



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

-جامعة الجيلالي بونعاما – خميس مليانة

UNIVERSITE DJILALI BOUNAAMA – KHEMIS-MILIANA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre

Département des Sciences de la Terre

Filière : Géologie

Spécialité: Hydrogéologie

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de Master

Thème:

**Vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe
Mio-plio-quaternaire du synclinal
de Djelfa à la pollution**

Préparé par:

- BEKHAITI Oussama
- BRAHIMI Oussama

Devant le jury :

Dr. GHARBI Benyoucef	Président	MCB	UDBKM
Dr. BOUDERBALA Abdelkader	Encadrant	MCA	UDBKM
Dr. GUENFOUD Ahmed	Examineur	MCB	UDBKM

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons avant tout à remercier, ALLAH, le tout puissant, le tout miséricordieux, de nous avoir donné le courage et la capacité de présenter ce modeste travail.

Nous adressons nos profonds reconnaissances à **Dr. BOUDERBALA Abdelkader** pour nous avoir en cadré, suivi et encouragé afin de réaliser ce travail et d'avoir été toujours disponible et attentif.

Nous tenons à exprimer nos très vifs remerciements à l'ensemble des enseignants qui nous ont encadrés dans la spécialité Hydrogéologie au niveau de notre département.

Nous remercions et affectueusement le comité de jury **Dr GHARBI Benyoucef** et **Dr GUENFOUD** d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

Nous remercions également tout le personnel de l'ANRH-Djelfa, surtout Mme YOUNSSI Djihad et personnel de la DRE de Djelfa.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Je dédie ce mémoire à ...



A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon chère Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma petite famille, ma femme,

Tu as partagé avec moi tous les moments et tu étais toujours à ma côté.

Je te remercie de m'avoir jamais déçu et de n'a pas cessé de m'encourager .aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude.

A mon petit ange Rital Iline.

Avoir une fille comme toi ma belle donne beaucoup de sens de ma vie, du fond de mon cœur mes prières pour toi, ma fille, pour couronner ta vie de bonheur et de succès inchallah.

A mes très chers frères et sœur

Djihad, Aymen, Yacine, Farouk, Dhia et Rayan les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection à mon binôme

"Oussama" et à toute la famille BEKHAITI.

A mes chères ami (e)s et collègues de STU et les résidents du BOTANE (RAIS Mohamed)

BRAHIMI Oussama

*A ma très chère mère : **Melki Salifa***

Je dédie ce Travail A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Ma mère, Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Je te dédie mon travail en témoignage de mon profond amour pour toi.

Je t'aime tellement maman je prie Dieu de te donner une bonne santé et une vie longue et heureuse.

*A mon très cher père : **Bekhaiti mohammed***

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation.

Je t'aime papa et je prie Dieu de te donner une bonne santé et une vie longue et heureuse.

*A mes chers frères : **Marouane, Redha, Ishak, Ayoub, Fatima et Khaoula***

Merci de toujours me soutenir, merci pour tout l'amour et la confiance, et de toujours m'aider dans tous les domaines. Je vous dédie ce travail comme un témoignage d'amour et d'appréciation envers vous.

Je vous aime tous.

*A mon cher ami **Boudjenane Mustafa***

Tu es comme mon frère, je te remercie pour tout le soutien et je te souhaite à tous du succès dans ta vie future et je te félicite aussi pour ton travail.

J'espère que Dieu préserve notre relation fraternelle

*"**Oussama**" et à toute la famille **Brahimi***

Merci pour tout, tu as été mon frère pour moi, merci pour ton soutien et tes efforts.

Félicitations à vous et à votre famille pour ce travail..

*A mes chères ami (e)s et collègues de **STU** et les résidents du **BOTANE (RAIS Mohamed)***

BEKHAITI Oussama

ملخص :

منطقة الدراسة (منخفض الجلفة) تعد من المناطق الشبه جافة بنسبة تساقط 334مم، وتتضمن هذه المنطقة طبقة مياه جوفية من عمر الميوليكواترنار، التي تلعب دورا مهما في توفير مياه الري وكذلك مياه الشرب للمنطقة.

الهدف من هذا العمل هو تقدير مدى تعرض طبقة مياه جوفية للتلوث، فضلا عن دراسة الخصائص الهيدروكيميائية لهاته المياه الجوفية.

النتائج المحصل عليها من هاته الدراسة بينت الاتجاه العام للسريان المياه من الجنوب الغربي نحو الشمال الشرقي مع زيادة عمق المياه الجوفية باتجاه جريانها، أما مناطق التغذية فهي من الضفتين الجنوبية و الشمالية.بالإضافة إلى ذلك،كشفت الدراسة الهيدروكيميائية أن معظم المياه الآبار المدروسة لها طابع كيميائي بيكربوناتي كالسيومي و كبريتي كالسيومي . أما جودة المياه، يمكن اعتبارها ذات نوعية كيميائية جيدة وصالحة للشرب، كما أنها تعتبر من ممتازة إلى جيدة للري.

دراسة تعرض طبقة المياه الجوفية في منخفض الجلفة للتلوث باستخدام نظام المعلومات الجغرافيةSIG، و برسم الخرائط على طريقة DRASTIC و التي تعمل على تحديد المناطق الأكثر حساسية للتلوث، حيث أظهرت الخريطة النهائية (Carte de Vulnérabilité) ثلاث فئات من أصناف الحساسية للتلوث حيث أن 42.25% من منطقة الدراسة لديها حساسية للتلوث منخفضة، و 54.93% ذات حساسية متوسطة و 2.82% بحساسية عالية لخطر التلوث.

الخريطة النهائية يمكن اعتمادها كمرجع بهدف توخي خطر التلوث والتقليل منه أو تجنبه إلى أدنى حد من أجل نوعية جيدة للمورد المائي.

الكلمات المفتاحية : منخفض الجلفة، DRASTIC، طبقة مائية، خصائص هيدروكيميائية، حساسية المياه الجوفية، SIG.

ABSTRACT:

The study area (Syncline of Djelfa) belongs to the semi-arid climate zones, with precipitation average of 334mm. This zone contains the Mio-Plio-Quaternary aquifer, which plays an important role in the supply of irrigation water, as well as, drinking water in this region.

The aim of this work is to evaluate the vulnerability of groundwater in this aquifer to pollution, as well as, the hydrochemical characterization of groundwater quality of the Mio-Plio-Quaternary aquifer.

The obtained results indicate that the piezometric map highlight a general direction of groundwater flow from South-West towards the North-East, with depth of groundwater increasing from the Southwest to the Northeast. While, the hydrochemical study reveals that the quasi totality of the studied wells have a calcic bicarbonated and calcic sulphated facies, and it can be considered that groundwater of this aquifer are generally from good to excellent quality, drinkable, and they are considered excellent for irrigation.

Finally, the study of the vulnerability of groundwater of the Mio-plio-quaternary aquifer of the Syncline of Djelfa by using the DRASTIC method and GIS, shows three (03) classes of vulnerability, where 42.25% of the study area has a low vulnerability, 54.93% has a moderate vulnerability and 2.82% has a high vulnerability.

This final map of the vulnerability could help engineers to prevent a possible pollution of groundwater in this area, with a view to a good qualitative management of the resource.

Key words: Syncline of Djelfa, DRASTIC method, Mio-Plio-Quaternary aquifer, hydrochemical characterization, vulnerability, GIS.

RESUME :

La zone d'étude (Synclinal de Djelfa) est une zone semi-aride avec une précipitation de 334 mm, y compris une couche d'eau souterraine d'âge du moi-plio-Quaternaire, qui joue un rôle important dans la fourniture d'eau d'irrigation ainsi que d'eau potable à la région.

L'objectif de ces travaux est d'estimer la mesure dans laquelle un aquifère est contaminé, ainsi que d'étudier les propriétés hydrochimiques des eaux souterraines.

Les résultats obtenus à partir de cette étude ont montré la tendance générale de l'écoulement de l'eau du sud-ouest vers le nord-est avec une profondeur accrue des eaux souterraines vers son écoulement, tandis que les zones d'alimentation proviennent des rives sud et nord. En outre, l'étude hydrochimique a révélé que la plupart des puits étudiés ont un caractère chimique, y compris le bicarbonate de calcium et le soufre de calcium. La qualité de l'eau peut être considérée comme de bonne qualité chimique et potable, et est considérée comme excellente à bonne pour l'irrigation.

L'étude de vulnérabilité montrant l'exposition de l'aquifère à une pollution à l'aide de SIG, et par une cartographie drastique qui identifie les zones les plus polluantes et sensibles, la carte finale (Carte de Vulnérabilité) montre trois catégories de classes d'allergie à la pollution où 42,25% de la zone d'étude est faiblement sensible à la pollution, 54,93% sont modérément sensibles et 2,82% sont très sensibles à la contamination.

La carte finale peut être adoptée comme référence en vue de minimiser, de minimiser ou d'éviter le risque de pollution pour une bonne qualité de la ressource en eau.

Mots clés : Synclinal de Djelfa, DRASTIC, aquifère, hydrochimie, vulnérabilité à la pollution, SIG,

Liste des abréviations et des paramètres :

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

DRE : Direction des Ressources en Eau

P: Précipitation (mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm) **ETR** : Evapotranspiration Réelle (mm)

I : Infiltration de l'eau dans le sol (mm)

K : Perméabilité (m/s)

R : Ruissellement (mm)

RFU : Réserve Facilement Utilisable (mm)

T : Transmissivité (m²/s)

T : Température (°C)

SIG: Système d'information géographique

DPI: Drastic Pollution Index.

Liste des Tableaux :

Chapitre II : Context hydroclimatologique

TABLEAU II- 1 : COORDONNEES DE LA STATION METEOROLOGIQUE DE DJELFA	12
TABLEAU II- 2 : VARIATION DES PRECIPITATIONS AU NIVEAU DE LA STATION DE DJELFA (1975-2014)	13
TABLEAU II- 3 : VALEURS DU RAPPORT P/T POUR LA PERIODE 1975 – 2014	21
TABLEAU II- 4 : VALEURS DE L’ETP ESTIMEES PAR LA FORMULE DE THORNTHWAITE A LA STATION DE DJELFA, PERIODE (1975-2014)	23
TABLEAU II- 5 : BILAN HYDROLOGIQUE MOYEN (1975-2014) A LA STATION DE DJELFA, PAR LA METHODE DE THORNTHWAITE	27
TABLEAU II- 6 : VALEURS DU (R) ET (I) DANS LA REGION DU SYNCLINAL DE DJELFA, PERIODE (1975-2014).....	29
TABLEAU II- 7 : VALEURS DES APPORTS LIQUIDES SELON LA FORMULE ALGERIENNE	30
TABLEAU II- 8 : VALEURS DES APPORTS LIQUIDES SELON LA FORMULE DE MALLET-GAUTHIER	30
TABLEAU II- 9 : VALEURS DES APPORTS LIQUIDES SELON LA FORMULE DE TURC.....	31

Chapitre III : Cadre géologique et Hydrogéologique

TABLEAU III- 1 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE CHAQUE FORMATION AQUIFERE DU SYNCLINAL DE DJELFA	58
---	----

Chapitre IV : Etude hydrochimique

TABLEAU IV- 1 : CLASSIFICATION DES EAUX SELON LEUR D.H.T	81
TABLEAU IV- 2 : CLASSIFICATION DES EAUX DE LA NAPPE SELON LA FORMULE CARACTERISTIQUE	83
TABLEAU IV- 3 : CARACTERE DE L’EAU SELON LA CLASSIFICATION DE SCHOELLER-BERKALOFF	87

TABLEAU IV- 4 : NORMES APPLICABLES AUX EAUX DESTINEES A L'ALIMENTATION HUMAINE (O.M.S 2011)	91
TABLEAU IV- 5 : VALEURS DU S.A.R ET DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DES DIFFERENTS POINTS D'EAU.....	93
TABLEAU IV- 6 : CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION EN FONCTION DE LA C.E ET DU S.A.R (METHODE DE RICHARDS).....	94

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

TABLEAU V- 1 : ATTRIBUTS DE LA VULNERABILITE DE L'EAU SOUTERRAINE ET PARAMETRES ASSOCIES MODIFIE D'APRES (VRBA, 1991 ; ROMAIN DUCOMMUN, 2010)	107
TABLEAU V- 2 : PARAMETRES DE LA METHODE DRASTIC (ALLER ET AL, 1987)	111
TABLEAU V- 3 : CRITERES D'EVALUATION DE LA VULNERABILITE DANS LA METHODE DRASTIC (ALLER ET AL, 1987).....	112
TABLEAU V- 4 : CRITERES D'EVALUATION DE LA VULNERABILITE DANS LA METHODE DRASTIC (ENGEL ET AL, 1996)	112
TABLEAU V- 5 : COTES ET POIDS DRASTIC DU PARAMETRE PROFONDEUR DE LA NAPPE (D) (BENSLIMANE ET RAHMOUNE 2008 ; BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019).	113
TABLEAU V- 6 : COTATION DU PARAMETRE PROFONDEUR DE LA NAPPE (D).....	113
TABLEAU V- 7 : COTES ET POIDS DRASTIC DU PARAMETRE RECHARGE EFFICACE DE LA NAPPE (R) (BENSLIMANE ET RAHMOUNE 2008 ; BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019)	115
TABLEAU V- 8 : COTATION DU PARAMETRE RECHARGE EFFICACE DE LA NAPPE (R)	115
TABLEAU V- 9 : COTES ET POIDS DRASTIC DU PARAMETRE NATURE DU MILIEU AQUIFERE (A) (BENSLIMANE ET RAHMOUNE 2008 ; BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019)	117
TABLEAU V- 10 : COTATION DU PARAMETRE NATURE DU MILIEU AQUIFERE (A)	117
TABLEAU V- 11 : COTE ET POIDS DRASTIC DU PARAMETRE TYPE DE SOL (S) (BENSLIMANE ET RAHMOUNE 2008 ; BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019).....	119

TABLEAU V- 12 : COTATION DU PARAMETRE TYPE DE SOL (S)	119
TABLEAU V- 13 : COTE ET POIDS DRASTIC DU PARAMETRE TOPOGRAPHIE (T) (BENSLIMANE ET RAHMOUNE 2008 ; BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019).	121
TABLEAU V- 14 : COTATION DU PARAMETRE TOPOGRAPHIE (T)	121
TABLEAU V- 15 : COTE ET POIDS DRASTIC DU PARAMETRE IMPACT DE LA ZONE VADOSE (I) (BENSLIMANE ET RAHMOUNE 2008 ; BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019).	123
TABLEAU V- 16 : COTATION DU PARAMETRE IMPACT DE LA ZONE VADOSE (I).....	123
TABLEAU V- 17 : COTE ET POIDS DRASTIC DU PARAMETRE CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE (C) (BENSLIMANE ET RAHMOUNE 2008 ; BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019)	125
TABLEAU V- 18 : COTATION DU PARAMETRE CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE (C).....	126
TABLEAU V- 19 : CRITERES D’EVALUATION DE LA VULNERABILITE DANS LA METHODE DRASTIC (ENGEL ET AL.1996 IN SBARGOUD, 2011).	128
TABLEAU V- 20 : CLASSES DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE MIO- PLIO-QUATERNAIRE DU SYNCLINALE DE DJELFA.	129

Liste des Figures :

Chapitre I : Situation géographique et géomorphologique de la zone d'étude.

FIGURE I- 1 : POSITION DE LA REGION DE DJELFA DANS LE NORD ALGERIEN	4
FIGURE I- 2 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE. (BOUDIAF ET KAMEL HAYAT 2019)	6
FIGURE I- 3 : SITUATION DU GRAND BASSIN VERSANT DES ZAHREZ (17).....	7
FIGURE I- 4 : SITUATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED DJELFA-MELAH (17-02) DANS LE GRAND BASSIN DES ZAHREZ.....	8
FIGURE I- 5 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED DJELFA-MELAH	9

Chapitre II : Context hydroclimatologique.

FIGURE II- 1 : COURBE DE SIMPLE CUMUL DES PRECIPITATIONS A LA STATION DE DJELFA (1975-2014)	13
FIGURE II- 2 : ABAQUE DE L'INDICE D'ARIDITE ANNUEL DE DE MARTONNE	15
FIGURE II- 3 : CLIMAGRAMME D'EMBERGER.....	16
FIGURE II- 4 : VARIATIONS INTERANNUELLES DES PRECIPITATIONS DE LA STATION DE DJELFA POUR LA PERIODE (1975-2014).	18
FIGURE II- 5 : VARIATION DES PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES A LA STATION DE DJELFA POUR LA PERIODE (1975-2014).	18
FIGURE II- 6 : VARIATION DES TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES DE LA STATION DE DJELFA (1975-2014).....	19
FIGURE II- 7 : VARIATION DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES A LA STATION DE DJELFA (1975-2014).....	20

FIGURE II- 8 : DIAGRAMME OMBRO-THERMIQUE POUR LA PERIODE (1975-2014) A LA STATION DE DJELFA.....	20
FIGURE II- 9 : ABAQUE DE WUNDT MODIFIE PAR COUTAGNE.....	25
FIGURE II- 10 : RELATION PRECIPITATION-TEMPERATURE-ETR, POUR LA PERIODE (1975-2014) A LA STATION DE DJELFA.	28

Chapitre III : Cadre géologique et Hydrogéologique.

FIGURE III- 1 : PRINCIPALES UNITES GEOLOGIQUES DE L'AFRIQUE DU NORD	35
FIGURE III- 2 : ESQUISSE STRUCTURALE DE L'ATLAS SAHARIEN CENTRAL.....	36
FIGURE III- 3 : MONTS DES OULEDS-NAIL ET BASSIN DES ZAHREZ CARTE GEOLOGIQUE.....	37
FIGURE III- 4 : COUPES GEOLOGIQUES PASSANT PAR LE SYNCLINAL DE DJELFA	38
FIGURE III- 5 : MONTS DES OULED NAIL ET BASSIN DES ZAHREZ SCHEMA TECTONIQUE	39
FIGURE III- 6 : CARTE GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ETUDE	47
FIGURE III- 7 : COUPES GEOLOGIQUES DU FLANC NORD DU SYNCLINAL DE DJELFA.....	49
FIGURE III- 8 : LOG STRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DU SYNCLINAL DJELFA	50
FIGURE III- 9 : CARTE D'INVENTAIRE DES POINTS D'EAU DU SYNCLINAL DE DJELFA	53
FIGURE III- 10 : CARTE D'ISO-PROFONDEUR DES EAUX DE LA NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE DU SYNCLINAL DE DJELFA.....	55
FIGURE III- 11 : CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE DU SYNCLINAL DE DJELFA.....	56

Chapitre IV : Etude Hydrochimique.

FIGURE IV- 1 : CARTE D'INVENTAIRE DES POINTS D'EAU ECHANTILLONNES (MAI 2013).....	63
FIGURE IV- 2 : CARTE D'ISO-VALEURS DES CONDUCTIVITES ELECTRIQUES.....	67
FIGURE IV- 3 : CARTE DES ISO-TENEURS EN CALCIUM (Ca^{2+}).....	70
FIGURE IV- 4 : CARTE DES ISO-TENEURS EN MAGNESIUM (Mg^{2+}).....	72
FIGURE IV- 5 : CARTE DES ISO-TENEURS EN SODIUM (Na^+).....	75
FIGURE IV- 6 : CARTE DES ISO-TENEURS EN BICARBONATE (HCO_3^-).....	77
FIGURE IV- 7 : CARTE DES ISO-TENEURS EN SULFATE (SO_4^{2-}).....	79
FIGURE IV- 8 : CARTE DES ISO-TENEURS EN CHLORURES (Cl^-).....	81
FIGURE IV- 9 : CLASSIFICATION DE STABLER.....	83
FIGURE IV- 10 : DIAGRAMME DE CLASSIFICATION DES EAUX D'APRES PIPER.....	85
FIGURE IV- 11 : CLASSIFICATION DES ECHANTILLONS SALON LE DIAGRAMME DE PIPER.....	86
FIGURE IV- 12 : DIAGRAMMES DE SCHOELLER-BERKALOFF.....	88
FIGURE IV- 13 : CARTE DE REPARTITION DES FACIES CHIMIQUES DES EAUX DE LA NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE	91
FIGURE IV- 14 : HISTOGRAMME AU NORMES APPLICABLES AUX EAUX DESTINEES A L'ALIMENTATION HUMAINE (O.M.S 2011) ET (JOA 2011).....	92
FIGURE IV- 15 : DIAGRAMME DE CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION.....	95
FIGURE IV- 16 : CARTE DES CONDUCTIVITES	97

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

FIGURE V- 1 : LES DIFFERENTS TYPES DE LA POLLUTION. (DJELBANE ET M'ZARA2015).....	101
FIGURE V- 2 : ORIGINE, TRANSPORT ET EVOLUTION DU POLLUANT (DJELBANE ET M'ZARA 2015)	103
FIGURE V- 3 : PARAMETRES DE LA METHODE DRASTIC (NARGES G 2017).....	110
FIGURE V- 4 : CARTE DE REPARTITION DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE	114
FIGURE V- 5 : CARTE DE REPARTITION DES VALEURS DE LA RECHARGE EFFICACE DE LA NAPPE.	116
FIGURE V- 6 : CARTE DE LA NATURE DU MILIEU AQUIFERE.....	118
FIGURE V- 7 : CARTE DU TYPE DE SOL.....	120
FIGURE V- 8 : CARTE DE LA TOPOGRAPHIE DE LA NAPPE.....	122
FIGURE V- 9 : CARTE DE LA ZONE VADOSE.....	124
FIGURE V- 10 : ABAQUE DE FREEZE ET CHERRY REPRESENTANT LA GAMME DES VALEURS DE PERMEABILITE (FREEZE& CHERRY 1979)	126
FIGURE V- 11 : CARTE DE REPARTITION DES VALEURS DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE..	127
FIGURE V- 12 : CARTE DE REPARTITION DES VALEURS DE L'INDICE DE VULNERABILITE.....	128

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Situation géographique et géomorphologique de la zone d'étude	
I. A/ Situation géographique :	4
I. A.1- Relief :	5
I. A.2- Réseau hydrographique :	5
I. A.3- Végétation :	5
I. A.4- Localisation du Synclinal de Djelfa :	5
I. B/ Aperçu géomorphologique :	7
Conclusion :	10
Chapitre II : Context hydroclimatologique	
Introduction :	12
II. 1- Homogénéité des données :	12
II. 2- Détermination du type de climat :	14
II. 2.1- Indice de De Martonne :	14
II. 2.2- Climagramme de Louis Emberger :	15
II. 3- Analyse des données climatiques:	17
II. 3.1- Précipitation:	17
II. 3.1.1- Variations interannuelles des précipitations :	17
II. 3.1.2- Variation des précipitations moyennes mensuelles:	18
II. 3.2- Température :	19
II. 3.2.1- Variation des températures moyennes annuelles :	19
II. 3.2.2- variation des températures moyennes mensuelles :	19
II. 3.3- Diagramme Ombrothermique :	20
II. 3.4/ Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte):	21
II. 4- Estimation de l'évapotranspiration:	22

II. 4.1- Evapotranspiration potentielle (ETP) :	22
II. 4.2- Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement (De) :	24
II. 4.2.1- Formule de L. Turc (1954) : qui s'écrit de la manière suivante :	24
II. 4.2.2- Formule de Coutagne : qui s'écrit de la manière suivante :	24
II. 4.2.3- Méthode de Wundt :	25
II. 5- Le bilan hydrologique :	26
II. 5.1- Calcul de l'ETR selon la formule de Thornthwaite :	26
II.5.2/ Calcul du déficit agricole (Da):	26
II. 5.3- Détermination du ruissèlement et de l'infiltration :	28
II. 6- Détermination des apports liquides :	29
Conclusion :	31

Chapitre III : Cadre géologique et Hydrogéologique

III. A/ GEOLOGIE :	33
III. A.1- Cadre géologique régional :	33
III. A.1.1- Domaine de l'Atlas saharien central :	33
III. A.1.2- Stratigraphie de l'Atlas saharien central :	33
III. A.1.3- Tectonique de l'Atlas saharien :	34
III. 2- Cadre géologique local :	40
III. 2.1- Stratigraphie :	40
III. 2.2- Tectonique :	45
III. 2.2.A- La partie centrale (axiale) :	45
III. 2.2.B- Les flancs Nord et Sud du synclinal :	45
III. B/ HYDROGEOLOGIE :	51
Introduction :	51
III. B.1- Piézométrie :	51
III. B.1.1- Mesure piézométrique sur terrain (inventaire des points d'eau) :	51
III. B.1.2- Carte d'iso-profondeur des eaux :	52

III. B.1.3- Elaboration de la carte piézométrique :	52
III. B.1.4/ Interprétation de la carte piézométrique :	54
III B.2- Détermination des paramètres hydrodynamiques (essais de pompage):	58
Conclusion :	59

Chapitre IV : Etude Hydrochimique

Introduction :	62
IV .1- Etude des paramètres physiques :	62
IV .1.1/-Température :	62
IV .1.2/ Potentiel hydrogène (pH):.....	62
IV. 1.3- Conductivité électrique (CE):.....	65
IV .2/ Etude des paramètres chimiques :	67
IV .2.1/ Evolution des paramètres chimiques :	67
IV .2.1.A/ Carte d'isoteneurs en calcium (Ca^{2+}) :	68
IV .2.1.B/ Carte d'isoteneurs en magnésium (Mg^{2+}) :	68
IV .2.1.C/ Carte d'isoteneurs en sodium et potassium ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) :	72
IV .2.1.D/ Carte d'isoteneurs en bicarbonates (HCO_3^-) :	73
IV .2.1.E/ Carte d'isoteneurs en sulfates (SO_4^{2-}) :	73
IV .2.1.F / Carte d'isoteneurs en chlorures (Cl^-) :	73
IV. 2.2- Etude des valeurs relatives:	81
IV. 2.2.A- Dureté totale ou degré hydrotimétrique (D.H.T):.....	81
IV .2.2.B/ Indice d'échange de base :	82
IV. 3- Classification chimique des eaux :	82
IV. 3.1- Classification des eaux d'après Stabler :	83
IV. 3.2- Classification des eaux d'après Piper :	85
IV. 3.3- Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff :.....	87
IV .4/ Etude de l'évolution chimique des eaux :	89

IV .5/ Qualité chimique des eaux :	91
IV .5.1/ Potabilité des eaux :	91
IV .5.2/ Aptitude des eaux à l'irrigation :	92
IV .5.2.1/ Classification des eaux par la méthode de Richards :.....	93
IV .5.2.2/ Variation spatiale de la CE :	95
Conclusion :.....	97

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

Introduction :.....	99
V .A- Généralité sur la pollution des eaux souterraine :.....	99
V. A.1- Les sources de la pollution :.....	100
V. A.2- Type de pollution :.....	100
V. A.3- Principaux types des milieux souterrains :.....	102
V. A.3.1-La zone non saturée :	102
V. A.3.2-La zone saturée :	102
V. B- Définition de la vulnérabilité des eaux :.....	102
V. B.1- Mécanismes de la pollution des eaux souterraines :.....	102
V. B.2- Concepts de vulnérabilité :	103
V. B.3- Types de vulnérabilité :	104
V. B.4- Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :	104
V. B.5- Facteur de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :	105
V. B.6- Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :.....	108
V. B.7- La méthode DRASTIC :	109
V. B.8- Elaboration des cartes thématiques par l'application de la méthode DRASTIC:.	113
V. B.8.1- Carte de la profondeur de la nappe (D) :.....	113
V. B. 8.2- Recharge efficace de la nappe (R) :	114
V. B.8.3- Nature du milieu aquifère (A) :.....	116

V.B.8.4. Type de sol (S) :	118
V. B.8.5- Topographie (T) :	120
V. B. 8.6- Impact de la zone vadose (I) :	123
V. B.8.7- Conductivité hydraulique (C) :	125
V.B. 8. 8. Carte de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC :	127
Conclusion :	130
Conclusion générale :	131
Recommandations :	133

Références bibliographiques

Annexes

Introduction générale

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt de l'importance pour d'innombrables activités humaines. L'eau peut être rare à certains endroits, comme les zones sèches et semi-arides, ou tout simplement d'une qualité médiocre à d'autres endroits. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, tels que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution. Il est donc essentiel de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer et protéger cette ressource pour en assurer la durabilité.

L'eau de surfaces et de souterraines sont exposées à toute forme de pollution qu'elle soit urbaine, agricole, industrielle ou seulement accidentelle. Cette pollution constitue un risque permanent de limitation de cette ressource.

Le polluant subit une migration et une évolution dans l'espace souterrain, il est non seulement présent dans l'eau mais également fixé, absorbé sur les roches et les minéraux du système aquifère, engendrant ainsi une difficulté pour rétablir sa qualité d'origine.

La protection naturelle des eaux souterraines est assurée par ensemble de conditions d'alimentation, de gisement et d'écoulement qui définissent le degré de vulnérabilité de l'aquifère, malgré ces réactions qui se produisent dans le sous-sol, les eaux souterraines restent toujours vulnérables.

Il existe un grand nombre de modèles déterministes permettant de suivre l'évolution et le comportement des polluants dans le milieu souterrain. Ces modèles peu utilisables, ils exigent une quantité importante de données fiables souvent non disponibles.

C'est pourquoi le mécanisme de pollution des eaux souterraines est souvent rattaché au concept de vulnérabilité, qui exprime en fait, la sensibilité de la nappe aux différents polluants exposés à la surface du sol.

Face à la diversité et la variabilité des informations nécessaires à l'évaluation des différents paramètres qui caractérisent la vulnérabilité, l'utilisation de l'outil informatique devient indispensable.

La présente étude met en exergue la problématique de la pollution de la nappe dans une région faisant partie de la steppe.

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. (**Boudiaf et Kamal H 2019; Ben Slimane et Rahmoune 2008**)

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. Nous nous sommes basés sur la méthodologie suivante:

- Dans le premier chapitre nous aborderons une présentation générale de la région de Djelfa.
- Dans le deuxième chapitre une étude Hydroclimatologique et calcul du bilan hydrologique pour la période considérée (1975-2014).
- Dans le troisième chapitre comportant la géologie régionale et locale de la région d'étude ainsi que l'hydrogéologie de notre nappe en donnant une idée sur sa piézométrie. Une étude hydrogéologique qui portera sur:
 - L'établissement et l'interprétation des coupes hydrogéologiques;
 - L'établissement et l'interprétation de la carte piézométrique, ainsi que la carte d'iso-profondeur ;
- Dans le quatrième chapitre nous préciserons les faciès chimiques des eaux, leur évolution dans l'espace et la qualité chimique des eaux.
- 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. Et en fin une conclusion générale.

Chapitre I

Situation géographique et
géomorphologique de
la zone d'étude

I. A/ Situation géographique :

La zone d'étude est située dans le territoire de la wilaya de Djelfa, soit à 300 km au Sud de la capitale Alger, entre les coordonnées géographiques 2° et 5° de longitude Est et entre 33° et 35° de latitude Nord (Fig. I-01). La wilaya de Djelfa est limitée :

- ✓ Au Nord par les wilayates de Médéa et de Tissemsilt ;
- ✓ A l'Est par les wilayates de M'sila et de Biskra ;
- ✓ A l'Ouest par les wilayates de Laghouat et de Tiaret ;
- ✓ Au Sud par les wilayates de Ouargla et de Ghardaïa.



Source : ANRH

Figure I- 1 : Position de la région de Djelfa dans le Nord Algérien

Echelle 1/5.000.000

I. A.1- 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 moyenne de 850 m ;
- Les monts de Ouled Naïls, les plaines de Maïaleba et Mouilah à l'Est du chef-lieu avec des altitudes de 900 à 1200 m ; **(Boudiaf et Kamel Hayat 2019)**

I. A.2- Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de la Wilaya de Djelfa est en grande partie endoréique à l'exception de la région de l'extrême Nord de la Wilaya, qui est formé de Oued Ouark et de Oued Touil relié au Cheliff plus au Nord. Ce réseau constitue principalement :

- Au Nord, le bassin versant du Haut Cheliff qui draine les dépressions de la région de Ain Oussera ;
- Au Centre, le bassin fermé des chotts qui collecte, outre les eaux de la dépression, les eaux des plaines de la zone de la dépression des Ouled Nail .
- Au Sud, le bassin de l'Oued Djeddi qui collecte les eaux de ruissellement du versant Sud de l'Atlas Saharien.

I. A.3- Végétation :

Le couvert végétal naturel de la Wilaya est observé essentiellement dans les hautes steppes arides avec des vides entre les touffes de végétation sur des sols généralement maigres en contact direct avec la roche mère. La région de Djelfa fait partie de la steppe d'alfa. Bien que, les forêts occupent les chaînes de montagnes du Sénalba, du Djebel Azreg et du Djebel Boukahil. Elles sont claires et aérées par manque de sous-bois conséquent et l'inexistence de maquis. Les principales espèces forestières sont le pin d'Alep, le chêne vert et le genévrier du Phénicien (arar).

I. A.4- Localisation du Synclinal de Djelfa :

Le Synclinal de Djelfa qui fait l'objet de cette étude occupe la partie centrale de l'Atlas Saharien précisément, aux monts de Ouled Nail. Il s'étend sur 80 Km de long et 25 Km de large. Il est entouré par les massifs: Senalba, Djebel Djellal Gharbi et Djebel Djellal

Chargui. Il est limité entre les coordonnées UTM 500 Km < X < 550 Km et 3815 Km < Y < 3850 Km (Figure I-02).

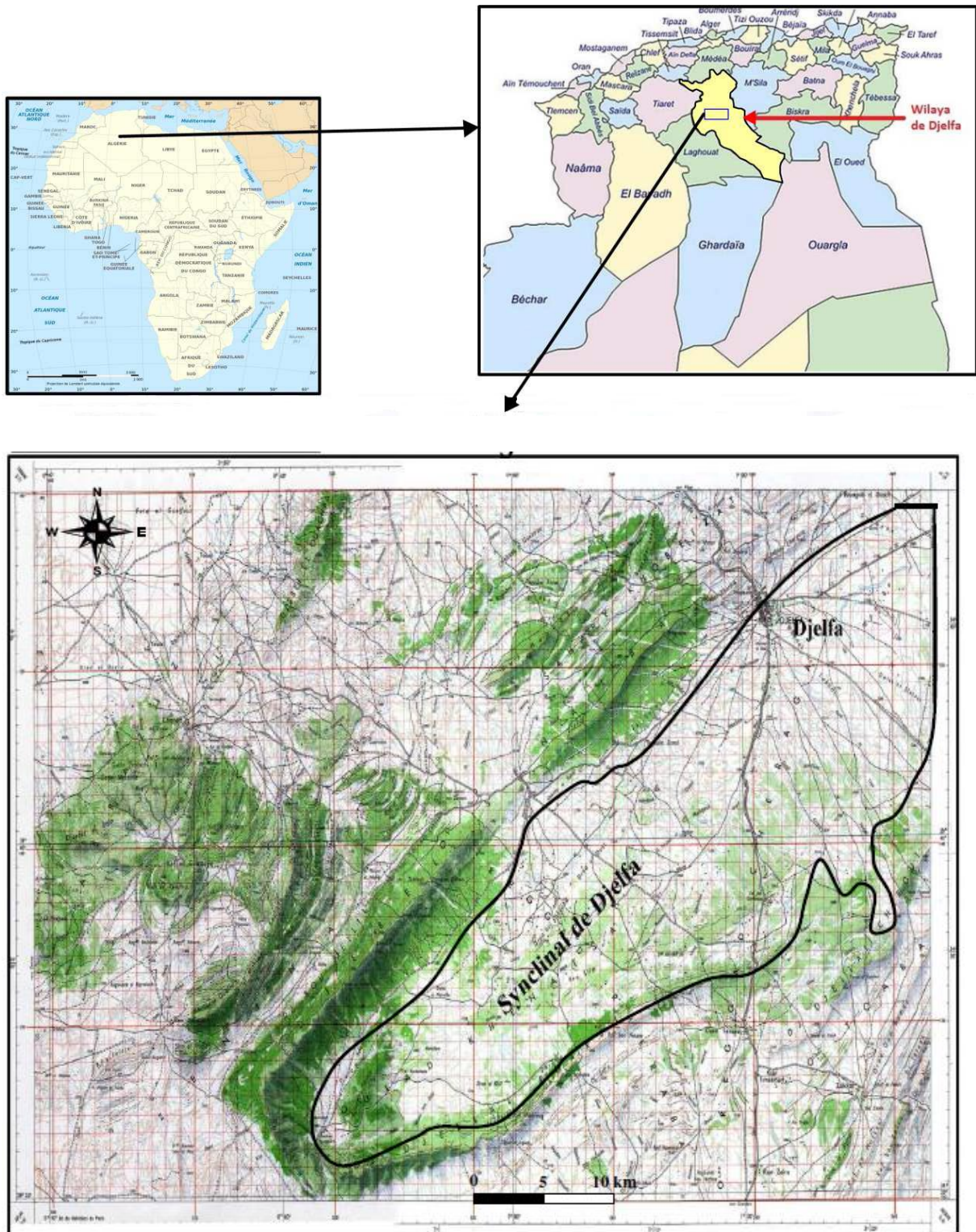


Figure I- 2 : Situation géographique de la région d'étude. (Boudiaf et Kamel Hayat 2019)

I. B/ Aperçu géomorphologique :

La région d'étude appartient principalement au grand bassin des Zahrez (17), plus exactement, dans la partie amont du bassin versant de l'oued Djelfa-Melah codé (17-02), représentée par les monts des Ouled-Naïl. Le périmètre de ce bassin versant est de l'ordre de 183,400 km et sa superficie est de 1310 Km². (Fig. I-03, I-04 et I-05)



Source : ANRH (2001)

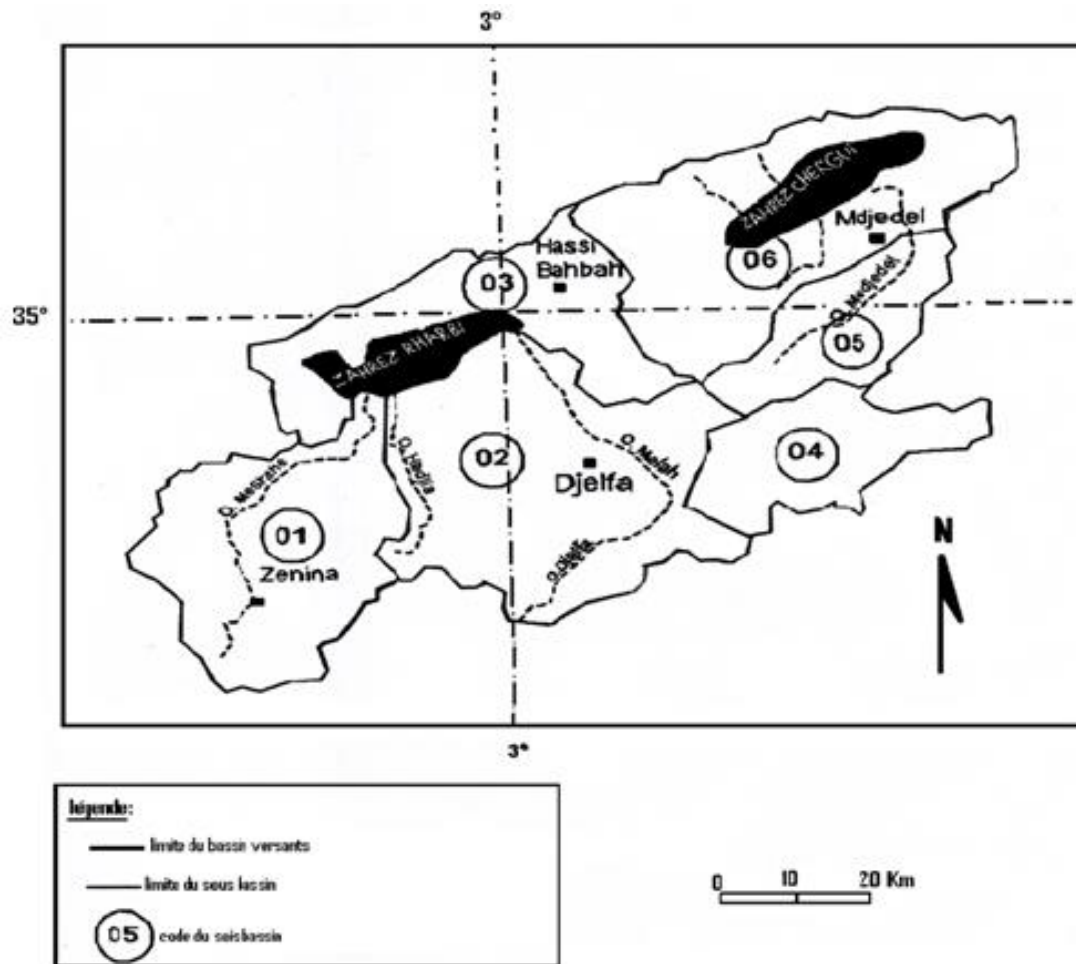
Légende :

— Limite du grand bassin versant

17 Code du bassin versant

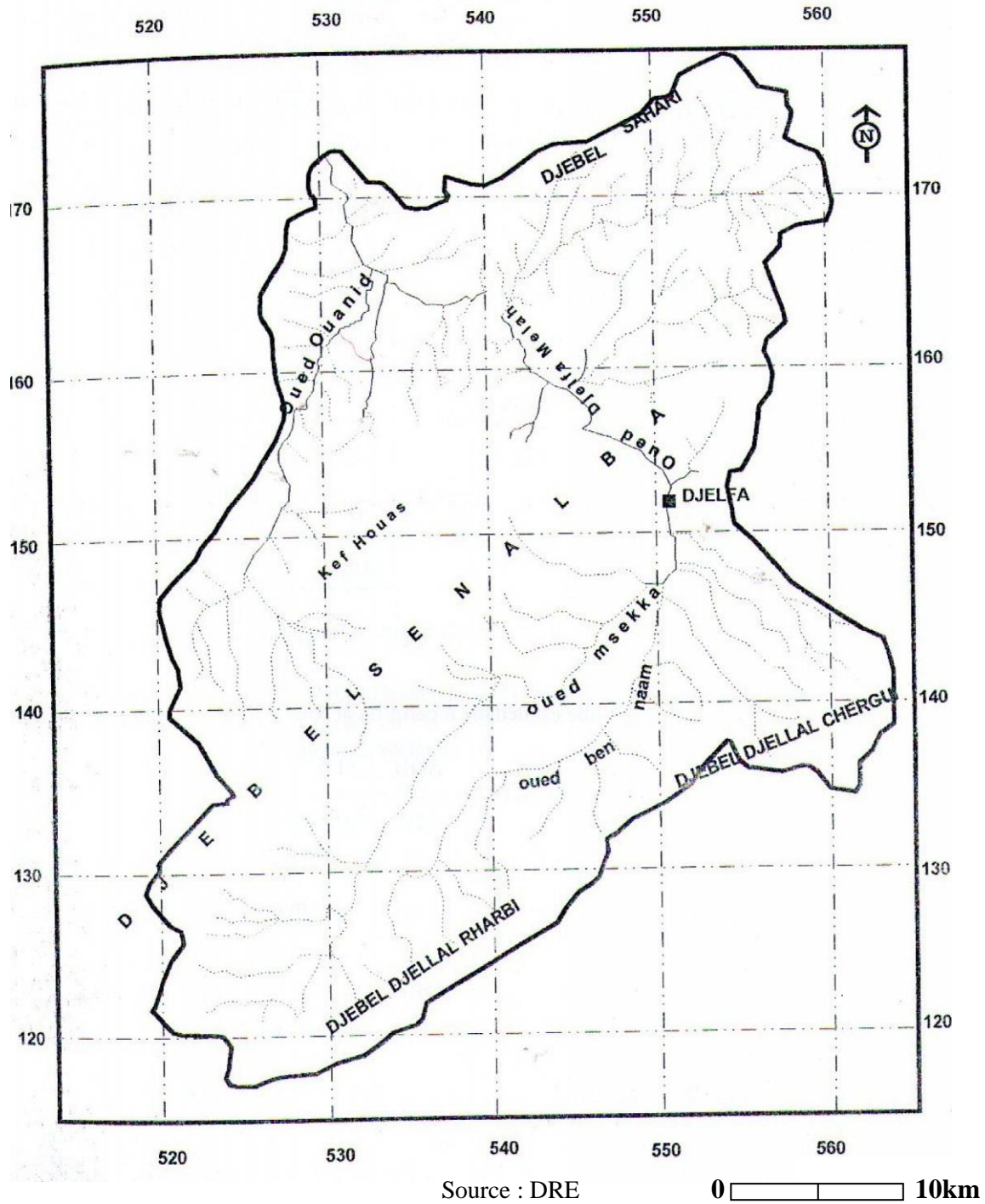
Figure I- 3 : Situation du grand bassin versant des Zahrez (17)

Echelle 1/5.000.000



Source : ANRH

Figure I- 4 : Situation du bassin versant de l'oued Djelfa-Melah (17-02) Dans le grand bassin des Zahrez



Légende :

- Ecoulement pérenne
- Ecoulement temporaire
- Limite du bassin versant

Figure I- 5 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Djelfa-Melah

Conclusion :

La wilaya de Djelfa est située à 300 Km au Sud de la Capitale d'Alger, entre 2° et 5° de longitude Est et entre 33° et 35° de latitude Nord. Elle a une superficie totale de 32.256,35 Km².

Elle est caractérisée par l'existence de larges plaines alternant des crêtes montagneuses linéaires en direction NE.

Comme toute région de la zone steppique, Djelfa est caractérisée par deux vocations essentiellement agricoles et pastorales qui exigent une immensité des pâturages et une disponibilité importante et permanente d'eau.

Le bassin versant de l'oued Djelfa-Melah codé (17-02), se situe dans les monts des Ouled-Nail (Atlas Saharien central), couvrant une superficie de 1310Km².

Il s'inscrit dans un relief très varié, fait de montagnes (Les Djebels Senalba et Sahari au Nord et les deux Djebels Djellal au Sud), ainsi que de dépressions (synclinal de Djelfa et de dépression du Zahrez Rharbi). La végétation est de type steppique des régions semi-arides.

Chapitre II

Contexte hydroclimatologique

Introduction :

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

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

II. 1- Homogénéité des données :

Dans cette étude hydroclimatique, nous avons utilisé les données de la station météorologique de Djelfa (ONM de Djelfa) (Tab II-01). Cette station possède une série d'observations plus de 40 ans et ne présente aucune discontinuité.

Tableau II- 1 : Coordonnées de la station météorologique de Djelfa

Station	Altitude (m)	Coordonnées en UTM		Période d'observation
		X (Km)	Y (Km)	
Djelfa	1180	525.325	3835.183	1975-2014

Avant d'utiliser la station de Djelfa. Il est indispensable de vérifier l'homogénéité des données de base, Une série chronologique est dite homogène si elle présente le caractère aléatoire simple ce qui suppose l'absence de toute organisation à l'intérieur de la série.

Parmi les nombreuses méthodes permettant de vérifier l'homogénéité d'une série de données, c'est la méthode graphique du simple cumul. Après avoir cumulé les valeurs des pluies de la période (1975-2014), nous avons reporté les années en abscisse et les valeurs cumulées de pluies en ordonnée. (Fig. II-01)

Tableau II- 2 : Variation des précipitations au niveau de la station de Djelfa (1975-2014)

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Annulle
Max	96	117	80.5	97.1	117	74	57.1	87	122	74	278	77.8	510
Moy	30.86	27.04	30.42	29.15	35.01	30.46	2.62	29.92	34.49	19.94	17.79	20.44	334.14
Min	0.7	0.7	1	3.5	2	0.3	1	0.4	1.4	1	0.4	0.3	180.5
Ecart Type	25.77	26.13	20.41	18	26.38	20.99	24.14	21.35	26.9	18.25	43.5	18.77	79.89
Coef de variation	0.84	0.97	0.67	0.62	0.75	0.69	0.84	0.71	0.78	0.92	2.45	0.92	0.24

**Figure II- 1** : Courbe de simple cumul des précipitations à la station de Djelfa (1975-2014)

Le tracé de la courbe ne présente pas de rupture brusque, ce qui explique que la série est alors considérée comme homogène.

II. 2- Détermination du type de climat :

Le type du climat d'une zone donnée est déterminé à l'aide de l'indice De Martonne ou de Climagramme d'Emberger, ce qui permet également de comparer les climats d'une région à l'autre.

II. 2.1- Indice de De Martonne :

En 1923, le géographe "De Martonne" a défini l'indice de l'aridité qui est fonction de deux paramètres climatiques : la température et la précipitation selon la formule suivante :

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

Avec :

I : indice de " De Martonne ".

P : précipitation moyenne annuelle, (mm).

T : température moyenne annuelle, (°C).

Suivant les valeurs de (I), De Martonne a établi la classification suivante :

- **I < 5** : climat hyperaride
- **5 < I < 7,5** : climat désertique
- **7,5 < I < 10** : climat steppique
- **10 < I < 20** : climat semi-aride
- **20 < I < 30** : climat tempéré.

Pour notre cas : I= 13,58 pour une Pmoy = 334,14 mm et Tmoy = 14,60 °C.

Donc selon la classification de "De Martonne", la région du synclinal de Djelfa est caractérisée par un climat Semi-aride. (Fig. II-02)

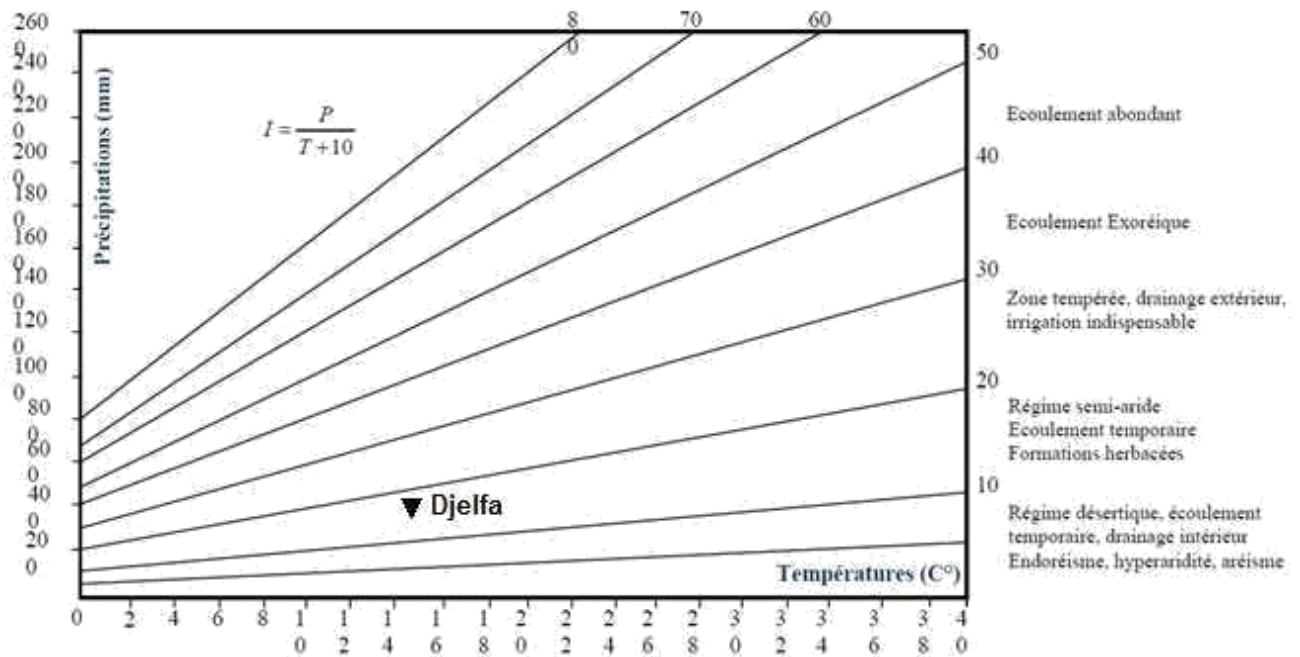


Figure II- 2 : Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne

II. 2.2- Climagramme de Louis Emberger :

Le Climagramme d'Emberger est un abaque comportant en ordonnées les valeurs du quotient pluviométrique d'Emberger (Q2), et en abscisses l'écart des carrés des valeurs des températures moyennes min. et max., où :

$$Q^2 = \frac{2000 p}{M^2 - m^2}$$

Avec :

- **Q2** : quotient pluviométrique d'Emberger ;
- **P** : précipitations moyennes annuelles, (mm) ;
- **M** : moyenne des maxima du mois le plus chaud, (°K) ;
- **m** : moyenne des minima du mois le plus froid, (°K) ;

Pour notre cas :

$$M = 33,70 + 273,15 = 306,85 \text{ °K}$$

$$m = 0,41 + 273,15 = 273,56 \text{ °K}$$

$$P = 334,14 \text{ mm} \quad \text{ce qui donne un } Q_2 = 34,59$$

$$T = \frac{1.78 + 0.41 + 1.551.78 + 0.41 + 1.55}{3} = 1,25 \text{ °c}$$

Le report des données sur le diagramme d'Emberger (figure II-03) a permis de confirmer que le climat de la région du Djelfa est de type semi-aride.

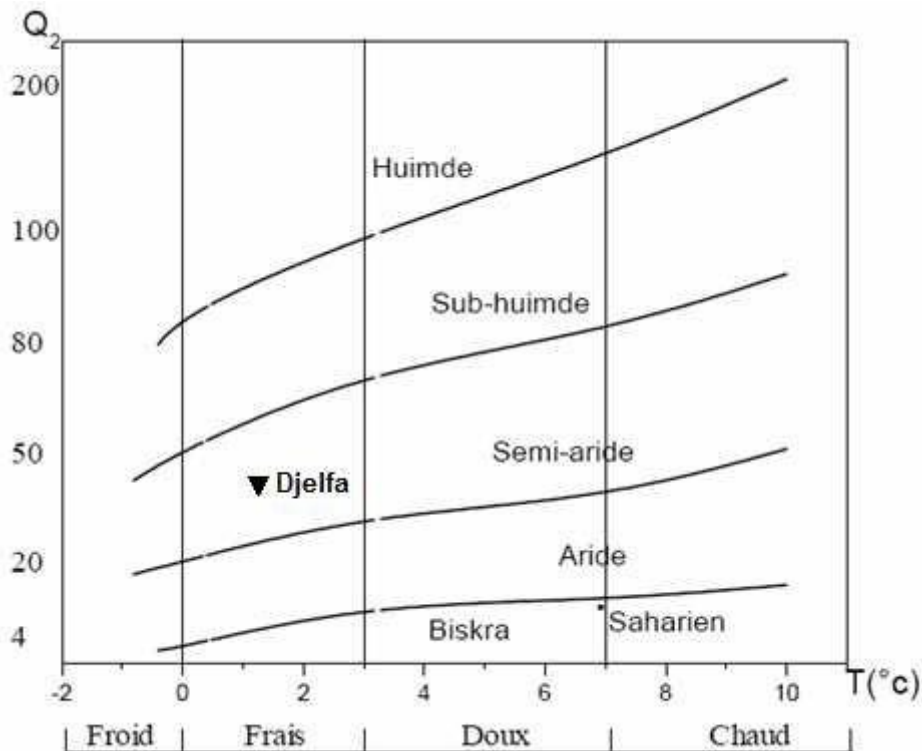


Figure II- 3 : Climagramme d'Emberger

Donc, nous pouvons dire que l'éloignement de la région de Djelfa de la mer (300 km environ) et sa position dans l'Atlas saharien central, lui confère un climat continental semi-aride caractérisé par un hiver relativement humide, très froid avec des précipitations irrégulières, des neiges, et gelée ; un été chaud sec, surtout orageux.

II. 3- Analyse des données climatiques:

II. 3.1- Précipitation:

Les précipitations constituent le phénomène physique qui décrit le transfert d'eau de la phase liquide (pluie) ou solide (neige et grêle) entre l'atmosphère et le sol. En plus de son influence sur les eaux de surface, la précipitation a une influence sur le volume d'eau emmagasinée dans le sous sol.

II. 3.1.1- Variations interannuelles des précipitations :

En analysant la courbe de la figure (II-04), on remarque que les valeurs maximales annuelles de cette période (1975-2014) se sont produites durant les années 1976, 1990, 1991 et 2012 avec respectivement 510 mm, 447,4 mm, 451,5 mm, 502 mm. Cependant, on note que ces valeurs maximales ne dépassent pas le double de la valeur moyenne annuelle (334,14 mm), et les années 1978, 1998 sont les plus sèches avec respectivement 194,8 mm, 180.5 mm.

L'évolution de la pluviométrie annuelle permet de noter une variabilité assez importante d'une année à une autre. Si on subdivise la période (1975-2014) en quatre décennies, on constate que :

- Durant la première décennie (1975-1984), soit sur une période de 10 ans, les précipitations interannuelles en générale sont globalement supérieures à la moyenne annuelle
- La deuxième décennie (1985-1998), est la période la plus pluvieuse, durant laquelle les précipitations sont égales ou supérieure à la moyenne annuelle.
- La troisième décennie (1999-2014), est la plus sèche, durant laquelle les précipitations sont légèrement inférieures à la moyenne annuelle.
- La troisième décennie (1999-2014), est la plus sèche, durant laquelle les précipitations sont légèrement inférieures à la moyenne annuelle.

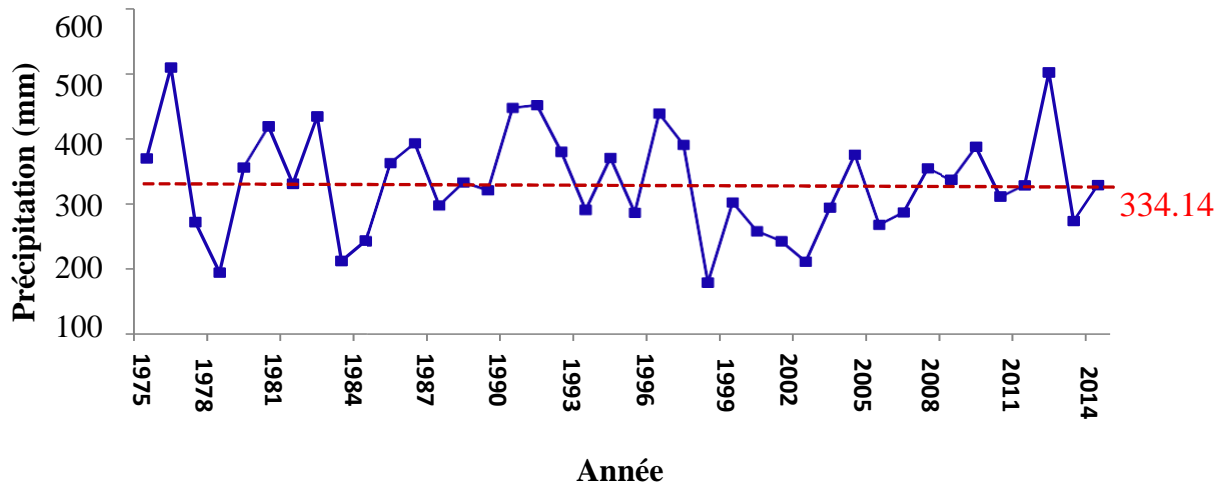


Figure II- 4 : Variations interannuelles des précipitations de la station de Djelfa pour la période (1975-2014).

II. 3.1.2- Variation des précipitations moyennes mensuelles:

L’histogramme de variations des moyennes mensuelles des précipitations (Fig. II-05), sur une période de 40ans (1975-2014), montre que les mois les plus pluvieux sont les mois de Janvier 35,01 mm et de Mai 34,49 mm et le mois le plus sec est Juillet (17,79 mm).

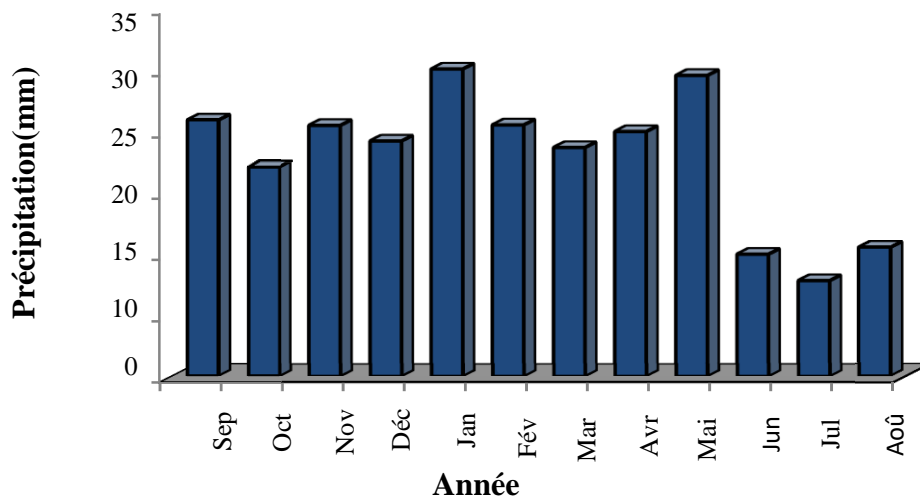


Figure II- 5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Djelfa pour la période (1975-2014).

II. 3.2- Température :

La température est un facteur climatique très important, par ce qu'elle influe sur l'évapotranspiration, le déficit d'écoulement et donc sur le bilan hydrique.

II. 3.2.1- Variation des températures moyennes annuelles :

L'analyse de la variation des températures moyennes annuelles (Fig. II-06), sur une période de 40ans (1975-2014), montre une tendance vers l'augmentation, et l'année la plus chaude est l'année 2001 avec une moyenne de 15.68°C, et l'année la plus froide est l'année 1976 avec une moyenne de 12.22°C, tandis que la valeur moyenne de la température pour cette période d'observation est de 14,60 °C.

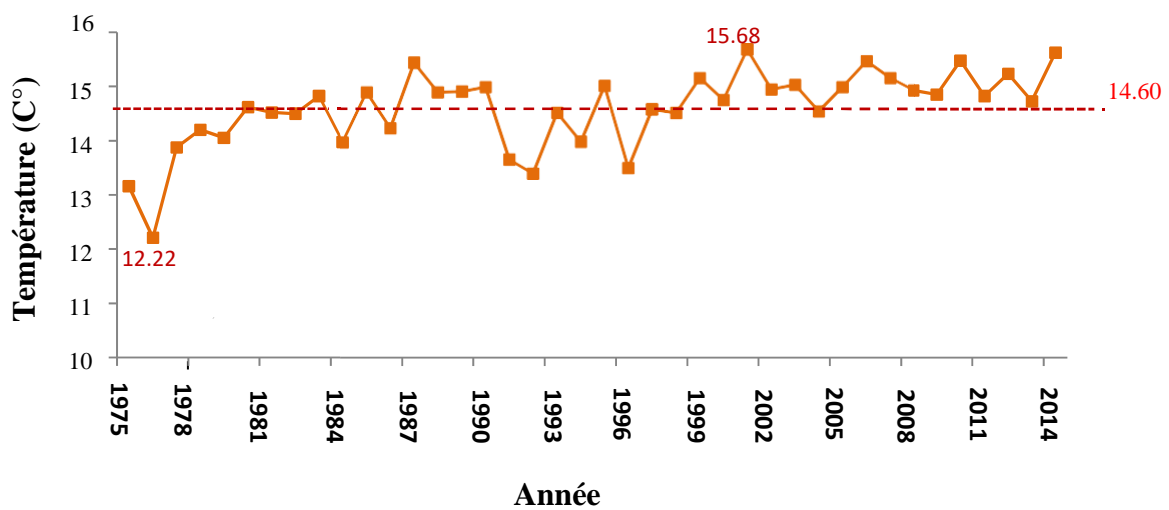


Figure II- 6 : Variation des températures moyennes annuelles de la station de Djelfa (1975-2014)

II. 3.2.2- variation des températures moyennes mensuelles :

L'histogramme de la variation des températures moyennes mensuelles (Fig. II-07), sur une période de 40 ans (1975-2014), montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (Juin- Septembre) avec des températures allant de 20,76 à 26,46°C. Cependant, les valeurs les plus basses sont variées de 4,74 à 9,06°C, et sont observées durant la période hivernale (Décembre – Mars), avec un minimum pendant le mois de janvier (4.74°C).

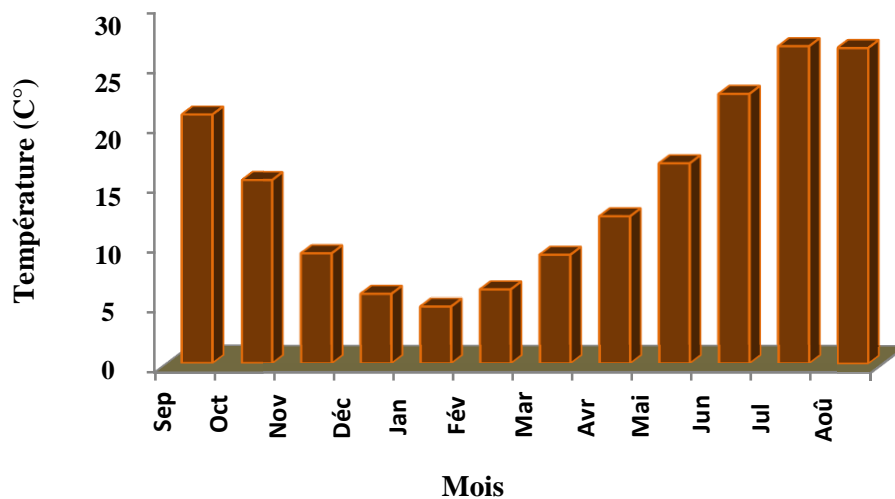


Figure II- 7 : Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Djelfa (1975-2014)

II. 3.3- Diagramme Ombrothermique :

Bagnouls (1953) et Gausсен (1957), considèrent un mois sec, quand le total moyen des précipitations exprimé en (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle du même mois ($P \leq 2T$).

Cette définition permet de tracer une courbe Ombro-thermique sur un graphique dans lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations (Fig. II-08). La surface délimitée entre les deux points de croisement des deux courbes, mesure l'intensité de la saison sèche, la différence des abscisses donne la durée de cette saison.

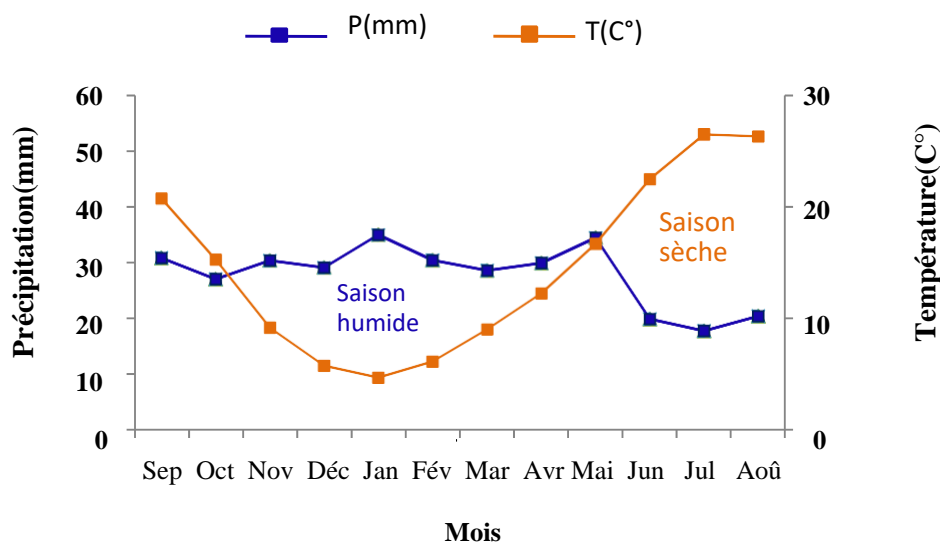


Figure II- 8 : Diagramme Ombro-thermique pour la période (1975-2014) à la station de Djelfa

D'après le diagramme Ombro-thermique, la période sèche s'étale de la moitié du mois de Mai jusqu'à la dernière semaine du mois d'Octobre, avec une durée de cinq mois, tandis que la période humide caractérise le reste des mois de l'année hydrologique.

II. 3.4/ Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte):

Cette méthode est basée sur l'établissement d'un rapport entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles (P/T) d'une même période. Le rapport (P/T) donne la valeur de l'humidité du sol et permet de définir 4 types de régimes :

- $P/T < 1$ Régime très sec.
- $1 < P/T < 2$ Régime sec.
- $2 < P/T < 3$ Régime subhumide.
- $P/T > 3$ Régime humide.

Les valeurs du rapport (P/T) qui montrent le Tableau II-03 permettent de connaître l'évolution de l'humidité du sol dans la région d'étude pour une période entre 1975-2014:

- ✓ Un régime très sec durant les mois de Juin, Juillet et Aout.
- ✓ Un régime sec durant les mois de Septembre et Octobre.
- ✓ Un régime subhumide durant les mois d'Avril et Mai.
- ✓ Un régime humide durant les de mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars.

Tableau II- 3 : Valeurs du rapport P/T pour la période 1975 – 2014

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P moy (mm)	30.86	27.04	30.42	29.15	35.01	30.46	28.62	2.92	34.49	19.94	17.79	20.44
T moy (°C)	20.76	15.29	9.18	5.8	4.74	6.17	9.06	12.27	16.69	22.48	26.46	26.31
P/T	1.49	1.77	3.31	5.03	7.39	4.94	3.16	2.44	2.07	0.89	0.67	0.78

II. 4- Estimation de l'évapotranspiration:

Le paramètre évapotranspiration est d'une grande importance pour les études hydrologique, car il intéresse le bilan hydrologique et ainsi les réserves d'eau souterraine.

L'évapotranspiration résulte de deux phénomènes, l'un physique c'est l'évaporation, et l'autre biologique c'est la transpiration. Donc, l'évapotranspiration joue un rôle primordial dans le cycle de l'eau et elle est fonction des paramètres physiques tels que, la température de l'air et de l'eau, la vitesse du vent et L'ensoleillement.

II. 4.1- Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (exprime la hauteur de la lame d'eau ou la tranche d'eau évaporée) est la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée pendant une période bien définie, en considérant les apports d'eau suffisants. Plusieurs formules ont été proposées par différents auteurs (Blaney et Criddle, Turc (1962), Thornthwaite (1948).....) pour le calcul de l'ETP, mais la formule la plus utilisée par les hydrogéologues dans les climats semi-aride est celle de Thornthwaite.

- **Formule de Thornthwaite :**

L'agronome américain G.W. Thornthwaite proposa en 1948 une expression pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle pour une durée théorique de 12.00H en tenant compte seulement de la Température mensuelle. Le développement de cette expression donne la formule suivante:

$$\mathbf{ETP=16. (10/I)^a.t^a}$$

Avec :

$$I = \sum i \quad \text{où} \quad i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

$$a = \left(\frac{1,6}{100}\right)I + 0,5$$

Dans notre cas : $I = 67.23$ et $a = 1.57$

Où :

- ETP : évapotranspiration potentielle non corrigée du mois considéré, en (mm).
- t : température moyenne mensuelle du mois considéré, (C°).
- I : indice thermique annuel, égal à la somme de douze indices mensuels.
- i : indice thermique mensuel.
- a : désigne l'exposant climatique.

Les valeurs obtenues sont corrigées par un coefficient de correction f qui dépend de la latitude du bassin. (Tableau II-04)

Tableau II- 4 : Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite à la station de Djelfa, période (1975-2014)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P (mm)	30.8 6	27.04	30.4 2	29.15	35.0 1	30.4 6	28.62	29.92	34.49	19.94	17.79	20.44	334,14
T(°C)	20.7 6	15.29	9.18	5.8	4.74	6.17	9.06	12.27	16.69	22.48	26.46	26.31	14,60
I	8.63	5.43	2.51	1.25	0.92	1.37	2.46	3.89	6.20	9.74	12.46	12.35	67,23
ETP (mm)	93.9 5	58.13	26.0 9	12.69	9.24	13.9 8	25.56	41.15	66.70	106.4 6	137.50	136.28	727.72
F	1,03	0,97	0,86	0,86	0,87	0,86	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	/
ETP_c (mm)	96.7 7	56.38	22.4 4	10.91	8.04	12.0 3	26.33	44.85	80.04	127.7 5	167.75	158.09	811.36

La valeur obtenue de l'évapotranspiration potentielle annuelle est de 811,36 mm pour un indice thermique annuel de 67,23. Nous notons qu'elle est largement supérieure aux précipitations qui sont de l'ordre de 334,14 mm.

II. 4.2- Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement (De) :

L'évapotranspiration réelle est appelée aussi déficit d'écoulement (De), intègre dans l'ensemble du bassin versant, les évaporations physiques et physiologiques, elles-mêmes influencées par les caractéristiques topographiques (pente des versants, nappes d'eau libres), géologiques (terrains perméables et imperméables, profondeur de la nappe phréatique) et la couverture végétale de celui-ci.

Plusieurs formules sont établies par différents auteurs pour le calcul du déficit d'écoulement annuel moyen en fonction des caractéristiques météorologiques du bassin, parmi ces formules, nous avons:

II. 4.2.1- Formule de L. Turc (1954) : qui s'écrit de la manière suivante :

$$De = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Où :

- $L = 300 + 25t + 0,053$
- T : température moyenne annuelle de l'air en (°C),
- P : précipitation moyenne annuelle en (mm)

Cette formule donne une valeur d'ETR égale à 323,66 mm/an, soit 96,86 % des précipitations.

II. 4.2.2- Formule de Coutagne : qui s'écrit de la manière suivante :

$$De = P - \lambda P^2 \quad \text{Avec : } \lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

- P : précipitation moyenne annuelle en (m).

L'application de cette formule est conditionnée par la relation suivante :

$$1/8\lambda < P < 1/2\lambda$$

- Si $P > \frac{1}{2\lambda}$: le déficit est indépendant de P : $De = 0,20 + 0,035t$.
- Si $P < \frac{1}{8\lambda}$: le déficit est égal à la précipitation : $De = P$.
- Dans notre cas, les précipitations (P) sont inférieures à $\frac{1}{8\lambda}$, donc : $De = 334.14$ mm.

II. 4.2.3- Méthode de Wundt :

L'abaque de Wundt modifié par Coutagne (Fig. II-09), permet de déterminer graphiquement l'évapotranspiration réelle en fonction de la température moyenne annuelle (°C) et les précipitations moyennes annuelles (mm).

La valeur obtenue à la station de Djelfa est de 330 mm, soit 98,76% des précipitations.

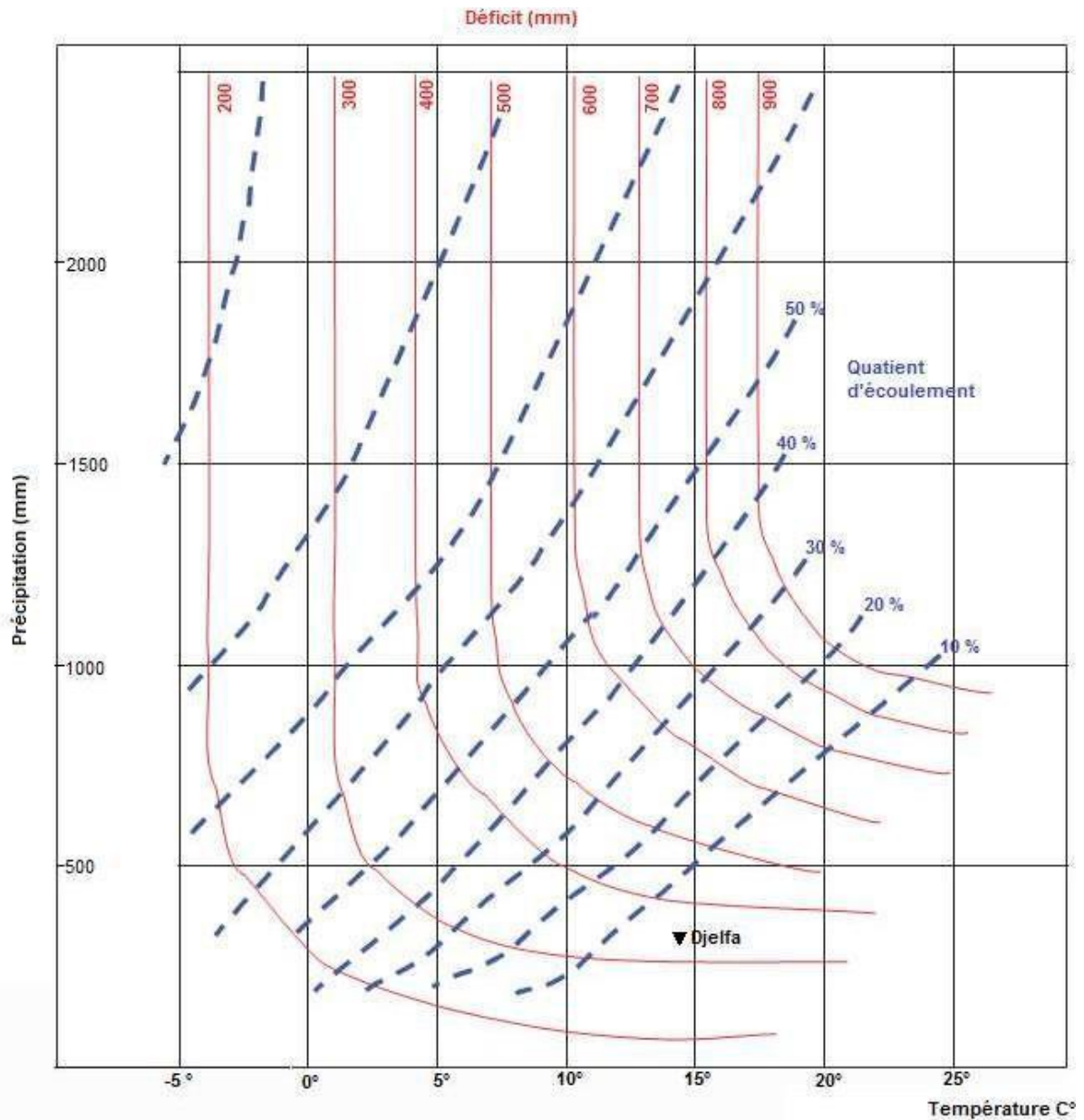


Figure II- 9 : Abaque de Wundt modifié par Coutagne

II. 5- Le bilan hydrologique :

Il est très nécessaire d'établir le bilan hydrologique du bassin versant qui donne des informations sur la relation entre la quantité d'eau précipitée, l'évapotranspiration, le déficit dans le sol et le débit observé au niveau de l'exutoire. La méthode de Thornthwaite permet d'établir un bilan hydrologique mensuel et donne pour chaque mois :

- ✓ L'évapotranspiration réelle (ETR), mm.
- ✓ La réserve facilement utilisable (RFU), mm.
- ✓ Le déficit agricole (Da), mm.

L'excédent (le ruissellement à l'échelle du bassin versant) (EX), mm.

II. 5.1- Calcul de l'ETR selon la formule de Thornthwaite :

Elle consiste à calculer l'évapotranspiration réelle (ETR) mensuelle à partir des précipitations moyennes mensuelles (P), l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la réserve facilement utilisable contenue dans le sol (RFU).

Le principe de raisonnement est le suivant :

- Pour un mois $P \geq ETP$, On pose $ETP = ETR$, la quantité d'eau qui reste ($P - ETR$) va alimenter La RFU jusqu'à son maximum (50 mm) et si elle dépasse cette valeur, il y'aura un excédent (Ex) qui va partir sous forme d'infiltration efficace vers la nappe soit sous forme de ruissellement.
- Pour un mois $P < ETP$, et si $P + RFU(i-1) > ETP \Rightarrow ETR = ETP$

$$\text{Si } P + RFU(i-1) < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU(i-1)$$

- Pour un mois $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$

II.5.2/ Calcul du déficit agricole (Da):

Le déficit agricole est calculé par la formule suivante :

$$Da = ETP_i - (P + RFU(i-1))$$

On commence le calcul du bilan par le mois de Septembre où on considère que la RFU est nulle, pour notre cas, on prend une RFU égale à 50 mm (D'après l'ANRH)

Tableau II- 5 : Bilan hydrologique moyen (1975-2014) à la station de Djelfa, par la méthode de Thornthwaite

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P (mm)	30.86	27.04	30.42	29.15	35.01	30.46	28.62	29.92	34.49	19.94	17.79	20.44	334.14
T(C°)	20.76	15.29	9.18	5.8	4.74	6.17	9.06	12.27	16.69	22.48	26.46	26.31	14.60
ETP (mm)	96.77	56.38	22.44	10.91	8.04	12.03	26.33	44.85	80.04	127.75	167.75	158.09	811.36
P-ETP	- 65.91	- 29.34	7.98	18.24	26.97	18.43	2.29	-14.93	-45.55	-107.81	-149.96	-137.65	
ETR (mm)	30.86	27.04	22.44	10.91	8.04	12.03	26.33	44.85	69.56	19.94	17.79	20.44	310.23
RFU (mm)	0	0	7.98	26.22	50	50	50	35.07	0	0	0	0	
EX (mm)	0	0	0	0	3.19	18.43	2.29	0	0	0	0	0	23.91
Da (mm)	65.91	29.34	0	0	0	0	0	0	9.78	107.81	149.96	137.65	500.45

D'après le tableau II-05 , on constate qu'à partir du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre, la réserve en eau dans le sol est nulle, et des valeurs variables du déficit agricole sont enregistrées. La RFU atteint sa valeur maximale (50 mm) dans les mois de Janvier, Février et Mars, ce qui favorise un ruissellement annuel de 23,91 mm. Les valeurs trouvées du déficit agricole correspondent à une estimation sur les besoins en eau d'irrigation des cultures.

L'observation des différentes courbes (La figure II-10), permet de faire les constatations suivantes :

- Le surplus d'eau commence du mois de Novembre jusqu'au mois de Mars, c'est une période dans laquelle l'ETR est inférieure aux précipitations. Cette diminution de l'ETR est causée par les faibles températures observées dans cette période (période froide).
- A partir du mois de Mars jusqu'au Juin, l'ETR est supérieure aux précipitations, c'est la période d'épuisement du stock, correspondre à l'augmentation de l'ETR par rapport aux précipitations. Cette augmentation est causée par l'élévation de la température.

A partir de Juin et jusqu'au Octobre, l'ETR est égale aux précipitations, c'est une période dans laquelle les températures sont élevées et les précipitations sont faibles. Cette période est donc marquée par un déficit agricole (500,45 mm en moyenne annuelle).

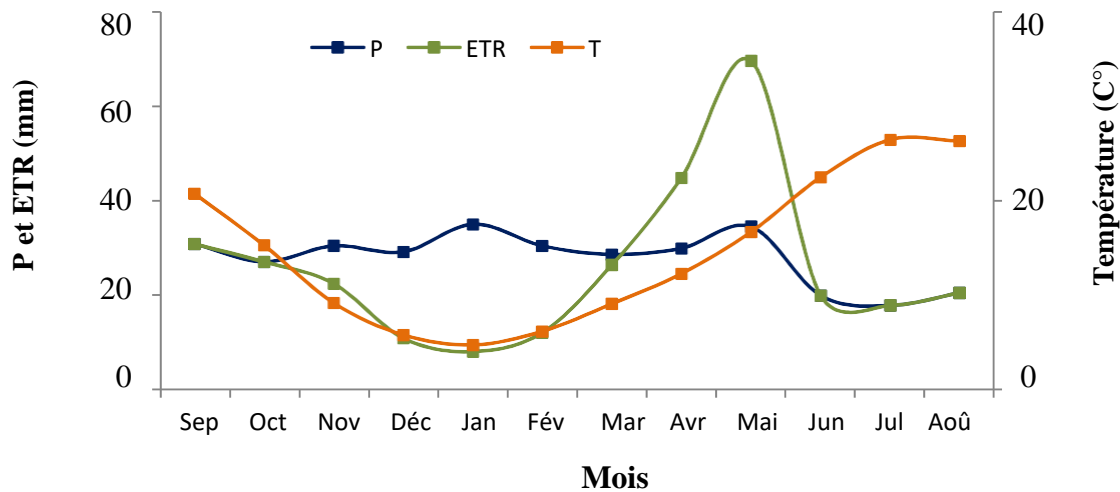


Figure II- 10 : Relation Précipitation-Température-ETR, Pour la période (1975-2014) à la station de Djelfa.

II. 5.3- Détermination du ruissèlement et de l'infiltration :

Il est important de connaître la quantité d'eau ruisselée sur le bassin versant topographique et la quantité d'eau infiltrée dans les aquifères contenues dans ce bassin pour estimer les réserves en eau pour différents besoins.

L'expression générale du bilan hydrique s'écrit comme suit :

$$P = ETR + R + I$$

Où :

P : précipitation moyenne annuelle, mm.

ETR : évapotranspiration réelle moyenne selon le bilan de Thornthwaite , (mm) .

R : ruissèlement, mm I : infiltration, en mm.

➤ Le ruissèlement (R) est calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff :

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

➤ L'infiltration (I) est calculée par la formule suivante :

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

D'après les valeurs de l'ETR et l'ETP calculées par la méthode de Thornthwaite (Tab. II-06), on calcule le ruissellement (R) et l'infiltration (I) :

Tableau II- 6 : Valeurs du (R) et (I) dans la région du synclinal de Djelfa, période (1975-2014)

	P	ETP	ETR	R	I
mm/an	334,14	811,36	310,23	18,89	5.02
%	100	242,82	92,84	5,65	1,50

L'ensemble de la lame d'eau ruisselée et infiltrée est égal à 23,91 mm/an, il représente 7.15 % des précipitations moyennes annuelles tombées sur la région du synclinal de Djelfa, ce qui est extrêmement faible. Ces valeurs obtenues restent à vérifier, en tenant compte de la lithologie du terrain, la topographie, le climat et la végétation qui caractérise la région.

II. 6- Détermination des apports liquides :

Les apports liquides (A) ou les ruissellements superficiels (Rs) des eaux peuvent être estimés par différentes formules empiriques, tel que (la formule Algérienne, la formule de Mallet-Gauthier, et la formule de Turc). Tableau II-07, 08 et 09.

$$A = Le.S.10^{-3}(Hm^3/an)$$

Où :

- **Le** : lame d'eau ruisselée, (mm/an) ;
- **S** : superficie du bassin versant, (Km²)

- **La formule Algérienne :**

$$Le = P(1 - 10^{-kPa^2}) \cdot 10^3 \quad \text{Avec } k = 0,18 - 0,01 \cdot \log S$$

Tableau II- 7 : Valeurs des apports liquides selon la formule Algérienne

$P_a(\text{m})$	k	$Le(\text{mm/an})$	$A(\text{Hm}^3/\text{an})$
0.334	0.15	12.64	28.10

- **Formule de Mallet-Gauthier :**

$$Le = 0,6P(1 - 10^{-0,36Pa^2}) \cdot 10^3$$

Tableau II- 8 : Valeurs des apports liquides selon la formule de Mallet-Gauthier

$P_a(\text{m})$	$Le(\text{mm/an})$	$A(\text{Hm}^3/\text{an})$
0.334	17.72	39.39

- **Formule de Turc :**

$$Le = P_a - \frac{P_a}{\sqrt{(0,9 + \frac{P_a^2}{L^2})}}$$

Avec :

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Où :

- **L** : coefficient de température, (mm) ;
- **T** : température moyenne annuelle, (°C)

Tableau II- 9 : Valeurs des apports liquides selon la formule de Turc

$P_a(\text{mm})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$L(\text{mm})$	$Le(\text{mm}/\text{an})$	$A(\text{Hm}^3/\text{an})$
334.14	14.60	820.61	10.48	23.30

Si nous comparons les résultats des quatre méthodes, nous trouverons que la valeur maximale des apports liquides est donnée par la formule de Mallet-Gauthier (39,39 Hm³/an), alors que la valeur minimale est trouvée par la formule de Turc (23.30 Hm³/an).

Conclusion :

Cette étude Hydroclimatologique effectuée sur le synclinal de Djelfa montre les résultats suivants :

- La région d'étude possède un climat continental de type semi-aride à hiver très froid, et un été chaud et sec.
- Les précipitations durant la période d'étude (1975-2014) sont relativement peu importantes et elles sont de l'ordre de 334,14 mm en moyenne annuelle, et une température moyenne annuelle de 14,60 °C.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR) déterminées par la méthode de Thornthwaite sont respectivement égales à 811,36 mm (242,82 % des précipitations) et 310,23 mm (92,84 % des précipitations).
- Le bilan hydrique de Thornthwaite est dans son ensemble est déficitaire.
- Le ruissellement (R) estimé par la formule de Tixeront-Berkaloff est de 18,43 mm/an, soit 5,52% des précipitations moyennes annuelles. Cette valeur est faible, mais vu la topographie (peu accidentée, mis à part les deux flancs), elle est admissible.
- L'infiltration (I) est estimée de l'équation du bilan de l'eau, elle est de l'ordre de 5,48 mm/an, soit 1,64 % des précipitations, ce qui est extrêmement faible, mais cette valeur d'infiltration ne tient compte ni des neiges, ni de l'infiltration au niveau des cours d'eau (principal et secondaires)

Chapitre III

Cadre géologique et Hydrogéologique.

III. A/ GEOLOGIE :

III. A.1- Cadre géologique régional :

La structure actuelle de l'Algérie du Nord est due aux mouvements orogéniques Hercyniens et Alpains. Ces manifestations tectoniques ont permis l'individualisation de grands ensembles géologiques, tel que l'Atlas saharien central auquel appartient notre secteur d'étude. (Fig. III 01).

III. A.1.1- Domaine de l'Atlas saharien central :

Les monts des Ouled Nail , font partie de l'Atlas saharien central qui est une chaîne de montagne intracratonique, constituée d'un matériel de nature continentale, plissé au cours des phases orogéniques Tertiaires.

III. A.1.2- Stratigraphie de l'Atlas saharien central : (Fig. III -02, III -03 et III -04)

- Jurassique :
Il est constitué par une série épaisse de 4500 m, avec des calcaires dolomitiques et dolomies massives au Lias, d'alternances de marnes et calcaires marneux au Dogger, d'intercalations gréseuses au Bajocien et Bathonien, et en fin une prédominance de grés à la fin du Jurassique (Malm) .
- Crétacé :
Il est surtout gréseux avec quelques rares passées calcaro-marneuses depuis le Portlandien jusqu'à l'Albien (4000 m). Dans notre région, l'Albien se réduit jusqu'à 600m d'épaisseur. Il s'agit d'un régime de sédimentation continentale ou lagunaire.
- Cénomaniens :
Il présente des dépôts évaporitiques alternant avec des passées marneuses à huitres. A l'Est de l'Atlas, les marnes d'une épaisseur de 1000 m caractérisant se dernier.
- Turonien :
Il est constitué par des calcaires en plaquettes bitumineux à la base, des marnes et des corniches de calcaires récifaux à rudistes. Il s'amincit dans le sens Est-Ouest.
- Sénonien :
Il est marqué par des marnes à huitres avec quelques intercalations des calcaires et des faciès conglomératiques dans les aires marginales du bassin de l'Atlas saharien.

- Mio-Plio-Quaternaire :

Il est constitué par des croutes calcaires, des conglomérats, des limons sableux, des lentilles de grès et des marnes rouges.

III. A.1.3- Tectonique de l'Atlas saharien : (fig. III -02 et III -05)

Le matériel du sillon Mésozoïque subsident a été affecté par les phases orogéniques tertiaires donnant naissance à des éléments structuraux typiques qui constituent l'Atlas Saharien :

- Une série d'accidents cassants : failles, décrochements, fentes ...etc
- Des plis coffrés avec des :
 - Synclinaux à fond large et plat.
 - Anticlinaux étroits, allongés et à voûtes plates.

L'Atlas Saharien est délimité par deux grands accidents qui sont la flexure Nord Atlasique et la flexure Sud Atlasique.

- Flexure Nord Atlasique :

Cet accident sépare deux régions qui diffèrent fondamentalement du point de vue tectonique.

La zone des Hauts Plateaux, pays plat qui a réagi rigidement aux sollicitations orogéniques avec comme conséquences, production de failles normales orientées Est- Ouest, induisant des structures en horsts et des grabbens ; et l'Atlas saharien fortement tectonisé.

La Flexure Sud Atlasique, c'est un accident d'une longue ligne, formée de flexures et failles séparant l'Atlas saharien de la plate-forme saharienne sur près de 2000 Km.

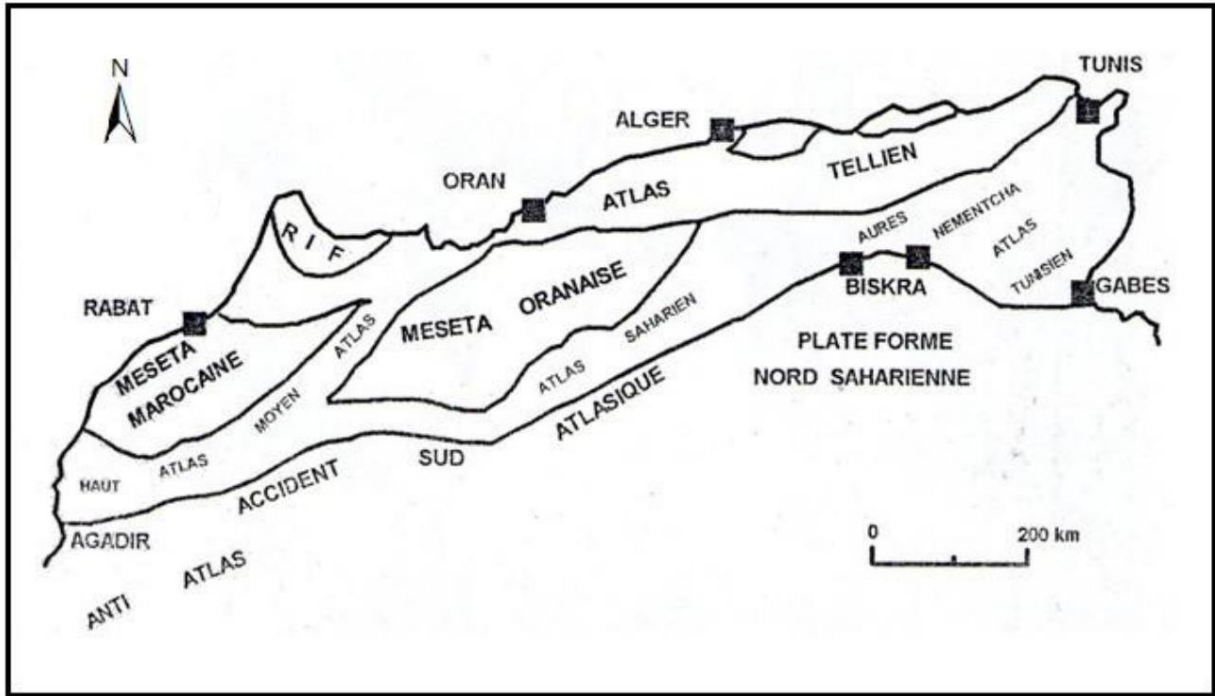
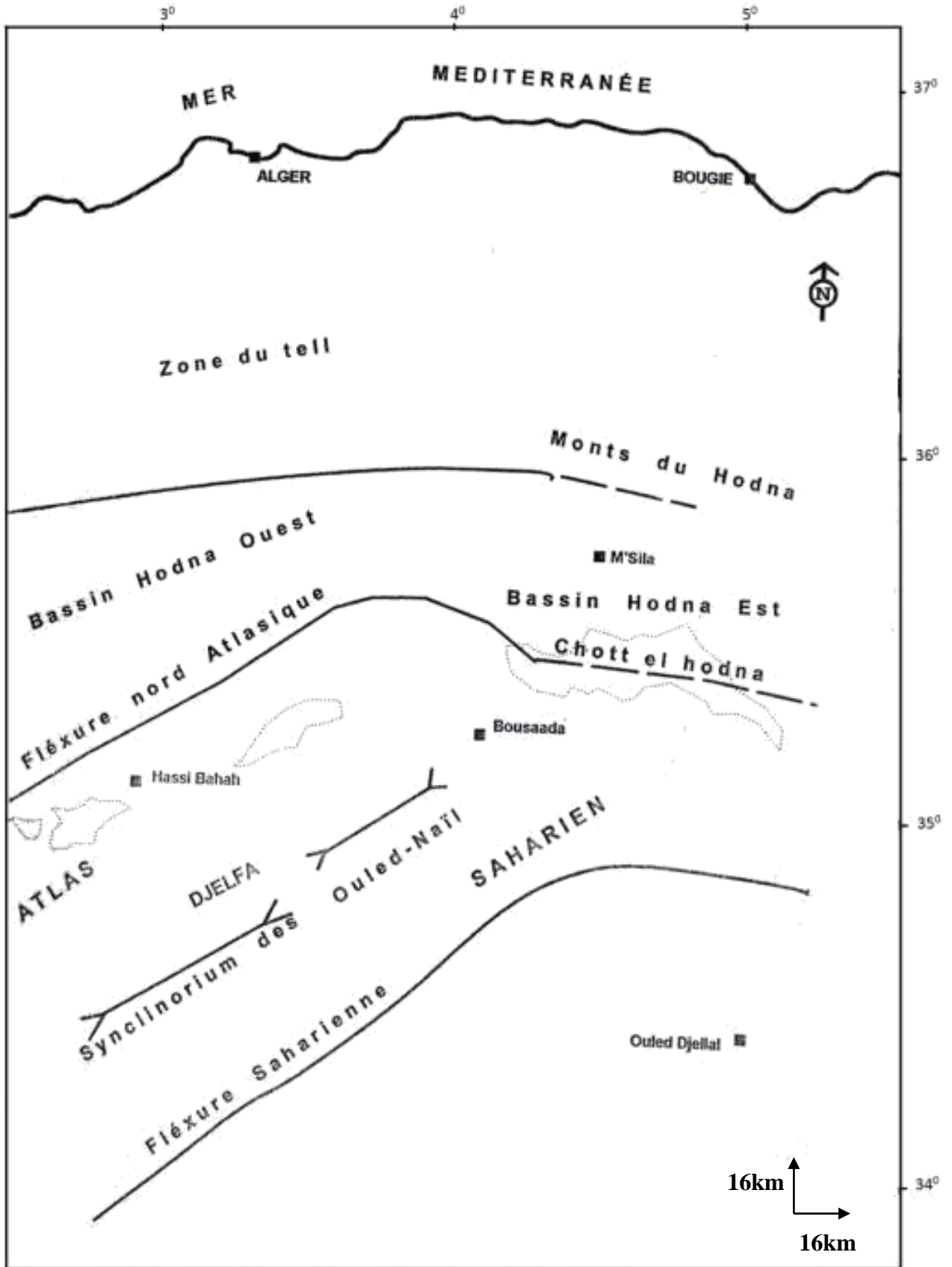
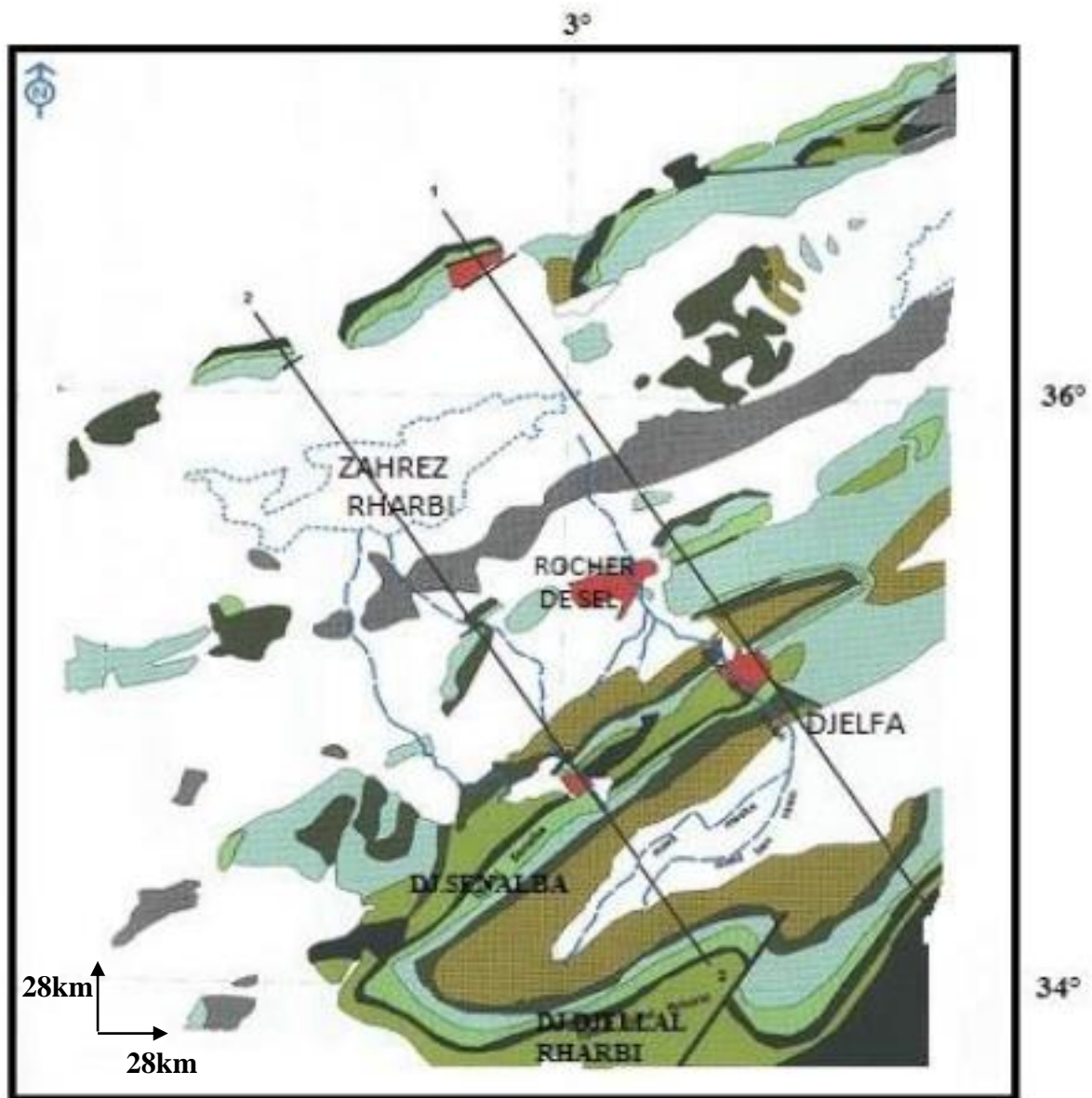


Figure III- 1 : principales unités géologiques de l’Afrique du Nord



Source : ANRH

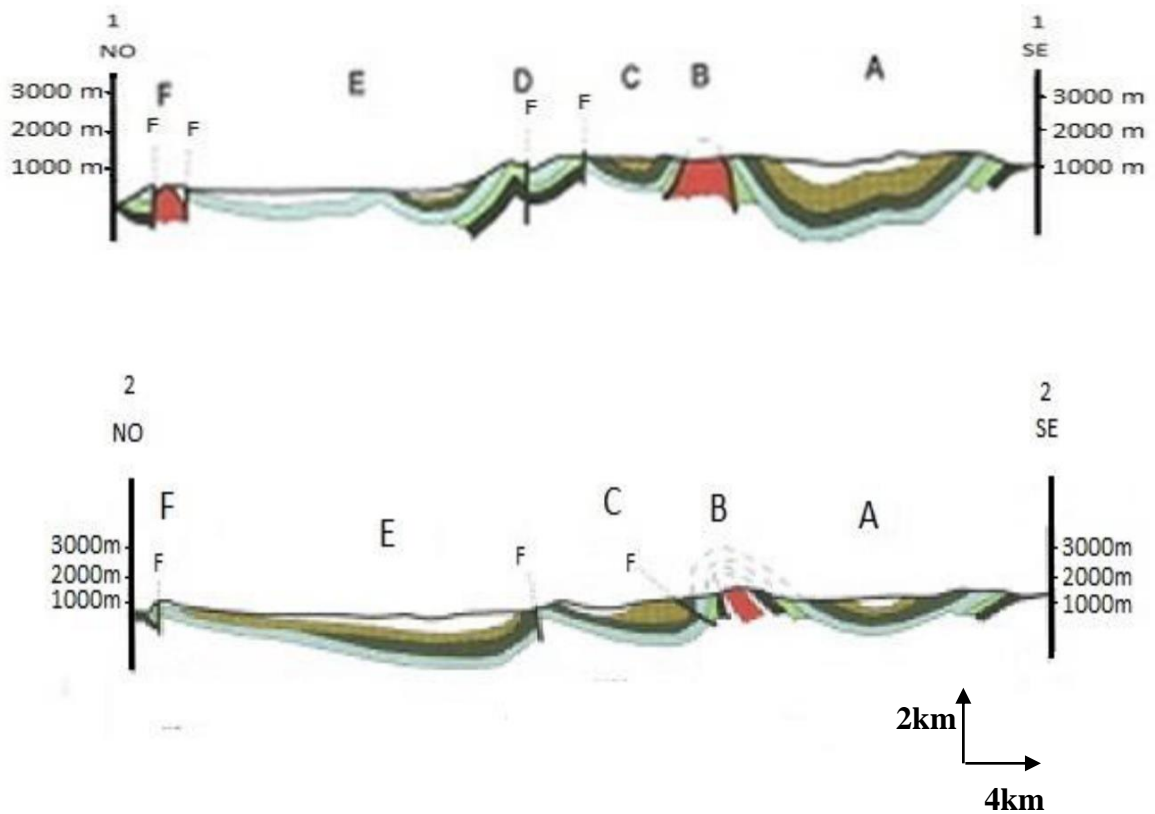
Figure III- 2 : Esquisse structurale de l'Atlas Saharien Central



Légende : Source : ANRH



Figure III- 3 : Monts des Ouled-Nail et bassin des Zahrez carte géologique



Légende :

- Mio-Plio-Quaternaire
Alluvions et carapace calcaire
- Senonien (Marno-calcaire)
- Turonien (calcaire)
- Cenomanien (Marnes, gypses, calcaires)
- Albien (grès)
- Aptien (Marnes et calcaires)
- Barrémien (grès)
- Trias (gypses et évaporites)

A : Synclinal de Djelfa

B : Anticlinal Sud

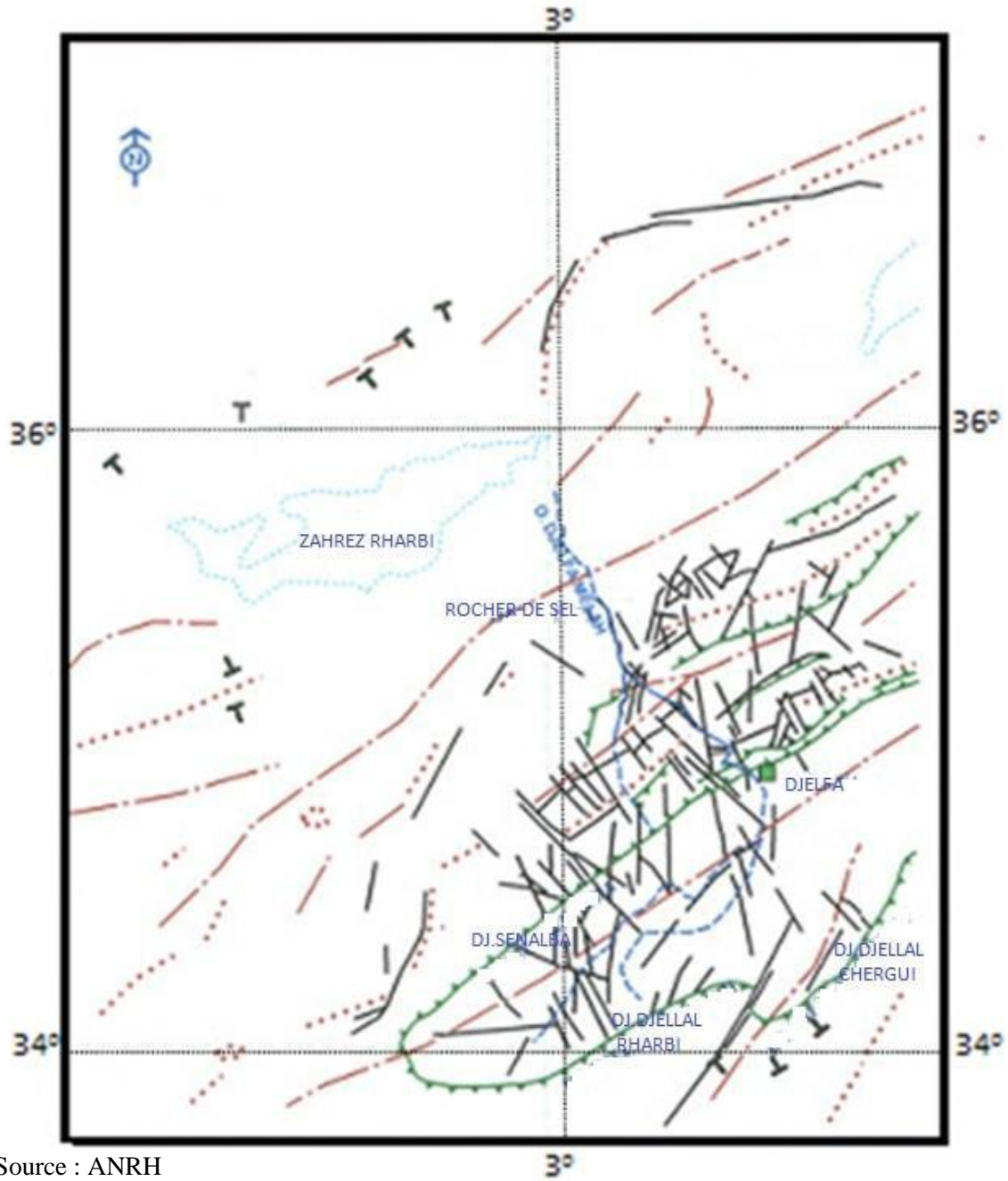
C : Synclinal de Ain Smara

D : Anticlinal Nord

E : Synclinorium des Zahrez

F : Anticlinorium de Sebaa Rous

Figure III- 4 : Coupes géologiques passant par le Synclinal de Djelfa



Source : ANRH

Légende :

- Crête
- Anticlinaux
- Synclinaux
- Pendage
- Alignement de fractures ou de linéaments

Figure III- 5 : Monts des Ouled Nail et bassin des Zahrez Schéma tectonique

III. 2- Cadre géologique local : (fig. III -06)

La dépression intra-montagneuse de Djelfa rentre dans le cadre montagneux Atlasique.

Le synclinal se compose de terrains, d'âge Crétacé, plissés avec au centre un remplissage Mio-Plio-Quaternaire constitué essentiellement de limons, d'argiles, de marnes, de lentilles de grès et de conglomérats.

III. 2.1- Stratigraphie :

Cette description lithostratigraphique est prise à partir de :

- Carte géologique de Djelfa au 1/100.000 ème .(fig. III -06)
- Log stratigraphique synthétique (fig. III -08)
- Coupes géologiques (fig. III -04 et III -07)

La série sédimentaire qui caractérise notre secteur d'étude, comprend de bas en haut, les terrains suivants :

a) Trias :

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

Ce sont des faciès évaporitiques constitués de sel gemme, de gypse lamellaire, d'anhydrite, de marnes bariolées, de grès argileux de couleur lie de vin et de schistes versicolores, avec des inclusions de conglomérats.

Le Trias est sans intérêt hydrogéologique, au contraire, il peut constituer un problème de salinité des eaux.

b) Crétacé :

Il est bien développé dans les régions de Djebel Senalba , Djebel Aissa et Kef Haouas. Il est représenté par des calcaires, des marnes et des grès. Il affleure parfois dans certains endroits du synclinal et parfois atteint par les forages profonds (Guettara F2 & F3 , Hassi Bahbah F2 et Feidh-el-botma F1)

b.1) Néocomien :

Il affleure et forme les reliefs du Kef-Haouas et Djebel Aissa. Il est représenté par des argiles gréseuses, sur lesquelles reposent des bancs décamétriques de calcaires dolomitiques, riches en polypiers diaclases avec des figures de dissolution en surface.

Vers le sommet on trouve des calcaires gréseuses, des calcaires à térébratules et échinidés.

L'ensemble atteint une épaisseur de 800 m formant le substratum imperméable du Barrémien.

b.2) Barrémien :

Constitué de dépôts continentaux où nous y trouvons des alternances de grés et d'argiles gréseuses rouges. Les grés sont durs à stratifications entrecroisées, constitués de grains fins très consolidés. Les diaclases sont fréquentes et conformes à la direction des failles.

Vers la partie sommitale, les bancs de grés sont moins épais (d'ordre métrique), l'épaisseur de cette formation augmente jusqu'à 1500 m à l'Ouest à plus de 2000 m à l'Est. Le Barrémien constitue donc un bon réservoir d'eau

b.3) Aptien :

Il est composé d'une alternance de marnes et de calcaires à orbitolines plus ou moins durs, de couleur beige à patine jaune légèrement verdâtre, et des marnes rouges vertes de faibles épaisseurs.

L'épaisseur de cette formation atteint 200 m à l'Ouest et 100 m à l'Est.

Les marnes sont plus dominantes que les calcaires, impliquant l'imperméabilité de cette formation.

b.4) Albien :

Sa partie inférieure est formée de grés massifs fins de couleur rouge, parfois blanc pâle tacheté de points noirs. Les grés sont intercalés par des passées d'argiles grisâtres. L'épaisseur est de 400 m en moyenne.

Sa partie supérieure est constituée de calcaires et marnes en alternance, avec une épaisseur d'environ 200 m.

Les deux parties présentent un intérêt hydrogéologique.

L'Albien est caractérisé par une perméabilité d'interstice.

b.5) Cénomanién :

Constitué essentiellement des dépôts marins, des marnes vertes jaunâtres à lumachelles avec quelques intercalations de calcaires en petits bancs et de gypses (3 à 4 m d'épaisseur). Il est caractéristique d'une mer peu profonde ou de lagune. Son épaisseur est d'environ 350 m.

La partie sommitale de cette formation, du point de vue hydrogéologique, est intéressante, car elle est constituée essentiellement de calcaires.

b.6) Turonien :

La partie sommitale est composée de bancs de calcaires durs, massifs de couleur crème à gris blanchâtre. Ces bancs sont très diaclasés et fissurés avec des figures de dissolution. Les fissures non concrétionnées sont en communication directe.

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.

Le Turonien est d'une épaisseur totale de 450 m, caractérisé par une perméabilité de fissures.

b.7) Sénonien :

Est représenté par une alternance plus ou moins régulière de marnes, de calcaires dolomitiques, de calcaires blancs diaclasés à incérâmes (de couleur jaunâtre à gris) et de lentilles de gypse qui sont fréquentes dans la partie sommitale.

Du point de vue hydrogéologique, le Sénonien est une formation peu perméable et par conséquent peu productive. Il est d'une épaisseur comprise entre 800 et 1000 mètres

c) Mio-Plio-Quaternaire :**Néogène (Mio-Pliocène) :**

En général remarqué par un faciès conglomératique au niveau de la dépression. Les lentilles de conglomérat d'épaisseur entre 0,50 m à 1 m , alternat tous les 0.5 m avec des limons sableux rosâtres finement lités .

Dans le matériel conglomératique nous y trouvons une prédominance de calcaire Turonien, aux cotés des débris de grès Albien, des marnes bariolées du Trias et des marnes bitumineuses Aptiennes à rognons de silex.

Il existe cependant, en allant vers le centre du synclinal, dans des assises supérieures, de rares intercalations de poudings, ce sont des grosses lentilles de 2 à 5 m d'épaisseur et de longueur pouvant atteindre plus de 30 mètres.

Des figures de courants et de stratifications obliques, sont également représentées au niveau des lentilles conglomératiques ainsi que sur les limons sableux rouges.

Nous avons aussi un certain granoclassement ; les gros galets et blocs sont massés en haut, tandis que la base est gravillonnée.

Tous cela, nous indique des caractéristiques définissant des dépôts de cônes torrentiels ou de chenaux d'oueds, ce qui implique son intérêt hydrogéologique.

▪ Quaternaire :**• Quaternaire ancien :**

Représenté par un premier glaciais, constitué d'une croute très épaisse et très dure presque dépourvue du matériel grossier.

Il existe cependant un deuxième glaciais, 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 .

• Quaternaire moyen (Tensiftien) :

Représenté par le troisième glaciais, 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.

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.

- Quaternaire récent :

Présente trois niveaux différents qui sont :

- Le bas glaciaire en croute :

Il s'étale sur la moitié Nord de la dépression de Djelfa, et n'occupe qu'une place restreinte le long des oueds.

- Lithologiquement il est de type sablo-limoneux, peu consolidé avec un conglomérat constitué de galets anguleux et une matrice limono-argileuse. Son épaisseur varie de 0,5 à 1 m.

- Les basses terrasses :

- La terrasse Soltanienne (majeure) :

La stratigraphie est déposée en un granoclassement décroissant du bas en haut ; on y en présence d'une séquence verticale avec à :

- La base : est constituée de conglomérat épais de 1 à 2 m. Le dépôt est de type alluvionnaires les plus grossiers de tout le Quaternaire. La matrice est sablo graveleuse, peu consolidée.
- La partie moyenne : est constituée de lentilles de sables et de galets dans les quelles s'intercalent de minces passées de blocs.
- La partie haute : les sables sont de couleur ocre-beige, très finement lités, de plus en plus limoneux et carbonaté vers le haut de la séquence. Cette terrasse nous la rencontrons en bordure des oueds principaux du réseau hydrique, quelque fois, formant de vastes cônes de déjection. Elle s'étend de 5 à 6 m en moyenne.

- La terrasse Rharbienne (mineure) :

Elle est située près des principaux oueds et s'emboîte dans les terrasse Soltaniennes .
Son épaisseur est de 2 à 4 m .

La sédimentation est de type granoclassée, elle débute par un dépôt de conglomérat grossier et se termine par un autre sablo-limoneux.

III. 2.2- Tectonique :

La structure géologique actuelle des monts des Ouled-Nail est issue essentiellement des plissements tertiaires.

Les séries Crétacé qui constituent l'ossature de ces monts ont été énergiquement plissées, selon une direction générale SW-NE.

Dans ce qui suit, on s'intéressera particulièrement à la tectonique de notre secteur d'étude, c'est-à-dire, le synclinal de Djelfa .

On le subdivise en deux parties :

- La partie centrale (axiale) de la dépression.
- Les flancs Nord et Sud du synclinal.

III. 2.2.A- La partie centrale (axiale) :

Correspond à une vaste cuvette d'axe SW-NE . Elle est comblée par des dépôts continentaux du Néogène et du Quaternaire discordants sur des séries d'âge Crétacé.

III. 2.2.B- Les flancs Nord et Sud du synclinal :

- **Le flanc Nord** : subdivisé en deux sous ensembles :
 - Un premier sous ensemble , qui constitue une série monoclinale à pendage supérieur à 40° , avec un âge qui varie du Néocomien au Sénonien , ce qui correspond à une zone montagneuse parcourue par un réseau hydrographique orienté SE-NW dont l'oued principal est celui de Djelfa-Melah .
 - Un deuxième sous ensemble, qui constitue une même série que la précédente , à pendage NW , inversé SE formant des plis au niveau du Kef Haouas .

Ces deux sous ensembles sont séparés par un contact tectonique majeur NE-SW conforme à la direction globale du synclinal.

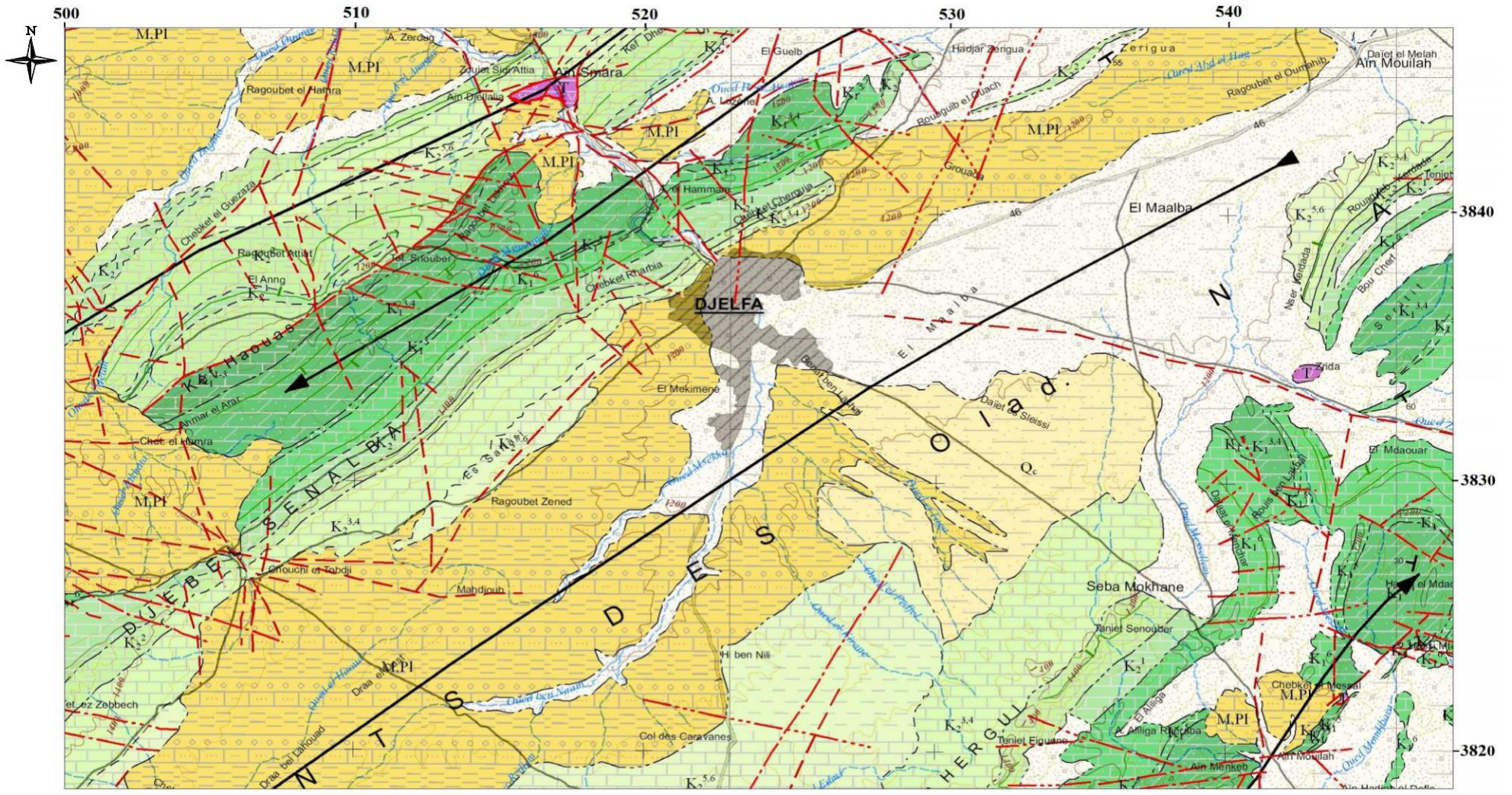
Donc en général, la fracturation prend essentiellement deux directions différentes qui sont :

- Une famille de direction NW-SE prédominante, décrochant et dextre, plurikilométrique ayant joué postérieurement à l'accident majeur. Les rejets sont horizontaux de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

- Une famille de direction N-S , des décrochements senestres , tel celui séparant le Djebel Aissa à Kef Haouas . Avec un réseau de failles disposées souvent en relais , s'amortissant au contact des marnes Cénomaniennes . Notant également, l'existence des fractures orientées NE-SW.
- **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 au niveau de l'Oued Seddour , 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 Rharbi à l'Ouest de la route Djelfa-Laghouat et Djebel Djellal Chergui à l'Est de cette route.









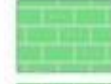

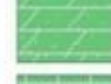




Source : ANRH

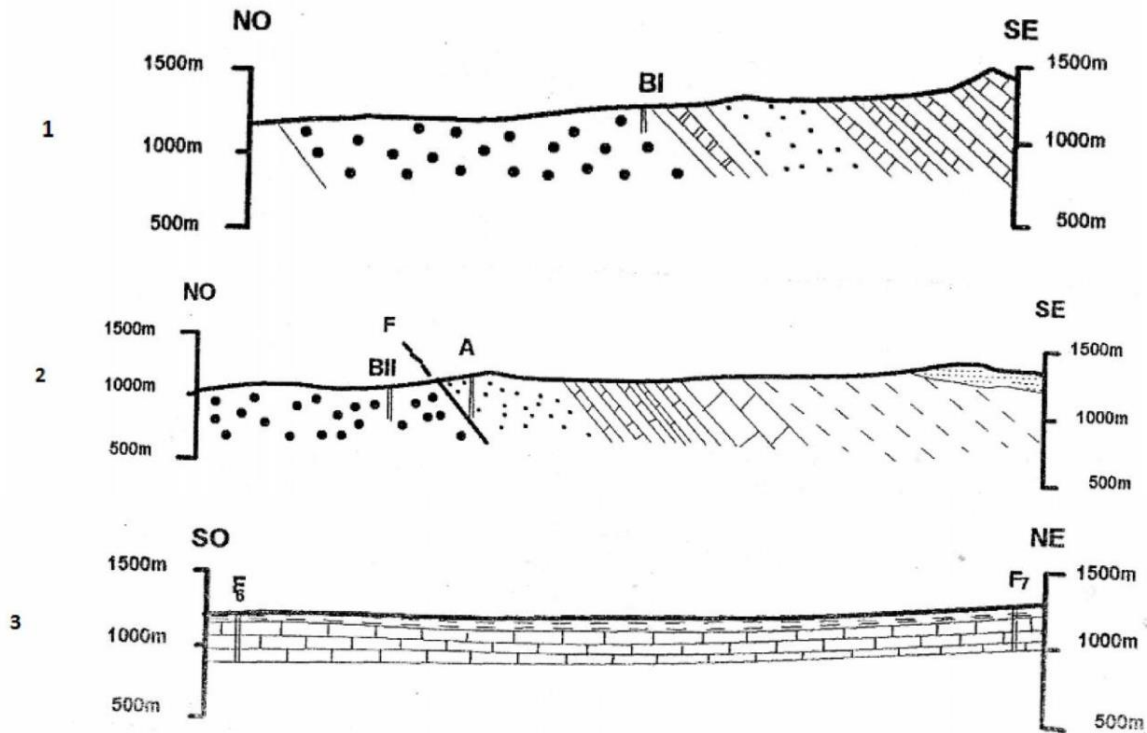
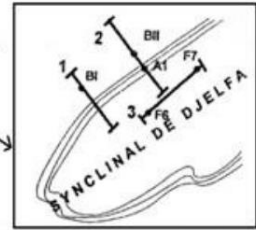
Figure III- 6 : Carte géologique du secteur d'étude

Echelle 1/200 000

Légende :

-  A Quaternaire (Holocène):Alluvions actuelles - sables, graviers, limons et argiles
-  Q_a Quaternaire (Holocène):Alluvions actuelles et récentes par endroit éboulis des pentes
-  Q_d Quaternaire (Holocène):Formations dunaires consolidées, quelques lumachelles, poudingues et grès
-  Q_c Quaternaire:Croûte calcaire - dépôts quaternaires anciens avec surface encroûtée
-  M,Pl Mio-Pliocène:Argiles et conglomérats, calcaires lacustres
-  K₂^{3,4} Crétacé supérieur (Coniacien et Santonien):Calcaires
-  K₂² Crétacé supérieur (Turonien):Calcaires et marnes
-  K₂¹ Crétacé supérieur (Cénomanien):Calcaires jaunes, marnes et gypse et dolomies
-  K₁⁶ Crétacé inférieur (Albien):Grès, calcaires ocres et argiles
-  K₁⁵ Crétacé inférieur (Aptien):Calcaires et grès
-  K₁^{3,4} Crétacé inférieur (Hauterivien-Barrémien):Grès, dolomies et argiles gréseuses
-  K₁¹⁻³ Crétacé inférieur (Berriasien-Hauterivien):Calcaires dolomitisés et marnes
-  T Trias:Gypses, argiles et dolomies noires

Situation des différentes coupes sur la carte géologique du flanc Nord du Synclinal de Djelfa, échelle réduite à 1/250.000



LÉGENDE:

Source : DRE










	Mio-plio-quadernaire (Alluvions et carapace calcaire)		Albien (Grès)
	Senonien (Marno-Calcaire)		Aptien (Marnes et calcaires)
	Turonien (Calcaire)		Barremien (Grès)
	Cenomanien (Marnes, gypses, calcaires)		Neocomien (Argiles gréseuses)
 : faille			

Figure III- 7 : Coupes géologiques du flanc Nord du synclinal de Djelfa

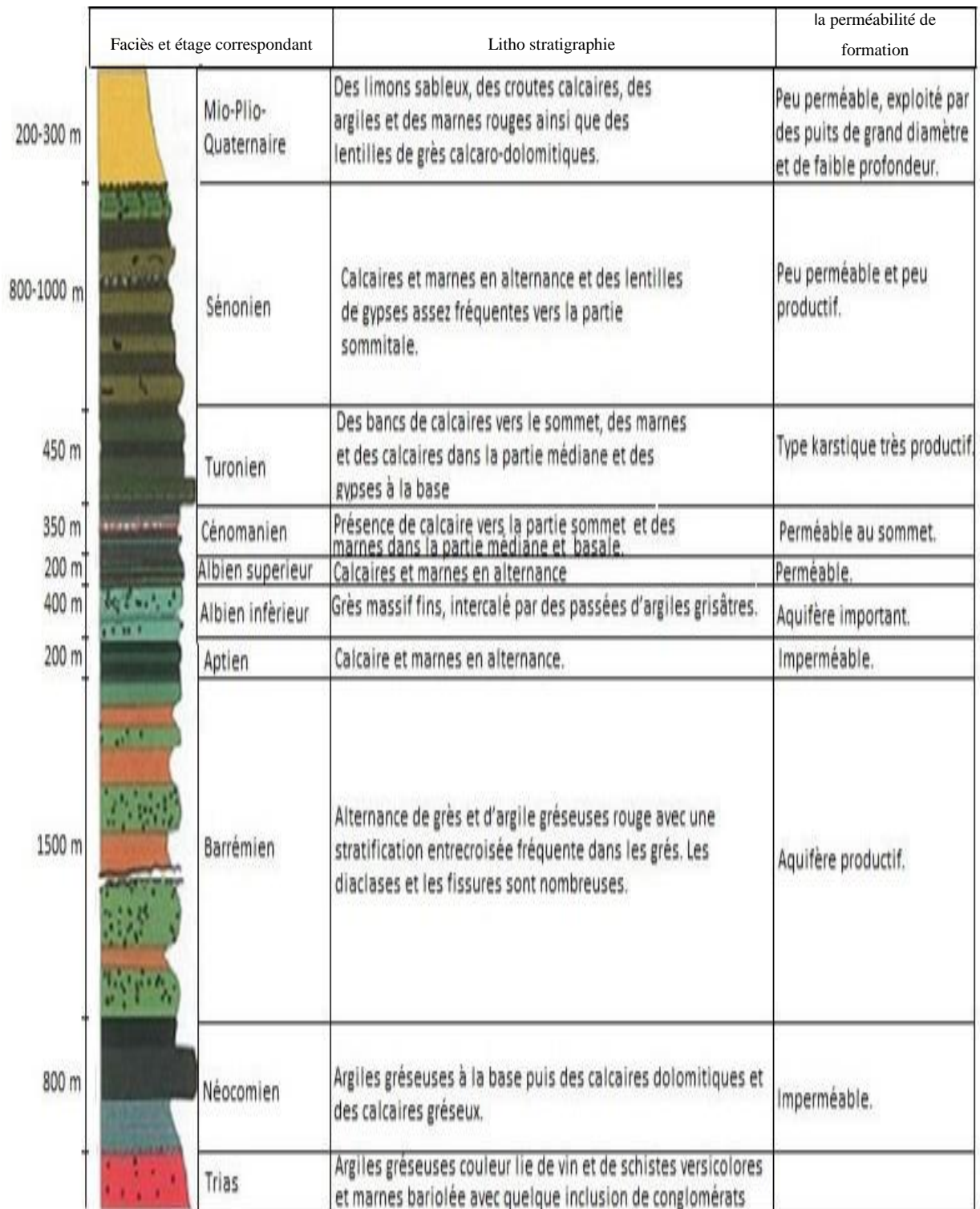


Figure III- 8 : Log stratigraphique synthétique du Synclinal Djelfa

III. B/ HYDROGEOLOGIE :

Introduction :

L'étude hydrogéologique d'une région est nécessaire afin de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques des différents aquifères, de reconnaître les potentialités en eau souterraine et de déterminer les conditions aux limites. L'étude piézométrique a pour objectif est de définir l'allure générale de l'écoulement de la nappe, de tirer des informations sur l'alimentation et de drainage de la nappe, de calculer le gradient hydraulique et l'identifier les zones favorables à l'implantation des ouvrages.

Pour mieux comprendre l'hydrogéologie du synclinal de Djelfa, nous avons établi les points suivants :

- Etablissement et interprétation des coupes hydrogéologiques ;
- Elaboration d'une la carte piézométrique, ainsi que la carte d'iso-profondeur ;
- Interprétation des essais de pompage.

III. B.1- Piézométrie :

III. B.1.1- Mesure piézométrique sur terrain (inventaire des points d'eau) : (fig. III -09)

La piézométrie est la synthèse la plus importante dans une étude hydrogéologique, car elle renseigne sur l'état de la nappe et nous permet de mettre en évidence le lien qu'elle peut avoir avec son environnement.

En effet, dans le cadre de ce travail, une campagne piézométrique en Avril 2015, un grand nombre des points d'eau qui sont en nombre de 64 , tous nivelés et répartis sur la nappe du Mio-Plio-Quaternaire . Mais on a pu utiliser seulement 44 points d'eau (25 puits et 18 forages et un seul piézomètre) pour l'élaboration de la carte piézométrique, a cause de la dispersion plus rapprochée de certains points d'eau qui oblige de choisir quelques uns. Les mesures doivent être effectuées pour les puits et les forges dans les conditions d'équilibres et dans le laps de temps le plus court.

Ces points d'eau sont en général des puits et des forages utilisés pour l'irrigation des aires agricoles.

III. B.1.2- Carte d'iso-profondeur des eaux :(fig. III -10)

La carte d'iso-profondeur des eaux schématise les profondeurs des eaux souterraines et montre leur relation directe avec la morphologie de la surface de l'eau souterraine et particulièrement avec la topographie du secteur d'étude .

On constate que les valeurs les plus petites du profondeur des eaux sont atteintes sur le piémont Sud du Djebel SENALBA, avec une valeur de (4,82 m) au niveau du puits PD5 et une valeur de (5,27 m) au niveau du puits PMS5 , puis elles s'augmentent en allant vers le Sud et également vers l'Est .

Les plus grandes valeurs du profondeur des eaux sont atteintes à l'extrême Est de la région d'étude, avec une valeur de (93,83 m) au niveau du puits FMH5 , et une valeur de (50,17 m) au niveau du puits FMH4 .

On observe qu'en général, la profondeur des eaux augmente du SW vers le NE.

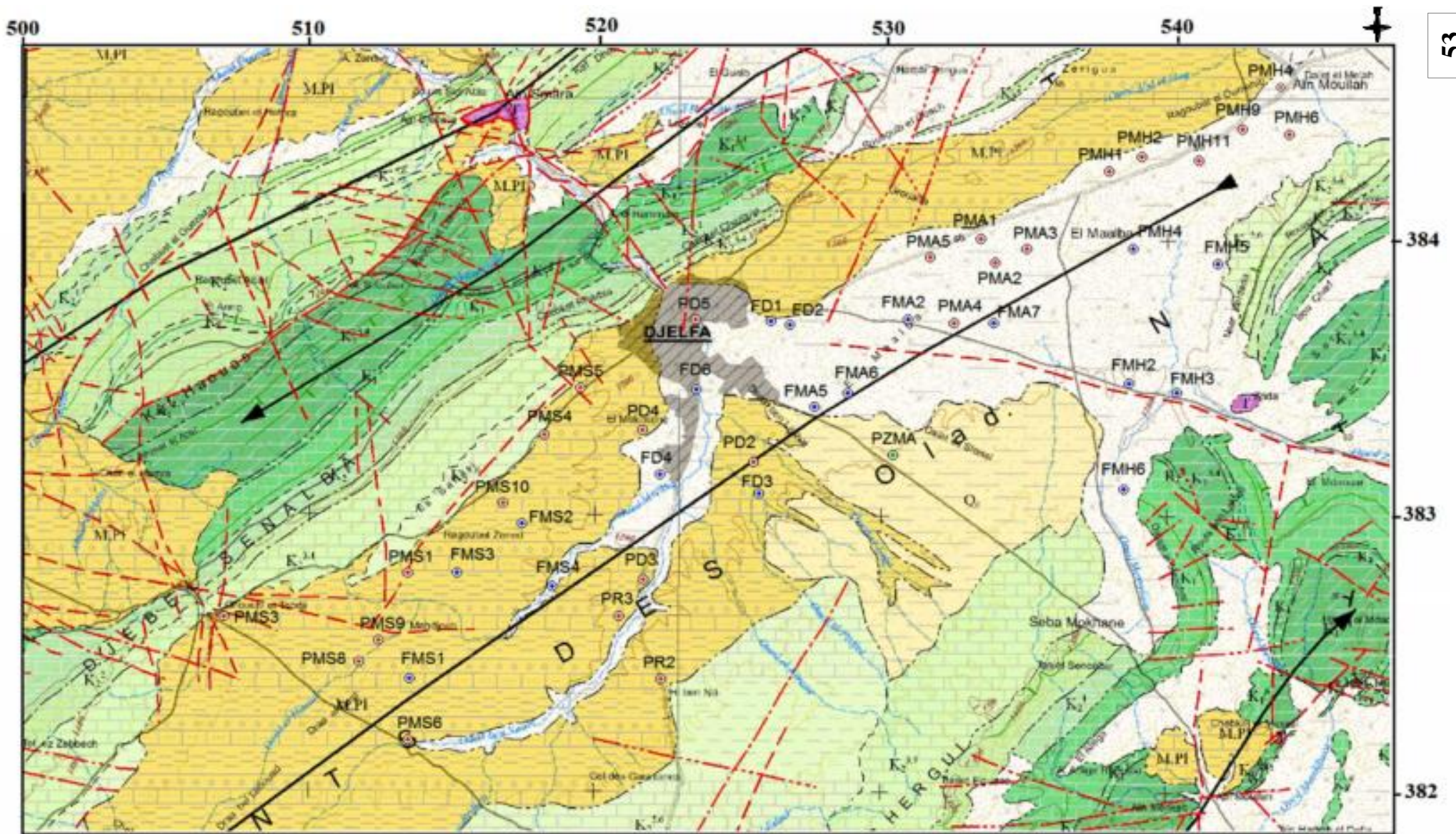
III. B.1.3- Elaboration de la carte piézométrique :

La carte piézométrique du secteur d'étude est l'élément synthétique de la configuration de l'écoulement souterrain dans la nappe superficielle.

Nous avons reporté sur la carte géologique au 1/125.000, les points d'eau nivelés et les cotes piézométriques absolues pour chaque point d'eau

L'équidistance des courbes isopièzes est choisie en fonction du gradient hydraulique, de l'échelle et de la densité des points d'eau (pour notre cas, on a choisi une équidistance de 10m).

Le tracé des courbes piézométriques a été établi en admettant l'existence d'une continuité hydraulique entre les formations Néogènes et Quaternaires.



Traitée par nous-mêmes Les coordonnées sont en UTM (Km)

Figure III- 9 : Carte d'inventaire des points d'eau du synclinal de Djelfa
Echelle 1/125.000

III. B.1.4/ Interprétation de la carte piézométrique :(fig. III -11)

Dans l'ensemble, l'examen de cette carte en fonction de l'allure des courbes isopièzes et la direction des axes d'écoulement permet de distinguer trois zones :

➤ **La zone SW et centre :**

Dans la partie SW, les courbes isopièzes sont espacées, avec un sens d'écoulement du SW vers le NE c'est-à-dire vers les deux oueds (oued M'sekka et oued Ben Naam) . On remarque l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines qui peut être dûe à l'influence des forages . Le gradient hydraulique est relativement moyen , il est de l'ordre de 1% .

Dans la partie centrale , des courbes isopièzes serrées parallèles à la structure géologique , ceci engendre une alimentation de la nappe par les formations Sénoniennes semi perméables du flanc Nord du Synclinal où l'écoulement s'effectue du NW vers le SE . Concernant le gradient hydraulique , il est fort , de l'ordre de 3,5% Donc dans cette zone , les lignes de courant convergent vers l'oued principal Djelfa-Mellah , la nappe est drainée par l'oued .

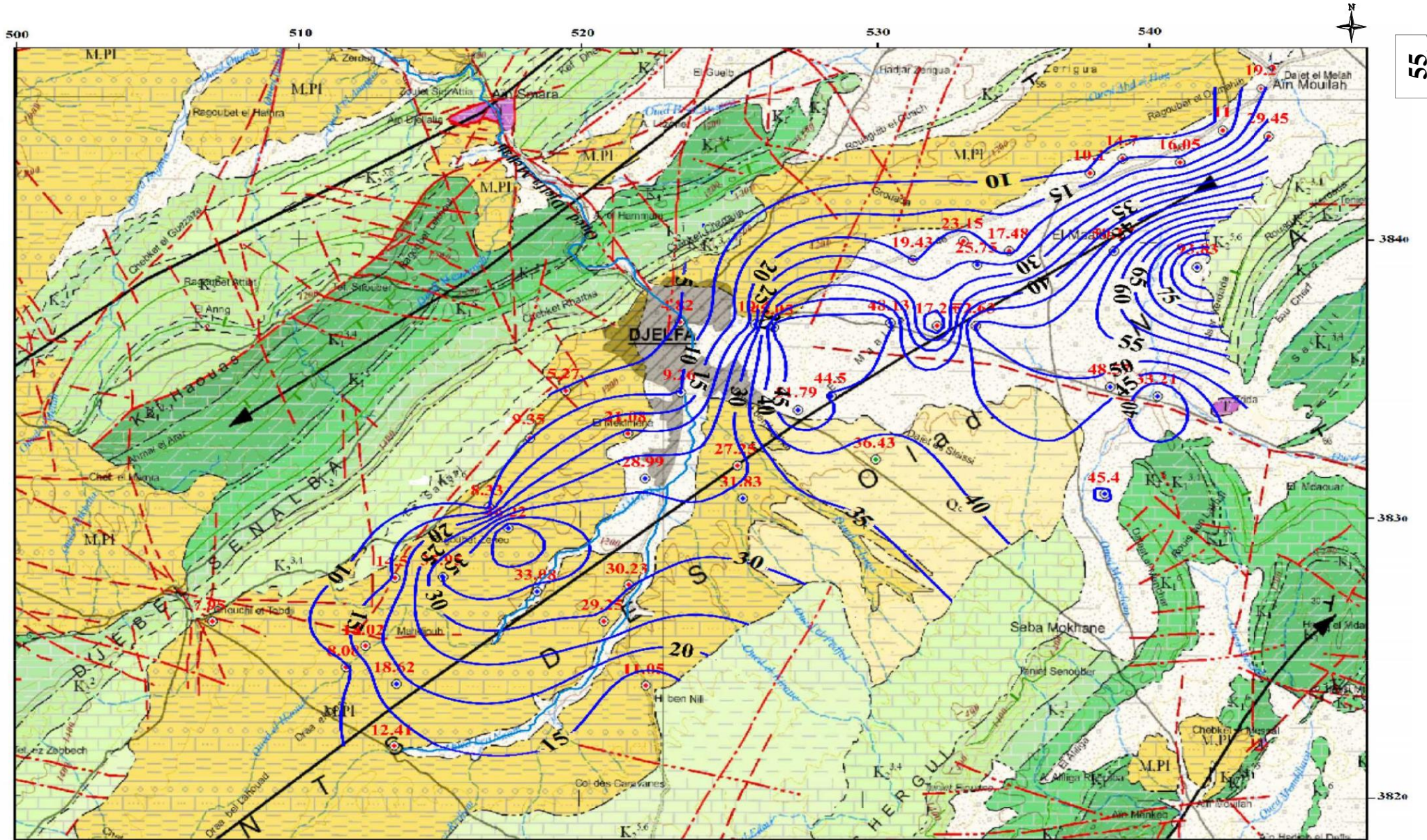
➤ **La zone centre Est :**

Les courbes isopièzes sont espacées et l'écoulement se fait du Sud vers le Nord , vers une zone de dépression qui peut être liée à la surexploitation des forages , avec l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines . Le gradient hydraulique est relativement moyen à faible, il est de l'ordre de 0,5% .

➤ **La zone Est :**

Le sens d'écoulement montre un axe de drainage d'une direction W-E , ce drainage va alimenter les formations calcaires Sénoniennes. Le gradient hydraulique est relativement moyen , il est de l'ordre de 1% .

D'une façon générale, on note que l'écoulement s'effectue suivant l'axe du synclinal , du SW vers le NE (marqué par les oueds actuels au centre Ouest et par des paléo-vallées au Nord Est)



Traitée par nous-mêmes Les coordonnées sont en UTM (Km)

Figure III- 10 : Carte d'iso-profondeur des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa

Echelle 1/125.000

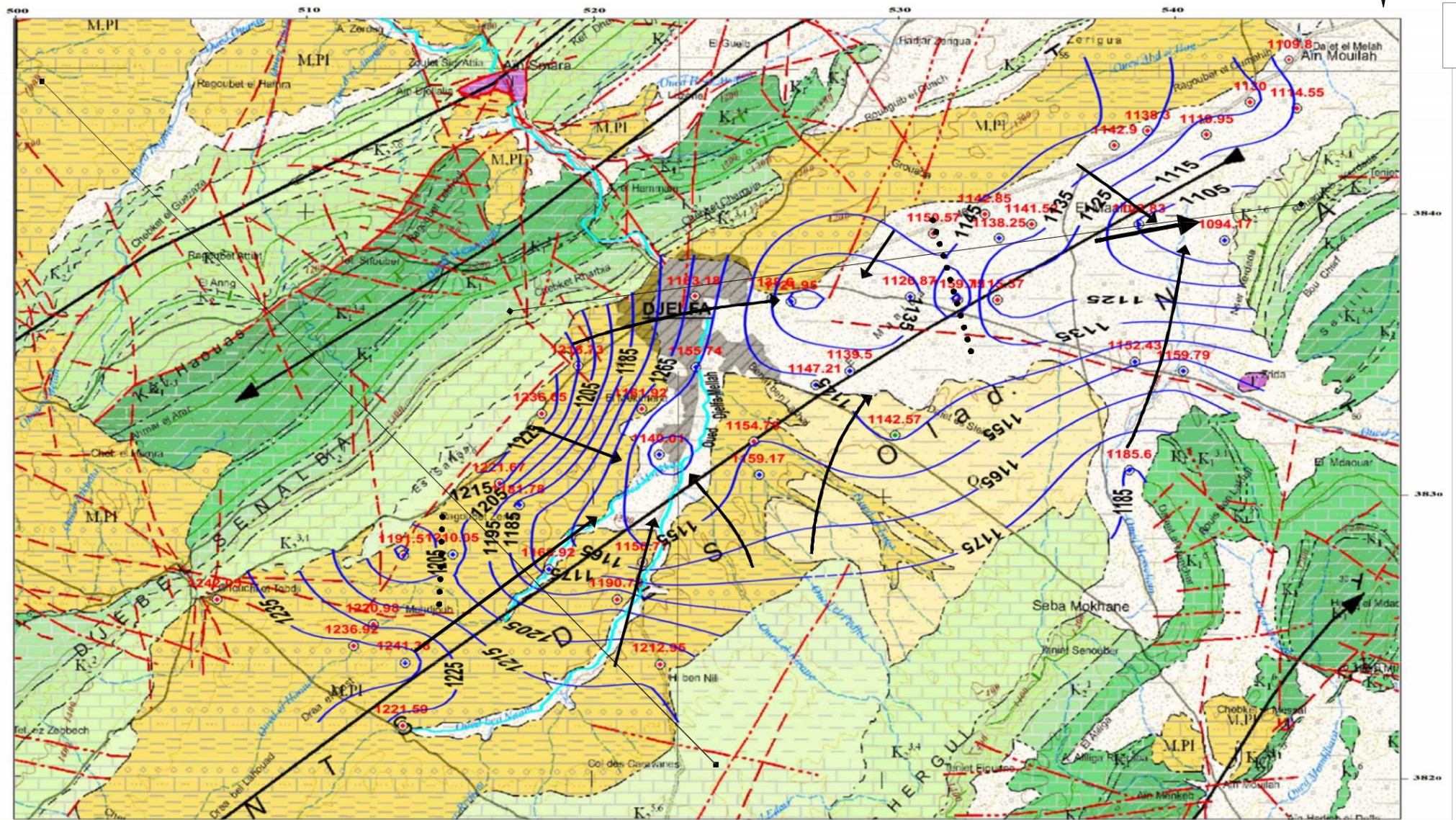
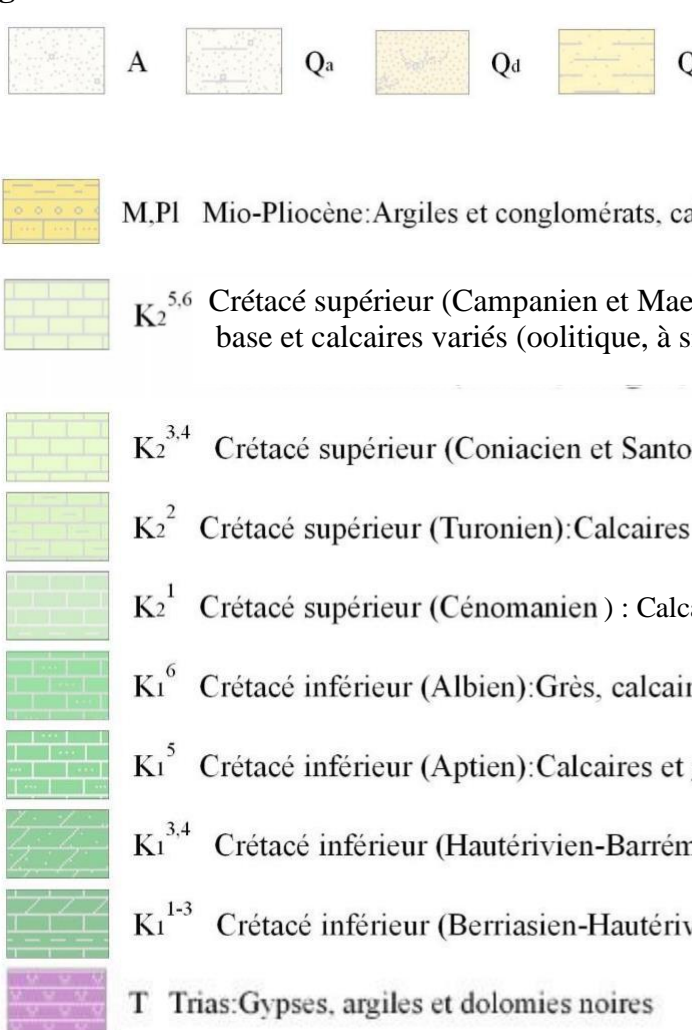


Figure III- 11 : Carte piézométrique de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa

Echelle : 1/ 250 00

Légende :

- 
- Quaternaire :** Alluvions, sables, graviers, Limons, argiles, croûte calcaire.
- M.PI** Mio-Pliocène: Argiles et conglomérats, calcaires lacustres
- K₂^{5,6}** Crétacé supérieur (Campanien et Maestrichtien) : Ensemble marneux à la base et calcaires variés (oolitique, à silex) au sommet
- K₂^{3,4}** Crétacé supérieur (Coniacien et Santonien): Calcaires
- K₂²** Crétacé supérieur (Turonien): Calcaires et marnes
- K₂¹** Crétacé supérieur (Cénomaniens) : Calcaires jaunes, marnes, gypse et dolomies
- K₁⁶** Crétacé inférieur (Albien): Grès, calcaires ocre et argiles
- K₁⁵** Crétacé inférieur (Aptien): Calcaires et grès
- K₁^{3,4}** Crétacé inférieur (Hautérivien-Barrémien): Grès, dolomies et argiles gréseuses
- K₁¹⁻³** Crétacé inférieur (Berriasien-Hautérivien): Calcaires dolomités et marnes
- T** Trias: Gypses, argiles et dolomies noires

Carte piézométrique :

1163,18



PD5 N° du puits et sa cote piézométrique

1140,01



FD4 N° du forage et sa cote piézométrique



Courbe isopièze



Sens d'écoulement

● ● ● ● ● Ligne de partage des eaux souterraines

Carte d'iso-profondeur :

4,82



PD5 N° du puits et sa profondeur en eau

28,99
 ⊙
 FD4

N° du forage et sa profondeur en eau.

10

Courbe iso-profondeur

III B.2- Détermination des paramètres hydrodynamiques (essais de pompage):

Dans le but de déterminer la transmissivité et la perméabilité, nous avons travaillé sur des données brutes des essais de pompage de plusieurs forages de différents aquifères de notre région d'étude. Leur interprétation est basée sur l'analyse des résultats finaux après leur détermination graphique des courbes de remontée et de descente. (Tableau III -01)

Tableau III- 1 : Récapitulatif des paramètres hydrodynamiques de chaque formation aquifère du synclinal de Djelfa

N°	Formation captée (m)	Epaisseur captée (m)	NS (m)	Q (l/s)	Rabat max (m)	Qs 10^{-4} / 2 (m /s)	Courbe de descente		Courbe de remontée	
							T(m ² /s)	K (m/s)	T(m ² /s)	K (m/s)
BII	Barrémien	90	20,21	15	39	3,85	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$	$0,36 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$
F4	Albien	250	104,53	14	19,53	7,17	$17 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$8,83 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-5}$
FM3	Turonien	165	45,80	10	39,23	2,55	$0,46 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$0,78 \cdot 10^{-5}$
Forae 05 Juillt	Mio-Plio-Quaternaire	200	51,22	05	61,48	0,813	-	-	$0,13 \cdot 10^{-3}$	$0,066 \cdot 10^{-5}$

Ou :

N.S : Niveau statique.

Q: débit de pompage en (l/s).

S: rabattements en (m).

T: transmissivité en (m²/s).

- perméabilité, (m/s)

Conclusion :

D'après l'analyse des données hydrogéologiques (coupes hydrogéologiques, carte piézométrique et d'iso-profondeur) , on tire les conclusions suivantes :

- La nappe du Mio-Plio-Quaternaire a une épaisseur moyenne de 250 m va bénéficier de deux sources d'alimentation :
- La première , c'est la précipitation , elle est d'une moyenne annuelle de 335,8 mm , mais d'après l'analyse hydroclimatique , l'infiltration est très faible (4,28 mm/an
- La deuxième source d'alimentation se fait soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration par l'intermédiaire des failles à partir des deux flancs du synclinal (Djebel Senalba au flanc Nord et Djebel Djellal Chergui au flanc Sud) , c'est une source d'alimentation très importante de la nappe , cela apparait clairement dans la carte piézométrique .
- La profondeur des eaux de la nappe augmente du SW vers le NE .
- D'une manière générale , l'écoulement s'effectue suivant l'axe du synclinal , du SW vers le NE .
- Le gradient hydraulique est dans son ensemble moyen à fort , de l'ordre de 0,035 au centre Ouest , au SW il est de l'ordre de 0,01 , alors que dans le centre Est il est de l'ordre de 0,0052 .
- L'existence des cônes de dépression, liés probablement à la surexploitation de la nappe.
- Les exutoires de la nappe sont :
 - L'oued principal Djelfa-Mellah qui constitue un important drain (exutoire) de la nappe.

- L'axe de drainage de direction WE, au niveau de la région de Maalba , avec un écoulement vers les calcaires Sénoniennes (l'extrême Est de la région).
- Les forages et les puits, avec des débits différents suivant l'utilisation.

Pour mieux approcher les caractéristiques hydrodynamiques des formations hydrogéologiques de notre zone d'étude, nous avons exploité les données brutes des essais de pompage recueillis au niveau de la DRE de Djelfa.

Les différentes courbes de descentes et de remontées présentent respectivement pendant les premières minutes de pompage une forte pente traduisant l'effet de capacité de l'ouvrage et le phénomène de post production.

Du point de vue hydrodynamique la formation Albienne est productive, avec des valeurs de transmissivité de l'ordre de $13 \cdot 10^{-3}$ m²/s et une perméabilité d'interstice de l'ordre de $5,17 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Chapitre IV

Etude hydrochimique

Introduction :

Le but de cette étude hydrochimique est la détermination des faciès chimiques des eaux souterraines, de suivre leur évolution et variation spatiale, et l'appréciation de la potabilité de ces eaux et de leur aptitude à l'irrigation. Pour cette étude, nous avons sélectionné 18 points d'eau, bien réparti sur le synclinal (fig. IV-01).

Les données exploitées sont celles de Mai 2013. Elles s'agissent des analyses physico-chimiques que nous avons effectuées au laboratoire d'hydrogéologie de l'université de Constantine dans le cadre de la préparation de l'ingénieur de l'un de nous (Monsieur Brahimi Oussama). Ces analyses ont porté sur les éléments majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-).

Il est à signaler qu'il n'y a pas des moyens pour réaliser une nouvelle campagne de prélèvement, et même il n'y a pas des nouvelles analyses physico-chimiques sur cette nappe du Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa.

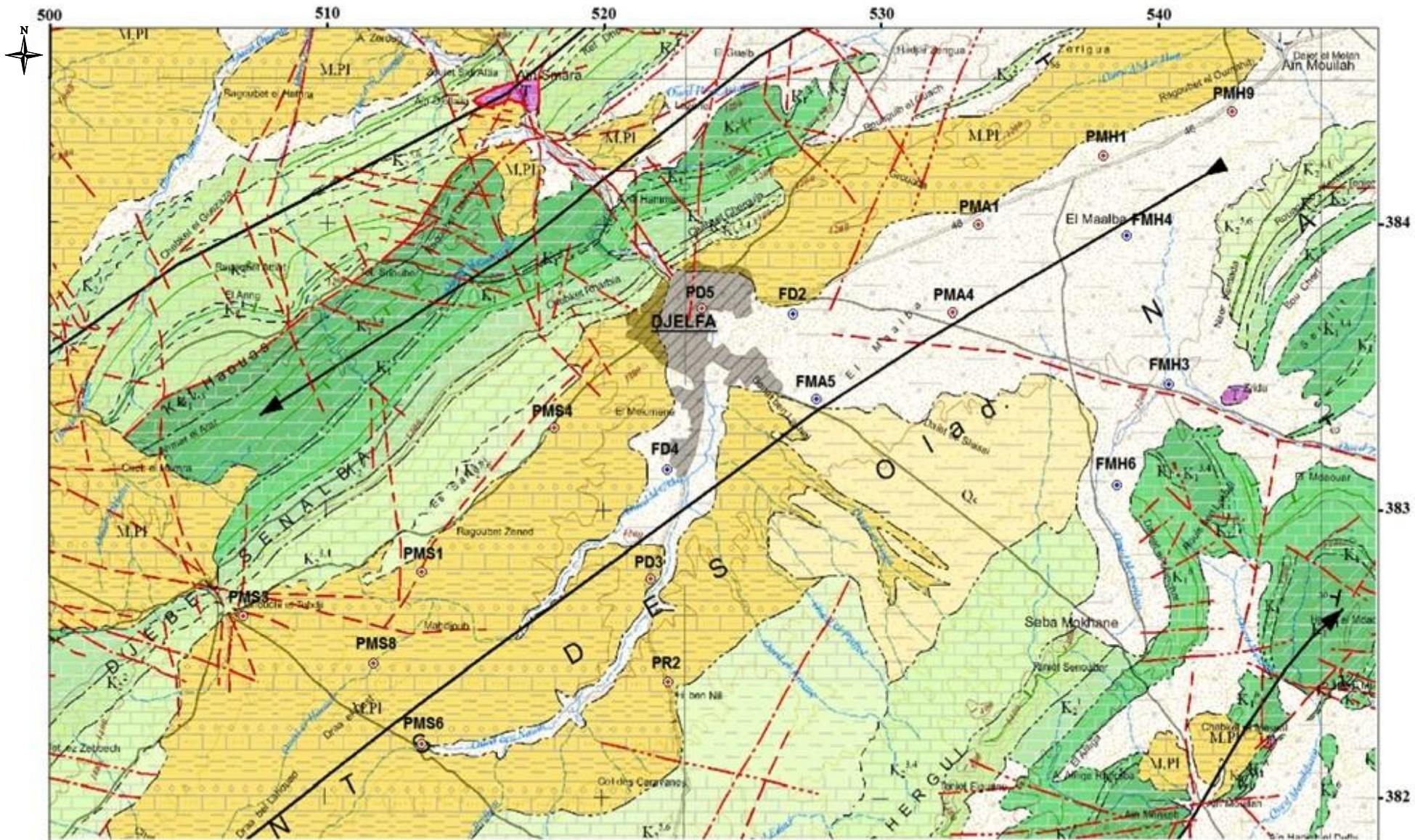
IV .1- Etude des paramètres physiques :**IV .1.1/-Température :**

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz et par conséquent sur la conductibilité. Elle permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, donc sur son origine.

La température des eaux prélevées en Mai 2013, étant variée entre 13 et 18,5 °C, elle ne dépasse pas les normes fixées par l'O.M.S (25 °C), alors que la température de l'air était de l'ordre de 29 °C. Cette variation de température des eaux souterraines peut être due à la variation de la profondeur de la nappe, et l'influence du gradient thermique.

IV .1.2/ Potentiel hydrogène (pH):

Le pH exprime la concentration en ion H^+ d'une solution. C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les valeurs mesurées du pH étaient comprises dans un intervalle de 7 à 8,12. Ces valeurs indiquent que les eaux sont légèrement basique, mais elles sont dans les normes Algériennes et de l'OMS.

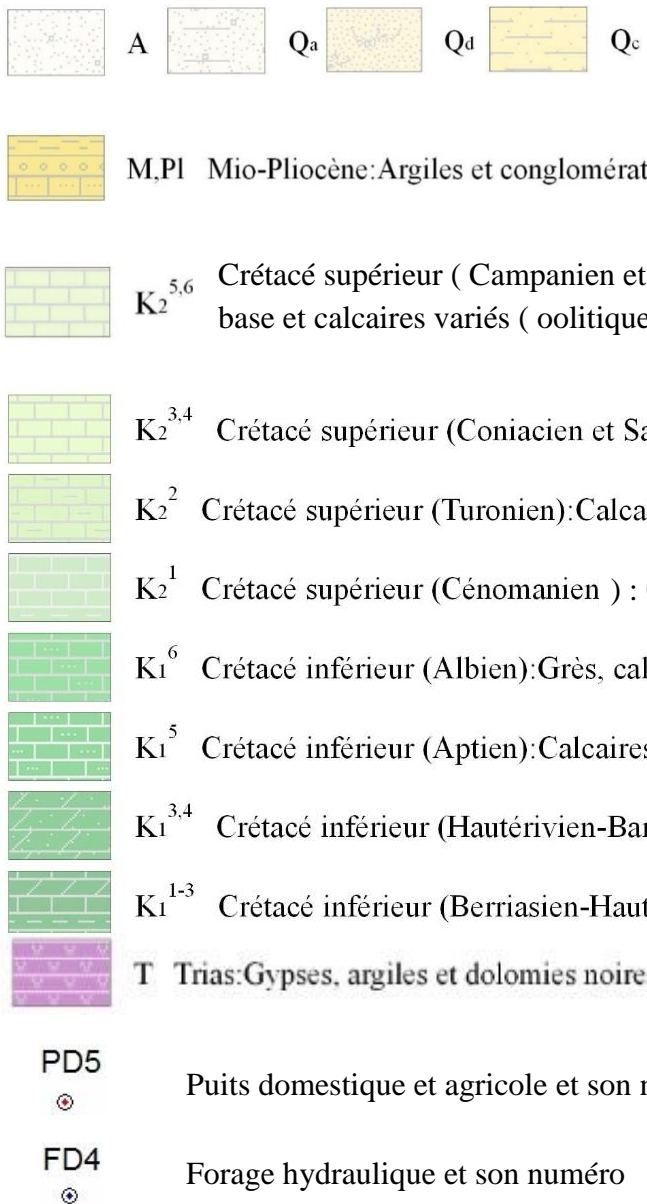


Traitée par nous-mêmes

Figure IV- 1 : Carte d'inventaire des points d'eau échantillonnés (Mai 2013)

Echelle 1/200.000

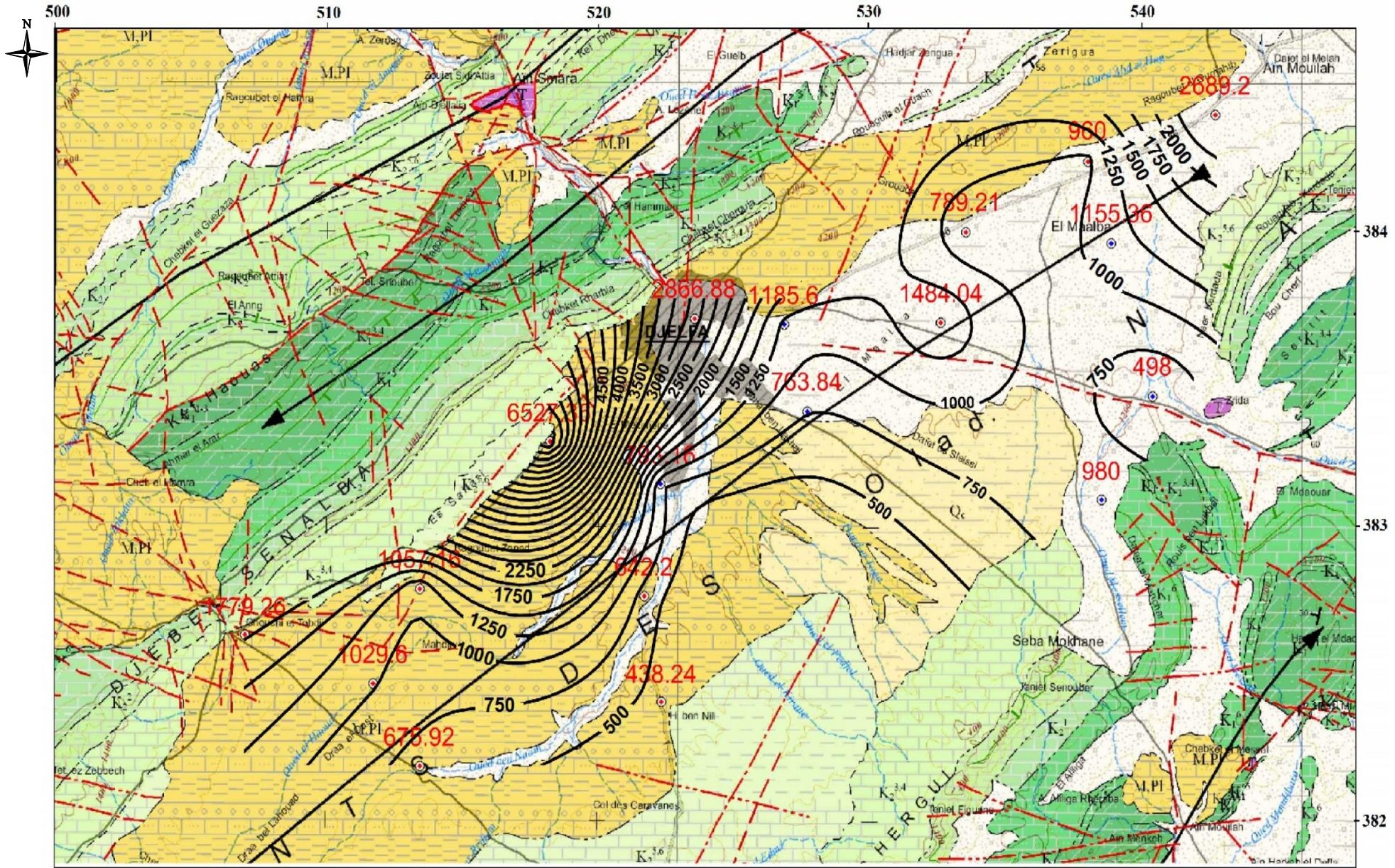
Légende :

- 
- A** Quaternaire : Alluvions, sables, graviers, limons, argiles, croûte calcaire
 - Q_a** Quaternaire : Alluvions, sables, graviers, limons, argiles, croûte calcaire
 - Q_d** Quaternaire : Alluvions, sables, graviers, limons, argiles, croûte calcaire
 - Q_c** Quaternaire : Alluvions, sables, graviers, limons, argiles, croûte calcaire
 - M.PI** Mio-Pliocène: Argiles et conglomérats, calcaires lacustres
 - K₂^{5,6}** Crétacé supérieur (Campanien et Maestrichtien) : Ensemble marneux à la base et calcaires variés (oolitique , à silex) au sommet.
 - K₂^{3,4}** Crétacé supérieur (Coniacien et Santonien): Calcaires
 - K₂²** Crétacé supérieur (Turonien): Calcaires et marnes
 - K₂¹** Crétacé supérieur (Cénomaniens) : Calcaires jaunes, marnes, gypse et dolomies
 - K₁⁶** Crétacé inférieur (Albien): Grès, calcaires ocre et argiles
 - K₁⁵** Crétacé inférieur (Aptien): Calcaires et grès
 - K₁^{3,4}** Crétacé inférieur (Hautérivien-Barrémien): Grès, dolomies et argiles gréseuses
 - K₁¹⁻³** Crétacé inférieur (Berriasien-Hautérivien): Calcaires dolomités et marnes
 - T** Trias: Gypses, argiles et dolomies noires
 - PD5** Puits domestique et agricole et son numéro
 - FD4** Forage hydraulique et son numéro

IV. 1.3- Conductivité électrique (CE):

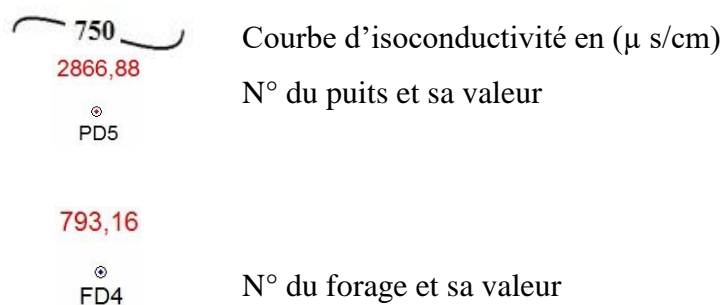
La conductivité électrique traduit le degré de la minéralisation d'une eau. Elle est d'autant plus élevée que la minéralisation est importante.

La gamme de variation de la conductivité des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire était variée de 438,24 μ S/cm à 6527,36 μ S/cm, à une température de 20 °C. L'examen de la carte d'iso-conductivité fait apparaître deux zones principales de valeurs différentes (fig. IV-02). Une première zone de valeurs variant de 500 à 2000 μ S/cm, située dans la partie Est et NE du synclinal. La deuxième zone à fortes valeurs, variant de 1800 à 6527 μ S/cm, située dans la partie Ouest du synclinal, en contact avec les piémonts des massifs à l'Ouest de la carte. Ces fortes valeurs sont expliquées par lessivage des formations traversées.



Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :**Figure IV- 2 :** Carte d'iso-valeurs des conductivités électriques**IV .2/ Etude des paramètres chimiques :****IV .2.1/ Evolution des paramètres chimiques :**

Les eaux souterraines contiennent toujours des sels dissous qui leur confèrent les caractéristiques du milieu dont elles sont issues. Ces sels peuvent également provenir de phénomènes exogènes qui ont contribué à des modifications de la chimie du milieu, parmi lesquels on note l'évaporation et le lessivage.

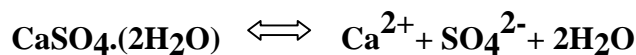
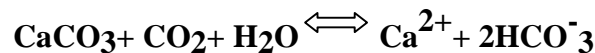
Afin de montrer la répartition spatiale des éléments chimiques, on a procédé à l'établissement d'une cartographie hydrogéochimique. La répartition des concentrations dépend de plusieurs facteurs tels que la lithologie, l'état hydrodynamique de la nappe et les conditions climatiques (une température élevée provoque l'évaporation et les précipitations engendrent le lessivage et la dissolution des roches).

Dans notre présente étude, on va cartographier les éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques qui présentent une influence sur la qualité des eaux .

La cartographie hydrogéochimique a été réalisée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 9.0.

IV .2.1.A/ Carte d'isoteneurs en calcium (Ca^{2+}) :(fig. IV-03)

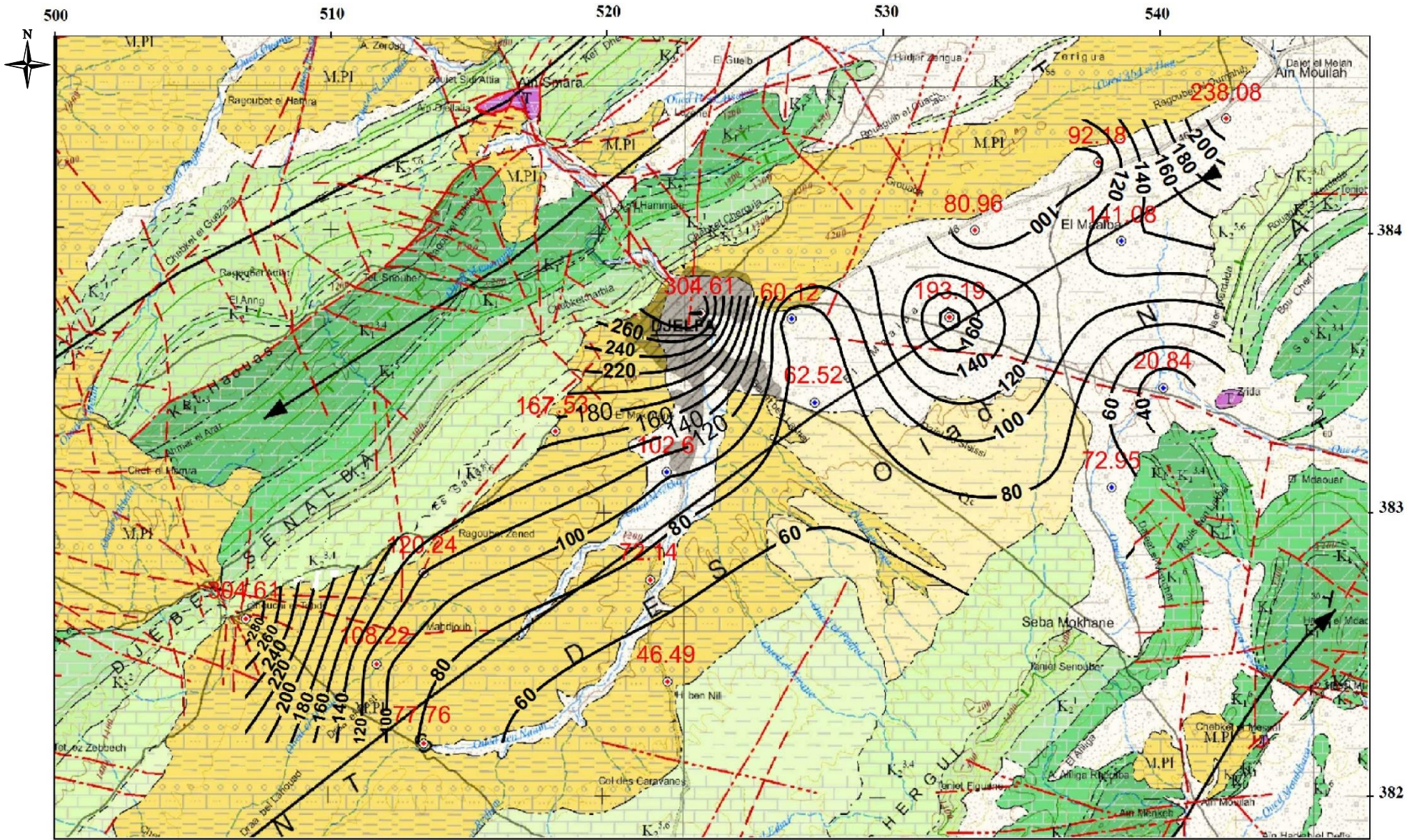
Les teneurs en calcium, varient de 20,84 mg/l au forage FMH3 à 304,61 mg/l aux puits PD5 et PMS3. La carte d'évolution des teneurs en calcium montre un accroissement des teneurs en calcium (Ca^{2+}) du SE vers le NW de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire. Les concentrations élevées sont observées dans la partie NW du synclinal, c'est-à-dire en bordure des formations carbonatées : PMS3 (304,61 mg/l) et PD5 (304,61mg/l), ainsi qu'au niveau du puits PMH9 (238,08 mg/l) à l'extrême NE du secteur d'étude. Cela est expliqué que le calcium (Ca^{2+}) provient essentiellement de la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) du carapace calcaire et probablement de l'influence de celles du Crétacé supérieur (Sénonien, Turonien et Cénomaniens) en bordure, ainsi que des gypses contenus dans les marnes (CaSO_4) d'âge Sénonien, selon les équations d'équilibre suivantes :



IV .2.1.B/ Carte d'isoteneurs en magnésium (Mg^{2+}) :(fig. IV-04)

Les concentrations en magnésium, varient de 0,84 mg/l (PMS3) à 398,64 mg/l (PMS4). Les teneurs élevées (supérieures à 100 mg/l) sont observées au niveau des points d'eau : PD5 (141,24 mg/l) et PMS4 (398,64 mg/l) situés dans la partie NW du secteur d'étude, au piémont Sud du flanc Nord du synclinal.

Les teneurs inférieures à 60 mg/l sont observées dans la partie centrale du synclinal. Les ions (Mg^{2+}) proviennent, comme les ions (Ca^{2+}), de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomies) du Cénomaniens.



Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :

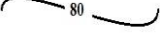


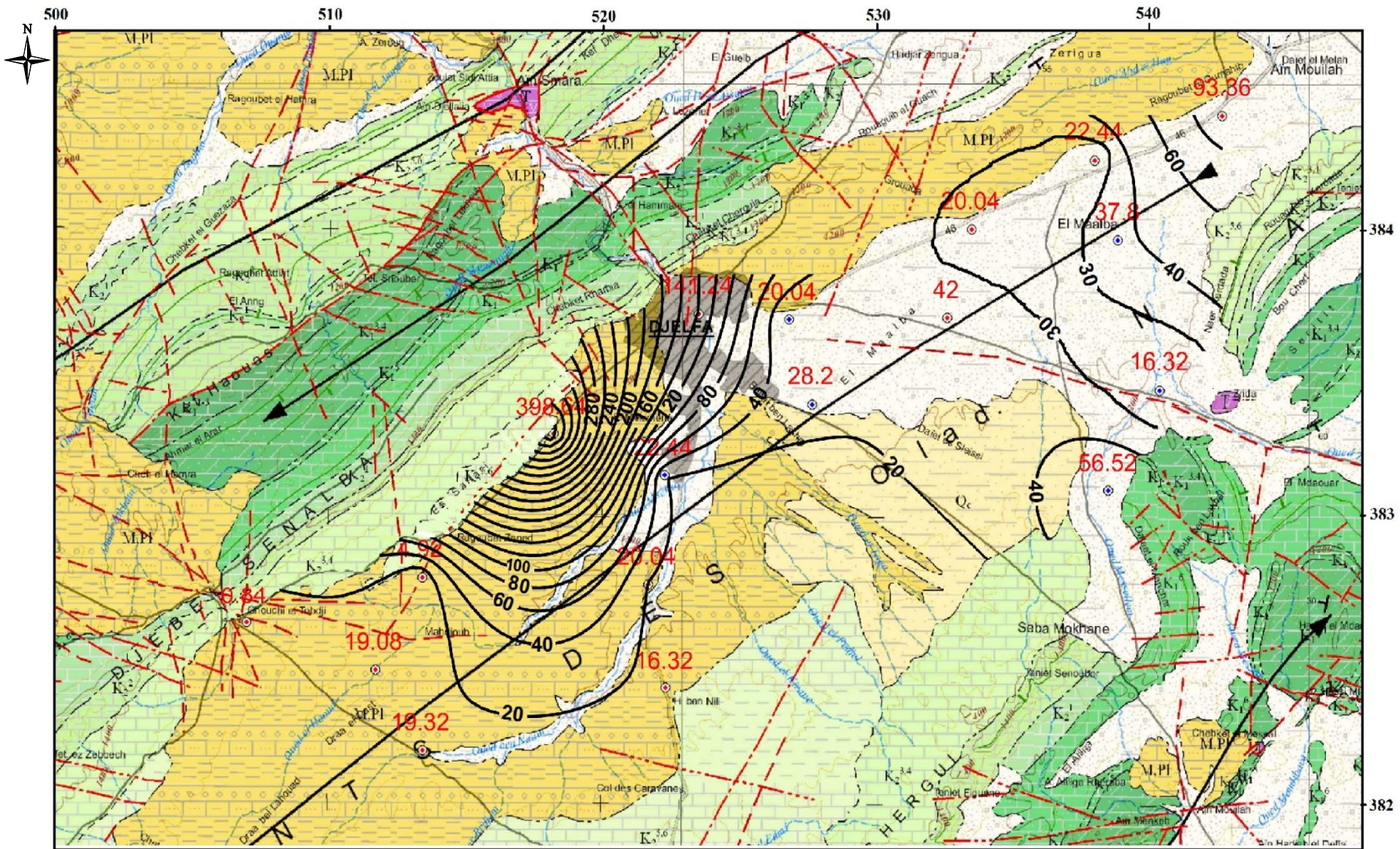
-  Courbe d'isoteneur en Ca^{2+} en (mg/l)
-  N° du puits et sa valeur.
-  N° du forage et sa valeur.

Figure IV- 3 : Carte des iso-teneurs en calcium (Ca^{2+})



Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :




-  Courbe d'isoteneur en Mg^{2+} en (mg/l)
 N° du puits et sa valeur.
 N° du forage et sa valeur.

Figure IV- 4 : Carte des iso-teneurs en magnésium (Mg^{2+})**IV .2.1.C/ Carte d'isoteneurs en sodium et potassium ($Na^+ + K^+$) : (fig. IV-05)**

Le Sodium est toujours présent dans les eaux naturelles en proportions variables, il provient essentiellement du lessivage des formations riches en NaCl (argiles et marnes, et halite, gypse, anhydrite) et des eaux usées d'origine industrielle et domestique.

Tandis que le Potassium est beaucoup moins abondant que le Sodium et rarement dépasse les 20 mg/l.

L'observation de la carte d'isoteneurs en ($Na^+ + K^+$), montre que les concentrations sont importantes dans les parties centrale Nord, et l'extrême NE du synclinal, avec une teneur maximale observée au niveau du forage FD2 de 138,46 mg/l.

On signale que les faibles concentrations se localisent en amont de la nappe, là où se trouve l'amont du sens l'écoulement des eaux souterraines (les eaux ne sont pas encore trop minéralisées).

IV .2.1.D/ Carte d'isoteneurs en bicarbonates (HCO_3^-) : (fig. IV-06)

Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-), varient de 76,86 mg/l (FMH3) à 603,9 mg/l (PD5).

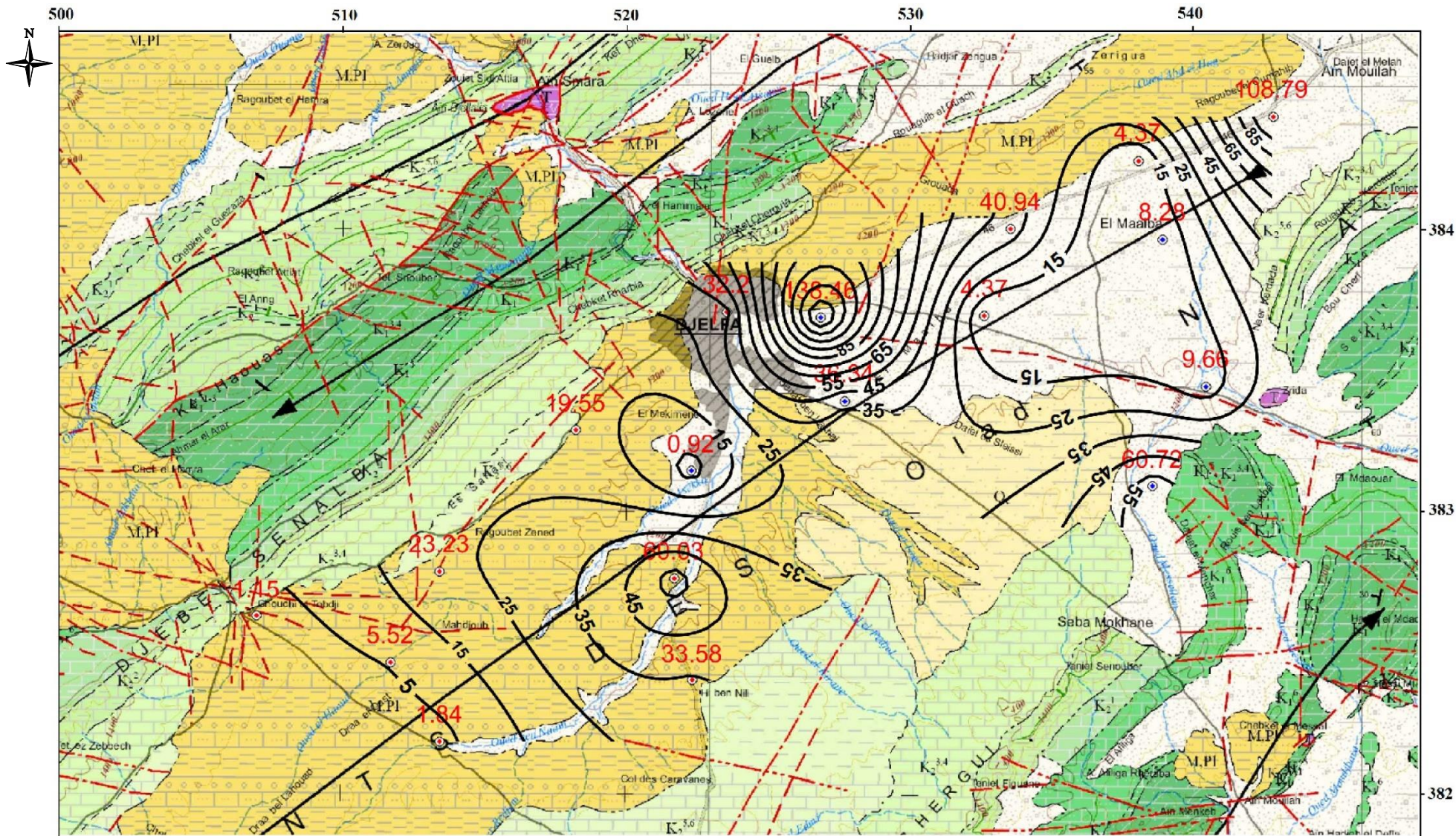
Les concentrations les plus importantes sont observées dans la partie centrale du Nord du synclinal : au niveau du puits PD5 (603,9 mg/l) et du puits PMS4 (489,22 mg/l) ; et également à l'extrême NE du secteur d'étude où une teneur de 588,04 mg/l a été observée au puits PMH9. Ces concentrations élevées proviennent du lessivage de la croûte calcaire.

IV .2.1.E/ Carte d'isoteneurs en sulfates (SO_4^{2-}) : (fig. IV-07)

Les teneurs en sulfates (SO_4^{2-}), varient de 25 mg/l (FMH3) à 1230 mg/l (PMS4). Nous remarquons que les concentrations les plus élevées sont localisées au NW de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire, au piémont Sud du Djebel Senalba, avec des valeurs qui dépassent les 1000 mg/l (1230 mg/l comme valeur maximale observée au niveau du puits PMS4). Ces fortes valeurs peuvent s'expliquer par l'influence de la dissolution des sels minéraux (gypses) contenus dans les formations Sénoniennes observées dans le secteur Nord-Ouest du synclinal de Djelfa et qui sont en contact direct avec la nappe Mio-Plio-Quaternaire.

IV .2.1.F / Carte d'isoteneurs en chlorures (Cl^-) : (fig. IV-08)

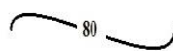
L'observation de la carte d'isoteneurs en chlorures (Cl^-), montre que les teneurs varient entre 3,55 mg/l (PR2) et 312,4 mg/l (PMS4). Ces dernières sont importantes au NW du synclinal, ainsi à l'extrême NE du secteur d'étude. L'origine des chlorures (Cl^-) peut être dû aux dépôts géologiques (lentilles de gypse, marnes argileuses). Ils peuvent être également provenir de la contamination par les eaux usées d'origine domestique et industrielle. Ils constituent donc un bon indicateur de la pollution. Il est à signaler que les teneurs des trois (03) puits (PMH9, PD5, PMS4) dépassent la norme de potabilité de l'O.M.S fixée à 250 mg/l.



Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :

 Courbe d'isoteneur en Na⁺ en (mg/l)

32,2


PD5

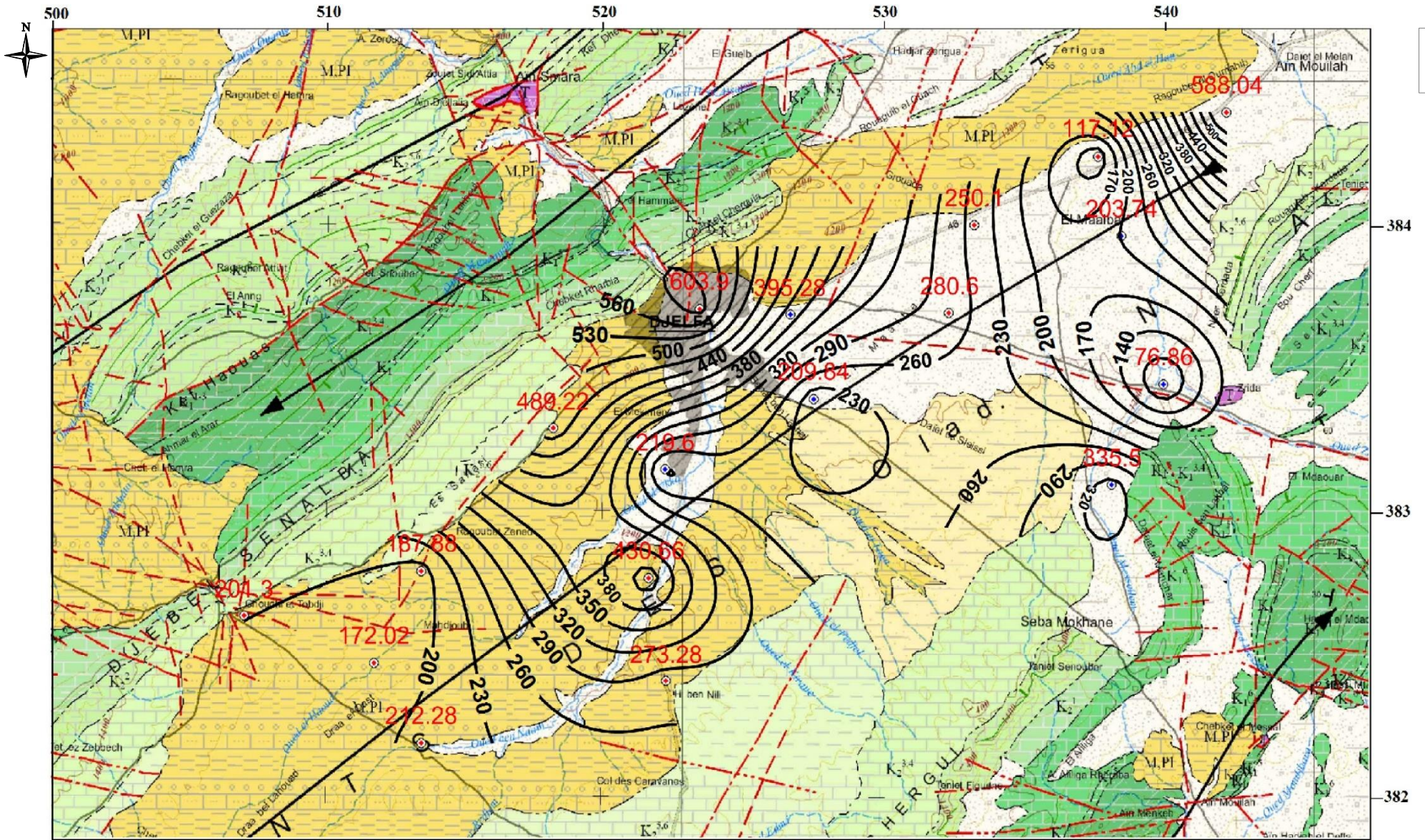
N° du puits et sa valeur.

0,92


FD4

N° du forage et sa valeur.

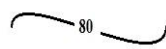
Figure IV- 5 : Carte des iso-teneurs en sodium (Na⁺)



Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :

 Courbe d'isoteneur en HCO_3^- en (mg/l).

603,9

⊙
PD5

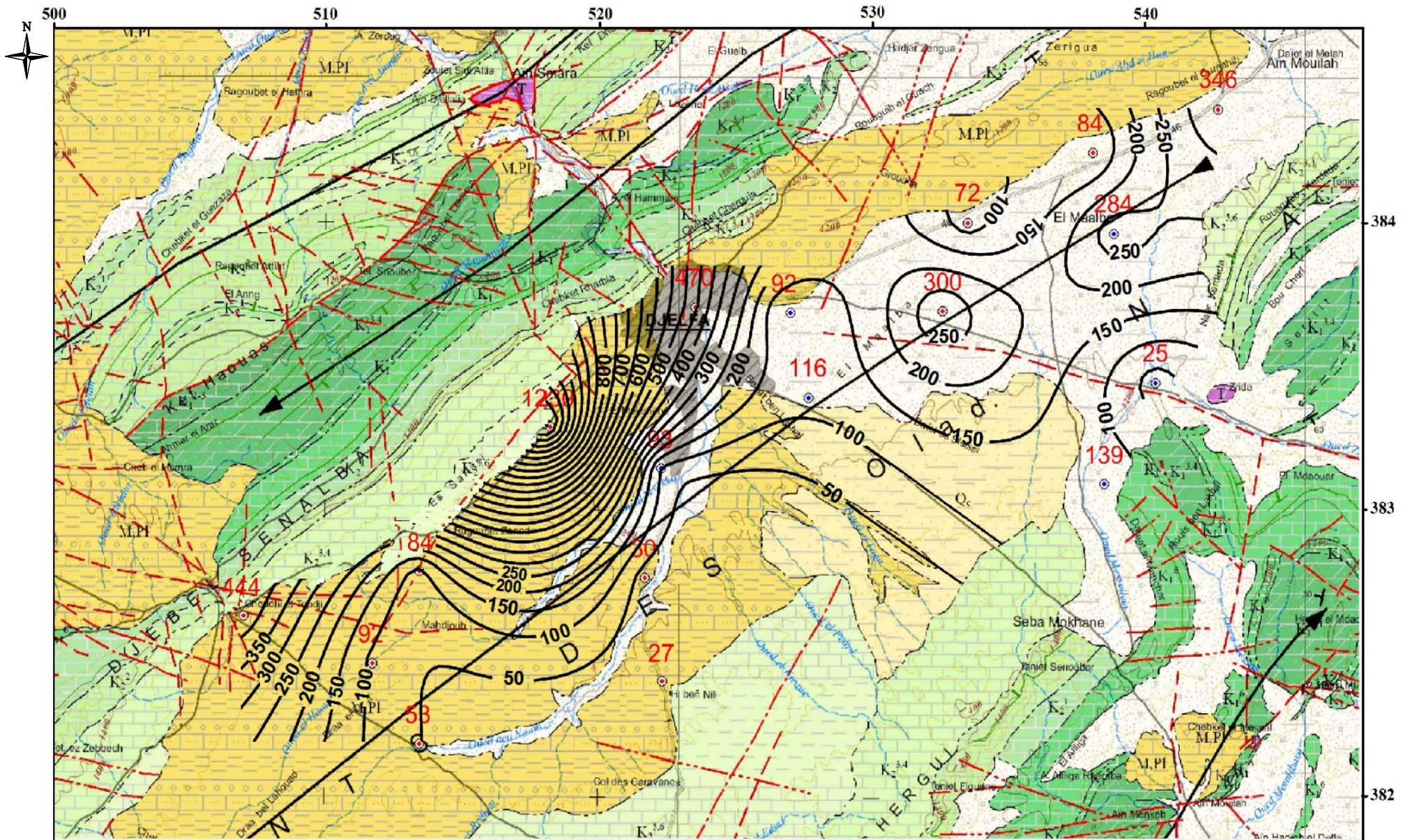
N° du puits et sa valeur

219,6

⊙
FD4

N° du forage et sa valeur.

Figure IV- 6 : Carte des iso-teneurs en bicarbonate (HCO_3^-)



Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :

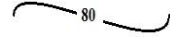
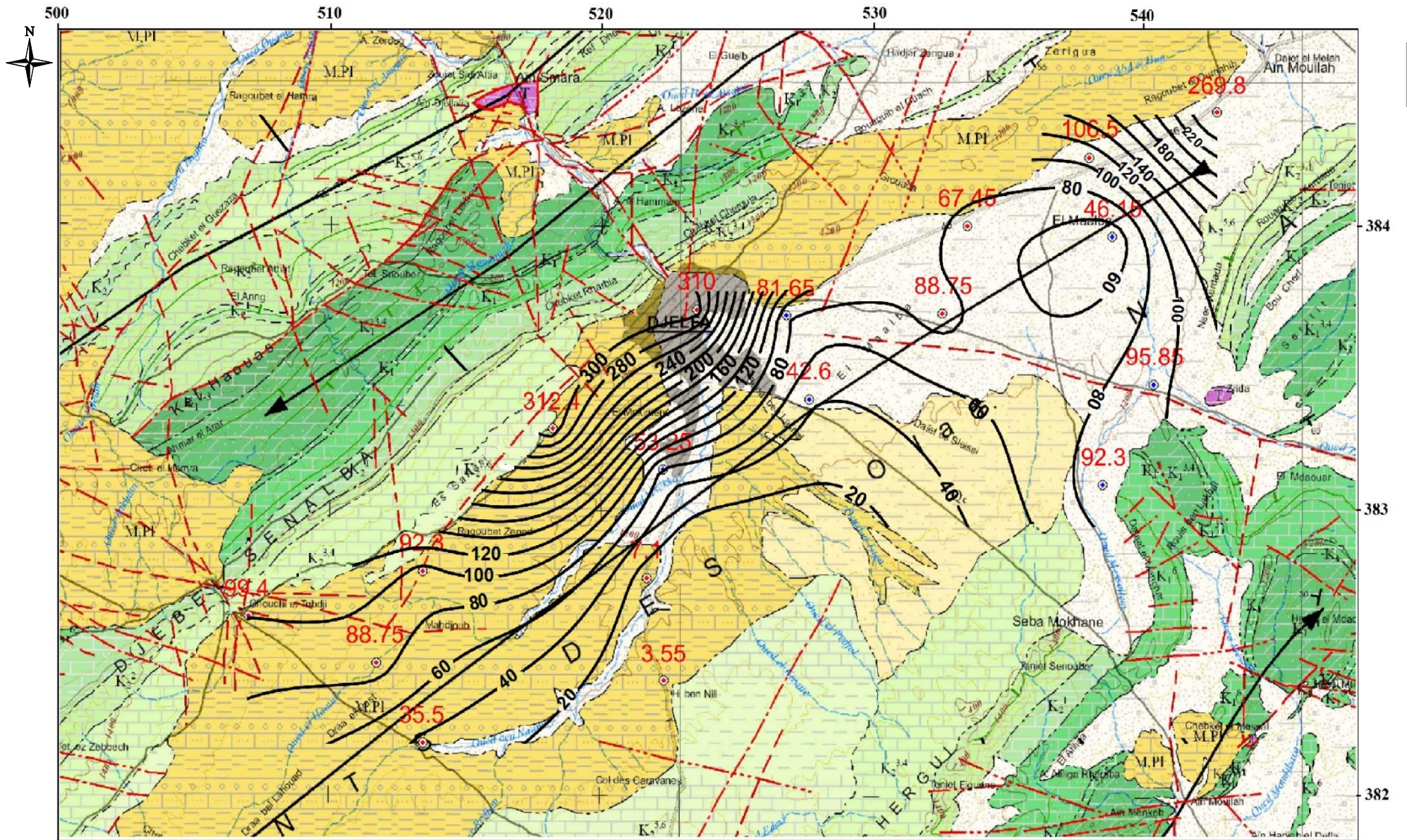
-  Courbe d'isoteneur en SO_4^{2-} en (mg/l)
- 470**
⊙
PD5 N° du puits et sa valeur.
- 93**
⊙
FD4 N° du forage et sa valeur

Figure IV- 7 : Carte des iso-teneurs en sulfate (SO_4^{2-})



Traitee par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :

-
- 80 Courbe d'isoteneuren Cl^- en(mg/l).
 310 N° du puits et sa valeur
 PD5
 53,25 N° du forage et sa valeur.
 FD4

Figure IV- 8 : Carte des iso-teneurs en chlorures (Cl^-)**IV. 2.2- Etude des valeurs relatives:****IV. 2.2.A- Dureté totale ou degré hydrotimétrique (D.H.T):**

Elle indique la teneur totale en sels de calcium (Ca^{++}) et de magnésium (Mg^{++}), exprimée en degré Français ($^{\circ}\text{F}$). D'après le tableau IV-01 si dessous qui classe les eaux selon la dureté totale, on peut classer 11 échantillons d'eau comme très dures, avec une valeur maximale de 208 $^{\circ}\text{F}$ observée au niveau du puits PMS4 situé au piémont Sud du Djebel Senalba et au flanc Nord du synclinal; 6 échantillons sont classés comme dures et un seul échantillon comme douce (12 $^{\circ}\text{F}$) observé au niveau du forage FMH3 à l'Est du synclinal. Donc on se basant sur ces normes, nous constatons que la majorité des eaux prélevées oscillent entre une eau dure à très dure.

Tableau IV- 1 : Classification des eaux selon leur D.H.T

Dureté ($^{\circ}\text{F}$)	0 à3	3 à15	15 à30	>30
Eau	Très douce	Douce	Dure	Très dure

IV .2.2.B/ Indice d'échange de base :

Les eaux souterraines, en traversant les formations géologiques, se mettant en contact avec différentes roches du réservoir ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans les roches.

D'après Schoeller, l'indice d'échange de base (i.e.b) est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants lorsqu'il y a échange de Na^+ et de K^+ de l'eau contre les alcalino-terreux des argiles (Ca^{2+} , Mg^{2+}).

L'i.e.b est donné par la formule suivante :

$$\text{i.e.b} = [\text{rCl}^- - \text{r}(\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / \text{rCl}^-$$

D'après les données, l'indice d'échange de base est en majorité positif. Ceci peut être expliqué par la substitution du sodium de l'eau par le calcium du terrain, d'où la prédominance du faciès calcique.

Il existe 5 points d'eau où l'indice d'échange de base est négatif, témoignant d'un échange du calcium de l'eau contre le sodium du terrain.

IV. 3- Classification chimique des eaux :

Plusieurs méthodes ont été définies par divers auteurs pour classer et connaître les différents faciès chimiques des eaux naturelles.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les méthodes principales les plus utilisées : la classification de Schoeller-Berkaloff et celle de Piper. Toutes ces classifications sont basées essentiellement sur la composition chimique de l'eau.

IV. 3.1- Classification des eaux d'après Stabler :(fig. IV-09)

Cette classification permet de connaître les différents faciès chimiques des eaux, où nous avons convertir les masses pondérales de chaque élément en (méq/l), puis on réduit ces derniers en pourcentage (%) du nombre total du (méq/l). On classe par ordre de grandeur les anions suivis des cations.

De ce classement, nous définissons les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire en quatre familles. (Tableau IV-02).

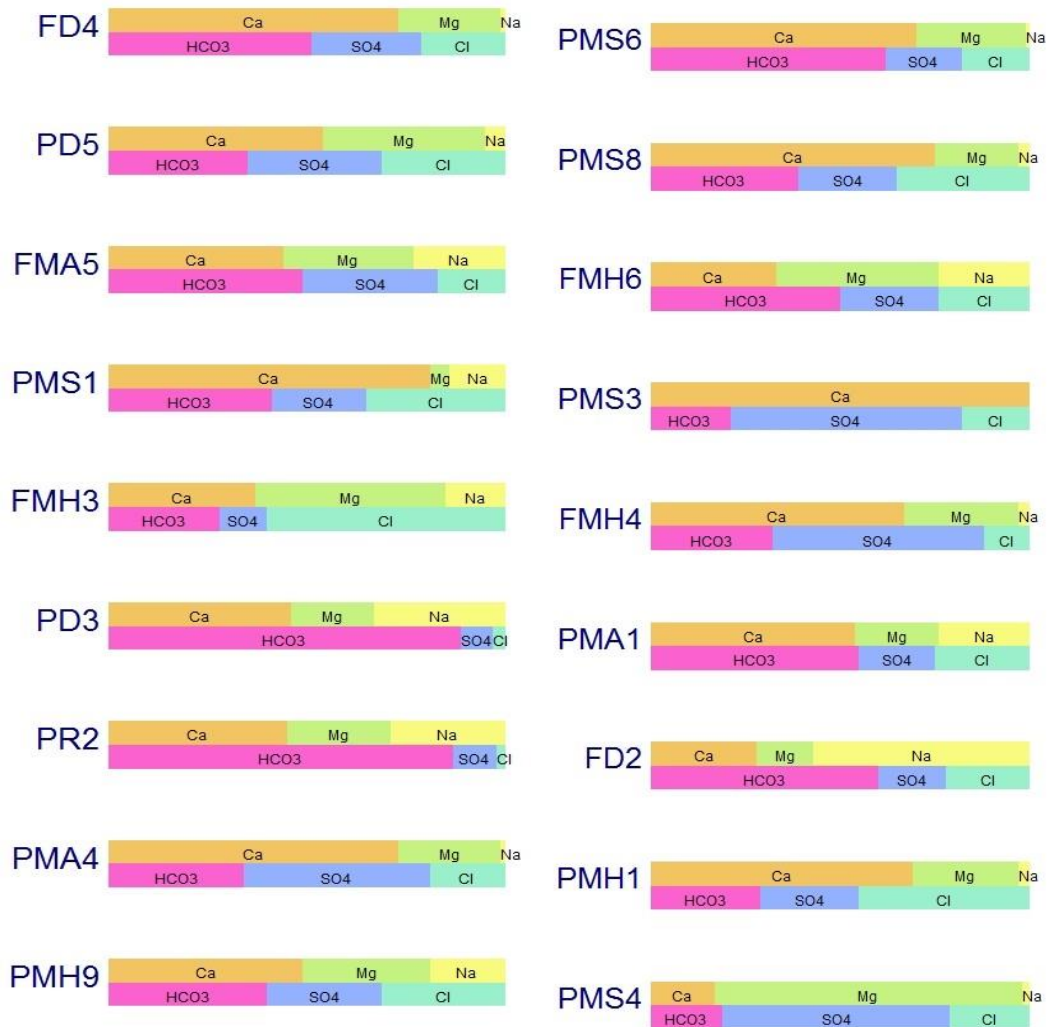


Figure IV- 9 : Classification de Stabler

Tableau IV- 2 : Classification des eaux de la nappe selon la formule caractéristique

Point d'eau	Formule caractéristique	Faciès chimique
FD4	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	Bicarbonaté calcique
PD5	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	
FMA5	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\% \text{Mg}^{++}$	
PMS1	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{2-}$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\% \text{Mg}^{++}$	
PD3	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\% \text{Mg}^{++}$	
PR2	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\% \text{Mg}^{++}$	
PMH9	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\% \text{Mg}^{++}$	
PMS6	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	
PMS8	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	
FMH6	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	
PMA1	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	
PMH1	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{2-}$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	
FD2	$r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++}$	
PMA4	$r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	Sulfaté calcique
PMS3	$r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\% \text{Mg}^{++}$	
FMH4	$r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	
PMS4	$r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Mg}^{++} > r\% \text{Ca}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	Sulfaté magnésien
FMH3	$r\% \text{Cl}^- > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-}$ $r\% \text{Ca}^{++} > r\% \text{Mg}^{++} > r\% (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	Chloruré calcique

IV. 3.2- Classification des eaux d'après Piper :(fig. IV-10 et 11)

Le diagramme de Piper permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Le principe consiste à représenter dans chaque triangle équilatéral les quantités en réaction par rapport à la concentration totale des anions et des cations, on obtient ainsi deux points représentatifs indiquant la dominance d'un anion ou d'un cation. La composition de l'eau peut être figurée sur le losange par un point unique correspondant à l'intersection des parallèles depuis ces deux points aux côtés du losange qui représente la nature chimique de l'échantillon.

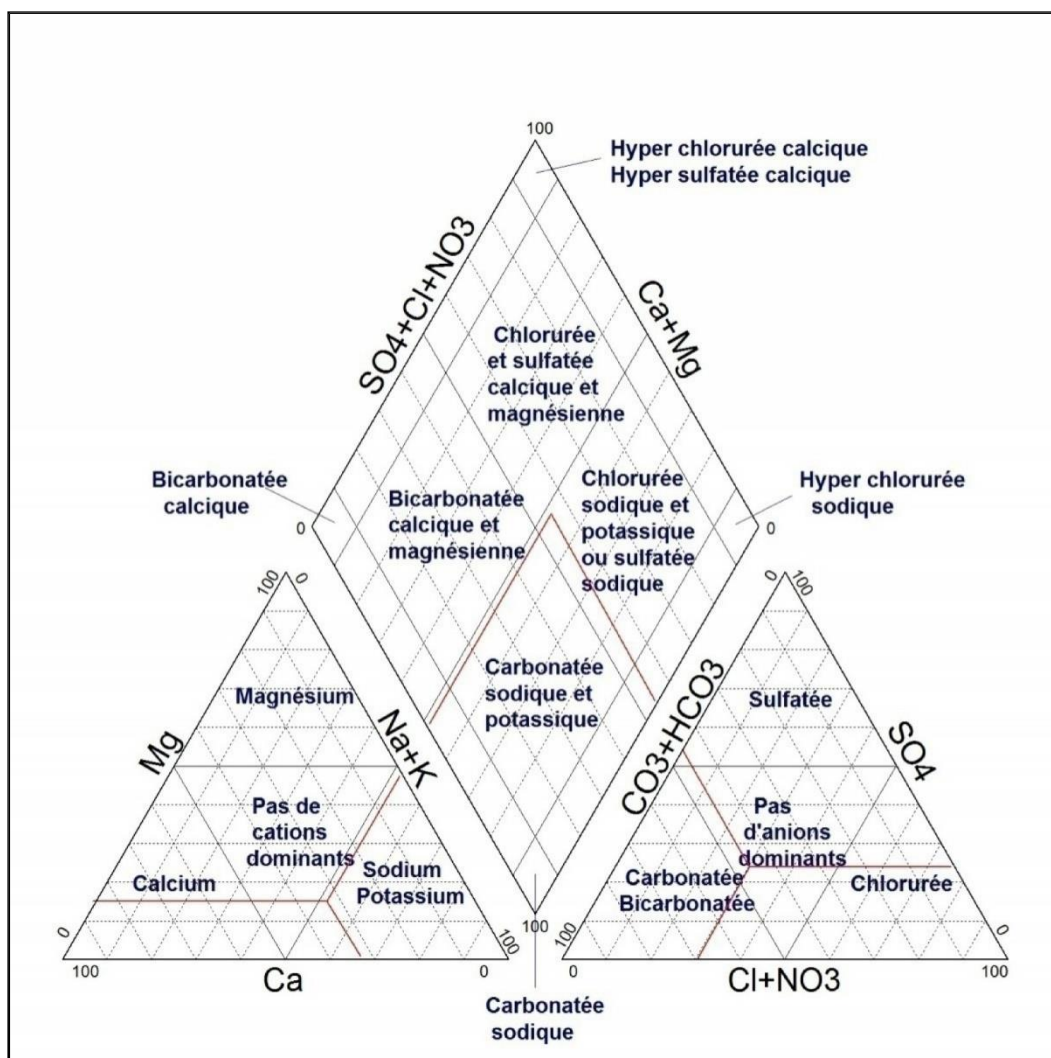


Figure IV- 10 : Diagramme de classification des eaux d'après Piper

D'après cette classification, on a trois familles de faciès chimiques :

- Chlorurée et sulfatée, calcique et magnésienne :

Cas des points d'eau : PD5, PMA4, PMS1, PMH9, FMA5, FMH3, FMH6, PMS8, FMH4, PMH1, PMS4, PMS3

- Bicarbonatée calcique et magnésienne :

Cas des points d'eau : FD4, PR2, PD3, PMA1, PMS6,

- Bicarbonatée sodique et potassique : Cas du point d'eau : FD2.

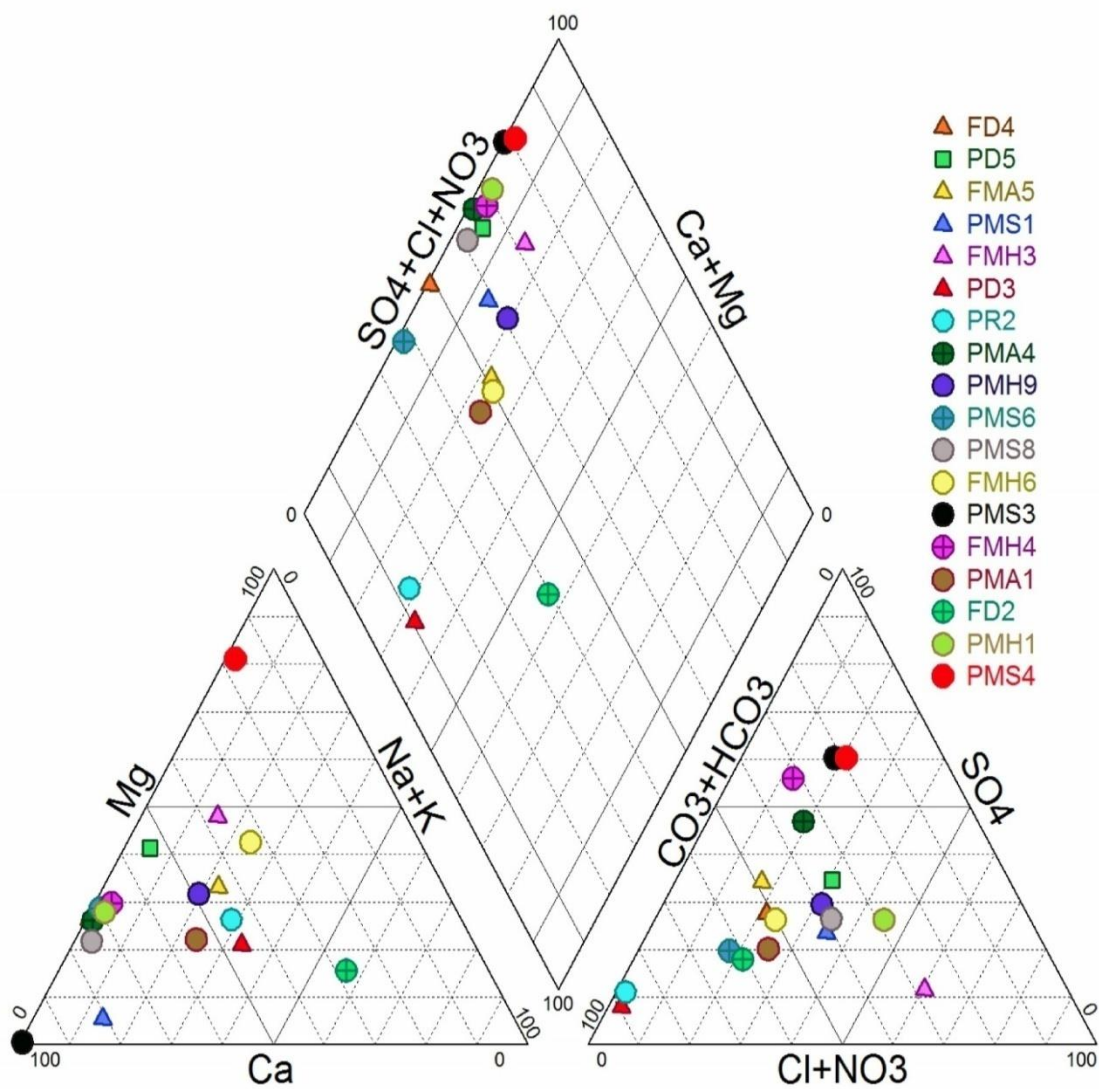


Figure IV- 11 : Classification des échantillons selon le diagramme de Piper

IV. 3.3- Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoëller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

La représentation graphique d'une analyse d'eau sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet la détermination du pH d'équilibre qui donne une idée sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau, ainsi que la quantité de CO₂ libre en mg/l (tableau IV-03).

Tableau IV- 3 : Caractère de l'eau selon la classification de Schoeller-Berkaloff

Point d'eau	pH mesuré	pH d'équilibre	CO ₂ libre (mg/l)	Caractère de l'eau
FD4	7,03	7,25	50	Agressive
PD5	7	6,35	150	Incrustante
FMA5	8,12	7,5	4	Incrustante
PMS1	7,42	7,25	17	Incrustante
FMH3	8,01	8,28	1,9	Agressive
PD3	7,18	7,11	70	Incrustante
PR2	7,23	7,5	40	Agressive
PMA4	7,25	6,88	40	Incrustante
PMH9	7,31	6,41	70	Incrustante
PMS6	7,32	7,4	24	Agressive
PMS8	7,57	7,34	12	Incrustante
FMH6	7,27	7,23	44	Incrustante
PMS3	7,3	6,82	25	Incrustante
FMH4	7,27	7,15	27	Incrustante
PMA1	7,3	7,6	32	Agressive
FD2	7,35	7,22	40	Incrustante
PMH1	7,62	7,58	7	Incrustante
PMS4	7,52	6,78	30	Incrustante

Les deux diagrammes de Schoeller (fig. IV-12) tracés pour les points d'eau analysés, montrent la dominance du faciès bicarbonaté calcique (12 points d'eau soit 66,67% des échantillons), permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions HCO₃⁻ et Ca²⁺. Secondairement on observe trois autres faciès ; bicarbonaté Sodique (1 échantillon), sulfaté calcique (3 échantillons), sulfaté magnésien (1 échantillon), chloruré calcique (1 échantillon).

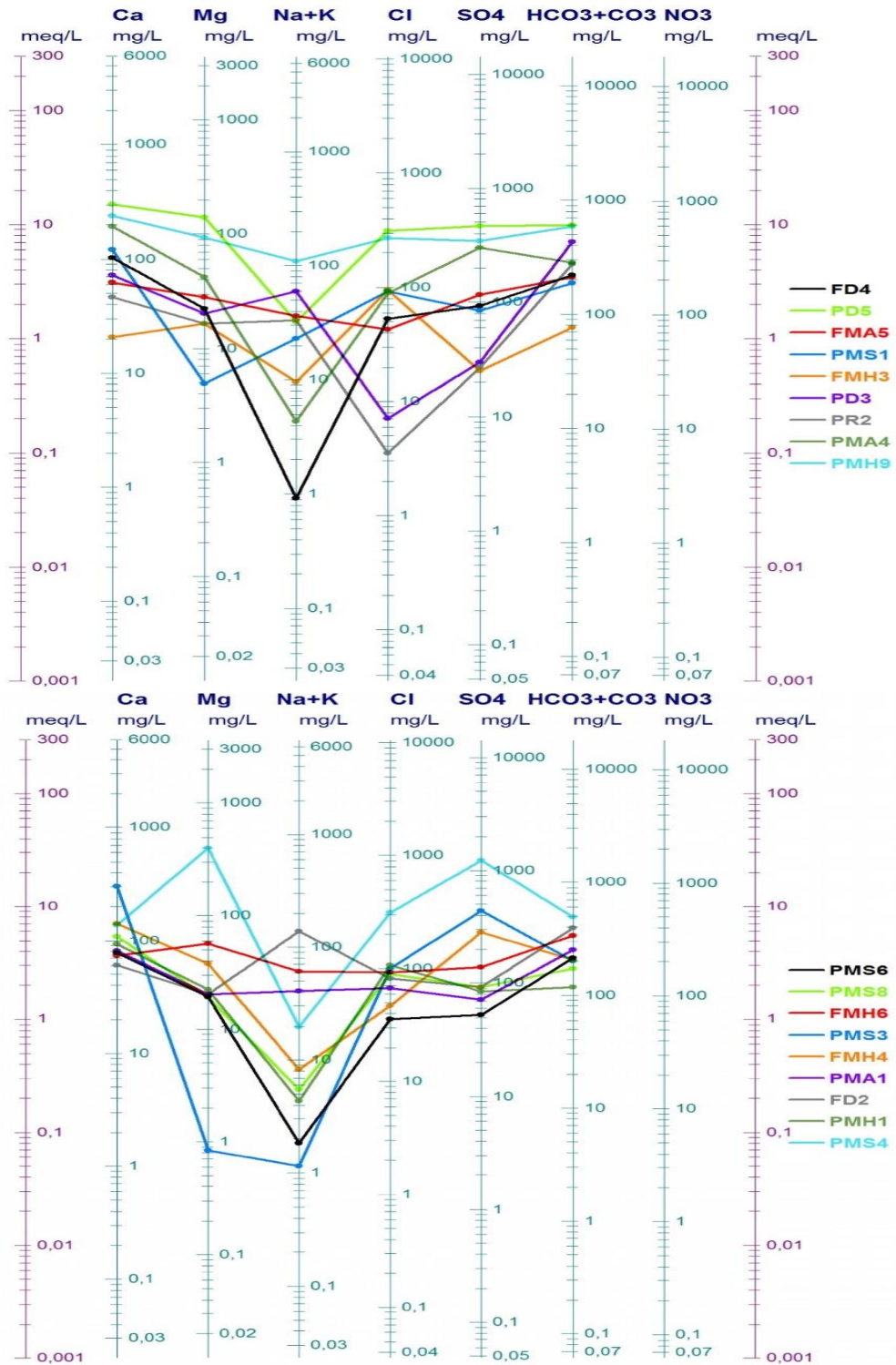


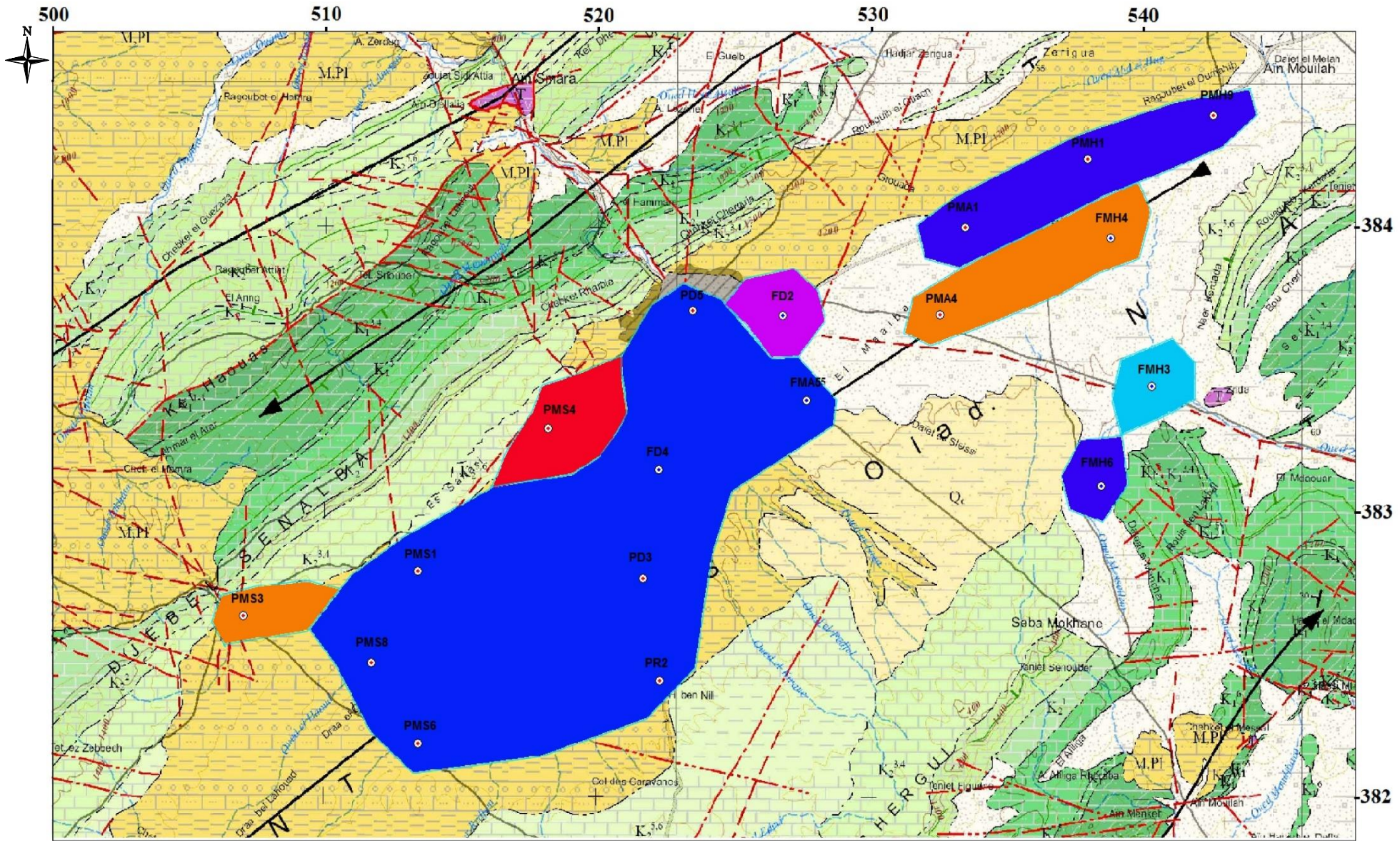
Figure IV- 12 : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff

IV .4/ Etude de l'évolution chimique des eaux :

A partir de la classification de Stabler, nous avons établi une carte des faciès chimiques qui montre la répartition spatiale du chimisme des eaux souterraines de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (fig. IV-13).

L'examen de la carte de répartition des faciès des eaux souterraines de la nappe Mio- Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa montre l'influence de la lithologie des formations sur les types de faciès. En effet, le carapace calcaire et l'influence des formations carbonatées du Crétacé supérieur bordant la nappe sont à l'origine du faciès bicarbonaté calcique qui est le prédominant sur l'ensemble de la nappe, confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe, à partir des bordures calcaires. Les formations carbonatées riches en gypses, sont à l'origine des autres faciès chimiques en particulier le sulfaté calcique, par les phénomènes de lessivage et d'évaporation.

D'une manière générale les eaux sont peu évoluées, du la 1^{ère} au 2^{ème} stade d'évolution chimique. Seuls les points FD2 (bicarbonaté sodique) et FMH3 (chloruré calcique) indiquent un mélange probable d'eau de faciès différents. En effet, ces deux points sont situés au Nord d'une faille E-W traversant une partie du synclinal.



Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200.000

Légende :








	Faciès bicarbonaté calcique
	Faciès bicarbonaté sodique
	Faciès sulfaté calcique
	Faciès sulfaté magnésien
	Faciès chloruré calcique
	PD5 Puits N° PD5
	FD4 Forage Hydraulique N° FD4

Figure IV- 13 : Carte de répartition des faciès chimiques des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire

IV .5/ Qualité chimique des eaux :**IV .5.1/ Potabilité des eaux :**

Pour définir la potabilité des eaux étudiées, nous allons baser sur les normes qui ont été établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S 2011) et par notre pays algérien (JOA 2011) tableau IV-04

Tableau IV- 4 : Normes applicables aux eaux destinées à l'alimentation humaine (O.M.S 2011)

Parameter	Concentration maximal admissible (OMS 2011)	Concentration maximale admissible (JOA 2011)	% dépassant la norme OMS	% dépassant la norme Algérienne
Ph	6,5à8,5	6,5 – 9,0	0%	0%
TDS	1000 mg/l	1500 mg/l	/	/
CE	1500 μ S/cm	2800 μ S/cm	22%	11%
Ca ²⁺	100	200 mg/l	50%	17%
Mg ²⁺	50 mg/l	100 mg/l	22	11%
K ⁺	12 mg/l	12 mg/l	/	/
Na ⁺	100	200 mg/l	11%	0%
Cl ⁻	200	500 mg/l	17%	0%
SO ₄ ²⁻	200	400 mg/l	33%	17%
NO ₃ ⁻	50 mg/l	50 mg/l	/	/

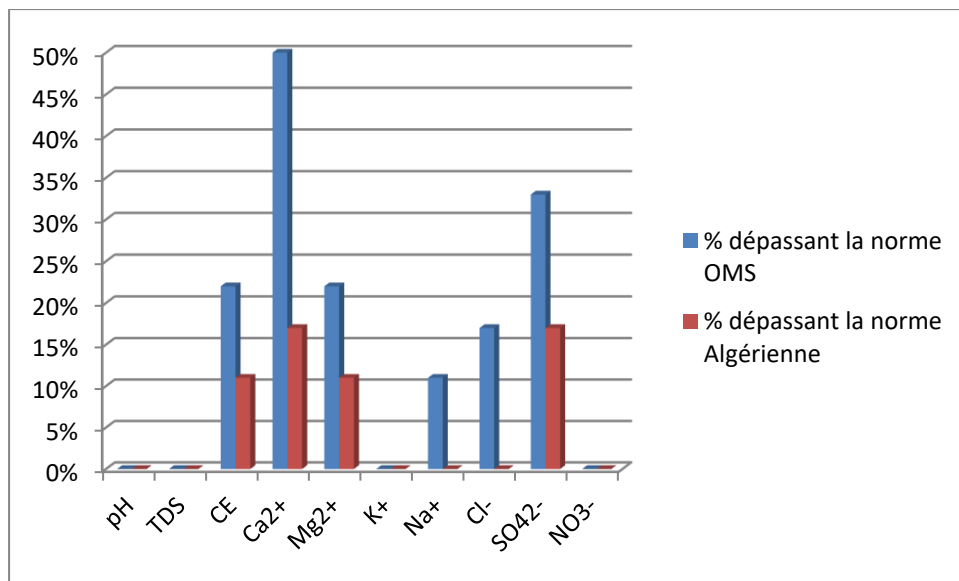


Figure IV- 14 : Histogramme au Normes applicables aux eaux destinées à l'alimentation humaine (O.M.S 2011) et (JOA 2011)

Le Figure V-14 montre que les normes de concentrations maximales admissibles selon les normes OMS et algérienne :

- Selon les normes de l'O.M.S, soit de 22% des échantillons prélevés qui ont des concentrations supérieures aux concentrations maximales acceptable, il s'agit des puits d'eau suivant : PD5, PMH9, PMS3 et PMS4. Cependant, le reste des points ont des concentrations dans les normes.
- Selon les normes Algériennes, soit de 17% des échantillons prélevés qui ont des concentrations supérieures aux concentrations maximales acceptable, il s'agit des puits d'eau suivant : PD5, PMH9, PMS3, et le reste des puits ont des concentrations dans les normes Algériennes.

IV .5.2/ Aptitude des eaux à l'irrigation :

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation ; alors que dans les zones semi-arides, où cette ressource est rare ou inexistante, on fait appel aux eaux souterraines. Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté

des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols qui peut être apprécié par la conductivité électrique et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué.

IV .5.2.1/ Classification des eaux par la méthode de Richards :

La classification proposée par Richards en 1954 est très utile pour caractériser une eau d'irrigation. Une eau chargée en sels peut provoquer un risque pour l'irrigation. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Ce paramètre comme étant une détermination du pouvoir d'échange des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , par le Na^+ dans les argiles et les colloïdes. Le taux de sodium absorbé par le sol (S.A.R) est donné par la formule suivante :

$$S.A.R = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{(rCa^{2+} + rMg^{2+})}{2}}}$$

Cette classification se fait donc , en reportant sur le diagramme les conductivité électriques en ($\mu S/cm$) à 20 °C, en fonction du taux d'absorption du sodium (S.A.R).

Tableau IV- 5 : Valeurs du S.A.R et de la conductivité électrique des différents points d'eau

Point d'eau	S.A.R	Σ ($\mu S/Cm$)	Classe	Point d'eau	S.A.R	σ ($\mu S/Cm$)	Classe
FD4	0,02	793,16	C ₃ S ₁	PMS6	0,05	675,92	C ₂ S ₁
PD5	0,38	2866,88	C ₄ S ₁	PMS8	0,13	1029,6	C ₃ S ₁
FMA5	0,95	763,84	C ₃ S ₁	FMH6	129	980	C ₃ S ₁
PMS1	0,56	1057,16	C ₃ S ₁	PMS3	0,02	1779,26	C ₃ S ₁
FMH3	1,90	498	C ₂ S ₁	FMH4	0,16	1155,36	C ₃ S ₁
PD3	1,61	642,2	C ₂ S ₁	PMA1	1,05	789,21	C ₃ S ₁
PR2	1,10	438,24	C ₂ S ₁	FD2	3,94	1185,6	C ₃ S ₁
PMA4	0,1	1484,04	C ₃ S ₁	PMH1	0,11	960	C ₃ S ₁
PMH9	1,52	2689,2	C ₄ S ₁	PMS4	0,19	6527,36	C ₄ S ₁

La classification de Richards basée sur la conductivité et le S.A.R, permet de définir plusieurs classes d'eau, présentant chacune le degré de danger de salinisation et d'alcalinisation.

Tableau IV- 6 : Classification des eaux d'irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R (Méthode de Richards)

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1 ^{ère}	Excellente	C ₁ S ₁	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plus part des cultures, sur la plus part des sols.
2 ^{ème}	Bonne	C ₂ S ₁ C ₁ S ₂	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle en particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
3 ^{ème}	Admissible	C ₃ S ₁ C ₂ S ₃ C ₃ S ₂	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée .
4 ^{ème}	Médiocre	C ₄ S ₁ C ₄ S ₂ C ₃ S ₃	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur sol et bien drainées.
5 ^{ème}	Mauvaise	C ₃ S ₄ C ₄ S ₃ C ₄ S ₄	Eau ne convient pas généralement à l'irrigation, mais elle peut être utilisée sous certaines conditions: sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux

La représentation des échantillons analysés sur le diagramme de Richards (fig. IV-15), montre que les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire appartiennent aux 3 classes : C₂S₁, C₃S₁, et C₄S₁. Elles se manifestent par un faible danger d'alcalinisation et par une salinisation moyenne.

La salinisation est causée par la dissolution des gypses et la forte évaporation des eaux, due au climat semi-aride de la région.

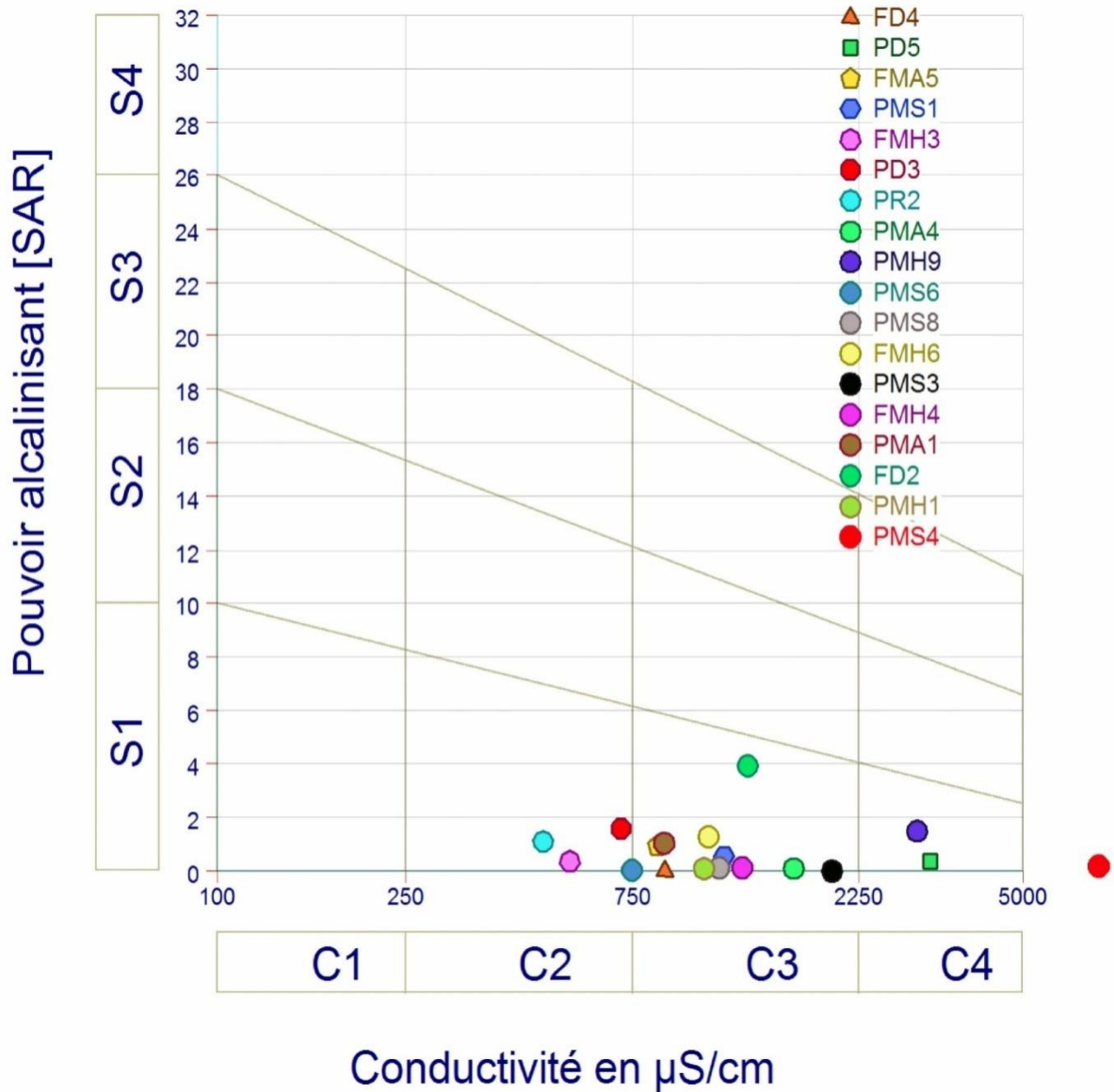
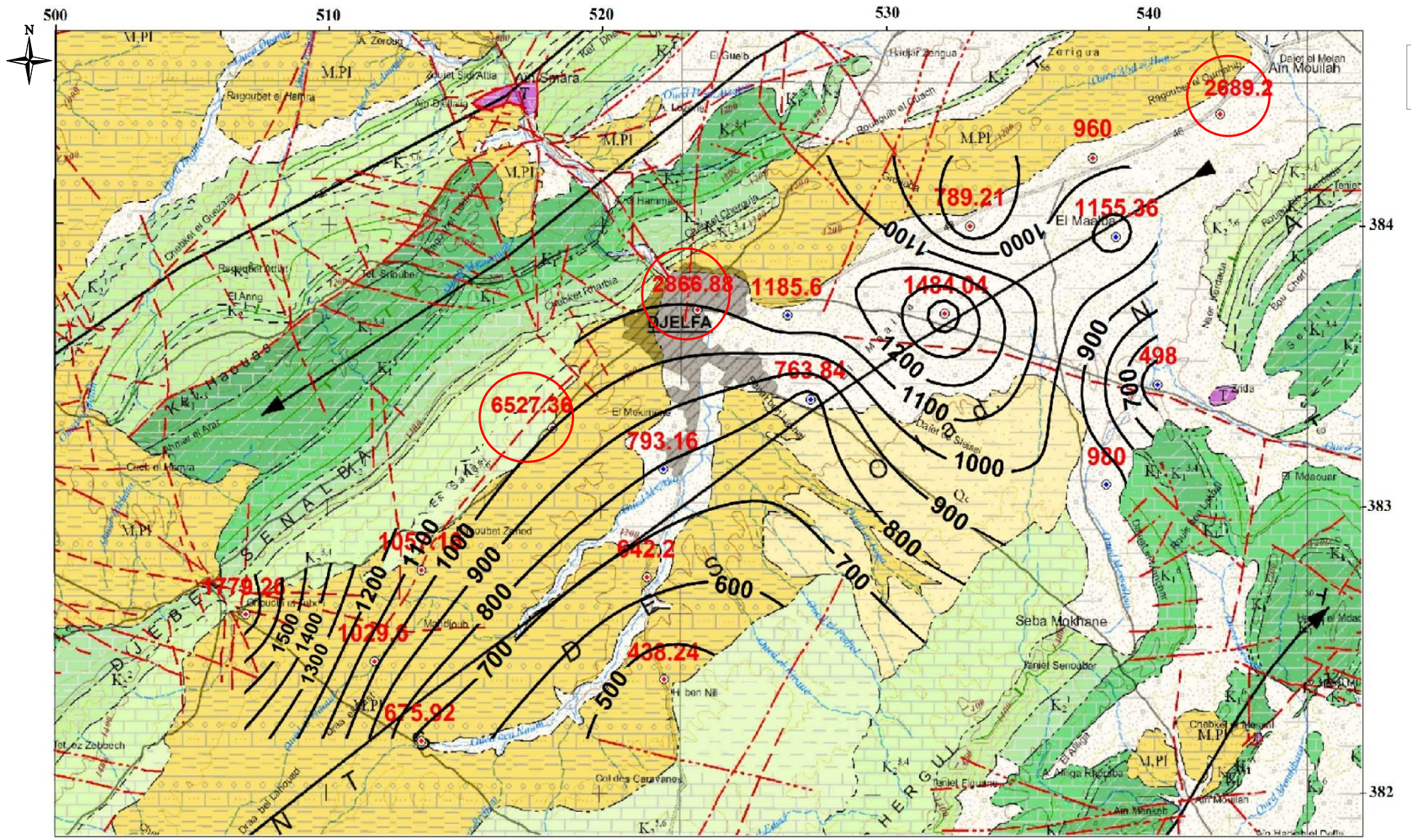


Figure IV- 15 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation

IV .5.2.2/ Variation spatiale de la CE :


Mise à l'écart des points d'eau (PMH9, PD5, PMS4) qui ont des conductivités électriques supérieures à $3000 \mu\text{S/cm}$ (valeur maximale admissible pour l'irrigation), le reste des puits du synclinal montre des CE admissibles pour l'irrigation (fig.IV-16).




Traitée par nous-mêmes

Echelle 1/200,000

Légende :

 Courbe d'isoconductivité en (μ s/cm).

 N° du puits et sa valeur.

793,16


 N° du forage et sa valeur.

Figure IV- 16 : Carte des conductivités

Conclusion :

L'étude hydrochimique de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa permet de dire que :

- Les valeurs des conductivités électriques sont dans l'ensemble moyennes et admissibles.
- La variation spatiale des éléments chimiques montre dans l'ensemble des fortes concentrations dans la partie Nord-Ouest de la nappe, c'est-à-dire au piémont Sud du Djebel Senalba (flanc Nord du synclinal), donc l'influence de la lithologie des formations sur la minéralisation et sur les types de faciès est bien marquée. En effet, les formations carbonatées du Crétacé supérieur bordant la nappe sont à l'origine du faciès bicarbonaté calcique qui est le faciès prédominant sur l'ensemble de la nappe, confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe, à partir des bordures nord du synclinal.
- Les classifications de Stabler, Schoeller-Berkaloff et Piper ont montré que les faciès chimiques dominants sont celles bicarbonatés calciques et sulfatés calciques.
- Pour l'aptitude des eaux de cette nappe à l'AEP et à l'irrigation, on peut considérer que les eaux de la nappe du Mio- Plio-Quaternaire sont généralement de bonne qualité chimique, potable en majorité (à l'exception de quelques puits), présentant un faible danger d'alcalinisation, et un danger de salinisation moyenne. Donc, elles sont considérées comme bonne pour irrigation dans l'ensemble.

Chapitre V

Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

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. L'établissement des cartes de vulnérabilité des aquifères permet une meilleure gestion de ces eaux. (**Bentekhici2015 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019**).

A cet effet, une estimation de la vulnérabilité permet de désigner les zones les plus sensibles à l'activité humaine. Il existe de nombreuses façons d'estimer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Dans ce travail, nous utiliserons des méthodes basées sur la méthode standard DRASTIC : **D**epth to water, **R**echarge, **A**quifer media, **S**oilmedia, **T**opography, **I**mpact of the vadose and hydraulic **C**onductivity à l'aide du système d'information géographique (SIG).

V .A- Généralité sur la pollution des eaux souterraine :

La Pollution des nappes phréatiques est une action d'autant plus nécessaire que la décontamination des nappes phréatiques contaminées est une entreprise longue et coûteuse, qui nécessite de développer et de diffuser des informations sur les services publics responsables et les individus, qu'il y ait protection des nappes phréatiques Protection des contaminations accidentelles ou des éléments naturels de risque de contamination par négligence, qu'elle soit atmosphérique ou superficielle, ponctuelle ou extensive.

Le concept de susceptibilité des eaux souterraines à la contamination combine divers facteurs physiques et stabilisateurs qui déterminent le degré auquel ces eaux souterraines sont plus ou moins exposées à la contamination de surface dans les conditions naturelles.

V. A.1- Les sources de la pollution :

On distingue deux sources de pollutions:

- **La pollution ponctuelle** : Consiste en des émissions localisées, plus ou moins facilement identifiables, chroniques ou accidentelles, qui résultent de peu ou pas de traitement des émissions domestiques, urbaines, agricoles ou industrielles.
- **La pollution diffuse** : Elle est due au lessivage et à l'érosion plus ou moins rapide et accusée des sols. Différentes substances sont entraînées vers les nappes et les rivières tel que les hydrocarbures, les métaux lourds, les pesticides. Cette pollution peut s'étendre sur de grandes surfaces. Elle est difficile à identifier et donc difficile à maîtriser. (Djelbane et M'zara 2015)

V. A.2- Type de pollution :

Les pollutions sont classées selon différents critères. (Figure V-01).

a- En fonction de l'origine de la pollution :

- Urbaine : eaux usées domestiques, eaux pluviales, eaux d'infiltration sous les dépôts d'ordures, etc...
- Industrielle : eaux rejetées par les usines, eaux d'infiltration sous les stockages de déchets industriels, liquides dangereux tels qu'hydrocarbures et solvants, eaux des bassins de lagunage, etc...
- Agricoles : eaux d'infiltration de drainage et de ruissellement sous aires cultivées, eaux sous aires agricoles (élevages, stockages et épandages d'engrais et de produit phytosanitaire).

b- Selon la nature des polluants :

- Physique : température, matière en suspension, radioactivité.
- Chimique : sels minéraux, métaux lourds, pesticides, détergents hydrocarbures, solvants.
- Micro biologiques : micro-organismes, virus, bactéries.

c- Selon la répartition géologique:

- Pollution diffusée.
- Pollution ponctuelle.

d- En fonction de la répartition dans le temps :

- Pollution permanente
- Pollution accidentelle
- Pollution saisonnière (sels de déneigement,... etc.).

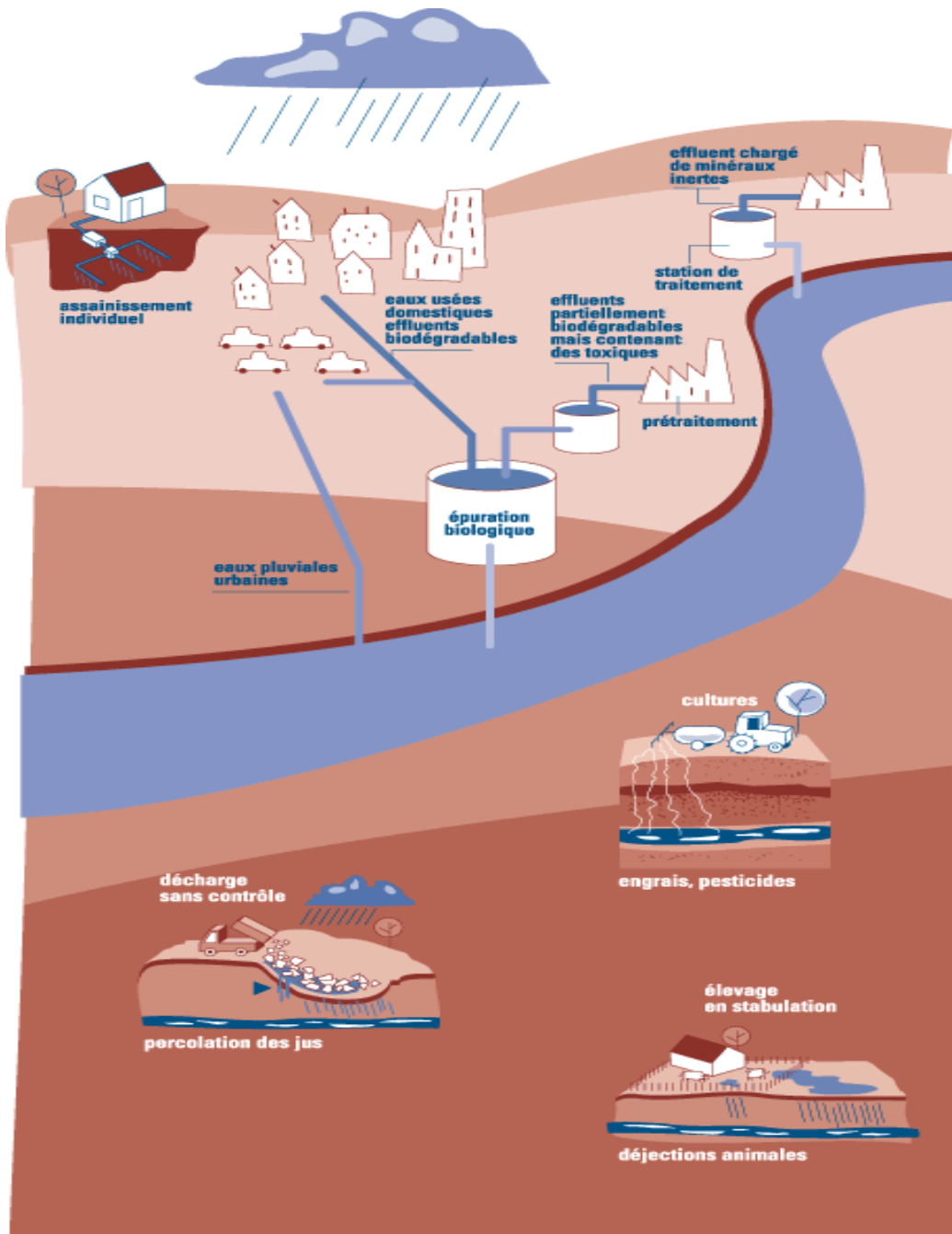


Figure V- 1 : les différents types de la pollution. (Djelbane et M'zara2015)

V. A.3- Principaux types des milieux souterrains :

Qu'il s'agisse d'une pollution diffuse de type agricole (nitrates par exemple) ou d'une pollution accidentelle:

Le point de départ est la surface du sol puis le transit vertical dans la zone dite non saturée (ZNS) surplombant la nappe, l'arrivée à la nappe puis le cheminement subhorizontal du polluant dans celle-ci avec étalement progressif du panache de pollution. (GOUAIDIA 2008)

V. A.3.1-La zone non saturée :

La zone non saturée comprend l'ensemble des niveaux du sous-sol et du sol situés au-dessus de la nappe. Ces niveaux sont dits « non saturés » car leur porosité ne contient pas seulement de l'eau, mais également de l'air.

Dans cette zone, les mouvements de l'eau véhiculant le polluant (pour une pollution miscible) sont eux-mêmes complexes, dépendant de la teneur en eau. Celle-ci varie continûment au cours du temps sous l'influence des cycles pluviométriques et d'infiltration. Ils sont aussi affectés par le degré d'hétérogénéité et le degré de fissuration de la ZNS, ce qui déterminera la plus ou moins grande rapidité de la propagation du polluant jusqu'à la nappe.

V. A.3.2-La zone saturée :

Sous la zone non saturée, on peut rencontrer trois grands types de milieux souterrains pouvant contenir des nappes, plus ou moins vulnérables à une pollution suivant leur profondeur et le degré de fissuration de la zone non saturée:

- Les milieux poreux
- Les milieux fissurés
- Les milieux karstiques

V. B- Définition de la vulnérabilité des eaux :

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe souterraine est définie comme étant la susceptibilité de la qualité des eaux à une charge polluante anthropique. Cette susceptibilité reste liée aux propriétés intrinsèques de l'aquifère, c'est-à-dire sa nature et ses caractéristiques physiques.

V. B.1- Mécanismes de la pollution des eaux souterraines :

Le transport des polluants et leur évolution dans le sol et le sous-sol, sont déterminés par les trois comportements de l'aquifère : hydrodynamique, hydrochimique et hydrobiologique.

Leur connaissance est essentielle pour la compréhension de la propagation et l'évolution des polluants, de la surface du sol aux lieux d'utilisation. Le cheminement des eaux s'effectue en quatre étapes (figure V-02).

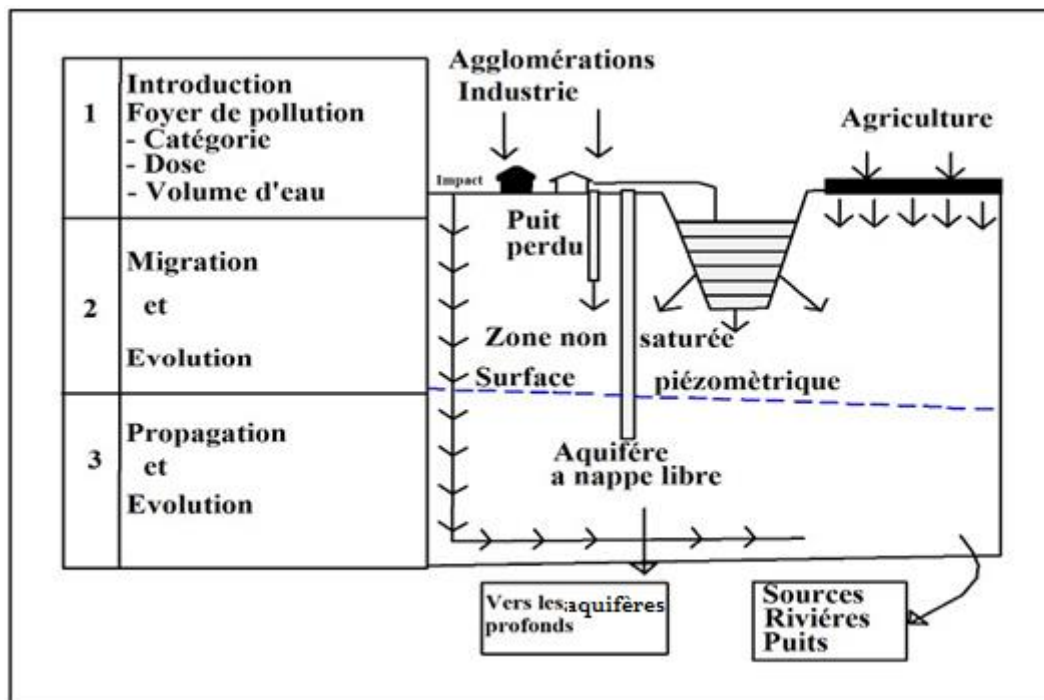


Figure V- 2 : Origine, transport et évolution du polluant (Djelbane et M'zara 2015)

V. B.2- Concepts de vulnérabilité :

Notion de la vulnérabilité représente la capacité de l'eau en surface à rejoindre la zone saturée de la nappe d'eau souterraine. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Ainsi, de nombreuses méthodes ont été développées dans le monde pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines, allant des plus simples, avec des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité, à des méthodes plus complexes avec des modèles qui prennent en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, ce qui nécessite une masse et une qualité importante des données d'entrée (Youssef et al. 2019).

V. B.3- Types de vulnérabilité :

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique :

- La vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;
- 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.

V. B.4- Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :

A cartographie de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution des eaux souterraines est une technique qui permet d'identifier les zones à haut risque, et ce dans le but d'aider la prise de décision en matière de gestion de la qualité des ressources en eau.

Ces cartes de vulnérabilité intrinsèque ne tiennent pas compte des caractéristiques physicochimiques propres à un contaminant. Elles peuvent être élaborées en utilisant plusieurs approches.

Afin d'améliorer sa politique de gestion et de planification des ressources en eau souterraine, l'agence a mené plusieurs projet de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des principales nappes faisant partie de sa zone d'action. Ces cartes ont été élaborées en se basant sur la méthode DRASTIC. Il s'agit d'une méthode standardisée pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, qui prend en compte la majeure partie des éléments hydrogéologiques qui affectent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines indépendamment du type de polluant.

V. B.5- Facteur de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :**- 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.

➤ 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.

➤ 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.
- 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.

➤ 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'emmagasinement 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.
- 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.
- 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.

➤ **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.

V. B.6- Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :

Parmi les nombreux outils cartographiques à la disposition de l'hydrogéologue ou de toute autre personne responsable de la gestion de ressources en eaux souterraines ou de l'aménagement du territoire, la carte de la vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution est ainsi un des éléments-clé pour la protection et la gestion des ressources en eau.

Les cartes de la vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution ont toutefois la particularité de ne pas représenter directement les ressources en eaux et leurs éléments associés (niveaux piézométriques, sources, etc.), mais plutôt un ensemble de paramètres dérivés de ces éléments, voire parfois non affiliés directement à l'eau souterraine (pente, type de sols, etc.). Elles permettent ainsi de représenter une multitude de données en provenance de sources variées, en les modulant en un nombre limité d'indices relatifs de vulnérabilité. Ces cartes sont également dépendantes du temps (à l'inverse des cartes géologiques, par exemple), dans le sens où les paramètres utilisés (profondeur du niveau piézométrique, intensité de la recharge, etc.) peuvent varier temporellement. Concrètement, la cartographie de vulnérabilité établit une représentation spatiale du degré de vulnérabilité d'un aquifère donné à une contamination potentielle, basée sur les attributs hydrogéologiques, géomorphologiques et hydrologiques (climat, pluviométrie) de celui-ci.

Une carte de vulnérabilité subdivise ainsi une portion de territoire en unités spatiales homogènes (polygones ou cellules) montrant un même indice de vulnérabilité, basé sur plusieurs paramètres de l'unité spatiale considérée (paramètres géologiques, pédologiques, ...etc) (Oumar et Berbara 2014).

V. B.7- La méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères:

- **D:** Depth to ground water (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée) ;
- **R:** Recharge (recharge) ;
- **A:** Aquifer media (nature de la zone saturée) ;
- **S:** Soil media (nature du sol) ;
- **T:** Topography (topographie, pente en %) ;
- **I:** Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée) ;
- **C:** Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité.

L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante:

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

Où : **D, R, A, S, T, I, C**, sont les paramètres cités plus haut

Et **n** : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cartes DRASTIC permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index. Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau V-02 ci-dessous. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé. (Tableaux V-03 et 04).

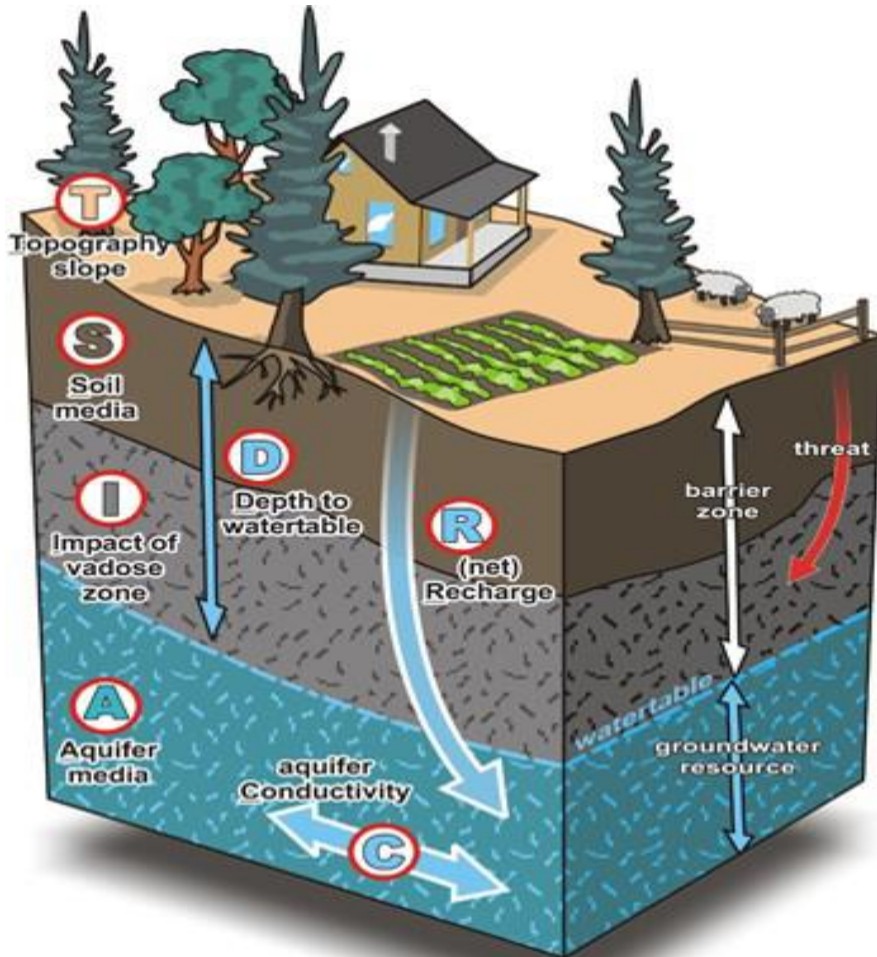


Figure V- 3 : Paramètres de la méthode DRASTIC (Narges G 2017)

Tableau V- 2 : paramètres de la méthode DRASTIC (ALLER ET al, 1987)

D : Distance à la nappe (m)		R : Recharge (mm)	
Valeurs (m)	Notation	Valeurs (mm)	Notation
0 – 1,5	10	25,5	9
1.5 – 4,5	9	17.5 – 25,5	8
4,5 – 9	7	10 – 17,5	6
9 - 15	5	5 - 10	3
15 - 22	3	0 - 5	1
22,5- 30	2		
> 30	1		
A : Nature de la zone saturée		S : Nature du sol	
Calcaire karstique	10	Mince ou absent	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Grès massif	6	Limons sableux	6
Métamorphique altéré	4	Limons	4
Métamorphique	3	Limons silteux	3
Massive shale	2	Argiles	1
T : Topographie (pente)		I : lithologie de la couche vadoze	
Valeurs (%)	Notation	Calcaire Karstique	10
0 à 2	10	Sable et gravier	9
2 à 6	9	Sable et gravier avec silt et argile	8
6 à 12	5	Grès	6
12 à 18	3	Calcaire	6
> 18	1	Silt et argile	1
0 à 2	10		
C : Perméabilité			
Valeur (m/s)	Notation		
> 9,4.10 ⁻⁴	10		
4,7.10 ⁻⁴ à 9,4.10 ⁻⁴	8		
32,9.10 ⁻⁵ à 9,4.10 ⁻⁴	6		
14,7.10 ⁻⁵ à 32,9.10 ⁻⁵	4		
4,7.10 ⁻⁵ à 14,7.10 ⁻⁵	2		
4,7.10 ⁻⁷ à 4,7.10 ⁻⁵	1		

Tableau V- 3 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (ALLER ET al, 1987)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	< 80
Faible	80 - 120
Moyen	121- 160
Elevé	161- 200
Très élevé	>200

Tableau V- 4 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (ENGEL ET al, 1996)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 101
Moyen	101 – 140
Elevé	141 – 200
Très élevé	>200

V. B.8- Elaboration des cartes thématiques par l'application de la méthode DRASTIC:

V. B.8.1- Carte de la 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.

L'évaluation de ce paramètre a été effectuée à partir de la carte piézométrique et la carte iso profondeur de la zone d'étude. D'où nous avons relevé directement les valeurs.

Généralement, la capacité d'atténuation augmente avec la profondeur du plan. C'est la différence entre l'altitude des courbes de niveau et du niveau piézométrique.

Tableau V- 5 : Côtes et poids DRASTIC du paramètre profondeur de la nappe (D) (Benslimane et Rahmoune 2008 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019).

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	
31et plus	1	

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

Tableau V- 6 : Cotation du paramètre profondeur de la nappe (D)

Profondeur de la nappe en(m)			
Intervalle	Côte	Poids	Indice
0-15	9	5	45
16-25	7		35
26-30	5		25
+30	3		15

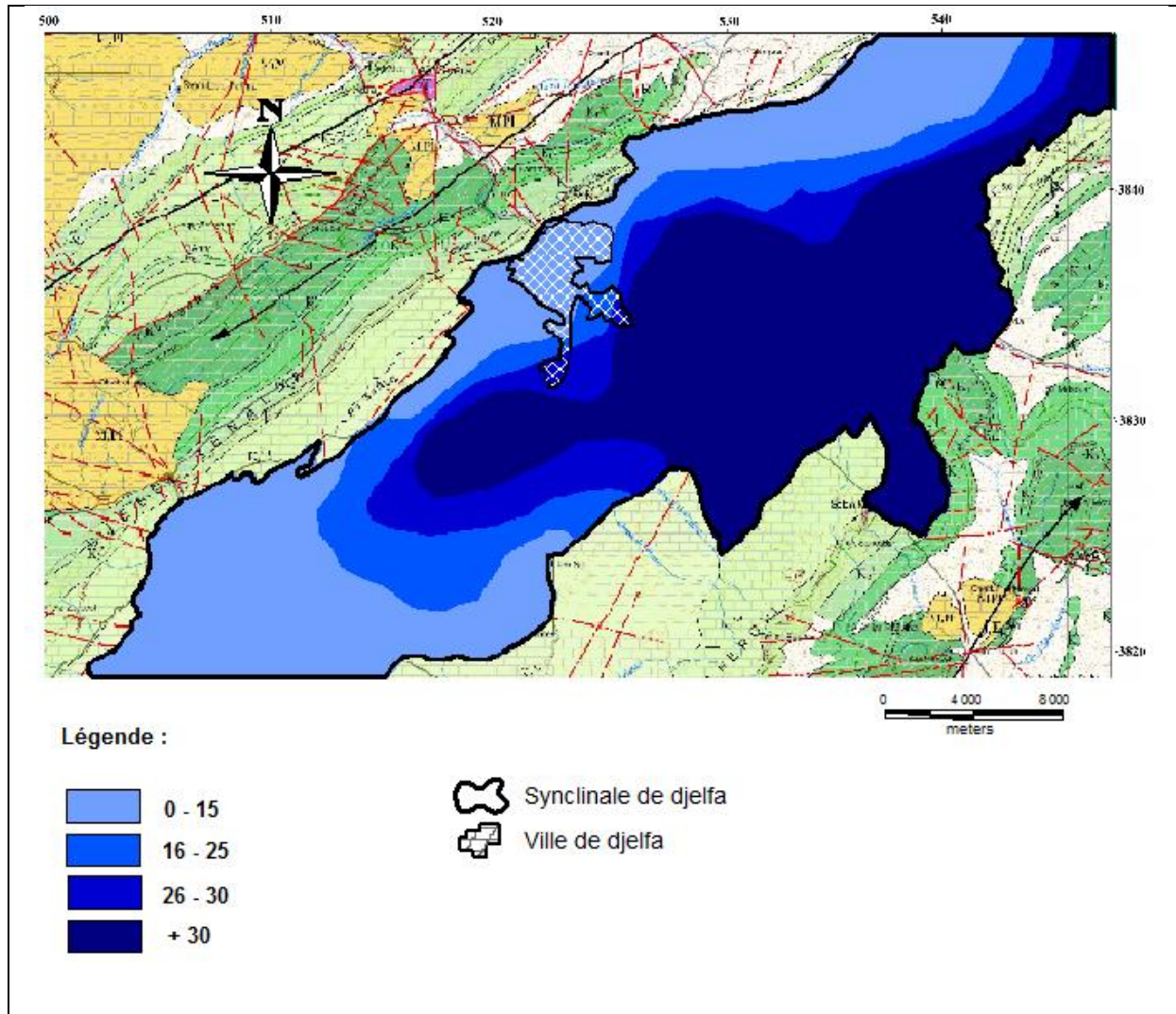


Figure V- 4 : Carte de répartition de la profondeur de la nappe

Les indices ainsi calculés ont permis de dresser la carte de répartition des valeurs de la profondeur de la nappe (Figure V-04). Cette carte démontre que les forts indices (> 30) se localisent dans la partie Sud-Ouest du synclinal de Djelfa, alors que les faibles valeurs de cet indice (< 15) se répartissent sur la majorité de la nappe et se localisent du Sud Est vers le Nord-Ouest.

V. B. 8.2- 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.

Tableau V- 7 : Côtes et poids DRASTIC du paramètre recharge efficace de la nappe (R)
 (Benslimane et Rahmoune 2008 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019)

Recharge efficace de la nappe(R)		
Intervalle	Côte	Poids
0- 5	1	4
5- 10	3	
10- 18	6	
18- 25	8	
25et 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. Deux valeurs peuvent donc être généralement employées pour toutes les aires de protection.

Tableau V- 8 : Cotation du paramètre recharge efficace de la nappe (R)

Recharge efficace(R)			
Intervalle	Côte	Poids	Indice
5- 10	3	4	12
10 - 18	6	4	24

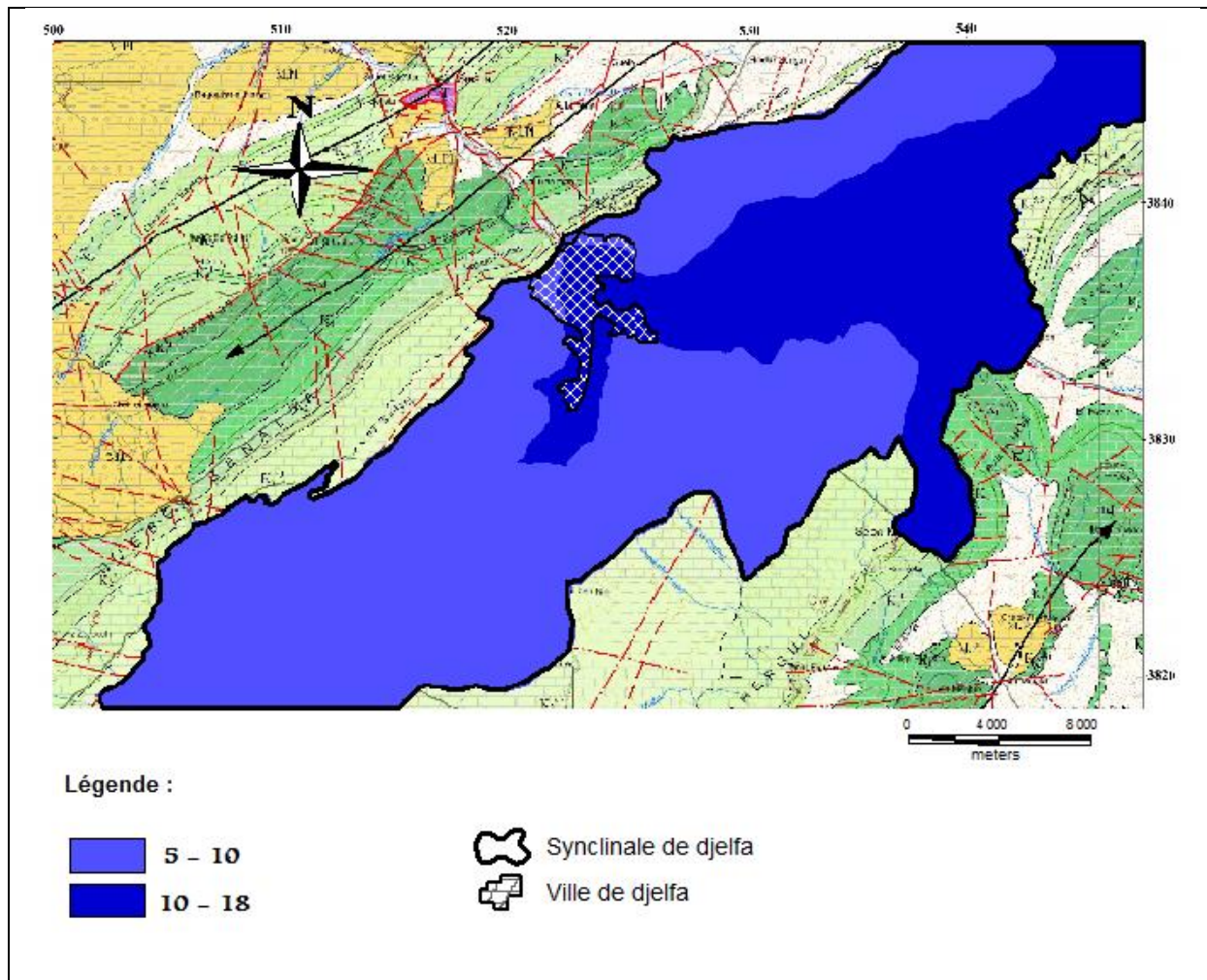


Figure V- 5 : Carte de répartition des valeurs de la recharge efficace de la nappe.

La carte représentant la recharge de la nappe (Figure V-05) montre un indice égal à 12 dans la partie Nord Est du synclinal, et une cote de 6 au secteur Sud-Ouest de la nappe Mio-Pliocène.

V. B.8.3- 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.

Tableau V- 9 : Côtes et poids DRASTIC du paramètre nature du milieu aquifère (A)
 (Benslimane et Rahmoune 2008 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019)

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 méthode DRASTIC permet de calculer un indice de l'ordre de 18 pour le premier type de matériau et de 24 pour le second.

Tableau V- 10 : Cotation du paramètre nature du milieu aquifère (A)

Nature du milieu aquifère(A)			
Type d'aquifère	Côte	Poids	Indice
Lits de grés et calcaire.	6	3	18
Sable et gravier	8		24

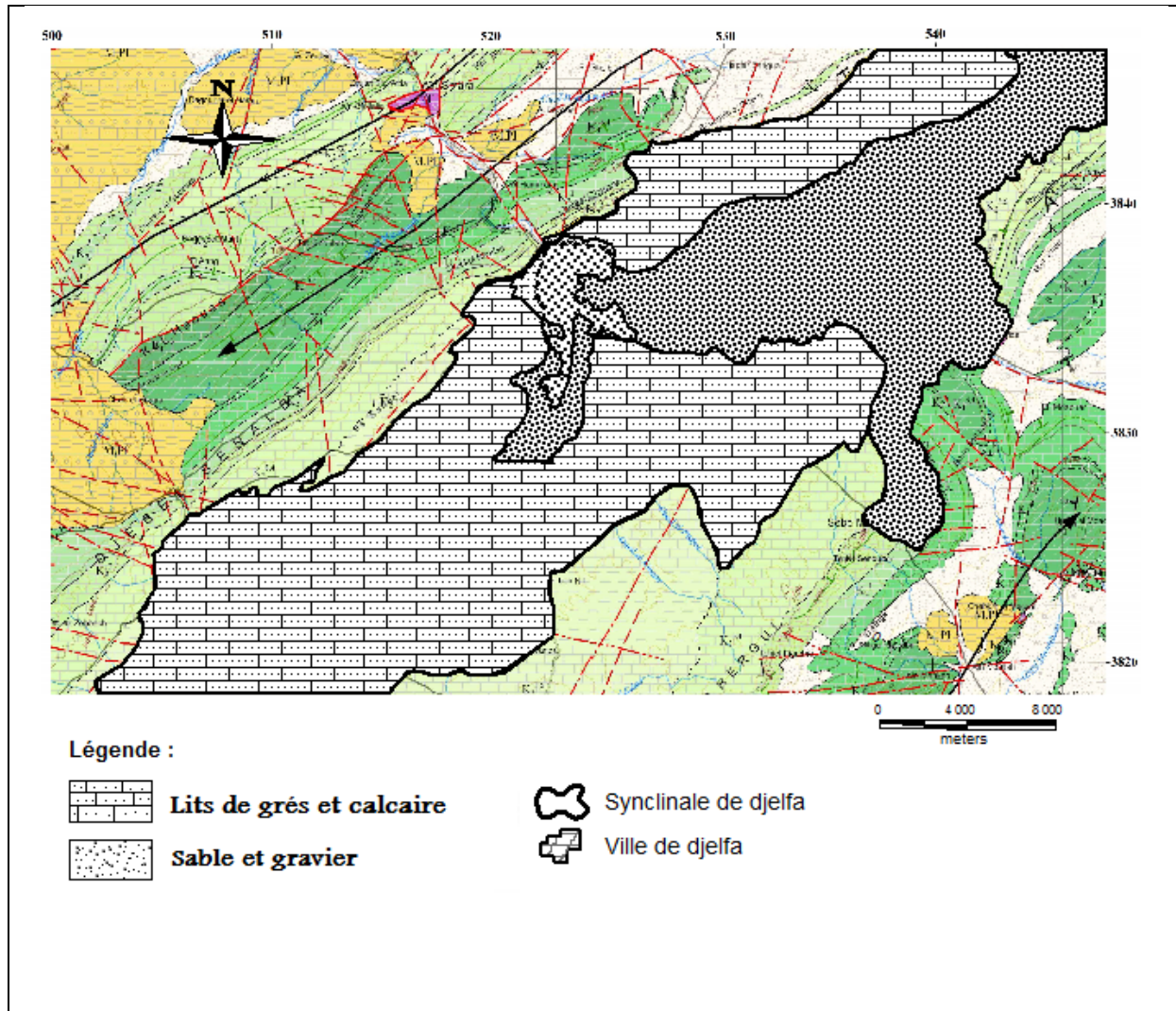


Figure V- 6 : Carte de la Nature du milieu aquifère

Son identification a été basée sur la carte géologique de la région d'étude. L'analyse de cette carte démontre la présence de deux types de matériaux, le premier constitué par un mélange de sable, de gravier et d'argile se situe dans la partie centre et Nord-Est de notre aquifère et le second type se constitue par un mélange d'argile, de conglomérats et du calcaire situé dans le reste de l'aquifère (Figure V-06).

V.B.8.4. Type de sol (S) :

La nature du sol a un impact considérable sur la contamination de l'aquifère par les polluants provenant de la surface. Elle peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers l'aquifère.

Plus le sol est riche en argile ou limon, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande

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.

Dans notre cas, vu le manque de la carte pédologique, la carte de la nature du sol a été réalisée sur la base de la carte géologique de la région de Djelfa (1/200.000).

Tableau V- 11 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre type de Sol (S) (Benslimane et Rahmoune 2008 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019)

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 V-12

Tableau V- 12 : Cotation du paramètre type de Sol (S)

Type de Sol (S)			
Nature du sol	Côte	Poids	Indice
Sable	9	2	18
Sol mince	10		20
Limon argileux	3		6

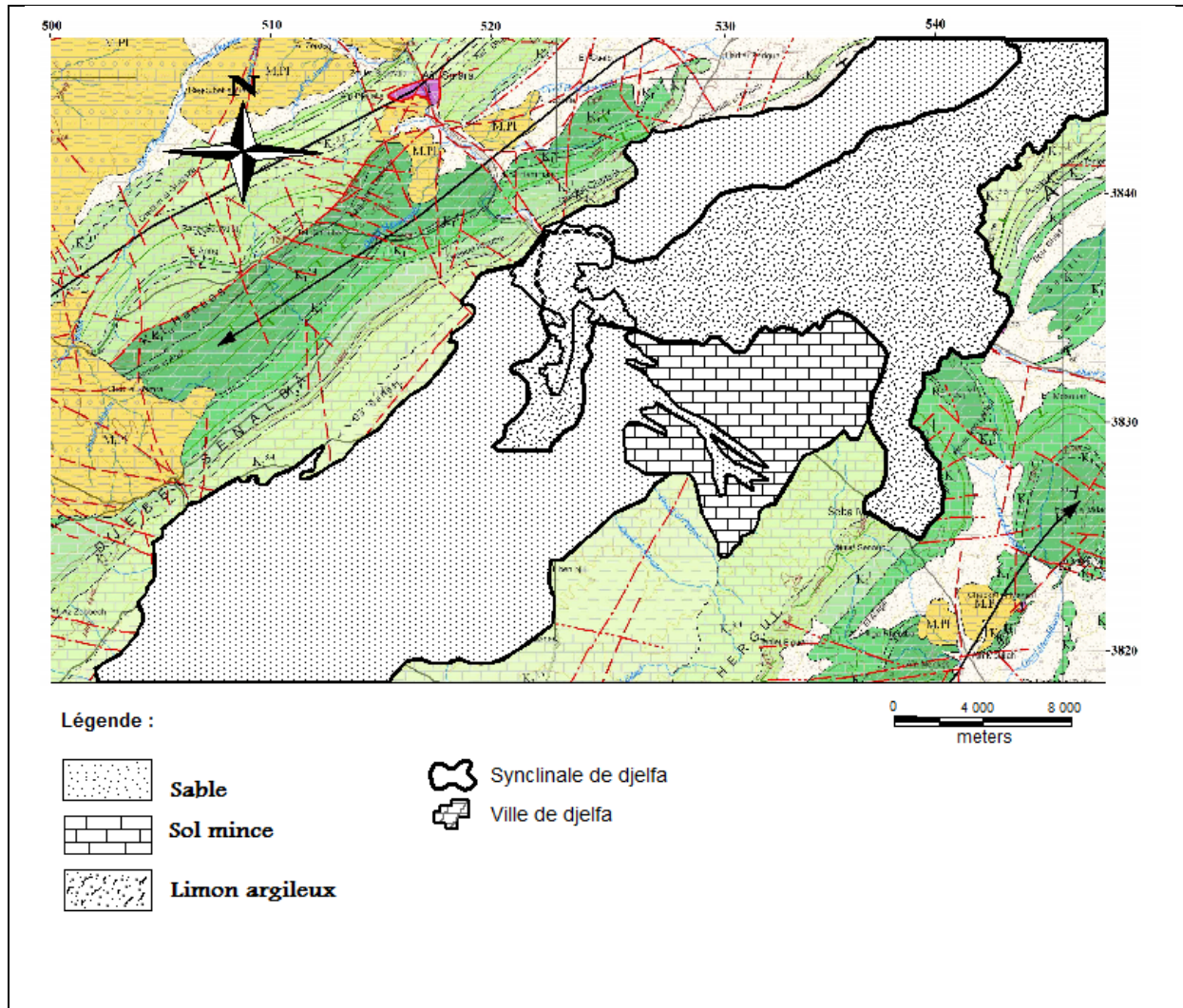


Figure V- 7 : Carte du type de sol.

Trois zones ont été sélectionnées en fonction de leur nature texturale du sol, d'où des poids et cotes correspondantes ont été attribués (Figure V-07).

V. B.8.5- Topographie (T) :

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente 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.

Tableau V- 13 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre topographie (T) (Benslimane et Rahmoune 2008 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019).

Topographie (T) (%)		
Intervalle	Côte	Poids
0-2	10	1
2-6	9	
6-12	5	
12-18	3	
Plus de18	1	

Le système de cotation attribué à la topographie est présenté au tableau V-14.

Tableau V- 14 : 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

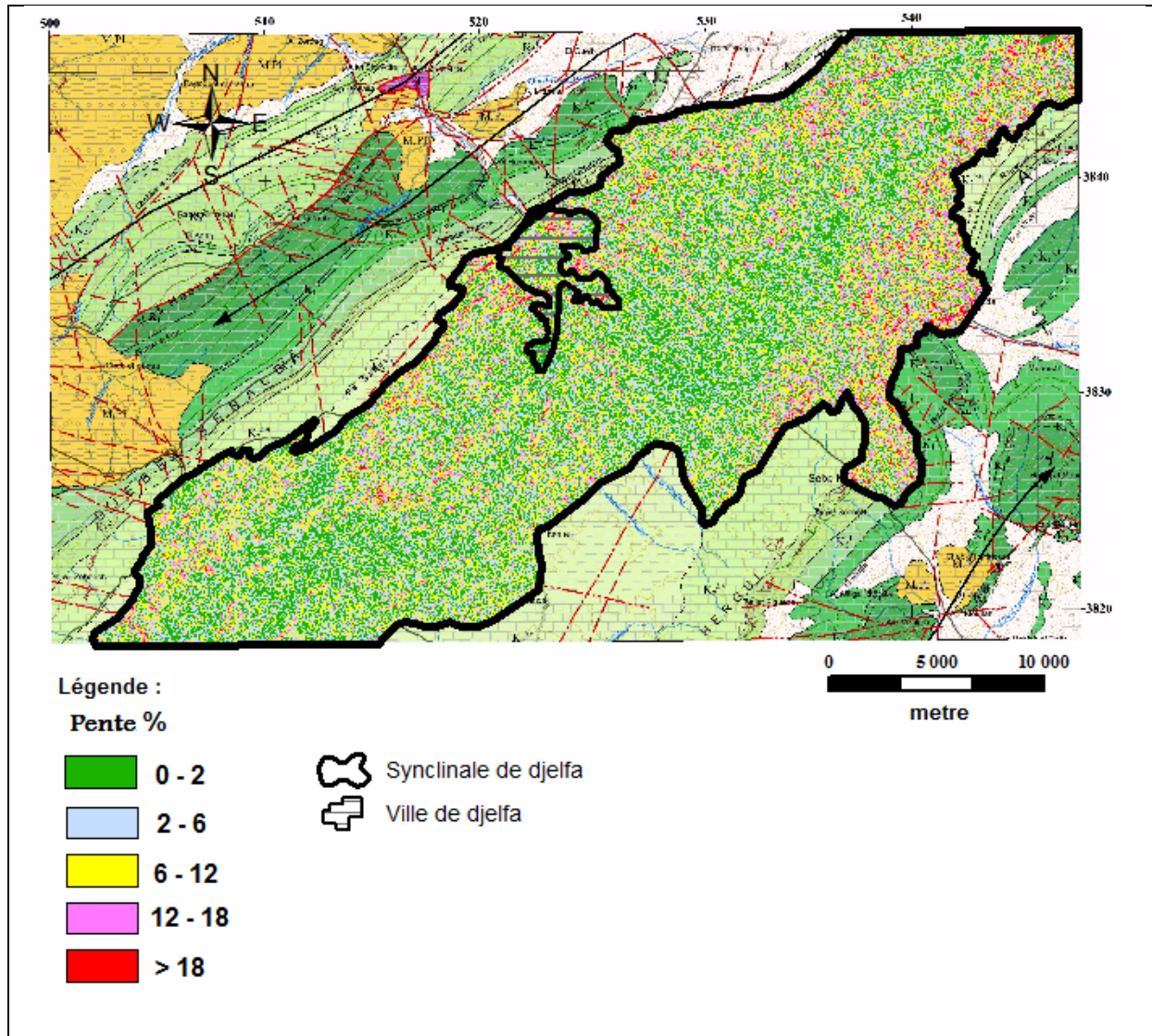


Figure V- 8 : Carte de la topographie de la nappe

La carte des pentes de la surface de la zone du synclinal a été réalisée sur la base de la carte MNT (téléchargée gratuitement sur des sites internet). Trois classes des pentes ont été déduites. Les pentes caractéristiques du Synclinal de Djelfa sont variées comme suites:

- 1- Pentes entre 0-2 % ont une cote de l'ordre de 0 ;
- 2- Pentes entre 2-6 % ont une cote de l'ordre de 9 ;
- 3- Pentes entre 6-12 % ont une cote de l'ordre de 5 ;
- 4- Pentes entre 12-18% ont une cote de l'ordre de 3 ;
- 5- Pentes plus de 18% ont une cote de l'ordre de 1.

V. B. 8.6- 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.

Tableau V- 15 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre impact de la zone vadose (I) (Benslimane et Rahmoune 2008 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019).

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

Le calcul permet d'avoir deux valeurs pour l'indice du paramètre « I », une valeur l'ordre de 30 pour les formations de mélange de sable, de gravier et d'argile, et une valeur de l'indice de 40 pour le mélange de sable et gravier et de conglomérats.

Tableau V- 16 : 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
Mélange de sable et gravier et de conglomérats	8		40

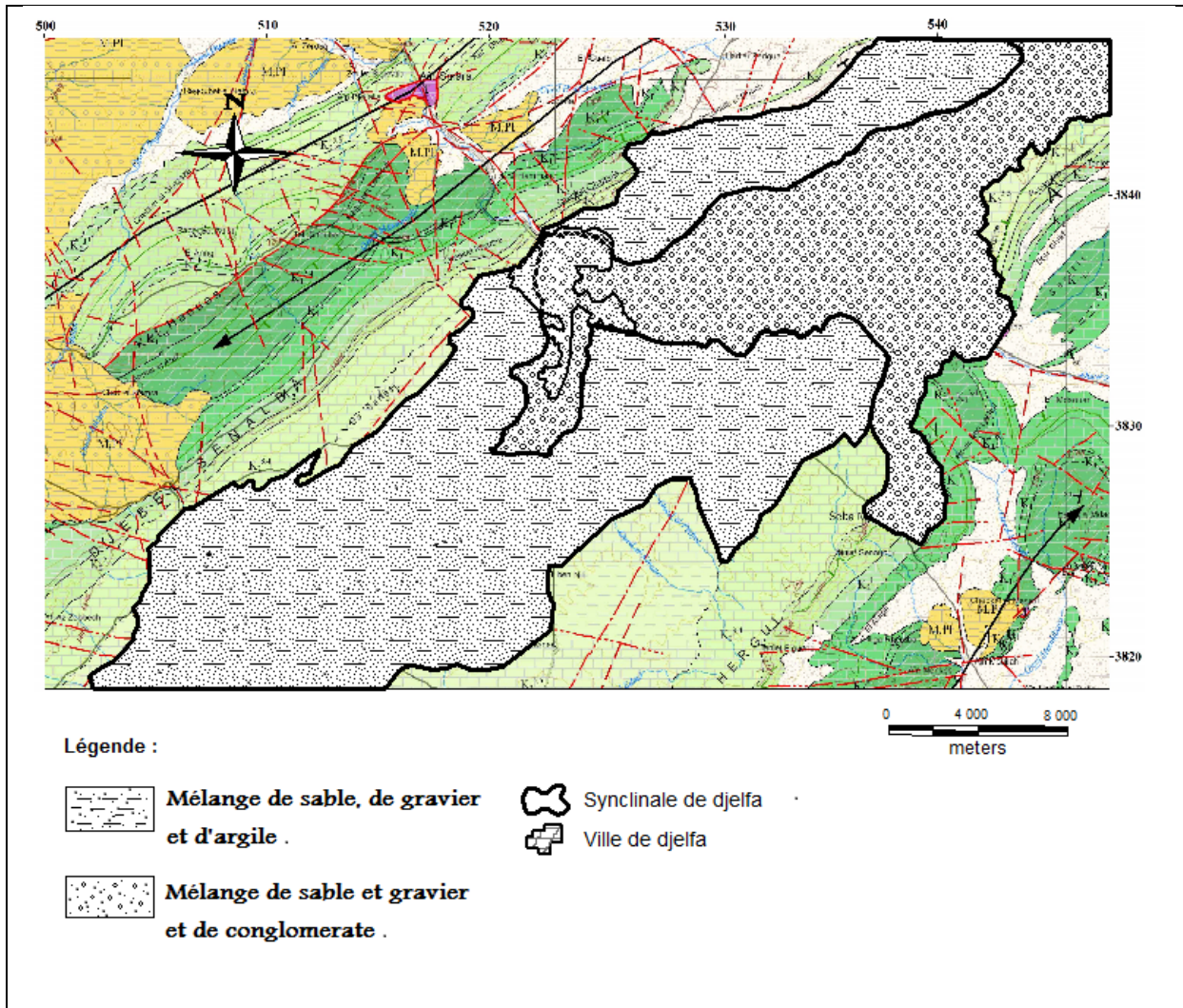


Figure V- 9 : Carte de la zone vadose.

Ce paramètre a été déterminé sur la base la carte géologique de Djelfa, en absence des coupes litho-stratigraphiques des forages existant dans la région d'étude.

La zone non saturée de l'aquifère Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa est composée de deux formations géologiques :

1. la première par un mélange de sable, de gravier et d'argile (Quaternaire Holocène) localisée dans la partie centre et Nord-est de notre nappe aquifère (alluvions actuelles),
2. la deuxième par un mélange d'argile, de conglomérats et du calcaire lacustre (Mio-Pliocène) au Sud Est et à l'extrémité Nord de notre nappe aquifère et une croûte calcaire et des dépôts quaternaires anciens (Quaternaire Qc) située dans la partie Sud.

V. B.8.7- 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. Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

Tableau V- 17 : Côte et Poids DRASTIC du paramètre conductivité hydraulique (C)
(Benslimane et Rahmoune 2008 ; Boudiaf et Kamel Hayat 2019)

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 de82	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 & Cherry 1979** (Figure V-10), dans notre cas, on a utilisé cet 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.

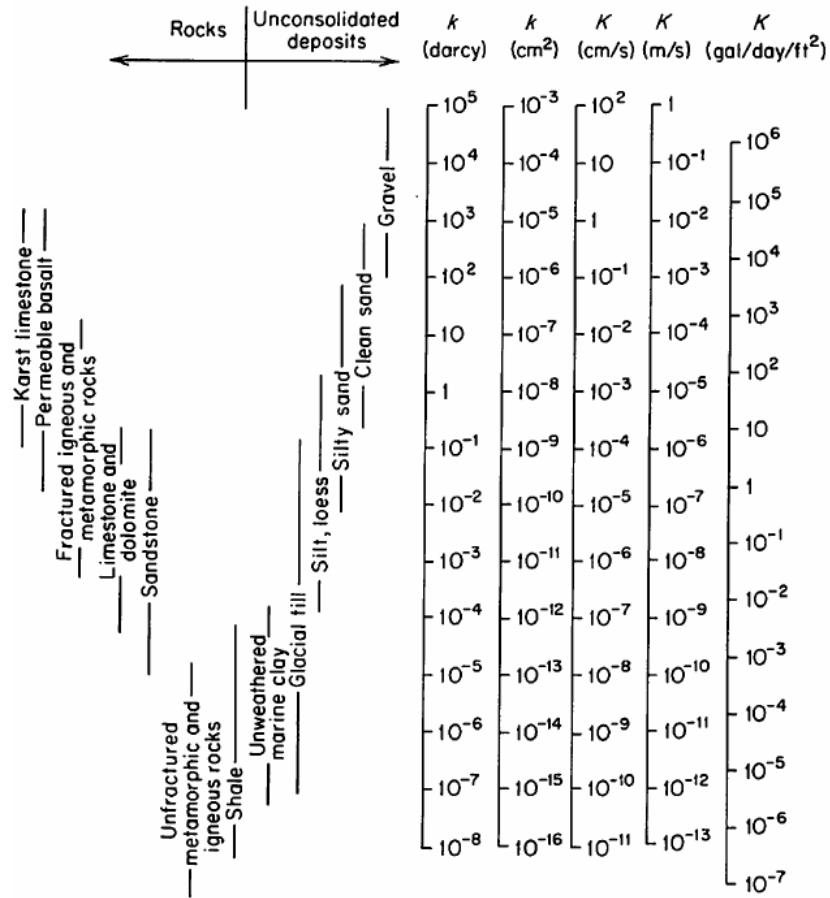


Figure V- 10 : Abaque de Freeze et Cherry représentant la gamme des valeurs de perméabilité (Freeze& Cherry 1979)

Le système de notation et de calcul de l'indice de ce paramètre est illustré dans le tableau V-18.

Tableau V- 18 : Cotation du paramètre conductivité hydraulique (C).

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

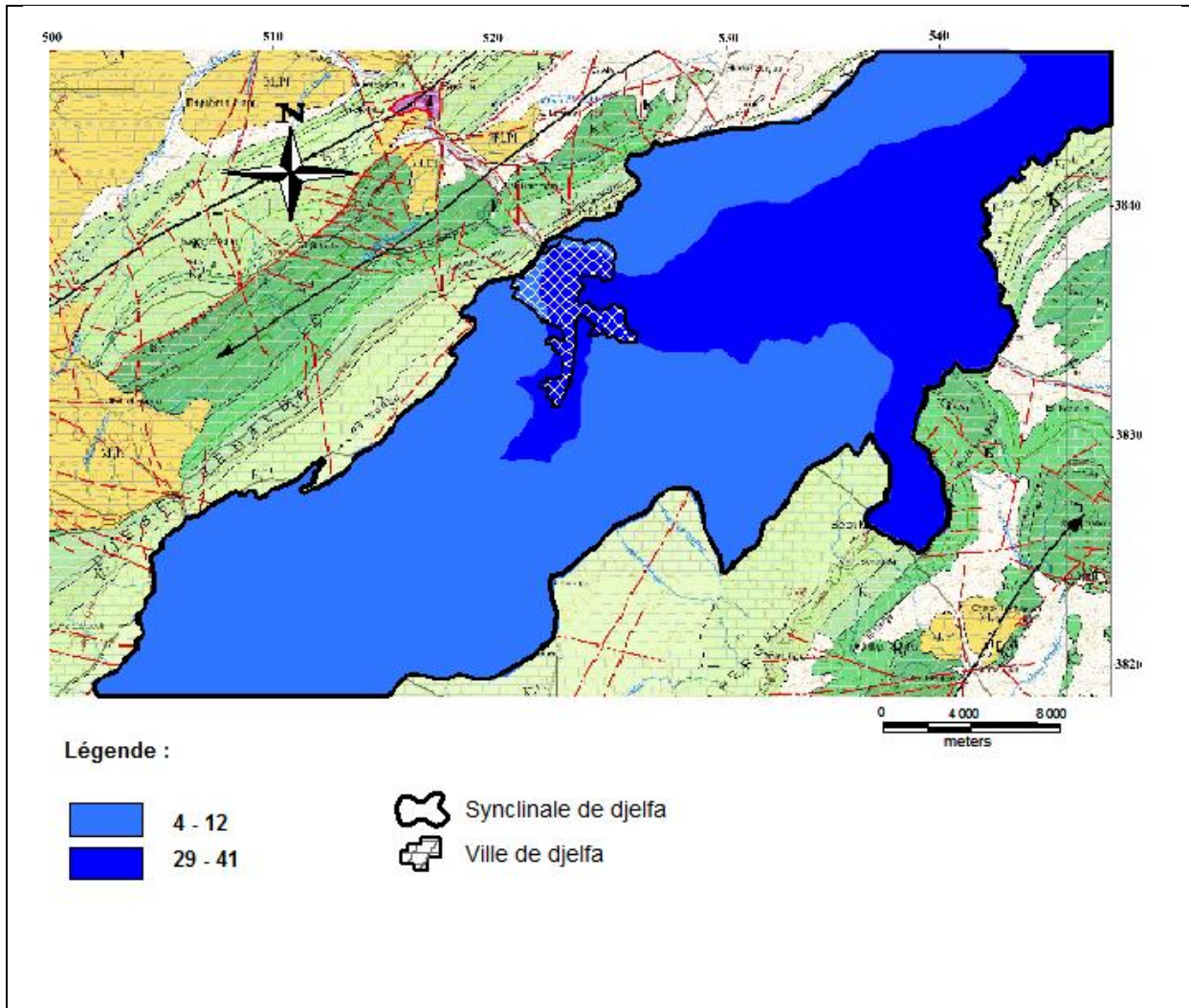


Figure V- 11 : Carte de répartition des valeurs de la conductivité hydraulique.

Les conductivités hydrauliques les plus élevés se localisent dans la partie centrale et au Nord-est où l'aquifère est constituée par un mélange de sable, de gravier et d'argile (Figures V-11).

V.B. 8. 8. 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 cote 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.

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 V-19).

Tableau V- 19 : 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

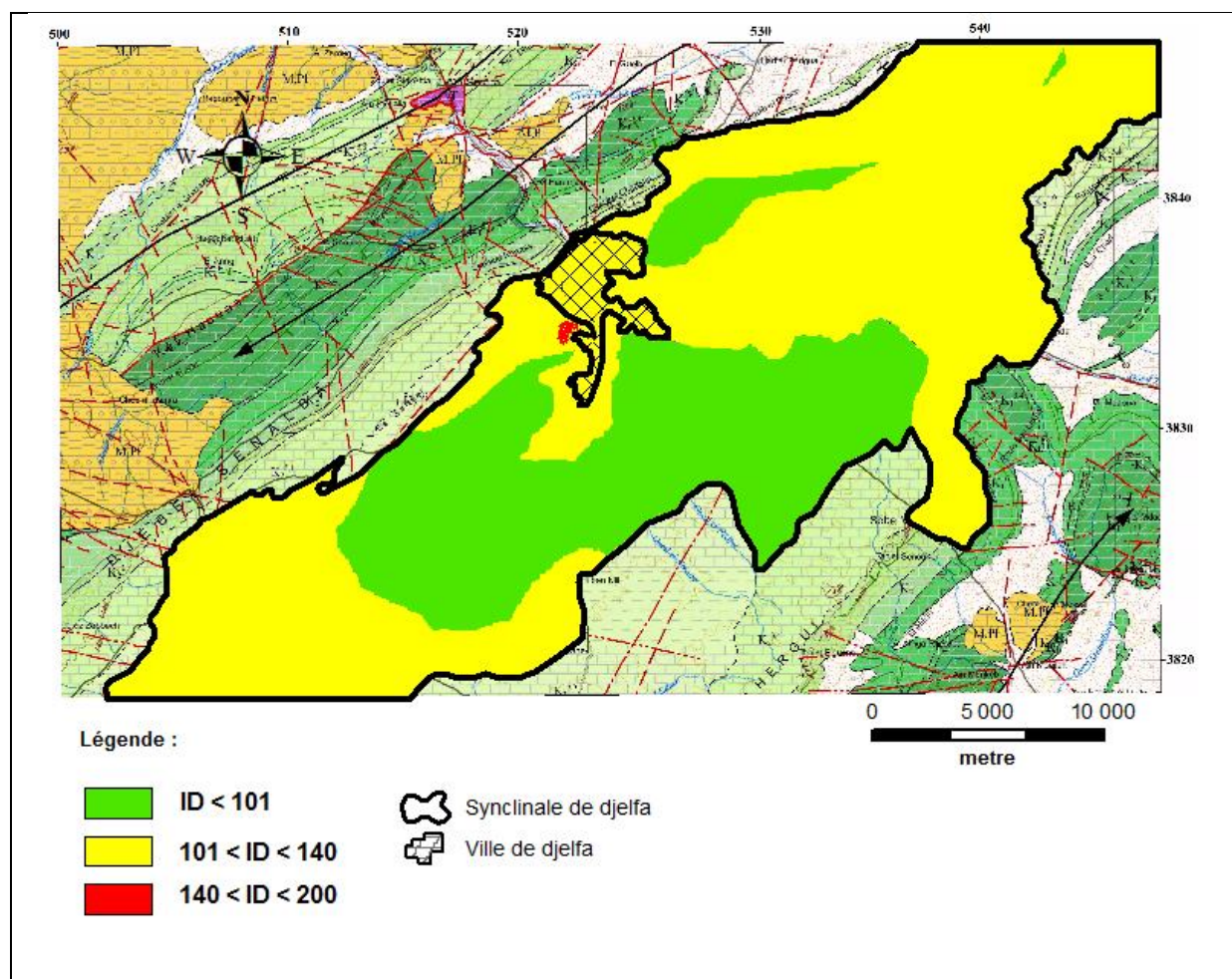


Figure V- 12 : Carte de répartition des valeurs de l'indice de vulnérabilité

Tableau V- 20 : Classes de vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe Mio-plio-quadernaire du Synclinale de Djelfa.

Degré de vulnérabilité	Classes de l'indice de vulnérabilité	Superficies (%)
Faible	ID<101	42.25 %
Moyen	101< ID<140	54.93 %
Elevé	140<ID>200	2.82 %

Les indices de vulnérabilité, ainsi déterminés, d'après la méthode DRASTIC varient entre 71 - 142. 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 V-12) :

- Une zone a faible vulnérabilité localisée au Sud-ouest et au Nord-Est. Elle se caractérise par une vulnérabilité faible (indice ID < 101) et occupe une superficie d'environ 42.25 %.
- Une zone moyennement vulnérable localisée au Sud-Ouest et au Nord-Est. Elle est caractérisée par une vulnérabilité moyenne (indice 101 < ID < 140) et occupe une superficie d'environ 54,93%.
- Une zone de forte vulnérabilité à la pollution localisée à l'Ouest de la ville de Djelfa, d'une superficie minime comparée aux deux autres zones (2.82 %). Elle représente l'endroit le plus vulnérable de toute la nappe, avec des indices entre 140 < ID < 200.

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, et basée sur les sept indices estimés et calculés, a permis de tracer une carte de vulnérabilité sectorielle des eaux souterraines à la pollution. Cette carte a fait ressortir l'existence de trois classes de vulnérabilité :

- Une zone de faible vulnérabilité, située dans la zone Sud-ouest et au nord-est ;
- Une zone de vulnérabilité moyenne, située dans les parties Sud-ouest et Nord-est où les potentialités hydriques sont considérables.
- Une zone de vulnérabilité élevée, localisée au sud-ouest de la ville de Djelfa d'une superficie minime.

Cette carte peut constituer un document d'aide sur le plan de gestion des ressources en eaux souterraines du synclinal de Djelfa, surtout de point de vue prévention contre des éventuelles pollutions de surface.

Conclusion générale :

La présente étude, qui a porté sur le synclinal de Djelfa, situé dans le centre Nord de L'Algérie, a abouti aux conclusions suivantes :

- Les caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'oued Djelfa-Mellah

montrent qu'il s'agit d'un bassin allongé, d'altitude moyenne de 1210 m, et d'indice de pente global faible, ce qui lui confère un écoulement lent des eaux superficielles.

- Le synclinal de Djelfa est soumis à un climat continental semi-aride, avec un hiver relativement humide très froid et un été chaud et sec, avec des précipitations annuelles de l'ordre de 334.14 mm. Le calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite a révélé que l'évapotranspiration réelle moyenne est de l'ordre de 310.23 mm, mobilisant 92,84 % des précipitations. Le ruissellement ne bénéficie également que de 5,65% de ces précipitations. Cette valeur est faible, mais vu la topographie (peu accidentée, mis à part les deux flancs), l'infiltration ne présente que 1,50 % de ces dernières mais il faut tenir compte également des infiltrations engendrées par la fonte des neiges. Notons qu'une partie du ruissellement va rejoindre le flux infiltré après un certain temps de ruissellement.

L'étude géologique concernant le synclinal nous permis de reconnaître les formations aquifères qui sont :

- Le Barrémien (gréseux) ; l'Albien inférieur (gréseux) et supérieur (calcaire) ;

le Turonien (calcaire) ; le Mio-Plio-Quaternaire (calcaro-conglomératique).

- Les sources d'alimentation de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire sont:

La première, c'est la précipitation ; la deuxième source d'alimentation se fait soit par le ruissellement direct soit par l'infiltration par l'intermédiaire des failles à partir des deux flancs du synclinal. L'étude piézométrique de cette nappe a montré un écoulement qui s'effectue d'une manière générale suivant l'axe du synclinal, du SW vers le NE.

- Les exutoires de la nappe sont : l'oued principal Djelfa-Mellah ; l'axe de drainage de direction WE, au niveau de la région de Maalba.

- L'étude hydrochimique a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines, donc les facteurs naturels et anthropiques qui influent sur cette qualité.

Plusieurs modes et outils d'interprétation ont été utilisés (cartographies, diagrammes, statistiques, ...etc) qui ont montré :

- L'influence de la lithologie des formations sur l'acquisition de la minéralisation et sur les types de faciès. En effet, les faciès chimiques dominants sont celles bicarbonatés calciques et sulfatés calciques.

-L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire à la contamination a été évaluée en utilisant la méthode DRASTIC combiné avec les logiciels des systèmes d'information géographique (Mapinfo, ArcGis), sept paramètres de diverses sources ont été intégrés et cartographiés, à savoir, la profondeur des eaux souterraines, la recharge efficace de l'aquifère, la nature de milieu aquifère, le type de sol, la pente

Topographique, l'effet de l'autoépuration de la zone vadose, et finalement la conductivité hydraulique de l'aquifère.

- Ces sept paramètres ont été calculé et cartographié, exprimés en couches thématiques SIG. La carte de vulnérabilité est obtenu par la superposition des ces derniers qui représentent les sept paramètres caractérisant la méthode DRASTIC.

Les résultats obtenus font apparaître au niveau de l'aquifère du Djelfa sont:

- Faible, dans la zone Sud-ouest et au nord-est caractérisée par de faibles potentialités hydrique.
- Moyen, dans la zone les parties Sud-ouest et Nord-est présente des potentialités hydriques considérables.
- Elevé, localisé au sud-ouest 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.

Recommandations :

Au terme de cette étude, nous recommandons :

- D'éviter l'implantation des ouvrages d'A.E.P au niveau des berges des oueds, car ce la produirait un abaissement du niveau piézométrique dans l'ouvrage et un écoulement des eaux de l'oued vers la nappe, ce qui amènerait une modification de la qualité des eaux.
- De mettre en fonctionnement l'ensemble des stations climatiques sans interruption, pour un meilleur suivi Hydroclimatologique de la région.
- De faire des campagnes piézométriques en hautes et basses eaux chaque année afin de suivre des fluctuations saisonnières de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.
- De demander aux décideurs des entreprises industrielles de collecter leurs eaux usées vers les stations d'épuration déjà existantes, afin de réduire l'impact des rejets sur les nappes d'eau souterraines en contact avec l'Oued Djelfa-Mellah.
- Création d'une banque des données et d'information pour la gestion et la cartographie de la vulnérabilité et développé une politique de protection des zones vulnérables ; réglementation des activités industrielles, agricoles et urbaines.
- De contrôler l'utilisation des engrais pour éviter une éventuelle pollution par les nitrates.
- A la fin ce travail il est recommandé d'essayer de définir la vulnérabilité par d'autres méthodes et réaliser des cartes par d'autre logiciels. Il est bien préconisé aussi de vérifier la vitesse de filtration de pollution et le temps probable pour la contamination de la nappe étudiée.

Références bibliographiques:

- **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.
- **Aitaissa (B) , Hamimi (A) , 2002** « contribution à l'étude hydrogéologique du synclinal d'Ain El Ibel-Sidi Makhoulouf (Wilaya de Djelfa) » .FSTGAT.USTHB.
- **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>.
- **ANRH,** «relevés du station de Djelfa».période1975-2014 .
- **Arezki (S), Ammar (G) , 1982** « étude hydrogéologique du flanc Nord du synclinal deDjelfa » .Mem.ing.DRE.Djelfa .
- **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'Ingénierat, Univ. Ammar Telidji-Laghoutat, 111p.
- **Bentekhici N., 2015.** Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la plaine de Sidi Bel Abbas, Apport des données de télédétection et les SIG. Acte de la Conférence Francophone Esri, 14p.
- **Cherrak, A. Snaoui, A, (1983).** Etude hydrogéologique du flanc nord du Synclinal de Djelfa. Mémoire de fin d'études. USTHB.
- **Deramchi (M), 1999** « synthèse des études et exploitation des données existantes sur le synclinal de Djelfa ». ANRH.Djelfa.
- **Djelbane,M. M'zara,M.(2015).** Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes souterraines par la méthode DRASTIC cas la nappe du Djelfa.Mem.Master.Univ.Djelfa.

- **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.
- **Engel B. et al, (1996).** Estimating groundwater vulnerability to nonpoint source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. In : Kavar and Nachtnebel HP (eds) Proc hydro Gis' 96 : Application of Geographic information system in Hydrology and water Ressources Manager, IAHS Publication.
- **El Kayssi, Y., Hilali, M., Kouz, T., & Kacimi, I. (2020).** Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par la méthode DRASTIC: cas de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc). Revue des Sciences de l'Eau/Journal of Water Science, 32(4), 317-334.
- **Freeze R. A. & Cherry J. A., 1979.** Groundwater. Ed. Prentice-Hall, New Jersey, 604p.
- **Gheisari, N. (2017).** Groundwater vulnerability assessment using a GIS-based modified DRASTIC model in agricultural areas (Doctoral dissertation, Université d'Ottawa/University of Ottawa).
- **Kamel, H F. Boudiaf, Z, (2019).** Vulnérabilité des ressources en eaux souterraines à la pollution, cas de la nappe du Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa. Mem. Master. Univ. Djelfa.
- **Margat J, (1968).** Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]. Bases de la cartographie, (Doc.) 68 SGC 198 HYD, BRGM, Orleans, France.
- **Oumar, A A. Berbara, F (2014).** Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines et de l'analyse de sensibilité, en utilisant un modèle GIS- Based SINTACS, plaine de Khemis Miliana. Mem. Master. Univ. Khemis Miliana.
- **ROMAIN DUCOMMUN (2010):** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain (Thèse présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel Pour l'obtention du grade de docteur).

- **VRBA.J et ZOPOROZEC .A** : Guidebook on mapping Groundwater vulnerability, IAH, International Contribution to hydrogeology, Vol. 16, Heise, Hannover,131 p.

SITE WEB :

<https://www.earthexplorer.usgs.gov>.

http://wikydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Pollution_eaux_souterraines.

<https://www.abhsebou.ma/domaines-dactivites>

Annexes

Point d'eau	coordonnée U.T.M (X) en m	coordonnée U.T.M (Y) en m	Altitude (Z) en m	Niveau statique en m	Côte piézométrique (m)
FMH1	539063	3843035	1153	12,4	1140,6
FMH2	538673	3834824	1201	48,57	1152,43
FMH3	540329	3834507	1193	33,21	1159,79
FMH4	538777	3839713	1154	50,17	1103,83
FMH5	541743	3839165	1188	93,83	1094,17
FMH6	538480	3830993	1231	45,4	1185,6
PMH1	537920	3842493	1153	10,1	1142,9
PMH2	539062	3843036	1153	14,7	1138,3
PMH3	544778	3844828	1134	19,35	1114,65
PMH4	543925	3845592	1129	19,2	1109,8
PMH5	544181	3844689	1131	20,8	1110,2
PMH6	544224	3843861	1144	29,45	1114,55
PMH7	543735	3843847	1151	24,35	1126,65
PMH8	543732	3843845	1151	20,44	1130,65
PMH9	542583	3844066	1141	11	1130
PMH10	542176	3843233	1143	20,25	1122,75
PMH11	541080	3842904	1136	16,05	1119,95
PMH12	540225	3842831	1137	12,25	1124,75
FMA1	531436	3838849	1165	39,12	1125,88
FMA2	530900	3837101	1175	48,13	1126,87
FMA3	534256	3839154	1163	44,7	1118,3
FMA4	530185	3832513	1263	46,83	1216,17
FMA5	527648	3833941	1199	51,79	1147,21
FMA6	528811	3834445	1184	44,5	1139,5
PZ MA	530392	3832192	1179	36,43	1142,57
PMA1	533443	3840053	1166	23,15	1142,85
PMA2	533961	3839193	1164	25,75	1138,25
PMA3	535066	3839686	1159	17,48	1141,52
PMA4	532527	3836982	1177	17,25	1159,75
PMA5	531671	3839356	1170	19,43	1150,57
PMA6	533913	3836996	1168	52,63	1115,37
FMA7	533913	3836996	1168	52,63	1115,37
FD1	526113	3837024	1158	19,4	1138,6

FD2	526777	3836907	1170	48,05	1121,95
FD3	525724	3830770	1191	31,83	1159,17
FD4	522242	3831463	1169	28,99	1140,01
FD5	522297	3831924	1179	35,64	1143,36
FD6	523501	3834560	1165	9,26	1155,74
PD2	525515	3831934	1183	27,93	1155,07
PD3	521685	3827644	1187	30,23	1156,77
PD4	521627	3833072	1183	21,08	1161,92
PD5	523469	3837084	1168	4,82	1163,18
FR1	527391	3823793	1250	37,28	1212,72
FR2	528394	3826366	1251	51,64	1199,36
FR3	523839	3820887	1278	51,83	1226,17
PR1	522177	3818195	1220	9,65	1210,35
PR2	522311	3824038	1224	11,05	1212,95
PR3	520816	3826318	1220	29,25	1190,75
PR4	524830	3821141	1264	30,16	1233,84
PR5	524168	3819774	1266	33,6	1232,4
FMS1	513506	3824042	1260	18,62	1241,38
FMS2	517424	3829658	1228	46,22	1181,78
FMS3	515145	3827877	1246	35,95	1210,05
FMS4	518471	3827390	1202	33,08	1168,92
PMS1	513426	3827851	1206	14,5	1191,5
PMS2	511945	3825330	1250	19	1231
PMS3	507006	3826251	1250	7,95	1242,05
PMS4	518187	3832888	1246	9,35	1236,65
PMS5	519438	3834592	1222	5,27	1216,73
PMS6	513446	3821812	1234	12,41	1221,59
PMS7	511723	3824620	1245	6,73	1238,27
PMS8	511723	3824620	1245	8,08	1236,92
PMS9	512411	3825405	1239	18,02	1220,98
PMS10	516734	3830411	1230	8,33	1221,67

Tableau : Résultat depiézométrie.

Station de Djelfa		sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jun	juil	aoù	Annuelle
1975	T°C	20.3	13.6	7.1	4.8	3.8	4.9	6.6	11.1	14.7	20.4	26.7	24	13.17
1976	/	18.9	12.1	6.6	7	3.3	4.8	6	10.9	15.4	12.9	24.3	24.4	12.22
1977	/	19.9	15.1	9.3	7.6	5.8	7.9	10.5	13	15.3	20.4	18.3	23.5	13.88
1978	/	20.5	12.2	6.7	8.7	3.9	9	8.5	11.6	15.2	22.3	25.5	26.4	14.21
1979	/	18.8	15.6	6.9	6.1	7.6	6.9	8.4	10	16.8	22.9	23.2	25.5	14.06
1980	/	21.4	13.3	9.4	2.3	4.9	7	8.3	10.8	13.9	22.5	25.2	36.5	14.63
1981	/	20.4	16.6	9	7.8	2.9	5.4	11.8	12.8	14.8	23.4	25.6	23.8	14.53
1982	/	21.3	13.9	8.3	3.7	5.9	6.1	8.6	10.9	16.8	24.7	27.6	26.2	14.50
1983	/	21.4	15.3	11.3	5.3	3.6	5.5	8.9	13.9	17.2	22.9	26.8	25.8	14.83
1984	/	20.6	13.6	8.9	5	4.77	4.8	7.4	13.9	13.9	22.9	26.9	25.1	13.98
1985	/	20.1	14.5	11.1	5.6	3.8	9.3	6.8	13.7	15.5	24.9	27.6	25.9	14.90
1986	/	20.6	14.9	8.1	4.6	4.5	6.6	7.7	10.8	20	22.1	24.7	26.3	14.24
1987	/	22.9	17.1	8.5	7.7	4.1	6.2	9.4	15.2	17	23.7	26.2	27.2	15.43
1988	/	19.6	15.9	10.5	4.1	6.6	6.2	9	13.5	17.9	21.6	27.4	26.5	14.90
1989	/	21.5	15.7	11.4	8.9	3.8	6.2	10.3	10.9	17.4	20.9	26.1	25.8	14.91
1990	/	23.9	16.2	9.5	4.2	4.8	8.7	9.9	11.3	16.9	24.5	25.5	24.5	14.99
1991	/	21.5	13.6	8.4	4.2	3.9	4.6	9.1	10.1	13.9	22.5	26.8	25.4	13.67
1992	/	21.6	14.8	9.2	5.8	3.3	5	7.2	10.5	15.8	18.6	23.8	25.4	13.42
1993	/	19.7	16.2	9.3	5.8	3.6	4.3	8.6	11.4	17.4	24.5	27.2	26.3	14.53
1994	/	19.8	14.6	10.3	6.1	5.3	7.5	10.9	10.8	10.4	16	28.2	28	13.99
1995	/	19.6	15	10.7	8.3	5	8.6	8.3	10.8	19.1	22.3	27.1	25.4	15.02
1996	/	18.4	13	9.6	7	6.7	4.3	8	10.9	15.2	19.1	24.6	25.4	13.52
1997	/	19.1	14.5	9.5	6.3	5.4	7.6	8.4	11.1	17.7	23.3	26.3	25.8	14.58
1998	/	22	12.4	9	4	4.8	6.4	8.8	12.4	15.1	23.2	27.6	28.5	14.52
1999	/	21.5	17.5	7.5	4.9	4.6	3.8	8.4	13.4	20.4	25.1	26.4	28.4	15.16
2000	/	20.5	13.2	9.7	6.8	2.2	6.5	10.5	13.3	19.3	22.5	27.4	25.2	14.76
2001	/	21.6	19.2	8.9	5.3	5.3	5.6	12.7	12.4	16.9	25.3	28	26.9	15.68
2002	/	20	15.8	9.9	7.2	4.5	7.2	10.4	12.5	17.6	24.2	25.6	24.5	14.95
2003	/	20.9	16.6	9.3	4.6	4.3	4.6	9.8	13.1	18	24.6	28.4	26.2	15.03
2004	/	20.6	17.5	7.8	5.1	5.3	8	10	11.2	13.2	22.9	26.3	26.7	14.55

2005	/	20.1	16.3	9.1	4.7	2.5	3.1	10.3	13.6	21.1	23.7	28.9	26.5	14.99
2006	/	19.5	18.4	10.7	5.9	2.7	4.5	10.5	15.5	19.9	24.5	27.4	26.1	15.47
2007	/	21.6	15.7	8.6	4.9	6.6	8.3	7.5	12.3	17.4	24.5	27.6	26.9	15.16
2008	/	21.3	14.2	7.3	4.2	6.2	7.9	9.8	14.3	17.3	22.2	27.9	26.6	14.93
2009	/	18.9	14.9	10.3	8.1	4.5	5.1	9.3	9.3	17.9	24.3	28.4	27.3	14.86
2010	/	20.9	15.2	9.7	7.5	6.6	8	10.4	13.9	15.5	22.3	28.9	26.9	15.48
2011	/	23.1	14.1	9.1	5.5	6.2	4.9	8.4	14.8	17.2	21.4	26.4	26.8	14.83
2012	/	21.2	15.8	10.7	5.7	4.2	2.2	9.2	11.5	19.3	26.1	28.6	28.3	15.23
2013	/	20.5	13.2	9.7	6.8	2.2	6.5	9.5	13.3	19.3	22.5	27.4	25.2	14.68
2014	/	22.9	17.1	8.5	7.7	4.1	6.2	10.1	15.2	17	23.7	26.6	27.2	15.53

Tableau : Température (1975-2014) Station de Djelfa

station de Djelfa		sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jun	juil	août	Annuelle
1975	p(mm)	62	17.5	54	14	17	40	46	28	51	5	18.9	17	370.4
1976	/	72	44	61	23	8	61	19	20	52	74	47	29	510
1977	/	4	4	48	29	41	9	2	13	68	17	25	12	272
1978	/	20.7	44	25	7	33	7	9	16	24	6.1	2	1	194.8
1979	/	39.7	27.1	20.4	26.9	50	67	29	28	14	4.6	1.6	47.9	356.2
1980	/	34.6	7.4	56.7	97.1	28.7	32.5	68.5	34.8	18.6	35	1.8	3.4	419.1
1981	/	73.3	12	1	33.5	6.2	45.2	36.4	67.4	5.3	7	10.6	33	330.9
1982	/	10.5	60.1	75.1	31.8	44.9	42.1	20.3	72.7	48	17.3	4.6	7	434.4
1983	/	0.7	2	17.6	11.3	35	15.5	15.2	19.6	25.6	15.5	8.6	45.7	212.3
1984	/	4.2	66.3	29.7	36.7	30.3	5	38	0.6	8.7	19	0.9	4.2	243.6
1985	/	39.6	31.7	30.8	51.9	48.1	12	65.1	1.3	59.4	13.3	9.7	0.5	363.4
1986	/	18.9	34.9	80.5	34.7	23.3	46.9	75.1	12.8	36.3	12.6	5.5	11.8	393.3
1987	/	3.7	8.6	55.1	23.4	58.5	34.4	13.6	22.7	12.4	21.8	41.4	3.1	298.7
1988	/	25.6	8.6	19.5	37.4	18.3	38	13.8	32.4	62.2	54.8	1.4	21.5	333.5
1989	/	10.6	3	41.2	18.1	13.6	8	9.1	36.1	50.4	52.6	6.5	72.4	321.6
1990	/	14.2	4	13.6	34.6	117	0.3	30	65.4	84.4	61	12.6	10.3	447.4
1991	/	32.5	117	19.5	21.6	23.5	51.7	74.2	38.8	34.5	15.7	9.4	13.1	451.5
1992	/	18.7	1.4	23.8	21.4	59.5	10.6	56.7	48.6	122	5.6	10.6	1.1	380
1993	/	25	5	19	15	8	71.1	40.2	13.5	39	12	16	27.6	291.4
1994	/	96	78	28	8	50	52	20	7	10	1	4	17	371
1995	/	13.2	49	3.9	30	46	13	50	11	6	46	6.4	13	287.5
1996	/	16	3	1	27	91.8	74	58	57	51	27	5	28	438.8
1997	/	77	11	55	17	39	5	1	87	43	9	2	45	391
1998	/	28	5	3	9	7	26	5	35	38	2	3.5	19	180.5
1999	/	25	28.7	26	68.5	61	24	25.1	9.1	3.4	13	2.6	16.6	303
2000	/	63	8	15	23.1	68.2	38.4	1	10	27	3.2	0.4	1.5	258.8

2001	/	78	28	12	17	60	12	2	3.7	3	4.7	0.4	22.8	243.6
2002	/	7.6	15.3	37.9	36.1	11	5.3	2	38.2	4.9	5.9	13	35.6	212.8
2003	/	6.3	41.4	41.3	54	53.3	45.3	13	17.8	14.8	2.8	5	0.3	295.3
2004	/	38.1	28	39.4	42	6	0.5	29.2	33	97.4	3.7	7.3	51.4	376
2005	/	63.6	48.8	18.5	25.5	2	20.5	12.5	6.8	1.4	35.1	12.2	22	268.9
2006	/	17.3	0.7	18.9	41	49.6	43.4	3.1	47.3	36.5	1.1	19.2	9.9	288
2007	/	32.2	38.3	70	3.5	4.8	26.6	72.6	28.8	31	16.3	12.8	18.2	355.1
2008	/	44.8	74.4	9.8	24	6.1	3.4	5.3	0.4	33.8	33.4	24.1	77.8	337.3
2009	/	68.7	4.5	27.4	29.8	72.2	44	47.6	54.5	12.3	10.7	15.3	0.9	387.9
2010	/	10	52.5	11.4	9.1	16.2	60.6	18.6	34.6	44.8	28.8	5.3	19.3	311.2
2011	/	10.1	29.7	21.9	19.2	12.3	37.2	32.8	56.3	32.1	26.9	30.2	19.9	328.6
2012	/	0.8	9	37	48.8	8.2	30.8	1.7	24.6	16.2	24.3	278	22.6	502
2013	/	16	12	19	47	51.7	42	11	38.2	12.2	7.8	13	4	273.9
2014	/	12	17.5	29	18	20	17	72	24.6	45	45	17.9	11	329

Tableau : Précipitation (1975-2014) Station de Djelfa

Point d'eau	Paramètres chimiques														Paramètres physiques			Minéralisation mg/l	
	Anions						Cations						D.H.T	Condà 20°C	pH	T °C			
	HCO ₃ ⁻		Cl		SO ₄		Mg		Ca		Na								
°F	mé/l	mg/l	mé/l	mg/l	mé/l	mg/l	mé/l	mg/l	mé/l	mg/l	mé/l	mg/l	°F	mé/l	µs/cm	/	°C	mg/l	
/	18	3,6	219,6	1,5	53,25	1,94	93	1,87	22,44	5,13	102,6	0,04	0,92	35	7	793,16	7,03	17,5	491,81
FD4	18	3,6	219,6	1,5	53,25	1,94	93	1,87	22,44	5,13	102,6	0,04	0,92	35	7	793,16	7,03	17,5	491,81
PD5	49,5	9,9	603,9	8,7	310	9,8	470	11,77	141,24	15,23	304,61	1,4	32,2	135	27	2866,88	7	17	1861,95
FMA5	17,2	3,44	209,84	1,2	42,6	2,42	116	2,35	28,2	3,13	62,52	1,58	36,34	27,4	5,48	763,84	8,12	18	495,5
PMS1	15,4	3,08	187,88	2,6	92,3	1,75	84	0,41	4,92	6,01	120,24	1,01	23,23	32,1	6,42	1057,16	7,42	14	512,57
FMH3	6,3	1,26	76,86	2,7	95,85	0,52	25	1,36	16,32	1,04	20,84	2,08	9,66	12	2,4	498	8,01	17	244,53
PD3	35,3	7,06	430,66	0,2	7,1	0,63	30	1,67	20,04	3,61	72,14	2,61	60,03	26,4	5,28	642,2	7,18	14	619,97
PR2	22,4	4,48	273,28	0,1	3,55	0,56	27	1,36	16,32	2,32	46,49	1,46	33,58	18,4	3,68	438,24	7,23	14,5	400,22
PMA4	23	4,6	280,6	2,5	88,75	6,25	300	3,5	42	9,66	193,19	0,19	4,37	65,8	13,16	1484,04	7,25	18,5	908,91
PMH9	48,2	9,64	588,04	7,6	269,8	7,21	346	7,78	93,36	11,9	238,08	4,77	108,79	98,4	19,68	2689,2	7,31	17,5	1644,07
PMS6	17,4	3,48	212,28	1	35,5	1,1	53	1,61	19,32	3,89	77,76	0,08	1,84	27,5	5,5	675,92	7,32	13	399,7
PMS8	14,1	2,82	172,02	2,5	88,75	1,92	92	1,59	19,08	5,41	108,22	0,24	5,52	35	7	1029,6	7,57	14	485,59
FMH6	27,5	5,5	335,5	2,6	92,3	2,9	139	4,71	56,52	3,65	72,95	2,64	60,72	41,8	8,36	980	7,27	17,5	756,99
PMS3	16,5	3,3	201,3	2,8	99,4	9,25	444	0,07	0,84	15,23	304,61	0,05	1,15	76,5	15,3	1779,26	7,3	14	1051,3
FMH4	16,7	3,34	203,74	1,3	46,15	5,92	284	3,15	37,8	7,05	141,08	0,36	8,28	51	10,2	1155,36	7,27	17	721,05
PMA1	20,5	4,1	250,1	1,9	67,45	1,5	72	1,67	20,04	4,05	80,96	1,78	40,94	28,6	5,72	789,21	7,3	18	531,49
FD2	32,4	6,48	395,28	2,3	81,65	1,92	92	1,67	20,04	3,01	60,12	6,02	138,46	23,4	4,68	1185,6	7,35	17,5	787,55
PMH1	9,6	1,92	117,12	3	106,5	1,75	84	1,87	22,44	4,61	92,18	0,19	4,37	32,4	6,48	960	7,62	17	426,61
PMS4	40,1	8,02	489,22	8,8	312,4	25,63	1230	33,22	398,64	8,38	167,53	0,85	19,55	208	41,6	6527,36	7,52	13,8	2617,34

Tableau : Résultat des analyses physico-chimiques des échantillons d'eau prélevé.