flancs Nord et Sud du Synclinal.

I. 2. 3. 1 La partie centrale (axiale) :

La zone axiale caractérisée par une orographie basse, correspond à une vaste cuvette d'axe SW-NE. Elle est comblée par des dépôts continentaux du Néogène et du Quaternaire.

I. 2. 3. 2. Les flancs Nord et Sud du Synclinal :

- **Le flanc Nord :**

Est constitué de deux sous-ensembles séparés par un contact tectonique majeur d'une direction conforme à la direction globale du Synclinal.

- Le premier sous-ensemble de pendage supérieur à 40° est formé par une série monoclinale d'âge Sénonien à Néocomien. Ce qui correspond à une zone montagneuse parcourue par un réseau hydrographique orienté SE-NW dont l'oued principal est celui de Djelfa-Melah.

- Le deuxième sous-ensemble de même série à pendage NW inversé SE formant des plis au niveau de Kef-Haouas.

- **Le flanc Sud :**

Il est constitué par une série monoclinale de pendage NW relativement plus faible de 12° à 30° . Ce flanc est affecté par un accident tectonique important, c'est un décrochement dextre dont le rejet horizontal dépasse les 5 Km subdivisant le flanc Sud du Synclinal de Djelfa en deux parties (Djebels): Djebel Djellal Gharbi à l'Ouest de la route Djelfa-Laghouat et Djebel Djellal Chergui à l'Est de cette route (Figure. 07).

L'observation de la figure 07 montre que le flanc Nord de la dépression de Djelfa est beaucoup plus affecté par les accidents tectoniques que le flanc Sud. En générale la fracturation prend deux familles de directions différentes qui sont :

- Une famille orientée NW-SE a pour trois directions préférentielles : $N 110^{\circ}$ à $N 120^{\circ}$, $N 120^{\circ}$ à $N 130^{\circ}$, $N 130^{\circ}$ à $N 140^{\circ}$.
- Une famille orientée N-S a pour direction $N 0^{\circ}$ à $N 10^{\circ}$.

Notant également, l'existence des fractures orientées NE-SW.

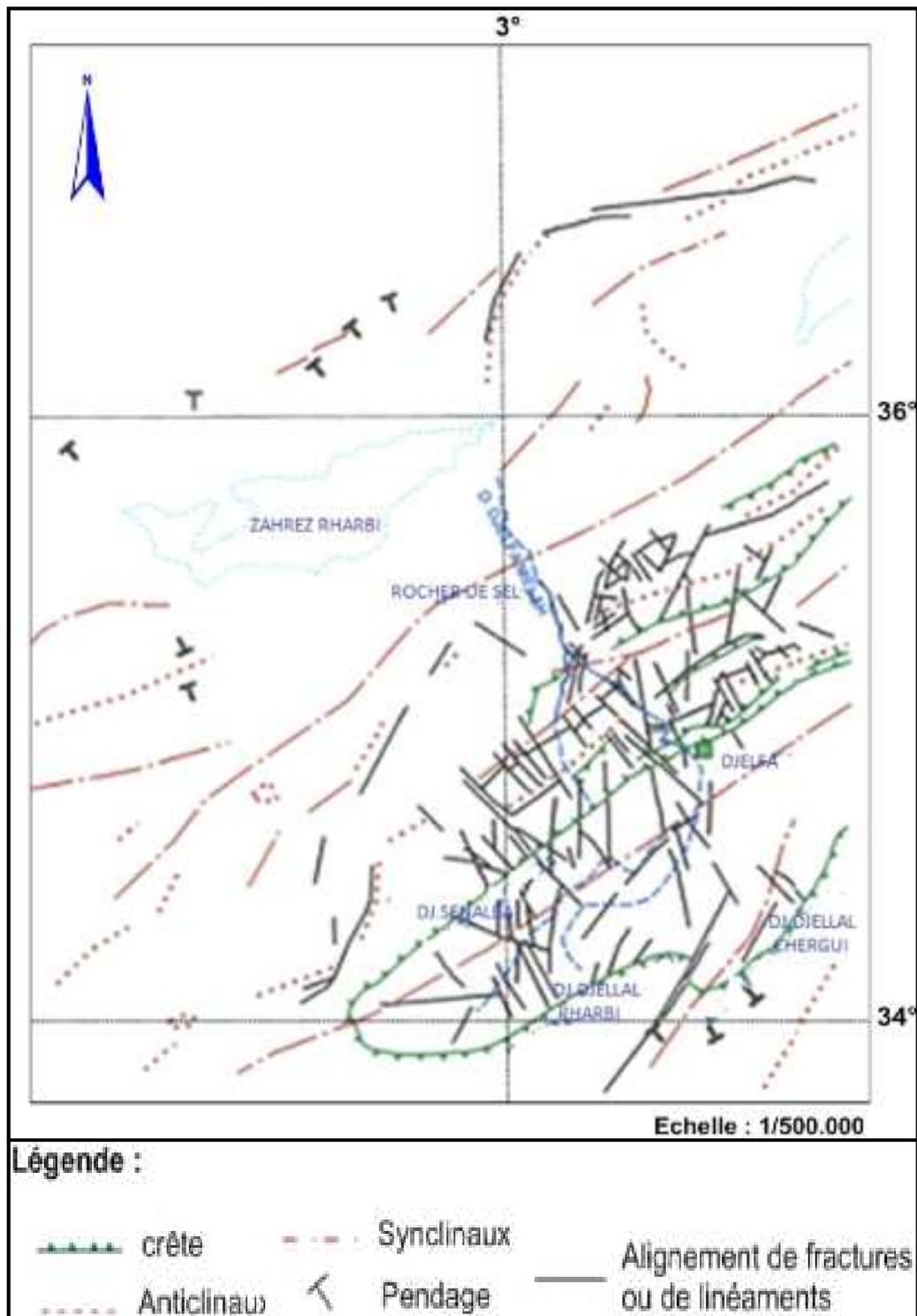


Figure 07 : Schéma tectonique du monts des Ouled Nail et bassin des Zahrez (D'après Cornet G., 1952, complété par Traysac J.,1981 in Rahmani B., 2016).

I. 3. Géomorphologie :

A- Les montagnes :

Elles représentent plus du tiers de la superficie totale (soit 21600 Ha). La région d'étude s'intègre dans deux vastes compartiments topographiquement parallèles, représentés par Djebel Senalba et les deux Djebels Djellal. Ils sont orientés Sud Ouest-Nord Est. Ces deux parties sont parfaitement distinctes par des limites bien marquées et des dénivellements assez accusés. Sur le bord Nord de la dépression, le Djebel Senalba suit un tracé rectiligne. Il s'élève entre 1400 et 1600 m d'altitude et sur le bord Sud de la dépression, les deux Djebels Djellal, opposent un tracé sinueux dû aux différents accidents qui l'affectent. Ils s'élèvent jusqu'à 1450 m d'altitude.

B- Les dépressions :

La dépression est formée de petites plaines dont l'altitude varie entre 1100 mètres et 1300 mètres, les plaines les plus importantes sont celles de Maalba et de Mouilah à l'Est de la ville de Djelfa (Rahmani B., 2016).

C- Les piémonts :

C'est la phase intermédiaire entre les monts et les plateaux. Les piémonts se localisent au Sud- Est et au Nord de la commune. Ils occupent une superficie de 4505 Ha, soit 8.20% de la superficie totale (A.N.R.H., 2016).

D- Les plateaux :

Ils font partie du grand plateau Moudjbara- Mouilah, occupant la plus grande partie de la superficie communale de Djelfa, soit 28825 Ha et se localisent en deux parties :

- La partie allant du Sud-Ouest (à partir du C. W 164) jusqu'au Sud- Est et Est de la commune. C'est la plus grande partie de ces plateaux ;
- La deuxième partie se trouvant à l'extrême Nord- Est de la commune. Ces plateaux sont caractérisés par des ondulations formant des petites collines et sont traversés par

des Oueds plus ou moins importants. Une grande partie de la population éparsée se localise sur ces terres où s'exerce l'activité agricole (D.P.A.T., 2014).

E- Les pentes :

La commune de Djelfa est formée de petites plaines dont les altitudes varient de 1020 à 1489 m. La partie haute de la dépression est constituée de la chaîne montagneuse de Ouled Nail. Cette chaîne orientée Sud- Ouest et Nord-Est est formée des principales montagnes de la Wilaya (D.P.A.T., 2014).

Les pentes ont été classées en 5 classes:

- 0 – 3% —
- 3 – 8%
- 8 – 12.5% : Pentas faibles à moyennes.
- 12.5 – 25%: Pentas moyennes.
- Plus de 25%: Pentas fortes.

Les terrains se caractérisent par des pentes faibles qui oscillent entre 0 à 8 % avec une prédominance de la classe (0-3%) qui se trouve au niveau des plateaux au Sud, Sud- Ouest, à l'Est et au Nord- Est. Au Nord et au Nord- Ouest se trouvent les pentes moyennes à fortes. La classe (12.5 - 25 %) est répandue, surtout au niveau des versants des Montagnes où la couverture végétale est dense. Par contre, la classe (plus de 25 %) est localisée sur tout le long des crêtes de Senelba et Kef Haoues.

F- Sismicité :

La région de Djelfa est caractérisée par une faible sismicité. Elle est classée dans la zone I, suivant les recommandations parasismiques d'Algérie (1981) où le territoire national est divisé en quatre zones (0, I, II et III).

G- Le couvert Végétal :

Les principales formations végétales existantes au niveau des bassins versants sont: le forêt, la steppe et le matorral.

- **La forêt :** Elle est localisée dans les zones montagneuses, c'est une forêt formée de pins d'Alep qui a du mal à s'adapter au climat de la région.

- **La steppe** : Elle se présente comme une formation discontinue, formée de touffes de xérophytes, plantes herbacées implantées sur les sols non salés. Elles sont spécifiques des régions de climat continental semi-aride.

- **Le matorral** : Il occupe une surface inférieure à celle de la forêt. Il s'agit d'une steppe arbustive, constituée de petits chênes, d'oliviers sauvages et d'arbousiers (Rahmani B., 2016).

I. 4. Conclusion :

Du point de vue tectonique, la structure actuelle de l'Algérie du Nord est due aux mouvements orogéniques hercyniens et Alpines. Ces manifestations tectoniques ont permis l'individualisation des grands ensembles géologiques, tel que l'Atlas saharien auquel appartient notre secteur d'étude.

Le Synclinal de Djelfa est définie par des formations géologiques allant du Trias au Quaternaire et est représentée par des affleurements de toute la série crétacé, souvent recouverts par un Tertiaire continental très incomplet.

Il est à noter que dans ce milieu, une grande partie de la population de Djelfa exerce une activité agropastorale qui nécessite de grands volumes d'eau provenant de l'exploitation des eaux souterraines de la zone d'étude.



CHAPITRE II

Hydroclimatologie

II. 1. Introduction :

L'analyse des données climatiques reste primordiale pour mener à bien toute étude hydrogéologique, elle permet de mettre en évidence l'importance des facteurs climatiques intervenant dans les écoulements et d'approcher les termes du bilan qui sont les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement.

L'étude climatologique se base sur l'exploitation des données pluviométriques sont principalement ; la précipitation, la température, l'évapotranspiration et les différents termes du bilan hydrique.

Au cours de notre étude, on s'est basé sur les données climatiques (précipitations et températures) de la station météorologiques de Djelfa sur une période de 43 ans.

II. 2. Caractérisation du climat :

L'étude du climat se base sur les mesures aux différentes stations, d'éléments météorologiques divers et parmi les plus importants nous citons les précipitations et la Température, les caractéristiques de station météorologiques de Djelfa sont portées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 01 : Caractéristiques de la station de Djelfa. (ONM de Djelfa).

Station	Altitude (m)	Coordonnées UTM		Période d'observation
		X	Y	
Djelfa	1180	525.325	3.835.183	1975–2018

❖ Le climat :

Le climat est de type semi-aride avec une nuance continentale (hiver froid, été chaud et sec), la pluviométrie varie de 350 mm au nord à moins de 200 mm au sud, avec 10 à 13 jours d'enneigement en moyenne et des vents dominants d'origine désertique, secs et chauds (sirocco pendant 20 à 30 jours en moyenne). (Berchiche. T., et al, 1993).

II. 2. 1. Diagramme ombrothermique :

Selon BAGNOULS et GAUSSEN (1953), un mois est considéré comme sec, si le total des précipitations (P) exprimées en millimètre est égal ou inférieur au double de la température moyenne (T) du mois, exprimée en degré centigrade ($P \leq 2T$).

D'après la figure 08, on peut déduire deux périodes bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale du mois d'Mai (16.93 °C) jusqu'à la dernière semaine du mois d'Octobre (15.33°C à Djelfa).
- Une saison humide qui s'étend du fin Octobre jusqu'au mois de Mai.

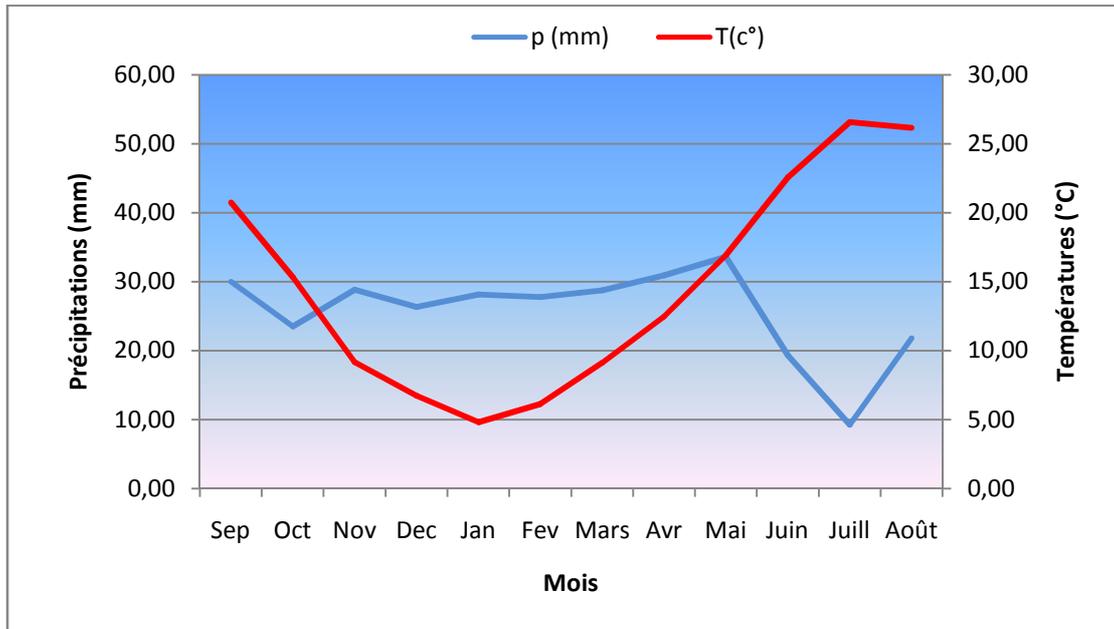


Figure 08 : Diagramme ombrothermique de la station de Djelfa (1975 – 2018).

II. 2. 2. Climagramme de Louis Emberger :

Pour déterminer les types de climat, L Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q.

Ce dernier dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes des températures minimales et maximales, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q = \frac{p}{\frac{(M+m)(M-m)}{2}} \cdot 1000$$

Où :

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 (degrés/Kelvin) (in Bakria M 2017) .

L'application numérique pour les trois stations donnent les résultats suivants :

Tableau 02 : Paramètres du climagramme d'Emberger.

Stations	Année	P (mm)	M (°K)	m (°K)	Q	Type de climat
Djelfa	1975/2018	308,24	306,68	273,52	32,03	Semi aride

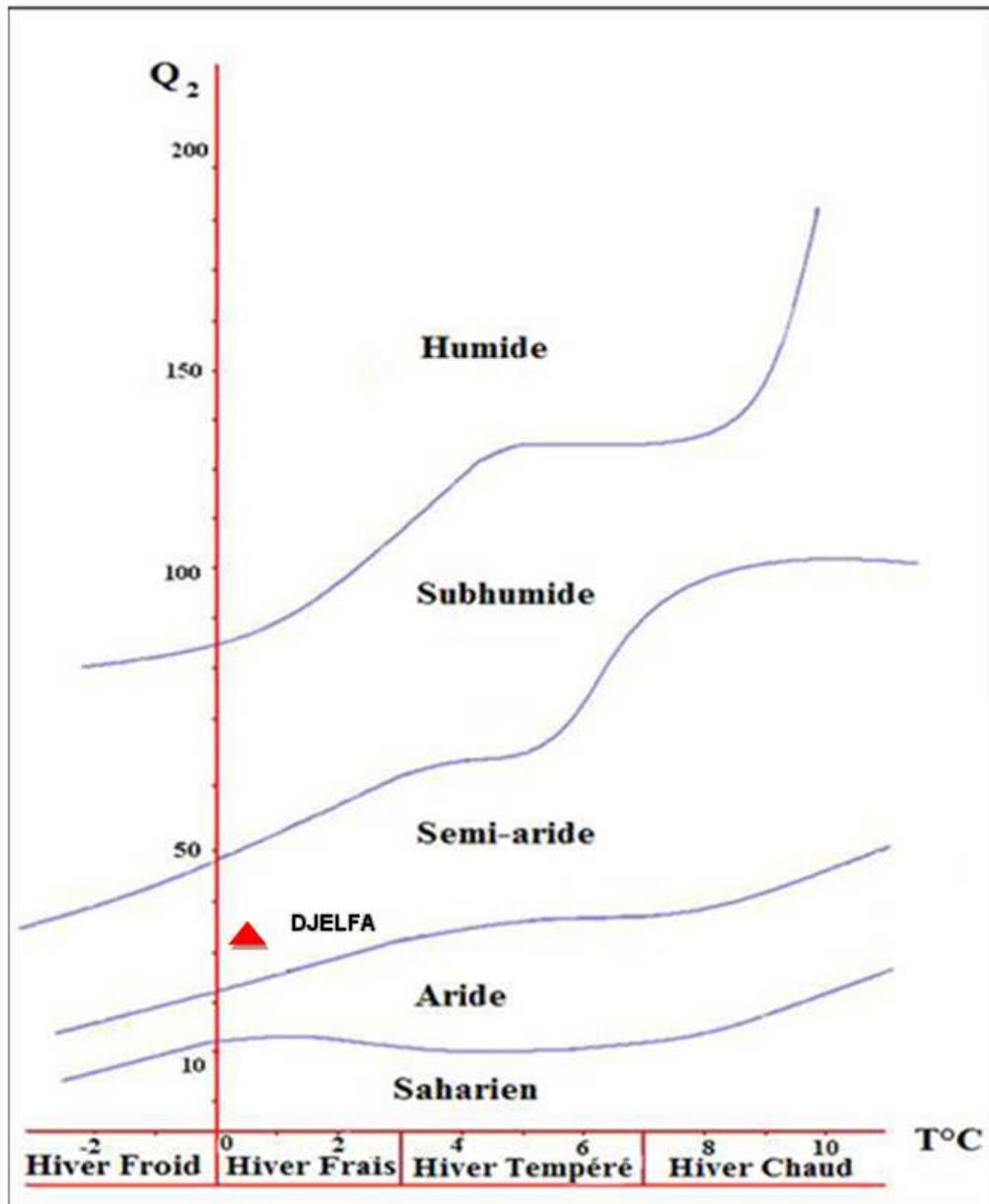


Figure 09 : Climagramme d'Emberger de la station de Djelfa

Il à noter qu'on a calculé Q pour suivre l'évolution du climat. Le report de station météorologique utilisée permet de dire que le climat de la ville Djelfa est un climat semi-à hiver frais.

II. 2. 3. Calcul de l'indice d'aridité de De Martonne :

L'aridité est un phénomène climatique impliquant une pluviométrie faible. Dans les régions dites arides, les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle (ETP).

En 1926, Emmanuel de Martonne élabore un système de classification des climats par une Méthode statistique, pour caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température et la précipitation (fig10.). Cet indice est calculé d'après la formule suivante :

$$IDM = \frac{P}{(T + 10)}$$

- 🚧 IDM : Indice d'aridité annuelle.
- 🚧 P : précipitation moyenne annuelle en mm.
- 🚧 T : température moyenne annuelle en °C.

Le type de climat selon la valeur de l'indice de De Martonne :

- $IDM < 5$: climat hyperaride.
- $5 < IDM < 7,5$: climat désertique.
- $7,5 < IDM < 10$: climat steppique.
- $10 < IDM < 20$: climat semi-aride.
- $20 < IDM < 30$: climat tempéré.
- $30 < IDM < 55$: Humide

L'aridité augmente quand l'indice diminue (in Bakria M 2017).

L'interprétation des données météorologiques de la station de Djelfa pour la période 1975-2018 fait ressortir que la température annuelle moyenne est de 14.73°C et la précipitation moyenne annuelle est de 308.24mm .

D'après le calcul de l'indice d'aridité de Martonne :

IMD = **12.46** où $10 < IDM < 20$: climat **semi-aride**.

II. 2. 4. Calcul de l'indice d'aridité mensuel :

Afin de préciser les liens de l'indice d'aridité avec la répartition saisonnière, un indice d'aridité mensuel a été défini par la relation suivante :

$$IDM = \frac{12p}{(T + 10)}$$

Où :

IDM : Indice d'aridité mensuel.

P : Précipitation moyenne mensuelle en mm.

T° : Température moyenne mensuelle en °C (in Bakria M 2017).

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année d'observation, les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau 03.

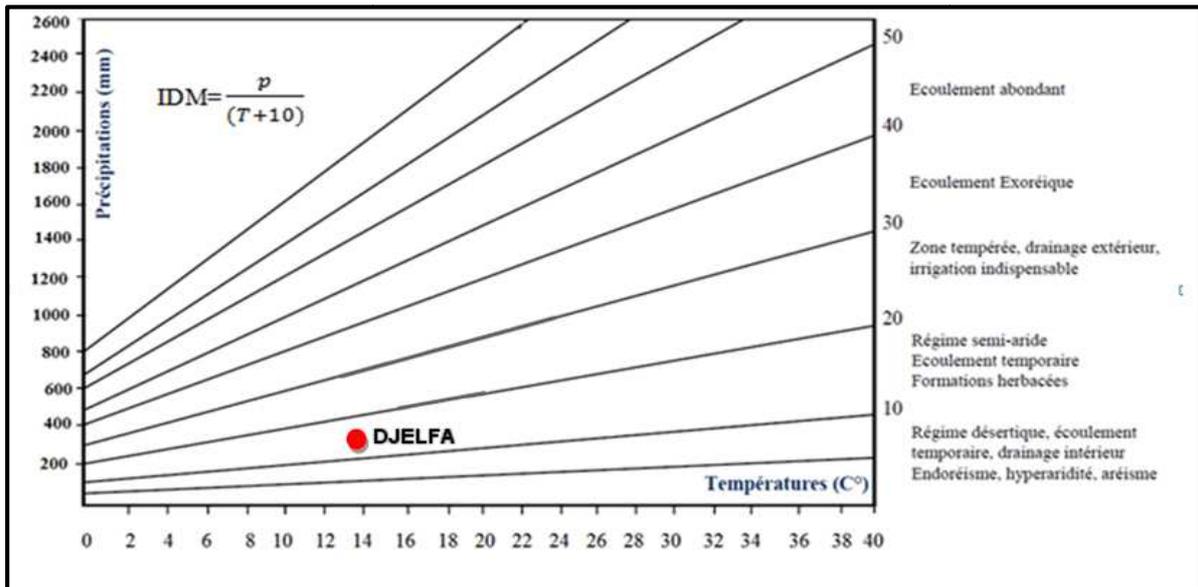


Figure 10 : Abaque de l'indice d'aridité annuel de Martonne.

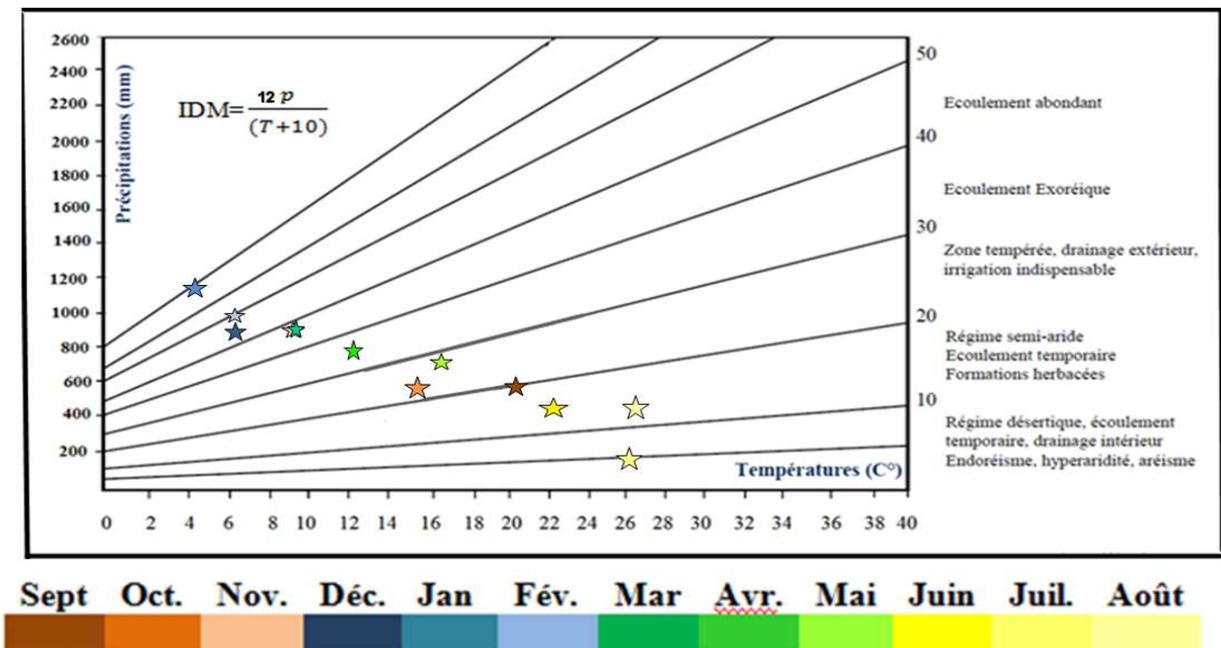


Figure 11 : Abaque de l'Indice d'aridité mensuel De Martonne.

Tableau 03 : Indices d'aridité mensuels (IDM) à la station de Djelfa

Mois	P (mm) de Djelfa	T °C de Djelfa	IDM Djelfa	Étage bioclimatique de Djelfa
Septembre	30,01	20,75	11,71	climat semi-aride
Octobre	23,5	15,33	11,13	climat semi-aride
Novembre	28,83	9,17	18,05	climat semi-aride
Décembre	26,32	6,73	18,87	climat semi-aride
Janvier	28,15	4,81	22,81	Climat tempéré
Février	27,77	6,14	20,65	Climat tempéré
Mars	28,72	9,12	18,03	climat semi-aride
Avril	30,93	12,47	16,52	climat semi-aride
Mai	33,63	16,93	14,98	climat semi-aride
Juin	19,32	22,58	7,12	climat désertique
Juillet	9,27	26,57	3,04	climat hyperaride.
Août	21,8	26,16	7,23	climat désertique
Moyenne	25,69	14,73	12,46	climat semi-aride

Il paraît de ce qui a précédé que selon les trois paramètres utilisés ; températures et précipitation dans le calcul des différents indices climatiques que la région de Djelfa est soumise à un climat semi-aride.

II. 3. Les facteurs climatiques :

Les facteurs climatiques dans leur ensemble permettent d'expliquer quantitativement l'intensité et la variabilité des composantes du régime hydrologique, dans le temps et dans l'espace, en interaction avec les conditions physico-géographiques de l'écoulement.

II. 3. 1. Les précipitations :

Les précipitations sont un facteur essentiel caractérisant le climat d'une région et un élément principal du bilan hydrique. Les précipitations jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eaux et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines pour constituer à moyen terme des ressources mobilisables non négligeables (Haied N, 2015).

II. 3. 1. 1. Les précipitations moyennes mensuelles :

Le calcul de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré sur un grand nombre d'années (43 années) donne un aperçu sur les variations mensuelles pluriannuelles des précipitations. Les valeurs sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 04 : Les précipitations moyennes mensuelles (mm) :

Mois Station	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Totale
Djelfa	30,01	23,5	28,83	26,32	28,15	27,77	28,72	30,93	33,63	19,32	9,27	21,8	308,24

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (figure 11) de la station de Djelfa, montre une homogénéité importante des précipitations d'un Mois à l'autre avec un maximum de l'ordre de 33.63 mm, durant le mois de Mai , et avec un minimum de 9.27 mm pendant le mois de Juillet.

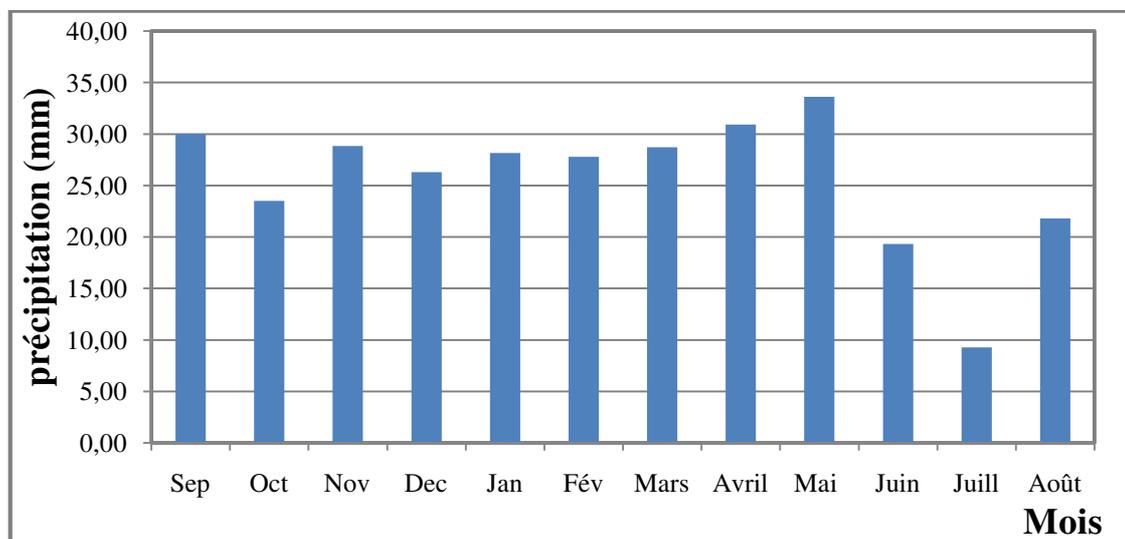


Figure 12 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles au station de Djelfa (1975 – 2018).

II. 3. 1. 2. Répartition saisonnière des précipitations :

Il est connu que le taux des précipitations diffère d'une saison à l'autre, pour déterminer les quantités de ce fait nous sommes intéressé aux précipitations saisonnières (**Automne** : Septembre, Octobre, Novembre. **Hiver** : Décembre, Janvier, Février.

Printemps : Mars, Avril, Mai. **Été** : Juin, Juillet et Août). Ce choix nous amène aux constatations suivantes :

Tableau 05 : Variation saisonnière des précipitations au station de Djelfa (1975-2018).

Saisons Station	Automne		Hiver		Printemps		Été		Totale	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Djelfa	24	7	54,70	16	191,60	55	74,70	22	308,24	100

D'après le tableau 05 :

- En automne, la pluviométrie enregistrée est la plus faible par rapport aux autres saisons elle est de 24 mm soit 7% de la totalité des pluies.
- En hiver les précipitations sont de 54.70 mm soit 16%.
- Le Printemps est la saison la plus pluvieuse avec 191.60 mm soit 55%.
- En Été le totale des précipitations est de 74.70 mm soit 22%.

Ce qui implique que le climat de Djelfa se caractérise par **PEHA**.

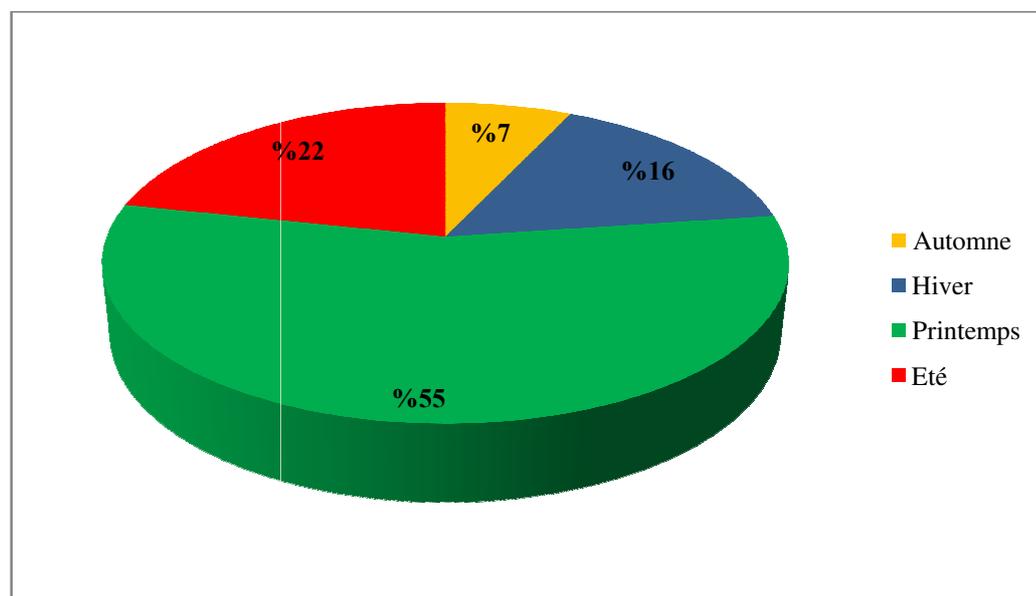


Figure 13 : Répartition saisonnière des précipitations à la station de Djelfa (1975-2018).

II. 3. 1. 3. Les précipitations moyennes annuelles :

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 308.24 mm, les variations interannuelles sont reportées dans le tableau n° 06.

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (CP). Ce paramètre est très important dans la détermination des années excédentaires et déficitaires. Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série à une station donnée.

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Le coefficient pluviométrique est en relation proportionnelle avec la pluviométrie
Nous avons deux cas :

- CP > 1: année excédentaire.
- CP < 1: année déficitaire (Haied N, 2015).

Remarque : la pluviométrie annuelle moyenne (p) est :

Station de Djelfa : $\bar{P} = 308.24$ mm.

Tableau 06 : Précipitations moyennes annuelles et les coefficients pluviométriques (1975-2018).

Année	Hauteur annuelle des précipitations P (mm)	Coefficient Pluviométrique	Les années déficitaires et excédentaires
1975/1976	443	1,44	Excédentaire
1976/1977	387	1,26	Excédentaire
1977/1978	184	0,60	Déficitaire
1978/1979	348,5	1,13	Excédentaire
1979/1980	286,2	0,93	Déficitaire
1980/1981	406	1,32	Excédentaire
1981/1982	376,7	1,22	Excédentaire
1982/1983	323,2	1,05	Excédentaire
1983/1984	138,3	0,45	Déficitaire
1984/1985	346,3	1,12	Excédentaire
1985/1986	378,3	1,23	Excédentaire
1986/1987	376,9	1,22	Excédentaire
1987/1988	333,2	1,08	Excédentaire
1988/1989	339,8	1,10	Excédentaire
1989/1990	363,1	1,18	Excédentaire
1990/1991	327,3	1,06	Excédentaire
1991/1992	290,2	0,94	Déficitaire

**Tableau 06 : Précipitations moyennes annuelles et les coefficients pluviométriques
(1975-2018) (Suite).**

Année	Hauteur annuelle des précipitations P (mm)	Coefficient Pluviométrique	Les années déficitaires et excédentaires
1992/1993	292,7	0,95	Déficitaire
1993/1994	225	0,73	Déficitaire
1994/1995	399	1,29	Excédentaire
1995/1996	487,9	1,58	Excédentaire
1996/1997	278	0,90	Déficitaire
1997/1998	294	0,95	Déficitaire
1998/1999	178	0,58	Déficitaire
1999/2000	109,1	0,35	Déficitaire
2000/2001	215	0,70	Déficitaire
2001/2002	250,9	0,81	Déficitaire
2002/2003	249,2	0,81	Déficitaire
2003/2004	371,5	1,21	Excédentaire
2004/2005	376	1,22	Excédentaire
2005/2006	357,6	1,16	Excédentaire
2006/2007	289	0,94	Déficitaire
2007/2008	328,3	1,07	Excédentaire
2008/2009	410,5	1,33	Excédentaire
2009/2010	358,6	1,16	Excédentaire
2010/2011	330,7	1,07	Excédentaire
2011/2012	241,8	0,78	Déficitaire
2012/2013	248,2	0,81	Déficitaire
2013/2014	310,72	1,01	Excédentaire
2014/2015	204,74	0,66	Déficitaire
2015/2016	252,6	0,82	Déficitaire
2016/2017	202,21	0,66	Déficitaire
2017/2018	345,1	1,12	Excédentaire

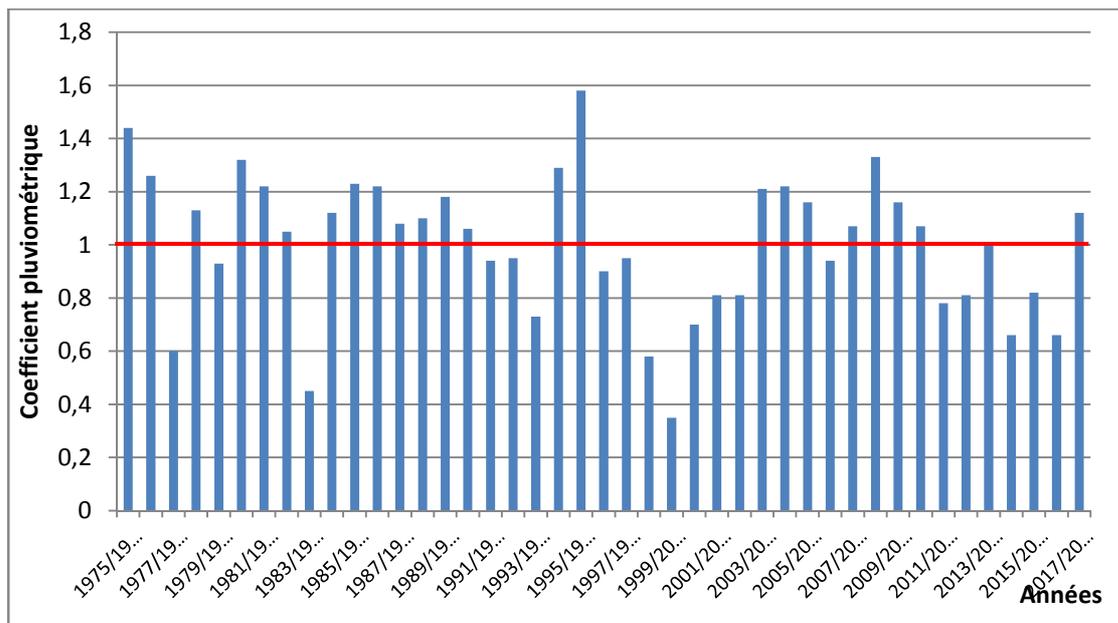


Figure 14 : Les variations du coefficient pluviométrique de la station Djelfa (1975-2018).

D’après cet histogramme, nous remarquons que les années excédentaires sont plus nombreuses que les années déficitaires.

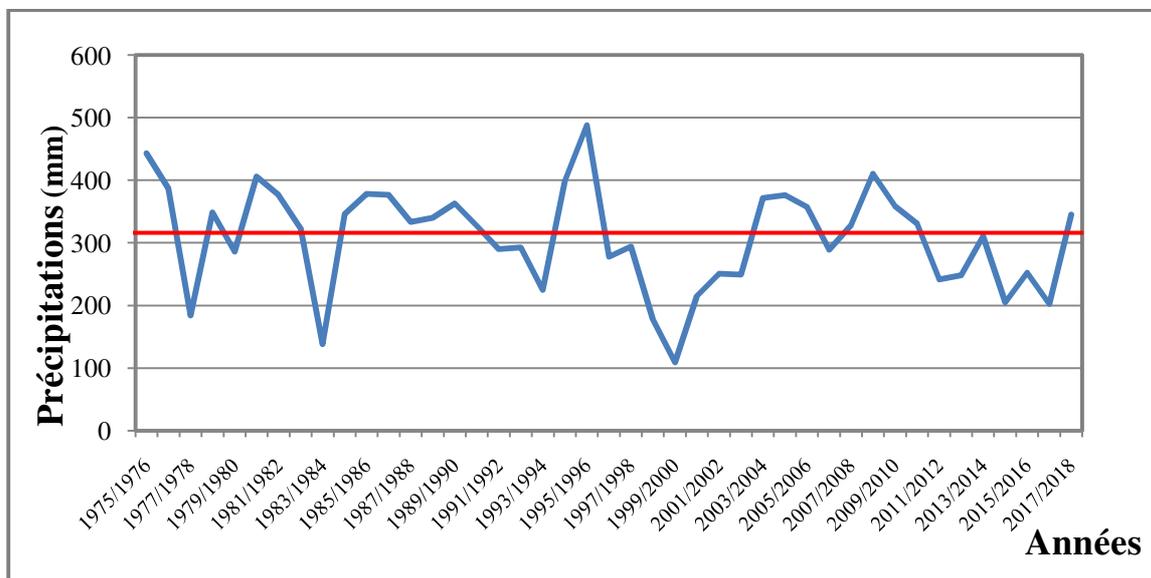


Figure 15 : Les variations des précipitations annuelles de la station de Djelfa (1975-2018).

II. 3. 2. La Température :

Les températures sont un facteur climatique très important qui régit directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (humidité, précipitation,...etc) et biogéographiques, le développement de la végétation, le phénomène de l'évapotranspiration et ainsi que le déficit d'écoulement annuel et saisonnier (Khadri S. 2009)

II. 3. 2. 1. La température moyenne mensuelle :

La température moyenne mensuelle mesurée au station de Djelfa (1975-2018), sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 07 : Températures moyennes mensuelles pour la période (1975-2018) :

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai.	Juin	Juill.	Août	Moy.
Station													
Djelfa	20,75	15,33	9,17	6,73	4,81	6,14	9,12	12,47	16,93	22,58	26,57	26,16	14,73

L'histogramme de la température moyenne mensuelle (figure 16) nous montre une différence assez proche des valeurs de la température. Nous remarquons aussi que le mois le plus chaud est le mois de juillet (avec une température de 26.57°C). Le mois le plus froid est le mois de Janvier avec 4.81 °C.

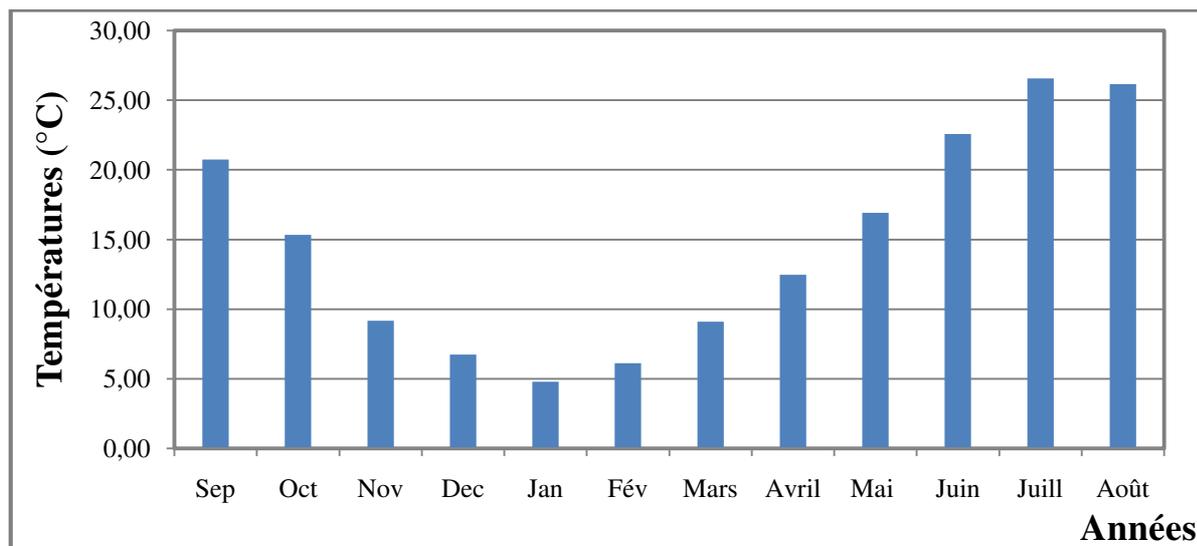


Figure 16 : Variation des températures moyennes mensuelles pour la station de Djelfa (1975-2018).

Tableau 08 : Température moyenne annuelle (1975 – 2018).

Année	T (°C) Djelfa	Année	T (°C) Djelfa
1975/1976	12,32	1997/1998	14,68
1976/1977	13,28	1998/1999	14,83
1977/1978	14,53	1999/2000	14,86
1978/1979	14,12	2000/2001	15,28
1979/1980	14,71	2001/2002	15,13
1980/1981	13,91	2002/2003	15,16
1981/1982	15,05	2003/2004	14,58
1982/1983	14,32	2004/2005	15,06
1983/1984	14,41	2005/2006	15,11
1984/1985	14,63	2006/2007	15,47
1985/1986	14,50	2007/2008	15,25
1986/1987	14,77	2008/2009	14,43
1987/1988	15,41	2009/2010	15,39
1988/1989	14,29	2010/2011	14,95
1989/1990	15,30	2011/2012	15,10
1990/1991	14,18	2012/2013	14,51
1991/1992	13,11	2013/2014	15,28
1992/1993	14,56	2014/2015	15,22
1993/1994	14,01	2015/2016	15,48
1994/1995	14,78	2016/2017	15,80
1995/1996	13,98	2017/2018	17,19
1996/1997	14,47	Moyenne	14,73

L'analyse des valeurs des Variations interannuelles des températures observées sur une période de 43 ans (Figure 17 et Tableau 08), nous montre que l'année la plus chaude est l'année 2017/2018, avec une moyenne de 17.19° C, et l'année la plus froide est l'année 1975/1976 Avec une moyenne de 12.32°C.

II. 4. Estimation des paramètres du bilan hydrique :

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration. Le bilan hydrique englobe l'étude des paramètres suivants :

- L'évapotranspiration.
- Les écoulements de surface ou ruissellement.
- L'infiltration

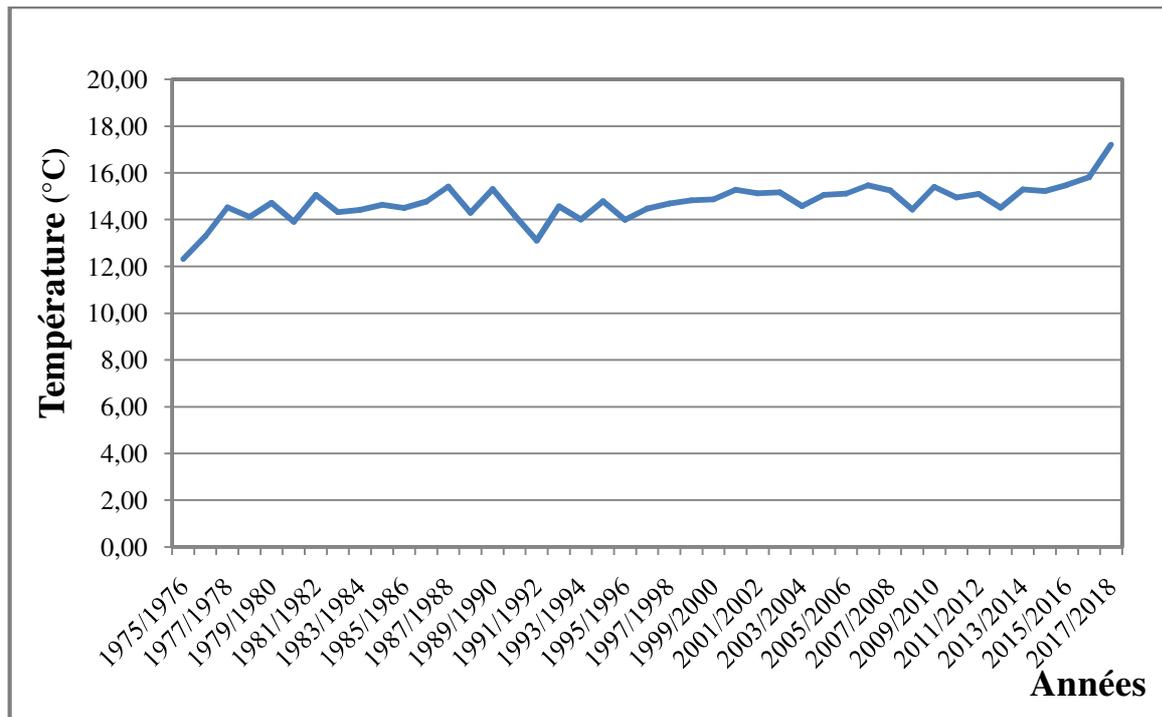


Figure 17 : Variation des températures moyennes annuelles pour la station de Djelfa (1975-2018).

II. 4. 1. Définition de l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration constitue un élément important du bilan hydrologique. Elle représente la quantité d'eau qui s'évapore et retourne vers l'atmosphère sous forme de vapeur.

Elle résulte de la combinaison de deux phénomènes l'un physique (évaporation) et l'autre biologique qui est lié au couvert végétal (transpiration) (Haied N, 2015)..

II. 4. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'ETR est la quantité d'eau généralement exprimée en mm évaporée ou transpirée par : le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant (mer, lac, cours d'eau...) et se manifeste de fait en conditions naturelles dans un site donné, compte tenu de la demande climatique de l'air et de la disponibilité en eau du sol (Haied N, 2015). Pour le calcul de L'ETR trois formules sont utilisées :

- ✚ Formule de Turc.
- ✚ Formule de Coutagne.
- ✚ Formule de Thornthwaite.

A- Formule de Turc :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{(0,9 + \frac{P^2}{L^2})}} \quad L = 300 + 25t + 0.05t^2$$

Avec :

ETR : Évapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en °C.

L : Pouvoir évaporant.

Les résultats sont portés dans le tableau suivant :

Tableau 09 : ETR annuelle selon la méthode de Turc

Paramètres Station	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Djelfa	308,24	14,73	828	302,46

B- Formule de Coutagne :

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

Cette formule n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante :

$$\lambda = \frac{1}{8\lambda} < p < \frac{1}{2\lambda} \quad \text{pour} \quad \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.1T}$$

Avec :

ETR : L'évapotranspiration réelle en m.

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en °C.

Donc :

Tableau 10 : ETR selon la méthode de Coutagne:

Paramètres Station	P (m)	T (°C)	λ	$\frac{1}{8\lambda}$	$\frac{1}{2\lambda}$
Djelfa	0,308	14,73	0,35	0,04	0,17

La formule de Coutagne n'est pas applicable dans notre cas parce que :

$$1/8\lambda = 0.04 < p = 0.308$$

Mais, $1/2\lambda = 0.17 < p = 0.308$

La quantité des précipitations ne remplit pas la condition, donc la formule n'est pas applicable.

II. 4. 3. Interprétation du bilan hydrique :

D'après le bilan hydrique de la station de Djelfa, selon la méthode de Thornthwaite, la **RFU** (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de **Novembre** pour atteindre son maximum (**26 mm**) de **Janvier à Mars**. Le surplus d'eau alimente le ruissellement et l'infiltration. La **RFU** diminue à partir du mois d'**Avril**, caractérisant le déficit agricole (**DA**) qui se poursuit jusqu'à **Octobre**.

L'**ETP** atteint son maximum au mois **Juillet (172.7 mm)**, et son minimum au mois de **Janvier (8 mm)**. L'Excédent commence à partir du mois de **Janvier** et s'étale au mois de **Mars**, avec un maximum au mois de **Février (16.2 mm)**, l'épuisement du stock commence au mois de **Mai** et se termine au mois d'**Octobre** avec un déficit agricole maximum au mois de **Juillet (163,4 mm)** où l'irrigation devient nécessaire.

Tableau 11 : Bilan hydrique à la station de Djelfa pour la période (1975/2018).

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	20,74	8,6	1,03	96,9	30,01	-66,9	-0,7	0,0	0,0	30,0	66,9	0,0
O	15,33	5,5	0,97	56,5	23,5	-33,0	-0,6	0,0	0,0	23,5	33,0	0,0
N	9,16	2,5	0,86	22,2	28,83	6,7	0,3	6,7	6,7	22,2	0,0	0,0
D	6,73	1,6	0,81	12,8	26,31	13,5	1,1	13,5	20,2	12,8	0,0	0,0
J	4,8	0,9	0,87	8,0	28,14	20,1	2,5	5,8	26,0	8,0	0,0	14,3
F	6,13	1,4	0,85	11,6	27,77	16,2	1,4	0,0	26,0	11,6	0,0	16,2
M	9,11	2,5	1,03	26,3	28,72	2,4	0,1	0,0	26,0	26,3	0,0	2,4
A	12,46	4,0	1,10	46,2	30,92	-15,2	-0,3	-15,2	10,8	46,2	0,0	0,0
M	16,92	6,3	1,21	82,5	33,62	-48,8	-0,6	-10,8	0,0	44,4	38,1	0,0
J	22,57	9,8	1,22	131,3	19,31	-112,0	-0,9	0,0	0,0	19,3	112,0	0,0
J	26,56	12,5	1,24	172,7	9,27	-163,4	-0,9	0,0	0,0	9,3	163,4	0,0
A	26,16	12,2	1,16	157,7	21,8	-135,9	-0,9	0,0	0,0	21,8	135,9	0,0
Annuel	14,7	67,8		824,7	308,2	-516,5				275,3	549,4	32,9

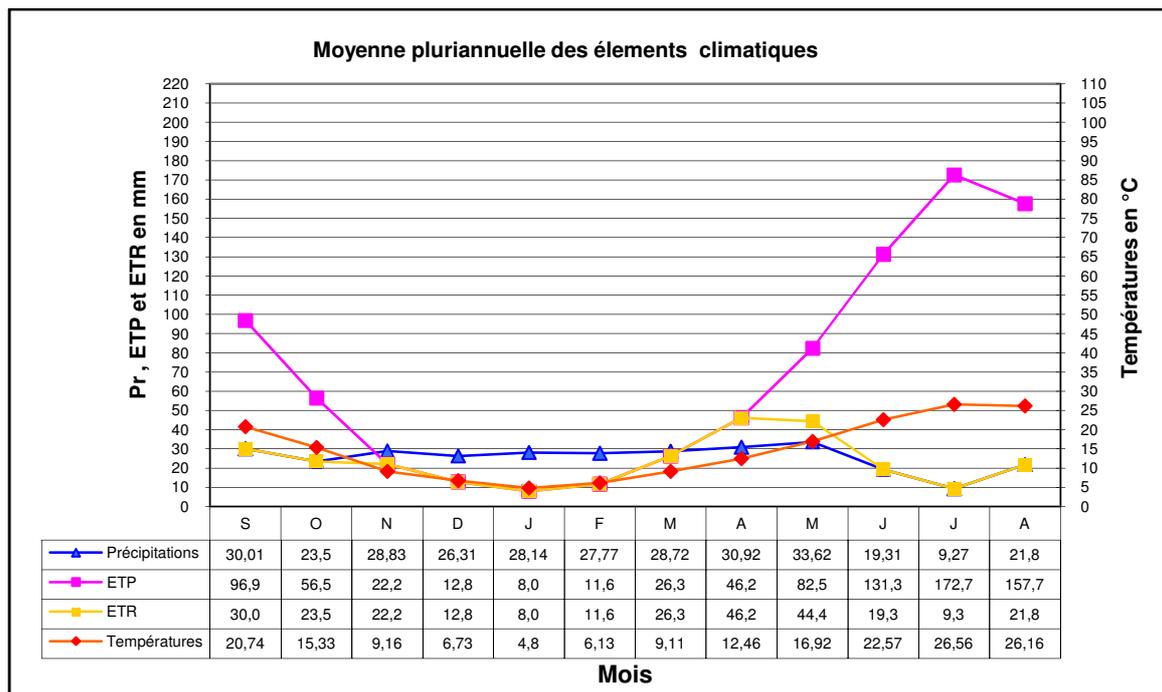


Figure 18 : Moyennes pluriannuelles des éléments climatiques à la station de Djelfa pour la période (1975/2018).

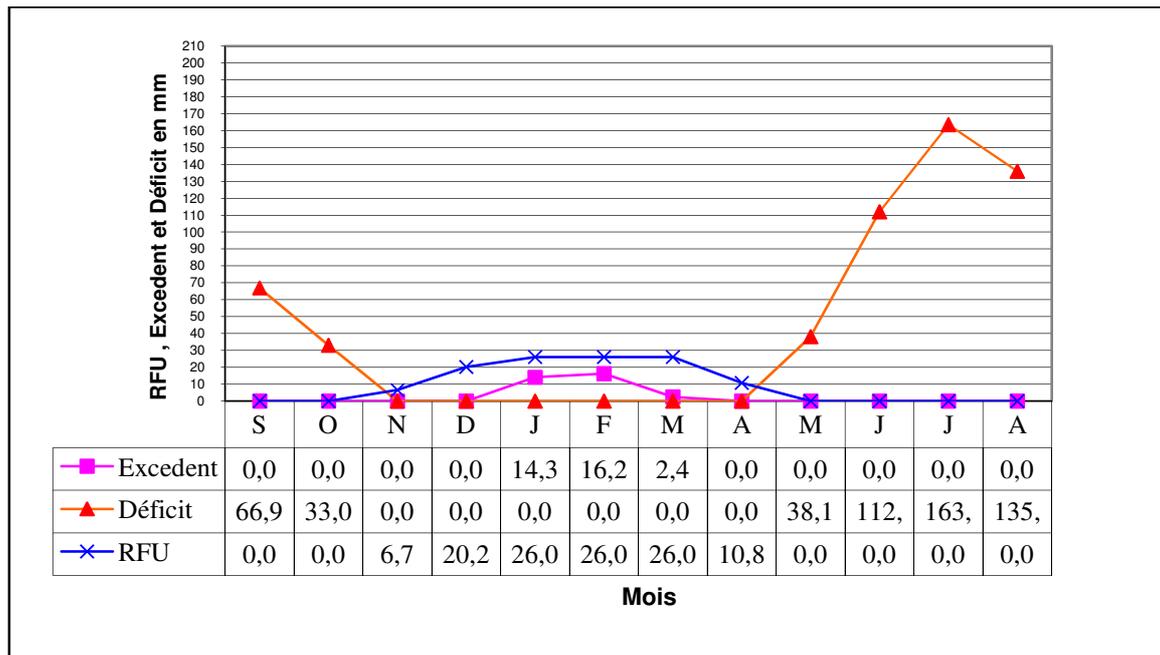


Figure 19: Diagramme de la variation de la RFU, du déficit agricole et de l'excédent à la Station de Djelfa (1975/2018).

II. 4. 4. Comparaison des résultats des deux méthodes :

L'utilité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des deux méthodes (la méthode de Coutagne n'est pas applicable) pour aboutir à une meilleure approche de L'ETR. (Tableau12), ce qui par la suite fera ressortir la formule la mieux appropriée à la région de Djelda.

L'ETR, calculée par la méthode de Turc semble surestimée pour tous les mois de l'année. Cependant la formule de Thornthwaite présente des résultats assez proches de la réalité en plus qu'elle prend en considération un coefficient de correction.

Tableau 12 : Résultats des valeurs de l'ETR selon les méthodes

Méthodes Station	Indice	Thornthwaite	Turc
		Djelfa	273,1

II. 5. Estimation de la lame d'eau écoulée :

II. 5. 1. Le ruissellement :

L'évaluation du ruissellement est nécessaire pour évaluer l'apport en eau de surface et d'apprécier l'érosion mécanique et chimique qui affecte la surface du sol.

- Formule de Tixerant-Berckaloff

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

Avec :

P : Précipitation moyenne en **m**.

R : Ruissellement en **m**.

ETP : Evaporation potentiel en **m**

Tableau 13 : Ruissellement selon la formule de Tixerant-Berckaloff.

Paramètres	P (m)	ETP(m)	R(m)
Station			
Djelfa	0,3082	0,8251	0,0143

Le bilan hydrique est défini selon l'équation suivante.

$$P = ETR + R + Ie$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles en mm/an.

ETR : Evapotranspiration réelle en mm /an.

Ie : Infiltration efficace en mm/an.

II. 5. 2. Infiltration efficace :

L'infiltration efficace est déduite de l'équation du bilan hydrique :

$$Ie = P - ETR - R$$

- Si $Ie > 0$: Les entrées sont supérieures aux sorties.
- Si $Ie < 0$: Les entrées sont inférieures aux sorties.

Tableau 14 : Les valeurs de l'infiltration efficace.

Paramètres	P (mm)	ETR		R		Ie	
Station		(mm/an)	(%)	(mm/an)	(%)	(mm/an)	(%)
Djelfa	308,24	273,06	88	14,34	5	20,84	7

II. 6. Conclusion :

Après cette étude hydroclimatologique de notre région d'étude, on a pu conclure qu'elle possède un climat continental de type semi-aride à hiver frais, et un été chaud et sec. Les précipitations durant la période (1975-2018) sont relativement peu importantes et elles sont de l'ordre de **308.24** mm en moyenne annuelle, la température moyenne annuelle est de **14.73** °C.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR) déterminées par la méthode de Thornthwaite, sont respectivement égales à **824,7** mm/an et **275,3** mm/an (89 % des précipitations).

Le ruissellement (R) estimé par la formule de Tixeront-Berkaloff est de **14.34** mm/an , soit **5** % des précipitations moyennes annuelles . Cette valeur est faible mais elle est admissible.

L'infiltration (I) est estimée de l'équation du bilan de l'eau, elle est de l'ordre de **20.84** mm/an, soit **7%** des précipitations, ce qui est extrêmement faible.



CHAPITRE III

Hydrogéologie

III. 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 pouvons connaître 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.

III. 2. Inventaire des points d'eau :

La nappe du Mio-Plio-Quaternaire du Synclinal de Djelfa est captée par des puits et des forages, mais le nombre des puits reste élevé par rapport aux forages.

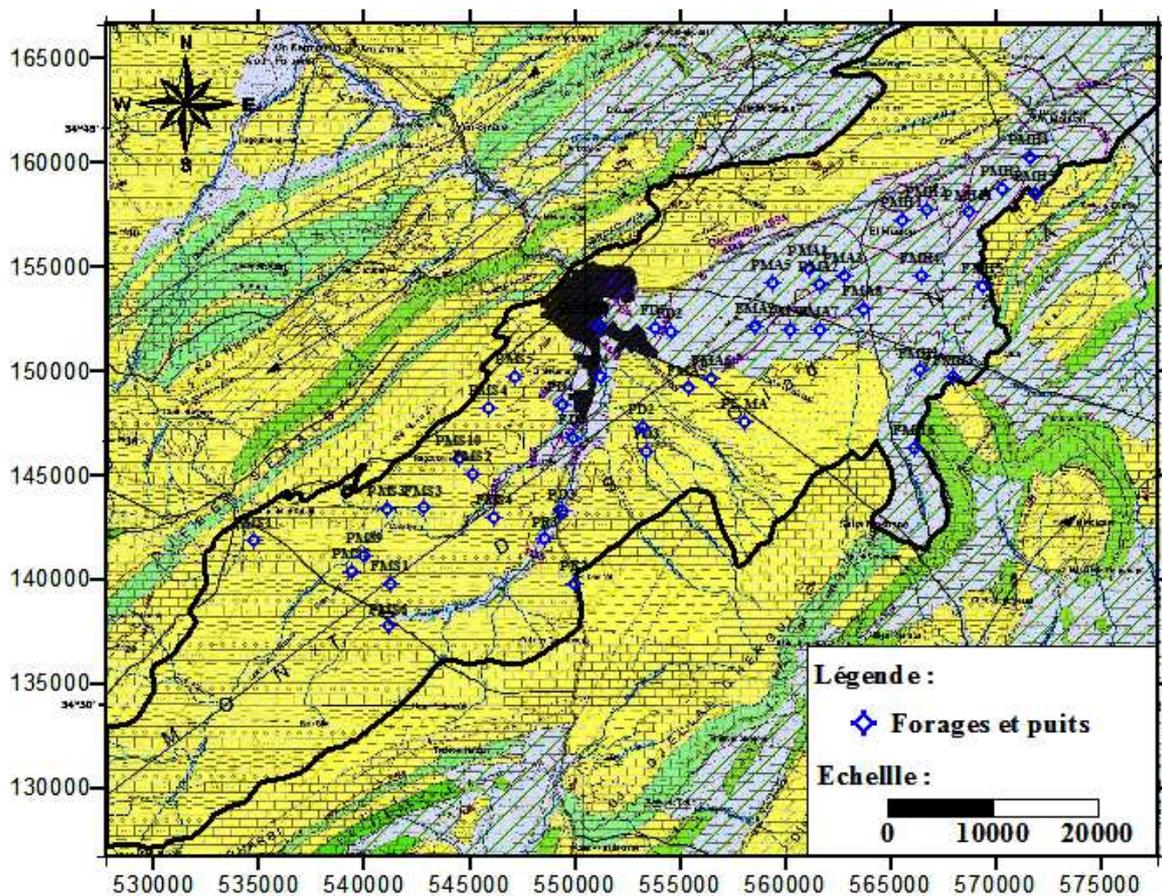


Figure 20 : Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du Synclinal de Djelfa.

III. 3. Géométrie de la nappe :

Pour mettre en évidence la nature de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire du Synclinal de Djelfa une étude géophysique a été élaboré par la S.N. REPAL (Société Nationale de Recherches et d'Exploitation des Pétroles en Algérie). Cette étude a contribué à la détermination des différentes formations hydrogéologique du Synclinal de Djelfa.

III. 3. 1. Aperçu géophysique :

L'étude géophysique a été est réalisée au niveau du versant Nord-Ouest du Synclinal de Djelfa, où ont été effectués de rares sondages mécaniques locaux ne dépassant pas 50 m de profondeur. Les dépôts de comblement épais du Néogène et Quaternaire discordants sur les termes crétacés masquent les structures. Cette prospection électrique (géophysique) a couvert la partie Sud-Ouest de la ville de Djelfa (dépression) (Figure 21), qui est limitée au Nord par le djebel Sénalba et au Sud par Djebel Djellal Chergui. (Chibane, B. 2010).

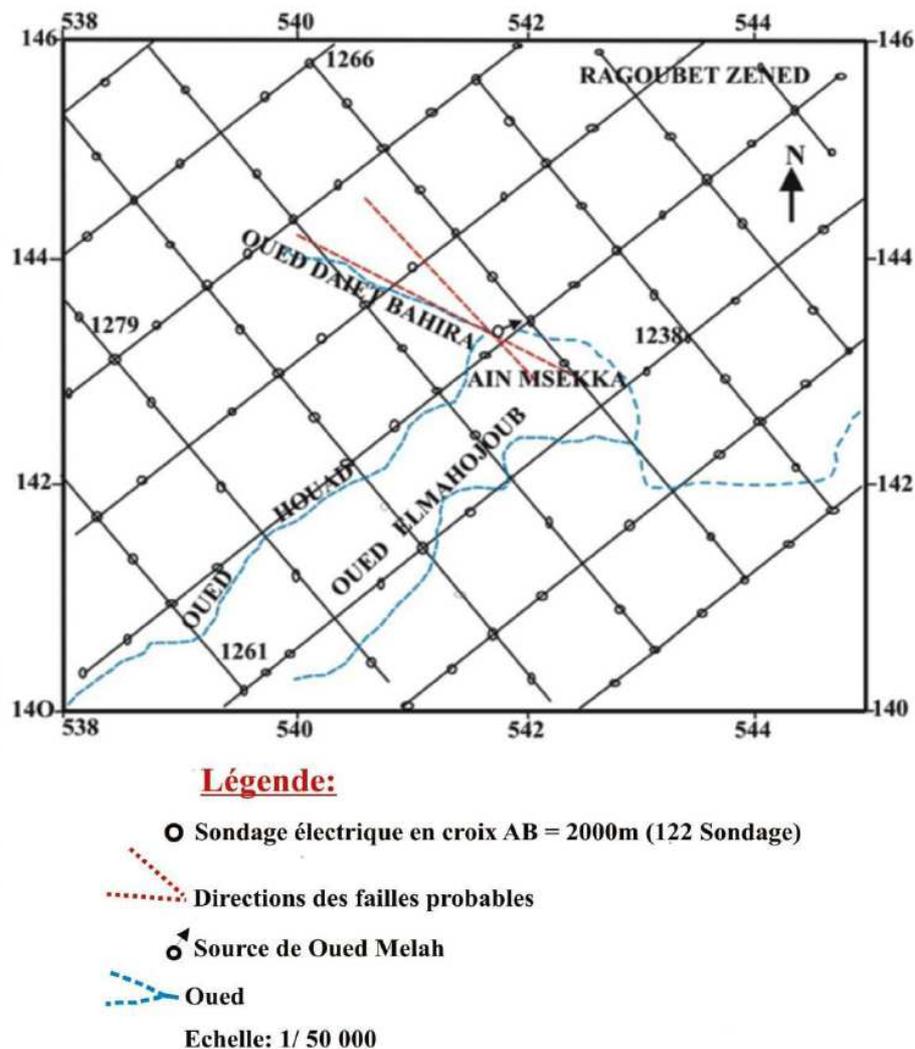


Figure 21 : Étude géophysique de la zone d'Ain Msekka (Chibane B., 2010).

Pour la reconnaissance régionale du terrain, des sondages électriques ont été réalisés pour mettre en évidence le substratum du Sénonien vers 100 à 300m et les calcaires karstiques du Turonien vers 600 à 800m de profondeur. Une distance d'environ 2000m en ligne AB=4000m a été préconisée. Les profils espacés de 3000m seront dispersés suivant la direction Nord-Ouest, Sud-Est. Les contrastes de résistivités à obtenir étant importants (Tableau 15) (Chibane, B. 2010).

Les formations qui ont été traversées par les sondages mécaniques et qui peuvent servir de log de référence (Figure 23), sont les suivantes :

- La croûte calcaire ;
- Un ensemble marneux avec des lentilles de calcaires, de grès et de conglomérats. L'épaisseur de cet ensemble augmente vers la partie centrale du synclinal ;
- Les calcaires, calcaires marneux et marnes formant le substratum sénonien. Sous la série sénonienne, on a un ensemble turonien caractérisé par une dalle de 100m à 120m de calcaire massif lithographique non atteint par les sondages mécaniques (Chibane B., 2010).

Tableau 15 : Résultats des résistivités obtenues par sondage électrique (Chibane B., 2010).

Etages	Lithostratigraphie	Résistivités en $\Omega.m$
Mio-Plio-Quaternaire	Argiles, marnes et limons	10 à 50
	Lentilles de grès et conglomérats	50 à 300
Sénonien	Alternance de marnes et calcaires	20 à 300
Turonien	Calcaires karstifiés altérés	≤ 300
	Calcaires karstifiés non altérés	300 à 1000
	Calcaires compactes	> 1000
Cénomaniens	Marnes	10 à 50

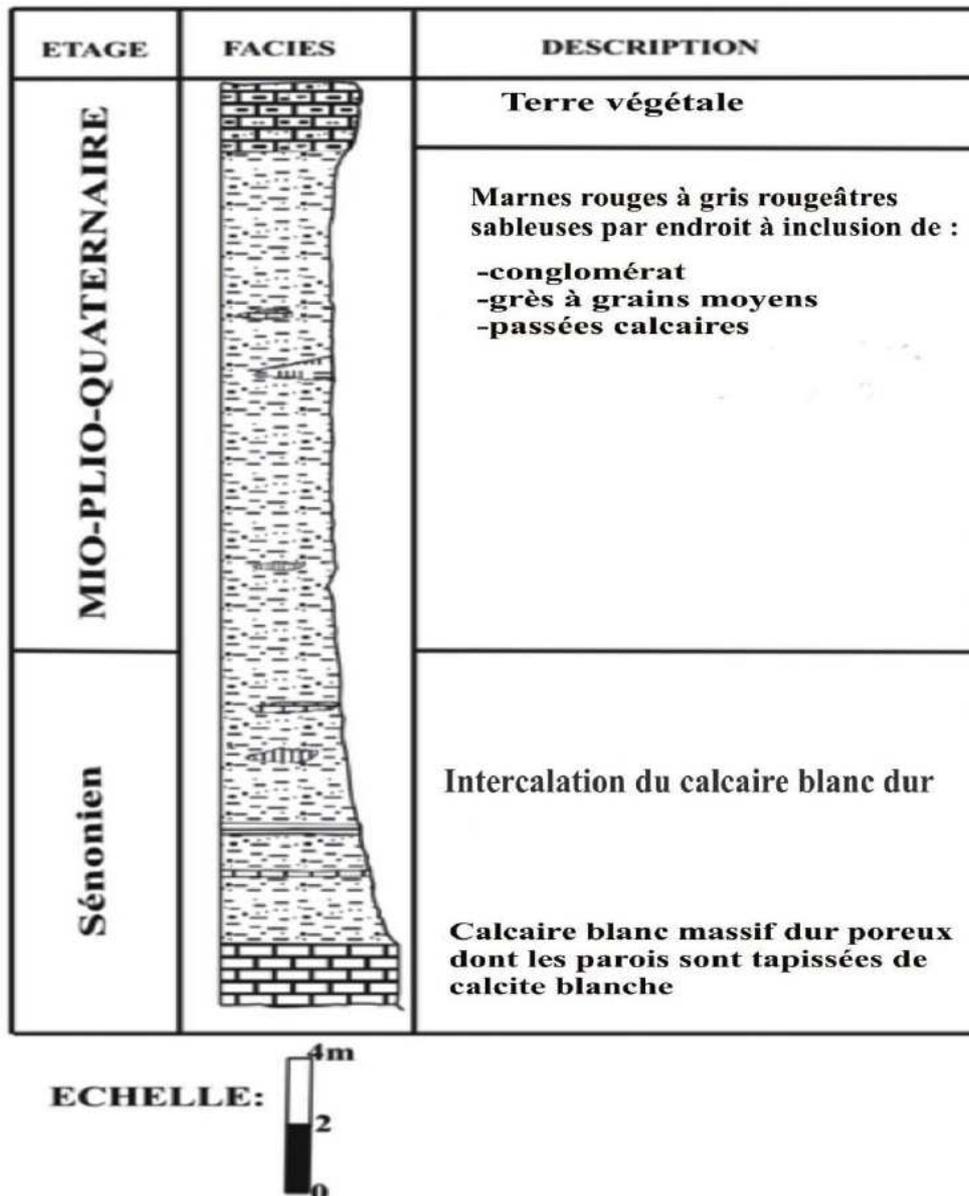


Figure 22 : Log synthétique des sondages mécaniques du site El-Mekimen (S.N.R.E.P.A.L., 1979).

III. 3. 2. Formations Aquifères :

Les formations hydrogéologiques déterminées à l'aide de la géophysique selon Boudjehra H., 2013, sont les suivantes (Figure 23) :

III. 3. 1. 1. Grès du Barrémien :

Formés par les grès rouges, blanchâtres ou jaunâtres de nature compacte de granulométrie fine et homogène. Ces formations sont caractérisées par l'existence des diaclases et fractures.

III. 3. 1. 2. Grès de l'Albien :

L'Albien est représenté par des grès rouges compacts passant parfois à des grès quartzeux et quartzites. Dans sa partie inférieure, les passages marneux sont fréquents. Le pendage très régulier des couches est de 40° à 45° de direction Sud-Est. Les diaclases et les failles de faibles rejets sont fréquentes. Ces dernières sont à l'origine de sources qui sortent au contact des grès et des marnes imperméables de l'Aptien.

III. 3. 1. 3. Calcaire du Turonien :

Cette formation est formée de calcaires dolomitiques et de dolomies massives, caractérisée par l'existence des fissures et diaclases, jouant un rôle important en favorisant l'infiltration des eaux. Ces calcaires reposent sur les séries marneuses du Cénomaniens et sont surmontés par des séries imperméables marneuses et marno-calcaires du Sénonien inférieur.

III. 3. 1. 4. Mio-plio-quadernaire (zone d'étude) :

C'est un aquifère hétérogène qui se trouve dans la partie centrale du synclinal de Djelfa où affleurent des argiles rouges, par endroit recouvert de galets fluviaux. La teneur en sable dans les argiles est très faible. Les formations du Mio-plio-quadernaire reposent sur le Sénonien, dont les niveaux marneux assurent la rétention des eaux.

III. 4. Etude piézométrique :

Les données utilisées dans cette étude ont été recueillies de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Ces données concernent la mesure du niveau piézométrique de 45 points d'eau au cours de deux campagnes piézométriques, la première en basses eaux Octobre 2014 (période des basses eaux) et la deuxième à Avril 2015 (période des hautes eaux).

III. 4. 1. Piézométrie de la nappe du Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa :

L'allure générale des cartes piézométriques démontre que l'écoulement souterrain suit un axe Sud-Ouest vers le Nord-Est parallèle à l'axe d'orientation du synclinal (Rahmani B., 2016).

L'interprétation détaillée de ces cartes montre qu'à l'aide des courbes isopièzes ainsi que la direction des axes d'écoulement, trois zones bien distinctes s'individualisent. La première zone au Sud-Ouest et au centre, dans la zone Sud-Ouest, l'écoulement se fait du Sud-Ouest vers le Nord-Est directement vers les oueds M'sekka et Ben Naam. Nous observons l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines qui peut être due à l'influence des forages.

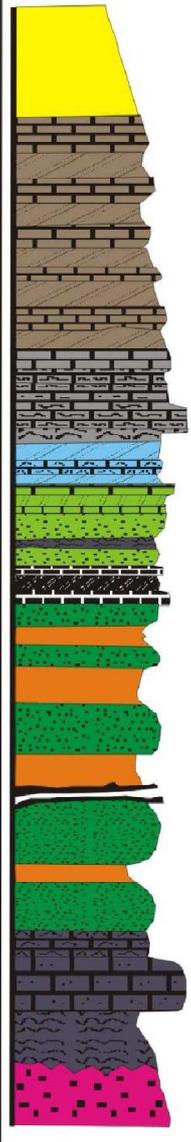
Faciès et étages correspondants	Lithostratigraphie	Hydrogéologie
 Mio-plio-quaternaire 200à250 m	Limons sableux, croûte calcaire, argiles, marnes rouges, lentilles de grès calcaréo-conglomératiques	Peu perméable, exploité par des puits de grands diamètres
Sénonien 800 à 1000 m	Calcaires et marnes en alternance et des lentilles de gypse assez fréquente vers la partie sommitale	Peu perméable et peu productif
Turonien 450 m	Calcaires au sommet, marnes et calcaires à la partie médiane et gypse à la base .	Type karstique très productif
Cénomaniens 350 m	Essentiellement marneux+intercalations de calcaires et gypses	Imperméable
Albien >200 m	Calcaires et marnes en alternance	Imperméable
Albien <400 m	Grès massifs fins+passées argiles grisâtres	Aquifère important
Aptien	Calcaires et marnes en alternance	Imperméable
Barrémien 150 m	Alternance de grès et d'argiles gréseuses rouges avec une stratification entrecroisée fréquente dans les grès . Les fissures et les diaclases sont nombreuses .	Aquifère productif
Néocomien	Argiles gréseuses à la base puis des calcaires dolomitiques et des calcaires gréseux	Imperméable
Trias	Argiles gréseuses, schistes vert et marnes bariolées + inclusion de conglomérats	Imperméable

Figure 23 : Colonne hydrogéologique du synclinal de Djelfa Echelle : 1/20 000 (Chibane B., 2010)

Le gradient hydraulique est relativement moyen, il est de l'ordre de 1%. Dans la partie centrale, les courbes isopièzes s'enserrent et deviennent parallèles aux formations géologiques, ce qui s'explique par une alimentation de la nappe par les formations Sénoniennes semi perméables du flanc Nord du Synclinal où l'écoulement s'effectue du Nord-Ouest vers le Sud-Est. Le gradient hydraulique dans cette première zone est de l'ordre de 1 à 2%.

Donc dans cette zone, les lignes de courant convergent vers l'oued principal Djelfa-

Mellah, la nappe est drainée par l'oued (Rahmani B., 2016).

Une deuxième zone centre Est où et l'écoulement se fait du Sud vers le Nord. vers une dépression justifiant une surexploitation des forages dans cette zone, avec l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines et un gradient hydraulique relativement moyen à faible il est de l'ordre de 0,5%. (Rahmani, B. 2016).

La dernière zone est à l'Est avec gradient hydraulique relativement moyen de l'ordre de 1%. Un sens d'écoulement selon un axe de drainage d'une direction Ouest-Est alimentant les formations calcaires Sénoniennes (Rahmani B., 2016)

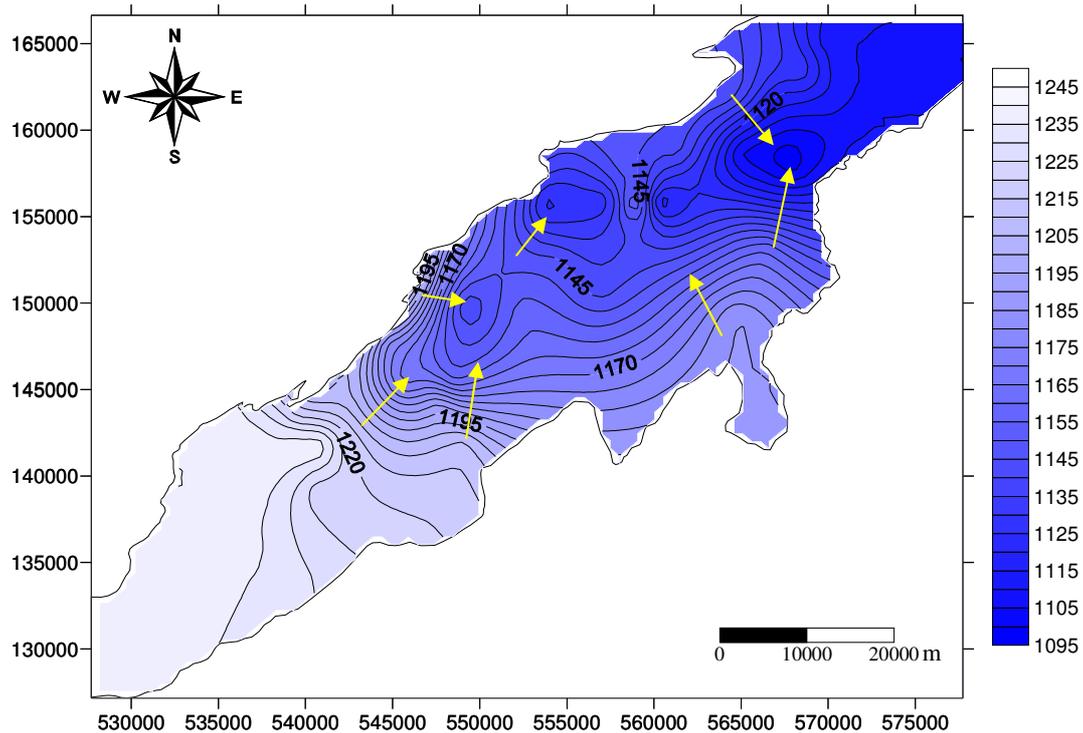


Figure 24 : Carte piézométrique de la nappe du Mio-plio-quaternaire du synclinal de Djelfa pour la période des basses eaux (Octobre 2014).

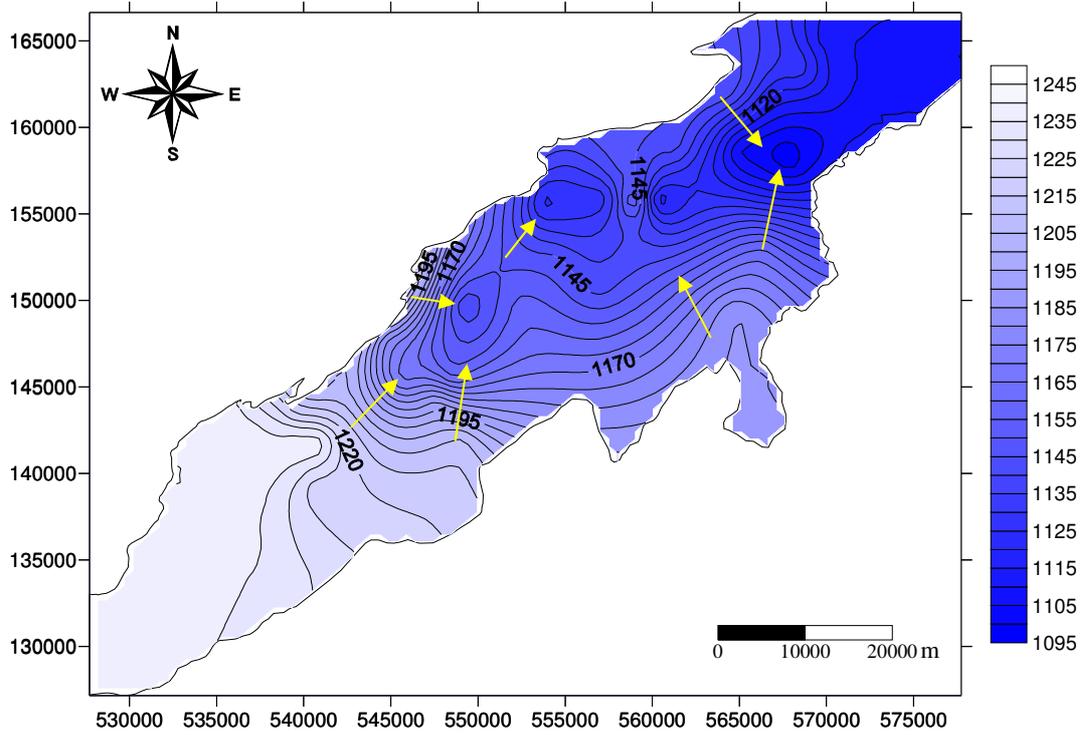


Figure 25 : Carte piézométrique de la nappe du Mio-plio-quaternaire du synclinale de Djelfa pour la période des hautes eaux (Avril 2015).

III. 5. Détermination des paramètres hydrodynamiques :

Les caractéristiques hydrodynamiques ont été déterminées en se basant sur les essais par pompage exécutés par l'ANRH et la DHW de Djelfa dans deux forages, le puits 55 et le forage 5 Juillet.

Tableau 16 : Coordonnées géographiques des deux forages d'eau testés par pompage.

Points d'eau	Formation captée	Coordonnées Lambert (Km)			NS (m)	Q (l/s)
		x (m)	Y(r)	z (m)		
Puits 55	Mio-plio-quaternaire	551,14	151,36	1140	7,4	10
Forage 5 Juillet	Mio-plio-quaternaire	553,75	150,76	1178	51,22	5

III. 5. 1. Les essais par pompage :

Une campagne des essais par pompage a été réalisée par la DHW de Djelfa dans deux forages (zone central), afin de définir les caractéristiques hydrodynamiques et les caractéristiques d'exploitation de la nappe après fin de sondage (Chibane B., 2010).

III. 5. 2. Méthode d'interprétation de C.E Jacob (1950) :

La méthode interprétative des données (courbes de la descente et celle de la remontée) est la méthode d'approximation logarithmique reposant sur l'expression hydrodynamique en régime transitoire établie par C.E. Jacob (1946).

a- Puits P55 :

Il se situe au voisinage de l'Oued Djelfa-Melah et est implanté dans des niveaux semi perméables. L'essai de pompage a duré 1h16mn, suivi d'une remontée de 2h20m. Le rabattement maximal atteint était de 10,14m. Le niveau dynamique final après pompage était de 17,54m pour un débit de pompage de 101/s. Le diamètre du puits est de 2,5m, constituant ainsi une source de pertes de charge importantes. (A.N.R.H., 2003)

- **Courbe de descente du P55 :**

D'après la courbe d'essais, on a calculé la pente à partir de la première droite qui est de l'ordre de 2,17m (Fig. 26), engendrant ainsi une transmissivité :

$$T = \frac{0.183 \times 10^{-2}}{2.17} = 0.84 \cdot 10^{-3} m^2/s$$

$$T = 8.4 \cdot 10^{-4} m^2/s$$

Cette courbe de descente ne marque pas de stabilisation, ceci peut être expliqué par le temps de pompage très court. (A.N.R.H., 2003)

- **Courbe de remontée du P55 :**

La courbe présente au début un alignement de points quelque peu espacés (Fig. 27), accusant une pente très prononcée de 2,29m. La transmissivité s'évalue dans ce cas à :

$$T = \frac{0.183 \times 10^{-3}}{2.29} = 0.08 \cdot 10^{-2} m^2/s$$

$$T = 8 \cdot 10^{-4} m^2/s$$

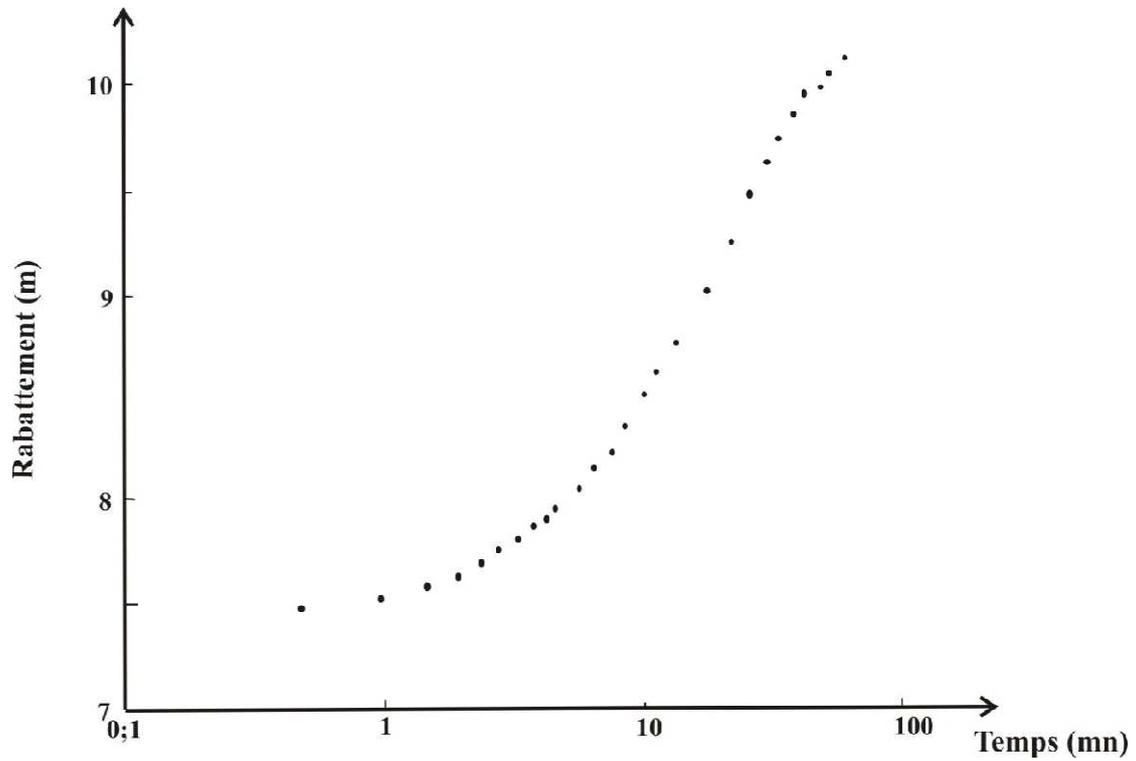


Figure 26 : Courbe de descente du Puits (P55).

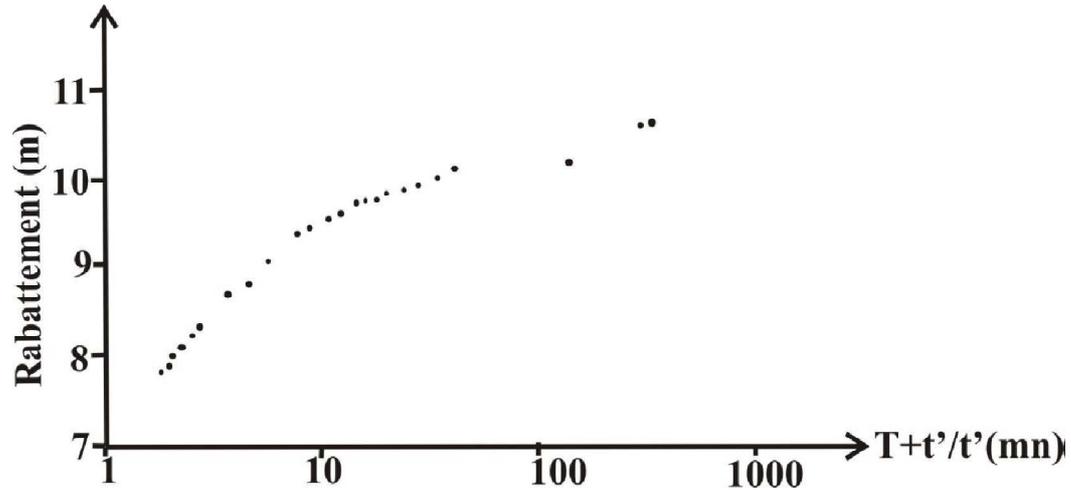


Figure 27 : Courbe de remontée du puits (P55).

b-Forage du 05 Juillet :

Dans le but de renforcer l'alimentation en eau potable de la zone Est de la ville de Djelfa, la Direction d'Hydraulique a réalisé un forage d'exploitation (Forage du 05 Juillet). Le forage a été réalisé par l'entreprise FOREM-HYD à l'aide d'un appareil rotary SD25 à la boue

bentonite comme fluide de circulation. Le forage a été implanté pour exploiter le remplissage Mio-plio-Quaternaire (A.N.R.H., 2003)

• **Courbe de descente du forage du 05 Juillet :**

La stabilisation du rabattement s’effectue autour de 60m (Fig. 28), avec une pente de 36,86m et une transmissivité de :

$$T = \frac{0.183 \times 0.005}{39.86} = 2,29 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$T = 2.29 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

• **Courbe de remontée du forage du 05 Juillet :**

Cette courbe présente une allure non linéaire des points atteignant 50m de rabattement résiduel (Fig. 29) et une pente de 38,18m avec une transmissivité de :

$$T = \frac{0.183 \times 0.005}{38.18} = 2.39 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

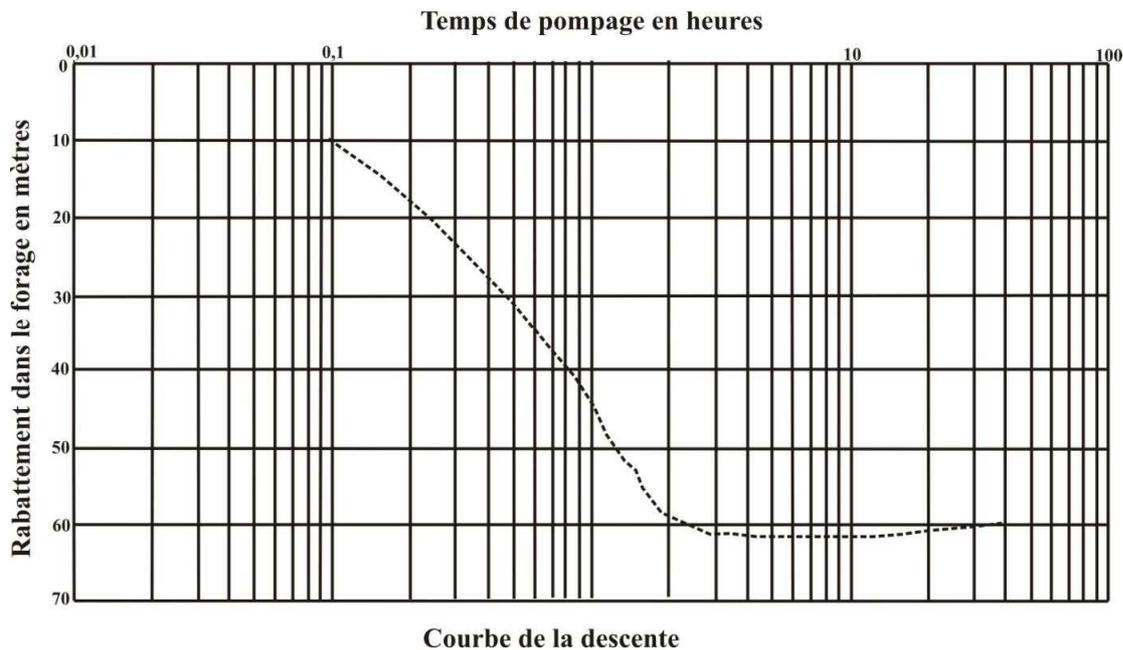


Figure 28 : Courbe de descente du forage 05 Juillet.

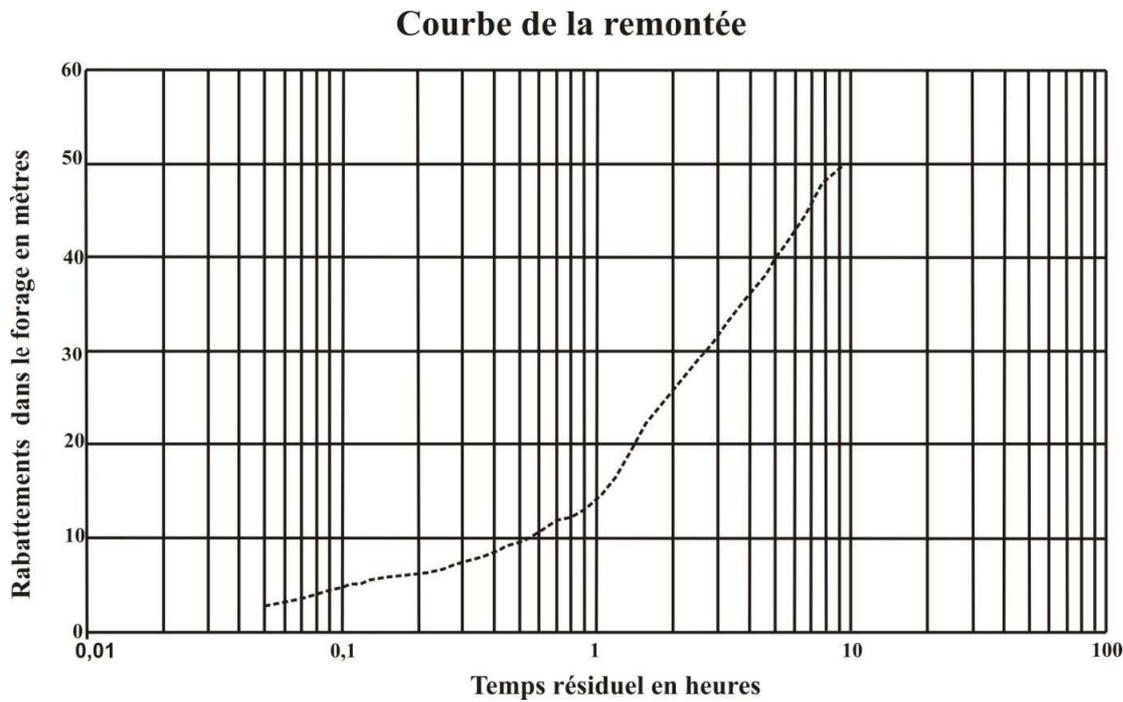


Figure 29 : Courbe de remontée du forage 05 Juillet.

III. 6. Conditions aux limites :

Les formations du Mio-plio-quaternaire reposent sur le Sénonien, dont les niveaux marneux assurent la rétention des eaux. La nappe bénéficie d'une source d'alimentation très importante, soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration. Elle est caractérisée par une limite à flux entrant au niveau de piémont Sud de Djebel Senalba et le piémont Nord de Djebel Djellal Chargui et Gharbi, qui sont constitués essentiellement d'alternance des calcaires et marnes d'âge Sénonien. A l'Est, la nappe est caractérisée par une limite à flux sortant vers la région de Mouilah, et vers les calcaires du sénonien bordant la nappe, où les courbes isohypses montrent un axe de drainage qui alimente ces formations. Les courbes isohypses qui sont perpendiculaire aux bordures montrent des limites à flux nul.

Il faut signaler que l'Oued principal Djelfa-Mellah draine la nappe Mio-Plio-Quaternaire en période des basses et hautes eaux.

III. 7. Conclusion :

D'après l'étude hydrogéologique il résulte que :

Les formations hydrogéologiques qui sont déterminées dans la nappe de la formation Mio-plio-quaternaire sont des argiles, des calcaires, des marnes et des limons avec des lentilles de grès et des conglomérats. C'est un aquifère hétérogène qui se trouve dans la partie

centrale du synclinal de Djelfa, cette dernière repose sur le Sénonien, dont les niveaux marneux assurent la rétention des eaux.

La nappe est alimentée par deux flancs du synclinal (Djebel Senalba au flanc Nord et Djebel Djellal Chergui et Djellal Gharbi au flanc Sud) soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration par l'intermédiaire des failles.

La carte piézométrique montre que l'écoulement des eaux souterraines convergent vers les principaux oueds. L'écoulement principal se fait dans la même direction que l'Oued Djelfa-Mellah.

Les essais par pompages effectués au niveau de l'aquifère montrent que les valeurs de la transmissivité moyenne estimée au niveau du forage 05 Juillet $T = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ est inférieure à celle du puits P55 qui est de l'ordre de $T = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.



CHAPITRE IV

Hydrochimie

IV. 1. Introduction :

Les systèmes aquifères peuvent subir des atteintes graves dans leur qualité. Le phénomène est d'autant plus alarmant pour les systèmes aquifères situés à proximité des surfaces agricoles ainsi que les agglomérations.

Les analyses chimiques permettent d'examiner les conditions physico-chimiques et géologiques auxquelles ces eaux sont liées.

L'étude de la chimie des eaux souterraines (l'hydrochimie) permet de suivre l'évolution spatiale des différents éléments métalliques dissous et d'estimer leur origine, d'estimer la profondeur de circulation des eaux, et d'apprécier la qualité des eaux vis-à-vis la potabilité et à l'irrigation.

Le but de l'étude concerne, en premier lieu, la détermination des faciès chimiques des eaux souterraines et l'appréciation de la potabilité des eaux ainsi que la détermination de l'indice de la qualité de l'eau (WQI).

IV. 2. Echantillonnage et analyses Hydrochimiques :

Deux campagnes de prélèvement d'eau ont été effectuées par l'ANRH en Octobre 2014 et Avril 2015, 27 points d'eau ont été choisis, en se basant sur une bonne répartition spatiale.

IV. 2. 1. Méthode de prélèvement :

La méthode de prélèvement utilisée par le laboratoire de l'Agence National des Ressources Hydraulique (ANRH) est la suivante :

Les paramètres physico-chimiques (température, pH, et conductivité) sont mesurés in situ au moyen d'appareillage de terrain avec des sondes sélectives pH-mètre pHep (HANNA), conductimètre type Delta OHM HD 3406.2. Les échantillons ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène (deux flacons par échantillon), l'un pour l'analyse des sels nutritifs après addition de quelques gouttes de chloroforme, l'autre pour l'analyse des éléments majeurs (après addition de quelques gouttes d'acide nitrique).

Les échantillons d'eau, prélevés dans la journée, ont été conservés dans des flacons à basse température (4°C) et les analyses ont été effectuées après 4 à 5 jours (Haied N., 2015).

IV. 2. 2. Les méthodes d'analyse :

Les méthodes utilisées sont :

- **Méthode volumétrique** pour les éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^-)
- **Méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique** (en utilisant un spectrophotomètre Hi 83200 (HANNA) pour les éléments (Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-).

Pour la fiabilité des résultats d'analyse, on a procédé à l'application de la méthode de la balance ionique avec une erreur de 6%.

IV. 3. Etude des paramètres physiques :**IV. 3. 1. Le potentiel d'hydrogène (pH) :**

Le pH est la mesure de l'acidité de l'eau. Il exprime la concentration en ions hydrogène H^+ d'une eau. Les caractères plus acide (inférieur à 5) ou plus basique (supérieur à 8,5) altèrent les micro-organismes vivant dans une eau (la norme de l'OMS est comprise entre 6.5 et 9) (Lokman B. & al, 2017).

A partir des résultats (Figures 30, 31) on voit clairement que le pH varie entre 7.58 et 8.2 durant la période des hautes eaux et entre 7.49 et 8.1 pendant la période des basses eaux.

IV. 3. 2. Conductivité électrique :

La conductivité est l'inverse de la résistivité, définie comme étant l'aptitude d'une eau (ou d'un matériau) à se laisser traverser par un courant électrique. La connaissance de ce paramètre, (ou de son inverse la résistivité), est précieuse dans la mesure où elle permet indirectement de d'estimer la minéralisation de l'eau, car elle est proportionnelle à la teneur en sels dissous d'une eau et dont les valeurs représentatives sont prises à des températures voisines de 20°C et exprimées en $\mu\text{s}/\text{cm}$.

L'organisation mondiale de la santé (OMS) recommande une classification des eaux, selon les plages de valeurs de la conductivité, qui sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 17 : Normes et classification des eaux selon leur conductivité.

Classe de qualité	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	2 500	3 000	3 500	4 000	>4 000

(Source : OMS 1994).

La variation de la conductivité donne des informations importantes sur l'évolution de la qualité de l'eau. Le tableau 18 présente la relation qui lie les valeurs de conductivité à la minéralisation.

Tableau 18 : Relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997).

Conductivité en $\mu\text{s/cm}$, à 20°C	Minéralisation
- inférieur à 10.	- eau de minéralisation très faible.
- comprise entre 100 et 200.	- eau de minéralisation faible.
- comprise entre 200 et 400.	- eau de minéralisation peu accentuée.
- comprise entre 400 et 600.	- eau de minéralisation moyenne.
- comprise entre 600 et 1000.	- eau de minéralisation importante.
- supérieur à 1000.	- eau de minéralisation excessive.

Les valeurs de la conductivité des eaux de la zone étudiée (Figures 32, 33) sont comprises entre 637 et 2945 $\mu\text{s/cm}$. Ces eaux, selon leurs conductivités, peuvent être classées en tant que des eaux de bonne qualité avec une minéralisation excessive. Les fortes valeurs se localisent dans la partie Nord ouest du synclinal en contact avec les piémonts des massifs à l'Ouest. Elles sont dues aux apports d'eau qui sont chargés venus des piémonts des massifs (surtout à partir des formations marno-calcaires du Sénonien) et en relation avec les formations triasiques par l'intermédiaire des failles. L'élévation des valeurs de la conductivité se fait suivant un axe Sud-Ouest, Nord-Est (sens d'écoulement des eaux souterraines).

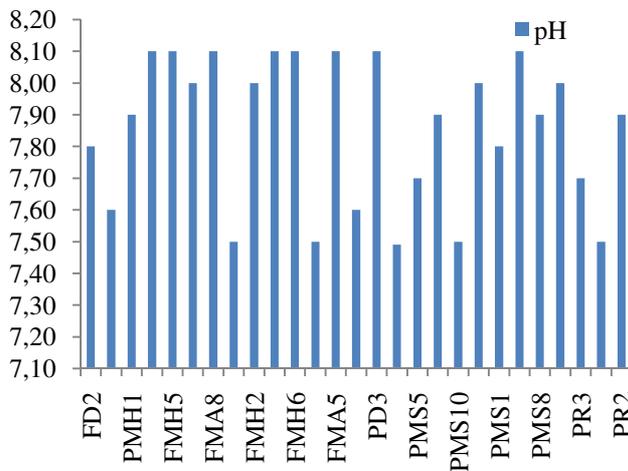


Figure 30 : Histogramme de la variation du pH (Octobre 2014)

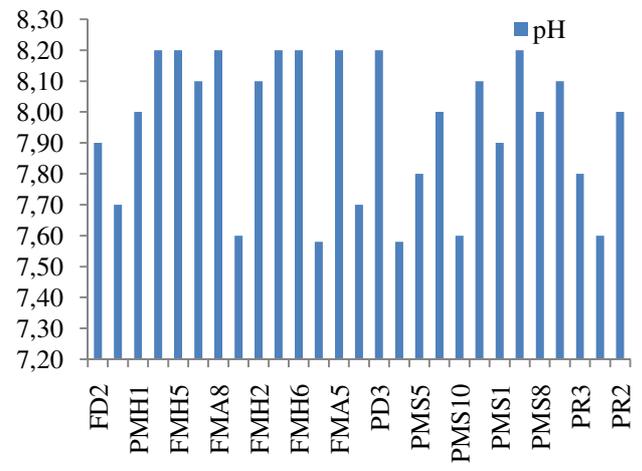


Figure 31 : Histogramme de la variation du pH (Avril 2015)

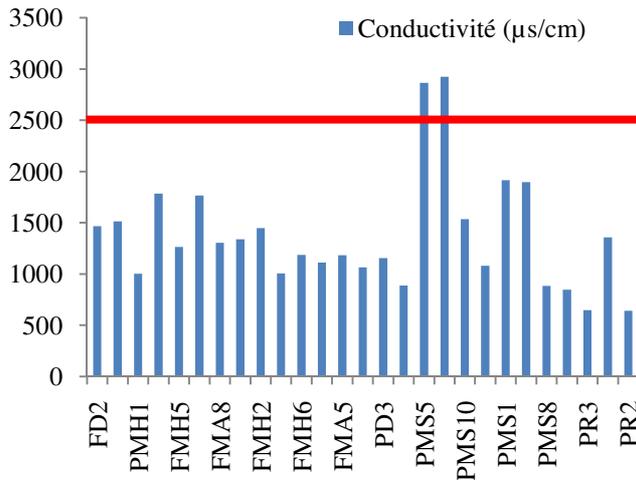


Figure 32 : Histogramme de la variation de la conductivité électrique µs/cm (Octobre 2014)

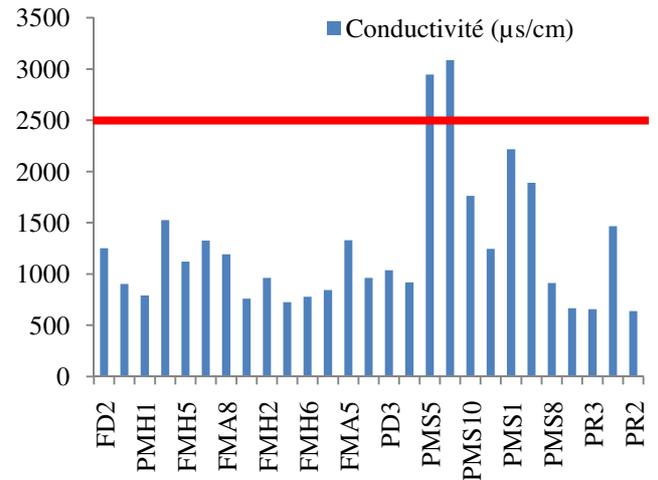


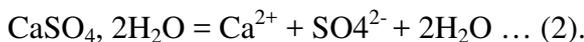
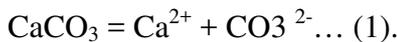
Figure 33 : Histogramme de la variation de la conductivité électrique µs/cm (Avril 2015)

IV. 4. Etude des paramètres chimiques :

Les différents paramètres ont été analysés au laboratoire de l'ANRH, le dosage a concerné les éléments majeurs rencontrés dans une eau souterraine à savoir : Pour les anions : Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻, et les cations : Ca⁺, Mg⁺, Na⁺, K⁺, et le nitrates (NO₃⁻).

IV. 4. 1. Calcium (Ca⁺⁺) :

Le calcium est un élément (métal) alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄).



L'organisation mondiale de la santé (OMS, 2006) recommande pour l'eau destinée à la consommation humaine une valeur limite de 200 mg/l, exprimée en CaCO₃.

D'après les figures 34 et 35, on peut constater que les teneurs en calcium dépassent parfois la norme (120 mg/l), et que ces teneurs oscillent entre 32.75 à 188.67 pour la période des hautes eaux et de 41.35 à 169.82 pour la période des basses eaux.

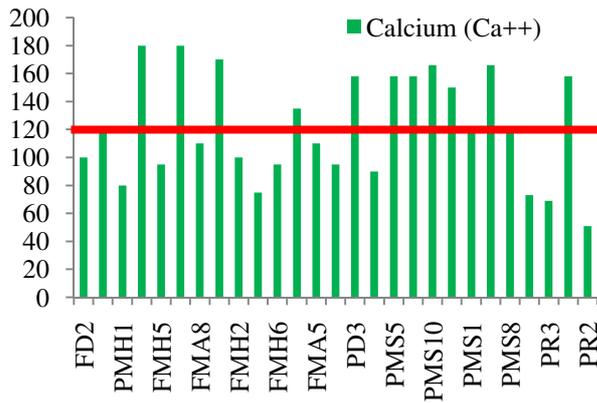


Figure 34 : Histogramme de la variation de calcium Ca²⁺ (Octobre 2014).

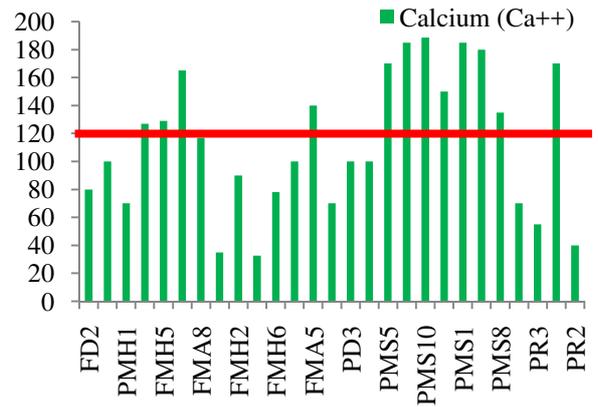


Figure 35 : Histogramme de la variation de calcium Ca²⁺ (Avril 2015).

IV. 4. 2. Magnésium (Mg⁺⁺) :

L'origine de magnésium dans les eaux souterraines est liée à la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (Magnésite et dolomite).



D'après les analyses chimiques, on remarque que les concentrations les plus élevées du Mg et qui dépassent la norme de l'OMS de 2006 (50mg/l) sont dues au lessivage des formations géologiques.

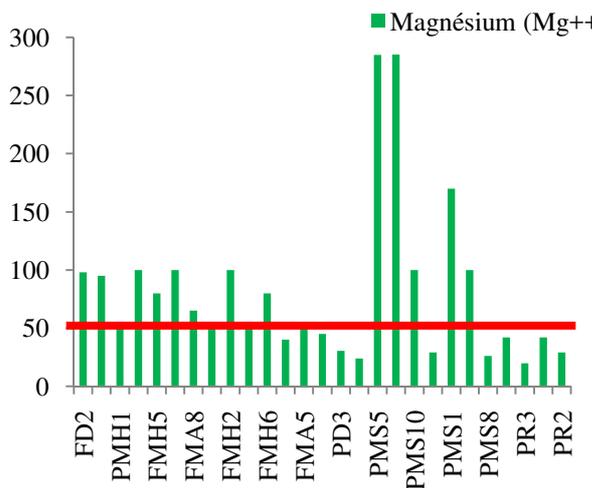


Figure 36 : Histogramme de la variation de magnésium (Mg²⁺) (Octobre 2014).

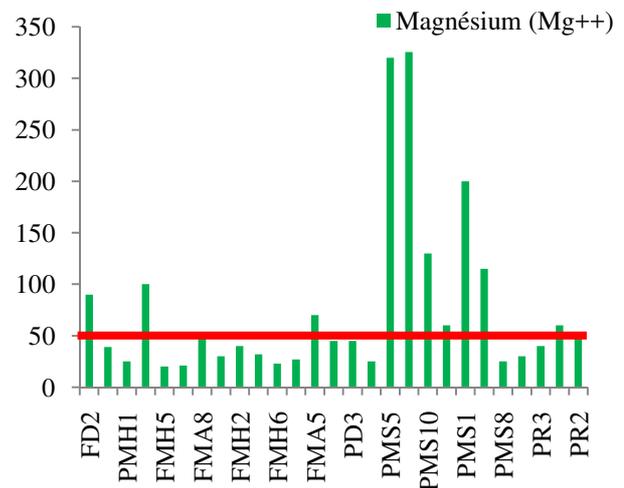


Figure 37 : Histogramme de la variation de magnésium (Mg²⁺) (Avril 2015).

IV. 4. 3. Sodium (Na⁺) :

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :

$$\text{NaCl} = \text{Na}^+ + \text{Cl}^- \dots (5).$$

Les valeurs importantes avoisinent les 120 mg/l, notant que ces concentrations ne dépassent pas la norme de l'OMS (120 mg/l). La région Nord-Est c'est la région où on enregistre les valeurs les plus élevées, alors que la zone Sud se caractérise par des concentrations inférieurs à 50 mg/l.

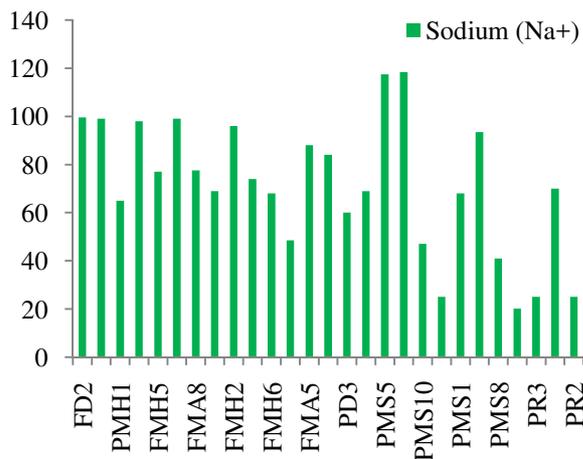


Figure 38 : Histogramme de la variation de sodium (Na⁺) (Octobre 2014).

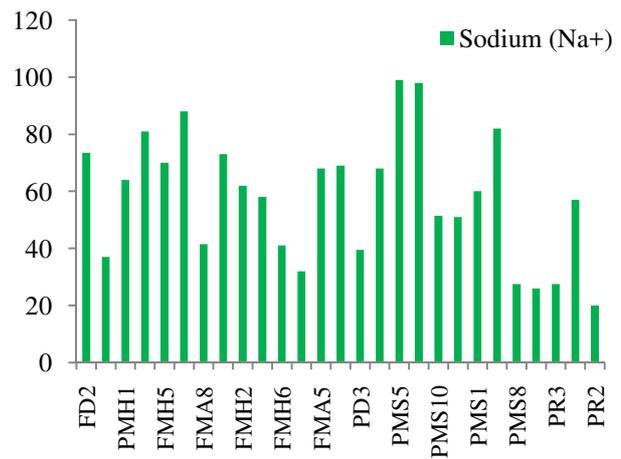


Figure 39 : Histogramme de la variation de sodium (Na⁺) (Avril 2015).

IV. 4. 4. Potassium (K⁺):

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK).

Les teneurs de potassium, ne peuvent provenir que des engrais et des formations argileuses qui entrent dans la formation du mio-plio-quadernaire.

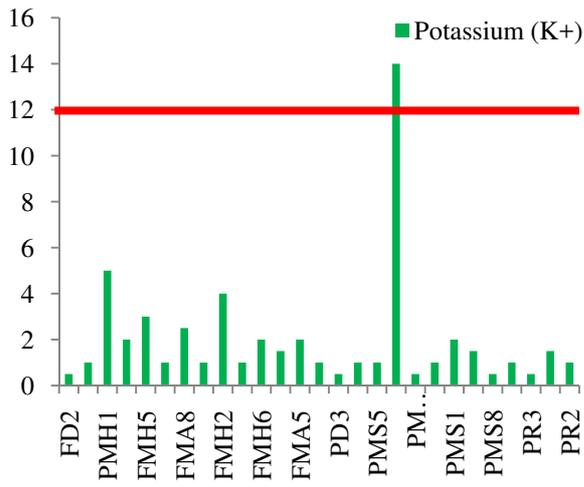


Figure 40 : Histogramme de la variation de potassium (K⁺) (Octobre 2014).

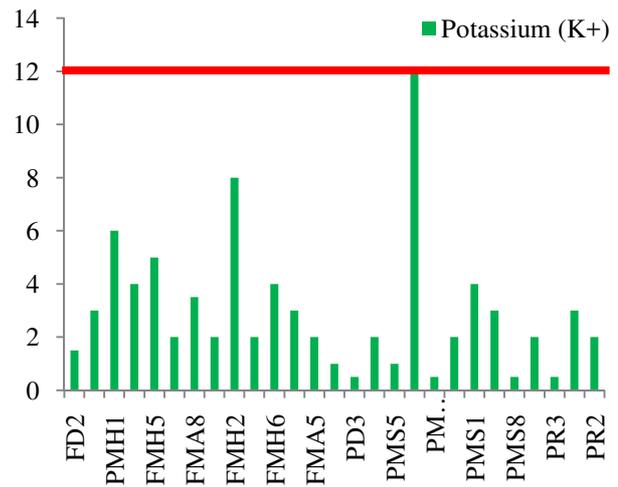
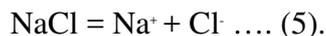


Figure 41 : Histogramme de la variation de potassium (K⁺) (Avril 2015).

IV. 4. 5. Les chlorures (Cl⁻) :

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution.

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations gypsifères, salifères et à l'effet de la salinité marine dans les aquifères côtières. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



Dans notre cas les teneurs en chlorures varient entre 32 à 260 mg/l, les teneurs les plus élevées se concentrent dans la partie Nord-Ouest au piémont Sud du flanc Nord du synclinal.

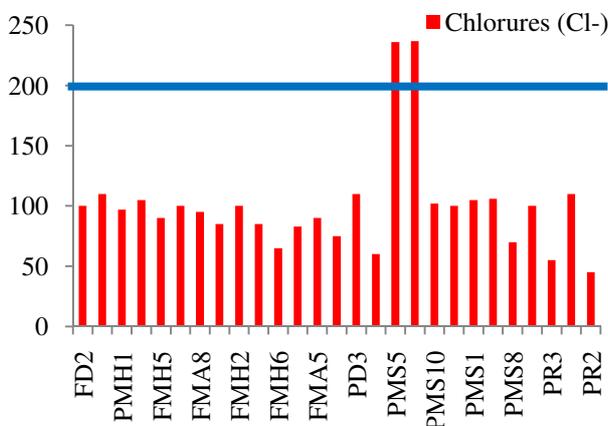


Figure 42 : Histogramme de la variation de chlorure (Cl⁻) (Octobre 2014).

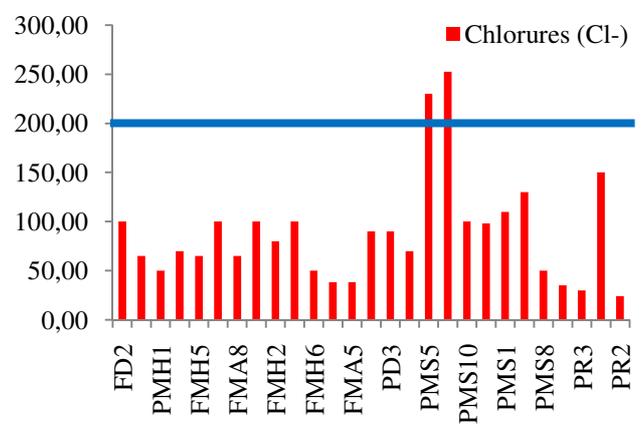
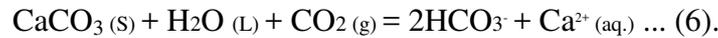


Figure 43 : Histogramme de la variation de chlorure (Cl⁻) (Avril 2015).

IV. 4. 6. Bicarbonates (HCO₃⁻) :

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution est donnée comme suit :



Dans les eaux naturelles l'alcalinité, exprimée en HCO₃⁻, varie de 10 à 350 mg/l (Rodier J., et al., 2005). On mentionne que les teneurs des Bicarbonates enregistrées à travers les points d'échantillonnage varient entre 150 à 661 mg/l.

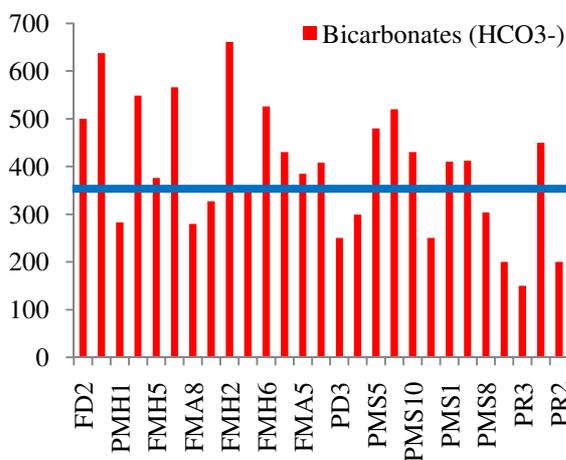


Figure 44 : Histogramme de la variation des bicarbonates (HCO₃⁻) (2014).

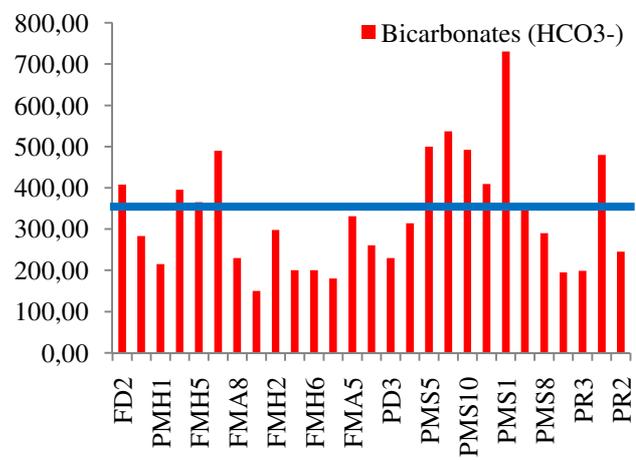
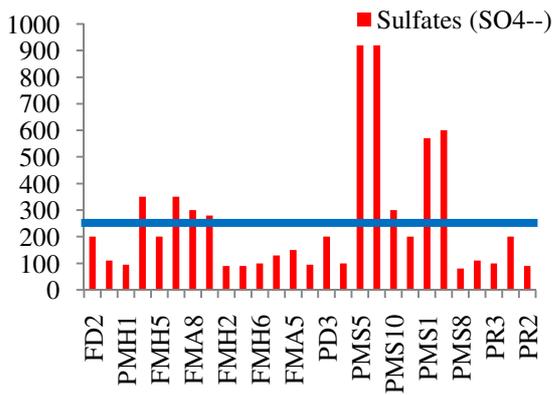


Figure 45 : Histogramme de la variation des bicarbonates (HCO₃⁻) (2015).

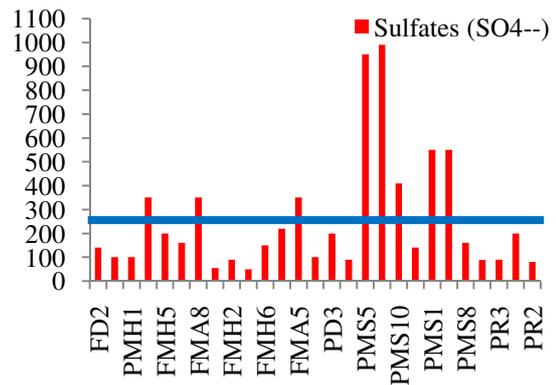
IV. 4. 7. Sulfates (SO₄²⁻) :

Les sulfates des eaux souterraines proviennent essentiellement de la dissolution du gypse (CaSO₄) dans les terrains gypseux ou du lessivage des terrains contenant des pyrites dont les sulfures entraînés s'oxydent en sulfate à l'air.

Avec des concentrations qui oscillent entre 50 et 950 mg/l qui se répartissent à travers la nappe mio-plio-quadernaire, les fortes concentrations s'observent dans la partie Nord-Ouest.



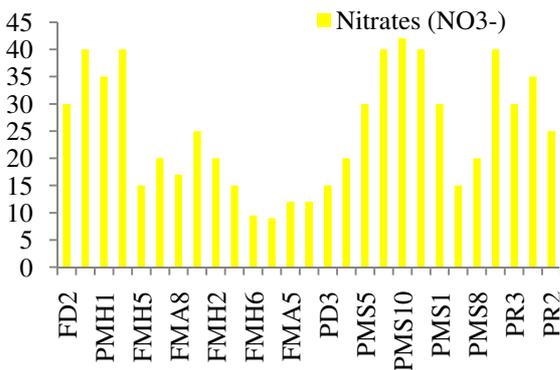
Figures 46 : Histogramme de la variation des Sulfates (SO₄²⁻) (Octobre 2014).



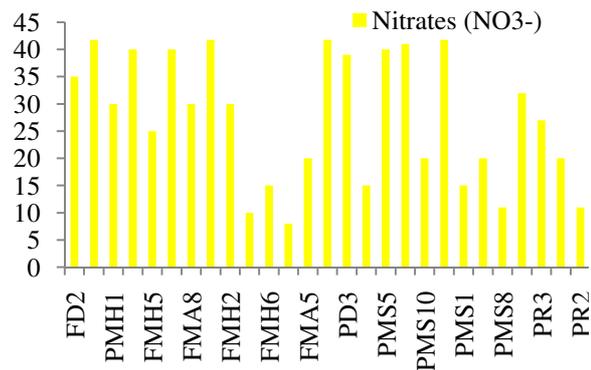
Figures 47 : Histogramme de la variation des Sulfates (SO₄²⁻) (Avril 2015).

IV. 4. 8. Nitrates (NO₃⁻) :

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble à confirmé (Debieche T. H., 2002). L'historgramme des teneurs en nitrates dans les eaux des rejets urbains, montre une grande variation de ces teneurs qui oscillent entre 9.0 et 42.7 mg/l. L'accroissement des teneurs en nitrates dans les eaux provient du lessivage des fertilisants utilisés dans les sols irrigués qui sont riches en nitrate (Kachi et al, 2016).



Figures 48 : Histogramme de la variation des Nitrates (NO₃⁻) (Octobre 2014).



Figures 49 : Histogramme de la variation des Nitrates (NO₃⁻) (Avril 2015).

IV. 5. Interprétation des analyses chimiques par les diagrammes de Stabler, Stiff, Piper et de Durov :

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours aux diagrammes de Stabler, Stiff, Piper et celui de Durov. La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel **Diagrammes**.

IV. 5. 1. Diagrammes de Stabler et Stiff :

La classification de Stabler est obtenue en classant, de gauche à droite par ordre décroissant de quantité en réaction pour cent, d'abord le groupe des trois anions, puis celui des trois cations. Afin de pouvoir comparer les compositions chimiques de l'eau aux caractéristiques physico-chimiques de la roche réservoir dont elle est issue.

Le diagramme de Stiff permet d'obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d'une famille d'eau donnée, la taille du polygone reflète le degré de la minéralisation. Les données d'analyse des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine. Les cations sont représentés à gauche ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} et Mg^{2+}) et les anions à droite (Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , NO_3^-).

La représentation des analyses sur les diagrammes Stabler et Stiff permet la comparaison des point d'eau comme elle montre la variation spatiale des faciès chimiques de l'aquifère.

Ces diagrammes confirment la dominance de deux faciès chimiques le bicarbonaté calcique à magnésien et le sulfaté calcique à magnésien, ce qui confirme l'influence de la lithologie sur le chimisme des eaux. Ces faciès sont dues aux calcaires et aux formations marneuses riche en gypse et les calcaires riche en magnésium d'âge Sénonien.

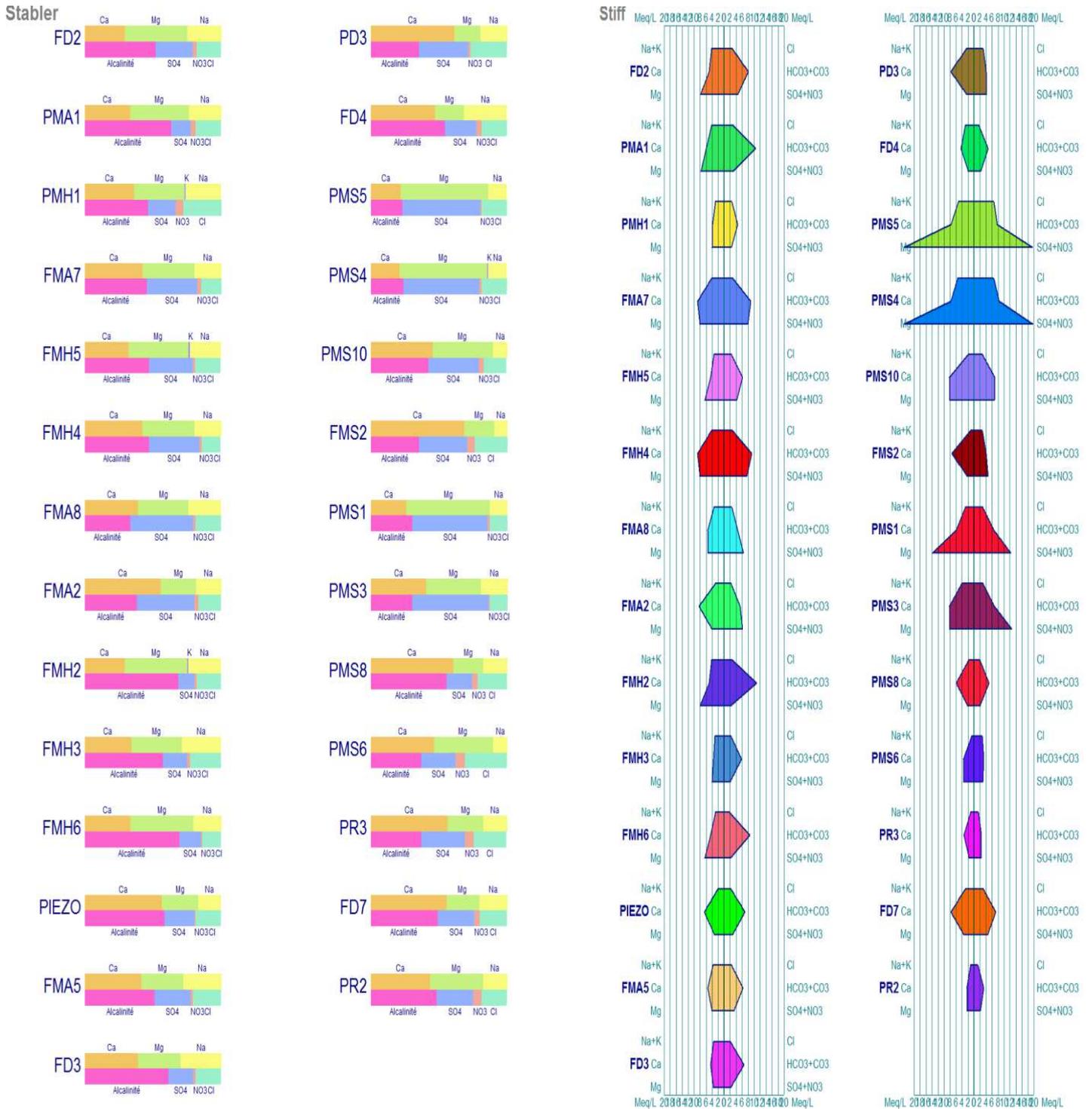


Figure 50 : Diagrammes de Stabler et Stiff (Octobre 2014).

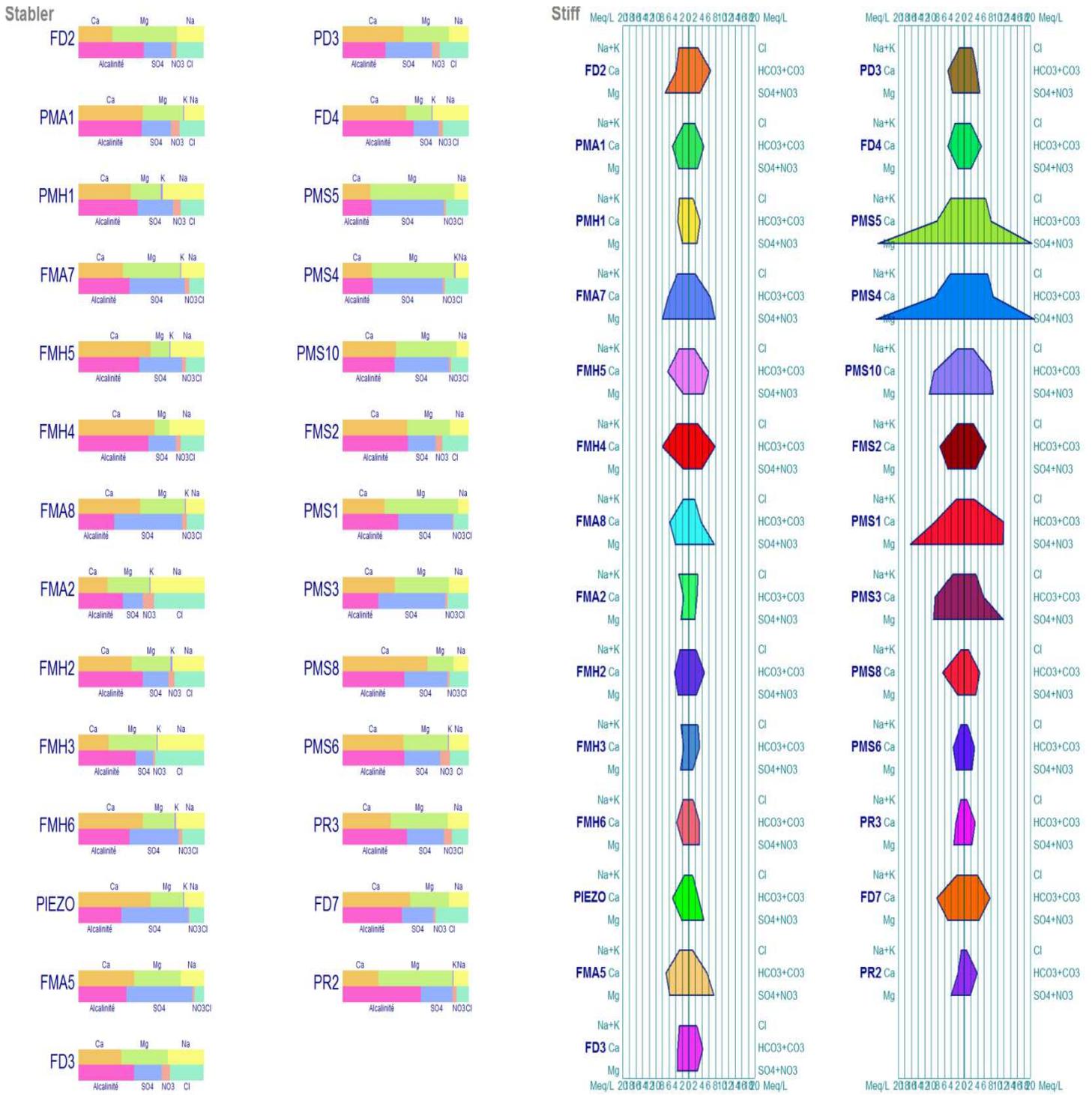


Figure 51 : Diagrammes de Stabler et Stiff (Avril 2015).

IV. 5. 2. Diagramme de Piper

Le diagramme triangulaire de Piper (Piper, 1944) évalue l'évolution de l'eau du système aquifère et la relation entre les types de roches réservoir et la composition de l'eau. La représentation des analyses sur le diagramme de Piper montre une variation des faciès chimiques des eaux de la nappe (Hani A., 2003).

L'examen du diagramme de Piper réalisé à partir des analyses chimiques des eaux souterraines pour les périodes des hautes et des basses eaux (Octobre 2014 et Avril 2015) démontre que les points d'eaux analysées se dispersent vers : le pôle chloruré et sulfaté calcique et magnésienne et le pôle bicarbonatée calcique et magnésienne au cours des basses eaux, alors que durant la période des hautes eaux on observe la migration des points d'eau analysés uniquement vers le pôle sulfaté calcique à magnésien. Les faciès chimiques les plus dominants sont le bicarbonaté calcique à magnésien et le sulfaté calcique à magnésien.

Les eaux bicarbonatées calciques et sulfatées calciques sont issues, en général, des formations marneuses, argileuse, gréseuses, gypseuses et du calcaires dolomitiques, qui reflètent l'hétérogénéité des formations mio-plio-quaternaires.

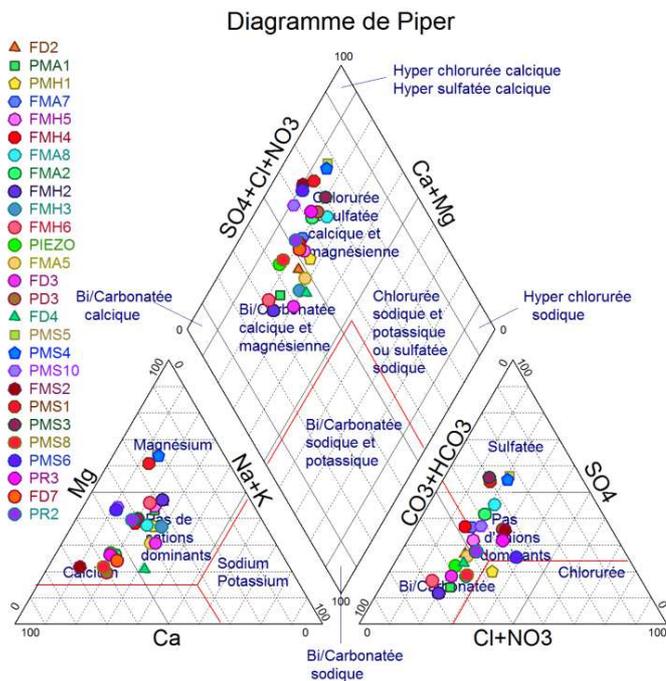


Figure 52 : Diagramme de Piper (Octobre 2014).

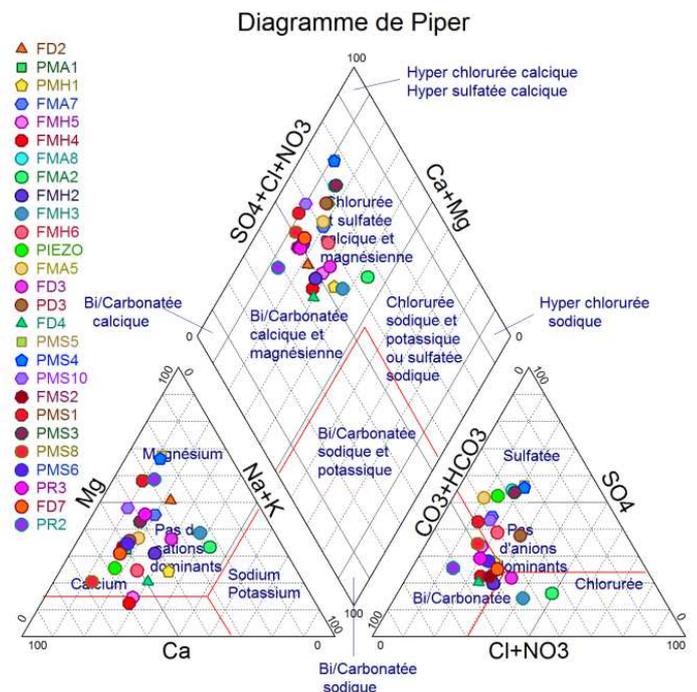


Figure 53 : Diagramme de Piper (Avril 2015).

IV. 5. 3. Diagramme de Durov :

Le diagramme de Durov (in Lloyd et Heathcoat 1985) construit sur la base des teneurs relatives (en méq/l) des ions majeurs en solution est avantageux par rapport au diagramme de Piper en révélant certains processus géochimiques qui pourraient affecter la genèse des eaux souterraines. Ce diagramme illustre bien qu'il y a une dominance des eaux des champs cinq qui caractérise l'eau issue de la dissolution minérale, 81.48 % des échantillons qui ne présente aucun cations ou anions dominant, en se basant sur la classification de Lloyd et Heathcoat (1985), cette eau peut être attribuée à une recharge récente et fraîche. Le second champ 3.70 % des échantillons caractérisant l'eau de dominance des cations et anions Ca^{++} et HCO_3^- , qui indiquent une eau souterraine influencée par les formations carbonatées avec un échange de base de Na^+ . Les échantillons restants représentant un pourcentage de 14.81 % se localisent dans le champ quatre (4) qui caractérise l'eau riche en SO_4^- et Ca^{++} , ce ci indique fréquemment que l'eau est contenue dans des formations gypsifères.

Tableau 19 : Classification de l'eau de la plaine de l'Oued Zied basée sur le diagramme de Durov (Lloyd et Heathcoat, 1985).

Sl. No	Types de l'eau	No. d'échantillons (GW=27)	%
1	HCO_3 et Ca dominant, ce ci indique fréquemment que les eaux sont contenues dans des formations aquifères calcareuses, sableuses, et d'autres types de formations aquifères.	---	---
2	Cette eau est à dominance des ions Ca et HCO_3 . Une association avec la dolomite est présumée si le Mg est significatif. Cependant, ces échantillons dans lesquels Na est significatif, un échange important des ions est présumé.	01 (1GW)	3.70
3	HCO_3 et Na sont dominants, généralement ce ci indique un échange de base de l'eau, bien que la production du CO_2 en profondeur puisse générer HCO_3 où Na est dominant sous certaines conditions.	---	---
4	SO_4 domine, ou anion secondaire et Ca est dominant, Ca et SO_4 dominant, ce ci indique fréquemment que l'eau est contenue dans des dépôts de laves ou gypsifères, sinon des eaux de mélange ou indiquant une simple dissolution.	04 (4 GW)	14.81
5	Pas d'anion ou cation dominant, ce ci indique que la minéralisation de l'eau est due à une simple dissolution ou à un mélange.	22 (22GW)	81.48
6	SO_4 domine, ou anion secondaire et Na est dominant, c'est un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et indique un mélange probable ou une influence rare de dissolution.	----	---
7	Cl et Na dominant, minéralisation fréquemment rencontrée sauf s'il y'a une pollution de couche aquifère. Sinon l'eau peut résulter d'un échange de base inverse du Na-Cl.	----	---
8	Cl l'anion dominant et Na le cation dominant, ce ci indique que les eaux souterraines sont liées à un échange de base inverse du Na-Cl.	----	---
9	Cl et Na dominant, ce ci indique fréquemment qu'ils sont issus d'une dissolution.	----	---

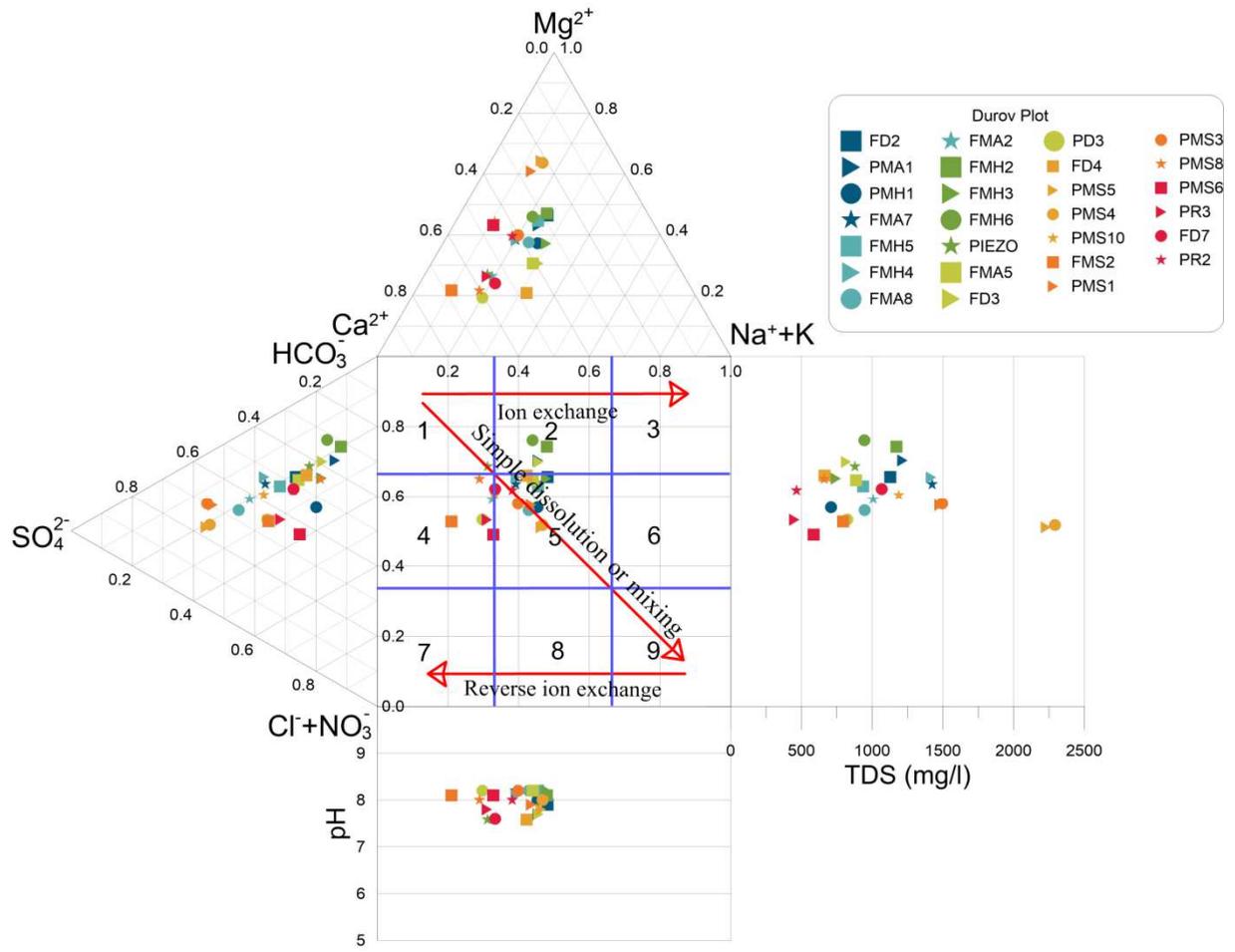


Figure 54 : Diagramme de Durov (Octobre 2014).

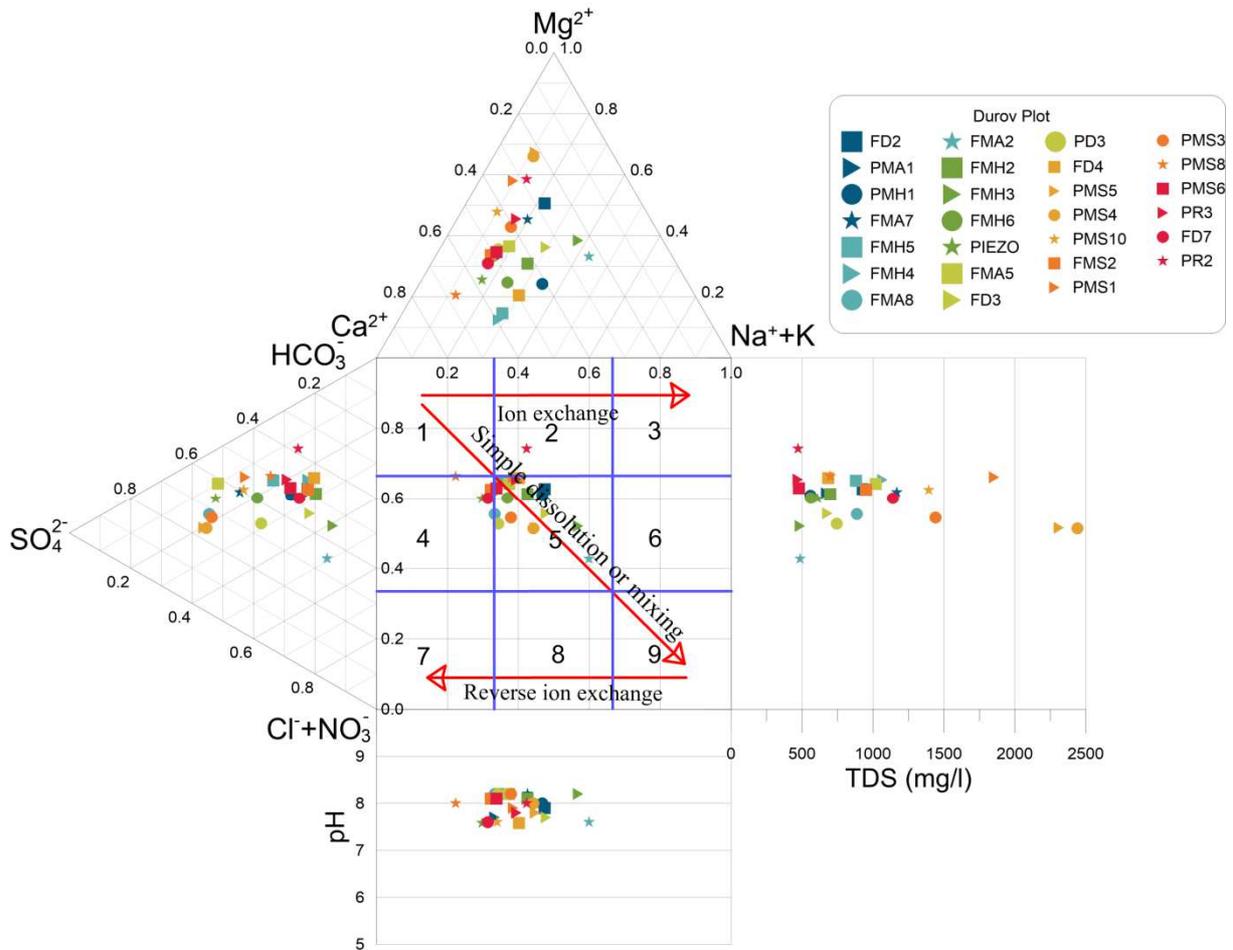


Figure 55 : Diagramme de Durov (Avril 2015).

IV . 6. Qualité chimique des eaux :

IV . 6. 1. La potabilité des eaux souterraines (AEP) :

La potabilité des eaux souterraines est basée sur les normes de l'O.M.S. Le tableau 20 permet de mettre en évidence que tous les points d'eaux étudiés dépassent les normes de potabilité en certains éléments, notamment en calcium, magnésium et sulfates.

Tableau 20 : Normes de potabilité des eaux d'après l'OMS (2006).

Substance	PH	Calcium (Ca ⁺²)	Magnésium (Mg ⁺²)	Sulfates (SO ₄ ⁻²)	Nitrates (NO ₃ ⁻)
Norme de l'O.M.S. (concentration en mg/l)	6,5 – 9	120	50	250	50
Substance	Chlorures (Cl ⁻)	Sodium (Na ⁺)	Potassium (K ⁺)	Ammonium (NH ₄ ⁺)	Température (T°C)
Norme de l'O.M.S. (concentration en mg/l)	200	150	12	0,5	25

➤ **Titre hydrotimétrique (dureté de l'eau) TH :**

La dureté d'une eau est évaluée à l'aide du degré hydrotimétrique (TH), qui est définie par la teneur totale de calcium et du magnésium (méq/l) et il est exprimé en degré français :

$$TH = (r Ca+r Mg)*5 (°F).$$

r Ca : Concentration en calcium en méq/l.

r Mg : Concentration en magnésium en méq/l.

La classification des eaux en fonction de leur dureté est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 21 : Classification des eaux en fonction de leur dureté (d'après RODIER J. 1980).

TH°F	0	7 à 22	22 à 32	32 à 54	54
Dureté de l'eau	douce	modérément douce	assez douce	dures	dures à très dure

Tableau 22 : Dureté des eaux souterraines de la zone d'étude (Octobre 2014).

Point d'eaux	TH (°F)	Point d'eaux	TH (°F)	Point d'eaux	TH (°F)
FD2	65	FMH3	39	PMS10	83
PMA1	69	FMH6	57	FMS2	49
PMH1	41	PIEZO	50	PMS1	100
FMA7	86	FMA5	48	PMS3	83
FMH5	57	FD3	42	PMS8	41
FMH4	86	PD3	52	PMS6	35
FMA8	54	FD4	32	PR3	25
FMA2	63	PMS5	157	FD7	57
FMH2	66	PMS4	157	PR2	25

Tableau 23 : Dureté des eaux souterraines de la zone d'étude (Avril 2015).

Point d'eaux	TH (°F)	Point d'eaux	TH (°F)	Point d'eaux	TH (°F)
FD2	57	FMH3	21	PMS10	101
PMA1	41	FMH6	29	FMS2	62
PMH1	28	PIEZO	36	PMS1	128
FMA7	73	FMA5	64	PMS3	92
FMH5	40	FD3	36	PMS8	44
FMH4	50	PD3	43	PMS6	30
FMA8	50	FD4	35	PR3	30
FMA2	21	PMS5	174	FD7	67
FMH2	39	PMS4	180	PR2	31

Les eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable de notre zone d'étude sont des eaux modérément douces à dures à très dures.

IV. 6. 2. Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation (Diagramme de Richards) :

Richards (1954) a élaboré une classification, en se basant sur les deux paramètres à savoir (SAR et conductivité électrique) .Le SAR qui est défini par la relation :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \text{ mg/l}$$

Les classes d'utilisation des eaux (C1S1,...C4S4) (Tableau N° 24) montrent les différentes précautions à prendre pour l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation. Utilisé pour les eaux de la région, nous obtenons le diagramme (Figure

Tableau 24 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation (Méthode du SAR).

Degrés	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1	Excellente	C ₁ -S ₁ C ₁ -S ₂	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2	Bonne	C ₂ -S ₁ C ₂ -S ₂	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
3	Admissible	C ₃ -S ₁ , C ₂ - S ₃ C ₃ -S ₂	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainées.
4	Médiocre	C ₄ -S ₁ , C ₄ - S ₂ C ₃ -S ₃	Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
5	Mauvaise	C ₃ -S ₄ , C ₄ - S ₃ C ₄ -S ₄	Inutilisable.

D'après le diagramme de Richards on constate que les eaux souterraines de l'aquifère mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa ont trois classes d'aptitude à l'irrigation, la classe C₂S₁, C₃S₁ et la classe C₄S₁. La classe la plus dominante est celle C₃S₁, ce qui signifie que les eaux ont une qualité Admissible pour l'irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainées avec le contrôle de la salinité.

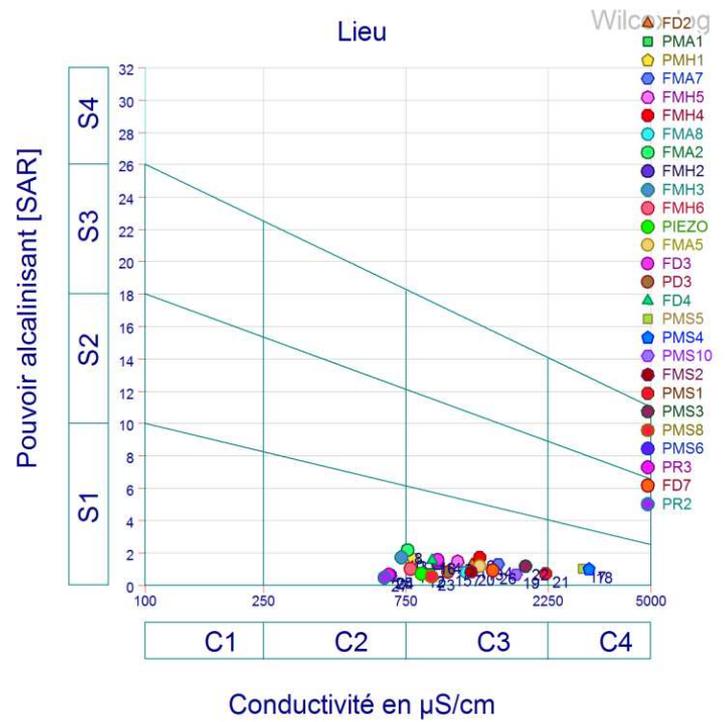
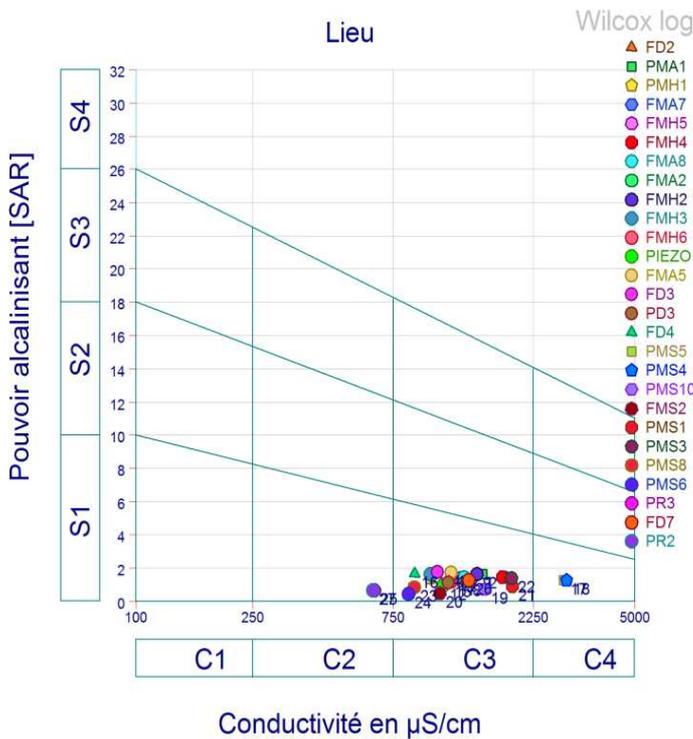


Figure 56 : Diagramme de Richards campagne (Octobre 2014).

Figure 57 : Diagramme de Richards campagne (Avril 2015).

IV. 7. Indice de la qualité de l'eau (WQI) :

L'utilisation d'un indice de qualité de l'eau WQI ou IQE a été proposée par Horton (1965) et Brown et al. et (1970). Ensuite, plusieurs auteurs ont développés des nombreux méthodes différentes pour le calcul des IQE (Şener et al., 2017).

Cet indice est défini comme une technique d'évaluation fournissant l'influence composite des paramètres individuels de la qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau destinée à la consommation humaine (Mitra, 1998)

Le WQI est une méthode très utile et efficace pour évaluer la qualité de l'eau. C'est un outil très utile pour communiquer des informations sur la qualité globale de l'eau car celle-ci ne dépend pas d'un seul paramètre (Abassi 1999 ; Pradhan et al. 2001; Adak et al. 2001; Ketata et al 2011; Sundara Kumar et al 2015).

IV. 7. 1. Estimation de l'indice de la qualité de l'eau :

Pour calculer le WQI, trois étapes ont été suivies (Horton 1965; Pradhan et al. 2001; Dwivedi and Pathak 2007; Asadi et al. 2007; Vasanthavigar et al. 2010; Saedi et al. 2010;

Yidana and Yidana 2010). Lors de la première étape, un poids (w_i) a été attribué à chacun des dix paramètres chimiques (pH, TDS, Cl, SO₄, HCO₃, NO₃, Ca, Mg, Na et K) en fonction de leurs effets perçus sur la santé (Tableau 25).

Tableau 25 : Poids et poids relatif de chaque paramètre chimique (Ketata et al., 2011).

Paramètre chimique	Normes de l'OMS	Poids (w_i)	Poids relatif (W_i)
pH	8,5	3	0,103
TDS (mg/)	500	5	0,172
Cl ⁻ (mg/)	250	3	0,103
SO ₄ ²⁻ (mg/)	250	3	0,103
NO ₃ ⁻ (mg/)	45	5	0,172
HCO ₃ ⁻ (mg/)	120	2	0,068
Na ⁺ (mg/)	200	3	0,103
Ca ²⁺ (mg/)	75	2	0,068
Mg ²⁺ (mg/)	50	2	0,068
K ⁺ (mg/)	12	1	0,034
		$\Sigma w_i = 29$	$\Sigma W_i = 0,9949$

Le poids maximal 5 a été attribué à des paramètres tels que le TDS, les chlorures, les sulfates et les nitrates en raison de leur importance majeure dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Srinivasamoorthy et al. 2008). Le bicarbonate reçoit le poids minimum de 1 car il joue un rôle négligeable dans l'évaluation de la qualité de l'eau. D'autres paramètres tels que le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium ont reçu un poids compris entre 1 et 5, en fonction de leur importance dans la qualité globale de l'eau destinée à la consommation (Ketata et al. 2011).

Dans la deuxième étape, la pondération relative (W_i) de chaque paramètre est calculée comme suit :

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Où

W_i : le poids relatif ;

w_i : le poids de chaque paramètre ;

n : le nombre de paramètres.

Dans la troisième étape, un classement de qualité (q_i) pour chaque paramètre est donné en divisant la concentration de chaque échantillon d'eau par sa valeur limite fixée selon les normes algériennes de potabilité et le résultat multiplié par 100 (Ramakrishnaiah et al., 2009 ; Ketata et al., 2011 ; et Şener et al., 2017) :

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Avec q_i est la notation de qualité, C_i est la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau en mg/l, et S_i est la norme d'eau potable algérienne pour chaque paramètre chimique en milligrammes par litre. La somme des valeurs S_i donne l'indice de qualité de l'eau pour chaque échantillon, la valeur S_i doit être déterminée par l'équation suivante :

$$SI_i = W_i \times q_i \quad (3)$$

SI_i est le sous indice du paramètre i ème; q_i est l'évaluation de la qualité basée sur la concentration du paramètre i ème (Ramakrishnaiah et al., 2009). La somme des valeurs SI_i donne l'indice de qualité de l'eau pour chaque échantillon.

$$WQI = \sum_{i=1}^n SI_i \quad (4)$$

Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) calculées sont classées en cinq catégories (Ketata et al., 2011 ; Şener et al., 2017).

Tableau 26 : Classification des eaux souterraines selon le WQI.

Classe du WQI	Type d'eau	Octobre 2014 (%)	Avril 2015 (%)
<50	Eau excellente	0,00	0,00
50 - 100,1	Eau bonne	44,44	51,85
100 - 200,1	Eau pauvre	48,15	40,74
200 - 300,1	Eau très pauvre	7,41	7,41
>300	Eau impropre à la consommation	0,00	0,00

La classification a été faite à la base des valeurs calculées de l'indice de qualité de l'eau, ces valeurs sont présentées dans les figures 58 et 59.

Les valeurs de l'indice de la qualité de l'eau calculées varient entre 61,50 et 244,00 pendant la période des basses eaux (Octobre 2014) et entre 60,33 et 260,52 durant la période des hautes eaux (Avril 2015).

La classification de la qualité des eaux de la zone d'étude varie entre une bonne à très mauvaise eau pour les deux périodes, ce qui implique que ces eaux sont plus ou moins acceptables pour la consommation humaine.

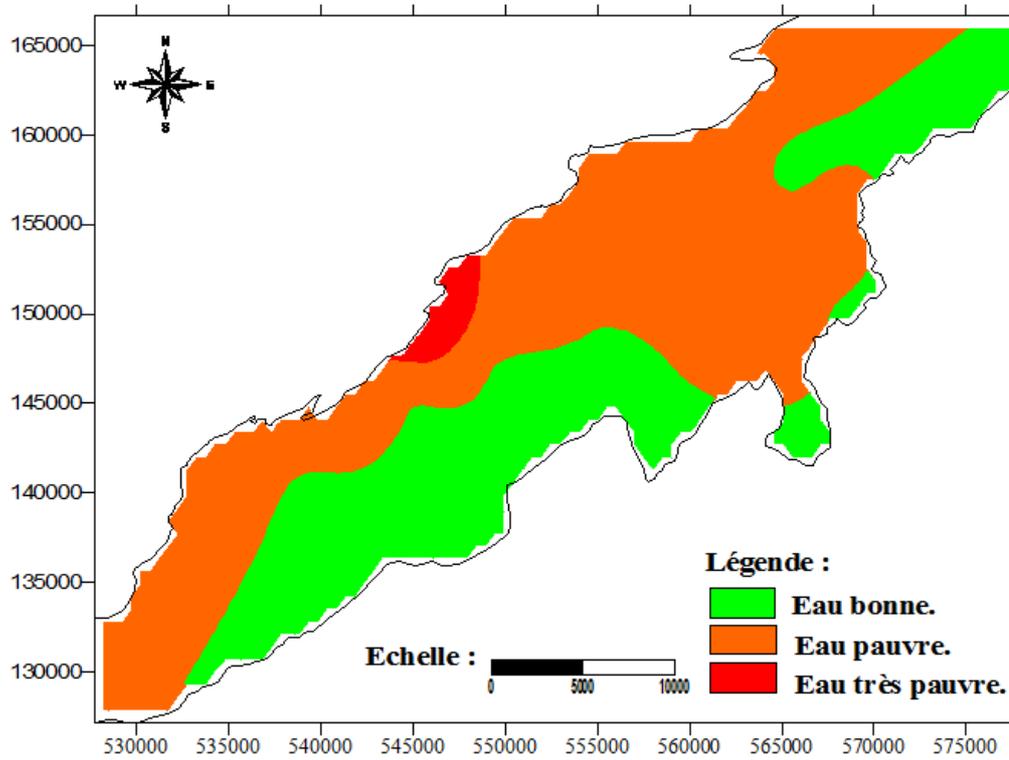


Figure 58 : Distribution spatiale du WQI (Octobre 2014).

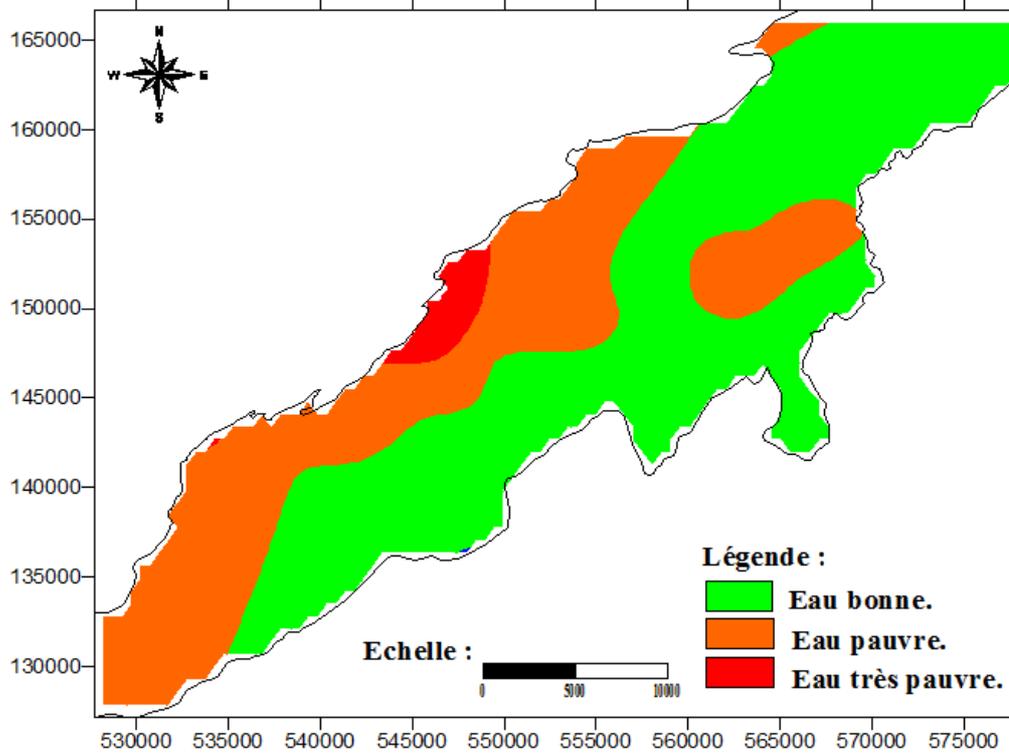


Figure 59 : Distribution spatiale du WQI (Avril 2015).

La distribution spatiale de l'indice de la qualité de l'eau (WQI) montre que le Nord-Ouest et l'Ouest de la nappe du mio-plio-quaternaire se caractérisent par une eau pauvre à très pauvre, alors que le Sud-Est et le Sud présentent des eaux de bonne qualité. Cette distribution se diffère durant les deux périodes (hautes et basses eaux). Au cours de la période des basses eaux, la distribution des eaux pauvres est plus importante que celle au cours de la période des basses eaux. Ceci s'explique et confirme les échanges entre les formations géologiques et les eaux souterraines.

IV. 8. Conclusion :

L'étude hydrochimique de la formation du mio-plio-quaternaire est basée essentiellement sur les résultats des analyses des eaux prélevées des puits et des forages qui captent la nappe aquifère.

Il résulte que le faciès chimique principal dominant est le bicarbonaté calcique, pour le faciès secondaire est le sulfaté calcique. Concernant la minéralisation, la taille du polygone de Stiff démontre une minéralisation moyenne. Au cours des basses eaux la minéralisation est plus importante que celle observée durant les hautes eaux, avec des points d'eau chargés tel que le PMS4 et le PMS5.

Le diagramme de Durov nous a permis de conclure que les eaux de l'horizon aquifère étudié sont affectées par le phénomène de mélange des eaux ainsi que la dissolution de la matrice rocheuse.

L'Indice de la qualité de l'eau (WQI) prouve que le pourcentage des eaux de bonne qualité augmente pendant la période des hautes ce qui confirme les résultats du diagramme de Durov.



CHAPITRE V

Vulnérabilité à la pollution

des eaux souterraines

V.1. Introduction :

Le risque de pollution, par définition, est une combinaison de plusieurs facteurs hydrogéologiques et anthropiques en présence des sources de contamination, la nappe aquifère du Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa représente une source d'eau d'une certaine importance et doit, à ce titre, être plus protégée contre toute éventuelle source de pollution. La cartographie de la vulnérabilité des aquifères est utilisée comme un outil de base pour la protection des ressources en eau (Bentekhici N., 2015). L'établissement des cartes de vulnérabilité des aquifères permet une meilleure gestion de ces eaux.

À cet effet, l'estimation de la vulnérabilité permet de préciser les zones les plus sensibles aux activités anthropiques. Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, dans ce travail, on va utiliser une approche basée sur la méthode DRASTIC standard : **D**epth to water, **R**echarge, **A**quifer media, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of the vadose and hydraulic **C**onductivity à l'aide d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) en utilisant l'environnement ArcGis.

V. 2. Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :

V. 2. 1. Définition d'une pollution d'eau :

La pollution de l'eau est une altération des qualités naturelles (physiques et chimiques) d'une eau. C'est à la fois l'action et les processus de dégradation des qualités de l'eau. La pollution des eaux souterraines entraîne le risque permanent de limitation de cette ressource dans un proche avenir. Elle résulte essentiellement de l'activité humaine indépendamment de la détérioration naturelle liée aux facteurs géologiques. Dans ce contexte, l'étude de la vulnérabilité à la pollution du système aquifère pourrait prévenir les risques de contamination et par la même orienter le monde de gestion et d'exploitation des eaux souterraines (Schoeller H., 1962).

V. 2. 2. Vulnérabilité à la pollution :

A- Origine de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines :

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine-écoulements-cible ». Dans le cadre de la cartographie de la vulnérabilité, on suppose que la contamination prend place au niveau de la surface (abstraction faite de fuites de réseau d'assainissement enterré par ex.) : c'est l'origine (Zwahlen, 2004). Le terme écoulements correspond au trajet du contaminant de son point d'origine à travers le système (zone non saturée et/ou zone saturée jusqu'au point d'eau) jusqu'au cible à protéger. La cible est, quant à

elle, l'eau souterraine qui fait l'objet d'une protection : pour la protection de la ressource, il s'agit de la surface des eaux souterraines (interface entre la zone non saturée et la zone saturée) et pour la protection d'une source, il s'agit du captage d'eau (forage, exutoire) (COST620).

B- Concept de la vulnérabilité :

« La vulnérabilité à la contamination est définie comme étant la protection naturelle contre la contamination ».

Le concept est basé sur l'hypothèse suivante : l'environnement physique fournit une protection naturelle des eaux souterraines vis-à-vis des impacts anthropiques, essentiellement les contaminants pouvant pénétrer l'environnement souterrain (Dörfliger et al, 2004 In Vrba & Zaporozec, 1994).

La vulnérabilité est une propriété relative, non mesurable et sans dimension. Il faut distinguer la vulnérabilité intrinsèque (naturelle) de la vulnérabilité spécifique, la première ne dépend que des propriétés naturelles du milieu, alors que la seconde intègre en plus les propriétés mêmes du contaminant (Bakalowicz , 1999).

C- Type de vulnérabilité :

On distingue deux types de vulnérabilité :

➤ **la vulnérabilité intrinsèque** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques et les modifications du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. D'après Landreau, 1996 in Cazaux, 2007; Schnebelen et al, 2002 on peut classer les méthodes de vulnérabilité en fonction des facteurs physiques influençant le transfert de polluants vers la nappe.

➤ **La vulnérabilité spécifique** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (Schnebelen et al. 2002 in Bézèlgues et al. ,2002).

D- Critères de vulnérabilité :

Plusieurs facteurs agissent sur la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine, ces facteurs sont présents dans le sol, la zone non saturée et la zone saturée.

D- 1. Critères relatifs au sol :

- La topographie :

C'est un critère qui contribue dans la détermination de la pente des terrains et l'évaluation de la vitesse d'écoulement des eaux superficielles (Derni, 2011).

- La couverture pédologique :

La nature, l'épaisseur, la texture la teneur en argile et en matière organique ont une influence directe sur le transfert des polluants dans la nappe d'eau souterraine.

D- 2. Critères relatifs à la zone non saturée :**- L'épaisseur de la zone non saturée :**

C'est l'horizon entre la surface topographique et la nappe d'eau souterraine, c'est la partie où le polluant peut se disperser vers les eaux souterraines.

- L'amplitude de battement de la nappe :

Si le battement de la nappe est significatif, il devient donc un critère de vulnérabilité.

- La perméabilité verticale de la zone non saturée :

Plus la perméabilité verticale est importante plus le temps de transfert d'un polluant vers la nappe est important (Ravbar N. et Goldscheider, 2007).

- La structure de la zone non saturée :

La nature, la texture, la teneur en argile et en matière organique de la Zone Non Saturée peut réduire la contamination des eaux souterraines par la pollution.

D- 3. Critères relatifs à la zone saturée :

- Le type de nappe : une nappe libre est plus vulnérable à la pollution qu'une nappe captive naturellement protégée par un toit imperméable ou peu perméable.

- Les paramètres hydrodynamiques : perméabilité, transmissivité, coefficient d'emménagement et gradient hydraulique déterminent le temps de résidence d'un contaminant dans la nappe.

- La piézométrie : elle rend compte de la géométrie de la nappe et de son fonctionnement hydrodynamique qui peuvent évoluer au cours d'un cycle hydrologique complet. Entre les périodes des hautes et des basses eaux par exemple, les directions d'écoulement et/ou les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser (Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

- La direction et le sens d'écoulement : déterminent le trajet d'un polluant dans la nappe d'eau souterraine.

- Le type du système hydrogéologique : à partir de la réactivité aux impulsions pluviométriques du système, et donc de son caractère transmissif, la vulnérabilité du système peut être évaluée (Zwahlen, 2004 In Cazaux, 2007).

- Les relations nappe-cours d'eau : l'alimentation des nappes d'eau souterraine par les cours d'eau superficiels ou par le drainage en sens contraire donne une idée sur la possibilité de contamination à la pollution.

- **L'épaisseur de l'aquifère** : détermine la réserve d'eau dans l'aquifère. Plus la réserve est importante, plus la dilution du polluant est assurée.

D- 4. Critères communs à la zone non saturée et à la zone saturée :

- **La fracturation** : la fracturation augmente la vitesse d'infiltration des polluants.

- **La recharge** : c'est le volume d'eau atteignant la nappe d'eau souterraine et dépend de la pluie efficace s'infiltrant dans le sol puis dans la zone non saturée (Dörfliger et al, 2004).

Tableau 27: Critères de vulnérabilité (Zwahlen, 2004).

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

V. 3. Objet de la cartographie de la vulnérabilité :

L'objectif d'une carte de vulnérabilité d'une formation aquifère est de fournir le potentiel et le degré de risque de contamination, mais aussi le degré des conséquences possibles d'une contamination, de même que les éléments nécessaires, tant pour la prévention que pour les mesures mises en place à la suite d'une contamination (Duchaine D,1998). La

cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion de la nappe et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution (Kebaili S et Herizi I,2017).

V. 4. Outils et Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :

V. 4. 1. Les Systèmes d'information géographique :

Un système d'information géographique (SIG) est par définition un système permettant de stocker, de consulter, de traiter et d'afficher de l'information géographique. Les SIG doivent répondre aux besoins des décideurs en matière de gestion et d'aménagement des territoires (Minivelle et Souiah, 2003 in Saidi, 2011)

Le concept SIG englobe : logiciels, données, matériels et les savoir-faire liés à l'utilisation de ces derniers alors qu'un logiciel SIG est un ensemble de fonctionnalités utiles à l'exploitation d'un SIG. Parmi ces logiciels, on trouve des logiciels libres (AccuGlobe, Google Earth ...) ainsi que des logiciels propriétaires (ArcGis, Mapinfo, Surfer, Isatis...) (Saidi,2011). Pour notre étude, nous avons utilisé logiciel **Arc Gis 10.3**.

l'Arc GIS : est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.). C'est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde (Djoudar,2014).

V. 5. Evaluation et cartographie de la vulnérabilité de la nappe du mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa :

Dans notre cas, l'évaluation de la vulnérabilité a été faite par l'application de la méthode DRASTIC. C'est une méthode universellement utilisée et tient compte de sept (07) paramètres jugés importants dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité.

V. 5. 1. La méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC est l'une des méthodes du sous-groupe PCSM (Point Count System Model) qui a été mise au point par Aller et al. (1987) dans l'objectif d'évaluer les risques de pollution des eaux souterraines (Verba et Zaporozec, 1994; Mardhel et al., 2005; Knox et al.; 1993). Les lettres DRASTIC désignent respectivement les facteurs : (**D**ePTH to water) profondeur du plan d'eau, (**R**echarge) recharge efficace, (**A**quifer media) Nature du milieu aquifère, (**S**oil media) nature du sol, (**T**opography) topographie, (**I**mpact of the vadose zone) impact de la zone vadose (hydraulic **C**onductivity of the aquifer) perméabilité de l'aquifère.

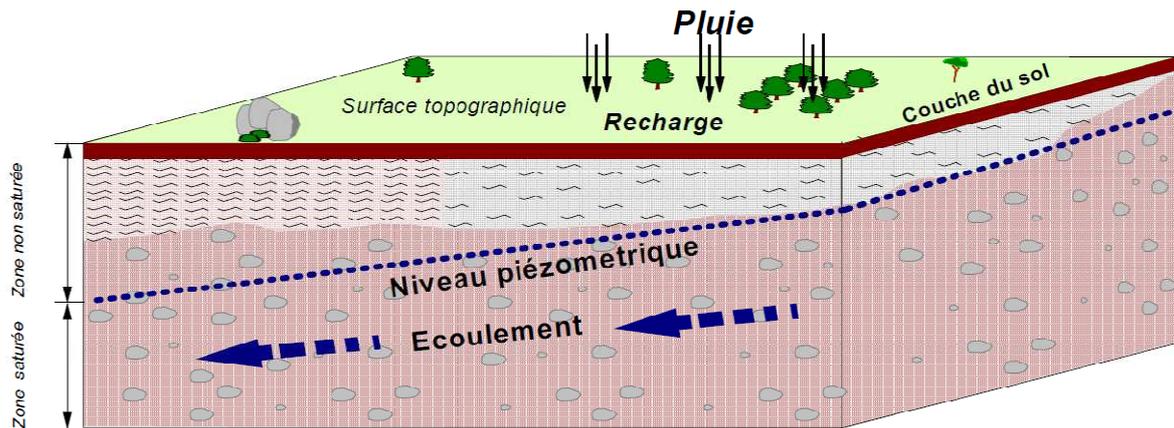


Figure 60 : Schéma représentant les paramètres intervenants dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par la méthode DRASTIC (Sinan et Bouibrine, 2007).

La méthode proposée repose sur les hypothèses de base suivantes : les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ; les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme d'infiltration efficace ; le contaminant a la même mobilité que l'eau souterraine ; l'unité hydrogéologique en question est de superficie supérieure à 0,4 km² (Murat et al., 2003).

La vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe du mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa va être évaluée au moyen de l'indice DRASTIC qui est un indice numérique représentant la somme pondérée des sept (07) côtes correspondant aux sept (07) paramètres définis ci dessus. L'indice local est obtenu en multipliant la cote de chaque paramètre par son poids relatif et en faisant la somme de ces produits :

$$\text{Indice DRASTIC} = Dc.Dp + Rc.Rp + Ac.Ap + Sc.Sp + Tc.Tp + Ic.Ip + Cc.Cp$$

Où : les indices 'c' et 'p' correspondent respectivement à la cote et au poids du paramètre. L'indice ainsi calculé représente une évaluation du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère. Ce risque augmente avec les valeurs de l'indice (Cheng Y, et al 2012)

Tableau 28 : Poids des paramètres dans la version DRASTIC standard (Aller et al., 1987).

Paramètres	Poids
D : profondeur du plan d'eau	5
R : recharge efficace	4
A : nature du milieu aquifère	3
S : type de sol	2
T : topographie	1
I : impact de la zone vadose	5
C: conductivité hydraulique de l'aquifère	3

V. 5. 2. Description des paramètres et élaboration des cartes thématiques :

V. 5. 2. 1. Profondeur de la nappe (D) :

La profondeur de la nappe joue un rôle primordial dans la qualification de la capacité de l'aquifère à être affectée par l'infiltration d'un polluant. Cette profondeur détermine l'épaisseur des matériaux de la zone d'aération à travers laquelle un contaminant percole avant d'atteindre le niveau piézométrique. Généralement, la capacité d'atténuation augmente avec la profondeur du plan d'eau (Chandoul E. R., et al 2008). C'est la différence entre l'altitude des courbes de niveau et du niveau piézométrique.

Tableau 29 : Côtes et poids DRASTIC du paramètre profondeur de la nappe (D) (in Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

Profondeur de la nappe en (m)		
Intervalle	Côte générale	Poids
0 - 1.5	10	5
1.5 - 4.5	9	
4.5 - 9	7	
9 - 15	5	
15 - 23	3	
23 - 31	2	
31 et plus	1	

Les côtes et le poids affectés à ce paramètre (D) sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau 30 : Cotation du paramètre profondeur de la nappe (D).

Profondeur de la nappe en (m)			
Intervalle	Côte	Poids	Indice
1.5 - 4.5	9	5	45
4.5 - 9	7		35
9 - 15	5		25
15 - 23	3		15
23 - 31	2		10
31 et plus	1		5

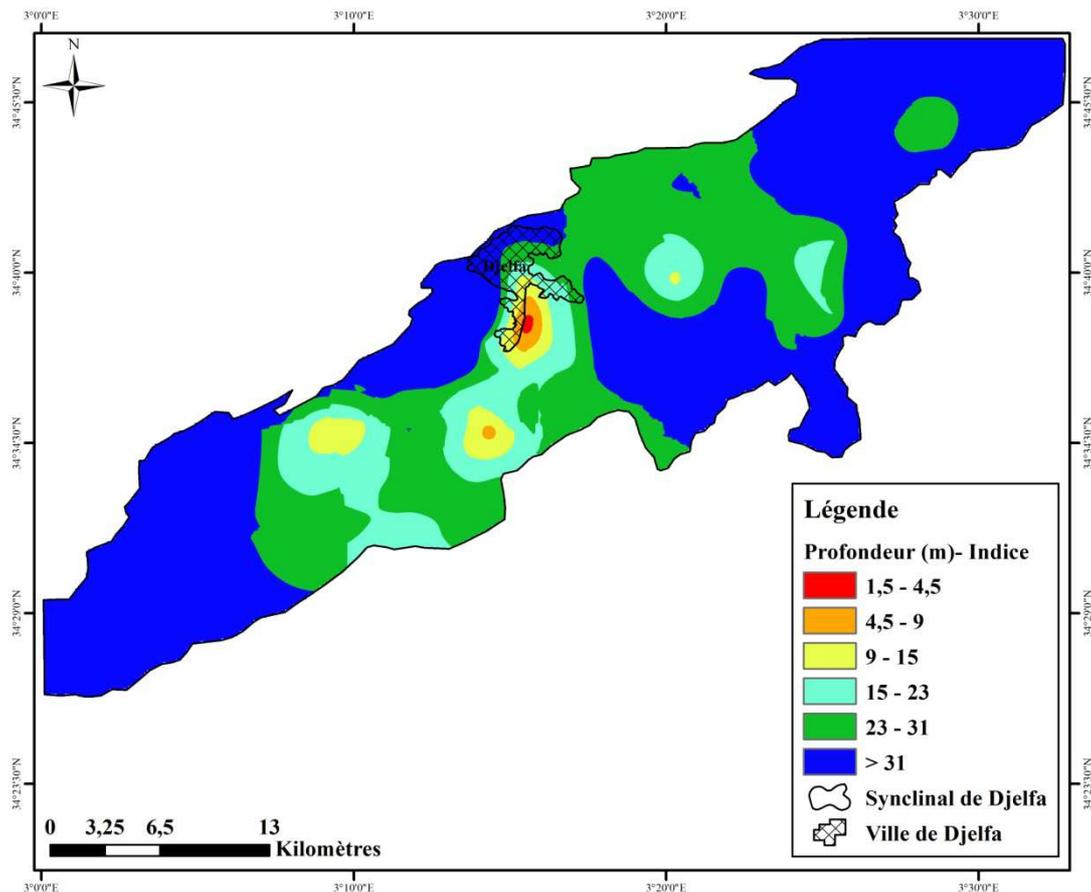


Figure 61 : Carte de répartition de la profondeur de la nappe.

Les indices ainsi calculés ont permis de dresser la carte de répartition des valeurs de la profondeur de la nappe (Figure 61). Cette carte démontre que les forts indices (45) se localisent au Sud de la ville de Djelfa, alors que les faibles valeurs de cet indice (5 et 10) (représentant les faibles profondeurs) se répartissent sur la majorité de la nappe Mio-plio-quaternaire.

V. 5. 2. 2. Recharge efficace de la nappe (R) :

Il s'agit de la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée (recharge annuelle nette). Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition dans l'espace et dans le temps, donc du climat (ETP, précipitations), mais également de la topographie et de la nature des formations. Elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines (Bézèlges et al., 2002; Haouchine et al., 2010).

Tableau 31 : Côtes et poids DRASTIC du paramètre recharge efficace de la nappe (R)
(in Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

Recharge efficace de la nappe (R)		
Intervalle	Côte	Poids
0 – 5	1	4
5 – 10	3	
10 – 18	6	
18 – 25	8	
25 et plus	9	

L'estimation de la recharge régionale, ou à l'échelle de l'aquifère, est souvent suffisante aux fins du calcul des indices DRASTIC. Une seule valeur peut donc être généralement employée pour toutes les aires de protection.

Tableau 32 : Cotation du paramètre recharge efficace de la nappe (R).

Recharge efficace (R)			
Intervalle	Côte	Poids	Indice
18 – 25	8	4	32

La carte représentant la recharge dans notre nappe (Figure 62) représente un seul indice de l'ordre de 32 puisque le calcul du bilan hydrique a donné une valeur moyenne de l'infiltration efficace de 20,84 mm. La méthode DRASTIC attribue la côte 8 à la recharge efficace pour l'intervalle se situant entre 18 et 25 mm. Ce paramètre est reporté au tableau 32.

V. 5. 2. 3. Nature du milieu aquifère (A) :

Le paramètre de la nature du milieu aquifère désigne la lithologie des aquifères et il intervient dans le piégeage des polluants, entre les nitrates échappés au pouvoir d'absorption du sol (Herizi I. et Kebaili S., 2017).

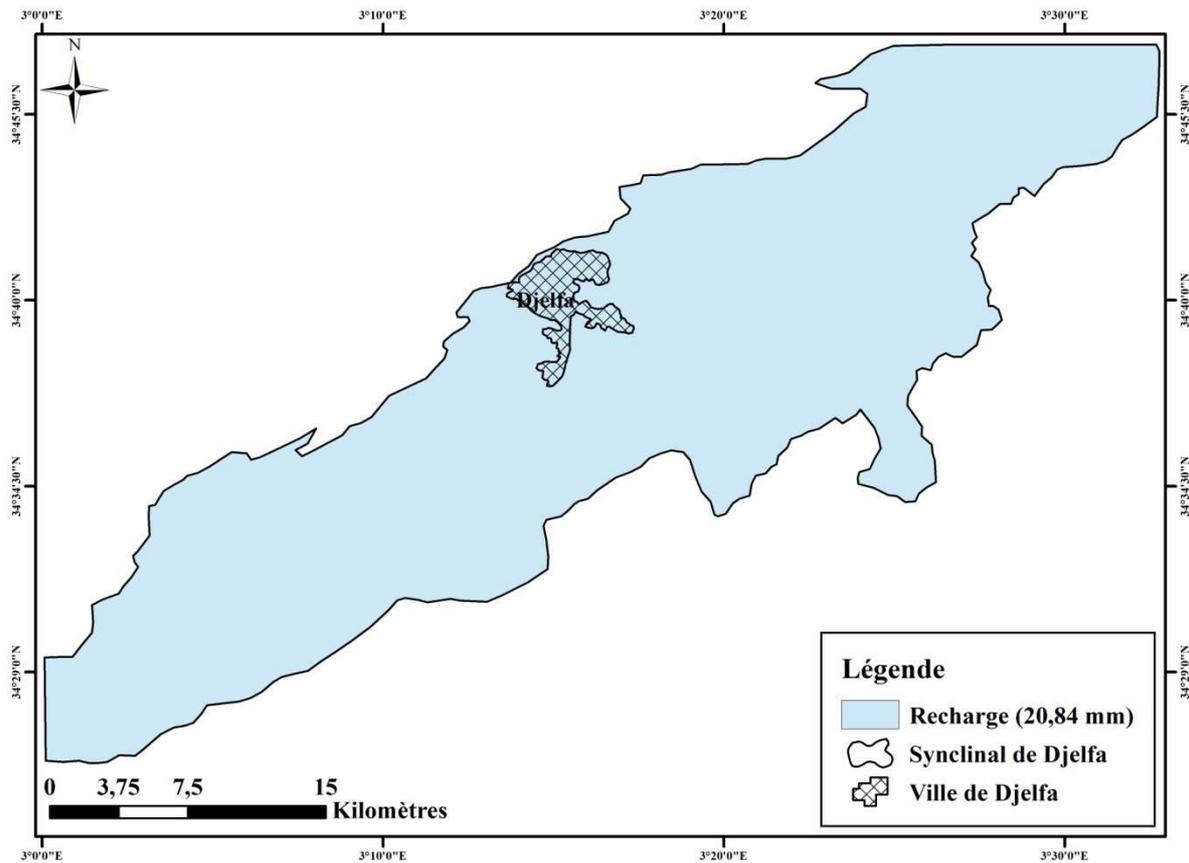


Figure 62 : Carte de répartition des valeurs de la recharge efficace de la nappe.

Tableau 33 : Côtes et poids DRASTIC du paramètre nature du milieu aquifère (A) (in Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

Nature du milieu aquifère (A)		
Type d'aquifère	Côte	Poids
Schiste massif	2	3
Roche ignées /métamorphiques	3	
Roche ignées /métamorphiques altérées	4	
Calcaire et argile schisteuse	5	
Lits de grés et calcaire	6	
Grés massif	6	
Calcaire massif	6	
Sable et gravier	8	
Basalte	9	
Calcaire karstique	10	

La détermination de ce paramètre a été faite sur la base de la carte hydrogéologique réalisée par l'ANRH. L'analyse de cette carte démontre la présence de deux types de matériaux, le premier constituer par un mélange de sable, de gravier et d'argile se situant dans la partie centre et Nord-Est de notre nappe aquifère et le second type se constitue par un mélange

d'argile, de conglomérats et du calcaire lacustre situé dans le reste de l'aquifère. La méthode DRASTIC permet de calculer un indice de l'ordre de 24 pour le premier type de matériau et de 15 pour le second.

Tableau 34 : Cotation du paramètre nature du milieu aquifère (A).

Nature du milieu aquifère (A)			
Type d'aquifère	Côte	Poids	Indice
Mélange de sable, de gravier et d'argile.	8	3	24
Mélange d'argile, de conglomérats et du calcaire lacustre.	5		15

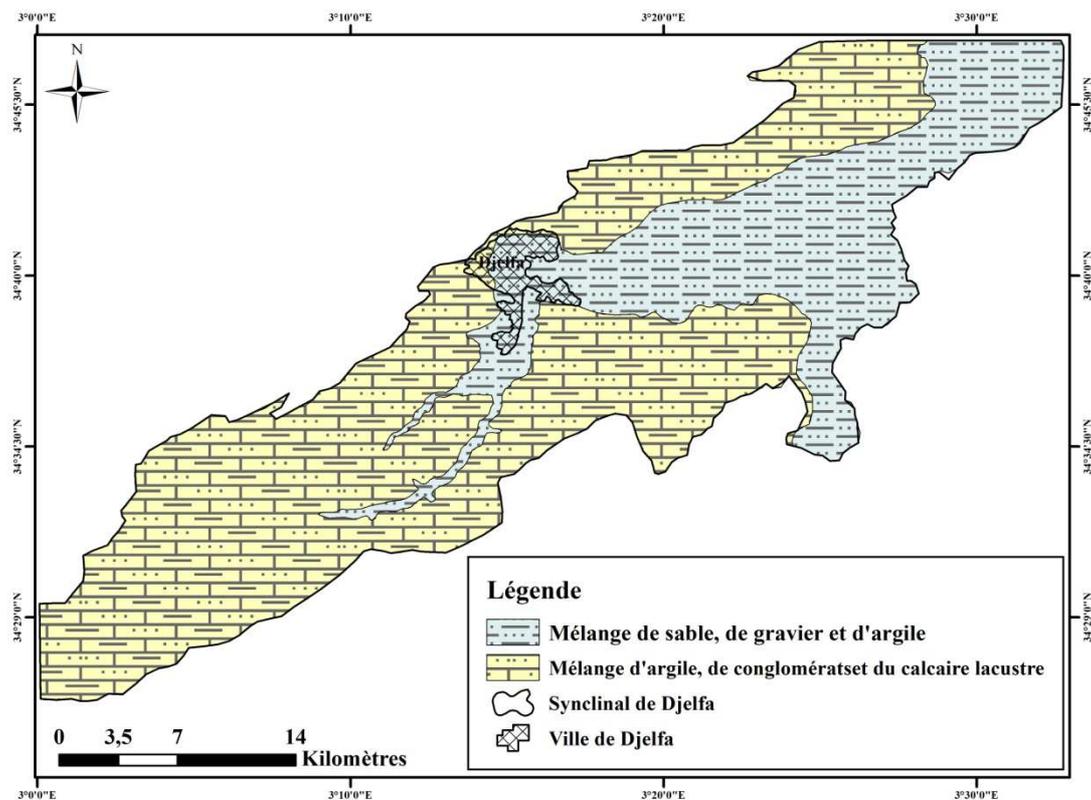


Figure 63 : Carte de la Nature du milieu aquifère.

V. 5. 2. 4. Type de sol (S) :

La nature du sol et leur épaisseur sont les deux facteurs qui conditionnent le caractère épurateur et l'aptitude des sols à laisser s'infiltrer un polluant (Bézèlgués et al., 2002). Le sol a un impact sur la frange d'eau qui s'infiltré à travers le sol pour atteindre la nappe d'eau souterraine et donc la migration verticale des polluants à travers la zone non saturée (Dibi B. et al 2013 in Latifi S., 2017). Dans notre cas la carte de la nature du sol a été réalisée à la base de la carte des sols de la région de Biskra (carte 1/500 000 de l'année 1938).

Tableau 35 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre type de Sol (S) (in Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

Type de Sol (S)		
Nature du sol	Côte	Poids
Sol mince	10	2
Gravier	10	
Sable	9	
Tourbe	8	
Argile fissurée	7	
Limon sableux	6	
Limon	5	
Limon silteux	4	
Limon argileux	3	
Terre noire	2	
Argile	1	

La cotation attribuée à ce paramètre est mentionnée dans le tableau 36.

Tableau 36 : Cotation du paramètre type de Sol (S).

Type de Sol (S)			
Nature du sol	Côte	Poids	Indice
Sol calcique	7	2	14
Sol Calcaire	10		20
Sol alluvial	10		20

La carte du type de sol (Figure 64) montre que les sols calciques couvrent la totalité de la surface de la nappe du Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa. Les indices calculés sont mentionnés dans le tableau qui suit.

V. 5. 2. 5. Topographie (T) :

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en pourcentage, ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants vers la nappe. En effet, Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. En revanche, une zone à faible pente a une tendance à retenir l'eau pendant une longue période, cela permet un plus grand potentiel de migration des contaminants (Sbargoud S., 2013., Bouleknafet Z. 2017).

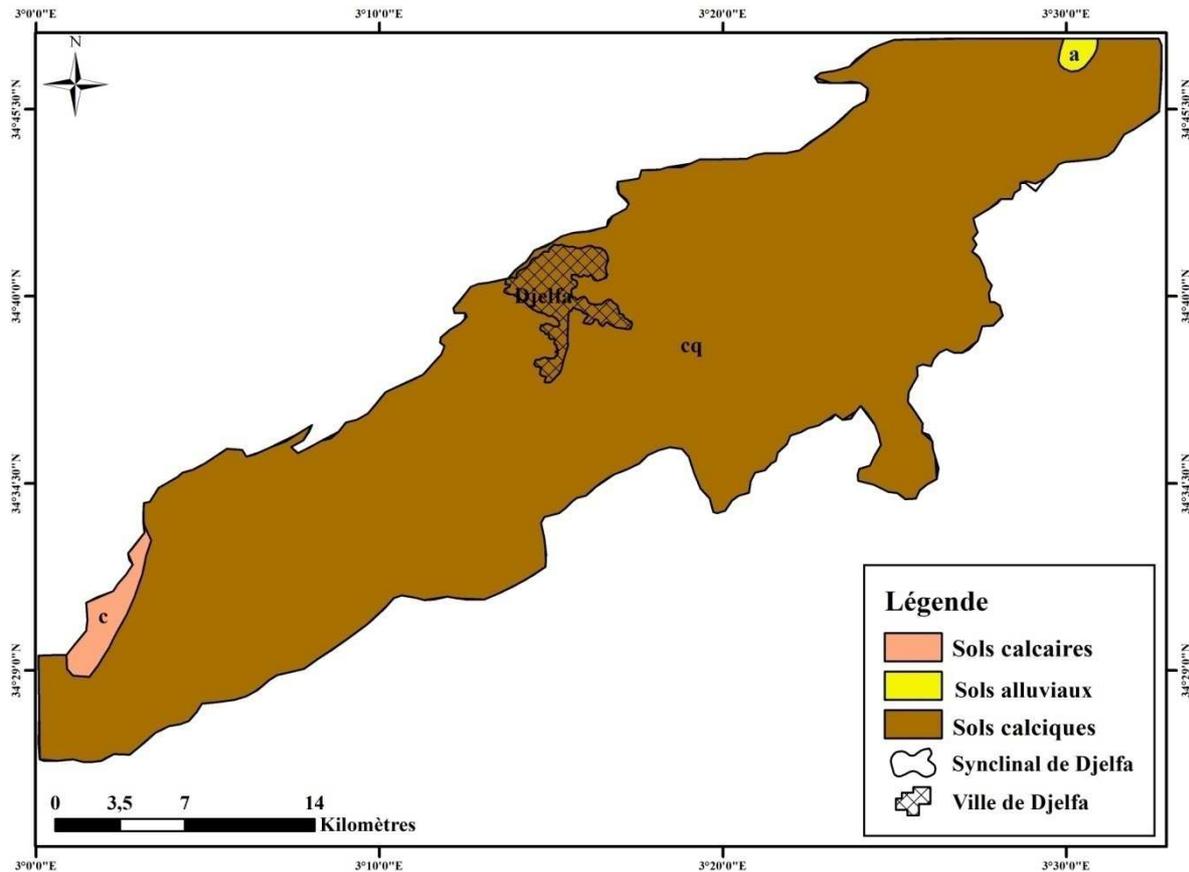


Figure 64 : Carte du type de sol.

Tableau 37 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre topographie (T) (in Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

Topographie (T) (%)		
Intervalle	Côte	Poids
0 - 2	10	1
2 - 6	9	
6 - 12	5	
12 - 18	3	
Plus de 18	1	

Le système de cotation attribué à la topographie est présenté au tableau 38.

Tableau 38 : Cotation du paramètre topographie (T).

Topographie (T) (%)			
Intervalle	Côte	Poids	Indice
0 - 2	10	1	10
2 - 6	9		9
6 - 12	5		5
12 - 18	3		3
Plus de 18	1		1

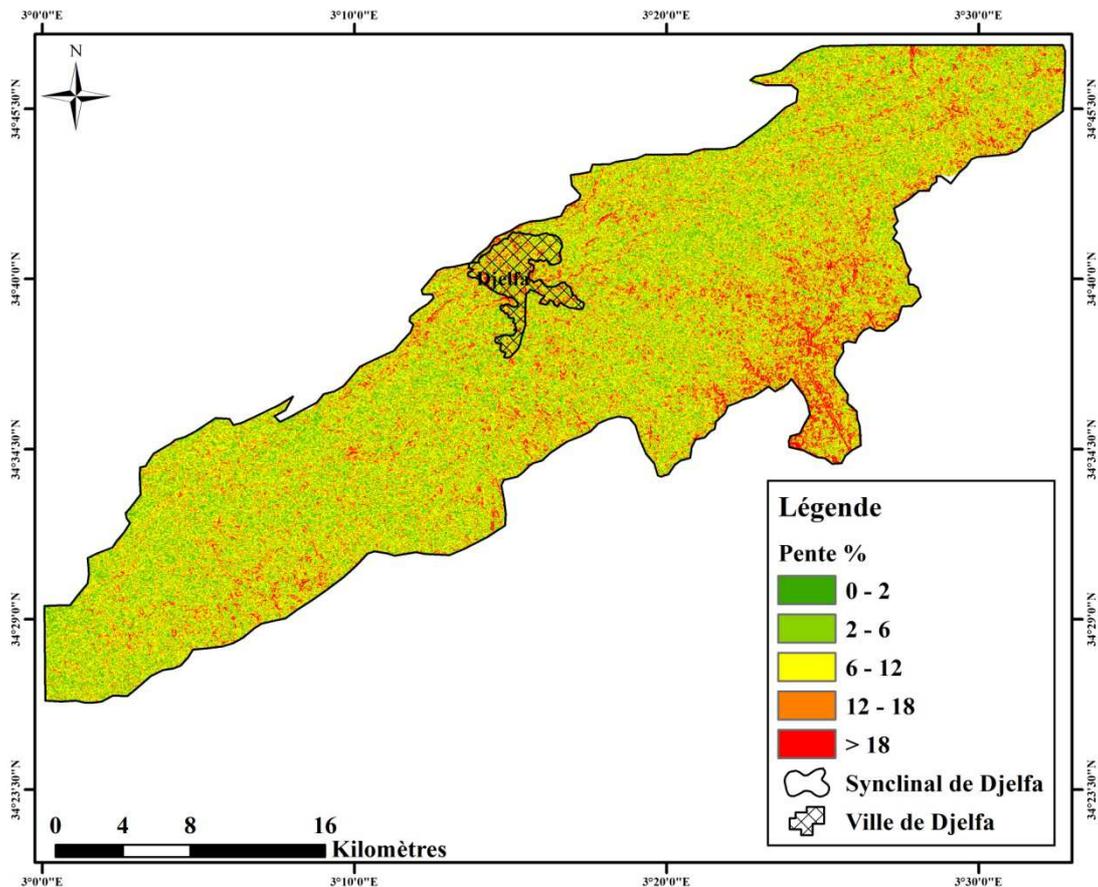


Figure 65 : Carte de la topographie de la nappe.

A partir de cette carte on peut distinguer que les pentes caractéristiques de la nappe du Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa sont comprises entre 0 et 12%. Les fortes pentes (12 à +18%) représentent une faible superficie.

V. 5. 2. 6. Impact de la zone vadose (I) :

La zone vadose est la zone située entre la surface du sol et la nappe d'eau. Elle est considérée comme étant un paramètre très important par la méthode DRASTIC, avec un poids de 5, car la nature et l'épaisseur de cette zone contrôlent dans une certaine mesure la vulnérabilité à la pollution des réservoirs.

Ce paramètre est déterminé en utilisant comme données de base la carte géologique ainsi que les coupes lithostratigraphiques existant dans la région d'étude.

La zone non saturée de la nappe du Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa est composée par trois formations géologiques, la première par un mélange de sable, de gravier et d'argile localisée dans la partie centre et Nord-Est de notre nappe aquifère, la deuxième par une croûte calcaire et des dépôts quaternaires anciens située dans la partie Sud et la dernière

par un mélange d'argile, de conglomérats et du calcaire lacustre situé dans le reste de l'aquifère (Figure 66).

Tableau 39 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre impact de la zone vadose (I) (in Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

Impact de la zone vadose (I)		
Nature de la zone	Côte	Poids
Couche imperméable	1	5
Limon/argile	3	
Argile schisteuse	3	
Calcaire	6	
Grès	6	
Lits de calcaire, grès et Argile schisteuse	6	
Sable et gravier avec limon et l'argile	6	
Roches métamorphique/ignée	4	
Sable et gravier	8	
Basalte	9	
Calcaire Karstique	10	

Le calcul permet d'avoir une seule valeur de l'ordre de 30 pour les trois formations existantes.

Tableau 40 : Cotation du paramètre impact de la zone vadose (I).

Impact de la zone vadose (I)			
Nature de la zone	Côte	Poids	Indice
Mélange de sable, de gravier et d'argile.	6	5	30
Croûte calcaire et des dépôts quaternaires anciens.	6		30
Mélange d'argile, de conglomérats et du calcaire lacustre.	6		30

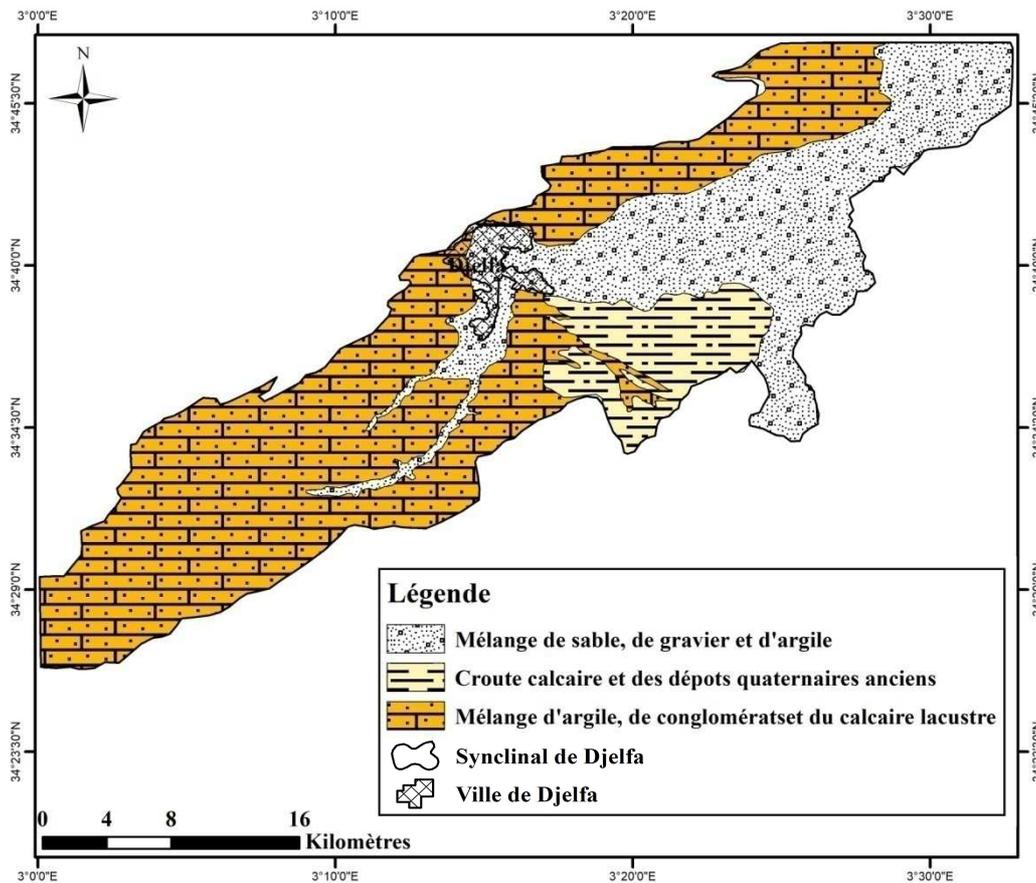


Figure 66 : Carte de la zone vadose.

V. 5. 2. 7. Conductivité hydraulique (C) :

La conductivité hydraulique est la facilité qu'a un fluide pour se déplacer dans une formation. Elle est reliée de manière étroite à la perméabilité dont une roche plus perméable possède une conductivité hydraulique plus élevée (Renard F., 2002). Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe (Bézèlgues et al., 2002).

Tableau 41 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre conductivité hydraulique (C) (in Benslimane I. & Rahmoune N., 2008).

Conductivité hydraulique (C) (m/j)		
Intervalle	Côte	Poids
0.04 - 4	1	3
4 - 12	2	
12 - 29	4	
29 - 41	6	
41 - 82	8	
Plus de 82	10	

La perméabilité peut être déterminée soit au laboratoire, soit à l'aide des essais par pompage, soit à l'aide de l'abaque de Freeze R. A. & Cherry J. A, 1979 (Figure 67), dans notre

cas, on a utilisé cette abaque. Ce paramètre est en relation directe avec les caractéristiques hydrodynamiques (débits, vitesse, gradient hydraulique). Plus la conductivité hydraulique est importante plus le potentiel de pollution est important.

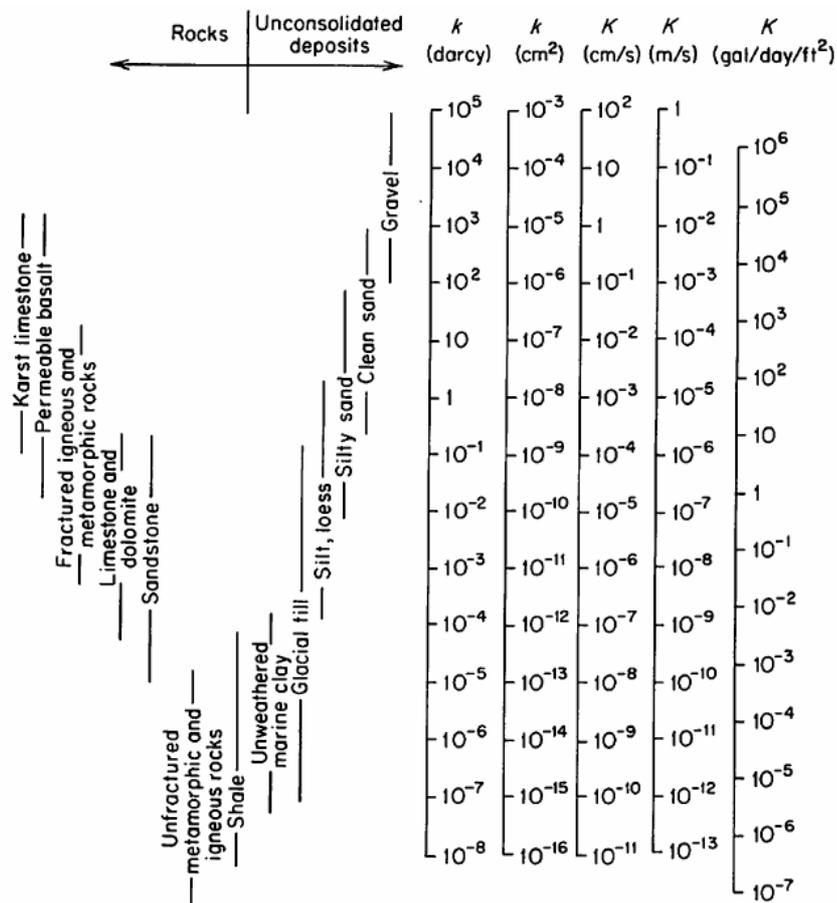


Figure 67 : Abaque de Freeze et Cherry représentant la gamme des valeurs de perméabilité (Freeze R. A. & Cherry J. A., 1979).

Le système de cotation et le calcul de l'indice de ce paramètre est illustré dans le tableau 42.

Tableau 42 : Cotation du paramètre conductivité hydraulique (C).

Conductivité hydraulique (C) (m/j)			
Intervalle	Côte	Poids	Indice
4 - 12	2	3	6
29 - 41	6		18

Les conductivités hydrauliques les plus élevés se localisent dans la partie centre et Nord-Est où la nappe est constituée par le mélange de sable, de gravier et d'argile (Figures 63 et 67).

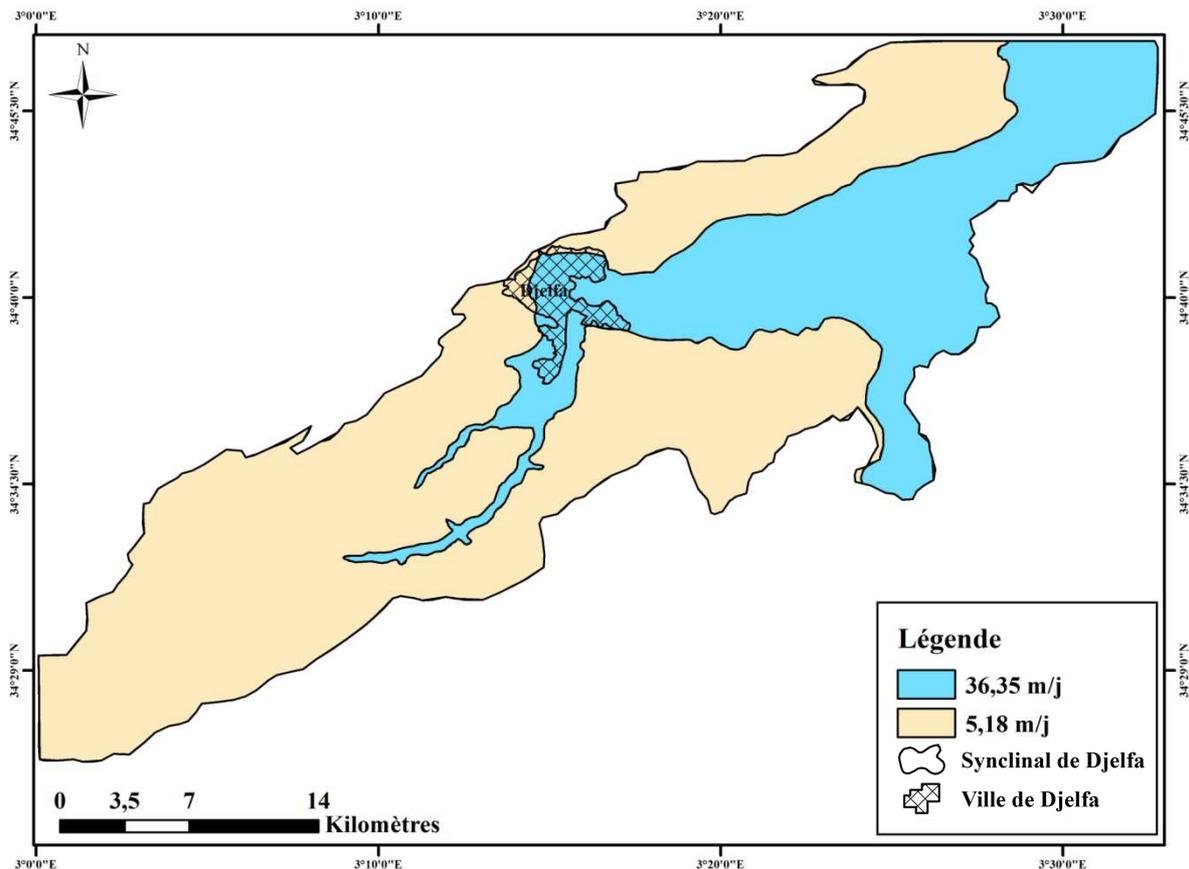


Figure 68 : Carte de répartition des valeurs de la conductivité hydraulique.

V. 5. 3. Carte de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC :

Le calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC notée ID (Osborne et al., 1998) propre à chaque unité hydrogéologique est obtenu par la somme des produits de chaque côte par son poids (tel qu'il est démontré auparavant). L'indice ainsi calculé représente une mesure du niveau de risque de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache (Douch I. 2016).

Une classification de l'indice de vulnérabilité à été établi par Engel et al 1996 qui permet de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de faire correspondre des classes de vulnérabilité à ces indices (Tableau 43).

Tableau 43 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (Engel et al.1996 in Sbargoud, 2011).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	ID < 101
Moyen	101 < ID < 140
Elevé	140 < ID < 200
Très élevé	ID > 200

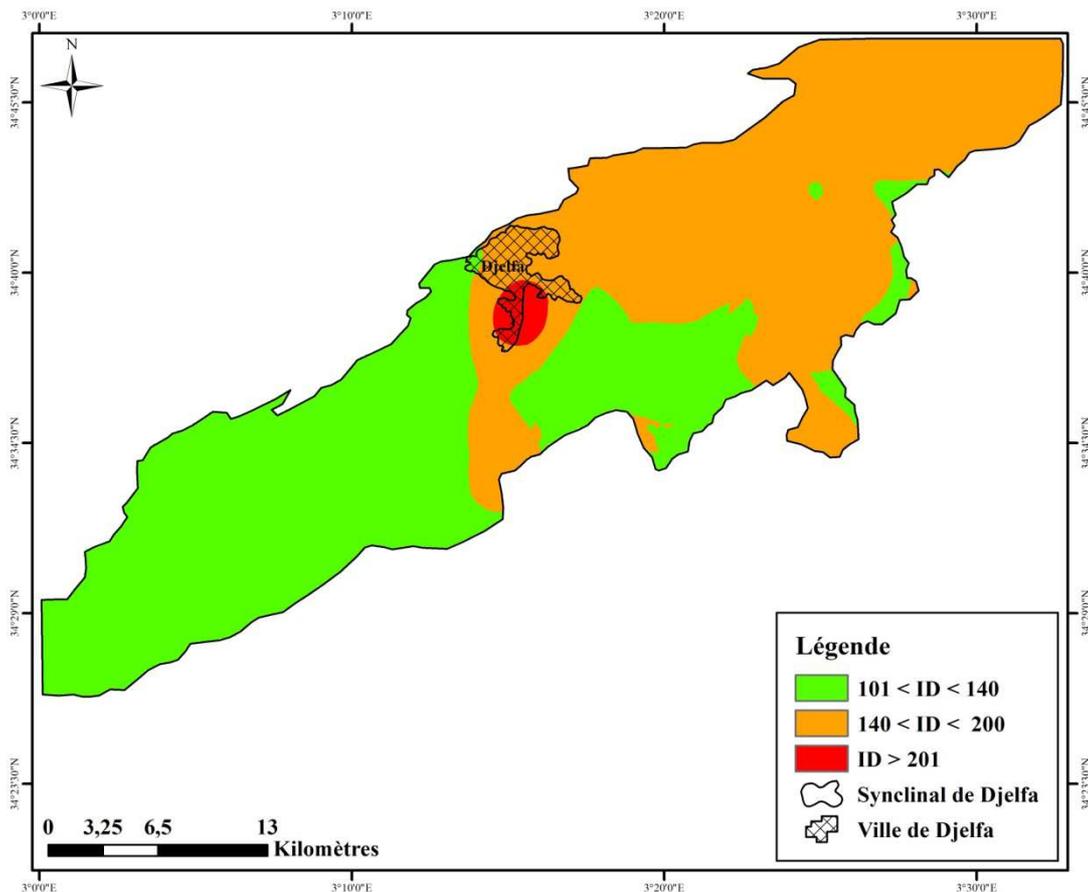


Figure 69 : Carte de répartition des valeurs de l'indice de vulnérabilité.

Tableau 44 : Classes de vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa.

Degré de vulnérabilité	Classes de l'indice de vulnérabilité	Superficie (%)
Moyen	101 < ID < 140	50,08
Elevé	140 < ID < 200	48,67
Très élevé	ID > 200	1,25

Les indices de vulnérabilité, ainsi déterminés, d'après la méthode DRASTIC varient entre 118 - 179. A partir de la carte de répartition des valeurs de l'indice de vulnérabilité, on voit clairement qu'il s'agit de trois classes de vulnérabilité (Figure 68) :

- Une zone Sud-Ouest caractérisée par une vulnérabilité moyenne (un indice de 101 - 140) occupant une superficie de l'ordre de 50,08%.
- Une zone Nord-Est avec un indice variant entre 140 - 200 caractérisant une vulnérabilité forte représentant 48,67% de la superficie totale de la nappe.

- Une zone centre localisée au Sud de la ville de Djelfa, d'une superficie minime comparée aux deux autres zones (1,25%), représentant l'endroit le plus vulnérable de toute la nappe caractérisée par un indice de l'ordre supérieur à 200 (vulnérabilité très forte).

V. 6. Conclusion :

L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa par la méthode DRASTIC et à l'aide d'un SIG nous donne une appréciation basée sur les sept indices estimés et calculés afin de tracer une carte de vulnérabilité sectorielle. Cette carte fait ressortir l'existence de trois classes de vulnérabilité : (i) moyenne dans la zone Sud-Ouest caractérisée par de faibles potentialités hydriques, (ii) forte dans la partie Nord-Est qui présente des potentialités hydriques considérables et (iii) très forte au Sud de la ville de Djelfa d'une superficie minime. Cela permet de nous faciliter la décision lors de la réalisation des plans de gestion de ces eaux.



Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce travail s'intéresse à l'étude de la Vulnérabilité des ressources en eaux souterraines à la pollution, cas du Synclinal de Djelfa, a travers cette étude nous avons pu conclure que :

Le Synclinal de Djelfa est définie par des formations géologiques allant du Trias au Quaternaire et est représentée par des affleurements de toute la série crétacé, souvent recouverts par un Tertiaire continental très incomplet.

Il est à noter que dans ce milieu, une grande partie de la population de Djelfa exerce une activité agropastorale qui nécessite de grands volumes d'eau provenant de l'exploitation des eaux souterraines de la zone d'étude.

Après de l'étude hydroclimatologique de notre région d'étude, on a pu conclure qu'elle possède un climat de type semi-aride à hiver frais, et un été chaud et sec. Les précipitations durant la période (1975-2018) sont relativement peu importantes et elles sont de l'ordre de **308.24** mm en moyenne annuelle, la température moyenne annuelle est de **14.73** °C.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR) déterminées par la méthode de Thornthwaite, sont respectivement égales à **824,7** mm/an et **275,3** mm/an (89 % des précipitations).

Le ruissellement (R) estimé par la formule de Tixeront-Berkaloff est de **14.34** mm/an , soit **5** % des précipitations moyennes annuelles . Cette valeur est faible mais elle est admissible.

L'infiltration (I) est estimée de l'équation du bilan de l'eau, elle est de l'ordre de **20.84** mm/an, soit **7%** des précipitations, ce qui est extrêmement faible.

D'après l'étude hydrogéologique il résulte que :

Les formations hydrogéologiques qui sont déterminées dans la nappe de la formation Mio-plio-quaternaire sont des argiles, des calcaires, des marnes et des limons avec des lentilles de grés et des conglomérats. C'est un aquifère hétérogène qui se trouve dans la partie centrale du synclinal de Djelfa, cette dernière repose sur le Sénonien, dont les niveaux marneux assurent la rétention des eaux.

CONCLUSION GENERALE

La nappe est alimentée par deux flancs du synclinal (Djebel Senalba au flanc Nord et Djebel Djellal Chergui et Djellal Gharbi au flanc Sud) soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration par l'intermédiaire des failles.

La carte piézométrique montre que l'écoulement des eaux souterraines convergent vers les principaux oueds. L'écoulement principal se fait dans la même direction que l'Oued Djelfa-Mellah.

Les essais par pompages effectués au niveau de l'aquifère montrent que les valeurs de la transmissivité moyenne estimée au niveau du forage 05 Juillet $T = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ est inférieure à celle du puits P55 qui est de l'ordre de $T = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

L'étude hydrochimique de la formation du mio-plio-quadernaire est basée essentiellement sur les résultats des analyses des eaux prélevées des puits et des forages qui captent la nappe aquifère.

Il résulte que le faciès chimique principal dominant est le bicarbonaté calcique, pour le faciès secondaire est le sulfaté calcique. Concernant la minéralisation, la taille du polygone de Stiff démontre une minéralisation moyenne. Au cours de la période des basses eaux la minéralisation est plus importante que celle observée durant les hautes eaux, avec des points d'eau chargés tel que le PMS4 et le PMS5.

Le diagramme de Durov nous a permis de conclure que les eaux de l'horizon aquifère étudié sont affectées par le phénomène de mélange des eaux ainsi que la dissolution de la matrice rocheuse.

L'Indice de la qualité de l'eau (WQI) prouve que le pourcentage des eaux de bonne qualité augmente pendant la période des hautes ce qui confirme les résultats du diagramme de Durov.

L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa par la méthode DRASTIC et à l'aide d'un SIG fait ressortir l'existence de trois classe de vulnérabilité : (i) moyenne dans zone Sud-Ouest caractérisée par de faibles potentialités hydrique, (ii) forte dans la partie Nord-Est qui présente des potentialités hydriques considérables et (iii) très forte au Sud de la ville de Djelfa d'une superficie minime. Cela permet de nous faciliter la décision lors de la réalisation des plans de gestion des ces eaux.



Références

bibliographiques

ABASSI S. A., 1999. *Water Quality Indices*. State-of-the art. J.IPHE., No.1.

ADAK M. D. G., Purohit K. M. & Datta J., 2001. *Assessment of drinking water quality of river Brahmani*. Indian J Environ Protect 8 (3):285–291.

ALLECHY F. B., LASM T. H., YOUAN T. M., YAO K., ASSEMIEN F., KOUAKOU. O. S., OKA K. A. R., BAKA D. & De LASME O. Z., 2016. *Cartographie De La Vulnérabilité À La Pollution Des Aquifères Du Socle Précambrien : Cas De La Région D'oumé (Centre-Ouest De La Côte D'ivoire)*. European Scientific Journal July 2016 Edi vol.12, No.20 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

ALLER L., BENNETT T., LEHR J. H., PETTY R. J. & HACKETT G., 1987. *DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. EPA, AdA, Oklahoma. 622 p.

AMHARREF M., AASSINE S., BERNOUSSI A. S. & HADDOUCHI B. Y., 2007. *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Application à la plaine du Gharb (Maroc)*. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20 (2): 185–199. <https://doi.org/10.7202/015812ar>.

A.N.R.H., 2003, 2008 & 2016. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Djelfa.

ASADI S. S., VUPPALA P. & ANJI R. M., .2007. *Remote sensing and GIS techniques for evaluation of groundwater quality in Municipal Corporation of Hyderabad (Zone-V)*. India Int. J. Environ. Res. Publ. Health 4(1):45–52.

BENDJAOUEL F. & TOUMI N., 2017. *Essai de gestion intégrée des ressources en eau par voie de modèle numérique, cas du Synclinal de Djelfa*. Mémoire de fin d'étude. Univ Ziane Achour, Djelfa, 68p.

BENSLIMANE I. & RAHMOUNE N., 2008. *Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes souterraines par la méthode DRASTIC "cas de la nappe du Synclinal de Djelfa"*. Mémoire d'ingénieur, Fac. des Sci. et Sci. de l'Ingéniorat, Univ. Ammar Telidji-Laghout, 111p.

- BENTEKHICI N., 2015.** *Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la plaine de Sidi Bel Abbes, Apport des données de télédétection et les SIG.* Acte de la Conférence Francophone Esri, 14p.
- BERCHICHE.T., CHANSSANY J. P. & YAKHLEF H., 1993.** *Evolution des systèmes de production ovin en zone steppique Algérienne.* Séminaire international réseau parcours, Ifrane (Maroc) 14-18 sept ; pp 157-167.
- BEZELGUES S. & DES GARETS E. avec la collaboration de MARDHEL V. & DÖRFLIGER N., 2002.** *Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1 - Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité.* Rapport BRGM-51783-FR, 44p.
- BOUDJEGHRA A., 2013.** Notice explicative de la carte hydrogéologique de Djelfa, 04.
- BOULEKNAFET Z., 2017.** *Hydrogéologie et vulnérabilité à la pollution des ressources en eau dans la plaine de Kebir Ouest.* Thèse de Doctorat en Sciences, option : Hydrogéologie, Fac. Sci. de la Terre, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 126p.
- BROWN R. M., McCLELLAND N. I., DEININGER R. A. & TOZER R. G., 1970.** *Water quality index-do we dare?* Water Sewage Works, 117(10). 339-343.
- CARTE DES SOLS DE L'ALGERIE REGION DE BISKRA, 1938.** *Carte 1/500 000,* dressée, héliogravée et publiée par le service Géographique de l'Armée en 1927, complétée en 1938, dessinée par Jaseix-Bellon R.
- CHANDOUL E. R., TRABELSI N., BOUAZIZ S., BEN DHIA H. & SIG 2008.** *"Spatial Analyst" pour le calcul et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution selon la méthode DRASTIC. Application sur la nappe phréatique de Gabès Nord.* La conférence Francophone ESRI, Versailles.
- CHENG Y., BAOXIANG Z., YINGYING Y., FANHAI M. & CHUNMIAO Z., 2012.** *A field demonstration of the entropy-weighted fuzzy DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment, Hydrological Sciences Journal .Journal des Sciences Hydrologiques, Vol.57 (7),1420-1432.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CHIBANE B., 2010.** *Etude hydrogéologique en milieu semi-aride à aride exemple de la région de Djelfa.* Thèse de Doctorat en Hydrogéologie, Fac. Sci de la Terre, de Géographie et de l'A.T. Univ. USTHB, 173p.
- DIBI B., KOUASSI K. L., KOUAME K. I., KONAN K. S., SOUMAHORO M., KONAN-WAIDHET A. B. & GNAKRI D., 2013.** *Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS : Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire.* International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol.2 (4), 464-476.
- DJOUDAR. D., 2014.** *Approche méthodologique de la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine en milieu fortement urbanisé : exemple en Algérie des plaines littorales (Mitidja).* Thèse de Doctorat. USTHB Alger, 2014 .178p.
- DUCHAINE, D., 1998.** *Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique).* Mémoire de Maître en Science (M.Sc.), Univ. du Québec, INRS-Eau, 83p.
- DOUCH I., 2016.** *Evaluation de la vulnérabilité à la pollution d'une nappe en milieu semi aride. Application à la nappe alluviale de la vallée de Boukiou (NW algérien).* Mémoire de Master en Hydrogéologie, Dépt. STU, fac. SNV et STU, Univ. Abou Baker Belkaid-Tlemcen, 97p.
- D.P.A.T., 2006.** Direction de la planification et de l'aménagement du territoire, Monographie de la wilaya de Djelfa, 228p.
- D.P.A.T., 2014.** Direction de la planification et de l'aménagement du territoire, Monographie de la wilaya de Djelfa, 200p.
- DWIVEDI S. L. & PATHAK V. 2007.** *A preliminary assignment of water quality index to Mandakini river, Chitrakoot.* Indian J Environ Protect 27:1036–1038.
- FREEZE R. A. & CHERRY J. A., 1979.** *Groundwater.* Ed. Prentice-Hall, New Jersey, 604p.
- HAIED N., 2015.** *Evaluation quantitative d'une réalimentation de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja dans la région de Bordj Ali Bey et son impact sur la qualité des eaux*

souterraines". Thèse de doctorat en sciences en Géologie, option : Hydrogéologie, IST, Université de Badji Mokhtar Annaba, 193 p.

HAIED N., FOUFOU A., CHAAB S., AZLAOUI M., KHADRI S., BENZZAHIA K. & BENZAHIA I., 2017. *Drought assessment and monitoring using meteorological indices in a semi-arid region. Energy Procedia.* 119(2017) 518–529.

HAOUCHINE A., BOUDOUKHA A., HAOUCHINE F. Z. & NEDJAÏ R., 2010. *Cartographie de La Recharge Potentielle des Aquiferes en Zone Aride. Cas de la Plaine d'El Outaya, Biskra –Algerie.* Eurojournals, 45, 4 (2010) 1-13.

HEMIDI L., 2014. *Vulnérabilité de la nappe alluviale de Guerrara à la pollution.* Magistère en Géologie, Fac. SNV&STU, Univ. Kasdi Merbah-Ouargla, 117p.

HERIZI I. & KEBAILI S., 2017. *Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe du Hodna par la méthode Drastic (cas de région Magra),* Mémoire de Master, Faculté de Technologie, Département Hydraulique, Univ. Mohamed Boudiaf-M'sila, 46p.

HORTON R. K., 1965. *An index number system for rating water quality.* J. Water Pollu. Cont. Fed., 37(3). 300-305.

KEBAILI S. & HERIZI I., 2017. *Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe du Hodna par la méthode Drastic (cas de région Magra).* Mémoire Master, sci. tech. Unive Mohamed Boudiaf - M'Sila.46p.

KETATA M., GUEDDARI M. & BOUHLILA R., 2011. *Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Central East Tunisia).* Arab. J. Geosci. 5:1379–1390.

KNOX, R. C., SABATINI, D. A. & CANTER, L. W., 1993. *Subsurface transport and fate processes.* USA: Lewis Publishers.

LANDREAU A., 1996. *Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines.* Rapport BRGM R38846. 28 p.

LATIFI S. & CHAAB S., 2017. *Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien.* Rev. Sci. Technol., Synthèse 34:48-62.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- MARDHEL V., PINSON S., & GRAVIER A., 2005.** *Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais.* (BRGM/RP – 54238 - FR Décembre 2005).
- MINISTERE DELEGUE CHARGE DE L'EAU, MAROC, 2016.** *Eau et climat.* livre bleu. 48p.
- MITRA B. K., 1998.** *Spatial and Temporal Variation of Ground Water Quality in Sand Dune Area of Aomori Prefecture in Japan.*
- MURAT V., 2000.** *Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution.* université du Québec INRS –Géoressources.
- MURAT V., PARADIS D., SAVARD M. M., NASTEV M., BOURQUE E., HAMEL A., LEFEBVRE R. & MARTEL R., 2003.** *Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du Sud-Ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD.* Édité. Commission Géologique du Canada, 14p, DOI : [10.4095/214216](https://doi.org/10.4095/214216).
- OSBORN N. I., ECKENSTEIN E. & KOON K. Q., 1998.** *Vulnerability assessment of twelve major aquifers in Oklahoma.* Technical Report 98–95, Oklahoma Water Resources Board, Tulsa, OK.
- PRADHAN S. K., PATNAIK D., & ROUT S. P., 2001.** *Water quality index for the ground water in and around a phosphatic fertilizer plant.* Indian J Environ Protect 21:355–358.
- RAHMANI B., 2016.** *Approche hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines dans une zone semi aride. Cas de la nappe mio-plio-quadernaire du synclinal de Djelfa (Algérie centrale).* Mémoire de Magister, Université Larbi Tebessi, 84p.
- RAMAKRISHNAIAH C. R., SADASHIVAIAH C. & RANGANNA G., 2009.** *Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State.* India. E-Journal of Chemistry, 2009, 6(2), 523-530, <http://dx.doi.org/10.1155/2009/757424>.
- RENARD F., 2002.** *Cours d'hydrogéologie.* Master Professionnel- DESS. 54p.
- RODIER J., BAZIN C., BROUTIN J. P., CHAMBON P., CHAMPSAUR H., & RODI L., 2005.** *L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats.* Ed. Dunod, Paris, 1384p.

- SAEEDI M., ABESSI O., SHARIFI F. & MERAJI H., 2010.** *Development of groundwater quality index.* Environ Monit Assess 163:327–335.
- SAIDI S., 2011.** *Contribution des approches paramétriques, cartographiques et statistiques à l'étude de la vulnérabilité du système aquifère phréatique de Mahdia (Tunisie orientale).* Thèse de doctorat. Faculté des sciences de Sfax, département des sciences de la terre (Tunisie). 255p.
- SBARGOUD S., 2013.** *Validité de l'application de la méthode de vulnérabilité DRASTIC à l'étude de la pollution par les nitrates dans la Mitidja (Nord d'Algérie).* Conférence GeoTunis. 8-12 avril 2013, Tunis, Tunisie, 22p.
- SCHNEBELEN N., PLATEL J. P., LENINDRE Y., BAUDRY D., HOARAU A., DUFOUR P. & BENHAMMOUDA S., 2002.** *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise.* Rapport BRGM/RP-51178-FR. 75p.
- SINAN M. & BOUIBRINE N., 2007.** *Utilisation des SIG pour la comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc).* Atelier international sur l'utilisation des techniques spatiales pour le développement durable. Rabat, 25-27 avril 2007.
- SMIDA H., ABDELLAOUI C., ZAIRI M. & BEN DHIA H. 2010.** *Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax, Tunisie).* Sécheresse, 21 (2), 131-146.
- SOCIETE NATIONALE DE RECHERCHES ET D'EXPLOITATION DES PETROLES EN ALGERIE (S.N.R.E.P.A.L.), 1979.** *Etude géophysique du synclinal de Djelfa.*
- SRINIVASAMOORTHY K., CHIDAMBARAM M., PRASANNA M. V., VASANTHAVIGAR M., JOHN PETER A. & ANANDHAN P. 2008.** *Identification of major sources controlling Groundwater Chemistry from a hard rock terrain-a case study from Mettur taluk, Salem district.* Tamilnadu, India. Journal of Earth System Sciences 117(1):49–58.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TAABNI M. & EL JIHAD M. D., 2012. *Eau et changement climatique au Maghreb : quelles stratégies d'adaptation ?* Les Cahiers d'Outre-Mer, Revue de géographie de Bordeaux, n° 260: 493-518

TRAYSSAC J., 1981. *Etude géomorphologique du bassin versant de l'oued Djelfa Mellah , versant Nord des Monts de Ouled Naïl (Algérie).* Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Univ. de Poitiers, Fac. des Sc. Humaines, 308p.

VASANTHAVIGAR M., SRINIVASAMOORTHY K., VIJAYARAGAVAN K., RAJIV GANTHI R., CHIDAMBARAM S., ANANDHAN P., MANIVANNAN R. & VASUDEVAN S., 2010. *Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin.* Tamilnadu, India. Environ Monit Assess. doi:[10.1007/s10661-009-1302-1](https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1).

VERBA J. & ZAPOROZEC A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability.* International Association of Hydrogeologists. v.16. 131 p. Guide sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines.

YIDANA S. M. & YIDANA A., 2010. *Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis.* Environmental Earth Science 59:1461–1473.