



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mostefa Benboulaïd –BATNA 2

Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : Hydraulique

Thème

**Estimation des potentialités des eaux souterraines
et estimation de la pollution par les nitrates :
Cas de la région de Chemora-Est algérien-**

Présentée par

GHODBANE Messaoud

(Ingénieur d'État en Hydraulique. Magister en Hydraulique)

Soutenue publiquement le
10 / 05 / 2018

Devant le jury composé de :

TIRI Ammar	Président	MCA	Université de Batna 2
BOUDOUKHA Abderrahmane	Rapporteur	Professeur	Université de Batna 2
BRINIS Nafaa	Examineur	MCA	Université de Batna 2
BAALI Fethi	Examineur	Professeur	Université Tébessa
FEHDI Chemceddine	Examineur	Professeur	Université Tébessa
GOUAIDIA Layachi	Examineur	Professeur	Université Tébessa

Année universitaire 2017/2018

DEDICACE

Grace à Dieu et l'appui et les efforts fournis par les personnes chères à mon cœur, que cette thèse a pu être réalisée. C'est pour cela que je dédie en premier temps ce modeste travail

- A la mémoire de mon très cher père*
- A la mémoire de mon très cher collègue Abdelhak Abdesmed.*
- A ma très chère Mère ;*
- A ma famille, surtout à ma femme et à mes enfants pour leur soutien et leur patience ;*
- A mes frères et sœurs ;*
- A tous mes amis, surtout Omar, Hichem, Lazhar et Khaled.*

Messaoud Ghodbane

Remerciements

En premier lieu, je remercie mon Dieu pour sa clémence et sa miséricorde, de m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

J'adresse mes spéciaux et sincères remerciements au directeur de cette thèse Mr BOUDOUKHA Abderrahmane, Professeur à l'université de Batna2 d'avoir accepté de m'encadrer et suivre mon travail de près avec sa sérénité, sa rigueur scientifique et ses précieux conseils qui m'ont bien orienté dans l'élaboration de cette thèse. Je lui remercie également pour la confiance et la compréhension qu'il a toujours manifestées à mon égard. Si ce travail est mené à terme, c'est grâce à son aide et soutien. Qu'il soit assuré de ma profonde estime et qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont également à Mr TIRI Ammar, Maître de conférence (A) à l'université de Batna2 d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance, aux membres examinateurs : Mr BRINIS Nafaa ; Maître de conférence (A) à l'université de Batna2, Mr BAALI Fethi; Professeur à l'université de Tebessa, Mr FEHDI Chemceddine; Professeur à l'université de Tebessa et Mr GOUAIDIA Layachi; Professeur à l'université de Tebessa d'avoir bien voulu assister et juger cette thèse.

Je tiens à remercier et témoigner ma grande reconnaissance aux différents services techniques auprès desquels j'ai bénéficié d'un aimable appui, notamment ceux qui m'ont facilité l'accès aux données de mesures et à la documentation, en particulier :

- Directions des ressources en eau des Wilayas de Batna et Oum El Bouaghi;*
- Subdivision des ressources en eau de Chemora*
- Subdivision des services agricoles de Chemora.*
- Bureau national d'études pour le développement rural (B.N.E.D.E.R).*

Je remercie également, le subdivisionnaire de la subdivision des services agricoles de Chemora Mr CHERIF Mouhamed Nadhir, de son aide avec toutes données disponibles et je remercie également mon ami ADJISSI Omar.

Ma reconnaissance à tous les propriétaires des points d'eau qui m'ont autorisé à utiliser leurs puits et forages pour effectuer les prélèvements d'eau et les mesures hydrodynamiques.

Et enfin, je tiens à remercier toutes personnes qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser cette thèse, je cite spécialement mes collègues des Départements :

- Sciences technologiques de l'université de Batna2, BELKHERI Lazhar.*
 - Sciences de la terre de l'université de Batna2, BRINIS Nafaa et DERIAS Tarek.*
- Mes vifs remerciements de leurs aides et échanges scientifiques.*

Mes remerciements les plus sincères vont également à ma famille pour leur soutien moral et leur patience pendant les moments difficiles dans la réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

RESUME

La présente étude vise à estimer les potentialités des eaux souterraines de la région de Chemora et déterminer les sources et les origines de la pollution par les nitrates. Ceci permettra de prendre les mesures nécessaires afin de les protéger. La zone d'étude fait partie des hauts plateaux constantinois situés dans l'Est Algérien. Cette région est à vocation agricole et l'activité principale est la céréaliculture intensive en plus les cultures maraîchères, l'élevage du bétail et la production volaille. La géologie de la région est caractérisée par la présence des formations calcaires recouverts par des affleurements alluvionnaires du Quaternaire. Les résultats des différentes campagnes piézométriques montrent que la nappe est le siège d'un faible rabattement atteignant les 3.20 m au maximum. L'étude géochimique a montré un comportement variable du chimisme de la nappe dans le temps et l'espace. La minéralisation augmente de Sud-ouest vers le Nord-est dans le sens d'écoulement des eaux souterraines. La conductivité électrique présente des valeurs élevées à la partie Sud-ouest et Nord-est près du lac salé (Gareat Ank Djemel), avec un maximum de $9580\mu\text{S}/\text{cm}$ durant la période de Mars 2007 et $5350\mu\text{S}/\text{cm}$ pendant la période de Février 2016. L'analyse de la qualité chimique des eaux montre que la majorité des eaux souterraines sont impropres à la consommation. Cependant pour l'aptitude à l'irrigation, les eaux de la partie centrale, le Sud-ouest et le piémont Nord du djebel Fedjoudj sont de qualité admissible. Le reste du terrain est le siège d'une eau de qualité médiocre à mauvaise. La concentration élevée en nitrates dans la Sud-ouest est en liaison avec l'activité agricole. La modélisation de la variation de la concentration des nitrates dans les eaux souterraines de l'aquifère de Chemora à l'aide des codes ODAST (1D) et TDAST (2D), a montré que cette pollution pourrait polluer une distance d'environ 6Km et surface d'environ 120 km^2 avec la valeur maximale de concentration initiale ($87\text{mg}/\text{l}$) au bout d'une dizaine d'années.

Mots clés : eau souterraine, aquifère, géochimie, potentialités, pollution, nitrate, Chemora, Algérie.

ABSTRACT

The present study aims to estimate the potential of groundwater in the Chemora region and to determine the sources and origins of nitrate pollution. This will take the necessary steps to protect them. The study area is part of the Constantinian highlands located in eastern Algeria. This region is agricultural and the main activity is intensive cereal farming in addition to market gardening, livestock breeding and poultry production. The geology of the region is characterized by the presence of limestone formations covered by Quaternary alluvial outcrops. The results of the different piezometric companions show that the water table is the seat of a small folding up to 3.20 m maximum. The geochemical study shows a variable behavior of the chemistry of the aquifer in time and space. Mineralization increases from Southwest to Northeast in the direction of groundwater flow. The electrical conductivity is high in the south-west and north-east near the salt lake (Gareat Ank Djemel), with a maximum of 9580 μ S / cm during the period of March 2007 and 5350 μ S / cm during the period of February 2016. The analysis of the chemical quality of water shows that the majority of groundwater is unfit for consumption. However, for irrigation capacity, the waters of the central part, the Southwest and the northern foothills of Jebel Fedjoudj are of acceptable quality. The rest of the field is the seat of water of mediocre quality to bad. The high nitrate concentration in the Southwest is linked to agricultural activity. The modeling of the variation of the nitrate concentration in the groundwater of the Chemora aquifer using the ODAST (1D) and TDAST (2D) codes, has shown that this pollution could pollute a distance of about 6 km and surface of about 120 km² with the maximum value of initial concentration (87mg /l) after a decade.

Keywords: groundwater, aquifer, geochemistry, potential, pollution, nitrate, Chemora, Algeria.

ملخص

تهدف الدراسة الحالية إلى تقدير القدرات المائية للطبقة الجوفية لمنطقة الشمرة وتعيين مصادر ومنابع تلوثها بالنترات. مما سيسمح بأخذ التدابير اللازمة لحمايتها.

منطقة الدراسة تنتمي إلى المرتفعات القسنطينية الواقعة في شرق الجزائر، تتميز بطابع فلاحي، والنشاط الرئيسي هو زراعة الحبوب المكثفة، بالإضافة إلى زراعة البقول، تربية الماشية وإنتاج الدواجن. وتتميز جيولوجيا المنطقة بوجود تكوينات طباشيرية مغطاة بنتوءات غرينية تعود حقبها إلى العصر الرباعي. كما أظهرت نتائج مختلف فترات قياس منسوب المياه الجوفية أن الطبقة المائية شهدت انخفاضا في المستوى وصل إلى 3.20 متر كحد أقصى.

وبينت الدراسة الجيوكيميائية سلوكا متغيرا لكيمياء المياه الجوفية في الزمان والمكان. وتزداد الملوحة من الجنوب الغربي إلى الشمال الشرقي في اتجاه تدفق المياه الجوفية. وتتميز مياه الطبقة المائية بناقلية كهربائية عالية في الجزء الجنوب الغربي لمنطقة الدراسة والشمال الشرقي بالقرب من البحيرة المالحة (عنق جمل) و بعد أقصى بلغ $9580 \mu\text{S}/\text{cm}$ خلال فترة مارس 2007 و $5350 \mu\text{S}/\text{cm}$ خلال فترة فبراير 2016. وتظهر الدراسة الكيميائية لنوعية المياه بأن غالبية المياه الجوفية للمنطقة غير صالحة للإستهلاك. أما فيما يخص صلاحيتها للسقي فإن مياه الجزء الأوسط، والجنوب الغربي، والسفوح الشمالية لجبل لفجوج فهي ذات نوعية مقبولة. وباقي مياه المنطقة فهي غير صالحة. ويرتبط التركيز العالي للنترات في الجنوب الغربي بالنشاط الزراعي. ولقد أظهرت نمذجة تغير تركيز النترات في المياه الجوفية لمكمن الشمرة باستخدام نموذجي (ODAST(1D) و TDAST(2D) أن هذا التلوث يمكن أن يبلغ مسافة حوالي 6 كلم و يسود مساحة حوالي 120 كلم² من المكمن المائي وبتركيز يصل إلى أقصى حد لقيمة تركيز التلوث الأولي (87 ملغ/ل) خلال عقد من الزمن.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، المكمن المائي، الكيمياء الجيولوجية، القدرات، التلوث، النترات، الشمرة، الجزائر.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- Les principales caractéristiques des eaux souterraines	4
I.2- La composition de l'eau souterraine	4
I.3- Le cycle de l'azote	5
I.4- Pollution et dégradation de la qualité	6
I.4.1- Vulnérabilité des nappes à la pollution	6
I.4.2- Sources, Causes et impact de la pollution des eaux souterraines par les nitrates.....	8
I.5- Transfert et évolution des polluants	9
I.5.1- Transfert dans le sol.....	10
I.5.2- Transfert dans la zone non saturée	10
I.5.3- Evolution en milieu saturé.....	11

CHAPITRE II : METHODES ET MATERIEL

II.1- Etablissement du bilan hydrologique	12
II.1.1- L'évapotranspiration potentielle (ETP)	12
II.1.2- La réserve facilement utilisable (RFU).....	13
II.1.3- L'évapotranspiration réelle	13
II.1.3.1- Méthode de Thornthwaite	13
II.1.3.2- Méthode de L. Turc.....	13
II.1.3.3- Méthode de Coutagne	14
II.1.4- Estimation du ruissellement et de l'infiltration	14
II.2- Les essais de pompage	14
II.3- Méthodes d'analyses physico-chimiques de l'eau et statistiques	15
II.3.1- Prélèvement de l'eau	16
II.3.2- Méthodes d'analyses.....	16
II.3.2.1- Analyse par spectrophotométrie UV visible	16
II.3.2.2- Analyse physique	17
II.3.2.2.1- Mesure de la température	17
II.3.2.2.1.1- Principe	17
II.3.2.2.1.2- Mode d'opérateur.....	17
II.3.2.2.2- Mesure de potentiel d'hydrogène (pH)	17
II.3.2.2.2.1- Principe	17

II.3.2.2.2- Mode d'opérateur.....	17
II.3.2.2.3- Mesure de la conductivité électrique (CE).....	18
II.3.2.2.3.1- Principe	18
II.3.2.2.3.2- Mode d'opérateur.....	18
II.3.2.3- Analyse chimique.....	18
II.3.2.3.1- Détermination de l'alcalinité 'Méthode volumétrique'	18
II.3.2.3.1.1- Principe	18
II.3.2.3.1.2- Mode d'opérateur.....	19
II.3.2.3.2- Détermination du titre alcalimétrique (TA)	19
II.3.2.3.3- Détermination du titre alcalimétrique complet (TAC).....	19
II.3.2.3.4- Mesure de la dureté totale, calcique et magnésienne	19
II.3.2.3.4.1- Dureté totale (TH).....	19
II.3.2.3.4.1.1- Principe	19
II.3.2.3.4.1.2- Mode d'opérateur.....	20
II.3.2.3.5- Détermination de la dureté calcique (TH _{Ca}).....	20
II.3.2.3.5.1- Principe	20
II.3.2.3.5.2- Mode d'opérateur.....	20
II.3.2.3.6- Détermination de la dureté magnésienne	21
II.3.2.3.6.1- Principe	21
II.3.2.3.6.2- Mode d'opérateur.....	21
II.3.2.3.7- Dosage des chlorures par la méthode de 'MOHR'	21
II.3.2.3.7.1- Principe	21
II.3.2.3.7.2- Mode d'opérateur.....	22
II.3.2.3.8- Détermination de la dureté en hydrogénocarbonates (HCO ₃ ⁻)	22
II.3.2.3.9- Dosage des sulfates (méthode par turbidimétrie).....	22
II.3.2.3.9.1- Principe	22
II.3.2.3.9.2- Mode d'opérateur.....	22
II.3.2.3.9.3- Développement et mesure de la turbidité.....	23
II.3.2.3.9.4- Correction de la turbidité naturelle	23
II.3.3- Indices de saturation	24
II.3.4- Méthodes statistiques	24
II.3.4.1- Classification ascendante hiérarchique (CAH).....	24
II.3.4.2- Analyse en composantes principales (ACP)	25
II.3.5- Modélisation de la pollution	27

II.3.5.1- Objectif	27
II.3.5.2- Modélisation de l'écoulement et du transport convectif-dispersif d'un soluté.....	27
II.3.5.2.1- L'équation de transport convectif-dispersif d'un soluté	27
II.3.5.2.2- Modèle unidimensionnel (1D-ODAST).....	28
II.3.5.2.3- Modèle bidimensionnel (2D-TDAST)	30

CHAPITRE III : APERÇU SUR LES CONDITIONS NATURELLES

III.1- Présentation du site d'étude.....	31
III.1.1- Climat	31
III.1.2- Hydrographie	34
III.2- Aperçu géomorphologique et géologique.....	35
III.2.1- Lithostratigraphie	36
III.2.1.1- Les formations du Quaternaire	36
III.2.1.2- Miocène	38
III.2.1.3- Crétacé	38
III.2.2- Tectonique et paléogéographie	40
III.2.2.1- Evolution paléogéographique	40
III.2.2.2- Aperçu tectonique.....	40
III.2.3- Description lithologiques à partir des logs et coupes des forages.....	43
III.3- Apports de la prospection géophysique dans la région de Chemora	46
III.3.1- Apports de la prospection géophysique dans la plaine Chemora-Remila.	46
III.3.2- Apports de la prospection géophysique dans la plaine Chemora-Boulhilet..	55
III.4- Minéralisation	57
III.5- Caractéristiques lithologiques du sous bassin versant	57
III.6- Classification des formations géologiques selon leurs intérêts hydrogéologiques	58
Conclusion	59

CHAPITRE IV : ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE

IV.1- Introduction	60
IV.2- Géométrie de l'aquifère superficiel du Quaternaire.....	60
IV.3- Etude de la piézométrie	61
IV.3.1- Inventaire des points d'eau.....	61
IV.3.2- Conditions aux limites.....	62
IV.3.3- Interprétation des cartes piézométriques.	62
IV.3.4- Battement de la nappe	65
IV.3.5- Carte d'égale épaisseur de la couche mouillée.....	65

IV.4- Les caractéristiques hydrodynamiques des formations aquifères.....	66
IV.4.1- Interprétation des résultats.....	68
IV.4.1.1- Distribution de la transmissivité et de la perméabilité	68
IV.4.1.2- Détermination de la porosité efficace par la méthode d'Archie.....	72
IV.4.1.2.1- Carte de la résistivité de L'aquifère (Rt)	73
IV. 4.1.2.2- Carte de la résistivité de l'eau contenue dans le terrain (Rw)..	74
IV. 4.1.2.3- Carte de la Porosité efficace vraie ou coefficient d'emmagasinement.	74
IV.5-Estimation des potentialités des eaux souterraines de la région de Chemora	75
IV.5.1- Les réserves en eau souterraine.	75
IV.5.2- Etude des réserves de la zone étudiée.	76
IV.5.3- Estimation des besoins en eau	77
IV.5.3.1- Débit extrait de la nappe pour l'agriculture.....	77
IV.5.3.2- Débits extraits de la nappe pour les besoins en eau potable et industriels.....	78
Conclusion	78

CHAPITRE V:HYDROGEOCHIMIE ET POLLUTION PAR LES NITRATES

V.1- Introduction.....	80
V.2- Caractérisation des eaux de la nappe alluviale de la région de Chemora .	80
V.2.1- Résultats et discussions.....	81
V.2.1.1- Etude des paramètres physiques	82
V.2.1.1.1- Température.....	82
V.2.1.1.2- Le Potentiel d'hydrogène (pH)	84
V.2.1.1.3- La Conductivité électrique (CE).....	85
V.2.1.2- Etude des paramètres chimiques.....	87
V.2.1.2.1- Cartographie hydrochimique	87
V.2.1.2.2- Pollution par les nitrates NO ₃ ⁻	94
V.2.1.2.3- Faciès chimique des eaux	96
V.2.1.2.3.1- Détermination	96
V.2.1.2.3.2- Répartition spatiale des faciès chimiques	97
V.2.1.2.4- Les rapports caractéristiques.....	98
V.2.1.2.5- Origine des éléments chimiques	99
V.2.1.2.5.1- Origine du calcium (Ca ²⁺)	99

V.2.1.2.5.2- Origine de Na ⁺ et Cl ⁻	99
V.2.1.2.6- Indices de saturation et équilibres chimiques	101
V.2.2- Analyse de la qualité des eaux par les Méthodes statistiques	103
V.2.2.1- Application de CAH sur les résultats d'analyses de la région de Chemora.....	103
V.2.2.2- Application de l'analyse en composantes principales	104
V.2.2.2.1- Matrice de corrélation.....	105
V.2.2.2.2- Etude des liaisons significatives entre les éléments physico-chimiques.....	107
V.2.2.2.3- Interprétation des résultats des ACP.....	109
V.3- Aptitude des eaux de la région de Chemora à l'irrigation.....	115
V.3.1- Classification et détermination du risque de sodicité et de salinité.....	115
V.3.1.1- Classification de R. S. AYERS - D. W. WESTCOT.....	115
V.3.1.1.1- Salinité	115
V.3.1.1.2- Sodicité	116
V.3.1.2- Classification de Richard.....	117
V.3.1.3- Classification de Wilcox.....	118
V.4- Potabilité des eaux	123
V.4.1- Normes Algériennes 2000 et O.M.S 2006.....	123
V.4.2- Degré hydrotimétrique total (D.H.T).....	124
V.5- Impact de la pollution par les nitrates.....	125
V.5.1- Schéma éventuel des polluants de différentes origines rencontrées dans l'eau	125
V.5.2- Le transfert des polluants du sol vers les eaux souterraines.....	126
V.5.2.1- Les nitrates dans les eaux souterraines	128
V.5.2.1.1- Les normes des nitrates selon l'OMS et algériennes	129
V.5.2.1.2- Elimination de la pollution des nitrates	129
V.5.2.1.2.1- Elimination naturelle	129
V.5.2.1.2.2- Elimination des nitrates des eaux potables	130
V.5.3- Sources de la pollution aux NO₃⁻ dans les eaux souterraines de la région de Chemora	131
V.5.3.1- Pollution d'origine domestique.....	132
V.5.3.2- Pollution agricoles	132

V.5.4- Evolution des NO_3^- dans les eaux souterraines de la région de Chemora .	134
V.5.4.1- Evolution spatio-temporelle des nitrates	134
V.5.4.2- Evolution spatio-temporelle des nitrates dans le sens d'écoulement..	135
Conclusion	136
CHAPITRE VI : MODELISATION DE LA POLLUTION	
VI.1- Contexte	139
VI.2- Application du modèle du transport convectif-dispersif d'un soluté	139
VI.2.1- Modèle unidimensionnel (1D) ODAST.....	139
VI.2.1.1- Phase de calage.....	139
VI.2.1.2- Simulation	141
VI.2.2- Modèle bidimensionnel (2D) TDAST	141
VI.2.2.1- Phase de calage.....	141
VI.2.2.2- Simulation	143
Conclusion	143
Conclusion générale	144
Recommandations et solutions.....	147
Annexes	148
Production scientifique.....	156
Références Bibliographiques.....	157

LISTE DES FIGURES PAR CHAPITRE

CHAPITRE III

Figure. III.1- Carte des conditions naturelles et les lieux d'échantillonnage d'eau. extrait de la carte géologique d'Ain Beida-est d'Algerie : 1/200000	32
Figure. III.2- Réseau hydrographique	35
Figure. III.3- Carte geomorphologique de la region de Chemora	36
Figure. III.4- Schema structural simplifie. source carte géologique de l'Algerie, feuille de Boulhilet N°174 :1/50000	42
Figure. III.5- Coupes géologiques interprétatives : Anticlinales des Djebels : Bouarif, Amrane et Fedjoudj. Source carte géologique de l'Algérie – feuille de Boulhilet N°174:1/50000)	43
Figure. III.6- Log stratigraphique du Sondage FDJ	44
Figure. III.7- Description lithologique à partir des logs et coupes des forages implantés dans la zone d'étude	46
Figure. III.8- Carte de position des sondages électriques dans la plaine de Chemora-Remila (C.G.G, 1969 - 1970).....	47
Figure. III.9- Courbes des sondages électriques A16 et M29 (Calcaires Aptiens).....	49
Figure. III.10- Courbes des sondages électriques B8 (Marnes Cénomaniennes).....	49
Figure. III.11- Courbes des sondages électriques B7, B6-7, C12 (Calcaires Cénomaniens et Turoniens).....	50
Figure. III.12- Courbes des sondages électriques I.7, KL10-11, Q11(Calcaires Cénomaniens et Turoniens).....	51
Figure. III.13- Courbes géoélectriques A, B, C et I	53
Figure. III.14- Courbes géoélectriques K-KL, M et Q	54
Figure. III.15- Carte du substratum de la plaine de Chemora-Remila	55
Figure. III.16- Carte de la résistance transversale.....	56
Figure. III.17- Courbes des sondages électriques A.5, A.6, A.7 (Niveaux alluvionnaires grossiers : Argilo-graveleux, Marnes)	56
Figure. III.18- Courbes des Sondages électriques paramétriques des formations aptiennes	57
Figure. III.19- Carte du substratum de la zone d'étude	58

CHAPITRE IV

Figure.IV.1- Carte d'inventaire des points d'eau	61
---	----

Figure.IV.2- Carte piézométrique – période Mars 2007-.....	63
Figure.IV.3- Carte piézométrique – période Juin 2007-.....	64
Figure.IV.4- Carte piézométrique – période Février 2016-.....	64
Figure.IV.5- Cartes du battement de la nappe.....	65
Figure.IV.6- Carte d'égalité épaisseur de la couche mouillée.....	66
Figure.IV.7- Essai de pompage – courbes de descente et remontée.....	69
Figure.IV.8- Essai de pompage – courbes de descente et remontée.....	70
Figure.IV.9- Carte de la transmissivité en 10^{-4} m ² /s.....	71
Figure.IV.10- Carte de la perméabilité en 10^{-4} m /s.....	71
Figure.IV.11- Carte de la Résistivité de l'aquifère (Rt).....	73
Figure.IV.12- Carte de la Résistivité de l'eau contenue dans le terrain (Rw).....	74
Figure.IV.13- Carte de la Porosité efficace vraie ou coefficient d'emménagement.....	75

CHAPITRE V

Figure. V.1- Carte de la température des eaux souterraines (Mars 2007)	83
Figure. V.2- Carte de la température des eaux souterraines (Février 2016)	83
Figure. V.3- Carte du pH (Mars 2007)	84
Figure. V.4- Carte du pH (Février 2016)	85
Figure. V.5- Carte de la conductivité (Mars 2007)	86
Figure. V.6- Carte de la conductivité (Février 2016)	87
Figure. V.7- Carte de calcium Ca ⁺⁺ (Février 2016)	88
Figure. V.8- Carte de magnésium Mg ⁺⁺ (Février 2016)	89
Figure. V.9- Carte de Na ⁺ ,K ⁺ (Février 2016)	91
Figure. V.10- Carte des bicarbonates HCO ₃ ⁻ (Février 2016)	91
Figure. V.11- Carte des chlorures Cl ⁻ (Février 2016)	93
Figure. V.12- Carte des sulfates SO ₄ ⁻	93
Figure. V.13- Carte des nitrates NO ₃ ⁻	95
Figure. V.14- Diagramme de Piper pour les compages Mars 2007 et Février 2016	96
Figure. V.15- Arbres de Facies chimique des eaux Mars 2007 et Février 2016	97
Figure. V.16- Carte des faciès chimiques Février 2016	98
Figure. V.17- Rapport caractéristique de (SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻) / (Ca ²⁺ /Mg ²⁺) durant les périodes (Mars et Février 2016)	100
Figure. V.18- Rapport caractéristique de (Na/Ca) / (Cl/SO ₄) durant les périodes (Mars et Février 2016)	100

Figure. V.19- L'évolution du Ca^{2+} en fonction de HCO_3^- selon la droite de pente (1 :1)	101
Figure. V.20- L'évolution du Na^+ en fonction de Cl^- selon la droite de pente (1 :1)	101
Figure. V.21- Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques	102
Figure. V.22- Dendrogrammes des faisceaux des variables et des échantillons analysés	104
Figure. V.23 - La relation significative entre la conductivité électrique et les éléments chimiques	107
Figure. V.24- Relation entre Ca^{2+} vs. Mg^{2+}	108
Figure. V.25- Relation entre Relation entre Ca^{2+} , Mg^{2+} vs. SO_4^{2-}	108
Figure. V.26- Projection des variables sur les plans factoriels – Mars 2007-	112
Figure. V.27- Projection des variables sur les plans factoriels – Février 2016-	113
Figure. V.28- Représentation graphique des Individus. Mars 2007	114
Figure. V.29- Représentation graphique des Individus. Février	114
Figure. V.30- Diagrammes de Richards	119
Figure. V.31- Diagrammes de Wilcox	120
Figure. V.32- Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richard. Février 2016	121
Figure. V.33- Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox (Février 2016)	122
Figure. V.34- Schéma éventuel des polluants de différentes origines rencontrées dans l'eau	126
Figure. V.35- Mécanisme de la pollution de l'eau par les nitrates (Julien, 2003)	128
Figure. V.36- Photos représentant les sources de la pollution	132
Figure. V.37- Evolution des nitrates pour la période de Mars 2007	134
Figure. V.38- Evolution des nitrates pour la période de Février 2016	135
Figure. V.39- Evolution spatio-temporelle des nitrates selon le sens d'écoulement	136

CHAPITRE VI

Figure.VI.1- Variation spatio-temporelle des concentrations des nitrates du modèle calé.....	140
Figure.VI.2- Esquisse du domaine d'application de TDAST	142
Figure.VI.3- Variation de la concentration des nitrates simulée par le modèle TDAST	142

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III

Tableau. III.1- Résultats de calcul du bilan hydrologique (station de d'ain Yagout, 1986-2005) par ETP- Thornthwaite	34
Tableau. III.2- Echelle de résistivité.....	51
Tableau. III.3- Répartition des terrains selon leur degré de potentialité	58

CHAPITRE IV

Tableau. IV.1- Inventaire des points d'eau	62
Tableau. IV.2- Quelques ordres de grandeurs des valeurs de la porosité totale et efficace (Landreau et Rouc, 1985).....	67
Tableau. IV.3- Valeurs de la transmissivité de l'aquifère	68
Tableau. IV.4- valeurs de la porosité efficace	73
Tableau. IV.5- Débits extraits de la nappe pour les besoins agricoles	77
Tableau. IV.6- Débits extraits de la nappe pour les besoins en eau potable et industriels	78

CHAPITRE V

Tableau. V.1- Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques	81
Tableau. V.2- Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité.....	86
Tableau. V.3- Classification des teneurs en nitrates dans la région d'étude.....	96
Tableau. V.4- Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson.....	105
Tableau. V.5- Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'aquifère de Chemora	106
Tableau. V.6- Ensembles des couples dépendants et indépendants.....	106
Tableau. V.7- Caractéristiques des ACP appliquées aux données physico-chimiques des eaux de la nappe de la région de Chemora	111
Tableau. V.8- Corrélations entre les variables et les facteurs	111
Tableau. V.9- Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation	116
Tableau. V.10- Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Richard	117
Tableau. V.11- Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Wilcox	118
Tableau. V.12- Normes de potabilité de l'O.M.S.2006 et Algériennes 2000	124
Tableau. V.13- Dureté des eaux en (Théobald et Gama, 1969).....	125

Tableau. V.14- Typologie des transferts de polluants dans les eaux souterraines	127
Tableau. V.15- Quantités des engrais livrées et utilisée pendant la campagne agricole 2014-2015 de Chemora selon la DSA –Batna.....	133
Tableau. V.16- Quantités des pesticides livrées et utilisée pendant la campagne agricole 2014-2015 de Chemora selon la DSA –Batna-	133

CHAPITRE VI

Tableau. VI.1- Résultats du modèle calé pour une période de neuf (09) ans	140
Tableau. VI.2- Résultats des simulations projetées (10, 15, 20 et 25 ans)	141

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'eau est une source précieuse et l'élément vital pour l'existence de tout être vivant. Elle fournit à l'être humain le luxe, le confort et en plus lui permet de satisfaire ses besoins de base. Les eaux souterraines représentent une excellente source d'approvisionnement en eau potable et le filtre naturel constitué par les matériaux géologiques produit le plus souvent une eau de bonne qualité. Leur exploitation présente des avantages économiques appréciables, du fait qu'elles ne nécessitent que peu de traitement et parfois même aucun. Cependant le maintien de cet avantage relatif requiert des mesures qui soient prises pour préserver de façon durable la qualité de cette ressource.

Ces dernières années même les eaux souterraines ne sont pas protégées contre la pollution. Donc un danger menace notre environnement et l'homme qui en est responsable par l'exploitation non rationnelle de cette ressource, les rejets domestiques et industriels non contrôlés dans la nature et par l'utilisation excessive des fertilisants surtout chimiques. Ces activités ont un impact néfaste sur la qualité des eaux souterraines.

En Algérie, la demande en eau que ce soit pour l'AEP, l'agriculture ou pour l'industrie ne cesse de croître et devient de plus en plus difficile à satisfaire à cause de l'accroissement de la population et l'insuffisance de l'eau. Ceci a obligé les décideurs à construire des ouvrages hydrauliques pour stocker les eaux des précipitations, mais pour satisfaire les besoins des différents secteurs, il est impératif de protéger cette eau contre toutes formes de pollution (Ménagère, industrielle, agricole...).

La région de Chemora, située dans la wilaya de Batna à l'Est algérien, contient une plaine alluviale qui s'est développée le long de l'Oued Chemora-Boulhilet et ses affluents. Cette région est à vocation agricole et recèle actuellement la seule ressource en eau disponible sur place, provenant des eaux souterraines peu profondes. Cette disposition favorable à l'exploitation par pompage a été l'un des atouts majeurs du développement socio-économique qu'a connu la région. Les eaux souterraines de la région de Chemora sont soumises à des pressions polluantes, tant agricoles qu'urbaines ou encore industrielles. Ceci a engendré ces dernières années la pollution des eaux de cette nappe par les nitrates (Ghodbane, 2009). Afin d'avoir un aperçu sur l'état actuel de la nappe de Chemora, nous avons entrepris une étude afin d'estimer les potentialités des eaux souterraines de la région et estimer le degré de pollution par les nitrates.

L'objectif du présent travail est d'étudier la caractérisation des paramètres physicochimiques des eaux souterraines, la qualité de ces eaux, voir leur variation spatio-temporelle, déterminer leurs faciès chimiques et leur degré de pollution par les nitrates.

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre concerne une recherche bibliographique surtout sur la pollution par les nitrates.

Le deuxième chapitre expose les méthodes adoptées et les moyens utilisés dans cette étude, ainsi les protocoles de l'échantillonnage des eaux, de dosage et de mesure des éléments physico-chimiques.

Le troisième chapitre a porté sur la présentation des conditions naturelles tel que le climat, la géomorphologie, la géologie et la géométrie de l'aquifère de la région d'étude.

Le quatrième chapitre : présente la géométrie de l'aquifère superficiel de la région de Chemora, sont comportement hydrogéologique à l'aide de ses caractéristiques hydrodynamiques et l'estimation de ses potentialités des eaux souterraines.

Le cinquième chapitre : traite le chimisme des eaux souterraines de cet aquifère et son évolution spatiale à l'aide de la cartographie hydrochimique. Cet aspect a été complété par une analyse statistique à l'aide de la CAH et l'ACP. Ensuite, la détermination de l'origine des nitrates et leur impact sur la qualité des eaux souterraines de la région.

Le sixième chapitre : expose les résultats de la modélisation de la pollution des eaux souterraines par les "Nitrates".

En fin, nous terminerons cette étude par une conclusion générale récapitulant les principaux résultats et les solutions appropriées pour protéger cette ressource.

CHAPITRE I:

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I- Recherche Bibliographique

Le cycle de l'azote est aujourd'hui, à l'échelle de la planète, le plus profondément perturbé des grands cycles biogéochimiques. L'azote qui entre à 80 % dans la composition de l'atmosphère se transforme en nitrates dans les sols. Une partie de ces nitrates est ensuite entraînée vers les eaux de surface et souterraines. Ce phénomène – absolument naturel – a été fortement amplifié par l'utilisation d'engrais de synthèse depuis le milieu du XXe siècle (Pascal. V et al, 2009).

Plusieurs études à travers le monde (Etchanchu et Probst 1988, Guillaud et Bouriel 2007) et en Algérie (Baali, 2005. Ghodbane, 2009. Boudoukha et al, 2012. Boudoukha et Boulaarak 2013. Tiri et al, 2014. Tiri et al, 2016. Guerraiche et al, 2016) ont signalé les effets des effluents agricoles, industriels et urbains sur la qualité des eaux de surface et souterraines.

La pollution par les nitrates est un problème complexe. La contamination des eaux souterraines par les nitrates et les pesticides pose un problème dans les eaux destinées à la consommation humaine, en particulier dans les régions agricoles. En effet, si le secteur agricole est un responsable parmi d'autres de la détérioration de la qualité des eaux, sa responsabilité est particulièrement mise en relief quand il s'agit de ce type de pollution (Barbier, 2011). La pollution des eaux par les nitrates peut avoir trois origines :

-Agriculture, industrielle et domestique, relève d'un processus déterminant, la minéralisation de l'azote organique c'est-à-dire son passage sous forme de nitrate soluble. En fonction de différents facteurs (les conditions climatiques, la couverture végétale...), les nitrates sont plus ou moins en grande proportion entraînés vers les nappes phréatiques (Turin, 1990).

Les nitrates emportés par les eaux d'infiltration au cours d'une année ne proviennent donc que pour une faible part des engrais apportés cette même année. L'essentiel provient de la production de nitrates par la matière organique morte des sols, c'est-à-dire des nitrates épandus les années précédentes et stockés. À ceci s'ajoute parfois la lenteur de la progression de l'eau d'infiltration dans les sols. L'intensification de l'agriculture, entraîne une utilisation importante de produits azotés. La concentration très élevée des nitrates dans les eaux souterraines est en liaison avec l'activité agricole (Khedidja et Boudoukha, 2014), dont l'origine se trouve, entre autres, dans les engrais et les fertilisants. Ces résultats confirment l'impact de l'intensification de l'agriculture dans la dégradation de la qualité des eaux souterraines (Bouderka et al, 2016). Les nitrates ont une forme soluble de l'azote qui est généralement mal adsorbé par les particules du sol et qui peut donc filtrer dans les eaux souterraines s'il n'est pas assimilé par les végétaux (Serhal et al, 2004).

I.1 - Les principales caractéristiques des eaux souterraines

Les principales caractéristiques des eaux souterraines sont : la turbidité qui est généralement faible, la température et la composition chimique qui sont constantes et elles sont plus minéralisées que les eaux de surfaces. La dureté des eaux souterraines est souvent élevée, leur indice de couleur est faible, et on y rencontre habituellement de l'H₂S, Silice, Mn en solution, Fe bivalent, NO₃ et les solvants chlorés. L'oxygène dissout est presque inexistant. Les eaux souterraines en cours de circulation peuvent avoir de grandes variations de composition avec l'apparition de polluants et de divers contaminants. En outre, les eaux souterraines sont souvent très pures microbiologiquement, sauf dans le cas d'une arrivée d'une pollution accidentelle.

I.2- La composition de l'eau souterraine

La nature géologique détermine la composition chimique des eaux souterraines. L'eau est constamment en contact avec la roche sur laquelle elle stagne ou circule, ainsi un équilibre se développe entre la composition de l'encaissant et celle de l'eau: c.-à-d. une eau qui circule dans un substrat sableux ou granitique est acide et possède une faible minéralisation par contre une eau qui circule dans les calcaires est alcalinisés des bicarbonates (David, 2000). La qualité de l'eau souterraine se rapporte à des paramètres tels que la température de l'eau, la quantité de solides dissous, et la teneur en polluants toxiques et biologiques. L'eau qui contient une quantité élevée de matière dissoute par l'action de la désagrégation de produit chimique peut avoir un goût amer, et elle est couramment appelée eau calcaire. Même si le niveau de salinité est le souci le plus commun, les autres solides dissous présents dans les eaux souterraines peuvent poser des problèmes. L'eau calcaire entraîne des dépôts écailleux qui se déposent, par exemple dans les chauffe-eau et les tuyauteries, et rend le savon difficile à mousser. D'autre part, des teneurs élevées en fer sont quelques fois présents dans certaines eaux souterraines. Le fer peut colorer l'eau et tacher les vêtements; il est aussi indésirable dans beaucoup de processus de fabrication. Enfin, les sulfates de l'eau peuvent entraîner un goût amer, et peuvent également avoir un effet laxatif (Lenntech, 1998).

✓ Les composants chimiques de l'eau.

Toutes les eaux continentales contiennent naturellement des ions, en quantité plus ou moins importante. Ces ions se divisent en cations à charge positive et en anions qui sont chargés négativement. Il y a ceux qu'on qualifie de majeurs, parce que presque toujours

présents, comme le calcium (Ca^{+2}) ou les bicarbonates (HCO_3^-) et les mineurs présents évidemment en faible quantité et souvent le reflet d'eaux particulières ou polluées.

Les cations majeurs comprennent donc le calcium (Ca^{+2}), le magnésium (Mg^{+2}), le sodium (Na^+) et le potassium (K^+). Dans les anions majeurs, on compte les bicarbonates (HCO_3^-), les chlorures (Cl^-) et les sulfates (SO_4^{-2}).

✓ Nitrate et les composés azotés

Les nitrates sont des composés naturels présents dans tous les écosystèmes. Ils sont essentiels aux végétaux, mais peuvent devenir néfastes pour les plantes et les animaux s'ils sont trop abondants. Les nitrates entrent également dans la composition des engrais chimiques et naturels (fumiers). Les nitrates sont la forme oxydée d'azote contre les deux autres formes réduites ; l'ammonium et les nitrites (Mebarkia et al, 2017). Les cours d'eau, les lacs et les étangs peuvent renfermer des nitrates provenant des diverses sources: zones agricoles dans lesquelles on utilise une forte dose d'engrais, parcs d'engraissement de bétail et pâturages, et zones de traitement des eaux usées, donc ont une origine essentiellement agricole (engrais, élevage...) et urbaine. Les nitrates dans l'eau potable sont mesurés à la fois en terme de quantité d'azote présent ou en quantité d'oxygène et d'azote. La norme pour les nitrates dans l'eau potable est de 50 mg /l (OMS, 2006). L'excès de nitrate et le dépassement de la norme apporte un préjudice à la santé humaine, notamment pour les bébés. L'eau d'une nappe ne contient naturellement pas de composés azotés: ceux-ci, proviennent de la décomposition de la matière vivante par les micro-organismes. C'est l'augmentation artificielle de la quantité d'azote combiné disponible dans le sol qui crée un déséquilibre entre l'apport et la consommation et produit un excès d'azote qui est finalement entraîné vers la nappe, cette forme d'azote se trouve sous forme de nitrates et d'ammonium (Beauchamp, 2006).

I.3-Le cycle de l'azote

Le cycle de l'azote dans les sols est marqué par différents processus dont les effets cumulés conduisent ou non à maintenir un excès d'azote dans les sols, et à le rendre disponible pour le lessivage. L'azote dans les sols provient principalement de la fixation de l'azote atmosphérique, du dépôt de l'azote contenu dans les précipitations, des amendements organiques et des apports d'engrais de synthèse. La fixation libre de l'azote par des bactéries aérobies ou anaérobies contribue à maintenir un stock d'azote de 10 à 30 kg/ha. L'apport d'azote par la fixation symbiotique des espèces légumineuses variant entre quelques dizaines à plusieurs centaines de kg/ha, selon les conditions de pH, d'humidité et de teneurs en nitrates (Recous et al, 1990). Les apports d'azote sous forme organique dans les sols se font par

amendements anthropiques (fumier, etc...), restitution au sol des résidus de culture et/ou restitution des déjections animales. La constitution du stock d'azote minéral dans le sol est issue des apports d'engrais de synthèse, sous forme d'ammonium, de nitrates et d'urée. L'effet des processus internes au cycle de l'azote peut être dominant par rapport aux modifications induites par les processus externes. Les processus internes interagissent avec les processus externes au cycle de l'azote, contrôlant le stock et les formes de l'azote contenu dans le sol, quelle que soit l'origine de ce dernier. La minéralisation ou l'ammonification correspond à la dégradation de la matière organique, conduisant à la production d'ammonium (NH_4^+). La minéralisation est d'autant plus forte que les apports sont importants, elle est maximale au printemps et à l'automne lorsque les températures sont douces et le sol humide (Webb et Walling, 1985).

I.4- Pollution et dégradation de la qualité:

La qualité naturelle des eaux souterraines peut être altérée par l'activité humaine. La détérioration de la qualité de l'eau est appréciée par mesure des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Dans le cas d'une détérioration jugée importante, l'eau ne sera plus considérée comme potable pour la consommation humaine. Elle pourra être telle quelle utilisée à d'autres fins (irrigation...) ou devra subir un traitement appropriée pour retrouver sa potabilité. L'eau des nappes n'est donc pas à l'abri de la pollution et l'auto-épuration n'est pas complète dans toutes les nappes et vis-à-vis de certaines substances (Beauchamp, 2006).

I.4.1- Vulnérabilité des nappes à la pollution.

La vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables: les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à rincer les particules de la zones non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées. Les nappes captives en revanche sont mieux protégées par les couches imperméables qui les surmontent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, donc plus aisée à protéger. Leur pollution apparaît lorsque le niveau protecteur imperméable est percé par un ouvrage (ancien forage, fouille profonde...). Enfin, la percolation de l'eau dans un milieu poreux peut produire une fixation des substances sur les particules et donc une

épuration de l'eau. Ce phénomène n'existe pas dans les milieux fissurés où la circulation est bien plus rapide (Beauchamp, 2006).

Pour atteindre une nappe libre en milieux poreux, les polluants transportés par les eaux d'infiltration doivent franchir de nombreux obstacles:

- **Le Sol**

L'activité chimique et microbiologique est intense (oxydation, réduction...) De nombreux corps sont modifiés chimiquement, les polluants organiques peuvent être métabolisés et minéralisés. Néanmoins, cette biodégradation peut aboutir à des métabolites au moins aussi toxiques que les polluants d'origine. Les complexes argilo-humiques peuvent fixer de nombreux corps minéraux et organiques par adsorption.

- **La zone non saturée**

Comme le sol, elle joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances. Cette action est d'autant plus efficace que la granulométrie est plus faible.

- **La zone saturée**

La filtration se poursuit dans le milieu poreux de la nappe; le polluant est dilué dans la masse d'eau.

La protection de la nappe sera d'autant meilleure que le sol et la zone non saturée sont épais, que leur granulométrie est fine et que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible. En revanche, ce type de nappe une fois contaminée par un polluant, reste longtemps.

Dans les nappes libres en milieu fissuré, la vulnérabilité à la pollution dépend de leur recouvrement. Les aquifères en terrains anciens (granites, schistes...) sont généralement recouverts par des formations meubles d'altération qui jouent le rôle de filtre. Ces matériaux meubles peuvent d'ailleurs remplir les fissures des roches et prolonger ainsi leur action de protection. Il n'en est pas de même dans les aquifères calcaires: les polluants s'infiltrant dans les fissures, y circulent rapidement et réapparaissent en l'état dans les sources et les forages. La pollution apparaît sous forme de pics de courte durée; elle disparaît rapidement si l'apport de polluant cesse.

Les nappes alluviales sont en connexion hydraulique avec le cours d'eau; la qualité de leur eau dépend de celle de la rivière. Comme pour le sol, les matériaux couvrant le fond de la rivière jouent le rôle de filtre. Ces nappes sont particulièrement vulnérables, influencées de

nombreuses sources de pollution dans les lieux d'urbanisation, d'industrialisation (villes, routes, exploitation des granulats...) et agricoles.

Généralement, la pollution des eaux souterraines est favorisée par certains aménagements et pratiques, telles que:

- Fonçage des forages et puits sans précaution, ouverture de gravières, creusement arbitraire des fausses septiques et puisards pour infiltrer les eaux usées en absence des réseaux d'évacuation gérés, rejets direct des déchets liquides et solides dans les points d'eau abandonnés.

- Mauvaise gestion des eaux de ruissellement, suite à l'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits), ce qui produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux...). Le drainage agricole, et des eaux usées.

- Elevages intensifs, nourris de farines de soja et de maïs fourrage, produisant une accumulation locale d'excréments difficiles à gérer.

- Modification des pratiques agricoles en remplacement la prairie par des cultures intensives, du maïs fourrage, l'utilisation abusive des herbicides et des produits azotés.

I.4.2- Sources, Causes et impact de la pollution des eaux souterraines par les nitrates

De nombreux éléments chimiques présents dans l'eau d'une manière générale ont une origine naturelle liée essentiellement à la nature des précipitations atmosphériques. Il faut ajouter à cela les apports liés à l'activité humaine (urbaine, agricole et industrielle). L'évacuation des eaux usées et des eaux de surface devient de plus en plus délicate au fur et à mesure du développement des principales villes. Une grande partie de la population se répartie le long des oueds et dans la plaine alluviale, leurs eaux usées sont directement rejetées dans les oueds (sans aucun traitement) qui les véhiculent vers la plaine. Notez que les habitants en zones rurales utilisent des fosses septiques (non conformes aux normes) et les oueds comme exutoires à leurs eaux usées. Les rejets ménagers constituent une autre forme de pollution. Leurs rejets anarchiques peuvent entraîner de nombreuses pollutions et dangers en portant atteinte à la qualité des eaux superficielles et souterraines par infiltration, à la qualité de l'air et à l'esthétique du milieu.

Dans le cas d'une nappe alluviale dont la recharge s'effectue principalement par l'infiltration et la percolation de l'eau à travers la zone non saturée, les fuites de nitrate sous les parcelles agricoles influencent donc significativement les concentrations en nitrate de la nappe (Guillaume, 2008).

I.5- Transfert et évolution des polluants

Dans le milieu souterrain, l'évolution des polluants est très lente, comparativement à ce qui se passe en surface. Il s'écoule des mois, des années, ou même des dizaines d'années, entre le début de la pollution et sa mise en évidence, les volumes infiltrés peuvent donc être très importants. Le milieu souterrain intègre successivement tous les événements polluants, et les nuisances peuvent se maintenir très longtemps après le tarissement des sources de pollution. Les bactéries sont retenues dans les premiers centimètres du sol. Les virus sont en revanche plus mobiles et peuvent contaminer la nappe sous-jacente. Le temps de transfert d'un polluant chimique à la nappe varie de quelques jours à plusieurs années. Il dépend principalement de:

- L'épaisseur de la zone non saturée, c'est à dire la profondeur de la surface piézométrique;
- la perméabilité du réservoir (fissuration) ou le pouvoir de filtration ;
- Les caractéristiques du polluant.

Les terrains à perméabilité d'interstices (sables, grès) connaissent un temps de transfert très long. Les roches à perméabilité de fissures (calcaires) connaissent un temps de transfert court.

Le soluté traverse la zone non saturée, et d'abord le sol, caractérisé par la présence d'oxygène, de minéraux argileux et matières organiques.... Les réactions adsorption/désorption entraînent un retard dans le transfert du polluant. Ces deux phénomènes sont favorisés par la présence d'argiles, oxydes et hydroxydes, et par les constituants organiques. L'adsorption prédomine sur la désorption. Les métaux sous forme ionique sont retenus par échanges d'ions ou adsorption, par les argiles, acides humiques et hydroxydes. Par suite du phénomène de désorption, les cations sont libérés progressivement. La pollution persiste dans l'eau souterraine, longtemps après l'introduction du polluant. Cette rémanence peut durer des mois, voire des années.

En zone saturée, la vitesse de propagation du soluté n'est pas identique à celle de l'eau souterraine. Elle dépend du type de polluant, en particulier de sa viscosité, et de sa concentration (phénomène de diffusion). Le débit de la nappe et les fluctuations de la surface piézométrique jouent également un rôle ([Beauchamp, 2006](#)).

I.5.1-Transfert dans le sol

Les argiles et la matière organique peuvent aider à retenir des composés organiques dans le sol (humus). Les interactions chimiques entre les solides peuvent être très complexes. Plus la molécule est grosse, mieux elle sera adsorbée sur les argiles et la matière organique. Les composés constitués de carbone, d'hydrogène, de brome, de chlore ou d'iode sont hydrophobes. Ceux composés d'azote, de soufre, d'oxygène ou de phosphore sont hydrophiles. L'hydrophobicité d'une molécule favorise son accumulation dans le sol. Son caractère hydrophile favorise sa lixiviation et donc son transfert à la nappe.

Grâce à ses propriétés d'adsorption et d'échange, dues à la présence de colloïdes minéraux et organiques, le sol peut retenir un grand nombre de substances très diverses.

Les polluants peuvent être piégés dans les pores du sol, trop étroits pour que les bactéries puissent y pénétrer. Ils deviennent inaccessibles aux microorganismes et s'accumulent. Les phosphates sont fortement retenus par le calcium ou sur les bords des feuillets argileux. Certains herbicides, comme l'atrazine, sont très fortement retenus dans les sols. Les polluants peuvent être piégés dans des structures argileuses, ou complexés avec des polymères organiques résistants à la biotransformation (lignines, composés humiques). Certaines molécules sont résistantes, sur de très longues périodes, à toute action de dégradation. L'accumulation peut être due également à des conditions non favorables au développement des microorganismes (manque de nutriment par exemple). Les polluants et leurs produits de dégradation peuvent aussi être piégés temporairement par les animaux ou les végétaux. C'est le phénomène de bioaccumulation. Le sol joue donc un rôle fondamental dans la fixation des micropolluants. Il fait également fonction de stockage et de tampon en ce qui concerne la pollution aux nitrates de la nappe ([Beauchamp, 2006](#)).

I.5.2-Transfert dans la zone non saturée

Le fluide polluant migre d'abord verticalement dans le milieu non saturé entre la surface du sol et la nappe, laissant dans son sillage des terrains imprégnés à une concentration proche de la saturation. Suivant sa volatilité, le polluant a tendance à plus ou moins diffuser dans la phase gazeuse du milieu non saturé. C'est notamment le cas des solvants chlorés et des hydrocarbures aromatiques.

Les teneurs des fractions solubles du produit polluant évoluent avec le temps et la distance à la source, sous l'effet de la dilution, de la convection (entraînement direct par l'eau), de la dispersion due à la tortuosité des écoulements entre les grains du terrain, et enfin de

phénomènes de fixation ou de dégradation : transformations chimiques de type oxydoréduction, précipitation, hydrolyse, complexation avec d'autres substances, biodégradation des molécules organiques (Beauchamp, 2006).

I.5.3-Evolution en milieu saturé

Une fois la surface piézométrique franchie, la propagation du polluant ne rencontre pratiquement plus d'obstacles. Dans l'aquifère, en raison de la rareté ou de l'absence d'oxygène, de matières organiques et de microorganismes, le rôle épurateur est réduit, comparativement à la zone non saturée. Les mécanismes de transport du soluté dans l'aquifère sont complexes. Ils sont la conséquence de l'hétérogénéité du réservoir. La dispersion du soluté se fait à la verticale du foyer de contamination (zone non saturée), puis selon un étalement latéral dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine (zone saturée).

La dilution est d'autant plus importante que le débit de la nappe, la vitesse ou la transmissivité sont élevés. La vitesse d'écoulement est assez lente en aquifère homogène, mais peut être extrêmement rapide en milieu karstique.

Dans la nappe, l'extension du panache de pollution dépend essentiellement de la direction et de la vitesse d'écoulement de l'eau, mais aussi des caractéristiques du polluant:

- La viscosité d'un polluant non miscible,
- L'adsorption et la désorption sur les particules de la matrice argilo-humique,
- L'évolution critique du polluant (dégradabilité).

Il faut distinguer les éléments chimiques solubles des insolubles plus légers ou plus lourds que l'eau, et les polluants bactériologiques.

La concentration des polluants minéraux dépend de leur solubilité. La solubilité et la mobilité des métaux lourds sont généralement contrôlée par les anions (les plus abondants dans l'eau souterraine): hydroxydes, carbonates, sulfates, chlorures et sulfures. Cette solubilité peut être modifiée par la formation de complexes argilo-humiques insolubles qui fixent les cations. Les substances organiques solubles sont maintenues en solution sous forme moléculaire par des liaisons hydrogènes. Les produits organiques peuvent être totalement détruits dans l'eau, ou transformés en produits non toxiques, par des réactions chimiques. La dégradation transforme un produit complexe en produits simples. L'activation est la transformation d'une substance non toxique en une molécule toxique. La détoxification consiste en la perte du caractère toxique (Beauchamp, 2006).

CHAPITRE II:

METHODES ET MATERIEL

II- Méthodes et Matériel

II.1- Etablissement du bilan hydrologique

L'objectif du bilan hydrologique est de comptabiliser les apports et les pertes en eau d'un bassin versant, autrement dit de quantifier les transferts d'eau issus des précipitations.

L'équation générale du bilan au niveau d'un bassin versant est :

$$P \text{ (mm)} = E_x + \text{ETR} \quad \text{avec} \quad E_x = I + R \pm V$$

Où :

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

E_x : excédent moyen annuel (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm) ;

I : infiltration (mm) ;

R : ruissellement (mm).

V : variation de la réserve, généralement très faible.

Le calcul du bilan est basé sur les données hydroclimatologiques telles que les précipitations les températures et l'évapotranspiration.

II.1.1- L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée par la formule de Thornthwaite, qui tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

$$ETP_{cor} = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a * K, \text{ (en mm).}$$

Où :

ETP_{cor} : Evapotranspiration mensuelle corrigée, (en mm) ;

T : Température moyenne mensuelle, (en °C) ;

$I = \sum i$; Avec I : Indice thermique annuel

i : Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression : $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,5}$

a : Coefficient calculé par la formule : $a = 1,6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0,5$;

K : Coefficient de correction, qui dépend du temps et de la latitude.

II.1.2- La réserve facilement utilisable (RFU)

La réserve facilement utilisable par les plantes (RFU), est calculée par la formule de (Richard, 1979) proposé pour la partie Nord- Est de l'Algérie qui est la suivante:

$$RFU = 1/3 D_a \cdot H_e \cdot P_r$$

Avec:

RFU: réserve facilement utilisable en (mm).

D_a : densité apparente du sol.

H_e : Capacité de rétention (Humidité du sol).

P_r : Profondeur de la terre parcourue par les racines en (m).

II.1.3- L'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle est calculée par des différentes méthodes, selon le climat et la nature des surfaces évaporantes.

II.1.3.1- Méthode de Thornthwaite

On peut évaluer l'évapotranspiration réelle par l'établissement du bilan hydrologique selon deux cas.

a)- Si $P > ETP$, alors $ETR = ETP$

Dans ce cas l'excédent provenant des précipitations est emmagasiné dans le sol pour alimenter la RFU jusqu'à sa saturation. Son surplus sera attribué à l'excédent (waters-surplus).

b)- si $P < ETP$, alors, $ETR = P + R.F.U$ (toute ou une partie de la R.F.U).

Si R.F.U disponible est insuffisant pour satisfaire l'ETR, alors l'ETR = P, et elle sera inférieur à l'ETP, dans ce cas on aboutira un déficit agricole (D_a).

II.1.3.2- Méthode de L. Turc

Turc a établi une formule qui permet de calculer l'ETR annuelle.

$$ETR = P / (0.9 + (P^2/L^2))^{0.5}$$

Où :

ETR : évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

L : paramètre dépendant de la température

$$L = 300 + 250t + 0.05t^3$$

t : température moyenne annuelle (°C)

II.1.3.3- Méthode de Coutagne

Coutagne a défini une formule empirique permettant de calculer l'ETR qui est la suivante:

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

Où :

P: précipitation moyenne annuelle (mm);

λ : coefficient dépendant de la température $\lambda = 1 / (0.8 + 0.14t)$

t: température moyenne annuelle (°C).

Cette formule n'est applicable qu'à la condition suivante :

$1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$ d'où la validité de la formule de Coutagne.

II.1.4- Estimation du ruissellement et de l'infiltration

La lame d'eau ruisselée sera estimée à l'aide de la formule de Tixeront – Berkaloff qui s'écrit de la manière suivante :

$$R = P^3 / 3 \cdot (ETP)^2 \quad \text{avec:}$$

R : ruissellement moyen annuel (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm).

II.2- Les essais de pompage

Les essais de pompage (rabattements et temps), repose sur des méthodes graphiques d'approximation exprimée par des expressions d'hydrodynamiques en régime transitoire, établies par Theis (1935) et ses successeurs tel que Wenzel (1942) et Jacob (1950). En 1935 Theis établit les expressions de l'écoulement de l'eau souterraine vers les ouvrages de captage, dit en régime transitoire où le temps de pompage est court, l'expression générale ainsi établie est la suivante :

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du, \quad \text{ou} \quad \Delta = \frac{Q}{4\pi T} [W(u)]$$

Δ : Rabattement observé à l'instant « t » dans le puits d'observation en mètre.

$W(u)$: Est la fonction caractéristique où : $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

T : Transmissivité en m²/s.

S : Coefficient d'emmagasinement (sans unité).

r : Distance du sondage d'observation à l'axe du puits de pompage en mètre.

Q : Débit de pompage constant dans le puits en m³/s.

t : Durée de pompage (le temps écoulé à un instant donné depuis le début du pompage, en secondes).

Jacob en 1950 a établi une nouvelle expression inspirée de celle de Theis. Cette expression dite logarithmique est utilisable lorsque le temps de pompage croit (devient assez grand) et que r décroît.

$$\Delta = \frac{0,183Q}{4\pi T} \left(\log \frac{4Tt}{r^2 S} - 0,577216 \right) \quad \text{d'où,} \quad \Delta = \frac{Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Après solution numérique et logarithmiques décimales, l'équation de Jacob s'écrit :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Cette formule simplifiée de Jacob est la plus utilisée donne une solution d'autant plus proche de la courbe de dépression réelle à l'instant t que x est plus petit.

II.3- Méthodes d'analyses physico-chimiques de l'eau et statistiques

L'étude se base sur trois campagnes de prélèvement (Mars, Juin 2007 et Février 2016), et vingt trois points d'eau, dont l'utilisation domestiques, agricoles et domestiques/agricoles. Les analyses sont portées essentiellement sur les paramètres physicochimiques suivants: La température (T), le pH, la conductivité électrique (CE). Les cations : calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), sodium (Na⁺) et potassium (K⁺). Les anions: chlorures (Cl⁻), sulfate (SO₄²⁻), bicarbonates (HCO₃⁻) et les éléments nutritifs : nitrates (NO₃⁻), nitrites (NO₂⁻).

Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre (I.S.T), Université de Constantine.

II.3.1-Prélèvement de l'eau

Le prélèvement d'un échantillon d'eau doit avoir un grand soin, car il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.).

Le matériel de prélèvement doit faire l'objet d'une attention particulière. L'emploi de flacons en verre borosilicaté de préférence bouchés. On peut utiliser aussi des flacons en matières plastiques largement répandus en raison de plusieurs avantages (facilité de transport et nettoyage etc.) (Rodier, 1984).

A cet effet les prélèvements sont effectués en profondeur et en utilisant des bouteilles en plastique afin d'éliminer toute interaction entre la matière et l'échantillon. En ce qui concerne la conservation des échantillons nous avons utilisé une glacière gardant la température à 4°C et les analyses physico-chimiques ont été effectuées dans les premières 24 heures au laboratoire et cela pour ne pas altérer l'échantillon.

II.3.2-Méthodes d'analyses

II.3.2.1- Analyse par spectrophotométrie UV visible

La spectrophotométrie UV visible est une méthode d'analyse quantitative et qualitative qui présente un grand intérêt pour le dosage de cations et d'anions. Elle est fondée sur la mesure de la quantité d'énergie absorbée par les molécules traversées par un faisceau de la lumière monochromatique. L'énergie absorbée correspond à une transition électronique d'un niveau fondamental à un niveau excité (Tahar-Cherif, 1994).

Le principe de l'appareillage est basé schématiquement sur un ensemble formé d'une source lumineuse, d'un système optique dispersif et d'un détecteur.

Cet ensemble nous permet d'obtenir un spectre UV visible sous forme de courbe d'absorbance A en fonction de la longueur d'onde et de réaliser un dosage en faisant varier l'absorbance en fonction de la concentration. La limite peut atteindre parfois une valeur en concentration estimée à quelque ppm seulement.

L'intensité de cette absorption est en fonction de la concentration de l'espèce absorbant, elle est exprimée par la loi de Beer-Lambert (Tahar-Cherif, 1994):

$$A = \log I_0/I = \epsilon.l.C$$

Où:

A: absorbance, I_0 : intensité initiale, I: intensité transmise.

ϵ : coefficient d'extinction ou d'absorptivité des particules dissoutes.

l: épaisseur de la cellule de mesure. C: concentration de la solution en particules considérées.

La diminution de l'intensité lumineuse d'une radiation monochromatique est proportionnelle au nombre de particules qui absorbent la lumière.

II.3.2.2- Analyse physique

II. 3.2.2.1- Mesure de la température

II. 3.2.2.1.1- Principe

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissolution des sels dissous donc sur la conductivité, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, etc. (Rodier, 1984).

II. 3.2.2.1.2- Mode d'opérateur

Plonger immédiatement le thermomètre dans la bouteille d'eau à analyser pendant 5 minutes, (La lecture doit se faire à travers les parois de la bouteille).

La mesure de la température a été effectuée sur le terrain, de même celle de l'air au même endroit et au même moment.

II. 3.2.2.2-Mesure de potentiel d'hydrogène (pH)

II. 3.2.2.2.1-Principe

Le pH est l'une des mesures que l'on doit effectuer le plus fréquemment, il est relié à la teneur en ions H^+ et aussi à l'acidité et l'alcalinité de l'échantillon. Le pH-mètre est l'appareil le plus utilisé pour la mesure du pH.

***Réactif et appareil**

- Solution tampon.
- pH-mètre.
- Becher de 250 ml.

II. 3.2.2.2.2-Mode opératoire

- Brancher le pH-mètre, le laisser se stabiliser pendant quelques minutes, installer les électrodes aux entrées correspondantes sur l'appareil.

- Etalonner l'appareil à l'aide d'une solution tampon. En suite rincer l'électrode avec de l'eau distillée et avec l'échantillon à analyser.
- Amener l'échantillon d'eau à analyser à la température désirée.
- Plonger l'électrode dans l'échantillon à analyser et lire la valeur de pH directement.
- Après chaque détermination de pH, on retire l'électrode, on la rince et à la fin de l'expérience on la laisse tremper dans l'eau distillée, ou dans la solution tampon ou dans une solution de KCl saturée (Rodier, 1984).

II. 3.2.2.3-Mesure de la conductivité électrique (CE)

II. 3.2.2.3.1-Principe

La mesure de la conductivité électrique, est probablement l'une des plus simples et plus importantes pour le contrôle de la qualité des eaux. Valeur inverse de la résistivité, paramètre très largement utilisé en hydrochimie, la conductivité est fonction de la concentration en espèces ionisés, principalement de nature minérale.

La conductivité électrique est mesurée par un conductimètre.

II. 3.2.2.3.2-Mode opératoire

- Mettre l'échelle graduée spécifique pour la conductivité dans le galvanomètre.
- Basculer l'interrupteur général vers la droite 'zéro check' et le maintenir dans cette position au moyen de bouton de réglage 'zéro ajuste' faire coïncider l'aiguille avec l'extrémité gauche de l'arc sur l'échelle graduée.
- Verser l'échantillon dans un Erlenmeyer de 250 ml.
- Rincer électrode (sonde) avec de l'eau distillée.
- Mettre la sonde dans l'échantillon.
- Allumer le spectrophotomètre.
- Régler le sur le range '5' par le bouton 'range'.
- Lire la conductivité sur l'échelle graduée (Rodier, 1984).

II.3.2.3- Analyse chimique

II.3.2.3.1- Détermination de l'alcalinité 'Méthode volumétrique'

II.3.2.3.1.1- Principe

La détermination de l'alcalinité est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide en présence d'un indicateur coloré. On distingue deux types d'alcalinité:

TA: titre alcalimétrique qui représente la teneur en bases fortes contenues dans l'eau (OH^- , CO_3^{2-})

TAC: titre alcalimétrique complet qui représente la teneur en bases fortes et en bases faibles (OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^-) (Rodier, 1984).

II.3.2.3.1.2- Mode opératoire

II.3.2.3.2- Détermination du titre alcalimétrique (TA)

On prélève 25 ml d'eau à analyser dans un Erlen, on ajoute à 2 gouttes de phénophtaléine. Une coloration rose se développe. Et dans le cas contraire le TA est nul; c'est le cas des eaux qui ont un pH inférieur à 8,3. A l'aide d'une burette, on verse doucement l'acide dans un Erlen jusqu'à décoloration de la solution. On note le volume 'V' de l'acide versé (Rodier, 1984).

II.3.2.3.3- Détermination du titre alcalimétrique complet (TAC)

On ajoute à l'échantillon précédant (s'il n'est pas coloré) 2 gouttes de solution méthyle orange. Ensuite on le titre à nouveau avec le même acide jusqu'au virage du jaune orangé qui correspond au $\text{pH} = 4,3$ et on s'assure qu'une goutte supplémentaire d'acide provoque le passage de la coloration jaune orangé au jaune rose ($\text{pH} = 4$). On note alors le volume (V') d'acide versé depuis le début de dosage (Rodier, 1984).

✓ Expression des résultats

TA : Titre Alcalimétrique

Exprimé en meq/litre : $\text{TA} = [(V.N)/V_e] * 103$

Exprimé en mg/litre de CaCO_3 : $\text{TA} = [(V.N)/V_e] * 50 * 103$

Où : N : normalité de l'acide. V : volume titré. V_e : volume d'échantillon.

50 : masse équivalent de CaCO_3 .

TAC : Titre Alcalimétrique Complet

Exprimé en meq/litre : $\text{TAC} = [(V.N)/V_e] * 103$

Exprimé en mg/litre de CaCO_3 : $\text{TAC} = [(V.N)/V_e] * 50 * 103$

Remarque

Pour éliminer le chlore résiduel si l'eau en contient, on doit ajouter auparavant une goutte de solution de thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) N/50.

II.3.2.3.4 - Mesure de la dureté totale, calcique et magnésienne

II.3.2.3.4.1 -Dureté totale (TH)

II.3.2.3.4.1.1- Principe

Les alcalino-terreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe de type chélate par le sel disodique de l'acide éthylènediamine tétracétique (EDTA). Lors du titrage,

l'EDTA Na₂ réagit d'abord avec les ions de calcium et de magnésium libre en solution puis, au point d'équivalence avec les ions de calcium et de magnésium combinés avec l'indicateur, l'excès de l'indicateur libre provoque un changement de couleur du violet au bleu.

II.3.2.3.4.1.2- Mode opératoire

On prélève 25 ml d'eau à analyser et on chauffe à environ 25°C-30°C. On ajoute 1 ml de la solution tampon (pH = 10) et quelques mg d'indicateur coloré net, on verse la solution d'EDTA Na₂ jusqu'au virage de violacé au bleu ciel et soit V le volume de la solution d'EDTA versée.

✓ Expression des résultats

TH : Dureté Totale

Exprimée en meq/litre : $TH = [(V.N)/Ve] * 103$

Exprimée en mg/litre de CaCO₃ : $TH = [(V.N)/Ve] * 5 * 104$

Exprimée en °F : $TH = [(V.N)/Ve] * 5 * 103$

Où : N: normalité de l'EDTA-Na₂. V: volume l'EDTA-Na₂. Ve : volume d'échantillon en ml.

II.3.2.3.5-Détermination de la dureté calcique (TH_{Ca})

II.3.2.3.5.1-Principe

Le principe est identique à celui de la méthode complexométrique décrite pour la dureté totale. En milieu très basique, pour les valeurs de pH > 10, le magnésium précipité sous forme d'hydroxydes, et en présence du rouge de Murexide, on dose uniquement le calcium.

II.3.2.3.5.2-Mode opératoire

Dans un Erlen de 250 ml, on verse 25 ml d'eau à analyser, on ajoute 1 ml de NaOH (1N) et 0,05g d'indicateur Murexide, puis on amène l'échantillon à 25°C-30°C. Et on titre avec la solution d'EDTA-Na₂ (0,02N), jusqu'au virage du rose au pourpre.

✓ Expression des résultats

TH_{Ca} : Dureté Calcique

Exprimée en mg/litre de CaCO₃ : $TH_{Ca} = [(V.N)/Ve] * 5 * 104$

Exprimée en mg/litre de Ca : $[Ca^{2+}] = [(V.N)/Ve] * 2 * 102$

Où :N: normalité de l'EDTA-Na₂. V : volume l'EDTA-Na₂. Ve : volume d'échantillon en ml.

II.3.2.3.6-Détermination de la dureté magnésienne

II.3.2.3.6.1- Principe

La dureté magnésienne est par définition la concentration en sel de magnésium. Elle se déduit de la relation de la dureté totale qui est égale à la somme des deux duretés calcique et magnésienne.

$$TH = TH_{Ca} + TH_{Mg} \text{ en mg de CaCO}_3 \text{ et } TH_{Mg} = TH - TH_{Ca}$$

II.3.2.3.6.2- Mode opératoire

On verse 25 ml d'échantillon d'eau à analyser dans un erlen de 250 ml, puis on ajoute 2 ml de la solution de sel oxalique à 25°C-30°C. On filtre le précipité blanc de CaC_2O_4 qu'on lave avec quelque ml d'eau distillée au dessus de l'entonnoir. L'eau de lavage est additionnée au filtrat. On ajoute par la suite 2,5 ml de la solution ammoniacal et quelque mg d'indicateur noir d'Eriochrome et on titre par la solution complexons III, on note le volume moyen versé V eu virage de la coloration au bleu.

✓ Expression des résultats

En mg/litre de $CaCO_3$: $TH_{Mg} = [(V.N)/Ve] * 5 * 10^4$

En mg/litre de Mg^{2+} : $[Mg^{2+}] = [(V.N)/Ve] * 122 * 10^2$

Où : N : normalité du complexons III EDTA- Na_2 (0,02N). V : volume de chute de burette (ml) d'EDTA- Na_2 (0,02N). Ve : volume d'échantillon (ml).

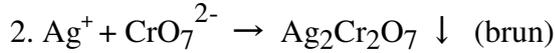
II.3.2.3.7-Dosage des chlorures par la méthode de 'MOHR'

Cette méthode de dosage est celle homologuée en France 'NF-T90-014 février 1952' pour analyser la teneur en Cl^- dans l'eau. Il y a des règles à respecter :

- La teneur en chlorures doit être comprise entre 5 et 150 mg/l (au dessous ou au dessus, la méthode donne des résultats erronés).
- Le pH doit être compris entre 5 et 9 (pour éviter les transformations des ions Ag^+ et CrO_4^{2-} , ce qui rendrait le dosage impossible).
- La présence des ions I^- et Br^- est interdite : AgI et $AgBr$ précipiteraient avant $AgCl$.

II.3.2.3.7.1-Principe

On dose les chlorures en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. On aura une teinte rouge qui caractérise le chromate d'argent formé par la présence d'un excès de la solution de nitrate d'argent suivant la réaction (Rodier, 1984).



II.3.2.3.7.2-Mode opératoire

On prend 25 ml de l'échantillon à analyser, à l'aide d'une pipette on ajoute 1 ml d'indicateur $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ et on titre par addition progressive de la solution de nitrate d'argent jusqu'à l'obtention d'une coloration à peine brunâtre (marron clair).

✓ Expression des résultats

$$\text{Cl}^- \text{ (mg/l)} = [(V.N)/V_e] * 35,5$$

Où: N: normalité d' AgNO_3 . V: volume d' AgNO_3 titrant. V_e : volume d'échantillon.
35,5: masse équivalente de chlore.

II.3.2.3.8-Détermination de la dureté en hydrogencarbonates (HCO_3^-)

Les teneurs en HCO_3^- sont évaluées après avoir déterminée l'alcalinité totale (TA) et l'alcalinité en sels minéraux :

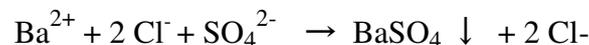
$$\text{HCO}_3^- \text{ (en mg/l)} = \text{TAC (meq/l)} * 61$$

61: masse équivalente de HCO_3^- .

II.3.2.3.9-Dosage des sulfates (méthode par turbidimétrie)

II.3.2.3.9.1-Principe

Les ions SO_4^{2-} sont précipités à l'état de sulfate de baryum qui est un sel très peu soluble suivant la réaction suivante:



Ce sel est maintenu en suspension grâce à un agent stabilisant (glycérine par exemple). La teneur en sulfate est reliée à la turbidité qu'on mesure par photométrie à 420 m.

II.3.2.3.9.2-Mode opératoire

Préparation des solutions étalons par dilution de la solution mère : préparer 5 ou 6 étalons contenant de 0 à 40 mg/l de sulfates en utilisant des flacons jaugés de 100 ml.

L'eau distillée servira de témoin (réglage du 100% de transmission du photomètre). On y ajoute les mêmes réactifs que dans les étalons ou dans les échantillons inconnus (Rodier, 1984).

II.3.2.3.9.3-Développement et mesure de la turbidité

Dans un Erlenmeyer de 250 ml placé sur un agitateur magnétique, verser 100 ml d'échantillon ou de solution étalon, ajouter avec la pipette 5 ml de la solution stabilisante. Agiter pendant 1 mn. La vitesse d'agitation devra être maintenue constante pendant toute la durée de l'expérience.

Ajouter environ 0,4 g de $BaCl_2$, pour plus de productibilité, utiliser une petite cuillère donnant une quantité égale de $BaCl_2$. Agiter pendant une minute puis verser la suspension dans la cellule de mesure. Attendre 3 à 4 mn pour que la turbidité se développe, puis faire la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde 420 nm; ne pas dépasser 10 mn après chaque addition de $BaCl_2$. Si on utilise un photomètre, commencé par le témoin afin de pouvoir régler le 100% de transmission pour chaque suspension, en effectuant des vérifications fréquentes du 0 100% (Rodier, 1984).

II.3.2.3.9.4-Correction de la turbidité naturelle

Si l'eau est turbide ou légèrement colorée, on effectue la mesure de la turbidité naturelle (qui est indépendante de la teneur en sulfate) en ajoutant à 100 ml d'échantillon 5 ml de la solution stabilisante sans $BaCl_2$. Cette turbidité est déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage et exprimée en $mg/l SO_4^{2-}$.

Remarque

- Prendre la température des échantillons, et chauffer si c'est nécessaire jusqu'à $20^\circ C - 25^\circ C$. Diluer à l'aide de l'eau distillée les échantillons dont la teneur en sulfates excède 40 mg/l .
- Si l'eau est colorée, utilisez un néphélométrie.

✓ **Expression des résultats**

La couleur est due à la présence des matières en suspension dans l'échantillon qui fausse le dosage. On peut cependant faire une correction en mesurant cette turbidité naturelle (sans l'addition de $BaCl_2$) et en exprimant en mg/l de sulfate. Grâce à la courbe d'étalonnage, il faut soustraire cette correction de la teneur totale en sulfate qui est déterminée après l'addition de $BaCl_2$.

II.3.3- Indices de saturation

L'indice de saturation est un modèle d'équilibre décrit le degré d'équilibre chimique d'une solution aqueuse avec un minéral, et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Appelo et Postma, 1993. Drever, 1997. Fehdi et al, 2011. Djneba et al, 2015). Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral concerné n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité (**Ksp**) au produit d'activité ionique (**KIAP**) des ions de référence dans la solution. Le degré de saturation peut être estimé à partir de l'équation suivante (Appelo et Postma, 1996).

$$IS = \log (KIAP/Ksp)$$

Où :

IS = l'indice de saturation.

KIAP = le produit d'activité ionique des ions.

Ksp = le produit de la solubilité du minéral.

Généralement l'équilibre d'eau-roche est atteint quand SI = 0. Si le SI > 0, l'eau est supposé sursaturé, la précipitation des minerais est nécessaire pour atteindre l'équilibre, par contre si le SI < 0, l'eau est sous-saturée, la dissolution des minerais est nécessaire pour atteindre l'équilibre.

II.3.4- Méthodes statistiques

Les méthodes d'analyses statistiques multivariées telles que (CAH : Classification ascendante hiérarchique, ACP : Analyse en composante principale, ...etc.), utilisées pour identifier les processus hydrogéochimiques contrôlant le chimisme de l'eau (Boudoukha et al, 2014. Ghodbane et al, 2016, Bencer et al, 2016, Ziani et al, 2016, Gaagai et al, 2017).

II.3.4.1- Classification ascendante hiérarchique (CAH)

La méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) est basée sur le regroupement des objets ou de données dans des classes à partir des similarités ou des dissimilarités entre ces objets que l'on veut regrouper. L'un des résultats de cette méthode est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données. On peut alors faire une idée d'un nombre adéquat de classe dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

Le choix de cette méthode est pour déterminer si les échantillons peuvent être groupés dans les groupes hydrochimiques statistiquement distincts qui peuvent être significatifs dans le contexte géologique. De nombreuses études ont employé cette technique pour classer

avec succès des échantillons d'eau (Alther, 1979. Williams, 1982. Farnham et al, 2000. Alberto et al, 2001. Meng et Maynard, 2001. Kim et al, 2009. Belkhiri et al, 2010. Tiri et al, 2015).

La classification est effectuée en regroupant les échantillons en fonction de leur 'similitude' basée sur la comparaison entre leurs paramètres multiples. Deux méthodes (Q-mode et R-mode) peuvent être appliquées pour identifier les faisceaux de dendrogramme. Le R-mode est habituellement appliqué aux variables de qualité de l'eau pour indiquer les interactions entre elles, alors que le Q-mode indique les interactions entre les échantillons étudiés. Dans la présente étude, CAH a été utilisée pour classer les échantillons en groupes hydrochimiques distinctes par la méthode d'agrégation de Ward (Ward, 1963). Un schéma (dendrogramme) de classification en utilisant la distance euclidienne (distance en ligne droite entre deux points dans l'espace c-dimensions défini par des variables c) pour la mesure de similarité, produit les groupes les plus distinctifs où chaque membre dans le groupe est plus similaire à ses membres que tout membre en dehors du groupe (Güler.2002). Comme il n'y a pas de test pour déterminer le nombre optimal des groupes dans l'ensemble de données, l'inspection visuelle est le seul critère à sélectionner les groupes dans le dendrogramme. La ligne de Phénon a été choisie à une distance de liaison par laquelle on peut distinguer les groupes en termes d'hydrochimie Variables.

II.3.4.2- Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales Conçue par Karl Pearson en 1901, intégrée à la statistique mathématique par Harold Hotelling en 1933. L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique essentiellement descriptive, son objectif est de présenter sous forme graphique, le maximum des informations contenues dans un tableau de données.

Cette technique d'analyse souvent notée ACP, fait partie des techniques descriptives multidimensionnelles. Elle appartient aussi au domaine du Datamining tel qu'il est mis en œuvre par exemple dans le logiciel SPAD 2004 (Asif et al, 2011). Ces techniques d'exploration sont exécutées dans le cadre d'enchaînements de procédures complémentaires de visualisation et de synthèse utilisées pour démêler la complexité et la redondance des données brutes et faire émerger des informations cachées dans les données.

La technique d'analyse en composantes principales peut être présentée de divers points de vue. Pour le statisticien classique, il s'agit de la recherche des axes principaux de l'ellipsoïde d'une distribution normale multidimensionnelle, ces axes étant estimés à partir d'un

échantillon. C'est la présentation initiale de 1933, puis celle des manuels classiques d'analyse multivariée.

Pour le factorialiste classique, il s'agit d'un cas particulier de la méthode d'analyse factorielle des psychométriciens (cas de variances spécifiques nulles ou égales).

L'analyse en composantes principales présente de nombreuses variantes selon les transformations apportées au tableau de données : le nuage des points-individus peut être centré ou non, réduit ou non. Parmi ces variantes, l'analyse en composantes principales normée (nuage centré-réduit) est certainement la plus utilisée et c'est celle-ci que nous choisissons pour présenter les principes de l'analyse.

D'une autre manière l'opération de l'analyse de composantes principales consiste à passer d'un tableau des données brutes, contenant toute l'information recueillie sur le phénomène que nous souhaitons étudier, à certaines représentations visuelles des données. Cette opération entraînera une certaine perte "d'information" que l'on essaie de minimiser. En échange, on obtient un gain en "signification", en particulier grâce aux représentations graphiques. Autrement dit, on passe du "magma" des données d'origine à des graphiques interprétables par l'utilisateur (Bouroche et al, 1980. Ghodbane, 2009). Pour l'interprétation, il est important d'avoir un minimum de connaissances sur le fonctionnement de l'ACP et la nature des résultats qu'elle produit.

Cette méthode consiste en évidence à déterminer les liens éventuels qui pourraient regrouper deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution dans des familles de même origine.

Enfin, du point de vue plus récent des analystes de données, il s'agit d'une technique de représentation des données, ayant un caractère optimal selon certains critères algébriques et géométriques, et que l'on utilise en général sans référence à des hypothèses de nature statistique ni à un modèle particulier.

Le but d'une analyse de corrélation est de décrire la relation statistique qui existe entre deux variables ou un ensemble de variables observées, au moyen de variables discrètes. Pour réduire le nombre de variable, la méthode de calcul de ces variables discrètes comme combinaisons linéaires des variables observées (Spearman, 1904). Cette technique permet de mettre des dépendances ou des correspondances entre deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution, afin d'avoir des sous groupes de variables corrélées ou non corrélées appelées facteurs qui expliquent la variance ou la covariance.

Le choix de cette méthode est de faire ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport à l'ensemble des points d'observation, dont le but d'avoir une idée sur le comportement hydrochimique et les sites de pollution.

II.3.5-Modélisation de la pollution

Les mécanismes de transport de polluants dans les nappes souterraines sont régis par de nombreux phénomènes. Les principaux sont liés aux écoulements d'eau au travers du milieu poreux souterrain. La convection et la dispersion sont les deux phénomènes les plus importants dans l'équation de transport. Dans cette étude on a appliqué deux modèles le premier 1D (ODAST) et le deuxième 2D (TDAST) pour le transport des nitrates dans l'eau souterraine de la zone Sud de la région de Chemora (Plaine Chemora-Remila).

II.3.5.1- Objectif

Le but de cette modélisation est de réaliser un modèle conceptuel permet de simuler l'évolution spatio-temporelle de la pollution de la nappe par les nitrates, afin de déterminer son impact sur la qualité des eaux et de délimiter son étendue.

II.3.5.2- Modélisation de l'écoulement et du transport convectif-dispersif d'un soluté

L'étude de transfert de polluants du sol vers les nappes souterraines nécessite la connaissance des données pédologiques (caractéristiques du sol), chimiques (réactions chimiques : polluant-eau-sol), microbiologiques, ainsi les modalités et temps de transfert des polluants (selon les types de polluants). Les phénomènes de transfert sont liés aux écoulements d'eau au travers le milieu poreux souterrain. La convection et la dispersion sont les deux phénomènes les plus importants dans l'équation de transport.

II.3.5.2.1- L'équation de transport convectif-dispersif d'un soluté

Cette équation, définissant la variation de la concentration en fonction du temps d'une substance organique ou minérale dissoute transférée en milieu poreux saturé, s'écrit comme suit :

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}}_{\text{Dispersion}} - \underbrace{V \frac{\partial C}{\partial X}}_{\text{Convection}} - \underbrace{\lambda RC}_{\text{biodégradation}}$$

Où :

R : est le coefficient de retard, v est la vitesse d'écoulement de l'eau, C est la concentration, λ : représente le taux de décroissance dans le milieu liquide poreux (taux de biodégradation), DL : est la composante longitudinale du tenseur de dispersion. Pour le cas où la concentration de la source diminue exponentiellement avec le temps.

✓ **La dispersion :**

La dispersion mécanique tient compte de la dispersion des vitesses des particules autour de la vitesse moyenne de l'eau. Cette dispersion peut être liée à l'hétérogénéité du milieu (dispersion macroscopique) ou à des phénomènes microscopiques. La dispersion macroscopique est causée par des variations dans la largeur des pores, créant ainsi des différences de vitesse des particules. La micro-dispersion par contre est liée à la tortuosité et au branchement des systèmes de canaux de pores provoquant une variation de la vitesse par suite des forces de friction causées par la rugosité des surfaces des pores.

La dispersivité est une propriété caractéristique du milieu poreux mais également du champ de vitesse.

✓ **La convection :**

Le transport par convection correspond au déplacement du soluté à la même vitesse que l'eau. Les éléments en solution sont entraînés par le mouvement du fluide qui se déplace.

✓ **La biodégradation :**

Ce processus affecte principalement les composés organiques. La biodégradation peut avoir pour effet direct la dispersion complète du composé dans le milieu considéré.

Les processus de biodégradation sont surtout le fait des bactéries et des champignons vivants dans le milieu poreux considéré, ces micro-organismes utilisent en effet les substances organiques dans leur métabolisme.

II.3.5.2.2-Modèle unidimensionnel (1D-ODAST)

Le code analytique unidimensionnel pour le transport des solutés dans les milieux homogènes (ODAST), fournit une solution analytique pour un écoulement permanent dans un système unidimensionnel de coordonnées cartésiennes. Si l'écoulement coïncide avec l'axe x , et le composant longitudinal du tenseur de dispersion est supposé indépendant de la position.

Les conditions initiales sont définies par les valeurs de la concentration du polluant en un point initial $x=0$, du domaine modélisé à un temps de référence $t = 0$.

Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux d'eau ou de matière entre le domaine modélisé et le milieu extérieur. La détermination de ces conditions est nécessaire pour résoudre l'équation de transport.

Les conditions initiales et aux limites peut être donné ainsi :

$$C(x, t) = 0 \quad t = 0$$

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial x} = 0 \quad x = \infty$$

$$\left[-D \frac{\partial c}{\partial x} + vC \right]_{x=0} = vf(t)$$

$$f(t) = C_0 e^{-\alpha t} \quad 0 \leq t \leq t_0$$

$$f(t) = 0 \quad t > t_0$$

Où C_0 est la concentration de la source initiale et α son taux de décroissance.

L'ensemble de ces équations est résolu par la technique de transformation de Laplace, (Van Genuchten et Alves, 1982) :

$$C(x, t) = A(x, t) \quad 0 \leq t \leq t_0$$

$$C(x, t) = A(x, t) - A(x, t - t_0) e^{-\alpha t_0} \quad t > t_0$$

Où :

$$C(x, t) = C_0 e^{-\alpha t_0} A_1(x, t) \quad \alpha \neq \lambda$$

$$C(x, t) = C_0 e^{-\alpha t_0} A_2(x, t) \quad \alpha = \lambda$$

$$A_1(x, t) = \frac{v}{v+U} \exp\left[\frac{x(v-U)}{2D}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{Rx-Ut}{2(DRt)^{1/2}}\right] + \frac{v}{v-U} \exp\left[\frac{x(v+U)}{2D}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{Rx+Ut}{2(DRt)^{1/2}}\right] + \frac{v^2}{2DR(\lambda-\alpha)} \exp\left[\frac{vx}{D} + (\alpha-\lambda)t\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{Rx+vt}{2(DRt)^{1/2}}\right]$$

$$U = [v^2 + 4DR(\lambda - \alpha)]^{1/2}$$

$$A_2(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2(DRt)^{1/2}} \right] + \left[\frac{v^2}{\pi DR} \right]^{1/2} \exp \left[\frac{(Rx - vt)^2}{2DRt} \right] - \frac{1}{2} \left[1 + \frac{vx}{D} + \frac{v^2 t}{DR} \right] \exp \left[\frac{vx}{D} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx + vt}{2(DRt)^{1/2}} \right]$$

II.3.5.2.3- - Modèle bidimensionnel (2D- TDAST)

Le code analytique bidimensionnel et tridimensionnel pour le transport des solutés dans les milieux homogènes (TDAST), fournit une solution analytique pour écoulement permanent dans un système à deux dimensions de coordonnées cartésiennes. Si l'écoulement coïncide avec l'axe y , les composantes longitudinales (D_L) et transversales (D_T) du tenseur de dispersion sont supposées indépendantes de la position.

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial X} - \lambda RC = R \frac{\partial C}{\partial t}$$

Pour le cas où la concentration de la source diminue exponentiellement avec le temps, les conditions initiales et aux limites peuvent être données comme :

$$C(0, y, t) = C_0 e^{-at} \quad -a \leq y \leq a$$

$$C(0, y, t) = 0 \quad \text{autres valeurs de } y$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{\partial C}{\partial y} = 0$$

$$y \rightarrow \infty$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

$$x \rightarrow \infty$$

La solution analytique (mais pas forme close) d'un tel problème, comme présentée par [Cleary et Ungs \(1978\)](#), est donnée par :

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 x}{4(\pi D_L)^{1/2}} \exp \left(\frac{vx}{2D_L} - at \right) \int_0^{t/R} \exp \left[\left(-\lambda R - \alpha R + \frac{v^2}{4D_L} \right) \tau - \frac{x^2}{4D_L} \right] \tau^{-3/2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{a-y}{2(D_T \tau)^{1/2}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{a+y}{2(D_T \tau)^{1/2}} \right) \right] d\tau$$

CHAPITRE III:

APERÇU SUR LES CONDITIONS NATURELLES

III- Aperçu sur les conditions naturelles

III.I- Présentation du site d'étude

La zone d'étude se trouve dans la région de Chemora (W. Batna) à l'Est algérien, au cœur des hautes plaines constantinoises ; à mi-chemin entre les hauteurs du tell constantinois et celles des Aurès. Cette zone s'étale sur une superficie de 486 km², située entre les longitudes (35°31'N et 35°50' N) et les latitudes (6°32'E et 6°58'E), à 54 Km au Nord-est de la wilaya de Batna, à 108 Km au Sud-ouest de la wilaya Constantine et 448 Km au Sud-est d'Alger (Fig. III.1).

Les habitants de la région de Chemora sont d'environ 40.000 habitants, très dispersés surtout dans les zones éparses le long des piémonts des djebels Fedjoudj, Bouarif, Amrane, Merzeklel et regroupés en agglomérations en 05 sites : Chef lieu des Communes ; Chemora, Boulhilet, Boughrara Saoudi et les agglomérations secondaires (villages agricoles) de Kouachia, Haouadssa et Legrine.

La région de Chemora est à vocation Agricole (Ghodbane, 2009). L'occupation prédominante est la Céréaliculture intensive avec une faible activité pour les cultures maraîchères. Cette activité occupe une superficie de 16940 ha, le reste est steppique. Le cheptel représente une part importante de la région, il est détenu en majorité par les privés. Cette région fait parti du domaine atlasique (Aurassien) qui se morcelle en deux grands ensembles géomorphologiques qui sont l'Atlas saharien à l'Ouest et l'Atlas oriental à l'Est. Se campée dans les sous bassins (07-04, 05,06. ANRH), comprend deux dépressions séparées par djebel Fedjoudj (1248m) orienté Est-Ouest; l'une au Nord (plaine de Chemora-Boulhilet) et l'autre au Sud (plaine de Chemora-Remila).

III.I.1-Climat

Les facteurs climatiques de la région jouent un rôle déterminant dans le régime des cours d'eau, surtout les précipitations qui constituent le facteur essentiel intervenant par leur répartition annuelle et mensuelle et les averses génératrices des crues. Ces différents aspects des précipitations plus ou moins modifiés par l'effet combiné des autres paramètres physiques (altitude et exposition) et climatiques (températures, vents, humidité, évaporation et évapotranspiration, etc.), peuvent transporter les éléments azotés et nutritifs par lessivage (surtout en période pluvieuse). Ils pénètrent par infiltration dans le sol et transfèrent vers les eaux souterraines et/ou ruissellent vers les cours d'eau en présentant l'une des causes de la dégradation de l'eau.

La région de Chemora est caractérisé par un climat continental de type semi- aride avec des hivers rudes et pluvieux accompagnés souvent par des gelés, des chutes de neiges et des étés secs et chauds.

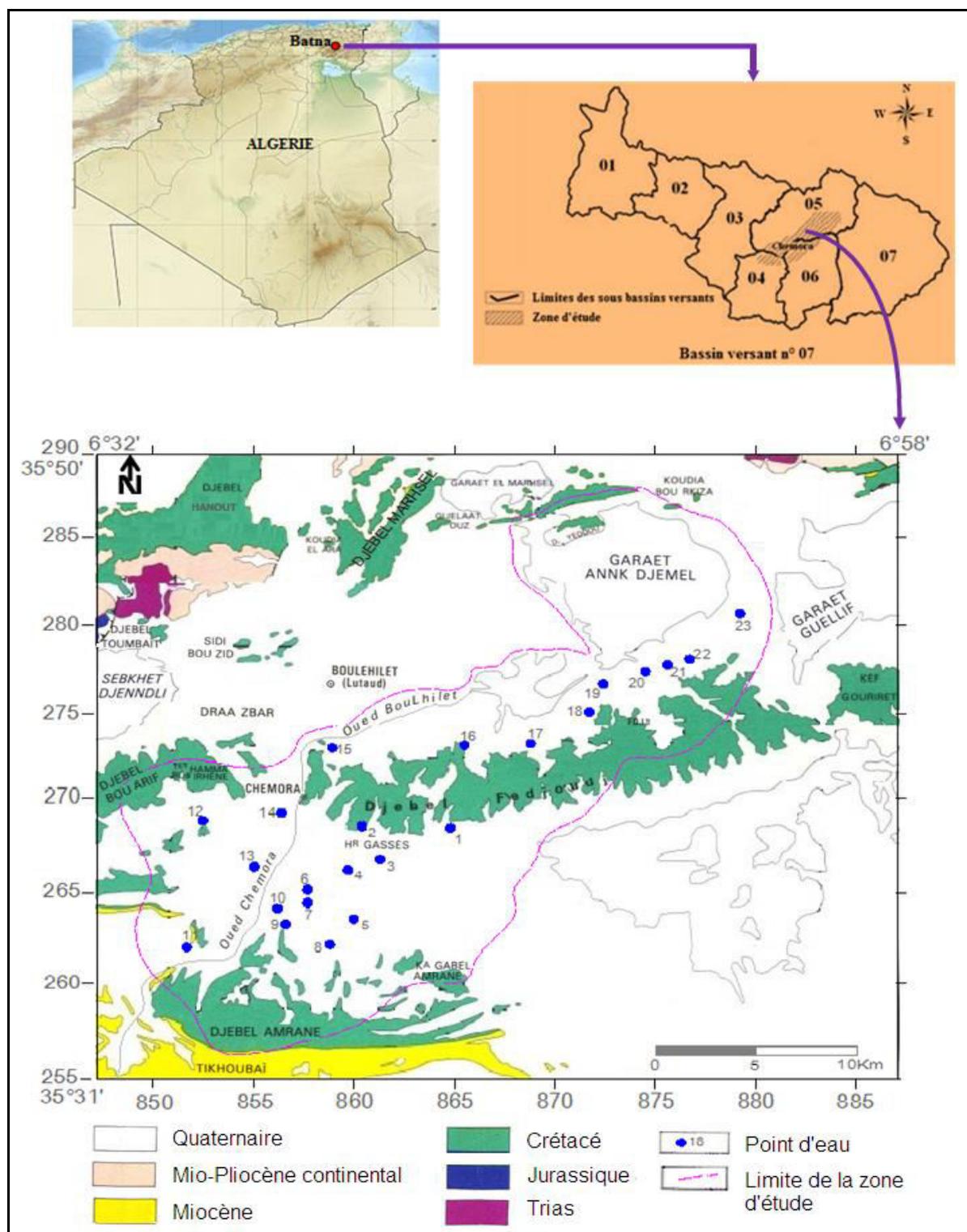


Fig. III.1. Carte des conditions naturelles et les lieux d'échantillonnage d'eau – Extrait de la carte géologique d'Ain Beida-Est d'Algérie : 1/200000 (Guellal et Vila, 1973).

Les précipitations sont irrégulières d'une année à une autre (comprises entre 200 et 400 mm) avec des orages et des fortes averses de fréquence entre le mois de Mai et septembre, qui provoquent une importante érosion. En période pluvieuse les éléments azotés et nutritifs provenant de la décomposition des déchets organiques (transformation de l'ammonium en nitrites ou en nitrates) sont transportés par ruissellement vers les cours d'eau, infiltrés dans le sol et transférés vers les eaux souterraines (Ghodbane, 2009 ; Cottard, 2008).

Les températures sont variables d'une saison à l'autre (4°C et 35°C) avec des amplitudes parfois très importantes expliquant l'alternance de deux périodes sèche et humide. Ces deux périodes induisent la fragmentation des matériaux pédologiques et géologiques, ce qui favorise l'infiltration des eaux chargées en éléments azotés et nutritifs vers les nappes aquifères (Ghodbane, 2009 ; Attoucheik, 2006 ; Belkhiri, 2005). Les vents canalisés par les massifs montagneux voisins des Aurès et du Bellezma, les siroccos soufflant pendant le mois de Mai et dure entre 20 et 40 jours et l'évapotranspiration qui caractérisent la région de chemora permettent le transport des éléments azotés et nutritifs qui se déposent directement sur le sol et la végétation de la région (l'ion nitrate est stable et assimilable par les plantes des sols) (Ghodbane, 2009 ; Cottard, 2008).

Le calcul du bilan hydrologique est effectué par les données de mesures de la station d'Ain Yagout et basé sur les résultats de l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de C.W. Thornthwaite (Ghodbane, 2009) :

$$ETP_{cor} = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a * K, \text{ (en mm).}$$

Où :

ETP_{cor} : Evapotranspiration mensuelle corrigée, (en mm) ;

T : Température moyenne mensuelle en (°C) ;

I : Indice thermique annuel, $I = \sum i$;

i : Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression : $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$

a : Coefficient calculé par la formule : $a = 1,6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0,5$;

K : Coefficient de correction, qui dépend du temps et de la latitude.

Les résultats de calcul du bilan hydrologique pour la station météorologique d'Ain Yagout à partir de la pluviométrie et des températures mensuelles sont résumés dans le (tableau III.1).

**Tableau III.1. Résultats de calcul du bilan hydrologique
(Station de d'Ain Yagout, 1986-2005) par ETP- Thornthwaite**

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Total
P (mm)	34	22	30	38	33	24	26	30	43	18	5	18	321
ETP_{cor}	110	60	19	9	10	17	37	56	106	153	178	184	939
P- ETP	-76	-38	11	29	23	7	-11	-26	-63	-135	-173	-166	/
RFU	0	0	11	40	46	46	35	9	-	-	-	-	/
ETR	34	22	19	9	10	17	37	56	52	18	5	18	297
Ex	-	-	-	-	17	7	-	-	-	-	-	-	24
Da	76	38	-	-	-	-	-	-	54	135	173	166	642

La lame d'eau ruisselée est estimée à l'aide de la formule de Tixeront – Berkaloff qui s'écrit de la manière suivante :

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

avec:

R : ruissellement moyen annuel (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm).

On a : P= 321 mm, ETP = 939mm; ce qui donne un ruissellement de :

R = 12.50 mm, soit 3.89% des précipitations d'où une infiltration :

I = 11.50 mm, soit 3.58% des précipitations.

III.1.2- Hydrographie :

Le réseau hydrographique (Fig. III.2) n'offre pas de grands oueds et reste tributaire des zones basses, c'est donc un système endoréique. Le seul oued important de cette région est l'oued Chemora qui draine les eaux de surface provenant du versant Nord des monts des Aurès et constituent le principal apport de cet oued vers Garaet Annk Djemel par le biais de oued Boulhilet. A partir de l'an 1998 et avec la réalisation du barrage de Koudiet M'daouar, toutes ces eaux sont stoppées et cumulées par ce dernier. Des lâchées d'eau ont eu lieu de temps à autre et ce, en fonction du taux de remplissage du barrage. Ces eaux qui servaient à irriguer presque toute la plaine et contribuaient à la réalimentation et à la dilution des eaux des nappes souterraines, leur stockage dans le barrage a provoqué un déséquilibre physicochimique et écologique.

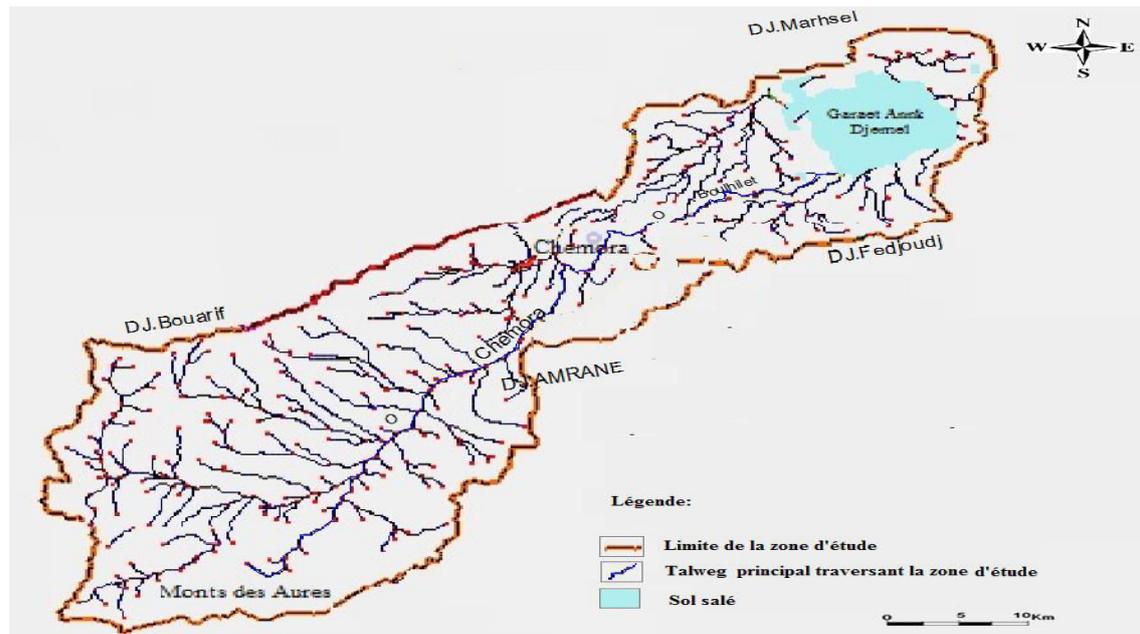


Fig. III.2: Réseau hydrographique

III.2- Aperçu géomorphologique et géologique :

La région de Chemora est située au cœur des hautes plaines constantinoises, entre les hauteurs du tell constantinois et celles des Aurès avec :

- A l'Est l'anticlinale du Djebel Fdjoudj (1248m) qui s'étend de l'Est à l'Ouest.
- Au sud l'anticlinale du Djebel Amrane.
- A l'Ouest l'anticlinale du Djebel Bouarif.

Cette région fait partie du domaine atlasique (Aurassien) qui se divise en deux grands ensembles géomorphologiques qui sont l'Atlas saharien à l'Ouest et l'Atlas oriental à l'Est.

La géologie montre que ces ensembles appartiennent à une même chaîne, formée par une alternance morno- calcaire et de calcaire gréseux vert à l'Ouest et par les marnes au Nord (Fig. III.3). Le Nord et le Sud présentent des terrains plats, l'Est présente le relief montagneux (Djebel Merzklal et Djebel Fedjoudj). A l'Ouest les fortes pentes existent uniquement au piémont du Djebel Bouirhsène (Prolongement Est de Djebel Bouarif). Les terrains les plus anciens qui affleurent dans le secteur sont attribués au Crétacé, et les plus récentes Quaternaire (R.Laffite. 1939).

La Zone d'étude s'étend sur la plaine de Chemora et celle de Boulhilet, Couvre une superficie d'environ 486 km² et limitée :

- Au Nord par les collines basses qui émergent du Quaternaire comme celles de Sidi-Bouزيد (907m) et les massifs montagneux de Djebel Marhsel et Djebel Ank Djemel.
- Au Sud par Djebel Amrane.

- A l'Est par Djebel Fedjoudj et Djebel Merzkhal.
- A l'Ouest on a le prolongement de Djebel Bouarif, et Djebel Bouirhsène (1064m).

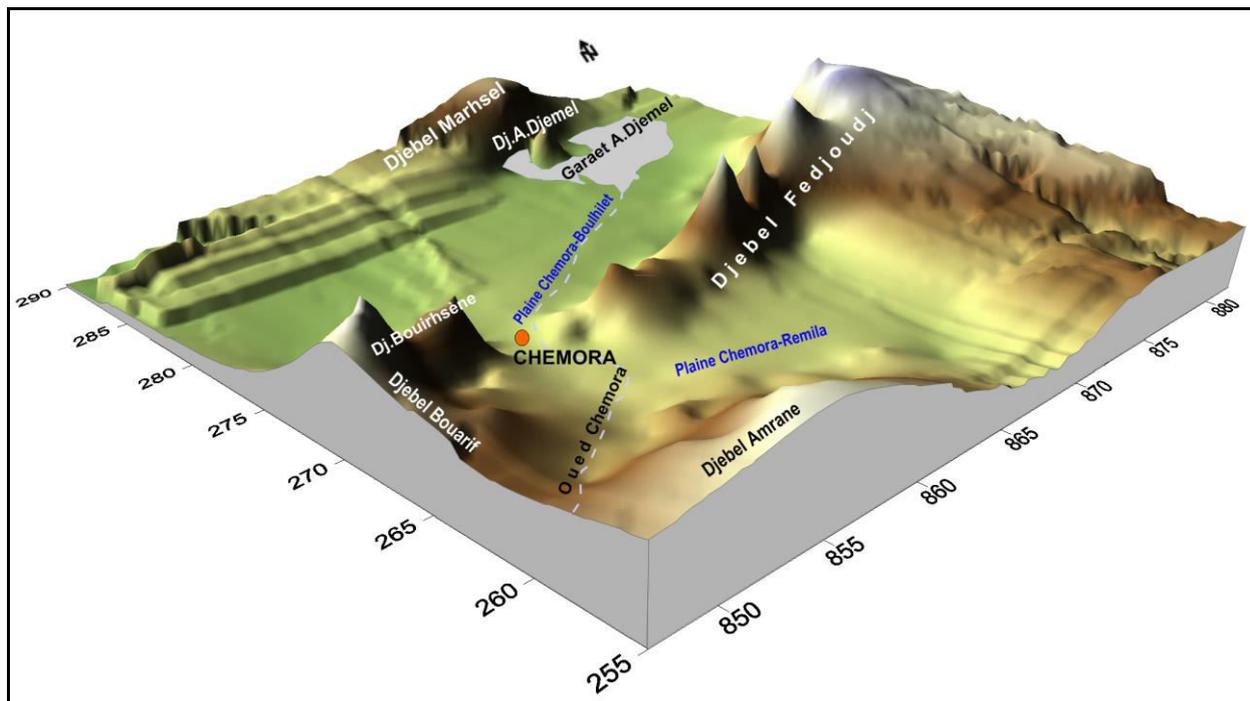


Fig. III.3- Carte géomorphologique de la région de Chemora

III.2.1- Lithostratigraphie

La partie stratigraphique de la zone d'étude présente des domaines géologiques où le Quaternaire couvre la majorité de la plaine de Chemora, les formations carbonatées affleurent au Djebel Merzkhal, Djebel Fedjouj et Bouirhsène à Djebel Bouarif. Selon les sondages qui traversent cette morphologie, on discerne un domaine très karstique et caverneuse d'âge Aptien et Barrémien de près de 1100 m d'épaisseur avec des faciès très comparables à ceux qui sont connus au Nord (feuille d'Ain Kercha) ou plus à l'Ouest (feuille d'Ain El-Ksar) et le Néocomien dont l'extrême base n'a pas été atteinte et développée sur plus 1300m d'épaisseur, lui aussi montre un net épaissement par rapport à la série du ravin bleu (feuille de Merouana). L'analyse lithostratigraphie ci-après est inspirée en grande partie des notices explicatives des cartes géologiques au 1/50.000 d'Ain el Ksar (173), Boulhilet(174), Ain-Yagout (146), Ain- Kercha(147), Oum El Bouaghi (148), Garaet El Taref (175), Tazoult (201), Toufana (202) et Khenchela (203), (S. Guellal et J.M.Vila. 1973).

III.2.1.1- Les formations du Quaternaire

⊕ « e » Eboulis :

Les éboulis longent le relief du Djebel Fedjouj, ils sont donc uniquement alimentés par l'Aptien calcaire.

✿ « A » **Alluvions actuelles et récentes :**

Les alluvions actuelles et récentes sont localisées d'une part au Nord et à l'Ouest du Djebel Fedjoud le long des vallées, de l'Oued de Chemora, de l'Oued Boulhilet et Oued Boulefreis au Sud de la carte.

✿ « Q » **Terres Arables, Limons Ariens et Quaternaires Indéterminé :**

Terres Arables, Limons Ariens et Quaternaires Indéterminé sont des formations de pentes, alluvions anciennes et Quaternaire indifférencié correspondent à des vastes zones plates cultivables, observables à des altitudes variées jusque sur les hauteurs du Djebel Bou Arif. Ce sont des limons sombres sur lesquels se développe un sol brun et des formations composées de sables gris, de limons et de graviers sont localisées sous la vallée de l'Oued Chemora affluent de l'Oued Taga.

✿ « Q^t » **Glacis Polygéniques nappant le relief :**

Les glacis polygéniques sont localisés au niveau des piémonts des reliefs et sont formés d'éléments détritiques divers. On remarque qu'il existe un granoclassement à l'amont et à l'aval du à la pente et au transport de ces éléments par les eaux de ruissellement.

✿ « Q^c » **Villafranchien probables, croûtes massives :**

Le Villafranchien et la croûte massive correspondent aux croûtes calcaires qui affleurent au Sud de Djebel Bouarif.

✿ « S » **Sebkha :**

Les Sebkhas sont des zones salées qui forment les sebkhas telles que Sebkhet Djendli, Garaet Ank Djamel et Guelif; elles sont inondées en hiver, l'été recouvertes par une couche de sel due à forte évaporation.

✿ « Q^s » **Sols salés anciens :**

Les sols salés anciens sont des sols salés hydromorphes qui portent une végétation caractéristique de salsolacées, localisés aux environs de sebkhas.

✿ « Q » **Formations dunaires:**

Les formations dunaires sont des amas de poussières et de sables fins localisés autour des Sebkhas et corrodés par l'érosion.

III.2.1.2-Miocène :**✿ «m» :Serravalien -Tortonien :**

Le Serravalien_ Tortonien est formé par des grès inférieurs dans le bassin de Timgad, dont deux affleurements situés dans l'angle Sud- ouest de la carte. Ce sont des grès blancs peu grossiers accompagnés de niveaux de biosparites gréseuses et de biomicrites à microfaune de la limite Serravalien_ Tortonien.

III.2.1.3- Crétacé

Les couches du Crétacé supérieur correspondent au versant nord de l'anticlinal du Djebel Amrane. celles du Crétacé inférieur correspondent à l'axe anticlinal BouArif- Fedjoud – Tarf.

✿ «C³» : Coniacien :

Le Coniacien a une épaisseur de 150 m, il est formé par des alternances de marnes grises et de marno-calcaires zoogènes à Incérâmes. Ce sont des bancs décimétriques ou métriques ayant un aspect noduleux. A la base, la microfaune est pauvre avec des Rotalia. Au sommet, elle est riche avec des Globotruncana.

✿ «C^{2b}» : Turonien moyen et supérieur :

A Djebel Amrane, le sommet du Turonien est caractérisé par une barre d'une épaisseur de 150m qui correspond à une série d'alternance de calcaires zoogènes noduleux riches en débris mollusques et d'échinodermes, suivi par des marnes beiges et de petits bancs métriques à Globotruncana renzi et Lenticulina très caractéristique. Sur les deux tiers supérieurs de la série, on remarque un banc dédoublé formé par des calcaires ocre noduleux, riche en débris divers. C'est un bon repère qu'on peut suivre sur de grandes distances.

✿ «C^{2a}» : Turonien basal :

La base de la série est formée par des marno-calcaires bitumineux à cassure noire qui forme la limite avec le Cénomaniens Supérieur.

Au dessus on a une dominance de marnes, bleues et de petits bancs de calcaires centimétriques ou décimétriques, sur plus de 200m. la microfaune est abondante formée par les Globotruncana, Helvetica, rotia sp, Heterohelix caractérise bien le Turonien franc.

✿ **«C^{1c}» : Cénomanién supérieur :**

Il s'agit d'une formation calcaire franche composée de micrites gris bleu à cassure noirâtre ou sombre en bancs d'épaisseur 1 à 3 mètres et de bancs marneux minces. La microfaune des marnes est riche en *Rotalipora cushnani* et autres ostracodes.

✿ **«C^{1b}» : Cénomanién moyen :**

C'est une formation marneuse qui dépasse les 300m d'épaisseur. Il s'agit de marnes grises avec des intercalations micritiques minces. C'est une formation riche en fossiles avec *Aspidiscus cristatus* et de nombreux Echinides.

✿ **«C^{1a}» : Cénomanién basal :**

Le Cénomanién basal constitue le cœur de l'anticlinal de Djebel Amrane, il s'agit de marnes gris-bleuté, schisteuses avec de minces intercalations de micrites argileuses et glauconieuses, La microfaune à *Hétéhélix* sp et *Hedbergelles* correspond peut être au Cénomanién basal, il est mieux daté au Djebel Bouarif.

✿ **«n⁶» : Albien :**

L'Albien a une épaisseur de 250m à Djebel Bouarif, c'est une série d'alternance d'argiles beige verdâtre, silteuses, de marnes grises et de grès blancs tendes, ferrugineux ou de grès quartziques fins. La microfaune est typiquement Albienne avec *Orbitolina*.

✿ **« n^{5c} » Aptien supérieur calcaire à miliolidés, orbitolines et « ovalveolina » reichili :**

Cette formation n'a été caractérisée qu'aux abords du thenit el-Khorfane à l'extrémité orientale de Djebel Fedjoud. Elle correspond à 150m d'une série avec des biomicrites sombres en bancs métriques, des grès blancs ferrugineux, des argiles grises siliceuses au sommet. Il s'agit sur 150m d'alternances de calcaires gris – noir Organo-détritiques, parfois oolithiques en bancs décimétriques ou métrique de dolomies beiges ou ocres souvent saccharoïdes et de marnes en passées métriques à débris de mollusques.

✿ **« n^{5b} » Aptien calcaire à miliolidés et orbitolines et rares intercalations dolomitiques :**

C'est l'Aptien calcaire qui forme l'essentiel de l'anticlinal de Djebel Fedjouj. Cette série atteint 175m d'épaisseur et correspond à une succession assez monotone de

calcaires sparitiques ou oolithiques sombres en bancs métriques, de minces bancs marneux gris, de petits bancs de calcaire noduleux à débits de rudistes et à orbitalines.

✿ « n^{5a} » **Aptien marneux :**

L'Aptien marneux apparaît seulement dans la moitié Est de Djebel Fedjoudj dans les cirques que l'érosion a aménagés dans la voûte anticlinale de celui-ci, 75 m de série affleurent mal sous les éboulis. Ce sont des marnes ; grises ou beiges avec 4 minces intercalations de calcaire zoogène en bancs décimétriques ou métriques beiges, noduleux riche en débris de lamelibranches, de brachiopodes et à orbitales et à milioles. A la base de cet ensemble marneux quelques bancs de grés ferrugineux appartiennent peut-être déjà au barrémien terminal et sont visibles sur quelques mètres.

✿ « n^{4d} » **Barrémien supérieur à dominante gréseuse :**

Ce type de formation affleure à Sidi Bouzid sur le bord nord-ouest de la feuille et près de Bouirhsène à Djebel Bouarif. L'épaisseur visible est de 80m, il faut noter qu'aucun fossile n'a été découvert.

✿ « n^{4c} » **Barrémien supérieur calcaro- dolomitique :**

Quelques petits affleurements à Sidi Bouzid correspondant à des dolomies sombres et à des calcaires fins noirs, cristallins, d'épaisseur de 50m.

III.2.2 - Tectonique et paléogéographie

III.2.2.1- Evolution paléogéographique

La zone d'étude appartient au vaste ensemble structural des hautes plaines constantinoises, entre les hauteurs du tell constantinois et celles des Aurès correspondant à un bassin fermé entouré de reliefs fortement accidentés et tectanisés.

III.2.2.2- Aperçu tectonique

L'analyse cartographique et les reconnaissances sismiques montrent que la structure de la zone d'étude est simple. Trois grands anticlinaux; l'anticlinal du Djebel Fedjoudj, Bouarif et celui de Djebel Amrane (Fig .III.4 et Fig .III.5).

- L'Anticlinal du Djebel Fedjoudj

Les pendages sont faibles sauf sur le versant sud. Les failles ont des rejets verticaux dus à des décrochements régulièrement dextres qui donnent à l'axe du djebel Fedjoudj une

courbure à convexité N-W et une concavité N-E, il s'agit d'un pli embouti par la compression alpine postérieure à la phase plicative Atlasique fini-éocène. L'Anticlinal du Djebel Fedjoudj est donc un pli embouti par le serrage alpin postérieur à la tectonique plicative atlasique fini-éocène (Guellal et Vila, 1977). Des basculements des bancs conglomératiques dans les formations du Mio-Pliocène des Djebels Chebka-Ahmar khadou-Guellif au Nord du massif de Fedjoudj, témoignant en faveur d'une déformation post-Pliocène (Marmi, 1995).

- L'anticlinal du Djebel Amrane

L'anticlinal du Djebel Amrane comprend des formations créacées qui sont affectées par des failles décrochantes senestres, d'orientation N-S. Ce pli se localise à l'extrémité Nord du bassin de Timgad-Touffana. Il présente une direction E-W à cœur créacé et flancs miocènes. Sa terminaison périclinale ouest plonge sous les sédiments messéniens de la dépression de Bou El Freiss. (Guellal et Vila, 1977) interprètent cet anticlinal comme un hors atlasique, plus tard, (Ghandriche, 1991) explique le rôle de la tectonique postmiocène dans sa structuration en se basant sur les données sismiques. Il présente des blocs plus ou moins basculés par le jeu des failles normales d'orientation NW-SE. Des failles cartographiques d'orientation E-W recoupent les formations créacées de Djebel Amrane, montrent un contact chevauchant, entre les formations turoniennes et celles du cénomaniens, souligné par une faille inverse. Le contact entre les formations créacées et celles du miocène et souligné par une discordance angulaire dans les secteurs de Lahbassi et Sidi salah (Dj. Amrane) caractérisée par la présence des conglomérats hétérogènes.

-L'anticlinal du Djebel Bourri

L'anticlinal de Dj. Bouarif, de direction globale NE-SW, est l'un des plus importants anticlinaux du domaine atlasique, faisant partie des structures héritées de la déformation atlasique. C'est le résultat de la tectonique héritée de la phase atlasique sur laquelle vient se greffer une tectonique post-miocène. Il constitue avec les monts d'Ain Yagout la limite nord du bassin de Timgad. (Bureau, 1970) a proposé la notion de « déformation en coup de poing », suggérant l'association d'un poinçon localisé, d'une variation des taux du raccourcissement parallèlement aux structures et des rotations autour d'axes verticaux. Ce pli est de style coffré (Vila, 1980) comporte un important réseau de failles d'orientation NNW-SSE se manifestant en décrochements dextres. Ces derniers sont responsables de la torsion et de la dislocation du massif de Bouarif pendant le Miocène.

Un accident directionnel sur le flanc sud de la structure est représenté par une faille inverse chevauchante, soulignée par la présence du Trias. Quant à (Ghandriche, 1991), il mentionne un contact chevauchant vers le sud qui suit le flanc sud du Bou Arif toujours accompagné d'une lame triasique et une accordance des dépôts miocènes-crétacés (sur le versant nord de ce dernier). Le décrochement dextres et la série de coulissement qui l'accompagne, modifient la direction des accidents tectoniques de direction SW-NE et indiquent par conséquence leur postérieuroté (Manani, 1991).

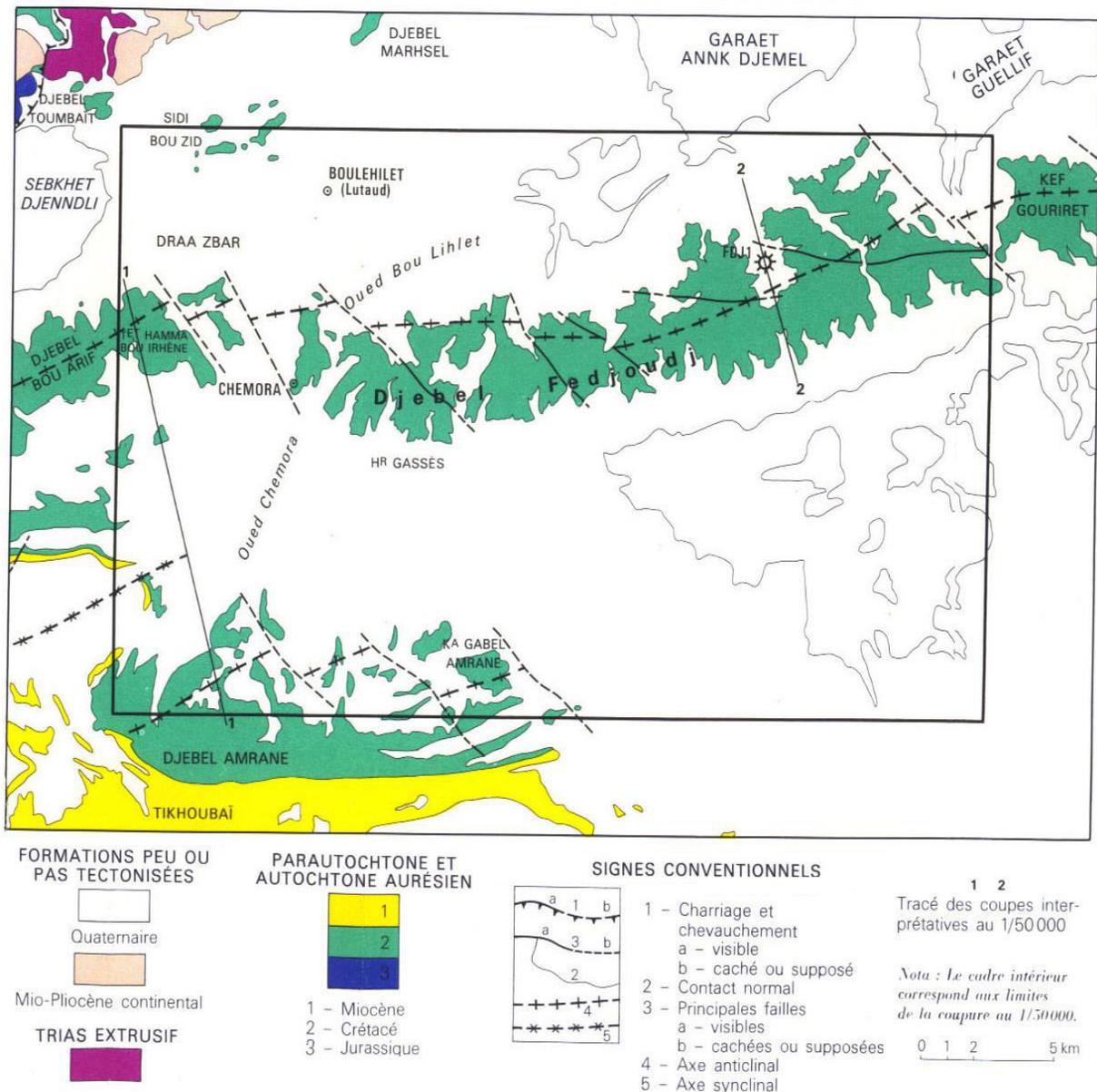


Fig. III.4. Schéma structural simplifié (Source carte géologique de l'Algérie, feuille de Boulhilet (174) : 1/50000)

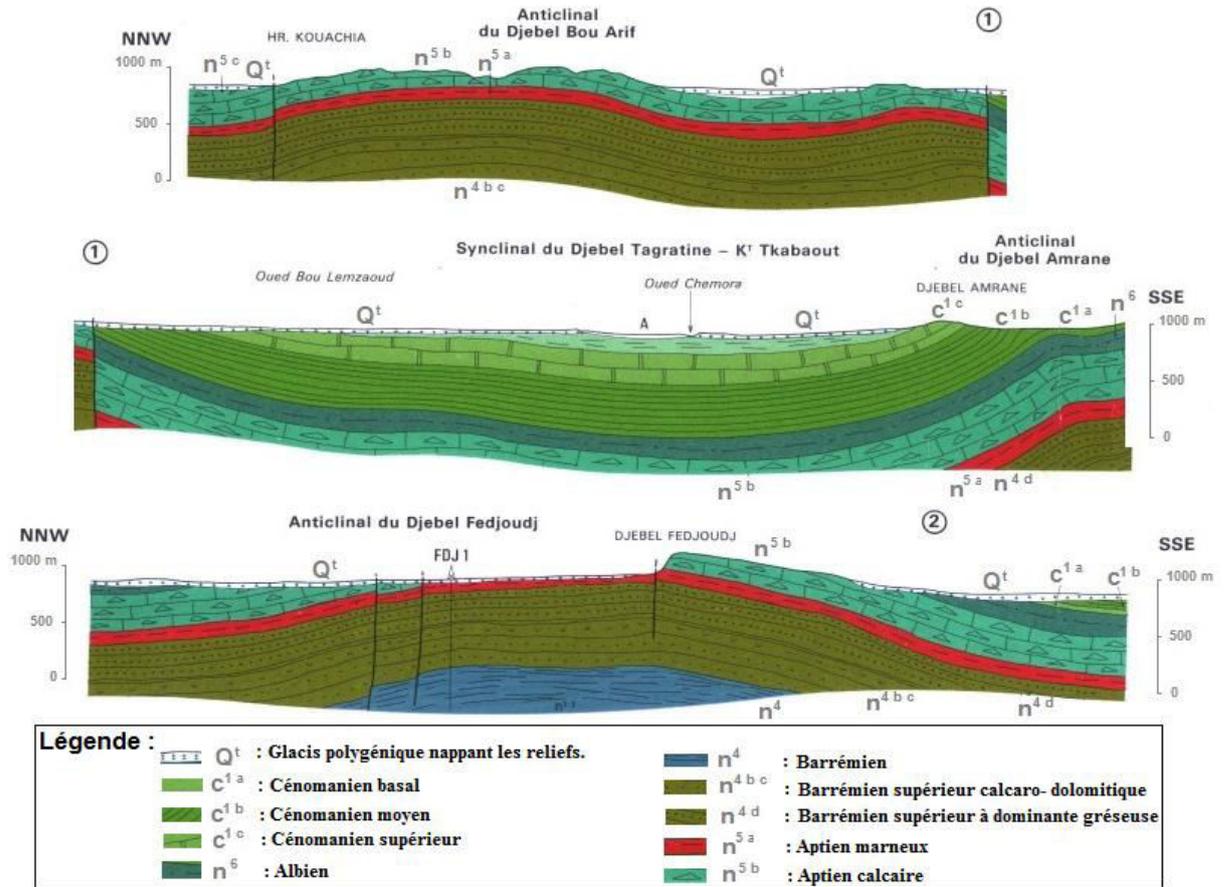


Fig. III.5. Coupes géologiques interprétatives : Anticlinales des Djebels : Bouarif, Amrane et Fedjoudj-(Source carte géologique de l'Algérie – feuille de Boulhilet (Ex Lutaud : N° 174) : 1/50000).

III.2.3- Description lithologiques à partir des logs et coupes des forages:

Un sondage (FDJ1-Log stratigraphique, figure III.6) réalisé par la société de SONATRACH dans le cadre de recherches et d'exploitation des hydrocarbures sur le versant Nord du Djebel Fedjoudj. Une étude sismique a confirmée l'allure régulière de cette structure qui possède à ses deux extrémités de belles fermetures. Le Log stratigraphique du sondage montre une série Barrémienne de près de 1100 m d'épaisseur. Le Néocomien dont l'extrême base est développé sur de 1300m d'épaisseur (Guellal et Vila, 1977).

Les coupes géologiques (Fig. III.7) des forages réalisés pour la potabilité et l'irrigation dans la région montrent des formations de seuils tectoniques ayant structuré en vastes plis très fracturés les ensembles de calcaires et marno-calcaires mésozoïques ont permis la mise en place sur des superficies notables les sédiments de couverture. Ainsi, le contexte géologique permis de penser à un système hydrogéologique multicouche des carbonates fracturés et des sédiments détritiques de couverture à modalités d'infiltration différentes et communes à la fois.

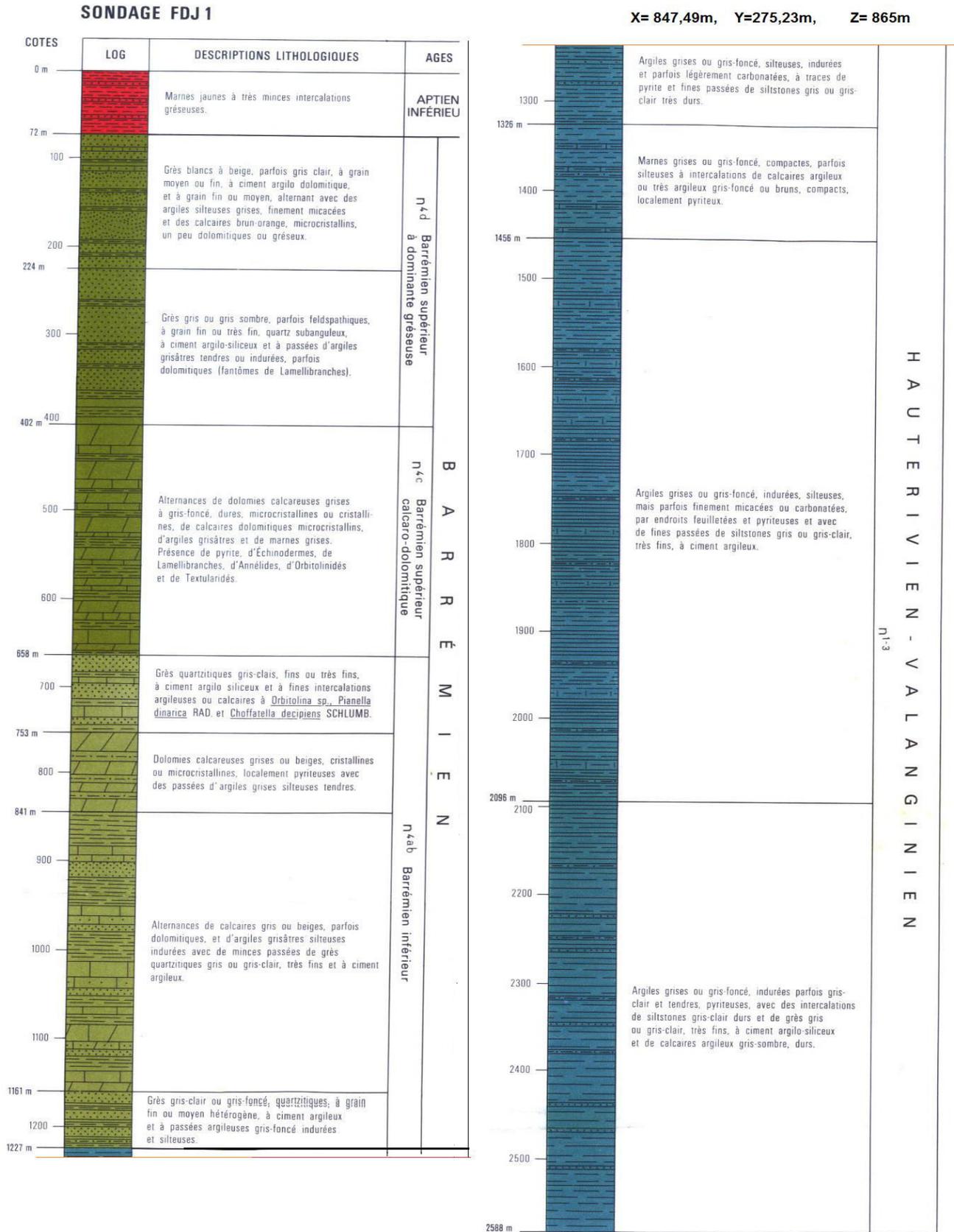
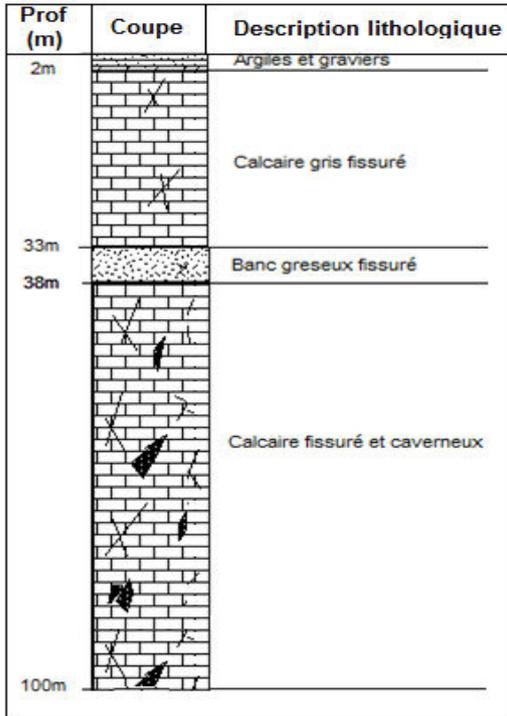


Fig III.6: Log stratigraphique du Sondage FDJ1 (Guellal et Vila, 1977).

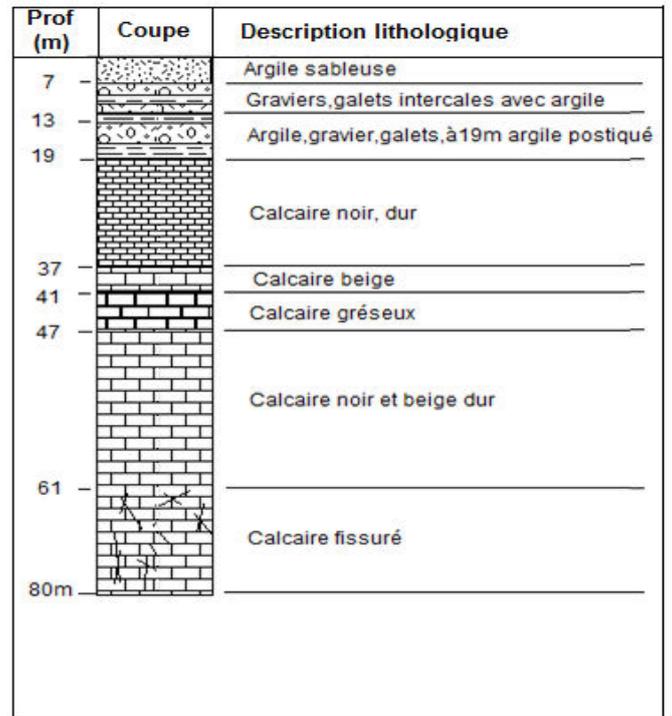
Forage 12 : Berkane - Est du Dj. Bouarif

$X= 851,75m, Y=269,23m, Z= 885m$



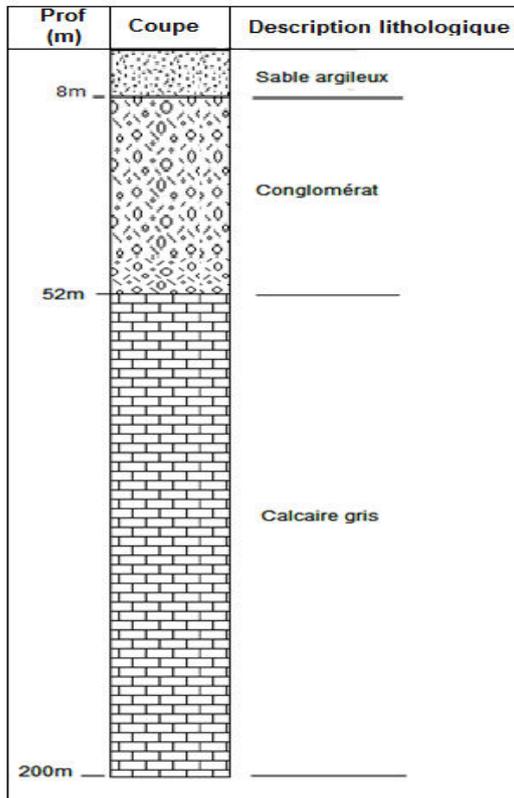
Forage 15 : Laadjardia- Sud- ouest du Djebel.

$Fedjoudj : X= 859,30m, Y= 274,0m, Z= 853m$



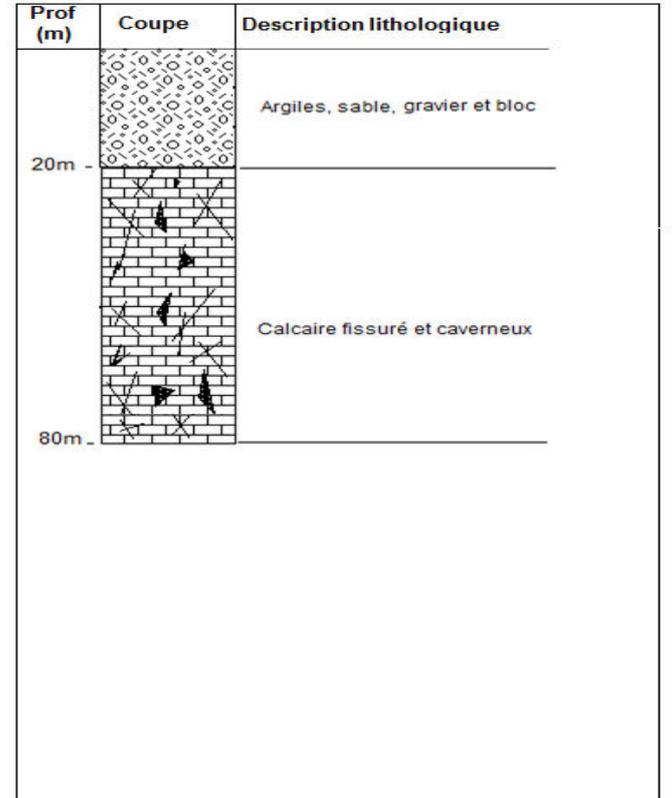
Forage 01 : Merzklel -Sud-est du Dj. Fedjoudj

$X=864,81m, Y=268,23m, Z= 873m$



Forage 02 : Guesses-Sud du Dj. Fedjoudj

$X= 860,49m, Y=268,45m, Z= 884m$



Forage 16 : Magnani -Ouest du Dj. Fedjoudj

Forage 22: Benhineh -Nord-est Dj.

X= 866,60m, Y=27 4,30m, Z= 853m

Fedjoudj X= 876,6m, Y=279,4m, Z= 845m

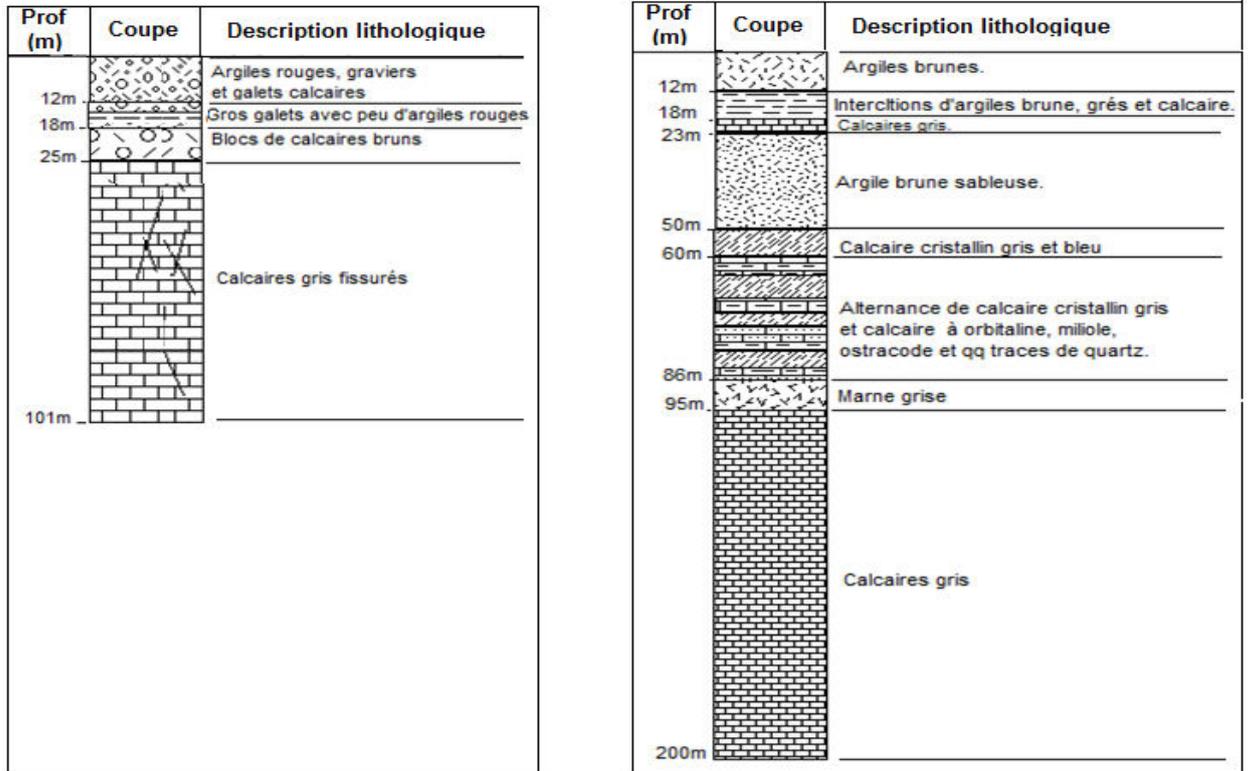


Fig. III.7: Description lithologique à partir des logs et coupes des forages Implantés dans la zone d'étude.

III.3 - Apports de la prospection géophysique dans la région de Chemora:

La géophysique est un moyen indispensable dans toute étude hydrogéologique. Elle permet de déterminer les différentes structures, la géométrie des réservoirs, déceler les accidents tectoniques et définir les zones susceptibles d'être aquifères. La prospection électrique permet de quantifier l'effet produit par un courant électrique traversant le sous-sol. Plusieurs techniques utilisant les méthodes électriques. La méthode utilisée dans le cas de la région de Chemora, est celle des sondages électriques (S.E). L'étude géophysique a été effectuée entre 1969 et 1971 par la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G), en vue d'examiner les différentes possibilités aquifères dans la région et leurs potentialités en eau ainsi que leur alimentation.

III.3.1- Apports de la prospection géophysique dans la plaine Chemora-Remila :

La campagne géophysique des sondages électriques verticaux réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG -1969-1970) dans la partie Sud-est de la région de Chemora

(Plaine Chemora-Remila) limitée à l'est par Garaet Taref et au Nord par Djebel Fedjoudj, à l'Ouest par Djebel Bou Arif et au Sud par Djebel Amrane. Cette a été entreprise dans le but de répondre à trois questions relatives à l'hydrogéologie de la plaine :

- Profondeur des calcaires aptiens en bordure Sud du Djebel Fedjoudj.
- Profondeur et extension des grès burdigaliens dans la partie Sud de la plaine.
- Reconnaissance des zones de meilleures transmissivités dans le remplissage quaternaire.

La méthode adoptée dans l'étude de la C.G.G était celle des sondages électriques verticaux avec les dispositifs quadratiques rectilignes AMNB de Schlumberger, dont la ligne AB s'étend jusqu'à 4000 m. En total de 600 sondages électriques ont été réalisés et sont répartis suivant une maille de 1Km*2Km dans la plaine sur des profils orientés SE-NW, dont 10 profils traversent la zone d'étude (A', A, B, C, D, E, F, G, H, I) et comprend 74 S.E (Figure III.8).

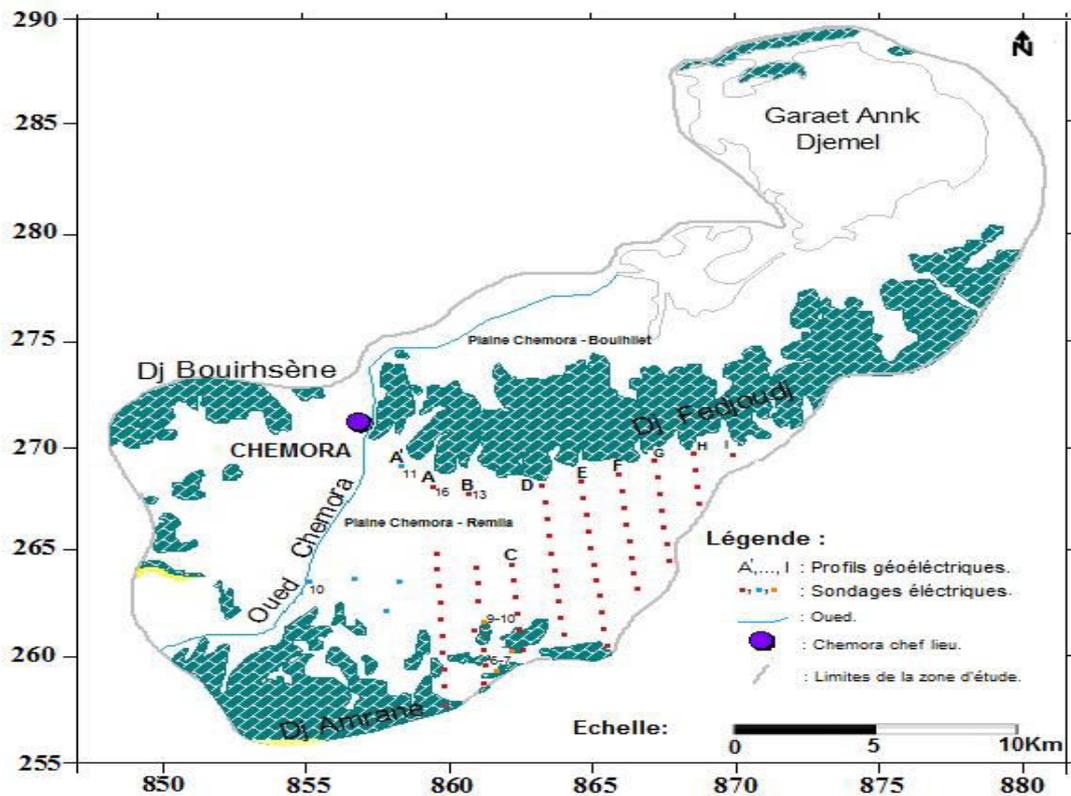


Fig. III.8: Carte de position des sondages électriques dans la plaine de Chemora-Remila (C.G.G, 1969 - 1970).

✓ **Etalonnages et échelle des résistivités :**

Les S.E d'étalonnage sur des forages et sur les S.E paramétriques effectués sur les affleurements ont permis d'obtenir les résistivités des diverses formations. Le choix des résistivités varies de chaque terrain a parfois présenté des grandes difficultés, du fait de complexité des formations, souvent formées d'alternances grès-marnes ou calcaires-marnes.

Ceci a surtout été le cas pour les formations miocènes et crétacées, mais il en a été de même très souvent pour les formations quaternaires composés d'alternances de sable et d'argiles.

Mêmes les divers niveaux ont pu être en ensembles, il a été difficile de se fixer des résistivités moyennes représentatives de ces ensembles. L'étude géophysique effectuée par la C.G.G a permis d'établir pour la plaine de Chemora-Remila:

- Des coupes géo-électriques.
- Une carte du substratum.
- Une carte tectonique.

✓ **Examen et interprétation de quelques sondages électriques :**

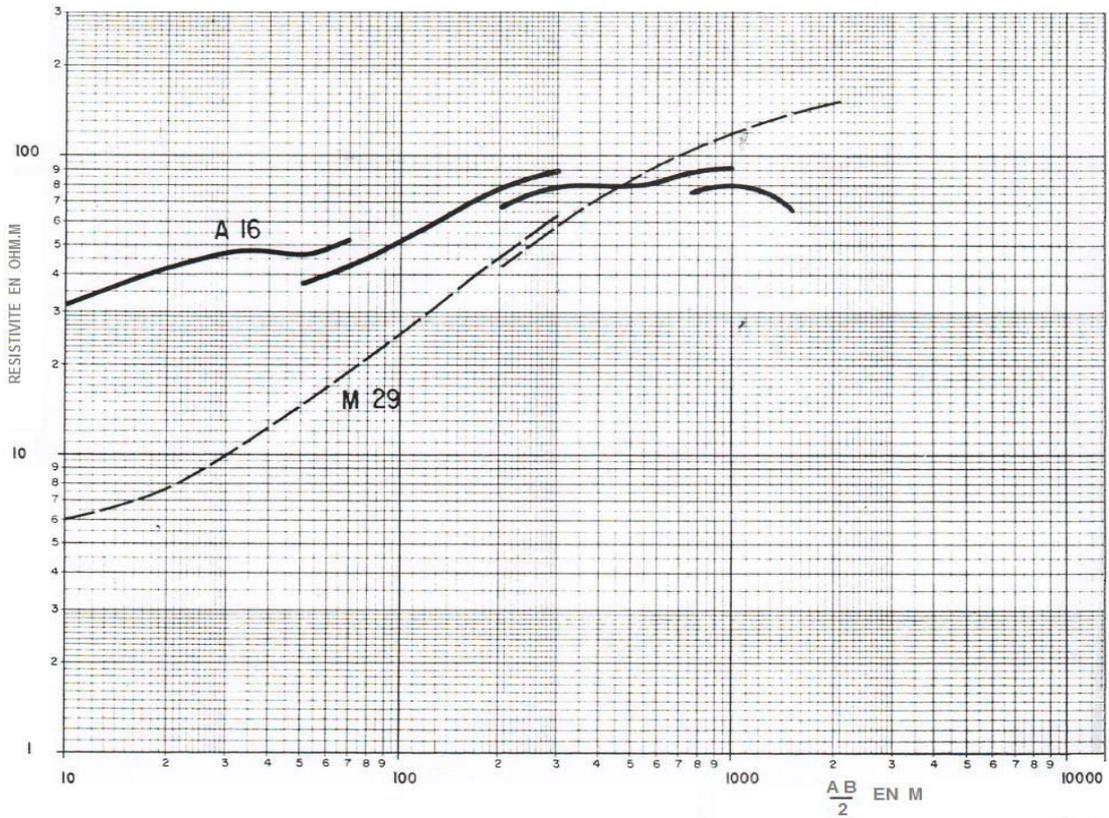
✿ **Sondages électriques aux piedmonts Sud et Sud-ouest du Djebel Fedjoudj (Coupe A, Coupe M) :**

Les S.E A16 et M29 montrent que les calcaires aptiens ont une résistivité supérieure à $100 \Omega \cdot m$ (150 à $200 \Omega \cdot m$). Le S.E A16 indique une formation sous-jacente plus conductrice (Fig. II.9).

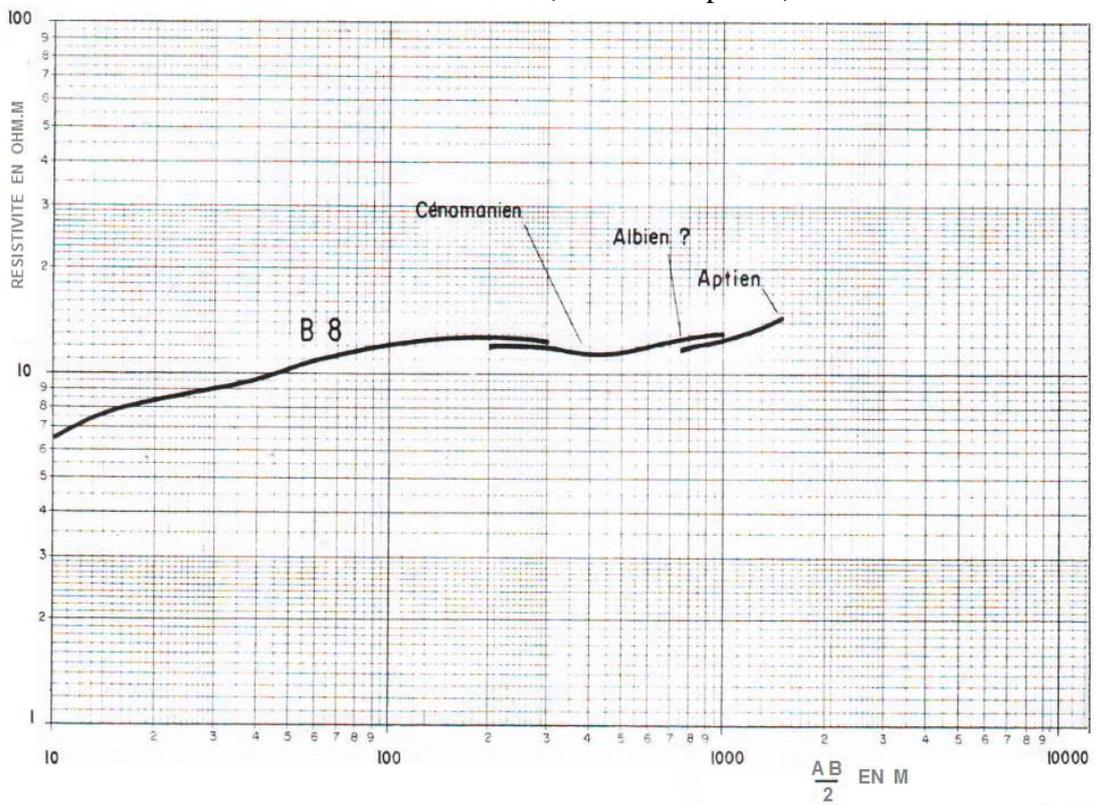
✿ **Sondage électrique au piémont Est du Djebel Amrane (Coupe B) :**

- Les S.E effectués sur l'anticlinal du Djebel Amrane ont touché l'épaisse formation des marnes cénomaniennes et le S.E B8 est représentatif de cette formation, dont la résistivité est de l'ordre de $7-10 \Omega \cdot m$. La courbe du sondage électrique B8 montre avant la remontée finale sur l'Aptien, une légère bosse qui indiquerait la présence d'une formation résistante intermédiaire, qui pourrait correspondre à des grès albiens. Sa résistivité ne peut être déterminée, admise entre 50 et $100 \Omega \cdot m$ (Fig. III.10).

Il est difficile, sur les affleurements du Djebel Amrane, de distinguer les calcaires cénomaniens des calcaires turoniens. D'autre part, les bancs calcaires, peu importants, sont compris dans des niveaux marneux assez épais. De telles successions (niveaux résistants, niveaux conducteurs), sont visibles sur les S.E comme B7, B6-7, C12. En surface, les bancs calcaires peuvent atteindre $1000 \Omega \cdot m$ (S.E. B6-7), en profondeur, probablement $100-150 \Omega \cdot m$. Les niveaux marneux ont des résistivités variant de $10 \Omega \cdot m$ au début du S.E. B7 à $30 \Omega \cdot m$ au début du S.E. C12 (Fig. III.11).



**Fig. III.9- Courbes des sondages électriques A16 et M29
(Calcaires Aptiens)**



**Fig. III.10- Courbes des sondages électriques B8
(Marnes Cénomaniennes)**

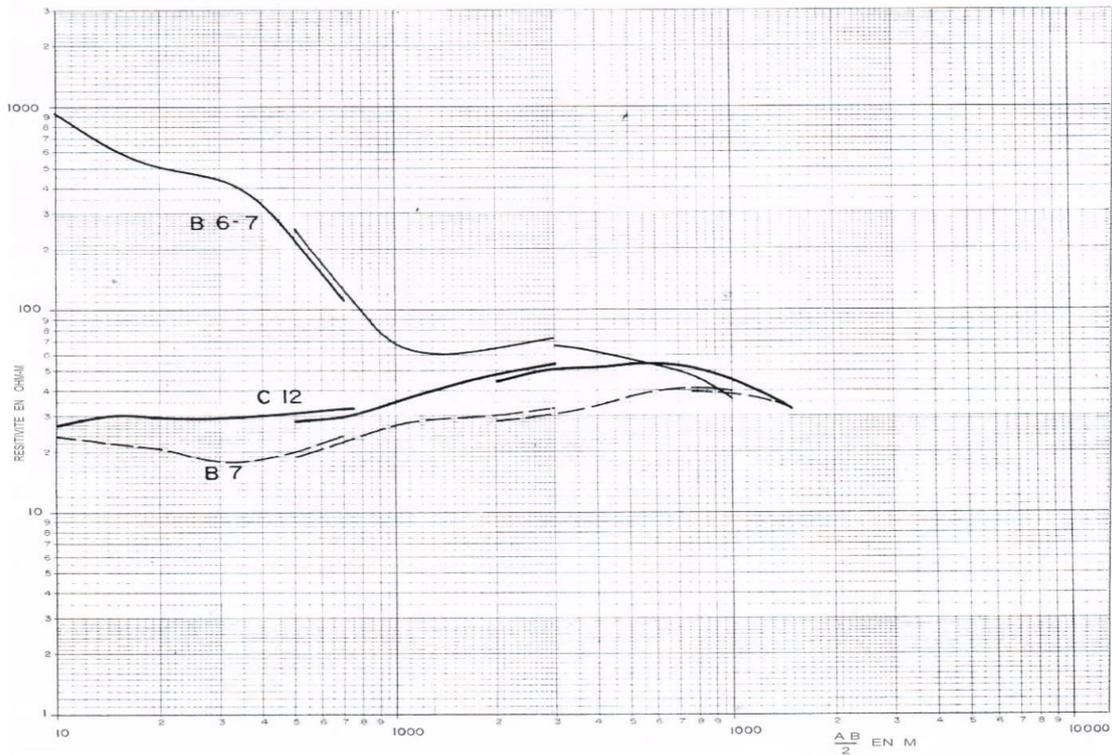


Fig. III.11- Courbes des sondages électriques B7, B6-7, C12 (Calcaires Cénomaniens et Turoniens).

✿ **Sondages électriques étalons au Sud-est de la zone d'étude (Coupe I, Coupe KL, Coupe Q) :**

Dans le remplissage quaternaire les résistivités extrêmement variées, allant de $0,5 \Omega \cdot m$ pour les terrains salés de surface, à plus de $100 \Omega \cdot m$ pour les conglomérats à eau douce.

Les S.E réalisés à côté des forages, S.E I7 (forage Kais), KL10-11 (forage Sonda) et Q11 (forage Khenchela) à quelques kilomètres au Sud-est de la zone d'étude en ligne AB= 300 m, sont bien représentatifs de la forme des courbes obtenues généralement dans une grande partie de la plaine. L'ensemble argiles-graviers -conglomérats présente une résistivité moyenne de l'ordre de $20 - 30 \Omega \cdot m$.

Les carottages électriques des forages ont montré que les résistivités des divers niveaux étaient très différenciées, et il est également possible à partir de ces forages de distinguer plusieurs niveaux successivement conducteurs et résistants. Le SE I.7 étaler deux niveaux résistants, le premier à $150 \Omega \cdot m$, le second plus profond à $60 \Omega \cdot m$. Au forage Sonda (SE KL10-11), aussi deux niveaux résistants distingués avec des résistivités $120 \Omega \cdot m$ et $60 \Omega \cdot m$. Tandis que au (SE Q11) la résistivité de l'ensemble graviers-conglomérats est de 50 à $60 \Omega \cdot m$, comme il été enregistré des

niveaux marneux intercalaires avec ont des résistivités de 7 à 15 $\Omega \cdot m$ (Fig. III.12).

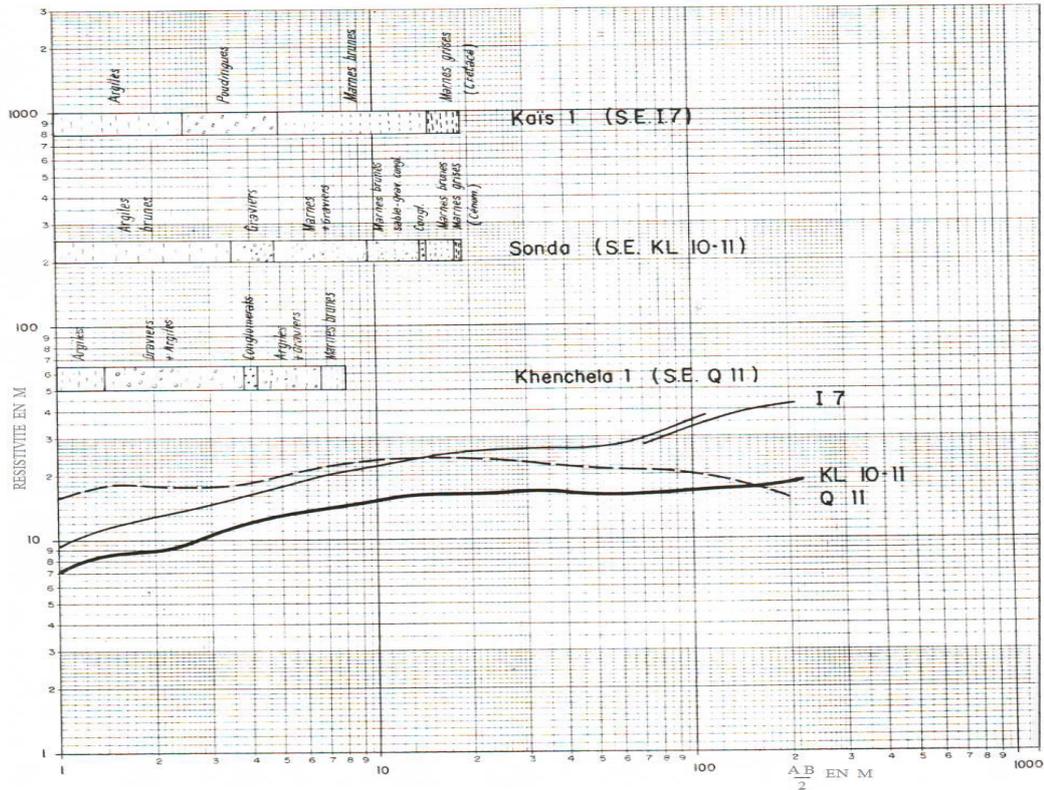


Fig. III.12- Courbes des sondages électriques I.7, KL10-11, Q11 (Calcaires Cénomaniens et Turoniens).

Les mesures pratiques et l'estimation statistique déduite de l'ensemble de sondages électriques, ont permis d'établir une échelle de résistivité (Tableau. III.2).

Tableau. III.2: Echelle de résistivité

Formations	Résistivité ($\Omega \cdot m$)
Terrains salés des chotts et Gareats.	0.5 – 33
Argiles quaternaire.	04 – 10
Sable argileux - graviers.	10 – 30
Graviers- conglomérats.	60 – 150
Marnes rouges pontiennes.	07 – 10
Sables – graviers pontiens.	50 – 70
Marnes burdigaliennes.	10
Grès burdigaliens.	70 – 100
Marnes Sénoniennes.	05 – 10
Calcaires Cénomaniens - Turoniens	100 – 150
Marnes cénonmaniennes.	07 – 10
Calcaires aptiens.	150- 200

Interpretation des coupes géoélectriques

Les coupes sont réalisées pour suivre l'extension latérale des différents horizons aquifères selon la résistivité. Plusieurs coupes géoélectriques ont été tracées selon les différents profils. (Fig. III.13 et III.14). L'examen de ces coupes permet de tirer plusieurs remarques.

-Coupe A :

Le niveau de recouvrement, s'étend jusqu'à environ de 50 m de profondeur, correspond aux formations constituées des sables argileux, graviers, conglomérats et argiles. Ce niveau est important et présente une résistivité moyenne de l'ordre de 20 à 30 Ω .m. Au Nord de la plaine vers le massif de Fedjoudj affleurent les formations des calcaires aptiens de résistivité moyenne de 150 Ω .m surmontées des crétacés calcaires (Cénomaniens, Turonien, Sénonien). La formation albienne dont le faciès gréseux est très réduite et n'affleure pas au Nord dans la chaîne du Djebel Fedjoudj, mais elle est présente sous le recouvrement quaternaire en bordure Sud du Djebel Fedjoudj.

-Coupe B :

La coupe B montre bien la formation des crétacés calcaires (Turonien, Cénomaniens) avec des épaisseurs de 200 à 350 m, dont la résistivité moyenne est de l'ordre de 100 Ω .m. Le substratum remonte vers l'Ouest, mais reste profond.

-Coupe C :

Sur la coupe C, le Miocène s'étend entre C1 et C12 à l'extrémité SW de la plaine et se prolonge vers le SE au delà de la zone d'études, cette série dite des grès se traduit en résistivités par un ensemble de 50 à 100 m d'épaisseur pour 70 à 100 Ω .m de résistivité. Au dessus de cette série résistante vient une formation conductrice correspond grande partie aux argiles rouges pontiennes. Notamment au SE sur la plupart des coupes cette formation est surmontée d'un autre niveau résistant. Il est donc plus probable que l'on ait affaire à un niveau Pontien, ou à la rigueur à un dernier banc de grès burdigaliens.

-Coupe I, K-KL, M, Q:

L'examen des coupes I, K-KL, M, Q et le reste des coupes localisées dans la partie sud-est de la plaine et au delà de la zone d'étude, nous a permis de constater l'existence d'une formation conductrice de base, la plus épaisse assimilée aux marnes cénomaniennes d'une résistivité de 10 Ω .m (S.E. K-KL). Le niveau dit de marnes rouges présente également des résistivités très variées. Les marnes proprement dites ont une résistivité de l'ordre de 7 à 10

Ω.m(S.E. K-KL, M, Q).Des niveaux plus résistant apparaissent souvent au sein ou au sommet de cette formation. (S.E. K-KL, M, Q).Des niveaux plus résistant apparaissent souvent au sein ou au sommet de cette formation. On peut avoir affaire soit à des niveaux grossiers (sables, grès), soit à des lentilles de gypse.

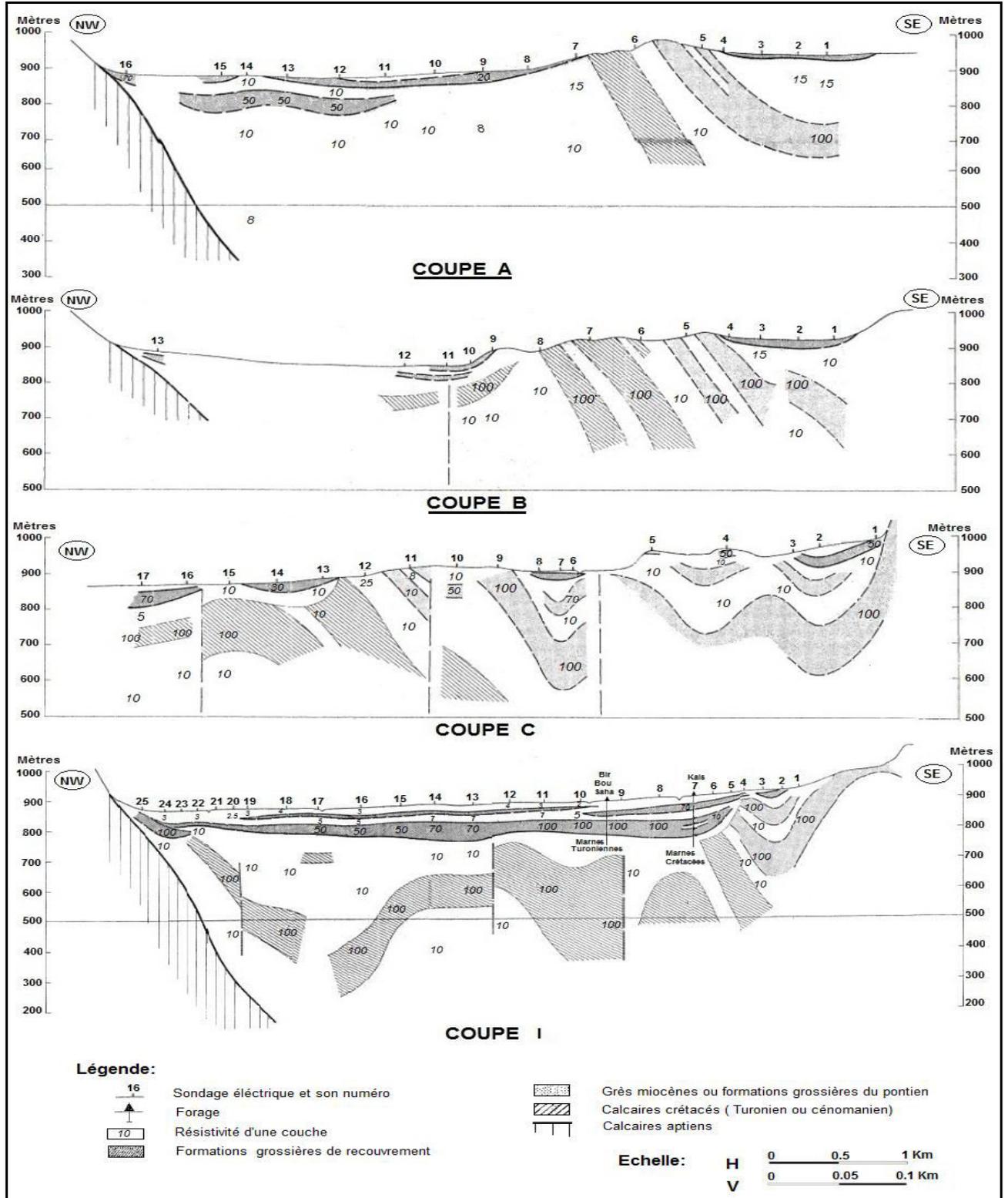


Fig. III.13. Coupes géoélectriques A, B, C et I

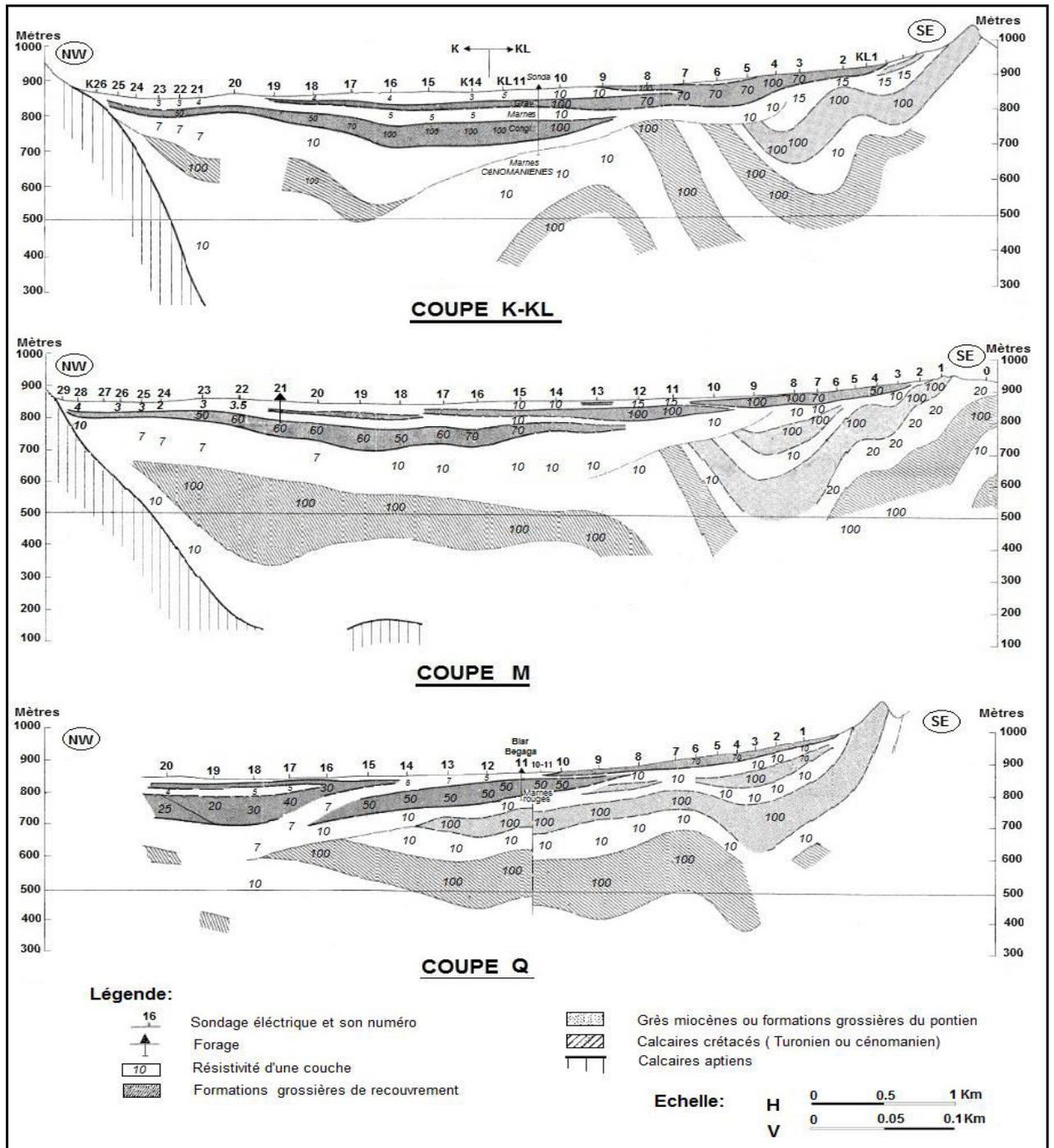


Fig. III.14. Coupes géoélectriques K-KL, M et Q

✓ **Carte du substratum**

Les sondages électriques, effectués par la C.G.G. et répartis uniformément sur toute l'étendue de la plaine, ainsi l'interprétation des coupes géoélectriques, permettent de renseigner sur le toit et la morphologie du substratum de l'aquifère des calcaires ce qui nous a permis de tracer une carte de substratum. Fig. III.15. Le substratum étudié est formé en générale des calcaires du Crétacé inférieur (Aptien) et les calcaires du Crétacé supérieur

(cénomaniens, cénomaniens-turonien et cénomaniens marneux). Le substratum est d'une profondeur d'environ 150m sous le recouvrement quaternaire au centre de la plaine. Comme il devient plus profond en allant vers l'Est et peut atteindre 200 m de profondeur au périphérique Est de la zone d'étude (Garaet Taref).

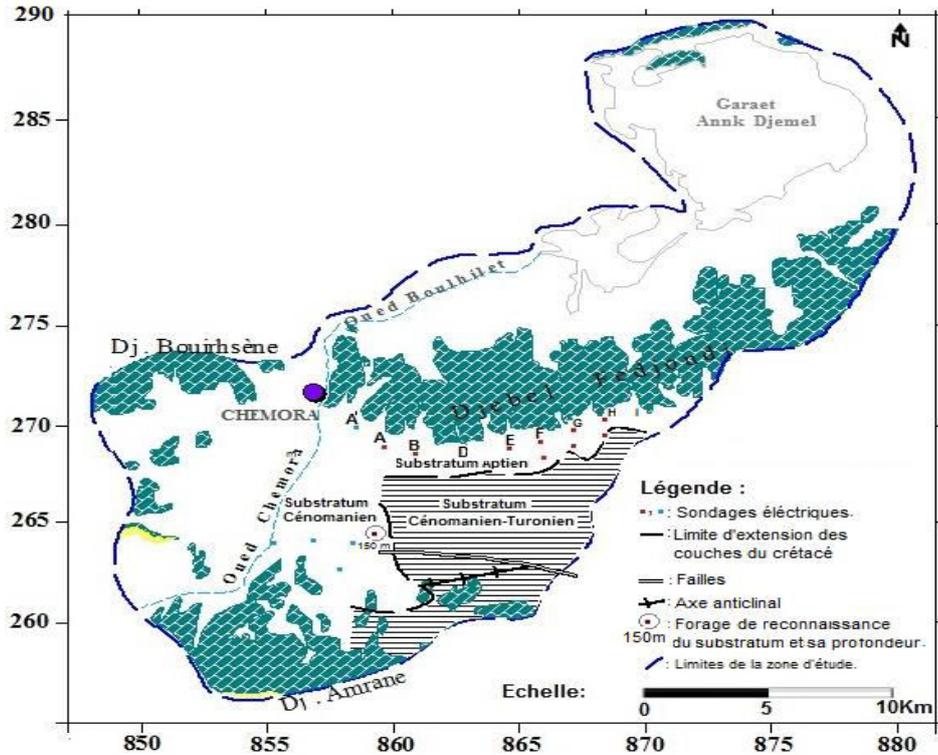


Fig. III.15. Carte du substratum de la plaine de Chemora-Remila
 ✓ **Carte de la résistance transversale**

Pour étudier la potentialité de l'aquifère superficiel, nous avons établis une carte de la résistance transversale. Fig. III.16. L'analyse de cette carte montre des résistivités variées entre 2000 à 3500 $\Omega \cdot m$ à l'ouest et à l'Est de la plaine, ce qui signifie de bonnes caractéristiques hydrogéologiques. Tandis que qu'au centre la résistivité est inférieure à 2000 $\Omega \cdot m$, traduisant la présence d'une formation de mauvaises caractéristiques hydrogéologiques.

III.3.2- Apports de la prospection géophysique dans la plaine Chemora-Boulhilet

La plaine de Chemora-Boulhilet, au Nord-est de l région de Chemora, est bordée au Nord par Djebel Mahrsel surplombant Garaet Annk Djemel, au Sud par le chaînon des massifs Merzklel-Fedjoudj et à l'Ouest par Djebel Bouirhsène (prolongement Est du massif de Bouarif).

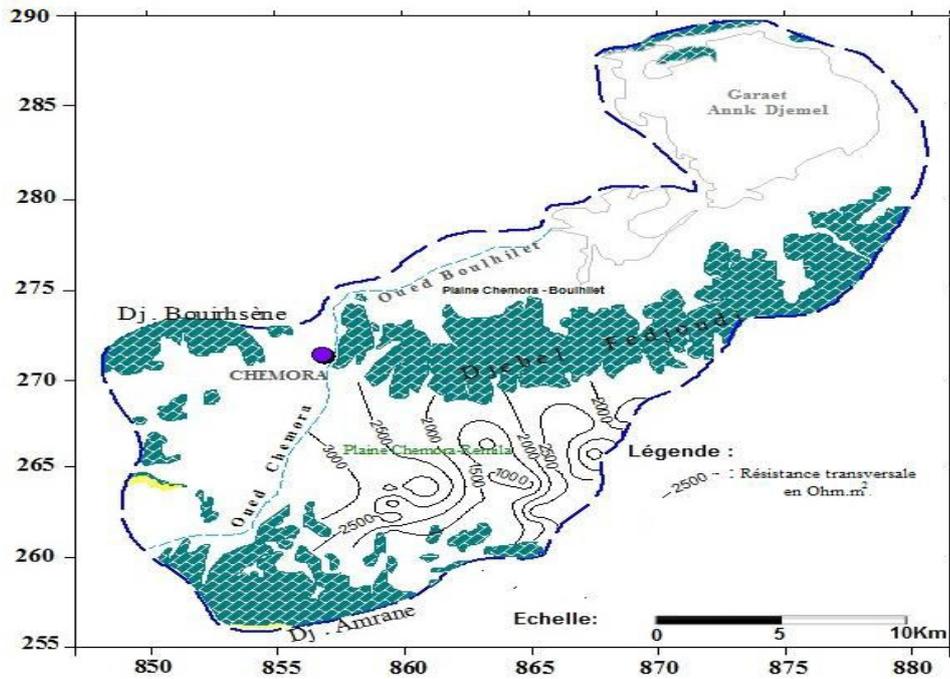


Fig. III.16 - Carte de la résistance transversale

✓ Examen et interprétation de quelques sondages électriques :

La prospection géophysique atteignant de faibles profondeurs dans la plaine de Chemora-Boulhilet (C.G.G, 1969 -1971), a révélé une épaisseur du recouvrement atteignant 600m au centre de la plaine, et des déperditions de Garaet Ank Djemel dans les dépôts alluvionnaires. La sédimentation tertiaire est essentiellement argileuse et marneuse à importante proportion en gypse. Les sédiments argilo-marneux contiennent des niveaux de graviers, de sable et des poudingues Fig. III.17 et III.18.

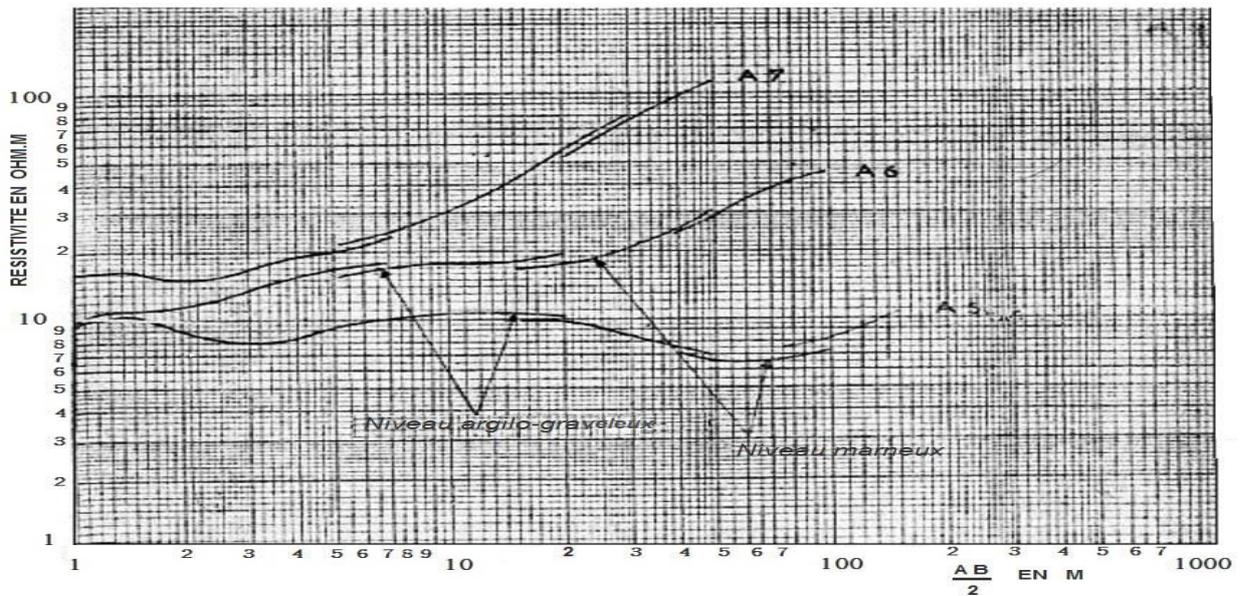


Fig. III.17. Courbes des sondages électriques A.5, A.6, A.7. (Niveaux alluvionnaires grossiers : Argilo-graveleux, Marnes)

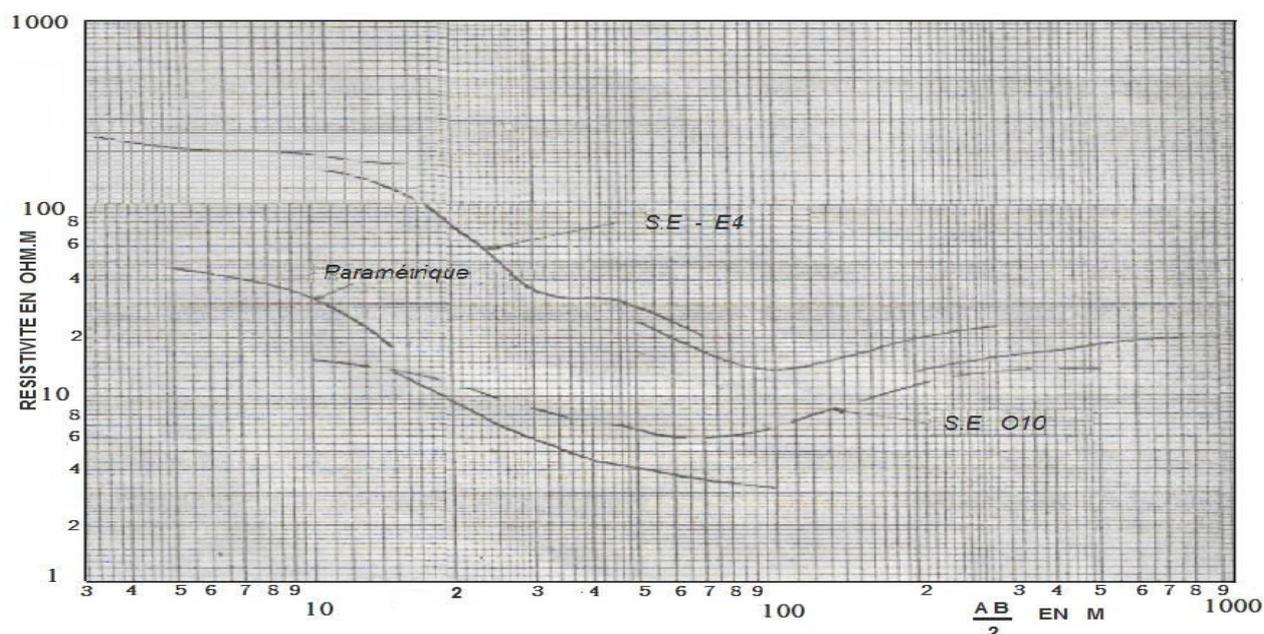


Fig. III.18. Courbes des Sondages électriques paramétriques des formations aptiennes.

✓ **Carte du substratum**

L'absence d'une étude géophysique couvrant toute la région et surtout la partie Nord, nous a amené à une évaluation des épaisseurs et des surfaces limites des aquifères à partir de la carte et les coupes géologiques et des logs lithostratigraphiques de quelques forages mécaniques (Fig. III.5, Fig. III.6 et Fig. III.7). L'examen de la carte du substratum (fig. III.19) montre que ce dernier remonte à la partie centrale de zone d'étude près de Djebel Fedjoudj et Djebel Bouarif (Bouirhsène). Le substratum devient plus profond en allant vers le Sud à l'est du Djebel Amrane (d'environ 150 m de profondeur) et vers le Nord-est aux environs de Garaet Annk Djemel près de Hanchir Safane (d'environ 80m).

III.4-Minéralisation:

Un seul niveau minéralisé existe dans cette région sur la feuille de Boulhilet. Il est aux calcaires situés à la base de la série aptienne carbonatée, exploité par une seule mine qui a fonctionnée au début du dix neuvième siècle (1900) près de la cote de 856m au Kef Safane à djebel Fedjoudj. Elle produit quelques tonnes de minerai de Zinc avec un peu de Plomb.

III.5 - Caractéristiques lithologiques du sous bassin versant

Les formations quaternaires occupent 52 % de la surface et s'étendent sur les zones de faible pente où s'effectue le dépôt de la charge solide arrachée aux versants.

Quand aux formations gréseuses, elles occupent 24 % de la surface, et affleurent principalement dans les secteurs de Koudiat Medouar et Djebel Bouarif. Les argiles siliceuses associés aux grés, caractérisant les reliefs de Tagratine occupent 11 % de la surface.

Les masses à alternance de calcaire et de marne, affleurent au Nord de Djebel Bouarif et les flans Ouest de Djebel Amrane. Cette série occupe 10 % de la surface du sous bassin de Chemora. Les formations à dominance calcaire du Crétacé inférieur ; qui affleurent Bouarif et Djebel Fedjoud, occupent une surface de 3 % de la surface totales.

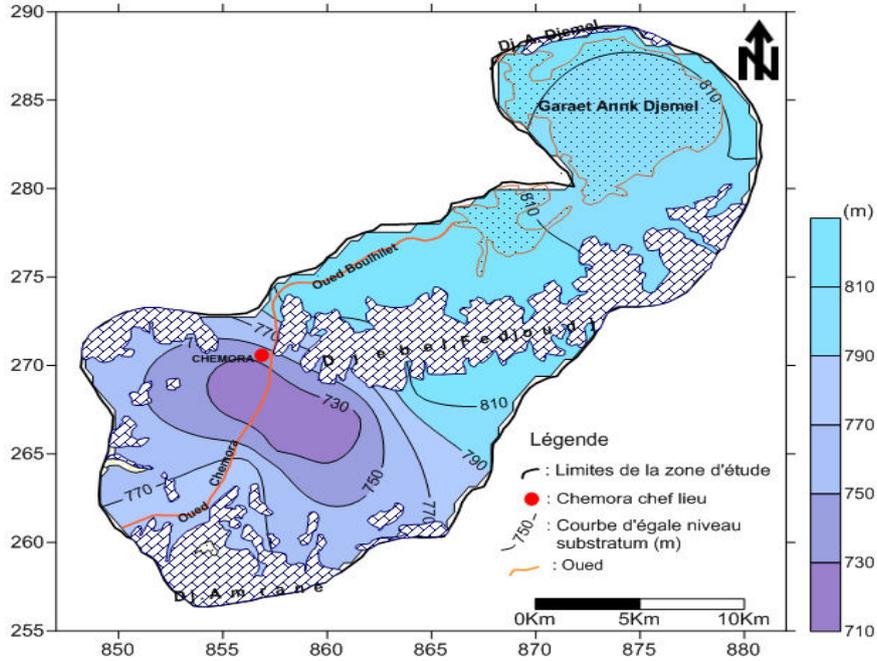


Fig. III.19- Carte du substratum de la zone d'étude

III.6- Classification des formations géologiques selon leurs intérêts hydrogéologiques

La classification des formations géologiques du sous bassin en question est basée sur la structure physique des roches (porosité), donc de leur susceptibilité d'emmagasiner ou de transmettre de l'eau.

Les terrains sont classés en trois catégories ; les terrains aquifères à fortes potentialités, les terrains à faible potentialité et les terrains imperméables (ANRH) Tableau. III.3 et (Tableau II. 04. Voir annexe n°01).

Tableaux III.3 : Répartition des terrains selon leur degré de potentialité

Terrains	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Terrains aquifères à forte potentialité (1)	140	29
Terrains Aquifères à faible potentialité (2)	194	40
Terrains impermeables (3)	150	31

- ❖ (1) : Formations perméables en grand sont représentées par les roches et séries calcaro-dolomitiques fissurées des Djebels ; Merzeklal, Fedjoudj, Ank Djemel et Bouarif.
- ❖ (2) : Roches meubles à perméabilité d'interstice ; sable; gravier, limons, alluvions diverses qui ne se diffèrent entre elles que par le volume de vide ou par la porosité formant le centre de la région (plaines alluviales) traversée par la vallée de Chemora-Boulhilet.

- ❖ (3) : Les marnes, les argiles et les conglomérats cimentées et dépourvues de fissuration ou de porosité.

Le secteur étudié appartient à un bassin qui recèle plusieurs formations aquifères réparties sur plusieurs niveaux stratigraphiques, depuis le crétacé jusqu' au quaternaire dont la nature, la puissance et la qualité sont variables. Cependant, on peut distinguer dans la région où appartient la zone d'étude trois principaux types de nappes; La nappe de plaines Sud Constantinoises et plaines alluviales du Bassin, la nappe miocène de Timgad, et le réservoir calcaire des monts des Aurès qui sont à l'origine de plusieurs sources.

Conclusion

La géologie de la zone étudiée fait partie de l'ensemble parautochtone Aurésien formé par des roches sédimentaires, il s'agit :

- ✓ Des formations détritiques du Quaternaire qui occupent toute la dépression, dont l'épaisseur varie de 100 m aux environs des massifs de Fedjoudj, Merzeklel et Bouirhsène à 150 m aux centres des plaines, Chemora-Boulhilet et Chemora-Remila qui constitue une structure favorable au développement d'un aquifère superficiel.
- ✓ Des formations carbonates du Crétacé inférieur et supérieur qui affleurent au S-SW du djebel Fedjoudj et à l'Est du massif de Bouarif (Bouirhsène) atteint une profondeur moyenne de 100 m sous le recouvrement du Quaternaire et entourent les dépressions. Ces formations sont favorables au développement d'aquifères profonds et permettent également l'alimentation de l'aquifère supérieur.

Le substratum est formé en générale des calcaires du Crétacé inférieur (Aptien) et les calcaires du Crétacé supérieur (cénomaniens, cénomaniens-turonien et cénomaniens marneux). Le recouvrement souvent très épais atteint une profondeur de 150m formé de plusieurs niveaux grossiers d'un ensemble argileux, argilo-sableux, sable, graviers et par fois des galets visible au niveau de l'oued de Chemora et celui de Boulfrès. Le niveau le plus important correspond aux conglomérats profonds est bien développé dans la partie Ouest et centre de la plaine.

L'analyse climatique a permis de distinguer que, le climat de la région est semi-aride à hiver frais avec une précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 321mm/an, température moyenne annuelle de l'ordre 16.34⁰C, L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle est de l'ordre de 939 mm (selon la méthode de Thornthwaite). Le ruissellement est faible de 12.50 mm, représente 3.89% des précipitations et l'infiltration est faible aussi de l'ordre de 11.50mm et représente 3.58 % des précipitations.

CHAPITRE IV

ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE

IV- Analyse hydrogéologique

IV.1- Introduction :

L'identification des structures et des formations géologiques permettent de mettre en évidence les formations susceptibles d'emmagasiner de l'eau et les liaisons possibles entre les formations et ce à l'aide de l'analyse structurale des affleurements. La détermination de l'état actuel des aquifères à l'aide de la géologie de la région, fait appel à des diverses méthodes d'investigation pour recueillir les données nécessaires permettant d'estimer les apports et de déterminer les endroits d'alimentation de ces aquifères ainsi que les paramètres hydrodynamiques (sens d'écoulement, conditions aux limites,... etc.).

La géologie de la région (Vila, 1977 ; Ghandriche, 1991) montre qu'il existe trois (03) aquifères :

- Un aquifère superficiel se trouvant dans les formations du Quaternaire ;
- Un aquifère profond dans les formations carbonatées du Crétacé;
- Un aquifère dans les formations du Miocène de Timgad.

Dans cette étude on ne s'intéressera qu'au premier aquifère des formations du Quaternaire en particulier à son comportement hydrodynamique. On étudiera principalement :

- L'évolution de la piézométrie ;
- Les paramètres hydrodynamiques (T : transmissivité, K : perméabilité, S : coefficient d'emmagasinement) déterminés à l'aide des essais de pompage.

IV.2- Géométrie de l'aquifère superficiel du Quaternaire

Cet aquifère se trouve dans les formations du Quaternaire qui occupent toute la dépression. Son profondeur varie de 20 m près des massifs à 10 m au centre de la plaine au Sud (plaine Chemora-Remila) et à 80 m dans la partie Nord de la plaine (plaine Chemora-Boulhilet). L'aquifère surmonté un substratum formé en générale des calcaires du Crétacé inférieur (Aptien) et les calcaires du Crétacé supérieur (cénomaniens, cénomaniens-turonien et cénomaniens marneux). Cet aquifère est formé de plusieurs niveaux grossiers d'un ensemble marneux, argileux, argilo-sableux, sables, graviers et par fois des galets visible au niveau de l'oued de Chemora, limons, alluvions diverses qui ne se diffèrent entre elles que par le volume de vide ou par la porosité formant le centre de la plaine. La région est traversée par Oued Chemora- Boulhilet et Oued Boulefreis au Sud de la zone d'étude. L'aquifère est caractérisé par des zones de dépression telle que Sebkhass Djendli, Ank Djamel, Guelif et

Taref. Ces dépressions sont inondées en hiver et recouvertes en été par une couche de sel due à la forte évaporation et entourées d'anciens sols salés hydromorphes qui portent une végétation caractéristique (salsolacées).

Compte tenu de l'absence d'une étude géophysique couvrant toute la région, l'évaluation des épaisseurs a été faite à partir de la carte et les coupes géologiques et des logs lithostratigraphiques de quelques forages mécaniques. Cet aquifère comporte une nappe libre dont le niveau statique est fortement influencé par la pluviométrie.

La nappe en question va jusqu'à 80 à 150 m de profondeur dans les formations du Quaternaire selon la région. Elle est constituée essentiellement d'alluvions récentes et anciennes. Ces formations sont en contact avec les formations calcaires des massifs environnants (Merzeklel, Fedjoudj, Bouarif, Bourirhsène et Sidi Bouzid).

Les puits et forages qui exploitent cette ressource sont destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation des cultures saisonnières.

IV.3- Etude de la piézométrie :

IV.3.1- Inventaire des points d'eau

On a pu inventorier 23 forages (Fig .IV.1) et les données piézométriques ont été consignées dans le tableau IV.1.

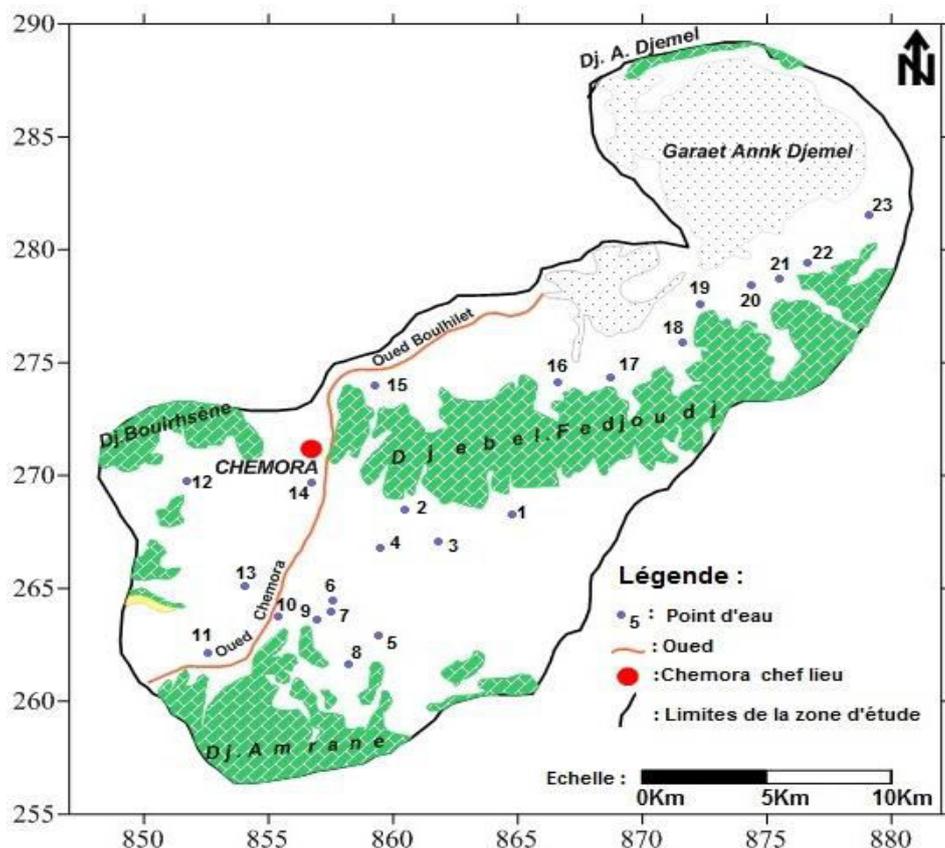


Fig .IV.1 : Carte d'inventaire des points d'eau

Tableau IV.1. Inventaire des points d'eau

Points d'eau	X (Km)	Y (Km)	NP-Mars 2007	NP- Juin 2007	NP-Fév 2016
1	864.81	268.23	839,00	837,90	838,15
2	860.49	268.45	837,00	835,30	836,00
3	861.83	267.06	847,00	846,85	847,00
4	859.48	266.78	849,50	847,70	848,30
5	859.43	262.94	868,00	867,25	867,40
6	857.58	264.43	871,00	868,80	869,00
7	857.48	263.94	852,00	848,50	849,50
8	858.22	261.64	899,00	897,40	897,80
9	856.91	263.60	874,00	872,90	873,20
10	855.41	263.76	853,00	851,00	852,00
11	852.55	262.13	892,50	891,20	891,60
12	851.75	269.73	848,00	844,65	844,80
13	854.03	265.11	850,00	847,90	848,60
14	856.76	269.68	833,00	831,50	832,00
15	859.30	274.00	833,90	833,00	833,35
16	866.60	274.10	833,70	832,10	832,50
17	868.70	274.30	830,00	829,55	829,85
18	871.60	275.90	833,00	831,75	832,00
19	872.30	277.60	831,00	830,20	830,30
20	874.40	278.40	831,00	829,80	830,10
21	875.50	278.70	834,00	833,00	833,45
22	876.60	279.40	833,80	832,60	833,00
23	879.10	281.50	833,00	831,50	832,00

VI.3.2- Conditions aux limites :

La nappe superficielle reçoit toutes les eaux qui dévalent les flancs internes des Djebels; Marhsel et Annk Djemel au Nord, Bouarif, Bouirhsène à l'ouest, Fedjoudj et Merzeklel à l'Est et Djebel Amrane au Sud. Ces limites sont donc de type à flux imposé entrant (L.F.I.E). Garaet Annk Djemel représente l'exutoire principal de l'aquifère et une limite à potentiel imposé.

IV.3.3- Interprétation des cartes piézométriques :

Afin d'étudier le comportement de la nappe alluviale, on a effectué deux campagnes de mesures en mois de Mars et Juin 2007 (Ghodbane, 2009) et une campagne durant la période de Février 2016.

L'examen des trois cartes piézométriques (Fig.IV.2, Fig. IV.3 et Fig. IV.4) permet de dire que la nappe a gardé la même structure et la morphologie à deux zones :

- Zone Nord : on peut distinguer dans cette zone deux parties :
 - La première partie considérée comme zone de drainage (Henchir Safane et Garaet Annk Djemel) et l'écoulement est de directions (E – NW).
 - La deuxième partie caractérisée par des courbes à espacement croissant du piémont ouest du Djebel Fedjoudj au centre de la plaine de Chemora-Boulhilet où l'écoulement est orienté du centre vers la partie Nord-est.
- Zone Sud : on distingue aussi deux parties :
 - Dans la première partie, on remarque que les courbes sont serrées au niveau du Djebel Amrane ce qui correspond à un gradient hydraulique fort et espacées de plus en plus vers le centre de la plaine de Chemora-Remila et les écoulements sont de directions (S-N) et (SW-NE) suivant les axes de drainage dans les mêmes directions.
 - La deuxième partie donne un écoulement à partir du piedmont Sud du Djebel Fedjoudj vers le Sud de la zone d'étude.

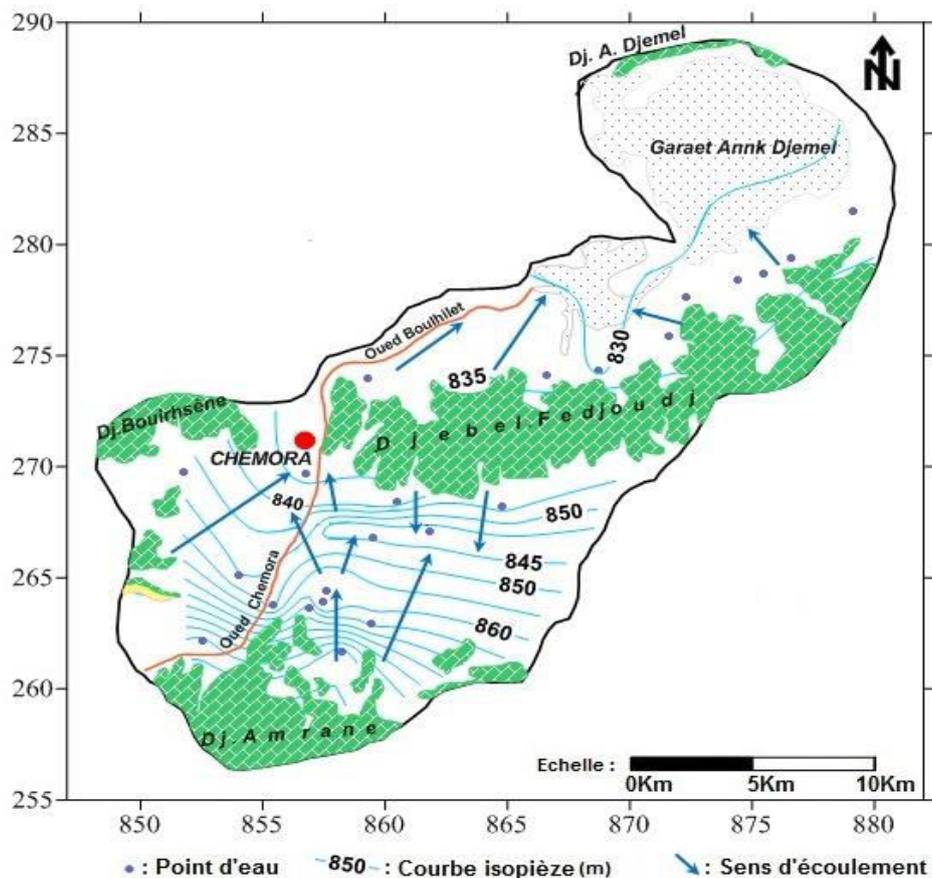


Fig. IV.2. Carte piézométrique – période Mars 2007-

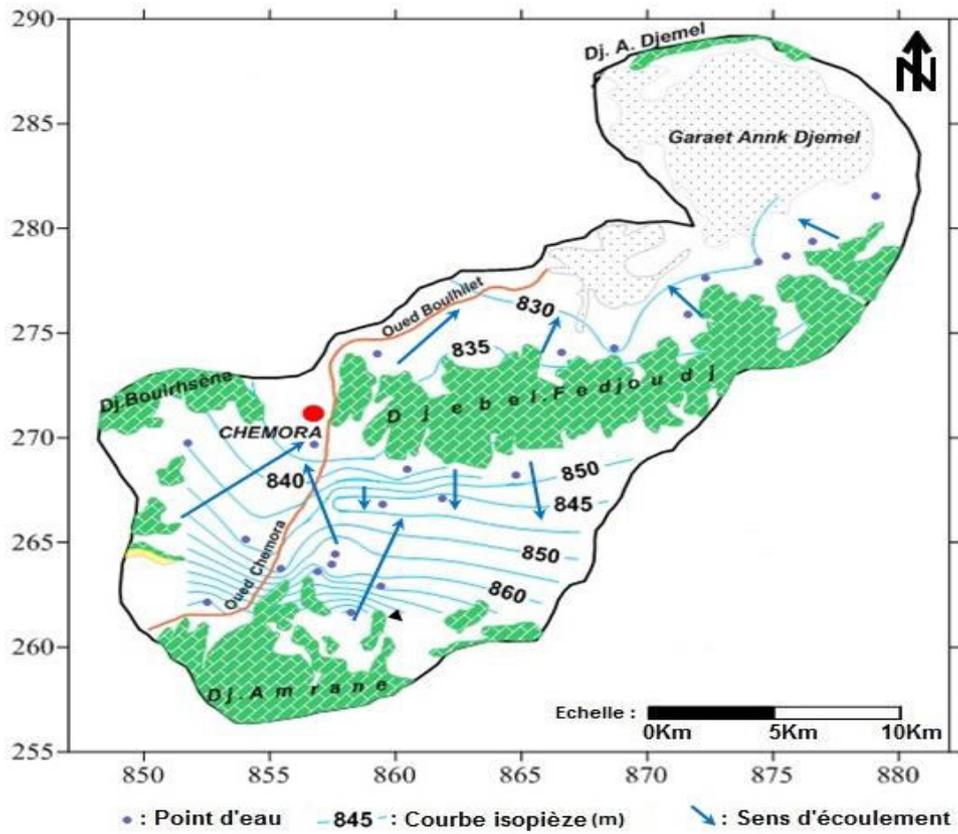


Fig .IV.3. Carte piézométrique – période Juin 2007-

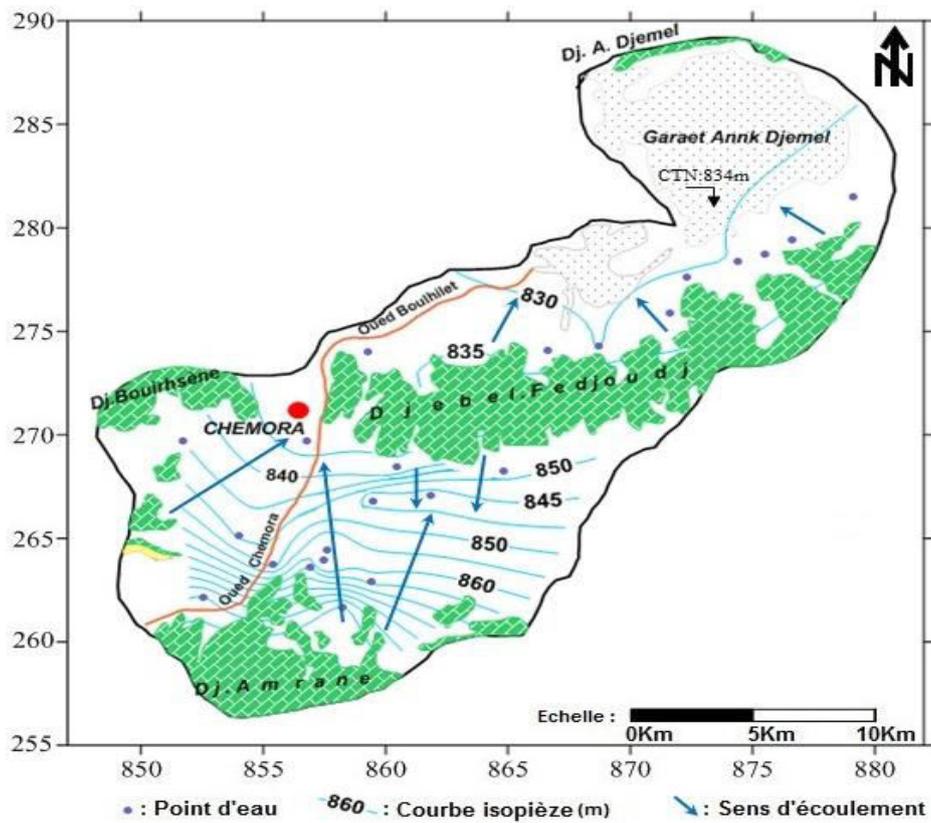


Fig .IV.4. Carte piézométrique – période Février 2016-

IV.3.4- Battement de la nappe

La carte de battement de la nappe a été tracée en comparant les cartes piézométriques des deux campagnes Mars 2007 et Février 2016 (Fig .IV.5). Ceci montre un abaissement de la nappe de 0.2 à 3.2 m. Les valeurs les plus fortes ont été enregistrées à l'Ouest et au Sud-ouest de la zone d'étude (2 à 3.2 m). Ceci est dû à la présence d'un nombre élevé de points d'eau implantés dans cette partie (pompage intense pour l'irrigation) et à l'absence de la pluie. Les valeurs moyennes ont été enregistrées au centre et au Nord-est (0.8 à 2 m). Tandis que les faibles valeurs ont été enregistrées au Sud du terrain de la zone d'étude (0.2 à 0.8 m) là où l'alimentation latérale est bien marquée.

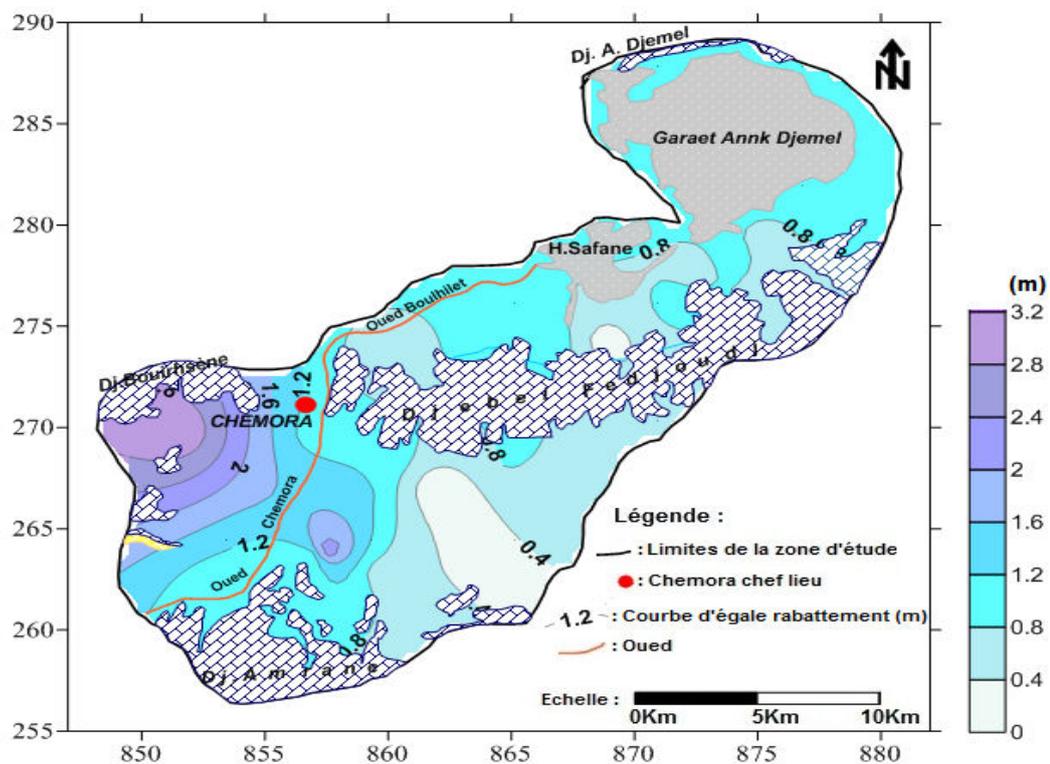


Fig IV. 5- Cartes du battement de la nappe

IV.3.5- Carte d'égalité épaisseur de la couche mouillée

La superposition de la carte du substratum et la carte piézométrique de Février 2016, nous a permis de tracer une carte d'égalité épaisseur de la couche mouillée de l'aquifère. La figure. IV.6 montre que la zone la plus favorable à l'implantation d'éventuels futurs forages se trouve au Sud et au Sud-ouest de la zone d'étude, dont l'épaisseur atteint 150 m. Les épaisseurs faibles ont été enregistrées au centre, au Sud-est et à l'Est, ce qui implique l'irrégularité de la morphologie du substratum.

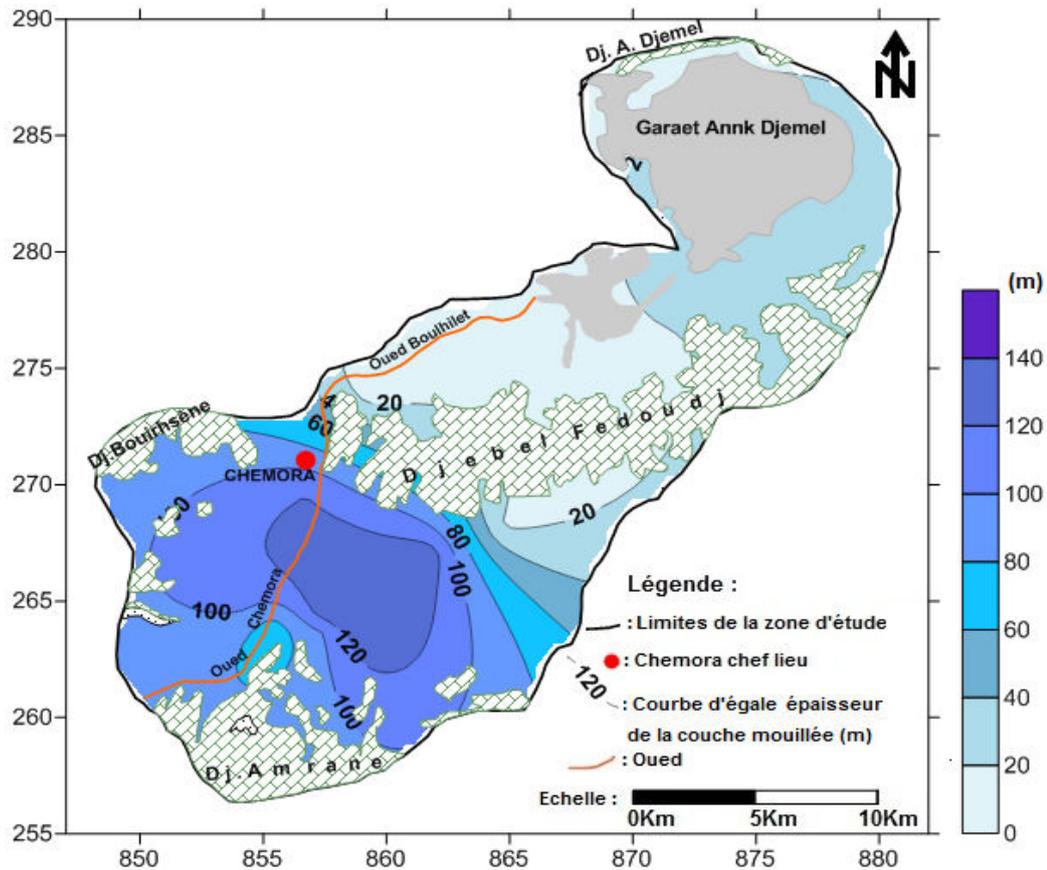


Fig IV. 6-Carte d'égal épaisseur de la couche mouillée

IV.4- Les caractéristiques hydrodynamiques des formations aquifères :

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères se fait par des essais de pompage. Ces essais consistent à représenter expérimentalement par des graphiques, les courbes et les droites des fonctions mathématiques régissant l'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage. L'étude de ces graphiques permet :

- D'analyser l'évolution du cône de dépression de la surface piézométrique ;
- De préciser les principales caractéristiques hydrauliques de la nappe ;
- De déterminer les paramètres hydrodynamiques :
- Estimer les potentialités hydriques souterraines exploitables de la région de Chemora.

Les principales caractéristiques hydrodynamiques qui interviennent dans l'estimation du bilan hydrogéologique et des réserves en eaux souterraines se limitent à la transmissivité (T) et au coefficient d'emmagasinement (S).

✓ **Transmissivité :**

La transmissivité est le produit du coefficient de perméabilité (K) par l'épaisseur de la zone saturée (h).

$$T \text{ (m}^2\text{/s)} = K \text{ (m/s)} \times h \text{ (m)}$$

✓ **Coefficient d'emmagasinement (S) :**

Le coefficient d'emmagasinement exprime le volume d'eau libéré par une section unitaire de l'aquifère, pour une variation unitaire de la charge hydraulique normale à cette section (Castany, 1982).

Dans les nappes captives il reste lié au taux de compression ; dans les nappes libres l'eau est libérée sous l'action des forces de gravité (drainage). Le coefficient d'emmagasinement est égal, en pratique, à la porosité efficace de l'aquifère où les effets de compression sont négligeables. C'est un nombre sans dimension désigné par le symbole « S ». Les valeurs usuelles vont de 1% pour certains limons jusqu'à 30-40% pour des alluvions grossières (Tableau IV.2). La porosité efficace diminue avec la taille des grains, par exemple les sables présentant plus de porosité « fermée » que les graviers. Elle peut être déterminée en laboratoire ou sur le terrain, par égouttage de la roche (Landreau et Rouc, 1985).

Tableau n° IV.2 : Quelques ordres de grandeurs des valeurs de la porosité totale et efficace (Landreau et Rouc, 1985)

	Porosité totale	Porosité efficace
Sables	20 à 40 %	10 à 25 %
Craie	10 à 40 %	1 à 5 %
Calcaires massifs fissurés	1 à 10 %	1 à 5 %
Argiles	40 à 50 %	1 à 2 %

Pour connaître les caractéristiques et le comportement hydrodynamiques de l'aquifère du Quaternaire de la région de Chemora, une étude a été réalisée grâce à des essais de pompage sur quatre forages, dont trois (03) implantés par les services de la direction des ressources en eau (D.R.E) de la Wilaya de Batna et (01) un par les services de la DRE de la Wilaya d' Oum El-Bouaghi.

Les mesures sont relevées dans les forages en cours de pompage. Il n'a pas été possible d'effectuer des mesures dans d'eau autres que les forages, vu l'inexistence des piézomètres.

IV.4.1- Interprétation des résultats

La méthode de Jacob nous a permis de déterminer que la transmissivité T , car les mesures (Annexe n°02) ont été effectuées dans les forages en cours de pompage et non au niveau du piézomètre (Fig.IV.7 et IV.8). Les résultats obtenus sont portés sur le tableau IV.3.

Tableau IV.3- Valeurs de la transmissivité de l'aquifère.

N° du point d'eau	Transmissivité (m^2/s)		Epaisseur utile (m)	Perméabilité ($10^{-4} m/s$)
	Cas de la descente ($\times 10^{-4} m^2/s$)	Cas de la remontée		
5	5.324	0.96×10^{-3}	18.75	0.28
12	5.350	5.43×10^{-4}	35	0.15
16	0.340	1.07×10^{-2}	20.9	0.02
22	4.630	6.28×10^{-3}	8	0.58

III.4.1.1- Distribution de la transmissivité et de la perméabilité

✓ Carte de la transmissivité :

La carte des transmissivités (Fig IV. 9) montre que l'aquifère est caractérisé par des faibles valeurs de transmissivité ($0.34 \times 10^{-4} m^2/s$) dans la partie médiane de la zone d'étude, ce qui implique probablement la présence des passages argileux. Par contre à l'Ouest, au Sud-ouest, à l'Est et au Nord-est la transmissivité est plus élevée, de l'ordre de $3 \times 10^{-4} m^2/s$ à $5 m^2/s$. Ceci est dû à la présence des formations carbonatées plus propre du prolongement Est du Djebel Bouarif (Djebel Bouirhsène) et celles de la partie Est du Djebel Fedjoudj.

✓ Carte de la perméabilité :

La carte de perméabilité (Fig IV.10) permet de marquer une augmentation remarquable de ce paramètre du centre vers le Nord-est de la zone d'étude, de 0,2 à $0,58 \times 10^{-4} m/s$ et une légère augmentation du centre vers le Sud de 0,2 à $0,32 \times 10^{-4} m/s$. Les valeurs minimales enregistrées au centre caractérisant la présence d'un sol de matériau plus au moins fin.

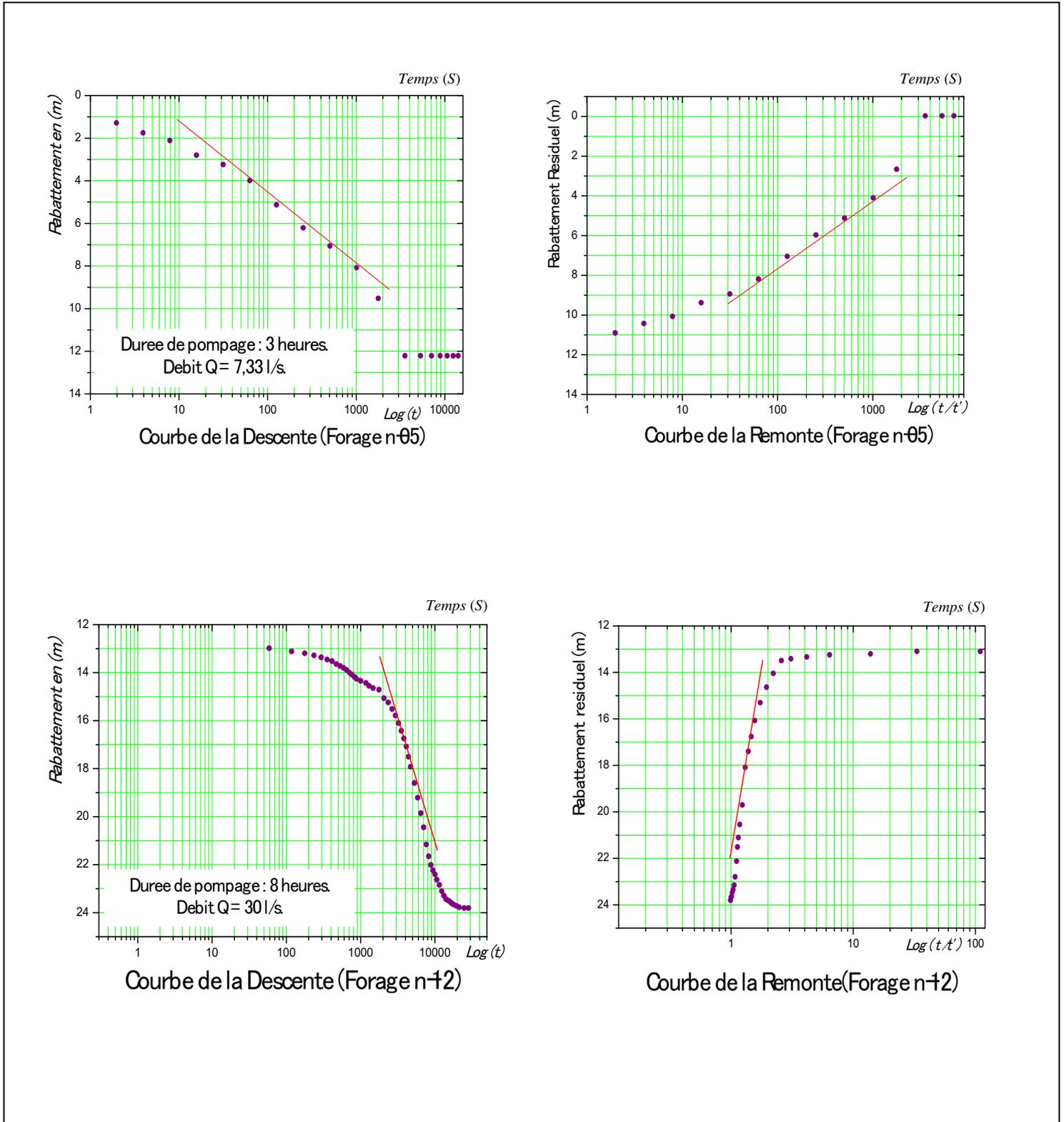


Fig IV. 7-Essai de pompage – courbes de descente et remontée

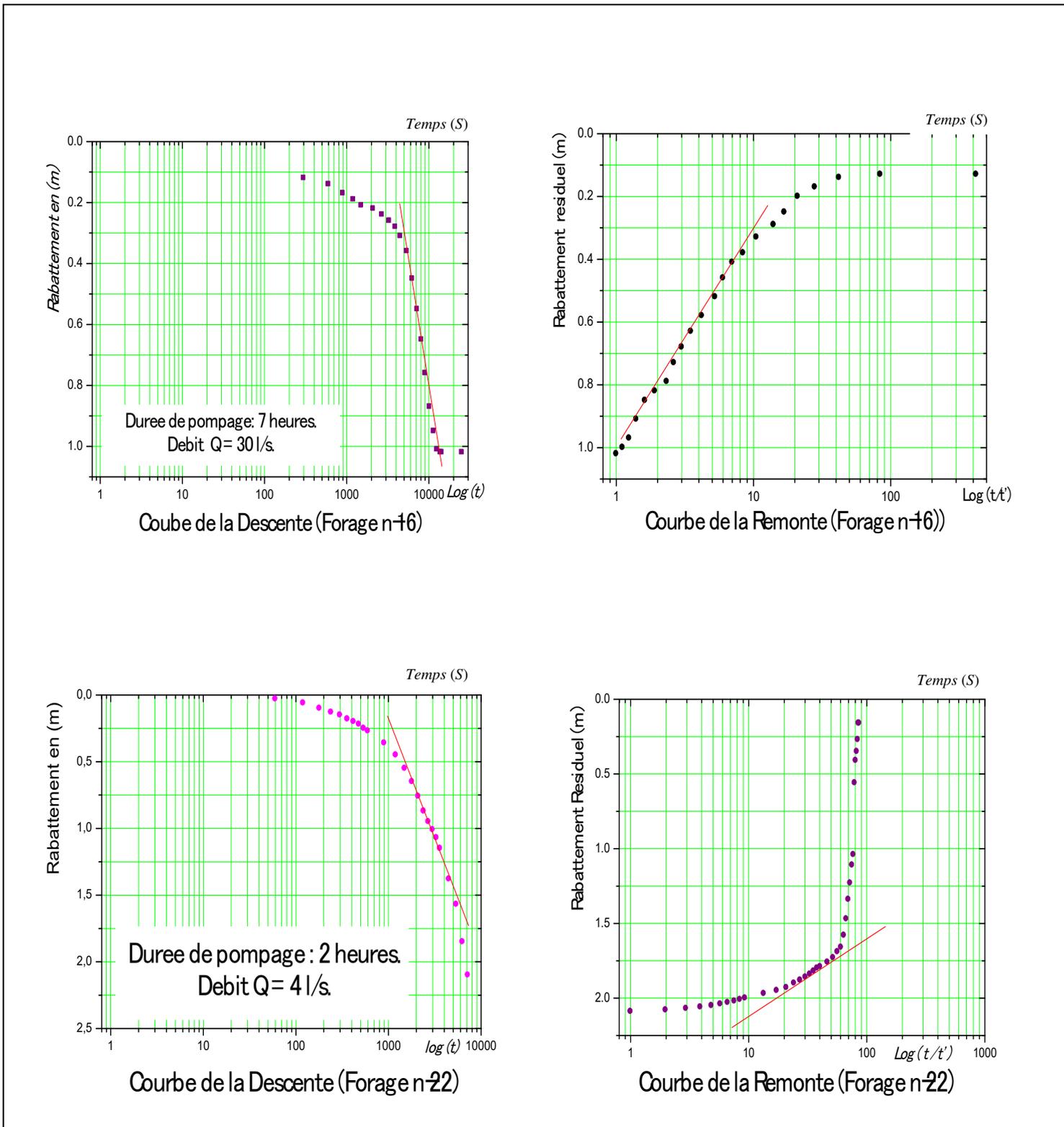


Fig IV. 8-Essai de pompage – courbes de descente et remontée

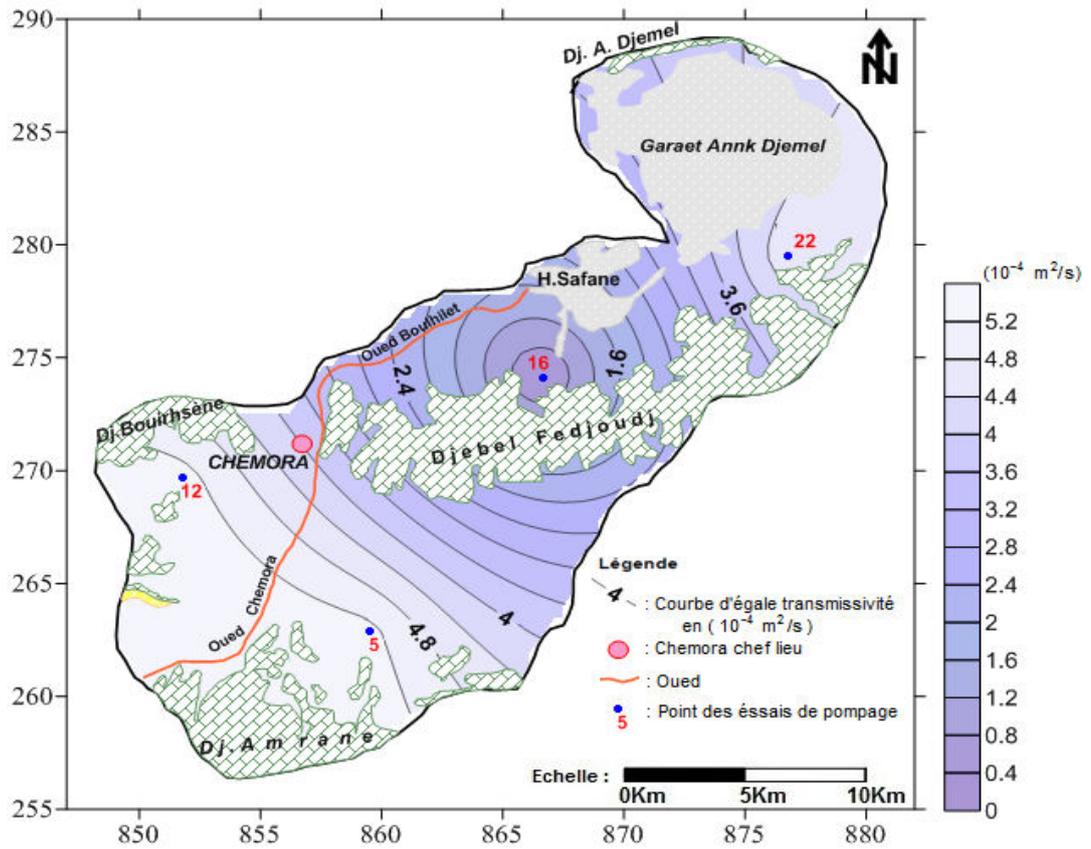


Fig IV.9- Carte de la transmissivité en $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

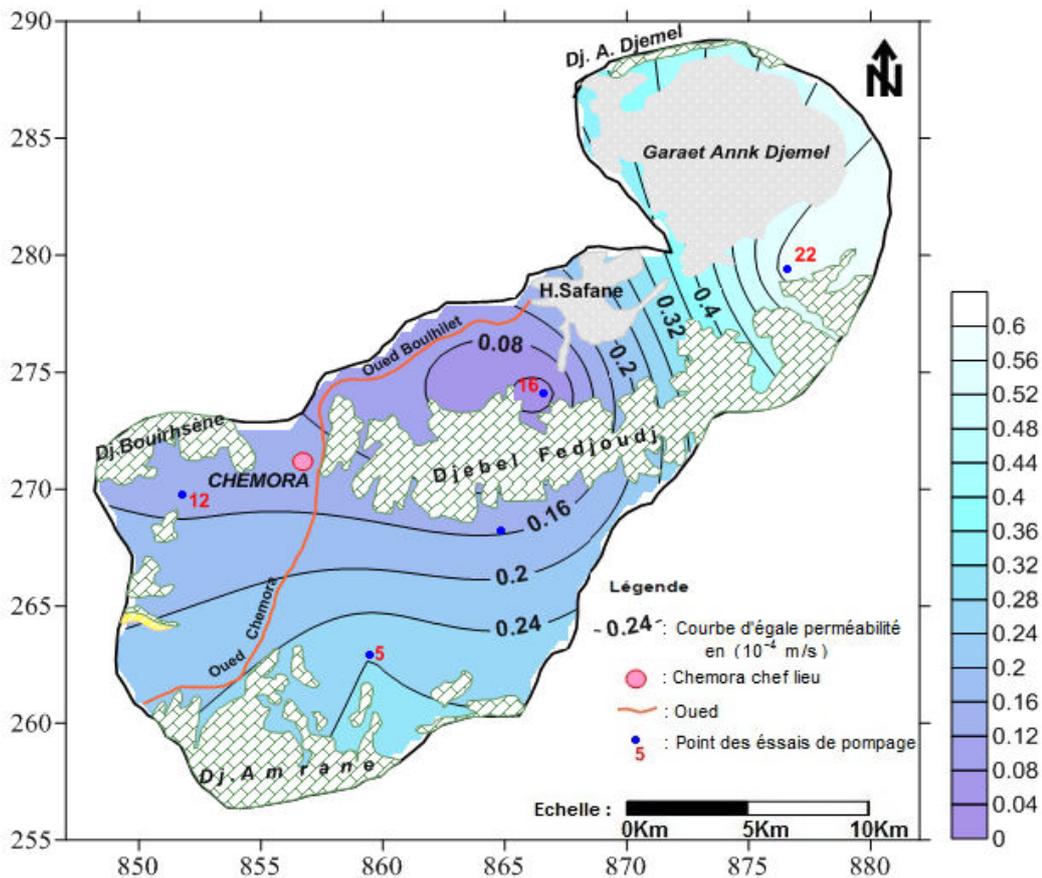


Fig IV.10- Carte de la perméabilité en 10^{-4} m/s

IV.4.1.2- Détermination de la porosité efficace par la méthode d'Archie

La porosité efficace est le rapport du volume d'eau gravifique au volume total de la roche . Dans le cas des nappes libres , elle est pratiquement équivalente au coefficient d'emménagement. Archie a établi une formule liant la résistivité d'un terrain de porosité efficace ϕ ,à la résistivité de l'eau dont il est imprégné.

La relation s'exprime par la relation suivante :

$$F = \frac{R_t}{R_w}$$

Avec :

F : Facteur de formation

R_t : Résistivité de l'aquifère

R_w : Résistivité de l'eau contenue dans le terrain

La relation établi par Archie entre la porosité efficace brute et le facteur de formation s'écrit :

$$F = a \cdot \phi - m$$

a : paramètre , $0,8 \leq a \leq 1$ (0,8 pour les sables et 1 dans le cas des formations compactes.

m : Coefficient variant de 1,37 pour les sables à 2 pour les formations compactes.

La valeur du coefficient " a " et celle de l'exposant " m ", étant différentes selon les auteurs, par simplification de l'équation on a opté pour les valeurs suivantes de ces paramètres :

$$a=1 \text{ et } m=2$$

$$F = \frac{R_t}{R_w} = \frac{1}{\phi^2} \Rightarrow \phi = \sqrt{\frac{R_w}{R_t}}$$

ϕ : Etant la porosité efficace ou coefficient d'emménagement.

La porosité efficace brute calculé doit être corrigée par un coefficient de correction , correspondant au rapport entre la hauteur de l'aquifère saturé d'eau et l'épaisseur de l'aquifère non argileux (tableau IV.4) .

IV.4.1.2.1- Carte de la résistivité de L'aquifère (Rt)

L'examen de la figure IV.11, montre que les valeurs élevées de la résistivité de l'aquifère caractérisent les parties ; Nord-est de (135 à 200 ohm.m) et Ouest de (125 à 155 ohm.m), cela revient à la nature des formations marneuses et argileuses. Le reste du terrain de la zone d'étude est caractérisé par des valeurs de (85 à 125 ohm.m), expliqué par la nature des formations alluvionnaires, graviers, galets, sables et sables argileux.

Tableau IV.4- : valeurs de la porosité efficace

Point d'eau	Rw(ohm.m) x10 ⁻³	Rt (ohm.m)	Porosité efficace Brute	Coefficient de Correction	Porosité efficace vraie ou coefficient d'emmagasinement
05	1,53	75	0,14	0,87	0,12
12	7,25	150	0,22	0,13	0,03
16	7,35	100	0,27	0,16	0,04
22	3,58	200	0,13	0,35	0,04

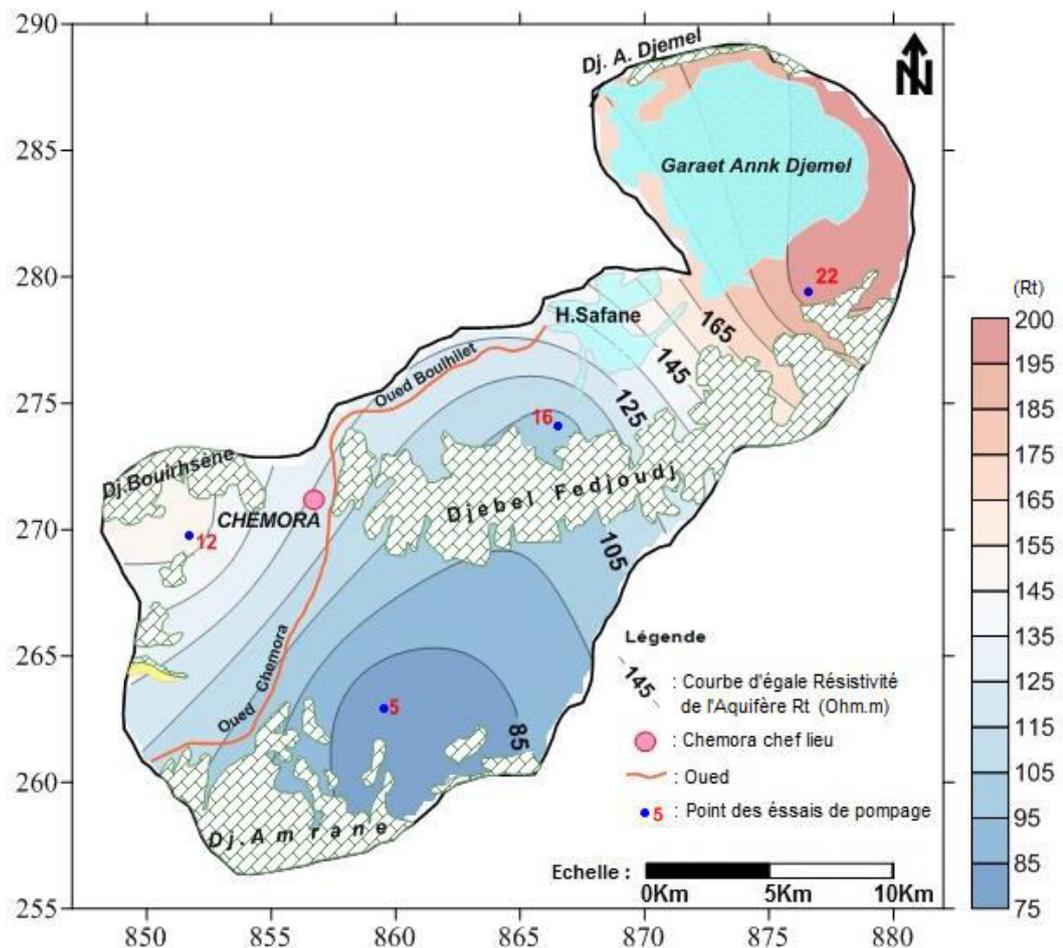


Fig IV.11- Carte de la Résistivité de l'aquifère (Rt)

IV.4.1.2.2- Carte de la résistivité de l'eau contenue dans le terrain (Rw)

La résistivité de l'eau revient à la dureté caractérisée par l'augmentation des concentrations de calcium et de magnésium, due à la dissolution des formations calcaires et carbonatés des massifs de Dj.Fédoudj et Dj.Bouirhsène (Fig IV.12 et cela explique les valeurs élevées enregistrées au centre, Nord-ouest et à l'Ouest de $4,5$ à $7,35 \cdot 10^{-3}$ ohm.m. Tandis que les faibles sont enregistrées au Sud et l'est, reflète la salinité élevée des eaux en ces endroits.

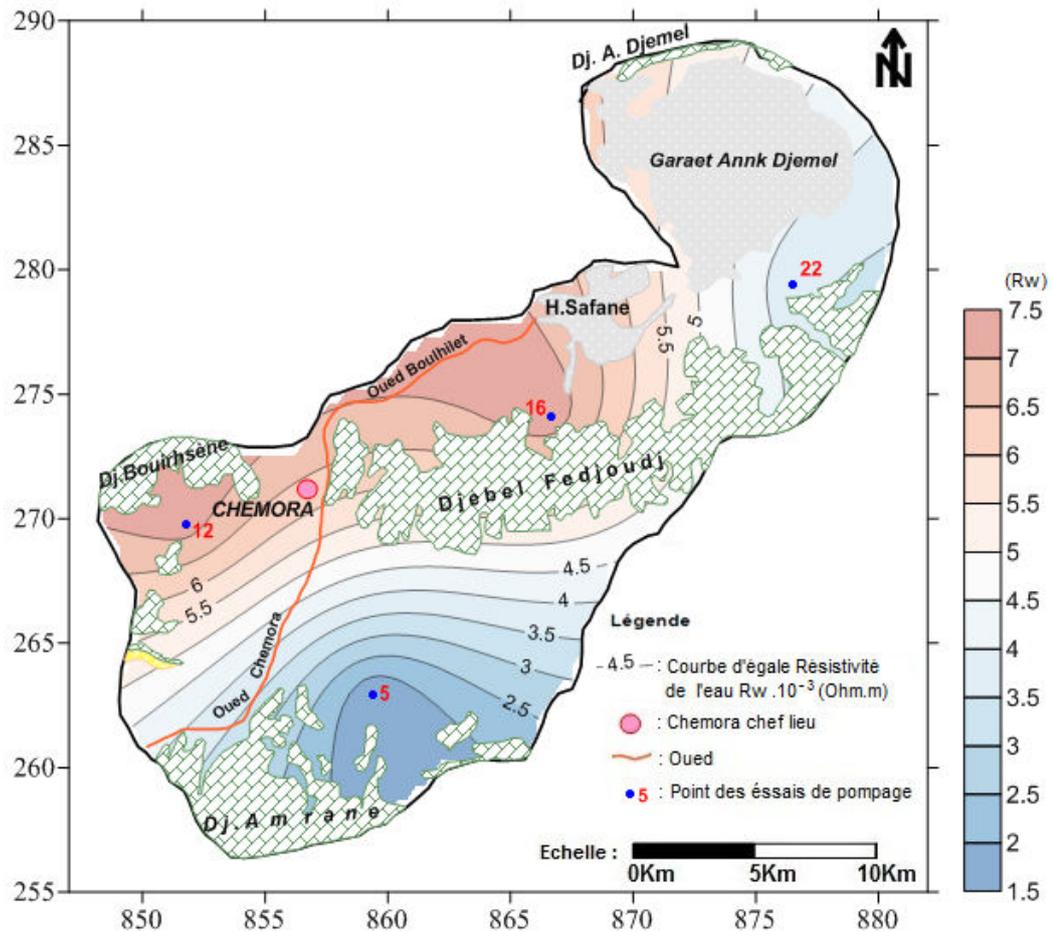


Fig IV.12- Carte de la Résistivité de l'eau contenue dans le terrain (Rw)

IV.4.1.2.3- Carte de la Porosité efficace vraie ou coefficient d'emmagasinement

L'analyse de la carte de la Porosité efficace vraie ou coefficient d'emmagasinement (Fig IV.13), montre que les formations de l'aquifère de la partie Sud ont des coefficients d'emmagasinement varie de 0.07 à 0.12. Cependant les formations de reste du terrain présentent des coefficients varie de 0.07 à 0.02.

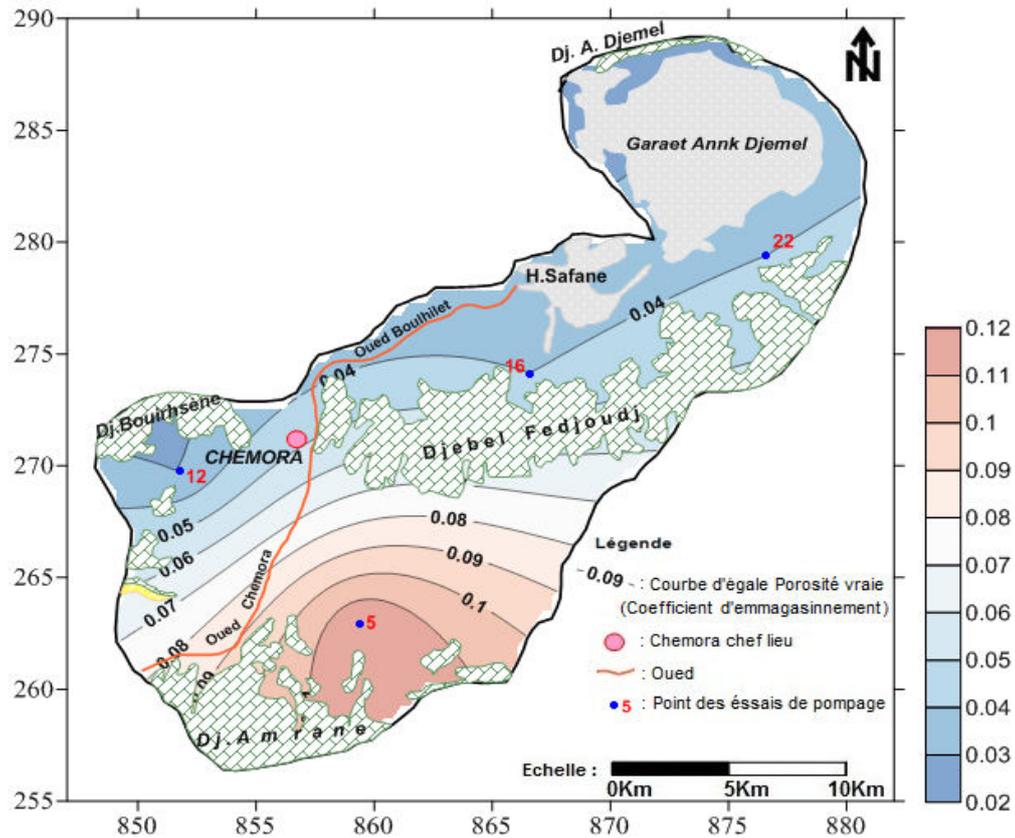


Fig IV.13- Carte de la Porosité efficace vraie ou coefficient d'emmagasinement

IV.5 - Estimation des potentialités des eaux souterraines de la région de Chemora.

La plaine alluviale de Chemora est une région à vocation essentiellement agricole. La mise en valeur des terres irrigables est conditionnée par le facteur « eau ». Nous tenterons d'estimer les ressources en eau et d'en évaluer les besoins de l'agriculture, l'alimentation en eau potable et les besoins de l'industrie.

IV.5.1-Les réserves en eau souterraine

Les réserves en eau souterraine peuvent être classées en 4 catégories.

✓ Les réserves régulatrices

C'est le volume d'eau gravitaire contenu dans la zone de fluctuation de la surface piézométrique d'un aquifère à nappe libre. Elle est calculée par référence à une période définie (fluctuations moyennes annuelles).

✓ Les réserves permanentes

C'est la part de la réserve totale non renouvelée. Pour l'aquifère à nappe libre, elle est limitée au sommet par la surface piézométrique minimale moyenne. Dans les aquifères à nappes captives, les réserves permanentes et les réserves totales sont pratiquement identiques.

✓ Les réserves totales

C'est la quantité d'eau gravitaire contenue dans le volume d'aquifère délimité dans tous les cas à la base par le substratum et au sommet par le toit imperméable pour l'aquifère à nappe captive et la surface piézométrique maximale moyenne pour celui à nappe libre.

✓ Les réserves exploitables

C'est la quantité ou le volume d'eau maximale qu'il est possible d'extraire de la réserve totale d'un aquifère temporairement ou définitivement dans des conditions économiques acceptables et sans porter préjudice à la qualité des eaux et au régime de la nappe. Ce volume doit être inférieur ou égal à la réserve régulatrice ; il peut être supérieur si l'on peut envisager une meilleure infiltration des précipitations, lors des recharges ultérieures.

IV.5.2-Etude des Réserves de la Zone Etudiée

-Réserves régulatrices

C'est le volume d'eau qui joue le rôle de régulateur du débit de la nappe et qui représente le volume des fluctuations de cette nappe. Il s'exprime par l'expression suivante :

$$V_r = A \cdot \Delta h \cdot S$$

A : surface de la zone considérée ;

Δh : variation moyenne du niveau piézométrique de la nappe dans la zone considérée ;

S : Coefficient d'emménagement ou porosité efficace de l'aquifère.

La valeur de la variation moyenne du niveau piézométrique de la nappe entre les deux périodes de Mars 2007 et Février 2016 est de 1,10 m ; ce qui représente une valeur moyenne entre les fluctuations les plus élevée et les fluctuations les plus faibles. Ces fluctuations s'effectuent sur une superficie d'environ 486 Km². Les résultats du calcul donnent une valeur moyenne du coefficient d'emménagement de 6%. Les réserves régulatrices sont ainsi estimées à 32,076.10⁶ m³.

- Réserves permanentes

C'est le volume d'eau inclus dans toute la masse de l'aquifère en dessous de la cote minimale atteinte par la nappe en fin d'étiage. Ce volume d'eau stocké n'est en général jamais entamé dans des conditions naturelles d'écoulement. Les exploitations intenses, surtout lors d'une exploitation agricole intensive qui va de mai à octobre, peuvent prélever sur ce capital, on a alors une surexploitation temporaire de la nappe. Ce qui peut dans ce cas perturber le régime naturel de la nappe. Dans le cas de la vallée de l'oued de Chemora,

ce phénomène est peu envisageable étant donné le volume important des réserves régulatrices et une alimentation de la nappe alluviale suffisamment importante, on peut exploiter le débit voulu sans entamer les réserves permanentes (ou statiques) du moins lors d'une succession d'années moyennes du point de vue pluviométrique. Ces réserves permanentes sont données par la relation :

$$V = A \cdot H_p \cdot S$$

A : Surface de la zone considérée ;
 $H_p = H - h$: puissance de l'horizon aquifère non affecté par les fluctuations ;
H : Epaisseur moyenne de cet horizon aquifère.
S : Coefficient d'emménagement ou porosité efficace de l'aquifère.

La puissance de l'horizon aquifère est de 70 m (Fig IV.6- précédente), le volume d'aquifère mouillé déterminé est de l'ordre de $340,20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Le coefficient d'emménagement étant estimé à 6%, on obtient ainsi un volume d'eau des réserves permanentes égal à $2041,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ce chiffre ne peut être qu'une approche de la réalité, vues les erreurs qui peuvent être faites sur la détermination du volume « utile » du réservoir et sur le coefficient d'emménagement. Cependant, il permet de donner une approximation sur les réserves énorme accumulées dans les formations alluviales.

IV.5.3- Estimation des besoins en eau

Les débits extraits, tant pour l'agriculture que pour l'eau potable et l'industrie, on fait l'objet d'une enquête sur le terrain par les services des DSA des wilayas de Batna et Oum-El Bouaghi pendant l'année 2016, qui résulte un total de 148 points d'eau ont été recensés pour l'irrigation des terres agricoles de cette zone avec un débit d'exploitation moyen de l'ordre de 5l/s et pour l'eau potable et l'industrie les informations recueillies des services des DRE donnent un nombre de 11 point d'eau exploités par cette zone.

IV.5.3.1-Débit extrait de la nappe pour l'agriculture

L'irrigation a lieu généralement de Mai jusqu' à Octobre, soit 184 jours. La durée moyenne de fonctionnement de pompage est de 3 heures par jour. Ce qui donne le résultat consigné dans le tableau suivant (Tableau IV.5).

Tableau IV.5- Débits extraits de la nappe pour les besoins agricoles.

Nombre de points d'eau	Q moyen exploité (l/s)	Q total exploité (l/s)	Q journalier (m^3/j)	Volume annuel ($\text{m}^3/184\text{j}$)
148	5	740	7992	$1,5 \cdot 10^6$

IV.5.3.2-Débits extraits de la nappe pour les besoins en eau potable et industriels

La durée moyenne de fonctionnement des pompes est de 8 heures par jour. Les débits extraits pour les besoins en eau potable et industrielles sont stipulés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6- Débits extraits de la nappe pour les besoins en eau potable et industriels (DRE des wilayas de Batna et Oum-El Bouaghi)

Point d'eau	Q exploité (l/s)	Q journalier (m ³ /j)	Q annuel (m ³ /an)
Merzklel	11	316.8	115632
Guesses	38	1094.4	399456
Berkane	38	1094.4	399456
Dhar Amrane	3	86.4	31536
Laadjardia	20	576	210240
Maniani	30	864	315360
Safane	6	172.8	63072
BL ₆	8	230.4	84096
BL ₄	20	576	210240
Benhineh 01	6	172.8	63072
Benhineh 02	8	230.4	84096
Total de la zone		5414.4	1976256

Le volume total prélevé annuellement de la nappe alluviale pour l'agriculture, l'AEP et les besoins industriels s'élève à $3,48 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ce chiffre pourrait être nettement dépassé compte tenu des forages en cours de réalisation, destiné à faire face aux besoins aussi bien de l'agriculture que de l'alimentation en eau potable et industriels.

Conclusion :

Dans cette étude hydrogéologique on est intéressé à l'aquifère superficiel, constitué essentiellement par des formations du Quaternaire qui recouvre la majorité de la zone d'étude caractérisé par des glacis polygéniques (argiles, graviers, Sables et galets), alluvions, limons, marnes, conglomérats cimentées et croutes calcaire. L'alimentation de cet aquifère se fait principalement par les massifs de Djebel Fedjoudj, Djebel Merzklel et Djebel Bouarif, et par les précipitations sur l'impluvium des plaines en périodes d'averses.

L'aquifère est capté par un nombre élevé de puits et forages qui se répartissent sur l'ensemble du système aquifère. Comme il est en relation avec les aquifères profonds (en certains endroits), ce qui suppose la présence d'un phénomène de drainance entre les aquifères.

L'analyse des cartes piézométriques de notre zone d'étude montre :

- ✓ Les zones correspondantes à des horizons à fort écoulement avec les directions de l'écoulement S-N, SW –NE, C- S, E-NW, E-N et C-NE. L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait à partir des massifs qui bordent les plaines de Chemora et Boulhilet où les axes d'écoulement prennent naissance. Ces écoulements sortent suivant deux sens ; le premier vers le Nord-est par l'intermédiaire d'un axe de drainage. Ainsi, se converge vers une zone de dépression (Garaet Annk Djemel) qui représente l'exutoire principal de l'aquifère et en même temps une limite à potentiel imposé; le deuxième sort de la zone d'étude vers le sud et rejoint l'axe de drainage Sud-est et se converge vers la zone de dépression (Garaet Taref) située à l'Est.

Les essais de pompage, nous a permis d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et d'estimer les potentialités hydriques souterraines :

- ✓ La transmissivité moyenne de l'ordre de $T = 3.911 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, la perméabilité moyenne de $0.26 * 10^{-4} \text{ m/s}$ et le coefficient d'emmagasinement (porosité efficace) moyen de 6% .
- ✓ Le volume total prélevé annuellement de la nappe alluviale pour l'agriculture, l'AEP et les besoins industriels est estimé à $3,48 \times 10^6 \text{ m}^3$.

CHAPITRE V

***HYDROGEOCHIMIE
ET POLLUTION PAR LES NITRATES***

V- Hydrogéochimie et pollution par les nitrates

V.1- Introduction

L'étude de la chimie des eaux souterraines est très utile pour l'hydrogéologie ; elle sert à compléter l'interprétation hydrodynamique et apporter une explication complémentaire sur l'alimentation, le drainage et l'écoulement au niveau des aquifères.

Les eaux des précipitations ruissellent, s'infiltrent, se chargent en composants des sols et des roches mères dont elles peuvent acquérir des sels minéraux en grande quantité (calcium, magnésium, sulfates...) ou d'autres composés comme le fer, le manganèse...., Les éléments liés à l'action de l'homme peuvent être entraînés en profondeur comme les nitrates, la matière organique, les pesticides, les micro-organismes qui par leur nature et leur concentration peuvent être indispensables, acceptables, indésirables voire toxiques ou dangereux.

Les cours d'eau, les lacs et les étangs peuvent renfermer des nitrates provenant des diverses sources : zones agricoles dans lesquelles on utilise une forte dose d'engrais pour la fertilisation, parcs d'engraissement de bétail et pâturages, et zones de traitement des eaux usées, donc ont une origine essentiellement agricole (engrais, élevage...) et urbaine (égouts). Le lessivage des nitrates vers les couches profondes selon le taux des précipitations et de la texture du sol. Plus le sol est léger et les précipitations intenses, plus le lessivage risque d'être important. Les nitrates peuvent être polluants lorsqu'ils atteignent les nappes d'eaux souterraines et les cours d'eau. D'autre part, les nitrates qui se retrouvent dans les cours d'eau provoquent, avec les phosphates, le phénomène d'eutrophisation qui provoque la Détérioration de l'écosystème aquatique par la prolifération de certains végétaux, en particulier des algues planctoniques. Des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l dans l'eau potable sont considérées comme nuisibles pour la santé humaine (O.M.S 2006).

V.2- Caractérisation des eaux de la nappe alluviale de la région de Chemora :

Les eaux souterraines de la nappe alluviale de la région de Chemora dans les formations quaternaires, actuellement les seules ressources pour l'alimentation en eau potable d'une grande partie de la population rurale. La nappe étudiée est située dans les plaines, Plaine Chemora-Boulhilet (traversée par l'oued Boulhilet déversant dans Garaet Ank Djemel au Nord-est) et plaine Chemora-Remila entre oued Chemora à l'Ouest, Oued Boulfreis au Sud et Garaet Taref à l'Est. La composition chimique des eaux souterraines est conditionnée par le type de la roche encaissante, du temps de séjour, de l'évolution hydrodynamique, de la profondeur du

niveau statique et du climat. Pour mettre en évidence un potentiel impact négatif sur la qualité des eaux de cette nappe alluviale, lié aux eaux des oueds, majoritairement polluées par les rejets liquides (eaux usées), l'utilisation des engrais et fumiers pour la fertilisation des terrains agricoles et la salinité augmentée par le phénomène de l'évaporation et les sols salés (Garaets, Sebkhass et Chott) ; une étude a envisagé de faire une caractérisation physicochimique des eaux souterraines de cette nappe dont le but de déterminer les paramètres polluants.

V.2.1- Résultats et discussions :

Afin de déterminer le chimisme des eaux souterraines de la région de Chemora, nous avons effectués des analyses physico-chimiques des eaux prélevées de 23 points d'eau de l'aquifère superficiel du Quaternaire durant trois campagnes (Mars, Juin 2007 et Février 2016). Les résultats des analyses des échantillons permettent de calculer les paramètres statistiques des éléments physiques et chimiques des eaux souterraines (Tableau. V.1).

Tableau. V.1 Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques

Compagne d'analyse	Paramètres Statistiques	T °C	pH	CE µS/cm	TAC	DHT	Ca ⁺² mg/l	Mg ⁺² mg/l	Na ⁺ + K ⁺ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻² mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ g/l	NH ₄ ⁺ mg/l
Mars 2007	Max	18	7,5	9580	4,4	75,2	649,29	512,88	983	573,4	3660	337,7	116	0,01	/
	Min	16,2	6,6	870	5,7	10	104,2	45,96	11,5	164,7	180	53,25	0,6	0	/
	Moy	17,07	7,05	2993,48	4,3	25,01	221,52	167,03	354,11	315,39	1395,43	230,15	27,45	0,00	/
	Mode	17,6	7,2	#N/A	3,7	15,6	176,35	86,28	#N/A	225,7	3200	255,6	0,6	0,001	
	Ecart type	0,62	0,28	2018,15	3,64	15,86	111,24	131,38	294,15	103,58	1212,74	97,46	30,10	0,00	/
	CV %	4	4	67	37	63	50	79	83	33	87	42	110	98	/
Juin 2007	Max	22,70	7,30	10080	6,70	80	745,48	512,76	816,96	408,7	3840	337,25	132	0,2	/
	Min	19,10	6,50	910,00	3,06	10,8	131,46	43,08	46	198,86	235	71	1,2	0	/
	Moy	21,23	6,96	3153,04	5,16	26,13	243,80	155,99	205,71	315,18	1053,48	238,19	29,37	0,01	/
	Mode	22,5	6,9	3340	5,8	12,4	211,62	79,44	222,87	353,8	885	337,25	9,5	0	
	Ecart type	1,51	0,21	2162,70	1,06	16,89	127,54	127,75	205,86	63,88	977,75	90,67	33,06	0,04	/
	CV %	7	3	69	20	65	52	82	100	20	93	38	113	313	/
Février 2016	Max	17,8	7,4	5350	10,2	34,8	268,54	285,24	212,75	622,2	680	519,5	98,5	0,006	3,78
	Min	16,9	6,3	940	3,1	8,4	104,21	21,36	26,56	189,1	140	71	14	0	1,22
	Moy	17,32	7,17	2405,22	5,78	14,83	165,38	78,88	93,69	352,48	242,83	301,25	51,35	0,00	2,34
	Mode	17,40	7,3	1370	4	10	132,27	93,26	#N/A	219,60	180	437,25	#N/A	0	3,05
	Ecart type	0,24	0,24	1117,79	1,92	6,26	42,95	60,50	43,07	116,92	133,12	140,71	29,38	0,00	0,71
	CV %	1	3	46	33	42	26	77	46	33	55	47	57	91	30
Normes O.M.S 2006		25	6,5-9,5	2000	35	/	200	150	200	/	250	250	50	0.2	0.2
Normes Algérienne 2000		25	6,5-8,5	2800	/	50	200	150	200	/	200	200	50	0.1	0.5

Pour apprécier la qualité des analyses chimiques des échantillons d'eau, une vérification à été faite par l'analyse de la balance ionique selon la formule suivante :

Balance ionique (en %) = $(\sum \text{cations} - \sum \text{anions}) / (\sum \text{cations} + \sum \text{anions}) * 100$ en méq/l.

La limite pour une analyse exploitable est fixée à un écart maximal de 10% et qui est une erreur acceptable pour ce type d'étude (Cüneyt et al, 2002 ; Yekdeli et al ; 2010. Kloppmann et al, 2011). Les eaux analysées présentent en générale un équilibre ionique.

V.2.1.1- Etude des paramètres physiques

V.2.1.1.1 - Température

La température de l'eau est un facteur important dans la production biologique. Ceci vient du fait qu'elle affecte les propriétés physiques et chimiques de celle-ci; en particulier sa densité, sa viscosité, la solubilité de ses gaz (notamment celle de l'oxygène) et la vitesse des réactions chimiques et biochimiques (HCEFLCD, 2006).

La répartition spatiale de la température des eaux souterraines pendant période de Février 2016 (Fig. V.1 et Fig. V.2), montre que les valeurs élevées caractérisent la partie Sud de la zone d'étude et varie de 17°C à 17.8°C, cela est du probablement à l'activité du sol reconnu par l'agriculture intense et l'utilisation des fertilisants. Par contre elle diminué vers la partie Nord-est dans le sens d'écoulement souterrain est atteint la valeur minimale de 16.9°C aux environs du Gareat. La variation spatio-temporelle montre que ces valeurs reconnues une diminution qui varie de 0.2°C à 0.7°C par rapport à la période de Mars 2007 et de 2.9 °C à 4.9°C par rapport à la période de Juin 2007, mais reste toujours dans la norme de potabilité fixée par l'organisation mondiale de la santé (O.M.S, 2006) de 25°C .

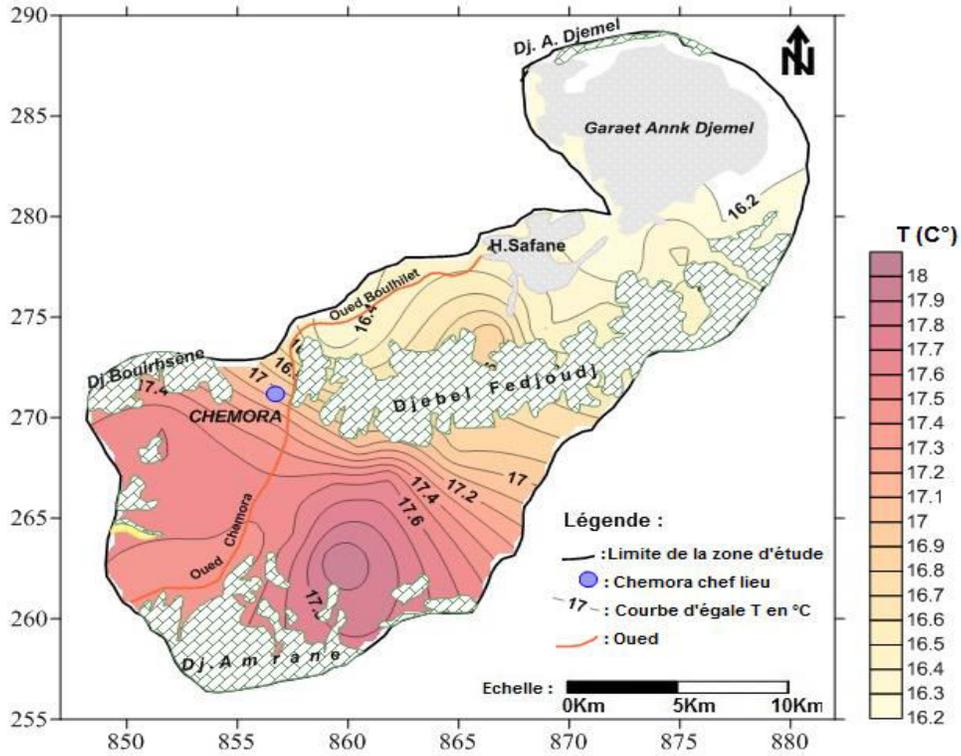


Fig. V.1. Carte de la température des eaux souterraines (Mars 2007)

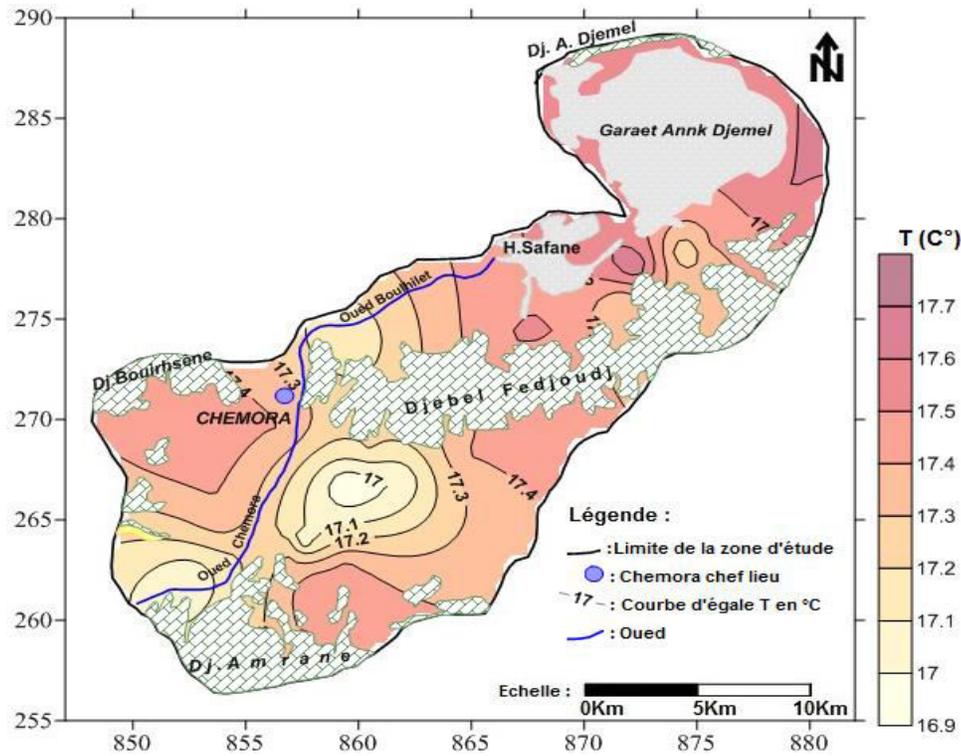


Fig. V.2. Carte de la température des eaux souterraines (Février 2016)

V.2.1.1.2 - Le Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes H^+ d'une solution, représente l'acidité ou l'alcalinité du milieu aqueux. Le pH d'une solution correspondant à la concentration $[H^+] = -\log_{10}(H^+)$. Cependant le pH dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique de l'aquifère et du bassin versant traversé (Dussart, 1966; Bermond et Vuichard, 1973). Dans la plupart des eaux naturelles, le pH est compris habituellement entre 6 et 8,5 alors que dans les eaux tièdes, celui-ci doit être compris entre 5 et 9 (HCEFLCD, 2007).

A partir des résultats obtenus (Tableau V.1, Fig. V.3 et Fig. V.4), on constate que les eaux de la nappe superficielle de la région de Chemora ont un pH qui varie entre 6,3 et 7,5 pour les trois périodes. Les valeurs du pH mesurées aux différents points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme de potabilité algérienne (6,5-8,5) et celle de l'O.M.S (6,5 – 9,5).

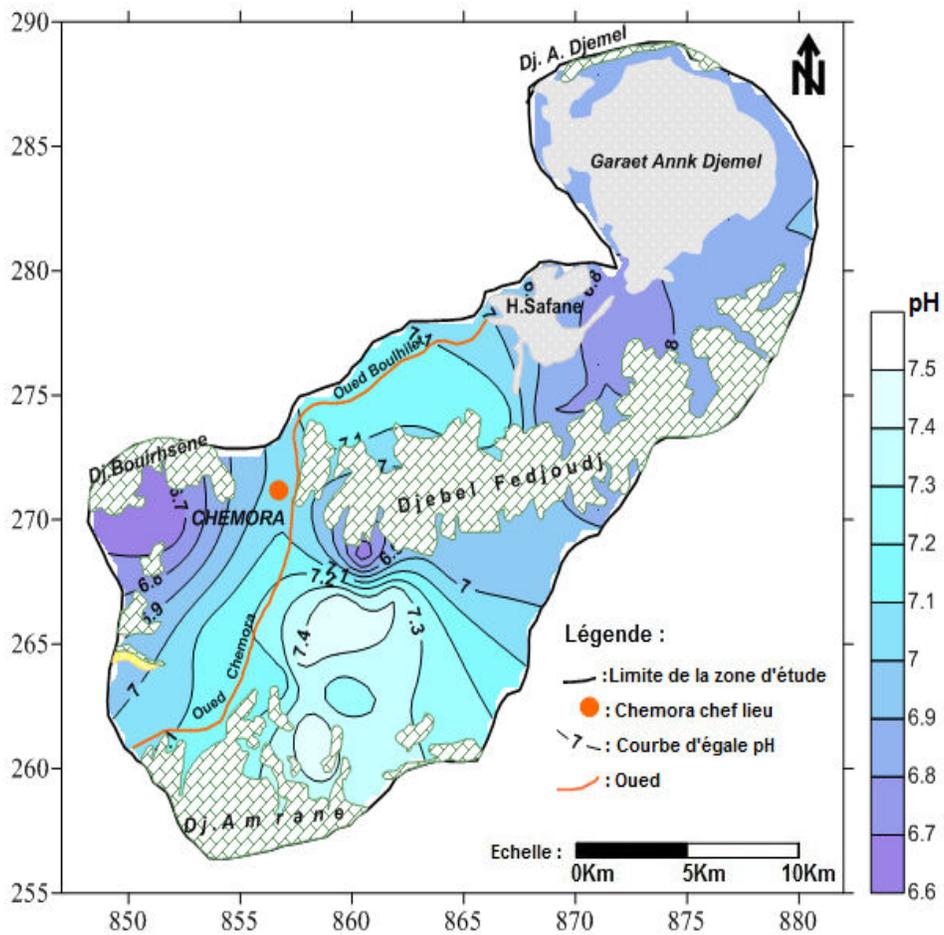


Fig. V.3. Carte du pH (Mars 2007)

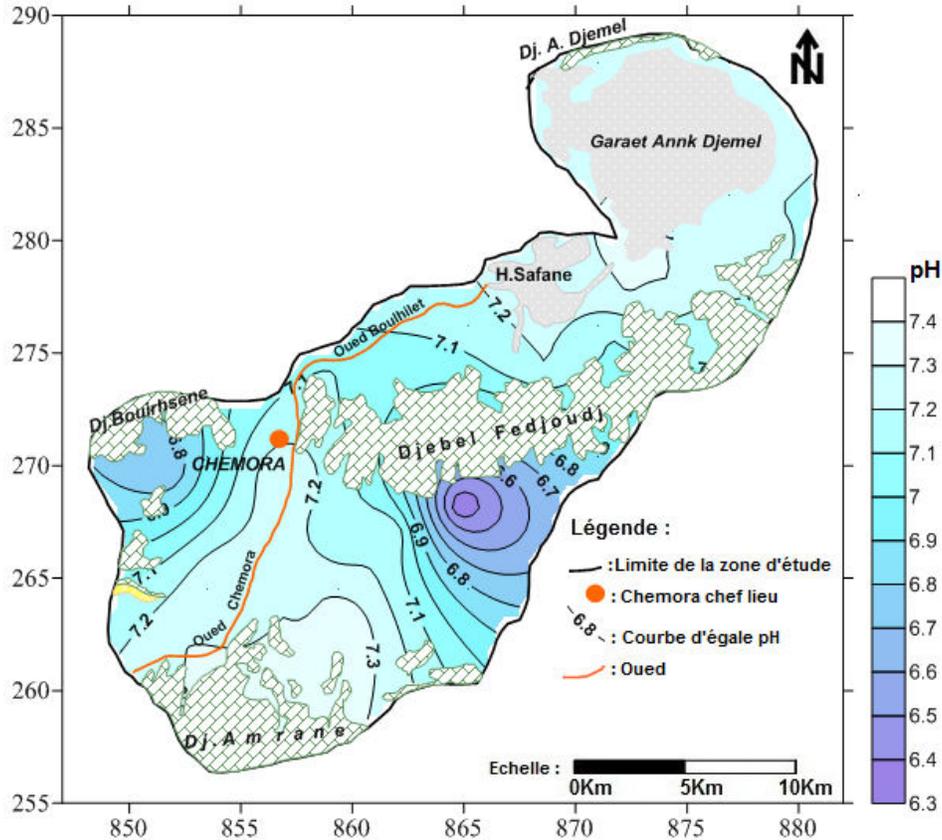


Fig. V.4. Carte du pH (Février 2016)

V.2.1.1.3 -La Conductivité électrique (CE) :

La conductivité d'une eau augmente avec sa teneur en sels dissous, elle permet donc une estimation de la minéralisation. Elle est considérée comme étant la propriété que possède l'eau de permettre au courant électrique de passer, celle-ci est en fonction, de la température, de la concentration et des espèces ioniques en solution. La classification des eaux en fonction de la conductivité électrique (Rodier, 2009) se présente de la manière suivante (Tableau. V.2).

La répartition de la conductivité électrique (Fig.V.5 et Fig.V.6), montre que pendant la période de Février 2016 les valeurs élevées ($>3000 \mu\text{s}/\text{cm}$) sont enregistrées à la partie Nord-est près du lac salé avec une valeur maximale de $5350 \mu\text{s}/\text{cm}$ et à la partie Sud avec une valeurs maximale de $4260 \mu\text{s}/\text{cm}$, ce qui peut être expliqué par plusieurs facteurs d'ordre hydrodynamique tel que la recharge en ces endroits et les apports d'eaux des bords Sud-ouest qui sont très chargés et qui permettent la concentration des éléments chimiques. Les valeurs qui ne dépassent pas les normes (Algérienne 2000) et (O.M.S 2006) sont de ($940 \mu\text{s}/\text{cm}$ à $2400 \mu\text{s}/\text{cm}$) enregistrées à la partie centrale et à l'Est de la zone d'étude dans le sens d'écoulement, cela du probablement à la

dilution. La période de Mars 2007 été caractérisée par des conductivités presque doublées que celles de la période de Février 2016 avec une valeur maximale de 9850 μ S/cm enregistrée au Nord-est près du lac salé qui représente un point d'agglomération des rejets telle que la contamination par les eaux d' Oued Boulhilet qui draine les eaux usées des villes de Chemora et Boulhilet. Tandis que nous remarquons une légère augmentation des conductivités pendant la période de Juin 2007 par rapport à la période de Mars 2007. Cette augmentation de la conductivité revient au rabattement de la nappe due en grande partie à la sècheresse et à l'excès de pompage.

Tableau. V.2. Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité

Conductivité μ S/cm	Degré de minéralisation	Pourcentage des points d'eau (%)		
		Mars 2007	Juin 2007	Février 2016
Egale à 0,05	eau déminéralisée	/	/	/
10 – 80	eau de pluie	/	/	/
80 – 100	eau peu minéralisée	/	/	/
300 – 500	eau moyennement minéralisée	4,35	4,35	4,35
1000 - 3000	eau saline	60,87	56,52	73,91
> 3000	eau de mer	34,78	39,13	21,74

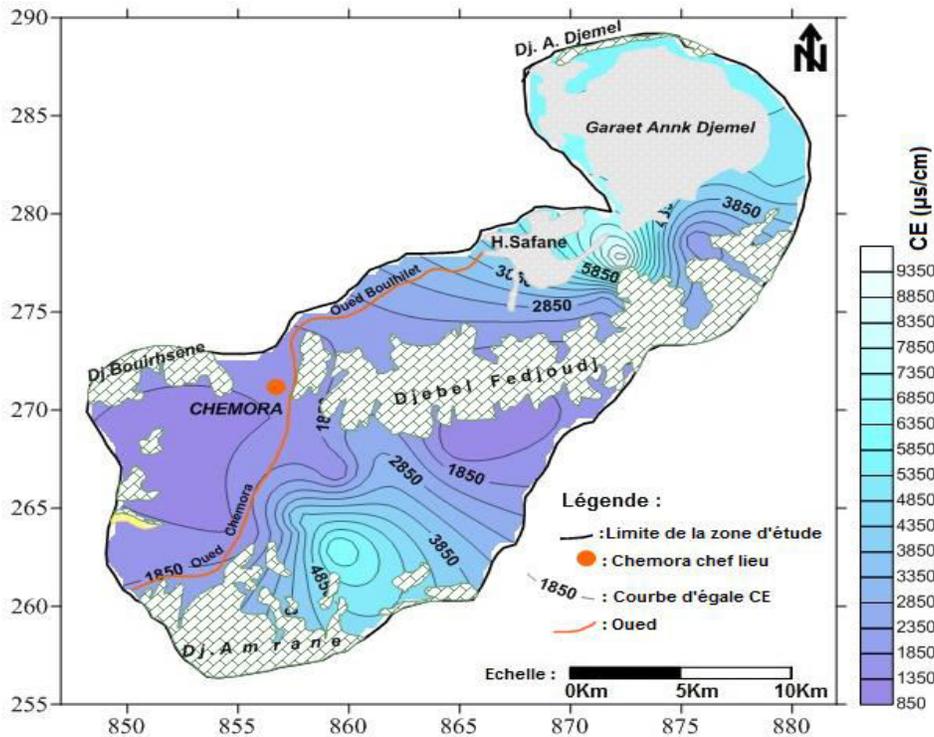


Fig. V.5. Carte de la conductivité (Mars 2007)

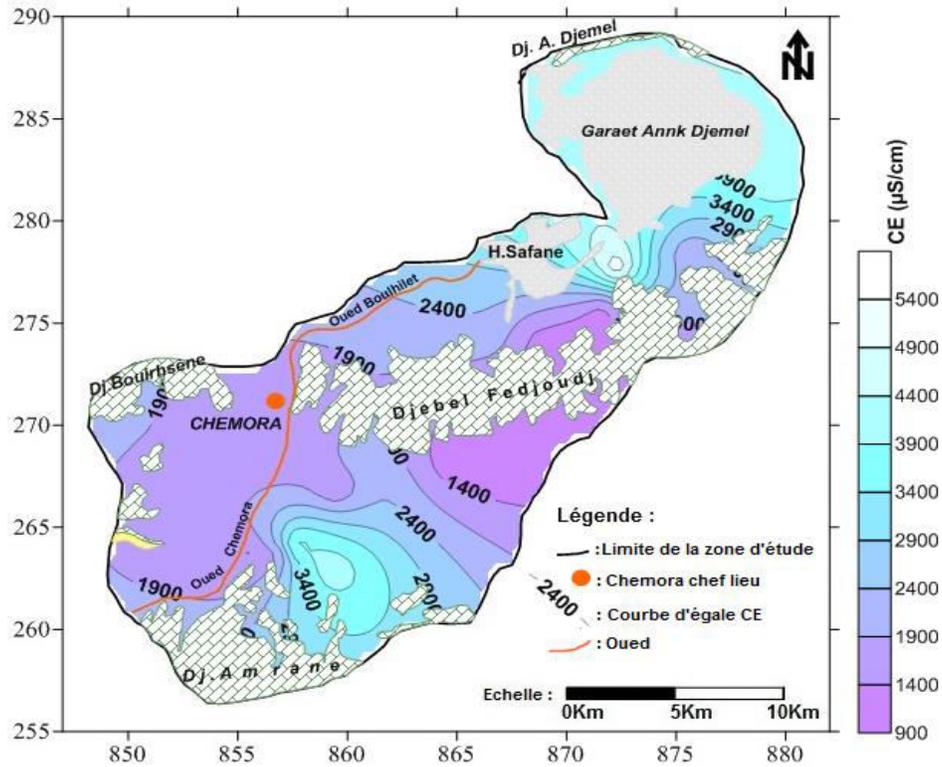


Fig. V.6. Carte de la conductivité (Février 2016)

V.2.1.2- Etude des paramètres chimiques.

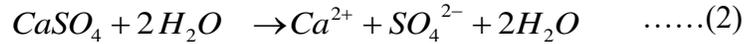
V.2.1.2.1 - Cartographie hydrochimique :

L'établissement des cartes, nous permet d'apprécier la répartition des concentrations des éléments chimiques et expliquer leur origine. A cet effet, neuf cartes des paramètres chimiques sont dressées pour la période de Février 2016, comparées à celles de la période de Mars 2007 (Ghodbane, 2009- Annexe n°03).

A- Le calcium Ca^{++} :

Le calcium est un élément alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates, fréquent dans les roches sédimentaires sous forme aussi de carbonates ; calcite, dolomite et aragonite (Derver 1997). Il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées (1) et également des formations gypsifères ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (2), suite à la présence du gaz carboniques, qui sont facilement solubles selon l'équation suivante :





L'examen de la carte du calcium de La période de Février 2016 (Fig.V.7), montre que les concentrations élevées en Ca^{++} sont enregistrées à la zone Sud-est de 260 mg/l près Dj. Fedjoudj et de 250mg/l au Sud-ouest près du Djebel Bouarif. Au niveau de la partie centrale la concentration varie de 100 à 160 mg/l. les teneurs de cet élément oscillent autour de la norme de l'O.M.S 2006 et algérienne 2000 de (200mg/l) pour cette période. Cependant la période de Mars présente des fortes concentrations en Ca^{++} qui dépassent la norme (600 à700 mg/l) à la zone Nord-est près de Garaet Ank Djemel et Dj. Fedjoudj, dues à la dissolution de roches carbonatées. Les zones Sud, Sud-ouest (Djebel Bouarif) et centrale du secteur sont caractérisées par des concentrations variées de 100mg/l à 300 mg/l.

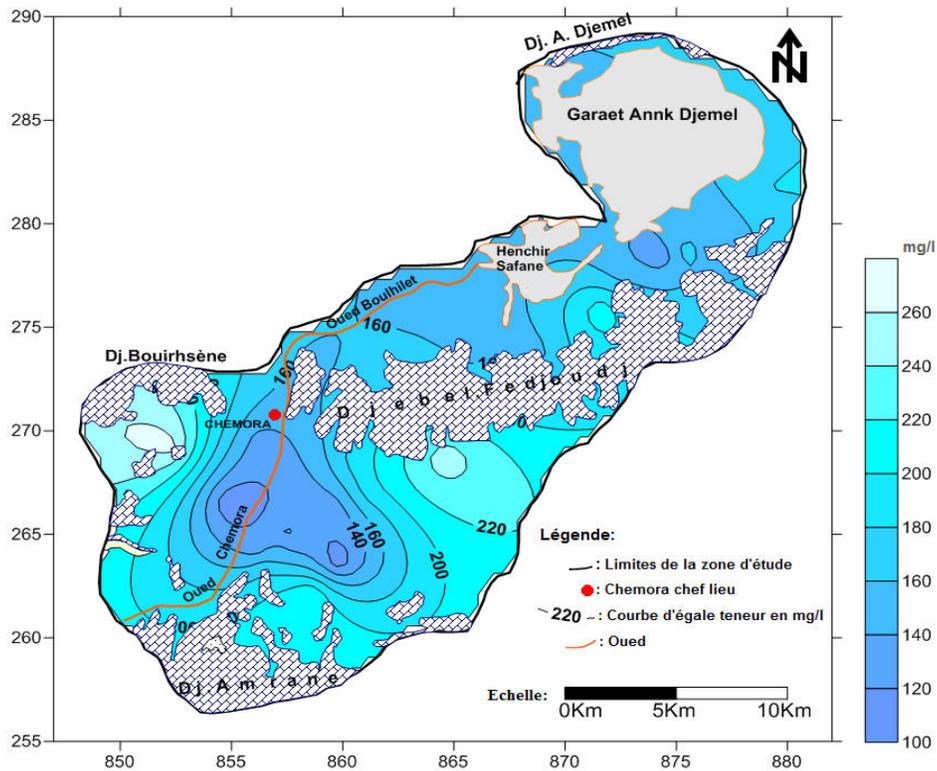


Fig. V.7. Carte de calcium Ca^{++} (Février 2016)

B - Le magnésium Mg^{++} :

Dans la nature le magnésium existe uniquement combiné à d'autres éléments, en particulier dans les minéraux tels que la carnallite, la dolomite et la magnésite, ainsi que dans de nombreux silicates formant des roches, et dans l'eau de mer. On le trouve également sous forme de sels. Il constitue un élément significatif de sa dureté, sa teneur dépend de terrain traversée, pour la consommation humaine la valeur limite de l'OMS 2006 et algérienne 2000 est

de 150 mg/l. Le magnésium peut avoir un effet laxatif et des troubles digestifs chez l'enfant, surtout si les concentrations de sulfate de magnésium sont supérieures à 700 mg/l. Le magnésium est une grande nécessité à la photosynthèse des plantes (Beaudry et Henry, 1984).

Les concentrations du magnésium pour la période de Février 2016 (Fig.V.8), ne dépassent pas les normes algériennes 2000 et celle de l'O.M.S 2006 presque sur la majorité de la zone d'étude, sauf à la partie Sud où elle atteint la valeur maximale de 285.25mg/l. Elles varient de (20 à 80 mg/l) à la partie Nord-est et de (20 à 140 mg/l) au centre. La période de Mars 2007 est marquée par des teneurs qui varient de (50 à 450 mg/l) à la partie Sud-ouest dû probablement à la dissolution du gypse ($MgSO_4$) et de (50 à 500 mg/l) à la partie Nord-est peut être liés à la dissolution des dolomies ($CaMg(CO_3)_2$) du flanc Nord-est du Djebel Fedjoudj. L'abaissement des concentrations durant la période de Février 2016 du possiblement à la dilution des ions du magnésium dans le sens d'écoulement.

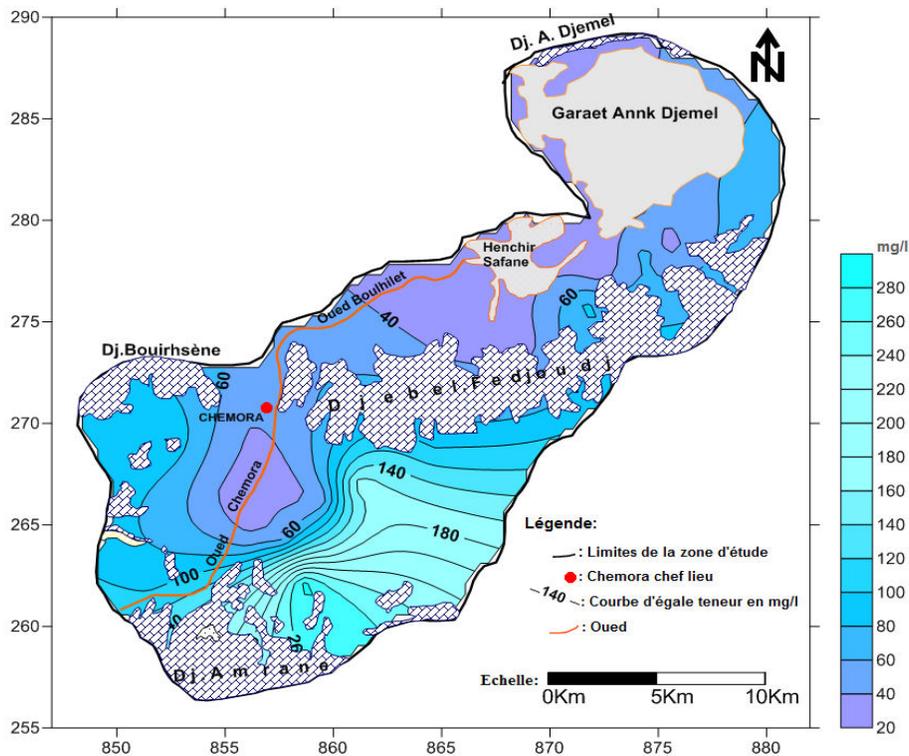


Fig. V.8. Carte de magnésium Mg^{++} (Février 2016)

C - Le $Na^+ + K^+$

Le sodium est élément, très abondant dans la nature, surtout dans l'eau de mer et provient aussi du lessivage ou de la percolation de terrains salés. Il joue un rôle important en irrigation à cause du fait de son action sur la perméabilité des sols, il est nécessaire à l'homme pour maintenir

l'équilibre hydrique de l'organisme et le fonctionnement des muscles et des nerfs. Sa présence dans les eaux potables non limité par une norme ; mais Trop de sodium a des répercussions importantes sur le système cardiovasculaire et peut provoquer ou empirer des maladies comme l'hypertension artérielle ou une insuffisance cardiaque ou rénale (Remberg, 1971).

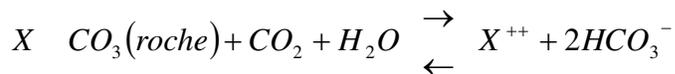
Le potassium beaucoup moins abondant que le sodium et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l. il ne représente aucun inconvénient particulier. La teneur globale de Na et de K dans l'eau est souvent estimée comme la différence entre la somme de tous les cations présents obtenus par échange ionique et la dureté.

L'examen de carte de sodium et potassium (Fig. V.9), montre que pendant la période de Février 2016 les normes, de l'O.M.S 2006 et algérienne de ces éléments sont légèrement dépassées par une teneur maximale de 212.75mg/l enregistrée à l'est du Djebel Amrane et les faibles concentrations aux parties ouest, centre et au nord-est de la zone d'étude avec un minimum de 26.56mg/l. Durant la période de Mars 2007, les teneurs oscillent entre 11.5mg/l et 983mg/l. Les faibles valeurs enregistrées aux parties ouest, centre et au nord-est. Les fortes concentrations sont relevées à l'est du Djebel Amrane, celles-ci probablement attribuées aux différents mécanismes chimiques liés à l'échange de base qui est influencé par le pompage et le sens d'écoulement.

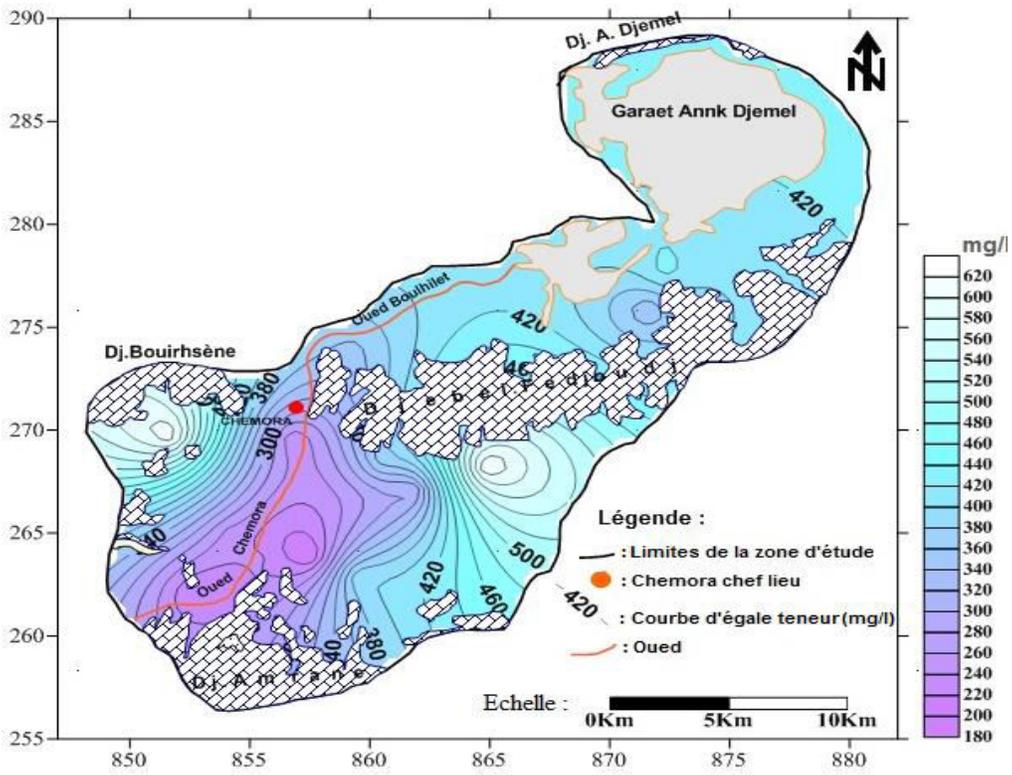
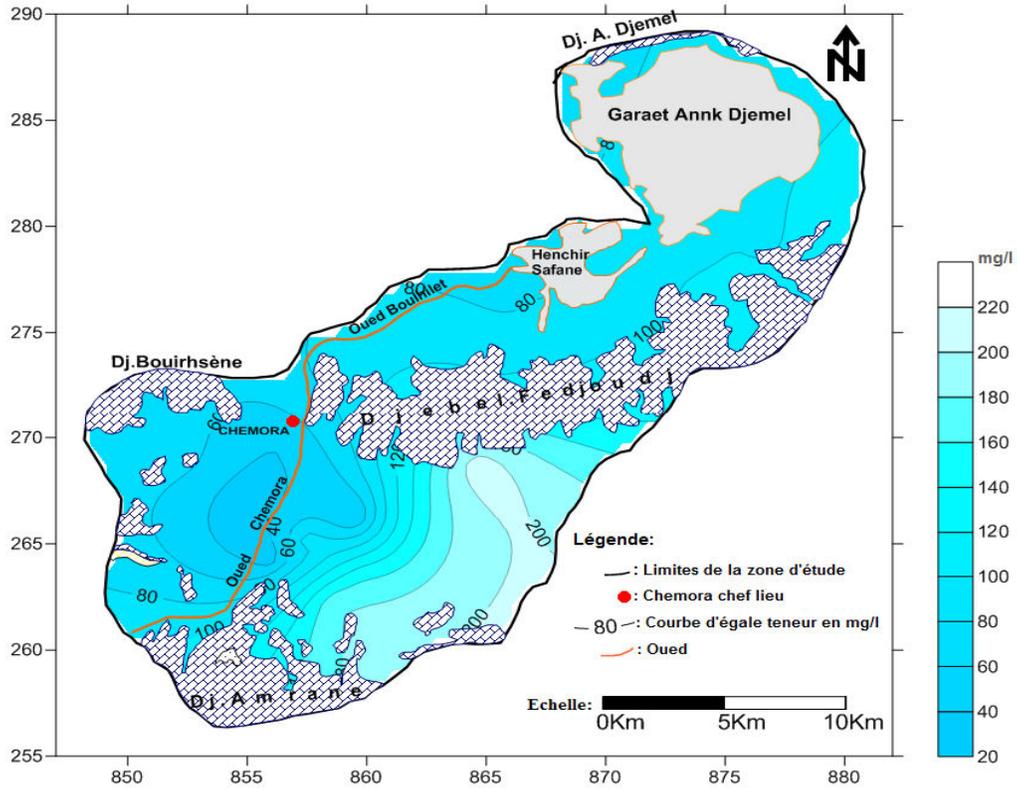
Le phénomène de l'abaissement important des concentrations durant la dernière période ne peut s'expliquer que par la dilution sous l'effet des apports d'eau souterraine.

D- Les bicarbonates HCO_3^- :

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico - chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique. Ont un double caractère acido-basique. Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO_2) selon l'équation générale suivante :



La figure. V.10 montre que Les fortes concentrations des bicarbonates sont liées à la présence des formations carbonatées, elles sont représentées par l'Aptien calcaire du Djebel Fedjoudj et Djebel Bouarif, les concentrations de l'ordre de 189.10mg/l à 622.20 mg/l pendant la période de Février 2016 et de 164.7 mg/l et 573.4 mg/l durant la période de Mars 2007. On remarque alors qu'on est en présence d'un processus de dissolution continu et plus accentué.



E- Les chlorures Cl^- :

Le chlore n'existe pas sous forme libre, mais à l'état de chlorures, comme le chlorure de sodium ou le chlorure de magnésium, dans de nombreux minéraux courants.

Les chlorures peuvent provenir d'une intrusion d'eau marine, ou suite à l'action humaine à partir du soulage des routes, ou par contamination des eaux usées. Ils peuvent provenir également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion dans les canalisations et les réservoirs. L'éloignement de la mer, et l'absence des rejets d'origine industrielle laissent supposer une origine géologique en relation avec les formations argileuses, marneuses et salifères triasiques. Dans l'eau potable, la concentration maximale acceptable est de 200 mg/l (O.M.S 2006). Une concentration élevée de Cl peut provoquer l'eczéma et l'érythème (Beaudry et Henry, 1984).

Les concentrations des chlorures pendant la période de Février 2016 (Fig. V.11), présentent des valeurs élevées à la partie Sud (flanc sud du Djebel Fedjoudj) avec une valeur maximale de 519.5 mg/l, la partie Nord-est révèle des concentrations varient de 301.75 mg/l à 463.15mg/l et les faibles concentrations sont relevées au centre et à la partie Ouest avec une valeur minimale de 71 mg/l. On constate qu'il y a un accroissement des concentrations tout en se rapprochant de Garaet (463 mg/l), ceci est dû au lessivage des terrains salés. Cependant une augmentation remarquable des apports des chlorures pendant cette période par rapport à la période de Mars 2007, surtout à la partie Sud (de 337.7 mg/l à 519.5mg/l), due probablement à la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères, liées aux apports d'eaux superficielles d'oued Chemora.

F- Les sulfates SO_4^{2-} :

Les sulfates contenus dans l'eau souterraine résultent de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'utilisation des engrais chimiques, le lessivage des terrains argileux et marneux. Elles proviennent également des eaux usées industrielles. De plus l'oxydation de H_2S et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère entraîne lors de précipitation l'acidification des lacs et des rivières, ainsi qu'une augmentation de la teneur en sulfates. La forte concentration en sulfates provoque de troubles gastro-intestinaux; aussi elles peuvent donner un goût désagréable à l'eau et créer des dépôts tenaces dans les chaudières (Beaudry et Henry, 1984).

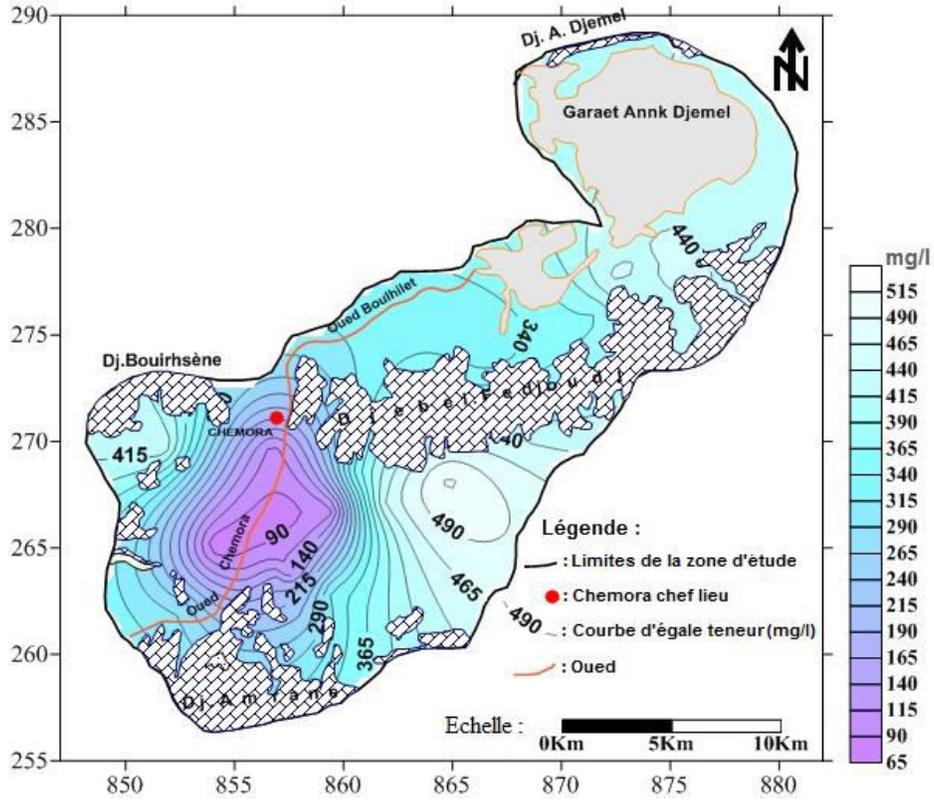


Fig. V.11. Carte des chlorures Cl⁻ (Février 2016)

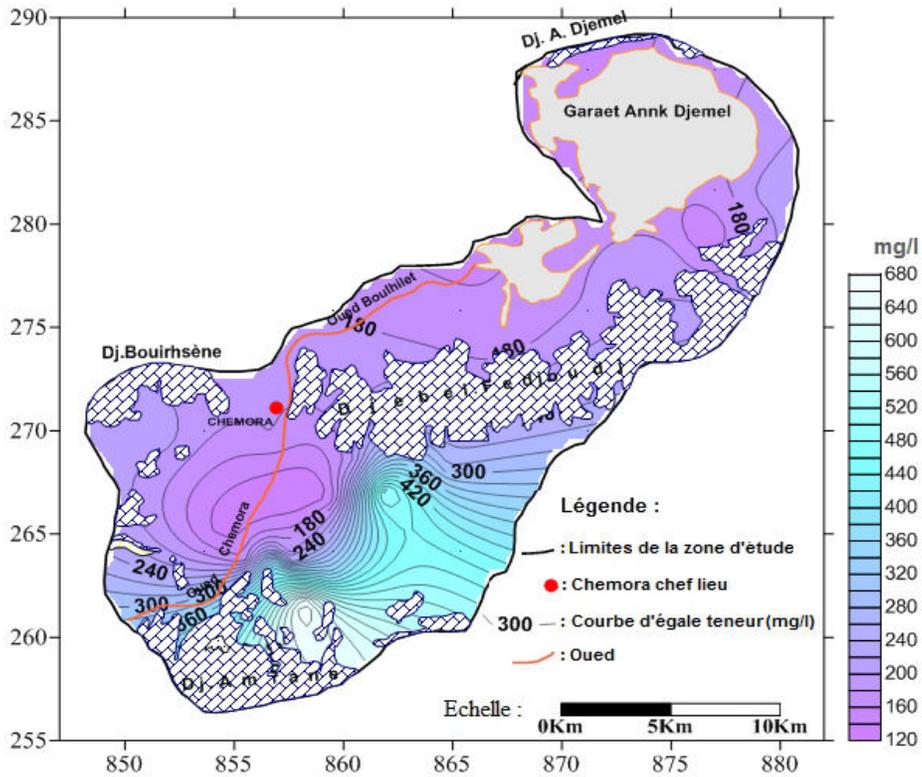


Fig. V.12. Carte des sulfates SO₄²⁻ (Février 2016)

La nappe superficielle de la région de Chemora présente des fortes concentrations en sulfates dépassants la norme (O.M.S 2006), à la partie Sud-ouest (Est du Djebel Amrane) durant la période de Février 2016 (Fig. V.12), avec un maximum de 680 mg/l. Les parties ; centre, l'Ouest et Nord-est sont caractérisés par des concentrations qui varient de 140 à 220 mg/l. La période de Mars 2007 présente des concentrations plus élevées, varient de 840 mg/l à 3660 mg/l, dues à la dissolution des marnes et des argiles appartenant à la série des alternances calcaires et marnes du Djebel Amrane. La partie Nord-est caractérisée par des concentrations croissantes en se rapprochant du Garaet, varient de 180 mg/l à 3400 mg/l. Cette répartition est toujours en liaison avec la géologie et les phénomènes d'évaporation et la surexploitation.

V.2.1.2.2- Pollution par les nitrate NO_3^-

Les nitrates (NO_3^-) sont des composés naturels présents dans l'environnement (l'eau, l'air et le sol), constituent le produit final essentiel du cycle de l'azote. Ils sont essentiels aux végétaux et améliorent le rendement, Ils entrent aussi dans la composition des engrais chimiques et naturels (fumiers). Comme ils peuvent devenir néfastes pour les plantes et les animaux s'ils sont trop abondants. Ils sont hydrosolubles et la partie non assimilée par les plantes se diffuse et s'infiltrer dans les sols pour atteindre les eaux souterraines. La présence d'un excès de nitrates dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole (engrais), urbaine (dysfonctionnement des réseaux d'assainissement) ou industrielle. Les normes algériennes et O.M.S pour les nitrates dans l'eau potable est de 50 mg /l. La consommation d'une eau présentant une concentration de nitrates supérieure à la norme mais inférieure à 100 mg /l est considérée comme temporairement acceptable, sauf pour les nourrissons et les femmes enceintes ou allaitantes. Au-delà de 100 mg/l, l'eau ne doit ni être bue ni être utilisée pour préparer les aliments. Notons que le dépassement de la norme porte un potentiellement dangereux à la santé humaine, notamment pour les bébés.

Les concentrations les plus élevées sont situées au centre de la partie Sud-ouest de la zone d'étude entre les massifs du Djebel Amrane, Djebel Fedjoudj et Djebel Bouirhsène (prolongement Est du massif de Bouarif). Il s'agit d'une zone à forte activité agricole. Ces teneurs varient entre 64 à 98.5mg/l durant la période de Février 2016 et de 46 à 116 mg/l pendant la période de Mars 2007. Ces concentrations dépassent les normes algériennes 2000 et de l'O.M.S 2006 de 50mg/l. En plus ces fortes concentrations sont liées à la nature alluvionnaire des terrains qui favorise la migration des éléments azotés vers la zone saturée sous l'effet de l'activité agricole.

Les faibles concentrations sont enregistrées dans la partie Nord et Sud-ouest, cette diminution est due à la dilution de ces dernières dans le sens de l'écoulement, ainsi qu'à la présence d'une couche argileuse de surface qui protège la nappe contre la propagation des nitrates en profondeur (Fig. V.13).

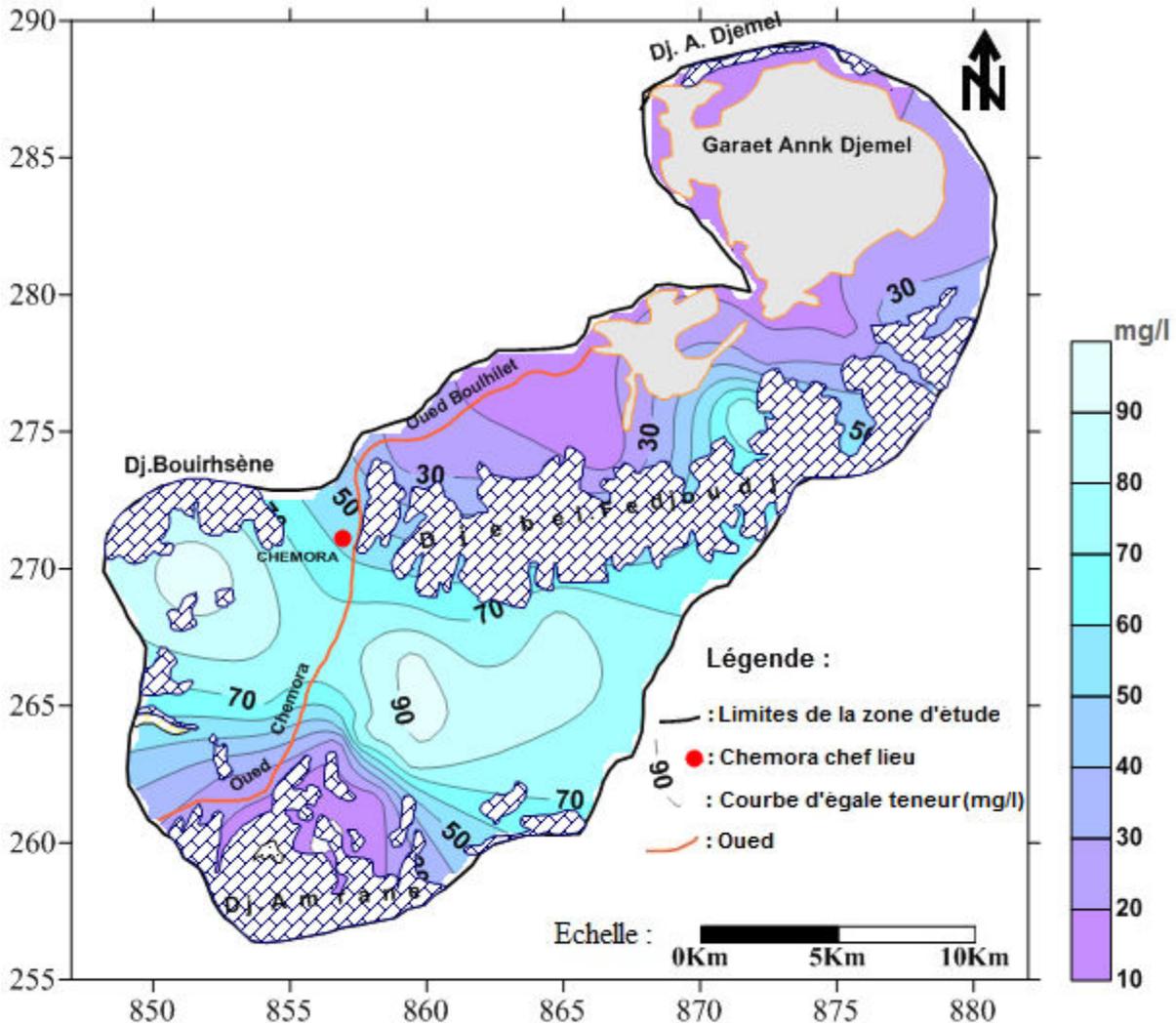


Fig. V.13. Carte des nitrates NO₃⁻ (Février 2016)

Les concentrations des nitrates peuvent être regroupées en trois classes (Tableau. V.3). Ce tableau montre que 17,39 % des points d'eau de la région possèdent des teneurs supérieures aux normes algériennes 2000 et O.M.S 2006, durant la période de Mars 2007 et 47,83% des points d'eau en Février 2016.

Tableau. V. 3. Classification des teneurs en nitrates dans la région d'étude

Compagne	Classe	Intervalle	Nombre	%	% Cumulé
Mars 2007	1	NO ₃ > 100mg/l	1	4,35	4,35
	2	50 < NO ₃ < 100mg/l	3	13,04	17,39
	3	NO ₃ < 50mg/l	19	82,61	100
Février 2016	1	NO ₃ > 100mg/l	0	0	0
	2	50 < NO ₃ < 100mg/l	11	47,83	47,83
	3	NO ₃ < 50mg/l	12	52,17	100

V.2.1.2.3 –Faciès chimique des eaux:

V.2.1.2.3.1.-Détermination

La détermination du faciès chimique des eaux et le suivi de son évolution en cours du temps ont été effectués à l'aide de diagramme de Piper pour les résultats des analyses chimiques des périodes de Mars 2007 et Février 2016. Les résultats du diagramme de Piper (Fig. V.14), permettent d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines qui présente une famille principale pendant les deux compagnes : *Chlorurée et sulfaté calcique*. Il s'agit dans la majorité des cas des *eaux chlorurées calciques* pour la période de Février 2016, résultant de la dissolution des roches carbonatées, gypsifères, argileuses, marneuses et *sulfatées-calcique* pour celle de Mars 2007, ceci est dû au lessivage des terrains argileux et marneux, de la dissolution du gypse, des formations salées et l'évaporation dans le lac, ainsi de l'utilisation des engrais chimiques.

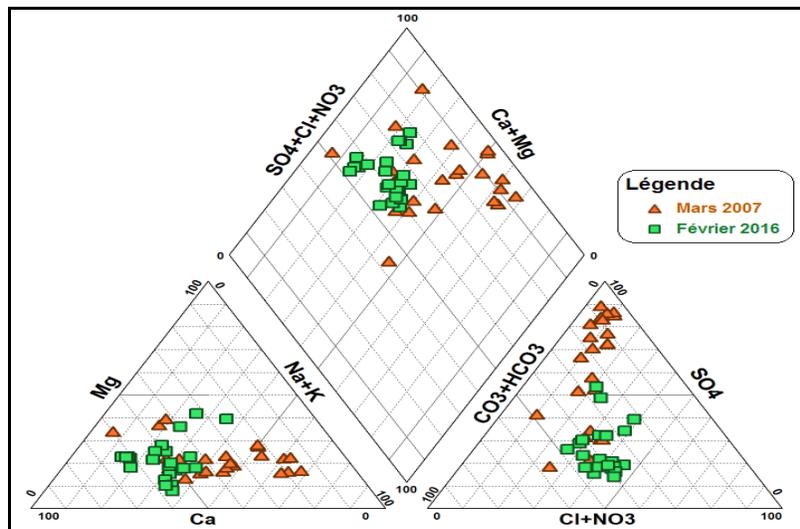


Fig. V.14. Diagramme de Piper pour les compagnes Mars 2007 et Février 2016

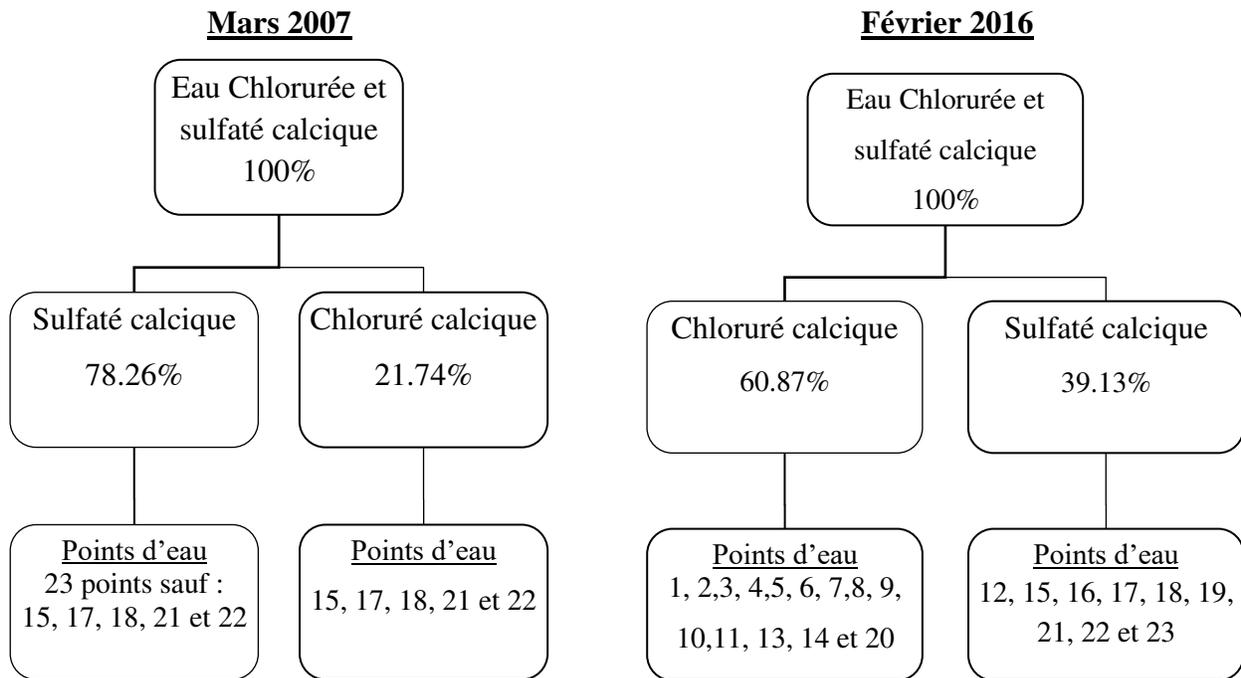


Fig. V.15. Arbres de Facies chimique des eaux Mars 2007 et Février 2016

V.2.1.2.3.2-Répartition spatiale des faciès chimiques

L'examen de la répartition spatiale des faciès chimiques montre une dominance du faciès sulfaté calcique durant la période Mars 2007 et du faciès chloruré calcique durant la période Février 2016 et suivant l'axe d'écoulement.

La répartition spatiale du faciès chimique pendant la période de Février 2016 (Fig. V.16) clustre 60.87% des points d'eau ont un faciès chloruré calcique caractérisant la zone Sud. La zone Nord est caractérisée par un faciès sulfaté calcique avec 39.13% des points d'eau, ce qui confirme à la fois la dissolution des roches carbonatées et également les formations évaporitiques du flanc nord du Djebel Fedjoudj, ainsi la contamination par les eaux usées.

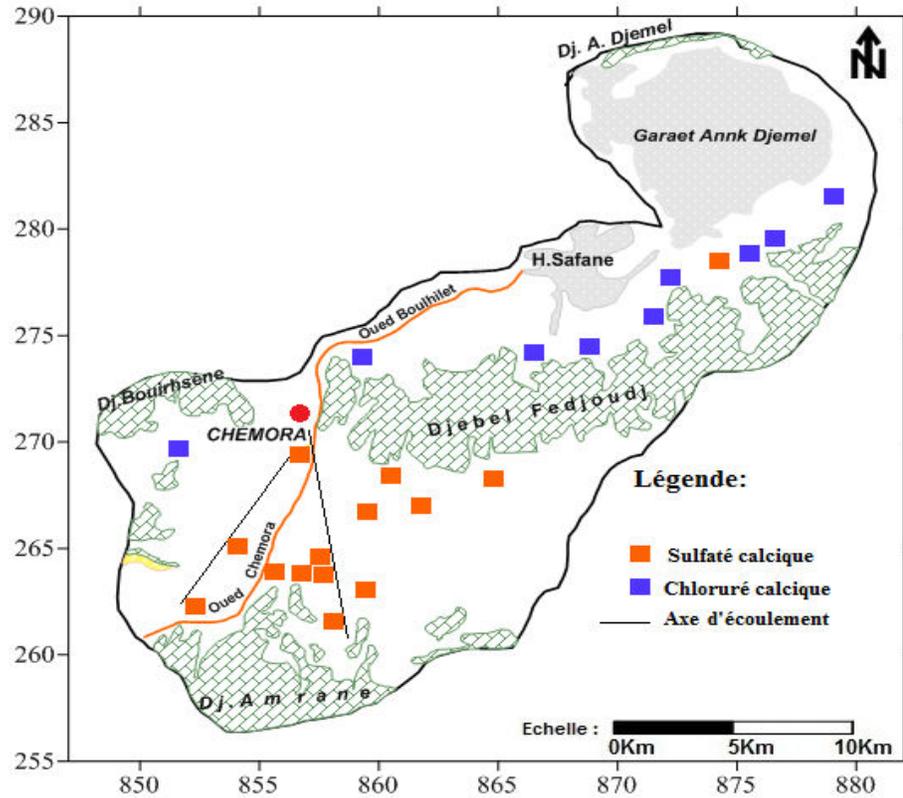


Fig. V.16-Carte des faciès chimiques Février 2016

V.2.1.2.4- Les rapports caractéristiques :

Le rapport caractéristique est le rapport de certains éléments chimiques exprimé en quantité en réaction. Ces rapports donnent de précieuses indications sur l'alimentation et le sens d'écoulement (Baali, 2007).

L'examen des graphiques des rapports caractéristiques $(SO_4/Cl)/(Ca/Mg)$ et $(Na/Ca)/(Cl/SO_4)$, (Fig. V.17 et V.18) permet de constater ; durant la campagne de Mars 2007 la dominance du faciès gypsifère avec 73.91% de la totalité des points d'eaux ont un faciès sulfaté .Alors que durant la campagne du mois de Février 2016, nous remarquons une dominance des chlorures par rapport aux sulfates, ce qui conduit à un changement du type de faciès. Nous pensons que ce changement dû à un apport supplémentaire en ions des chlorures, dû probablement à la dissolution de la halite (Faciès chloruré de 65,22% et 34.78% sulfaté) ou bien à l'alimentation de la nappe par les eaux salées du lac de sel (Garaet Ank Djemel). La recherche piézométrique a montré cela, puisque depuis l'an 2007 la nappe phréatique a gardé la même structure. Le gradient piézométrique élevé est observé au niveau de la chaîne de Fedjoudj diminué régulièrement vers le Nord et le Nord-ouest, indiquant l'importance de cette chaîne dans la

recharge des couches aquifères peu profondes. Elle indique également la présence d'une dépression piézométrique limitée entre le lac de sel et les formations de carbonate, déchargeant par Oued Boulhilet et une inversion d'écoulement du lac de sel aux eaux souterraines. Cette tendance était due possible à l'abaissement des eaux souterraines. Pendant les années humides, les lacs de sel de la région constituent une zone de décharge. Par contre en périodes sèches, et avec l'augmentation d'exploitation des eaux souterraines, il y a un abaissement de la nappe phréatique. Le secteur Est de la zone d'étude connu par l'agriculture qui tolère fortement le sel. Cette situation a mené à un déséquilibre dans le système hydrogéologique et causé une inversion d'écoulement.

V.2.1.2.5 - Origine des éléments chimiques :

Les eaux souterraines qui circulent dans la nappe alluviale de Chemora proviennent des formations carbonatées qui bordent la plaine et aussi de l'infiltration des eaux pluviales. Ensuite, elles s'écoulent dans un milieu très hétérogène (des alluvions, des sables, des graviers, des dépôts évaporitiques...etc.). Le parcours d'écoulement et les couches traversées influent sur l'acquisition des éléments chimiques. En se basant sur les mesures et les analyses chimiques trouvés, on va essayer de déterminer l'origine probable des ions de ces éléments.

V.2.1.2.5.1 - Origine du calcium (Ca^{2+}):

Le calcium tire son origine des carbonates et du gypse (carbonatée et évaporitique), comme il peut provenir des apports d'engrais azotés qui participent à la dissolution des carbonates (Boudoukha et al, 2014). La détermination de l'origine de Ca^{2+} est nécessaire pour connaître les mécanismes du chimisme de la nappe. La figure (Fig. V.19) montre que la majorité des points d'eau se trouve dans le domaine évaporitique, cela dû à la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

V.2.1.2.5.2 - Origine de Na^+ et Cl^- :

Généralement dans les eaux naturelles, la présence des deux éléments Na^+ et Cl^- est attribuée à la dissolution de la halite (NaCl). Cependant, ils peuvent avoir d'autres origines (naturelles ou anthropiques).

La représentation graphique de l'évolution du Na^+ en fonction de Cl^- (Fig. V.20) a montré que pour la période de Mars 2007, la plus part des échantillons d'eau sont placés au-dessous de la droite ($\text{Na} / \text{Cl} = 1$), indiquant l'abondance du sodium dans les eaux pendant cette période. Cela due à la dissolution de l'halite contenue dans les marnes et au phénomène d'échange de base par la libération des ions Na^+ contenus dans les argiles. Pour la période Février 2016 la majorité des

échantillons d'eau se trouvent au-dessous de la droite de pente égale à 1. Dans ce cas c'est les chlorures qui prédominent le sodium à cause d'une acquisition d'un apport supplémentaire ou d'un excès de dissolution de cet élément. Le déficit en Na est traduit par le phénomène d'échange ionique inverse entre l'eau et l'aquifère et se traduit par une adsorption du Na et une libération du Ca. Ces eaux sont contrôlées surtout par des réactions d'échange cationique de précipitation et de solubilisation du gypse et de la calcite.

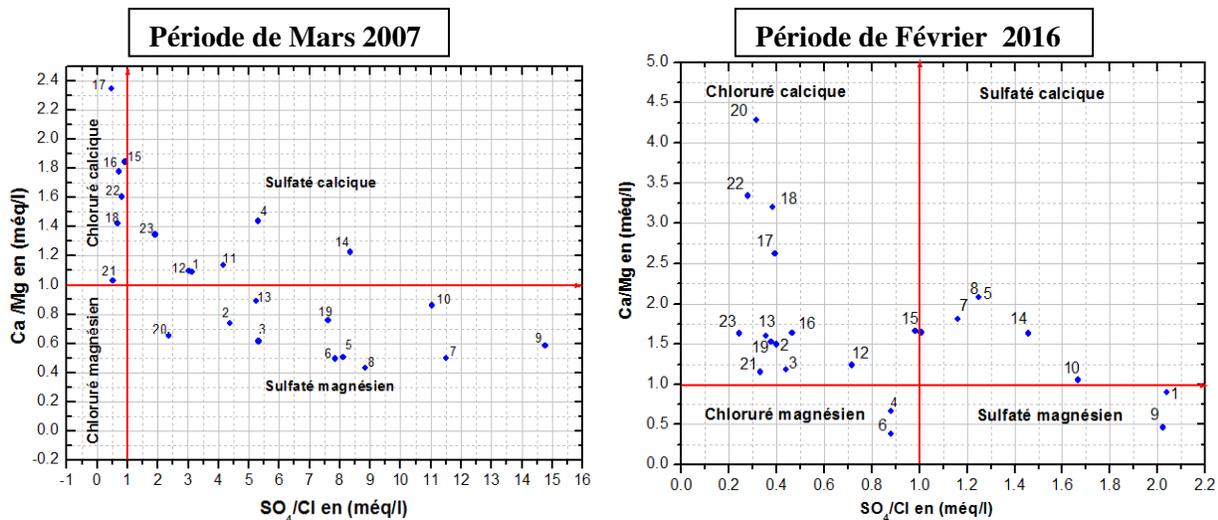


Fig. V.17. Rapport caractéristique de $(SO_4^{2-}/Cl^-) / (Ca^{2+}/Mg^{2+})$ durant les périodes (Mars et Février 2016).

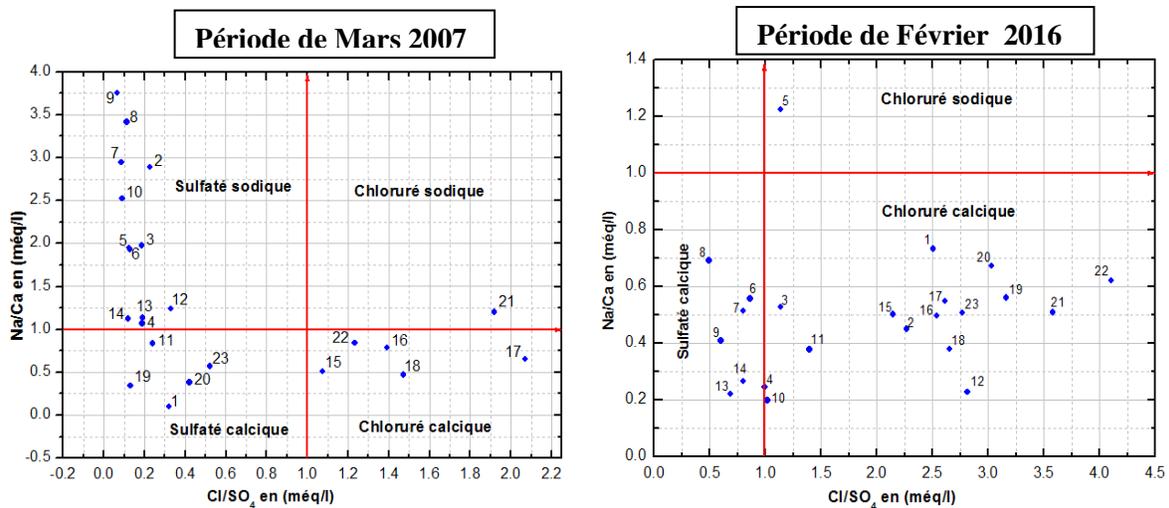


Fig. V.18. Rapport caractéristique de $(Na/Ca) / (Cl/SO_4)$ durant les périodes (Mars et Février 2016).

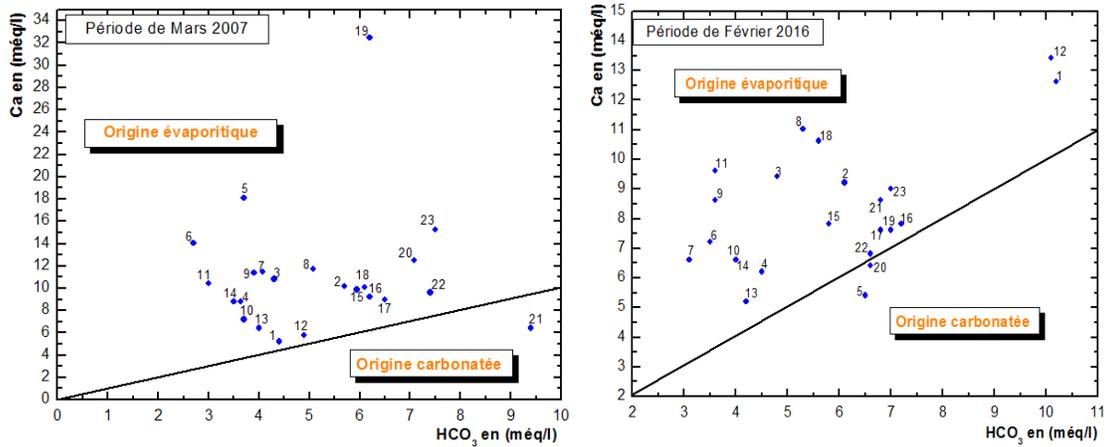


Fig. V.19. L'évolution du Ca²⁺ en fonction de HCO₃ selon la droite de pente (1 :1)

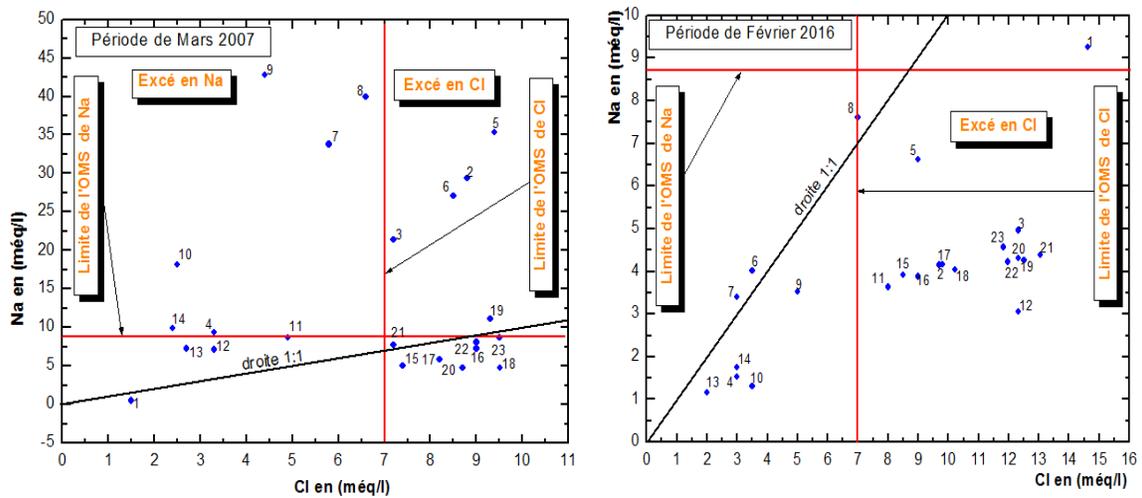


Fig. V.20. L'évolution du Na⁺ en fonction de Cl⁻ selon la droite de pente (1 :1)

V.2.1.2.6- Indices de saturation et équilibres chimiques

Pour déterminer la variation des indices de saturation de quelques minéraux spécifiques dissous dans l'eau (l'aragonite, la calcite, la dolomite, l'anhydrite, le gypse, et l'halite) et suivre les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, on a utilisé l'outil de la thermodynamique (PHREEQC).

L'examen des résultats obtenus après calcul (Annexe n°04- Fig. V.21), montre que les indices de saturation sont généralement en état d'équilibre en ce qui concerne la plupart des phases minérales carbonatés pour les trois campagnes (Mars, Juin 2007et Février 2016), sont probablement responsables de la composition hydrochimique. En ce qui concerne les phases

minérales évaporites sont sous-saturées pour les trois périodes en indiquant qu'elles se dissolvent le long du chemin d'écoulement souterrain.

-Les minéraux carbonatés présentent presque les mêmes degrés de saturation pendant les trois campagnes qui montre une tendance à l'état d'équilibre, avec l'observation de la sous saturation des eaux des points de 8 à 14 en ces minéraux pendant 2007 et cela dû à la dilution le long du chemin d'écoulement souterrain. Comme on marque la sursaturation en dolomite de 30% des échantillons analysés pendant 2007, cependant la période de Février 2016 présente 43% des échantillons analysés.

- Les minéraux évaporitiques montrent des degrés de sous-saturation pour l'ensemble des échantillons analysés durant les trois périodes. Ce qui permet aux ces éléments de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Cet aspect confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme.

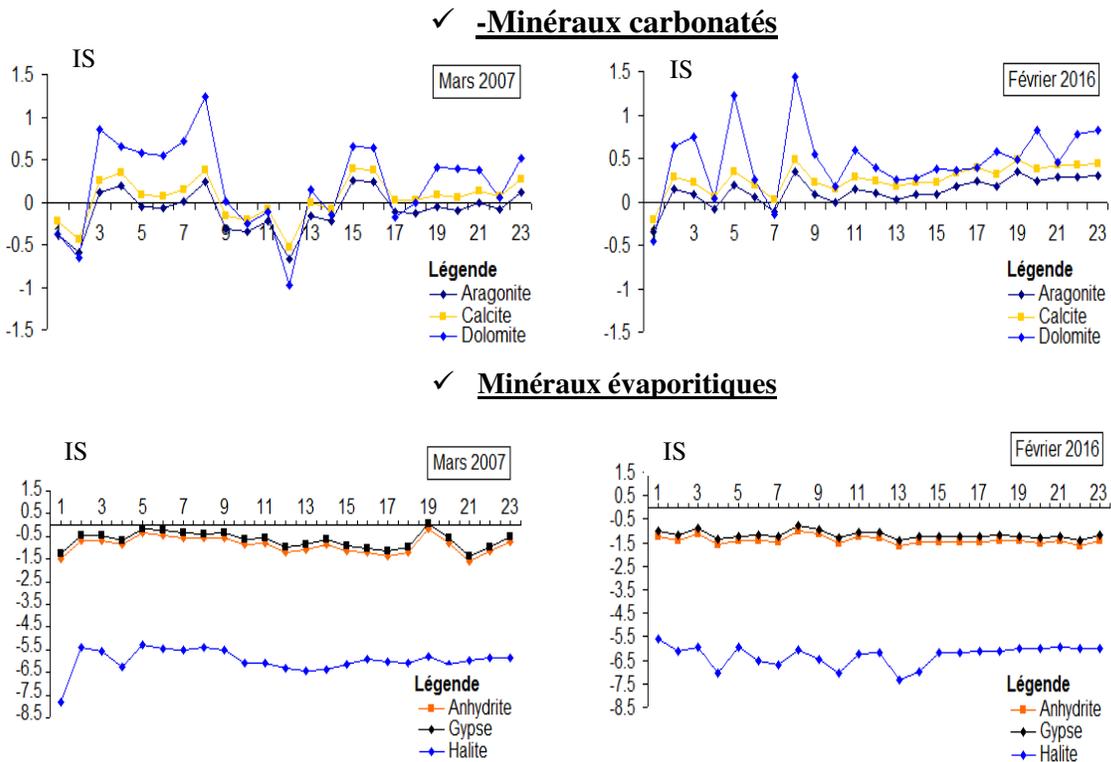


Fig. V.21. Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques

V.2.2- Analyse de la qualité des eaux par les Méthodes statistiques

V.2.2.1- Application de CAH sur les résultats d'analyses de la région de Chemora

Neuf variables hydrochimiques mesurées (CE, Ca, Mg, Na+K, Cl, SO₄, HCO₃, NO₂ et NO₃) ont été utilisées dans cette analyse pour classer en groupes composés les échantillons. Les dendrogrammes des faisceaux des variables et des échantillons analysés (Fig.V.22), donnent une classification de deux (02) groupes pour les deux campagnes de Mars 2007 et Février 2016. - Les résultats de cette classification pour la campagne de Février 2016 classent les groupes :

(G1: Ca, HCO₃, SO₄ et NO₃); (G2 : CE, Mg, Na+K, Cl et NO₂).

Le groupe 1 : est composé de 15 forages, dont 14 situés dans la zone Sud et un dans la zone Nord, représentés par les échantillons du n° 1 à n°14, plus le n°18. Ce groupe enregistre 65.22% du nombre total des échantillons d'eau, avec une valeur moyenne de conductivité de 2494.67µS/cm (CE <3000 µS/cm), qui est la caractéristique d'eau moins saline. Il est influencé par le contact des affleurements Aptiens de faciès carbonaté et gypsifères (Ca SO₄ 2H₂O), et par le lessivage des terrains argileux et marneux, ainsi par la pollution anthropique des nitrates provenant de la zone agricole.

Le groupe 2 : Le deuxième groupe est composé de 8 forages situés dans la zone Nord, représenté par les échantillons (15, 16, 17, 19, 20, 21,22 et 23) et concerne 34.78% du nombre total des échantillons d'eau, avec une valeur moyenne de conductivité de 2237.50 µS/cm. Ce groupe est situé près du lac salé où l'évaporation est intense et se caractérise par (Mg, Na+K et Cl), influencé par la pollution des eaux usées et par la salinité élevée due à la dissolution des formations évaporitiques (halite, NaCl).

La comparaison des résultats des deux périodes Février 2016 et Mars 2007, montre qu'il y a un changement dans la composition chimique des eaux par la transmutation des faciès entre le groupe 1 et 2. Où on enregistre le remplacement du faciès chloruré marqué en période de Mars 2007 dans le groupe 1 par le faciès sulfaté dans le même groupe durant Février 2016 et cela s'explique par la dissolution importante des formations carbonaté

et gypsifères, ainsi par le lessivage des terrains argileux et marneux et l'utilisation des engrais chimiques.

A son tour le groupe 2 a reconnu un changement par le remplacement du faciès sulfaté marqué pendant 2007 par le Faciès chloruré durant Février 2016, dû à la contamination par les eaux usées et également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères.

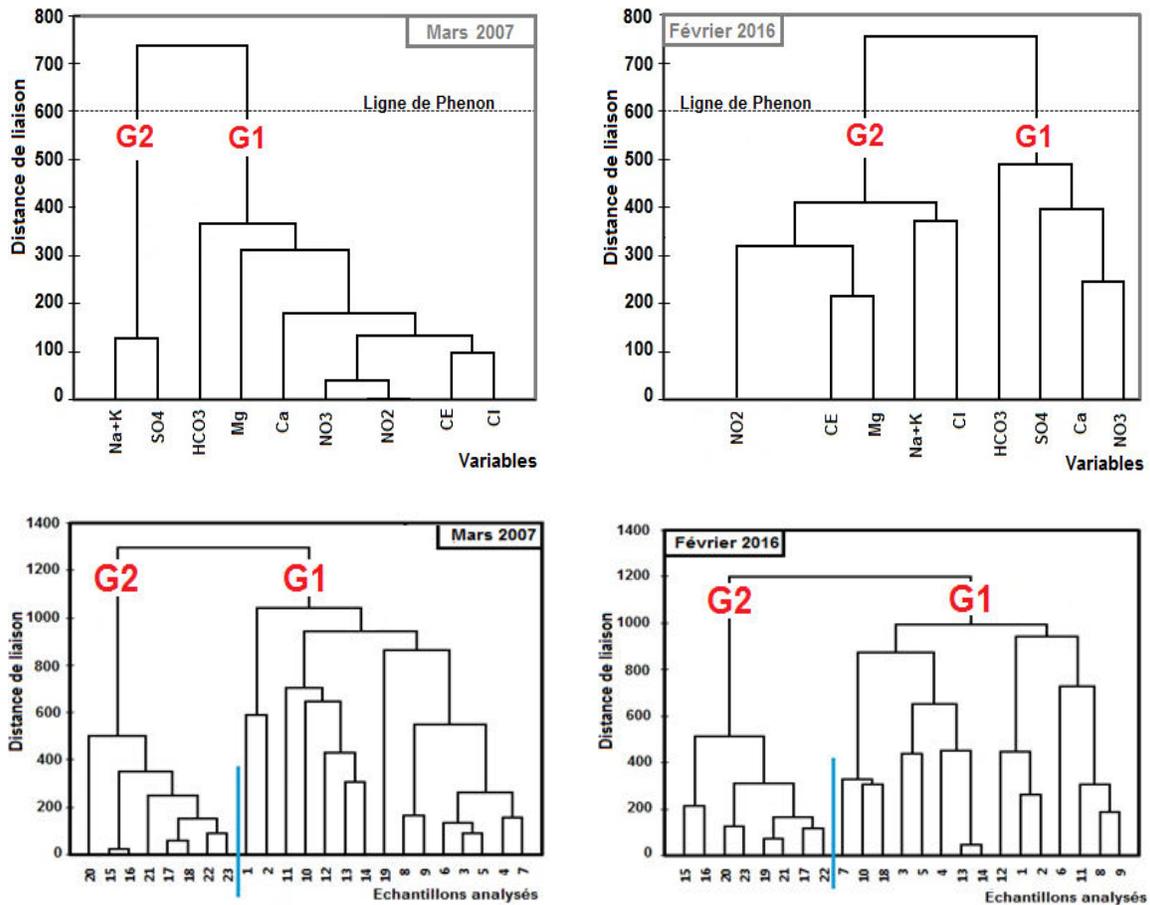


Fig. V.22. Dendrogrammes des faisceaux des variables et des échantillons analysés.

V.2.2.2- Application de l'Analyse en composantes principales :

Cette analyse a été réalisée par 23 échantillons et 09 variables dont : la conductivité électrique (CE), le Ca^{+2} , Mg^{+2} , $Na^{+}+K^{+}$, Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{-2} , NO_2^{-} et NO_3^{-}).

V.2.2.2.1- Matrice de corrélation :

La corrélation des éléments est distinguée par une matrice carrée caractérisée selon un coefficient de corrélation entre les variables, deux à deux (Degré d'association entre deux variables) (Wuersch, 2001). Les différentes corrélations entre les variables deux à deux peuvent être déterminées sur la base du coefficient de corrélation significatif (critique) tiré de la table de Bravais-Pearson en fonction du nombre d'observations et de variables mis en jeu (Lefebvre, 1988). La corrélation entre les paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines aide à comprendre certains phénomènes dégagés par l'interaction eau-roche et permet de donner une approche sur l'origine commune de certains paramètres. (Brinis et al, 2015). Du tableau. V.4, ce coefficient sera égal à $r_c = 0.53$. La matrice de corrélation a été réalisée pour l'ensemble des prélèvements d'eau analysés (Tableau. V.5) à l'aide du logiciel XLSTAT 2007.

Tableau V.4. Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson

v / e	0.1	0.05	0.02	v / e	0.1	0.05	0.02
1	0.9877	0.9969	0.9995	17	0.3887	0.4555	0.5285
2	0.9000	0.9500	0.9800	18	0.3783	0.4438	0.5155
3	0.8054	0.8783	0.9343	19	0.3687	0.4329	0.5034
4	0.7293	0.8114	0.8822	20	0.3598	0.4227	0.4921
5	0.6694	0.7545	0.8329	25	0.3233	0.3809	0.4451
6	0.6215	0.7067	0.7887	30	0.2960	0.3494	0.4093
7	0.5822	0.6664	0.7498	35	0.2746	0.3246	0.3810
8	0.5494	0.6319	0.7155	40	0.2573	0.3044	0.3578
9	0.5214	0.6021	0.6851	415	0.2428	0.2875	0.3384
10	0.4973	0.5750	0.6581	50	0.2306	0.2732	0.3218
11	0.4762	0.5529	0.6339	60	0.2108	0.2500	0.2948
12	0.4575	0.5324	0.6120	70	0.1954	0.2319	0.2737
13	0.4409	0.5139	0.5923	80	0.1829	0.2172	0.2565
14	0.4259	0.4973	0.5742	90	0.1726	0.2050	0.2422
15	0.4124	0.4821	0.5577	100	0.1638	0.1946	0.2301
16	0.4000	0.4683	0.5425				

v: le degré de liberté. $v = n-p-1$ avec n: le nombre d'observations.

p: le nombre de variables explicatives. e : le risque d'erreur.

D'après les résultats obtenus on peut distinguer selon le coefficient de corrélation des ensembles des couples dépendants et indépendants suivants (Tableau V.6).

Tableau V.5 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'aquifère de Chemora

Matrice de corrélation –Mars 2007-

Variables	CE	Ca	Mg	Na+K	HCO3	Cl	SO4	NO2	NO3
CE	1								
Ca	0.97	1							
Mg	0.89	0.87	1						
Na+K	0.19	0.12	0.48	1					
HCO3	0.15	0.04	-0.15	-0.44	1				
Cl	0.56	0.45	0.26	-0.18	0.63	1			
SO4	0.69	0.69	0.91	0.76	-0.42	0.01	1		
NO2	-0.05	-0.04	-0.28	-0.16	0.13	0.4	-0.26	1	
NO3	-0.03	-0.07	0.07	0.32	-0.4	0.01	0.24	0.21	1

Matrice de corrélation –Fév 2016-

Variables	CE	Ca	Mg	Na+K	HCO3	Cl	SO4	NO2	NO3
CE	1								
Ca	0.68	1							
Mg	0.62	0.46	1						
Na+K	0.69	0.34	0.55	1					
HCO3	0.68	0.43	-0.04	0.38	1				
Cl	0.62	0.38	-0.02	0.60	0.80	1			
SO4	0.5	0.36	0.9	0.56	-0.16	-0.08	1		
NO2	-0.09	0.12	-0.13	0.06	0.08	0.12	-0.26	1	
NO3	0.04	0.18	0.1	-0.35	-0.11	-0.37	-0.10	0.20	1

Tableau V.6 : Ensembles des couples dépendants et indépendants.

Période	Mars 2007	Février 2016	Coefficient de corrélation	Qualité de corrélation
Ensemble des couples	CE –Ca, CE-Mg Mg-SO4		> 0.90	Très bonne
	Ca- Mg	Mg-SO4	0.80-0.90	bonne
	CE- SO4 Ca -SO4 Na+K- SO4 HCO3-Cl	CE –Ca, CE-Mg CE- Na+K, CE- HCO3 CE- Cl, CE- SO4 pH- Ca, HCO3-Cl	0.60-0.80	significative
	CE-Cl pH-Na+K pH-HCO3	pH- HCO3 Na+K- Mg, Na+K- Cl Na+K- SO4	0.5-0.60	moyenne
	Couples indépendants		< 0.5	non significative

V.2.2.2.2- Etude des liaisons significatives entre les éléments physico-chimiques

L'examen de la matrice de corrélation, nous a permis d'établir les corrélations significatives entre les différents éléments. La conductivité électrique des différents échantillons, montre une bonne corrélation avec les éléments (Ca^{+2} , Mg^{+2} , $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$, Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{-2}), avec ($r > 0.53$) (Fig. V.23). Ces fortes corrélations indiquent la contribution directe de ces éléments dans la salinité des eaux souterraines (Ghodbane et al, 2016. Bouguerne et al, 2017). La relation entre Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les eaux la région de Chemora (Fig. V.24), montre une bonne corrélation entre leurs ions durant la période de Mars 2007, cela explique possiblement la dissolution de la calcite et de la dolomite présentes dans l'aquifère Quaternaire de la région de Chemora. Par contre nous remarquons une faible corrélation entre ces deux éléments en février 2016 et cela dû à l'apparition des apports supplémentaires des ions de sodium et celles des chlorures qui contribuent au changement du faciès des eaux durant cette campagne.

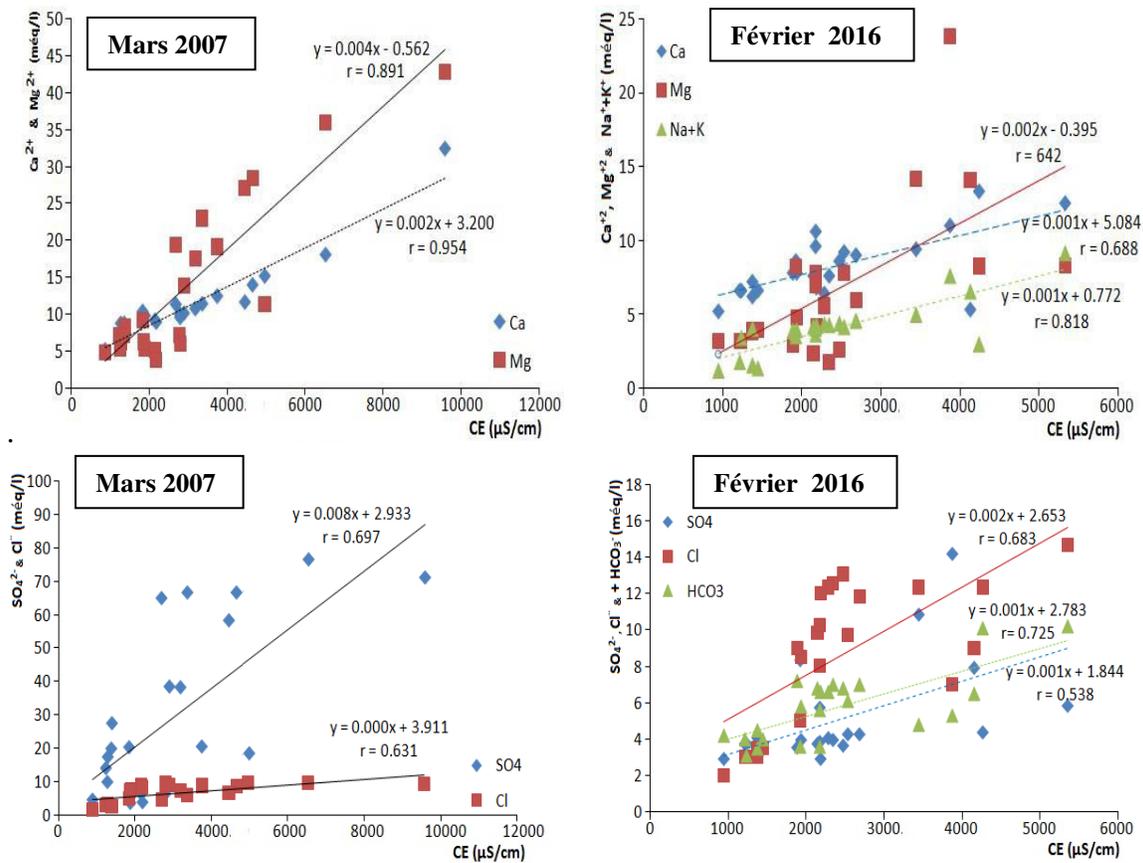


Fig. V.23. La relation significative entre la conductivité électrique et les éléments chimiques

V.2.2.2.3- Interprétation des résultats des ACP

Le critère de Kaiser ([Kaiser, 1960](#)) a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère, seulement les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données. D'après ce critère, Trois plans factoriels ont été retenues (F1, F2 et F3) avec 81,66% et 72,98% de la variance cumulée pour les données des analyses hydrochimiques de Mars 2007 et Février 2016 (Tableau. V.7), considérés corrélativement bons et peuvent être employées pour identifier les principales variations et changements dans la composition chimique de l'eau (Fig. V.26 et V.27).

L'interprétation des résultats des ACP en se basant sur le coefficient de corrélation critique de Pearson de 0.53 correspond à 5% d'erreur (Tableau V.8), montre que :

- **Le facteur 1 :**

Représente les chargements les plus élevés avec (39.92% et 37.47%) de la variance totale, notons que ces chargements sont déterminés :

- Mars 2007: Le facteur 1 est chargé positivement par (CE, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺+K⁺ et SO₄²⁻) et explique 39.92% de la variance totale.

- Février 2016: Le chargement est positivement par (CE, Ca²⁺, Na⁺+K⁺, HCO₃⁻ et Cl⁻, avec 37.47% de la variance totale, dans ce Facteur et par rapport a la période de mars 2007, on remarque un changement de la composition chimique présenté par la transmutation des sulfates par les ions Chlorurés et bicarbonatés et l'apparition des ions de magnésium. Cela dû possiblement à la dissolution de roches carbonatées et à la pollution par les eaux du rejet dans la zone Nord du secteur d'étude.

Ce facteur symbolise les éléments évaporitiques résultant de la dissolution de minerais, origine de la minéralisation élevée des eaux souterraines de la région.

- **Le facteur 2 :**

Ce facteur est caractérisé par :

- Mars 2007 : Des chargements positifs de (HCO₃⁻ et Cl⁻) et explique 28.39 % de la variance totale. Ce qui peut être expliqué par l'altération du carbonate et pourrait

- refléter l'influence des états d'équilibre d'acide-base sur la chimie des eaux souterraines.

La corrélation entre le pH et le bicarbonate est liée à l'équilibre Calco-carbonique pendant la dissolution du calcaire et de la dolomite.

- Février 2016: Des chargements positifs de (Mg^{2+} , et SO_4^{2-}), avec 20.24% de la variance totale. En cette période ce facteur est influencé par une dissolution importante des formations salifères.

- **Le facteur 3 :**

Le troisième facteur représente respectivement (13.34% et 15.27%) de la variance totale pour les trois campagnes (Mars et Février 2016).

- Mars 2007 : déterminé par un chargement positif de (NO_2^- et NO_3^-).

- Février 2016 : clustre un chargement positif unique très corrélé avec les ions des nitrates (NO_3^-).

Ce facteur est donc celui de la pollution agricole dû principalement à l'eau d'irrigation.

La projection des variables sur les espaces des plans factoriels F1, F2 et F3 (Fig. V.28 et V.29), montre une répartition des ensembles de données qui suggère une variation continue des propriétés chimiques et physiques de certains échantillons.

Les distributions de facteurs compactes la majorité des échantillons d'eau dans des groupes, suggèrent que tous les échantillons d'eau dans leurs groupes respectifs ont des caractéristiques chimiques similaires, donc les sources ou les chemins d'écoulement similaires. Si la distribution des échantillons dans l'espace du facteur est large, il peut indiquer des changements dans la chimie de l'eau due à des processus tels qu'une source de contamination, la dilution ou les changements brusques de la connectivité verticale-horizontale de l'aquifère. Par conséquent, F1, F2 et F3 sont supposés d'être représentatifs du processus d'acquisition du chimisme de l'eau lié à l'interaction eau-roche et à la pollution par l'activité agricole.

L'ACP a montrée trois groupes (G1, G2, et G3) Pour les ensembles de données. Tandis que CAH a donnée deux groupes (G1 et G2). Le troisième groupe ni qu'une spécification précise par l'ACP puisque ce groupe réellement découle du premier groupe classifié par

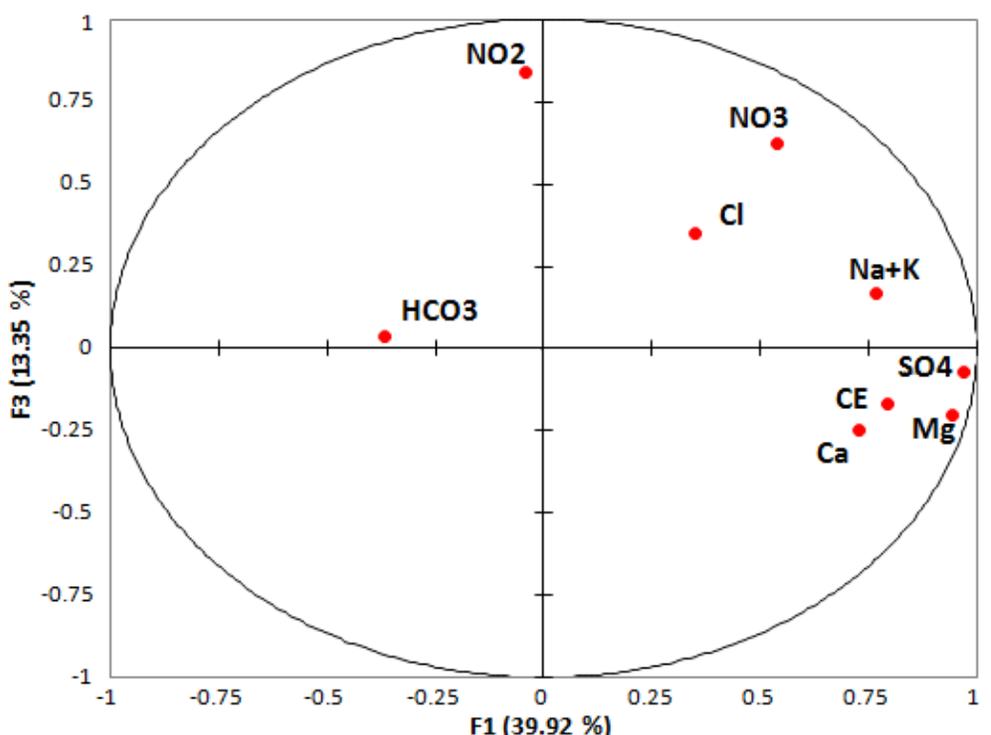
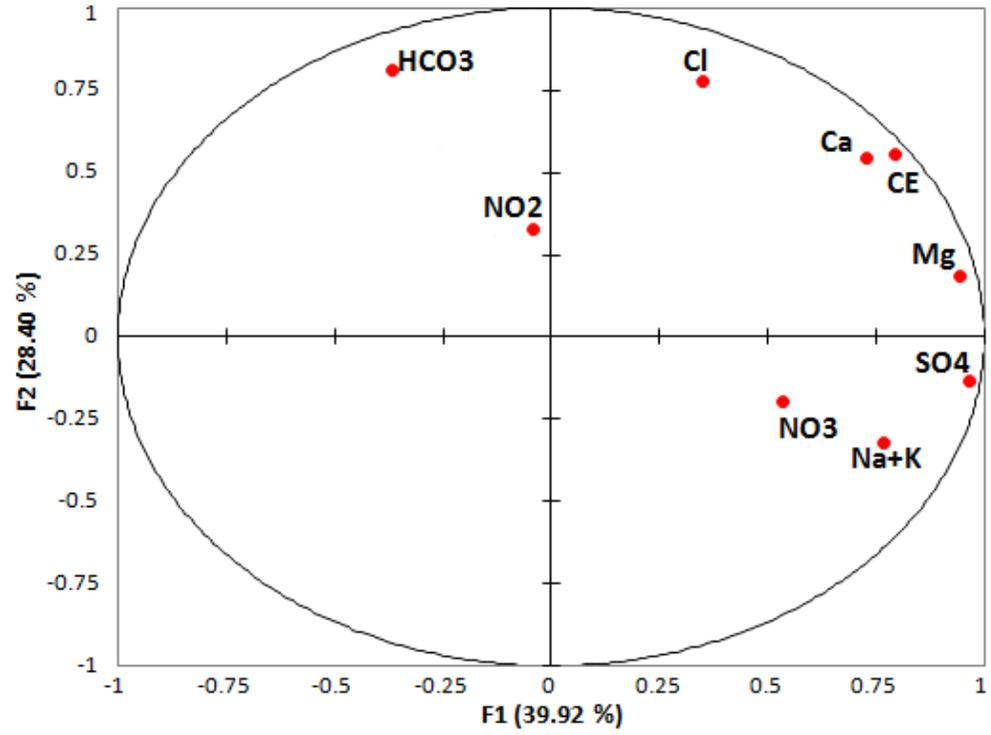


Fig. V.26. Projection des variables sur les plans factoriels – Mars 2007-

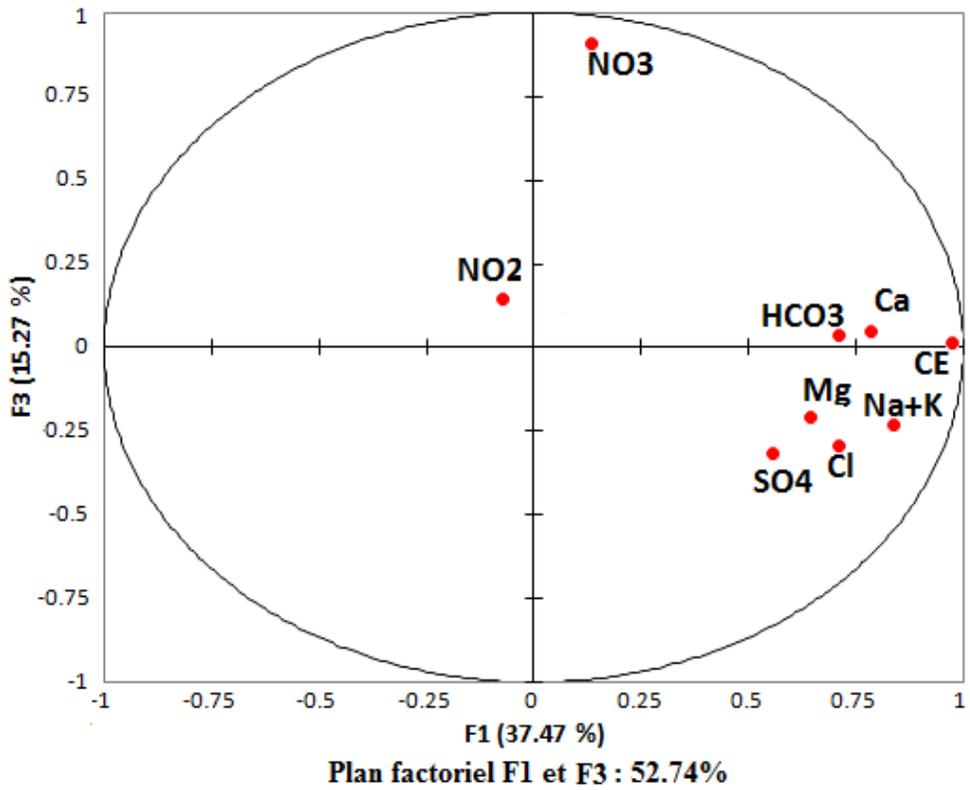
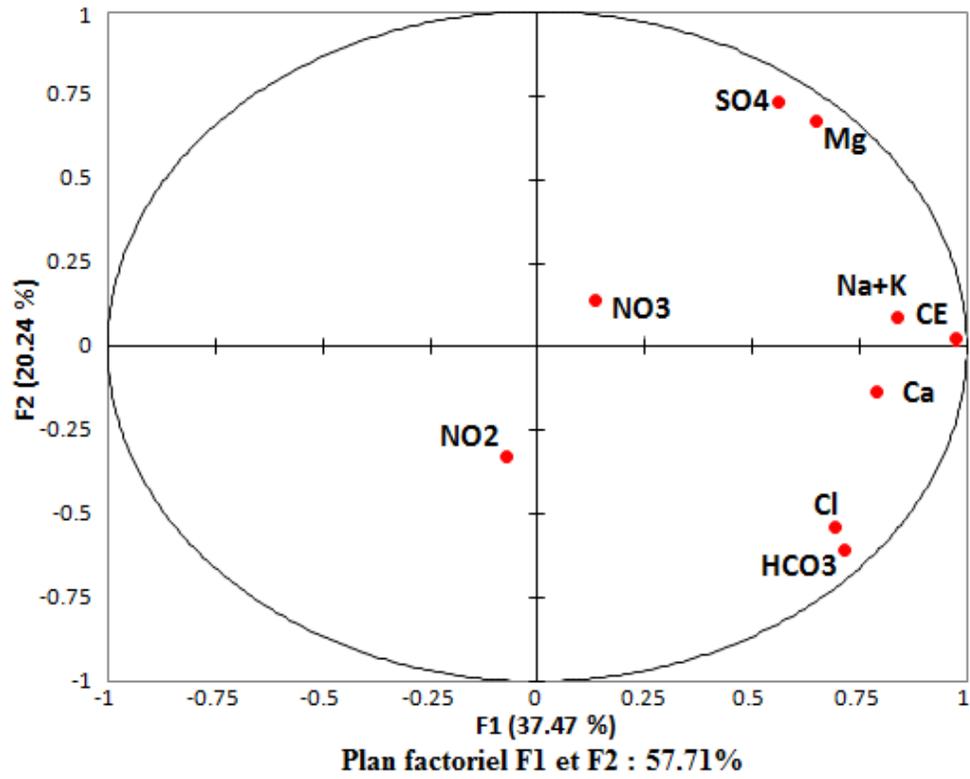


Fig. V.27. Projection des variables sur les plans factoriels – Février 2016-

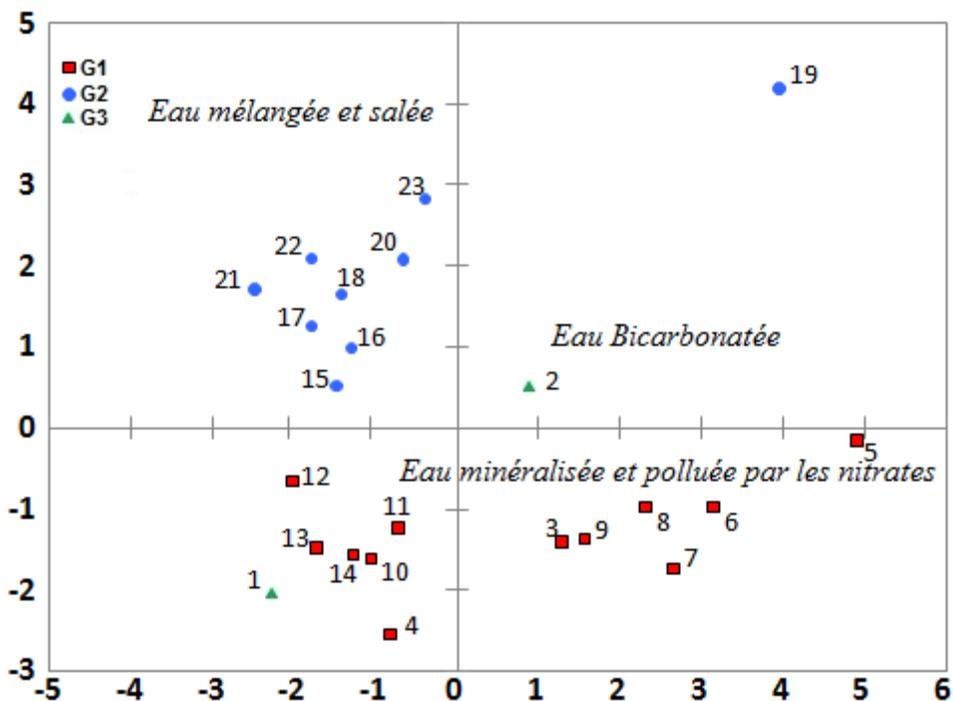


Fig. V.28. Représentation graphique des Individus. Mars 2007.

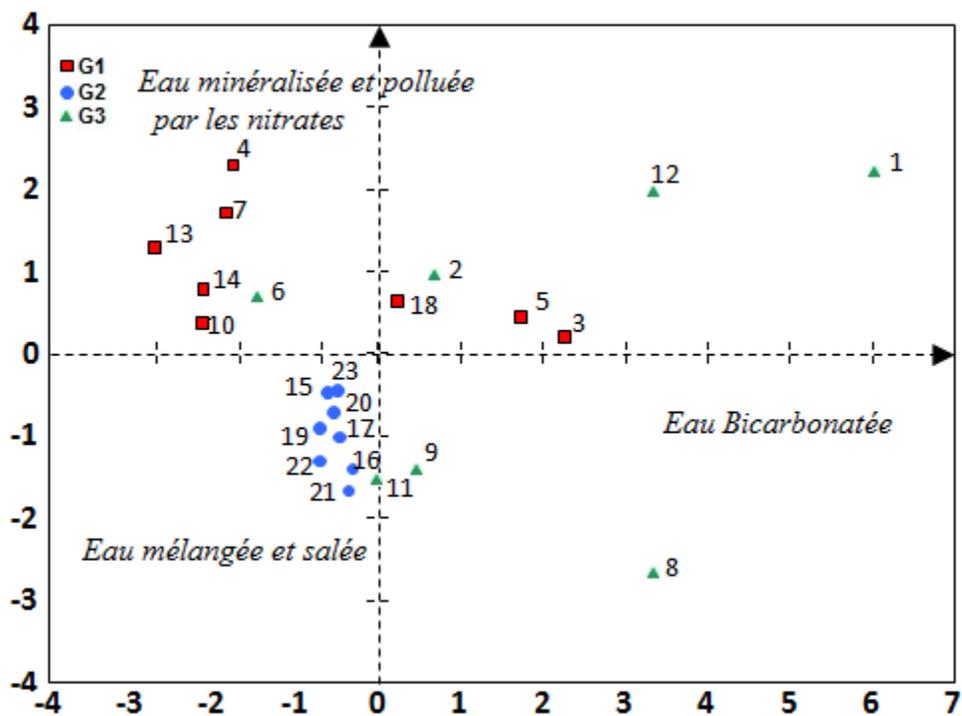


Fig. V.29. Représentation graphique des Individus. Février 2016.

La projection des individus (observations) sur le plan 1 : 2, montre l'existence de trois ensembles qui présentent des positions différentes. La partie Sud est caractérisée par une forte minéralisation influencée d'une pollution par les nitrates, due à l'utilisation anarchique des fertilisants (engrais, fumiers,...), les endroits proches des massifs bordant la plaine (G3 :1, 2, 6, 8, 9, 11,12) représentés par une minéralisation influencée par les formations carbonatées. Tandis que la partie Nord montre une forte minéralisation et Salinité croissante en se rapprochant du lac salé.

Finalement on peut constater deux zones essentielles ; la première : zone Sud touchée de la pollution par les nitrates, la deuxième : zone Nord touchée de la salinité.

V. 3- Aptitude des eaux de la région de Chemora à l'irrigation

Par sa qualité l'eau souterraine doit être destinée prioritairement à l'AEP malheureusement au niveau de région de Chemora les eaux des aquifères sont exploités anarchiquement pour l'irrigation. L'intensité des pratiques agricoles et la mise en place de nombreux systèmes d'irrigation ont provoqué un impact sur la qualité des eaux souterraines, notamment ceux de retour vers la nappe après irrigation. Le plus souvent l'irrigation est accompagnée par l'apparition de processus de sodisation, de salinisation ou d'alcalinisation des sols (Gouaidia et al, 2013, Brinis et al, 2014).

La sécheresse de la dernière décennie a engendré une forte évapotranspiration, influençant le taux de salinité des eaux. Afin d'étudier l'aptitude des eaux souterraines de la nappe alluviale à l'irrigation ou d'estimer leurs influence sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous avons utilisé les méthodes habituelles de classification de R. S. AYERS - D. W. WESTCOT.1988, Richards.1954 et Wilcox.

V.3.1- Classification et détermination du risque de sodicité et de salinité

V.3.1.1- Classification de R. S. AYERS - D. W. WESTCOT

V.3.1.1.1- Salinité :

Selon (Ayers et Westcot, 1988), quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après le prélèvement de l'eau par la plante. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau convenable pour la culture dans

le sol. Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation montrent que :

- ✓ Si, la salinité exprimée par la conductivité électrique en $\mu\text{S} / \text{cm}$ est inférieure à 700, il n'y a aucune restriction pour l'irrigation ;
- ✓ Si, la conductivité électrique varie entre 700 et 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- ✓ Et si, elle est supérieure à 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est forte.

L'examen du tableau V.9 montre que La majorité des points d'eau de la région de Chemora représentent une restriction légère à modéré pour les deux périodes, la zone Nord est caractérisée par 33,33% de points d'eau qui représentent une forte restriction pour l'irrigation en période de Mars 2007 contre 35,71% en période de Février 2016, influencée par l'accroissement graduel de la salinité on se rapprochant du lac salé (Ghodbane, 2016. Belhadj et al, 2017). Tandis que pour la zone Sud la forte restriction est représentée par 35.71% de points d'eau en de Mars 2007. L'irrigation avec les eaux chargées en sels, peut engendrer des chutes de rendements de certaines cultures, dans ce cas il est recommandé d'irriguer avec ces eaux les cultures tolérantes en sels, de pratiquer des cultures sur les sols légers (sableux), de faire des apports d'eau supplémentaire et un drainage.

Tableau V.9: Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation

Zone	Restriction pour l'irrigation	CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$	Pourcentage des échantillons (%)	
			Mars 2007	Février 2016
Zone Nord	Aucune	< 700	0	0
	Légère à modéré	700 – 3000	66.67	64.29
	Forte	> 3000	33.33	35.71
Zone Sud	Aucune	< 700	0	0
	Légère à modéré	700 – 3000	64.29	100
	Forte	> 3000	35.71	0

V.3.1.1.2- Sodicité :

L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer une destruction de la structure du sol, lorsque la concentration des ions Na^+   l'état soluble dans le sol est

importante, ces ions remplacent fréquemment les ions Ca^{++} dans le complexe absorbant. Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est donné par la formule ci-dessous :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{++}Mg^{++})/2}} \quad \text{Où : Na, Ca et Mg sont exprimés en méq/l.}$$

V.3.1.2- Classification de Richard

Le report des valeurs du SAR en fonction de la conductivité électrique de l'eau sur le diagramme de Richard (Fig. V.30) nous a permis de distinguer trois classes selon le degré de salinité: admissible, médiocre et mauvaise dont chaque classe présente ses propres caractéristiques. Le tableau V.11 donne les résultats d'interprétation des diagrammes et permet de localiser les types d'eau et les variétés de cultures utilisées.

Tableau V.10 : Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Richards

Classes	Période		% points d'eau	
	Mars 2007 (1)	Fév. 2016 (2)	(1)	(2)
Excellente	/	/	/	/
Bonne	/	/	/	/
Admissible	C3-S1, C3-S2	C3-S1	47.83	47.83
Médiocre	C4-S1	C4-S1	17.39	47.82
Mauvaise	C4-S2, C4-S3, C5-S2	C5-S1	34.78	04.35
Caractéristiques :				
C3-S1, C3-S2	Eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur sol ayant une bonne perméabilité			
C4-S1	Eau convenant à l'irrigation de certaines espèces de cultures bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés.			
C4-S2, C4-S3, C5-S1, C5-S2	Eau est ne peut être utilisé pour l'irrigation et pour certaines espèces bien tolérantes au sel qu'après drainage et lessivage des sols.			

V.3.1.3- Classification de Wilcox

La classification de Wilcox est déterminée par la représentation du pourcentage de sodium absorbé par l'eau en fonction de la conductivité sur le diagramme de Wilcox, définit cinq classes d'eau : Excellente – Bonne – Admissible- Médiocre - Mauvaise. Généralement cette classification connue en pourcentage du sodium, est définie par la relation :

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

Où tous les éléments sont exprimés en méq/l.

Les Résultats de l'interprétation des diagrammes de Wilcox pour les deux périodes Mars 2007 et Février 2016 (Fig. V.31), rapportés dans le tableau V.11, montrent que la majorité des points d'eau ont une qualité médiocre à mauvaise.

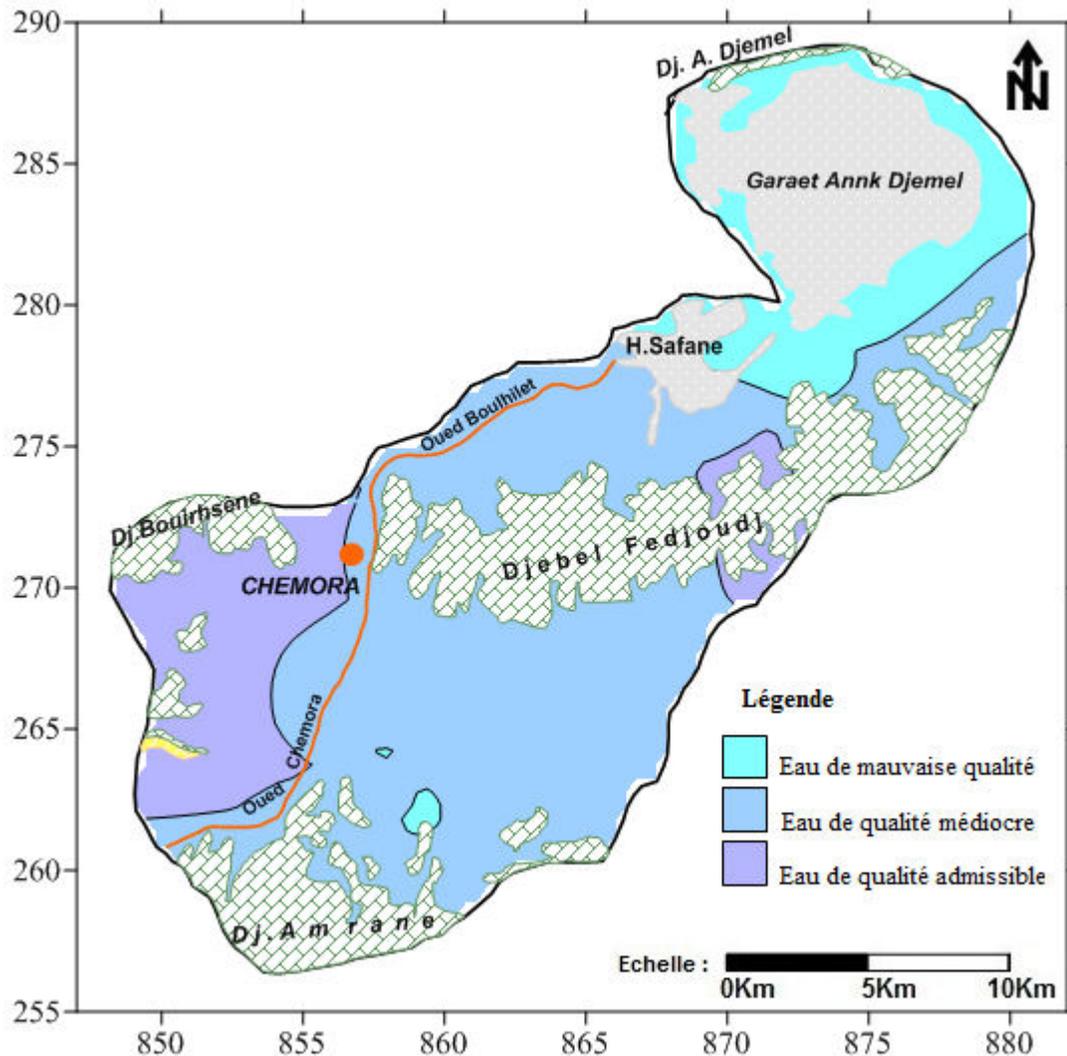
Tableau V.11 : Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Wilcox

Classes	% des points d'eau	
	Mars 2007	Février 2016
Excellente	/	/
Bonne	34.78	47.82
Admissible	4.35	/
Médiocre	26.09	26.09
Mauvaise	34.78	26.09

Pour connaître la répartition de la qualité des eaux selon leurs classes d'aptitude à l'irrigation, nous avons cartographié des cartes d'aptitude des eaux à l'irrigation pour chaque diagramme (Richard et Wilcox) pour la période de Février 2016). (Fig. V.32 et Fig. V.33).

✓ Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richard (Février 2016)

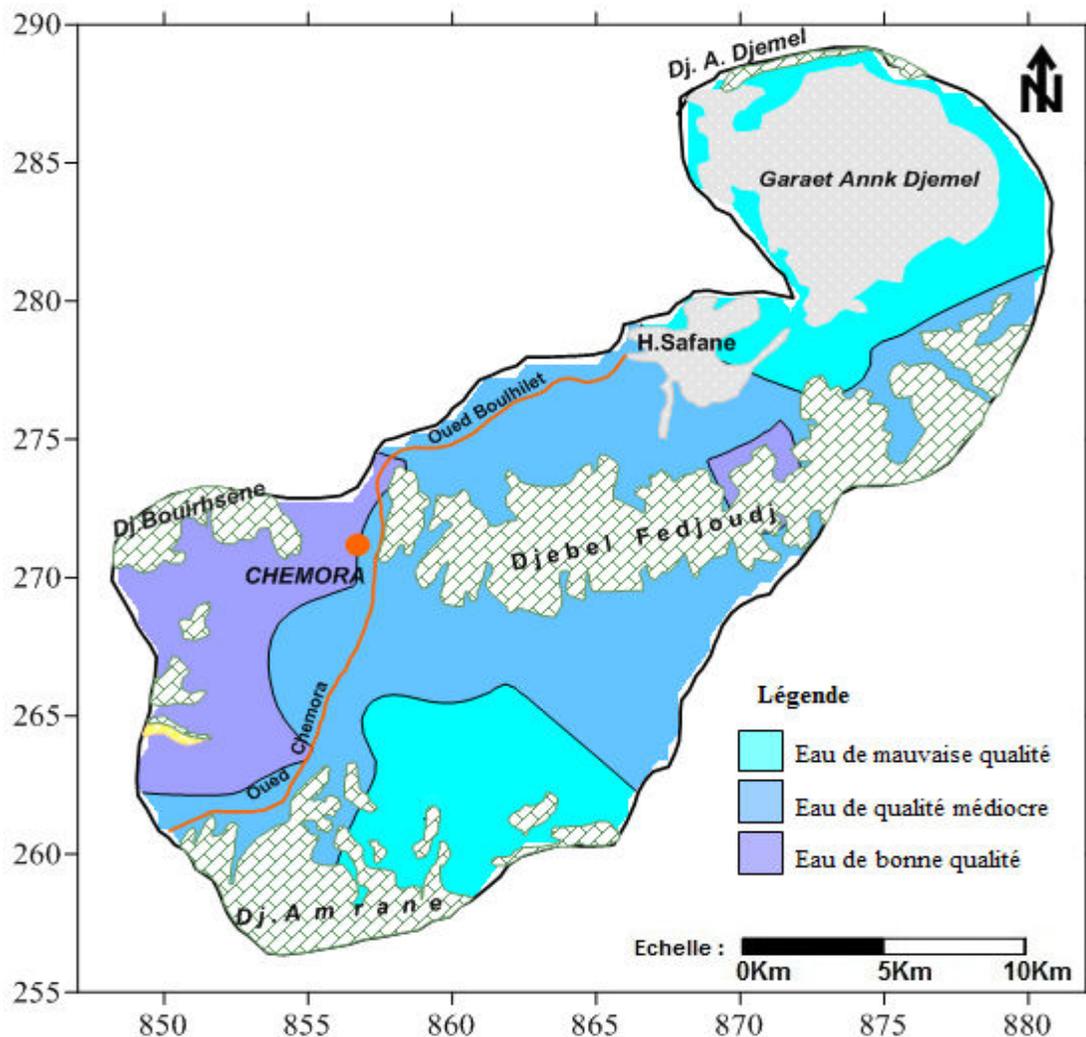
L'examen de la carte (Fig. V.32) montre que les eaux de qualité admissible sont localisées à la partie Ouest aux bords des massifs de Dj. Bouirhsène (prolongement Est du Dj. Bouarif) et à Sud-est aux bords des massifs de Dj. Fedjoudj. Celles de qualité médiocre se localisent au centre et au Sud de la zone d'étude. Tandis que celles de qualité mauvaise occupent la partie Nord-est en relation avec le lac salé et l'extrême Sud-ouest à l'Est du Dj. Amane influencées par nature des formations.



**Fig. V.32- Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richard.
Février 2016.**

✓ **Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox
Février 2016**

L'observation de la carte (Fig. V.33) d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox confirme les constatations de la première carte (Fig. V.32). Les eaux de la bonne qualité se trouvent aux parties Ouest et l'Est de la zone d'étude, aux bords des massifs à l'est du Dj. Dj.Buirhsène et au Nord du Dj. Fedjoudj. Celles de qualité médiocre se localisent au centre et au Sud-ouest. Cependant celles de qualité mauvaise occupent la partie Nord-est en relation avec le lac salé et l'extrême Sud à l'Est du Dj.Amane.



**Fig. V.33 - Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox
(Février 2016)**

Pendant la durée d'observation une dégradation de la qualité des eaux, a été remarquée, surtout au sud et au Nord-est du terrain. Cette dégradation est due essentiellement à l'hétérogénéité dans les formations (alluvions, argiles, sables, grès et les évaporites riches en Cl, Na, SO₄ et Ca) composant l'aquifère de la région de Chemora qui favorise la minéralisation, à l'irrégularité de la pluviométrie, ce qui ne favorise pas le phénomène de dilution, aux températures élevées qui engendre une forte évapotranspiration et par conséquent une augmentation de la salinité qui peut expliquer la dégradation de la qualité des eaux (Ghodbane et al, 2016).

V.4- Potabilité des eaux

Les eaux destinées à la consommation humaine doivent être dépourvues de tout agent polluant et d'impureté. Et répondre aux critères de potabilité (normes) définies par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) et les services de la santé publique, fixant les seuils des valeurs et les concentrations des éléments physico-chimiques composant l'eau potable.

La qualité chimique des eaux est déterminée en utilisant d'une part les normes Algériennes 2000 et celles de l'O.M.S 2006 et d'autre part le Degré Hydrotimétrique (D.H.T).

V.4.1 - Normes Algériennes 2000 et O.M.S 2006

L'examen du tableau V.12 montre que, le calcium représente 47.83% et 86.96% des échantillons d'eau pour les deux périodes (Mars 2006 et Février 2016) ont des teneurs en Ca⁺ inférieures aux normes (Algériennes 2000 et O.M.S 2006), on remarque un abaissement des concentrations de cet élément durant la période de Février 2016, du probablement à la diminution des apports de ce dernier.

Le magnésium représente 60.87% et 91.30% des eaux ont des teneurs inférieures aux normes (diminution des apports de Mg⁺ durant la période de Février 2016).

Les chlorures montrent (43.48% à 34,78%) des eaux ont des teneurs inférieures aux normes durant les deux périodes, c.à.d. que la majorité des échantillons ont des teneurs supérieures aux normes pour les deux périodes. Cet élément reconnu une légère

augmentation des concentrations pendant Février 2016, cela du possiblement à la pollution par les eaux usées rejetées dans la zone Nord.

Les sulfates représentent 8.7 à 73.91 des eaux ont des teneurs inférieures aux normes. Ce qui signifie que la majorité des échantillons ont des teneurs supérieures aux normes pour cet élément durant la période de Mars 2007.

Les nitrates montrent 82.61% et 52.17% des échantillons d'eau pour les deux périodes (Mars 2006 et Février 2016) ont des teneurs en NO_3^- inférieures aux normes. On remarque une augmentation des concentrations pendant Février 2016, cela dû à la pollution par les eaux d'irrigation dans la zone Sud.

Tableau V12- Normes de potabilité de l'O.M.S.2006 et Algériennes 2000

Eléments chimiques	valeurs guides (mg/l)		Pourcentage des échantillons ayant une concentration inférieure aux valeurs guides (en %)		
	Normes (O.M.S 2006)	Normes Algériennes 2000	Mars 2007	Evolution	Février 2016
Calcium	200	200	47.83		86.96
Magnésium	150	150	60.87		91.30
Chlorures	250	200	43.48		34.78
Sulfates	250	200	8.70		73.91
Nitrates	50	50	82.61		52.17

V. 4.2- Degré hydrotimétrique total (D.H.T) :

Le degré hydrotimétrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium.

$$DHT = rCa^{++} + rMg^{++} \quad (\text{en méq/l})$$

$$DHT = (rCa^{++} + rMg^{++}) \times 5 \quad (\text{en degré Français } ^\circ F)$$

Le tableau V.14 montre que la quasi-totalité des eaux analysées sont très dures pour les trois périodes, avec un D.H.T supérieur à 54 °F. Cette dureté a des conséquences plus ou moins néfastes telles que la consommation excessive du savon et la mauvaise cuisson des légumes secs. Nous pouvons dire que la majorité des eaux souterraines de notre région d'étude sont de qualité chimique médiocre à mauvaise, donc impropre à la consommation.

Tableau V.13: Dureté des eaux en (Théobald et Gama, 1969)

D.H.T (en °F)		0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Qualification de l'eau		Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
Pourcentage des points	Mars 2007	/	/	/	4.35	95.65
	Février 2016	/	/	/	34.78	65.22

V.5-Impact de la pollution par les nitrates.

L'eau, au cours de son parcours dans le sol ou dans les rivières, se charge de différents polluants d'origine naturelle ou humaine (urbaine, agricole et industrielle), qui devraient être traités ou éliminés avant que l'eau ne soit distribuée à la population. L'évacuation des eaux usées et des eaux de surface devient de plus en plus délicate au fur et à mesure du développement des villes. Une grande partie de la population se répartie le long des oueds et dans les plaines alluviales, leurs eaux usées sont directement rejetées dans les oueds sans aucun traitement, qui participent fortement au changement de la qualité des eaux souterraines (Abdelbaki et al, 2007). Notez que les habitants en zones rurales utilisent des fosses septiques non conformes aux normes et les oueds comme exutoires à ces rejets. Les rejets ménagers constituent donc une autre forme de pollution qui peut entraîner de nombreuses pollutions et dangers en portant atteinte à la qualité des eaux superficielles et souterraines par infiltration, à la qualité de l'air et à l'esthétique du milieu. Dans le cas d'une nappe alluviale dont la recharge s'effectue principalement par l'infiltration et la percolation de l'eau à travers la zone non saturée, les fuites de nitrate sous les parcelles agricoles influencent donc significativement les concentrations en nitrate de la nappe (Guillaume, 2010).

V.5.1- Schéma éventuel des polluants de différentes origines rencontrés dans l'eau

La pollution des eaux souterraines est liée à deux origines, naturelle et anthropique (Fig .V.34).

L'origine naturelle comprend deux types de pollution, une par les produits minéraux sous forme dissoute (Sulfates, Chlorures, ...) ou en suspension (Calcaires, argile,...) et organiques (humus, reste des plantes, animaux et insectes mortes,...), parfois enregistrée par la forte érosion des terrains lors des précipitations torrentielles, le faible couvert végétal et la grande surface agricole (Boudoukha et al, 2014). L'autre par les polluants microbiologiques comme les bactéries, les virus et autres (Prion,...).

L'origine anthropique comprend aussi deux types de pollution microbiologique et chimique de sources urbaine (rejets domestiques solides et liquides – organiques et sels-), agricole (lessivage des sols, composés azotés - nitrates, phosphate, pesticides,...), rejets des unités industrielles (organiques, sels et toxiques) et accidentelles (fuites des produits toxiques).

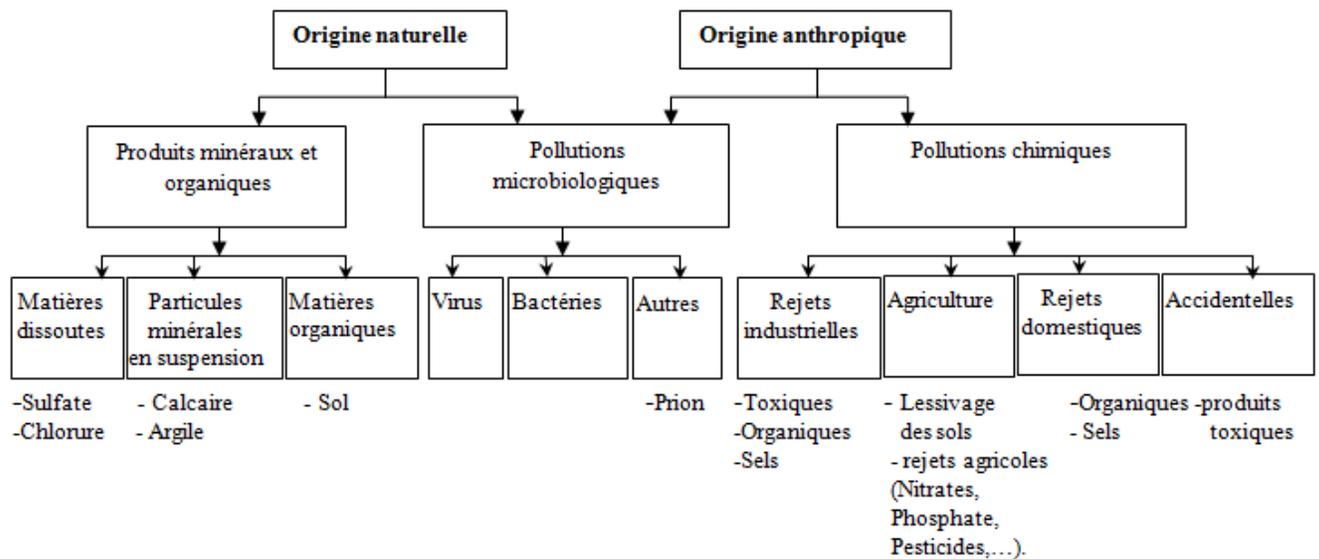


Fig. V.34- Schéma éventuel des polluants de différentes origines rencontrés dans l'eau

V.5.2 -Le transfert des polluants du sol vers les eaux souterraines

L'état des nappes dépend du contexte hydrogéologique et des activités de surface actuelles ou passées. Les eaux souterraines ne sont pas durablement et faiblement protégées contre les apports de matières polluantes. C'est en particulier le cas lorsque ces apports sont massifs, durables et concentrés. Le sous-sol hérite de ce qui se passe en surface et par conséquent, les eaux souterraines héritent des pollutions du passé.

La connaissance des transferts éventuels des polluants du sol vers les eaux souterraines est évidemment fondamentale pour assurer la protection durable de la ressource en eau.

La dégradation -mal mesurée mais bien connue- des eaux souterraines et l'amélioration des connaissances sur les mécanismes de transfert conduisent à avoir une vision plutôt défaitiste (Fig.V.35). Le sol, entre la surface et la nappe est un « filtre vivant » imparfait. La migration des polluants vers les nappes est avérée.

Les modalités et temps de transfert des polluants sont très variables selon les types de polluants, selon les sols et font appel à trois processus distincts : les caractéristiques des sols et leur humidité, les réactions chimiques des molécules avec l'eau et le milieu, l'activité microbienne. Ainsi, une nappe peut être protégée pour un type de pollution et pas contre une autre. Les différents mécanismes sont résumés dans le tableau V.14.

Tableau V.14 : Typologie des transferts de polluants dans les eaux souterraines

	Sol superficiel	Zone non saturée	Nappe
Vitesse des transferts liée à :	-végétation - micro-organismes - humidité	-structure du sol - porosité - humidité - transport colloïdal	-nature de la roche, - micro porosité
Transformation liée à :	-transformation biologique ; action des bactéries	-transformation chimique abiotique - dissolution/précipitation /oxydation	-transformation chimique abiotique - dissolution/précipitation /oxydation

Ces mécanismes de transfert constituent une difficulté pour la bonne connaissance des processus de filtration. Outre les difficultés d'étude dans chaque discipline (pédologie, chimie, microbiologie).Malgré ces difficultés, une bonne connaissance des mécanismes de transfert est fondamentale pour aider les décideurs à préserver de façon durable la ressource d'eau souterraine et à effectuer les arbitrages qui s'imposent : étendue des périmètres de protection, nature des changements éventuels dans les pratiques agricoles à mettre en œuvre, éventuellement sélection de sites à geler pour la protection des nappes...etc. Les choix sont ouverts, il est clair que le passage lent dans le sol constitue une filtration naturelle mais souvent insuffisante pour éliminer les éventuelles pollutions de surface (Miquel, 2003).

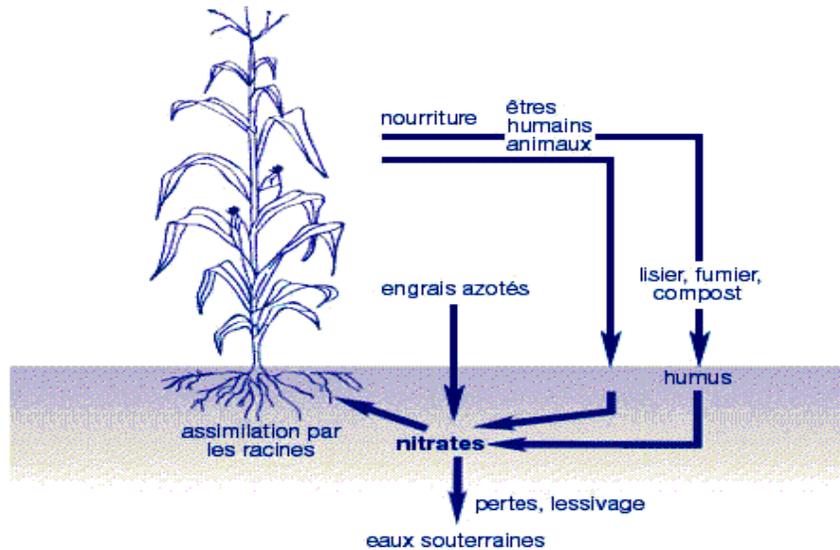


Fig. V.35-Mécanisme de la pollution de l'eau par les nitrates (Julien, 2003).

V.5.2 .1 -Les nitrates dans les eaux souterraines

Les concentrations en nitrate augmentent avec l'activité humaine, comme par exemple l'agriculture, l'industrie, les effluents domestiques et les émissions de produits de combustions. Les nitrates se déplacent généralement relativement lentement dans le sol et les eaux souterraines : il y a un temps de latence d'approximativement 20 ans entre l'activité de pollution et la détection du polluant en eaux souterraines. Pour cette raison, on prévoit que les activités courantes de pollution continueront à affecter les concentrations en nitrate pendant plusieurs décennies. Cependant si la pression dans la couche aquifère est élevée, le transport peut être très rapide dans la zone de saturation. (Lemntech, 1998).

Les sources de pollution aux nitrates dans les eaux souterraines sont:

- Une culture dans des secteurs où la couche de sol est relativement mince, ou si le sol a une capacité tampon nutritive pauvre, ou si il y a des changements d'utilisation de la terre;
- Sur-fertilisation des récoltes pour l'intensification de l'activité agricole ;
- Une grande répartition des récoltes qui exige de hautes doses d'engrais et qui laissent un excédant dans les sols durant de longues périodes ;

- Systèmes de drainage qui mènent au drainage des engrais ;
- Les cycles de rotation agricole intensifs impliquant un labourage fréquent et des étendus de sols nus pendant l'hiver ;
- Les engrais organiques provenant de la production animale ;

V.5.2.1.1- Les normes des nitrates selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et algériennes :

L'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) et les recommandations des normes algériennes exigent de ne pas dépasser pour un adulte une dose journalière admissible (DJA) de 3.65 milligrammes de nitrates par kg et par jour. Pour un adulte de 70 kg, cela correspond à 255 mg de nitrates par jour. Mais le bébé n'est pas un adulte en miniature. Cette (DJA) ne peut donc être transposée au nourrisson. Pour ne pas dépasser cette DJA, il ne suffit pas de prendre garde à la qualité de l'eau alimentaire. En effet, les légumes, les fruits, le pain, les produits laitiers les salaisons, les charcuteries contiennent des quantités plus ou moins grandes de nitrates jusqu'au 2000 mg (deux grammes) par kilo pour certains légumes. Selon la qualité de l'alimentation et la qualité de l'eau alimentaire, la DJA peut être rapidement atteinte.

La norme des nitrates fixée à 50 mg de nitrates (NO_3) par litre, à partir d'une teneur supérieure, l'eau des nappes aquifères n'est plus potable.

V.5.2.1.2- Elimination de la pollution des nitrates:

V.5.2.1.2.1- Elimination naturelle

Il y a trois cas importants où une élimination naturelle des nitrates peut se produire :

- Le premier est le cas où la roche dont est constituée la nappe contient un minéral assez rare, la pyrite. C'est un sulfure de fer, qui est se trouve sous forme de très petits minéraux non visibles à l'œil nu. Ce sulfure réagit avec l'oxygène contenu dans l'eau et s'oxyde en sulfate de fer, qui est soluble. En l'absence d'oxygène, la pyrite est oxydée par les nitrates, pour former aussi des sulfates de fer, et de l'azote gazeux, qui s'échappe vers l'atmosphère.

Cette réaction est réalisée par des bactéries dénitrifiantes du milieu. Cette disparition des nitrates peut être totale, elle se traduit cependant par une augmentation des sulfates dans l'eau, qui ne rend en général pas les eaux non potables.

-Le deuxième cas de dénitrification naturelle se produit sans la présence de pyrite, dès que la nappe se trouve isolée de l'atmosphère. Il faut en général que la nappe plonge vers la profondeur, et qu'elle soit surmontée par une couche d'argile formant un écran. L'air du sol ne peut plus communiquer avec l'eau de la nappe, et on constate alors que les bactéries présentes dans l'eau de la nappe et qui ont besoin d'oxygène pour vivre vont le chercher dans l'ion nitrate, dès que l'oxygène dissout a été consommé. Les nitrates disparaissent alors comme par enchantement, l'azote produit diffuse et retourne à l'atmosphère.

- Le dernier cas à citer est celui des nappes alluviales proches de certains cours d'eau.

Les teneurs en nitrates diminuent dans la nappe quand on se dirige de la bordure de la plaine alluviale, jusqu'à la rivière. Les concentrations de l'eau dans la rivière peuvent être environ la moitié de celle de la nappe, quand bien même l'eau de la rivière provient en totalité de la dite nappe comme en étiage estival. Ceci, donne deux explications. La première est que la végétation alluviale qui borde le fleuve puise son eau dans la nappe, et y consomme une partie des nitrates dont elle a besoin. La seconde explication, plus significative, est que, dans les alluvions, on constate très souvent que les parties graveleuses en profondeur, là où l'eau circule, sont surmontées par des dépôts fins limoneux. Ce dépôt de limons fins joue alors le rôle de la couche d'argile et permet une certaine dénitrification naturelle dans les graviers sous-jacents, dénitrification qui n'est en général pas totale, faute de temps pour se réaliser (Miquel, 2003).

V.5.2.1.2.2- Elimination des nitrates des eaux potables

Plusieurs méthodes et techniques d'élimination des nitrates des eaux potables ont peut citer :

- Le procédé diffusé par la société Dégremont utilisant de l'acide acétique,
- Le procédé diffusé par les sociétés Dégremont, OTV et SAUR utilisant de l'éthanol,

- Les procédés de traitement biologique par bactéries hétérotrophes et autotrophe, diffusé par les sociétés Dégremont, OTV, SOGEA, BRGM/SAFEGE,...etc.
- Les procédés de traitement physico-chimique : Echange d'ions, Procédés membranaires (Osmose inverse, Electrodialyse), ([Ratel et Debrieu, 2012](#)).

L'élimination des nitrates contenus dans l'eau par ces procédés reste très coûteuse, surtout on utilisant l'ozone. L'ozone est en produit chimique très oxydant qui oxydera toute la concentration en nitrates, et donc éliminer la toxicité causée par les nitrites.

La meilleure solution donc est de protéger l'environnement et les points d'eaux de toutes formes de pollution comme les eaux usées, l'utilisation en excès des engrais et les fumiers...etc.

Dans cette étude, nous avons essayé d'estimer le risque de la pollution des eaux souterraines par les nitrates. Il faut aussi mentionner que la concentration en nitrate dans les eaux souterraines évolue à un rythme alarmant. Le développement agricole, conduit souvent à la pollution des eaux souterraines rapides par les formes chimiques de l'azote, en particulier des nitrates, en raison de leur grande solubilité et une faible affinité pour l'échange d'ions. Les nitrates sont l'azote le plus oxygéné et sont une forme très soluble; ils sont le résultat du cycle de l'azote qui est un nutriment essentiel à la vie végétale. La variation spatiale des concentrations du nitrate est principalement liée à l'activité agricole qui se développe sur la surface, la nature des formations dans la zone insaturée et les conditions d'oxydoréduction. L'augmentation des nitrates est due à la contribution des engrais et la nitrification de l'ammonium ([Guerraiche et al, 2016](#)).

V.5.3- Sources de la pollution aux nitrates dans les eaux souterraines de la région de Chemora

Au cours des dix dernières années, la pollution des eaux souterraines par les nitrates n'a cessé d'augmenter. Les eaux souterraines sont vulnérables aux pollutions diffuses, longues à produire leurs effets, qui se manifestent souvent après un temps d'accumulation. Quand la dégradation est constatée, la restauration de la qualité des eaux souterraines est d'autant plus difficile et longue, de quelques années à quelques dizaines d'années, ce qui souligne l'importance de préserver ce patrimoine pour l'avenir.

V.5.3.1- Pollution d'origine domestique

Les eaux usées peuvent être l'un des causes de pollution les plus remarquables dans la ville de Chemora car jusqu'à une durée plus proche avant la réalisation du collecteur rejetant les eaux usées dans l'exutoire situé dans la zone Nord de la région, ces derniers sont rejetés directement dans l'Oued de Chemora dans le milieu urbain sans aucun traitement préalable et avec un débit estimé à 5414.4 m³/j en 2016 (Fig V.36). De même pour les déchets solides urbains (déchets ménagers) sont déposés dans une décharge non aménagée et mal gérée au Sud-ouest de la plaine. La production des déchets solides est évaluée à environ 3698 tonnes par an sur la base des données de l'APC de Chemora soit 10.13 tonnes par jour en 2008, avec une progression sensible en fonction de plusieurs facteurs, dont le plus essentiel est la croissance démographique, franchi en 2016 le seuil des 4500 tonnes par an.



Rejet des eaux usées



Exutoire « Oued Chemora »

Fig. V.36- Photos représentant les sources de la pollution

V.5.3.2- Pollution agricole

La région de Chemora est caractérisée par une agriculture de type céréaliculture et maraîchères qui nécessite une irrigation permanente surtout pendant la période de basses eaux. Cette dernière se fait par des forages et puits de faible profondeur débitent annuellement environ 1,5.10⁶ m³/an. La pollution diffuse d'origine agricole est une cause

majeure et principale accusée de la détérioration de la qualité des eaux souterraines. Notamment les nitrates et les pesticides qui représentent la principale source de pollution des aquifères dans la région de Chemora (Tableau. V.15, V.16). Plusieurs éleveurs des bétails et de poules, publics et privés rejettent les fumiers avec des grandes quantités dans la nature pour les utiliser par la suite comme fertilisants des terrains agricoles, les fosses septiques non étanches. En plus, l'utilisation irrationnelle et excessive des engrais azotés dans l'agriculture.

Ces manifestations abusives sur l'environnement présentent un facteur direct pour la pollution des eaux souterraines et la dégradation de la qualité de l'eau favorisée par la sécheresse qui augmente les teneurs en éléments polluants par concentration. Ce facteur considéré le plus favorisé pour la pollution vu les concentrations élevées des nitrates dépassant la norme, enregistrées dans les eaux de la plaine Sud (Chemora-Remila) exploitée par l'agriculture intense.

Tableau V.15 : Quantités des engrais livrées et utilisée pendant la campagne agricole 2014-2015 de Chemora selon la DSA –Batna

Produits	Engrais organiques	Engrais minérales simples Azotés (N)	Engrais minérales simples Phosphates (P)	Engrais minérales composés
	Urée	Sulfazote 26 %	TSP	NPK
Unité	(QX)	(QX)	(QX)	(QX)
Quantité	1377.00	1079.00	259	17

Tableau V.16: Quantités des pesticides livrées et utilisée pendant la campagne agricole 2014-2015 de Chemora selon la DSA –Batna-

Produits	Solides			Liquides	
	Fongicides	Herbicides	Nématicides	Herbicides	Insecticides
Unité	(QX)	(QX)	(QX)	Litre	Litre
Quantité	5.4	15.3	20.9	57.0	35.0

V.5.4- Evolution des nitrates dans les eaux souterraines de la région de Chemora

V.5.4.1- Evolution spatio-temporelle des nitrates

L'examen des cartes d'évolution spatio-temporelle des nitrates pour les deux périodes Mars 2007 et Février 2016 (Fig. V.37 et V.38), montrent que la pollution est localisée dans la zone agricole, située au centre de la partie Sud, Sud-ouest du secteur d'étude (Plaine de Chemora-Remila). Cette zone est caractérisée par la présence d'une couche d'une épaisseur perméable qui favorise la migration des composés azotés à la zone de saturation. Les concentrations des nitrates dépassent les normes (algériennes et O.M.S) et atteindraient la valeur maximale de 116 mg/l au point d'eau n°05 pour la période de Mars 2007 et 98.5 mg/l au point d'eau n°12 pour la période de Février 2016. La zone Nord est caractérisée par des niveaux des eaux souterraines peu profondes de (7-35 m) et par l'existence d'une couche d'argile d'épaisseur qui protège l'eau contre l'infiltration des engrais, Les valeurs des concentrations des nitrates enregistrées ne dépassent pas la norme de 50 mg/l pour les deux périodes de Mars 2007 et Février 2016. L'analyse chimique a montré que près de 48 % des points d'eau ont des valeurs supérieures à 50 mg/l pour la période de Février 2016 et 17% pour la période Mars 2007, ce qui confirme l'accroissement de la pollution au cours du temps.

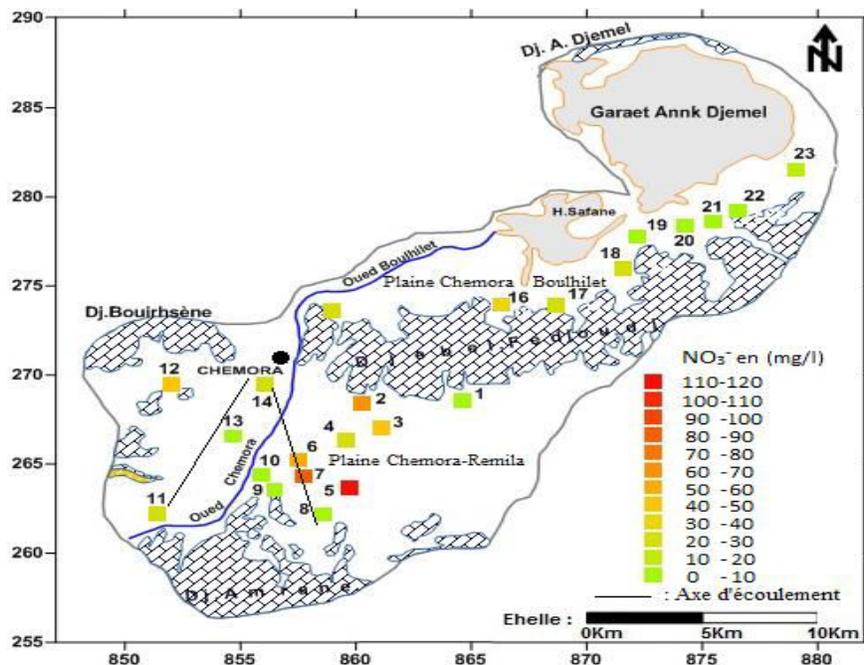


Fig. V.37. Evolution des nitrates pour la période de Mars 2007

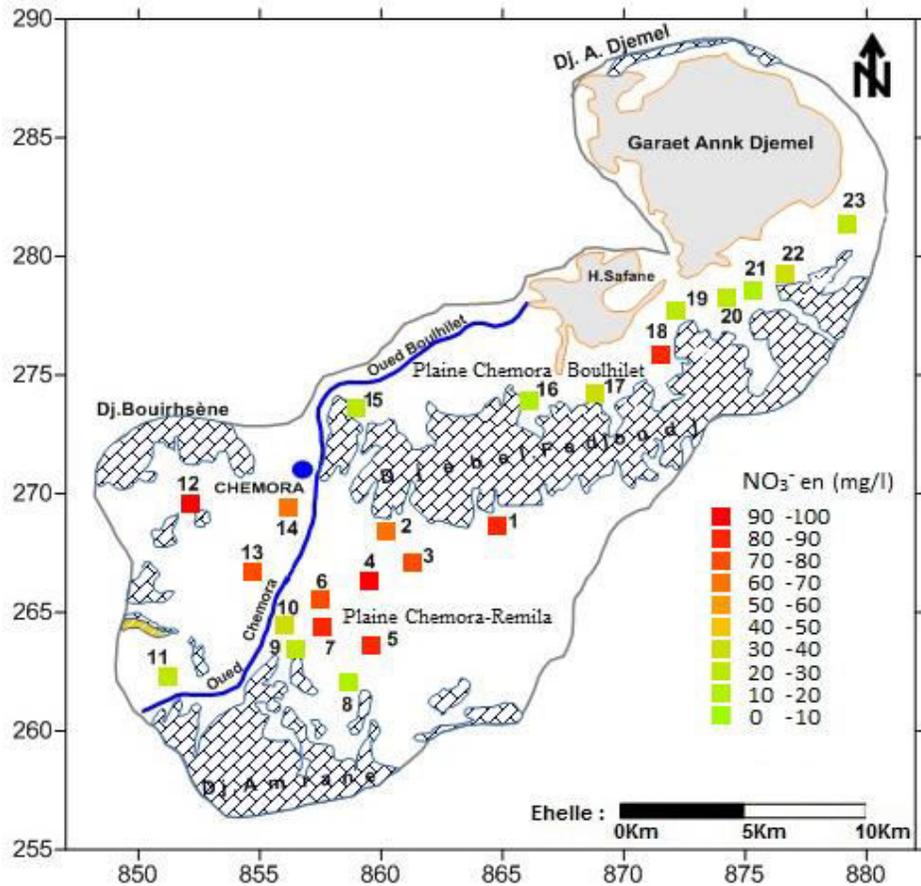


Fig. V.38. Evolution des nitrates pour la période de Février 2016

V.5.4.2- Evolution spatio-temporelle des nitrates dans le sens d'écoulement

L'évolution spatio-temporelle des nitrates selon le sens d'écoulement le long des profils (Sud) – (Nord) et (Sud-ouest) – (Nord) (Fig. V.39), montre que les teneurs des nitrates durant la période de Mars 2007 diminués dans le sens d'écoulement par la dilution. Tandis que pour la période de Février 2016 augmentent en dépassant la norme 50mg/l à la plaine Sud, cela dû à l'utilisation intense et excessive des engrais chimiques pour la fertilisation des terres agricoles et diminuer dans le sens d'écoulement en restant inférieures à la norme à la plaine Nord.

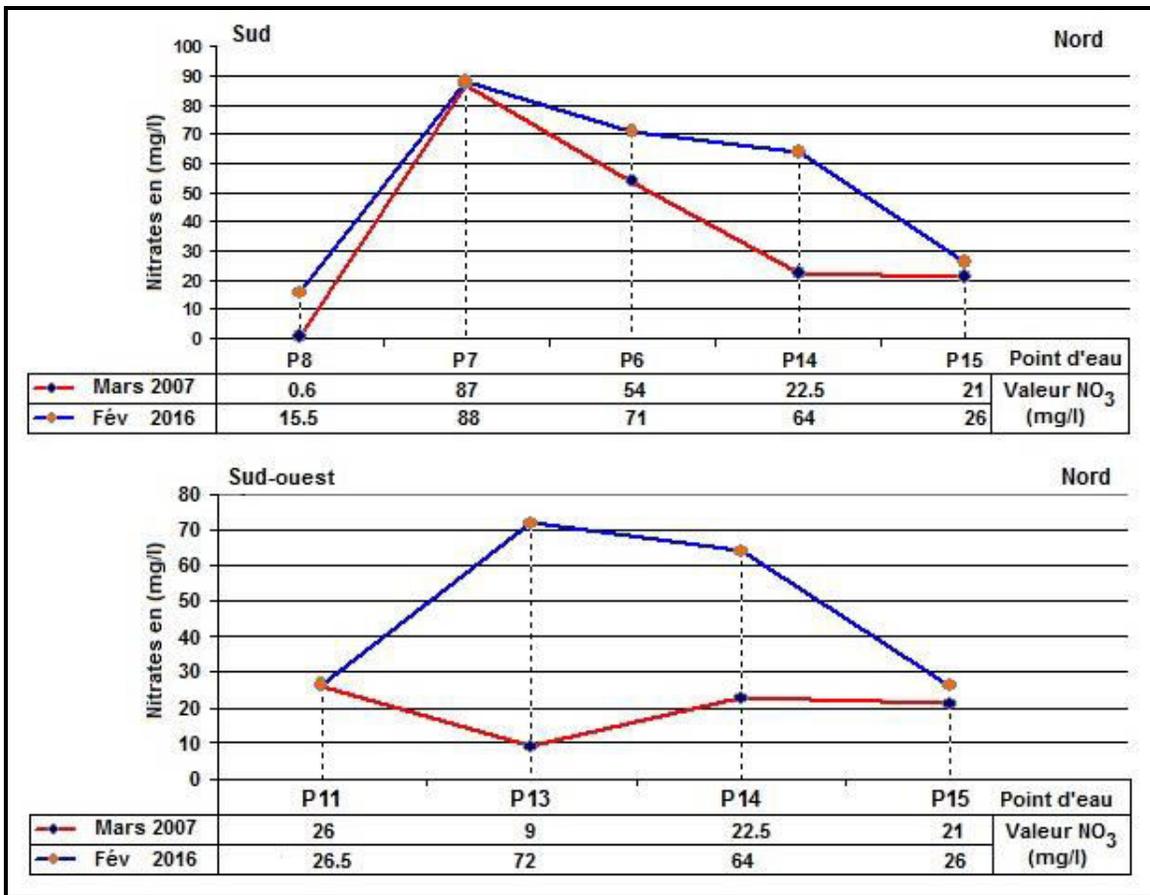


Fig. V.39- Evolution spatio-temporelle des nitrates selon le sens d'écoulement.

Conclusion

L'interprétation des données hydrochimiques ont montré un comportement variable du chimisme de la nappe alluviale de la région de Chemora dans l'espace et temps. La minéralisation augmente de Sud-ouest vers le Nord-est dans le sens d'écoulement des eaux souterraines. La conductivité électrique présente des valeurs élevées à la partie Sud-ouest près de Djebel Amrane et Les plus élevés à la partie Nord-est près de Gareat Ank Djemel avec un maximum de 9580µS/cm durant la période de Mars 2007 et 5350µS/cm pendant la période de Février 2016.

La représentation graphique des points d'eaux analysés sur le diagramme de Piper permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines qui

présente une famille principale ; Chloruré et sulfaté calcique pendant les deux campagnes de Mars 2007 et Février 2016.

Les eaux sont caractérisées par une salinité très élevée en se rapprochant du Gareat Ank Djemel à la partie Nord-est de la région et assez élevée à l'est du Djebel Amrane. Cependant les plus faibles ($CE < 3000 \mu S/cm$) sont localisées au centre, à l'est près et à l'ouest. Les indices de saturation des minéraux calculés à partir des ions majeurs et les éléments nutritifs, indiquent que les eaux souterraines sont généralement en état d'équilibre en ce qui concerne la plupart des phases minérales carbonatés, sont probablement responsables de la composition hydrochimique. En ce qui concerne les phases minérales évaporites sont sous-saturées en indiquant qu'elles se dissolvent le long du chemin d'écoulement souterrain.

L'analyse de la qualité des eaux par les méthodes statistiques a permis de montrer deux groupes par CAH et trois groupes par l'ACP pour les ensembles de données et durant les deux périodes Mars 2007 et Février 2016.

CAH montre deux groupes durant la période de Février 2016, (**G1** : Ca, HCO_3 , SO_4 et NO_3) ; (**G2** : CE, Mg, Na+K, Cl et NO_2). Le groupe 1 caractérise les eaux des forages de la zone Sud par une eau moins saline. Influencé par le contact des affleurements Aptiens de faciès carbonaté et gypsifères ($Ca SO_4 2H_2O$), et par le lessivage des terrains argileux et marneux, ainsi par la pollution anthropique des nitrates provenant de la zone agricole. Le groupe 2 caractérise les eaux des forages de la zone Nord par une eau de salinité accroissante en se rapprochant du lac salé et influencé par la pollution des eaux usées. La comparaison des deux périodes montre les mêmes groupes à l'exception d'un changement dans la composition chimique des eaux par la transmutation des faciès entre le groupe 1 et 2, par le remplacement du faciès chloruré marqué en période de Mars 2007 dans le groupe 1 par le faciès sulfaté dans le même groupe durant Février 2016. Ainsi le groupe 2 montre un changement par le remplacement du faciès sulfaté marqué pendant 2007 par le Faciès chloruré durant Février 2016.

L'ACP montre trois groupes; Le groupe 1 caractérise les eaux de la partie Sud-ouest par une eau minéralisée et polluée par les nitrates, le groupe 2 concerne la partie Nord-est et caractérisé par une eau mélangée et salée et le troisième groupe revient aux points d'eau

influencés par leurs situations près des bords carbonatés et calcaires, ce groupe ne peut qu'être spécifié par l'ACP puisque ce groupe réellement découle du premier groupe classifié par CAH.

L'analyse et les cartes d'aptitude des eaux souterraines de la région de Chemora à l'irrigation, montrent que les eaux de la partie centrale de la zone Sud-ouest et au piémont Nord du djebel Fedjoudj sont de qualité admissible. Tandis que celles de qualité médiocre à mauvaise se localisent au reste du terrain. Elles s'expliquent par la nature des formations en ces endroits. Les eaux des parties Nord-est et Sud du terrain sont caractérisées par une salinité élevée et elles conviennent à l'irrigation des cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés.

La détermination de la qualité chimique des eaux par les normes fixées par (O.M.S) et par le Degré Hydrotimétrique (D.H.T), montre que la majorité des eaux souterraines de notre région d'étude sont de qualité chimique médiocre à mauvaise, donc impropre à la consommation.

L'utilisation irrationnelle des fertilisants et engrais chimiques riches en éléments azotés dans la pratique de l'agriculture de la région, est la cause principale de la pollution des eaux souterraines par les fuites et la migration des nitrates. Cette pollution influe sur la qualité de l'eau et la rend non potable. Les secteurs les plus affectés dans la région sont le centre de la partie Sud et Sud-ouest (Plaine de Chemora-Remila), caractérisée par l'agriculture intense, les poulaillers et l'élevage des bétails.

CHAPITRE VI

MODELISATION DE LA POLLUTION

VI- Modélisation de la pollution

VI.1- Contexte

Une pollution par les nitrates a été détectée dans les eaux souterraines de la région de Chemora au cours des 20 dernières années. La teneur en cet élément a dépassé le seuil de 50 mg/l préconisé par les normes algériennes et celles de l'O.M.S. Le résultat des analyses hydrochimiques durant trois campagnes, Mars 2007, Juin 2007 et Février 2016, a montré que la zone la plus touchée, est la partie Sud. Ceci est dû comme on l'a déjà signalé, à l'activité agricole, à la présence d'une décharge incontrôlée et aux rejets liquides urbains. De telles actions suggèrent une lixiviation portant des quantités substantielles de produits riches en azote qui contribuent à la pollution de la nappe par infiltration.

Pour simuler le transport de nitrates dans l'eau souterraine de la partie Sud de la plaine de Chemora et suivre l'évolution de cette pollution dans le temps et dans l'espace, on a utilisé deux modèles analytiques, le premier unidimensionnel (ODAST) et le second bidimensionnel (TADAST).

VI.2- Application du modèle du transport convectif-dispersif d'un soluté

VI.2.1- Modèle unidimensionnel (1D) ODAST

VI.2.1.1- Phase de calage

Le but de cette phase est de reconstituer l'état actuel de la répartition des nitrates dans les eaux souterraines en agissant sur certains paramètres de dispersion tel que v : la vitesse d'écoulement moyenne en m/jour, R : le coefficient de retard, α et λ : les taux de décroissance et D : le coefficient de dispersion en m^2 /jour. Ce calage est important car il permettra de réaliser des simulations au niveau d'une partie de la plaine de Chemora.

Pour aboutir au calage du modèle, nous allons procéder de la manière suivante:

- 1- A partir des cartes piézométriques établies à l'aide des données récoltées durant les mois de mars 2007 et Février 2016, (Fig.IV.2 et IV.3) nous avons choisi deux points d'eau (n° 7 et n° 14) ayant des concentrations en nitrates, respectivement égales à 87 mg/l et à 64 mg/l. Ces deux puits se trouvent sur le même axe d'écoulement et les concentrations utilisées dans la phase de calage correspondent respectivement aux mois de mars 2007 (état de départ) et février 2016 (état d'arrivée).

- 2- La reconstitution de ces états a nécessité un calage par tâtonnement en agissant sur les paramètres de dispersion (v , R , α , λ et D) pendant une période de neuf (09) ans.
- 3- Le calage est estimé en calculant l'erreur entre la valeur de la concentration mesurée au point n° 14 (mars 2016) et la valeur de la concentration calculée au même point à la même date. Le calage est considéré comme bon lorsque cette erreur (E) $\leq 10\%$.
- 4- Après plusieurs tentatives (46), nous avons pu aboutir à une erreur de 0.75% pour une concentration mesurée de 64 mg/l et une concentration calculée de 63.518 mg/l pour une période de neuf (09) ans (Tableau VI.1, Fig. VI.1).

Tableau VI.1- Résultats du modèle calé pour une période de neuf (09) ans

Distances (m)	Temps (ans)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	87	87	87	87	87	87	87	87	87
500	87	87	87	87	87	87	87	87	87
1000	0	87	87	87	87	87	87	87	87
1500	0	0.001	87	87	87	87	87	87	87
2000	0	0	11.473	87	87	87	87	87	87
2500	0	0	0	75.968	87	87	87	87	87
3000	0	0	0	0	86.842	87	87	87	87
3500	0	0	0	0	0.013	86.999	87	87	87
4000	0	0	0	0	0	4.961	87	87	87
4500	0	0	0	0	0	0	48.047	87	87
5000	0	0	0	0	0	0	0	82..369	87
5500	0	0	0	0	0	0	0	0.017	86.852
5738	0	0	0	0	0	0	0	0	63.518

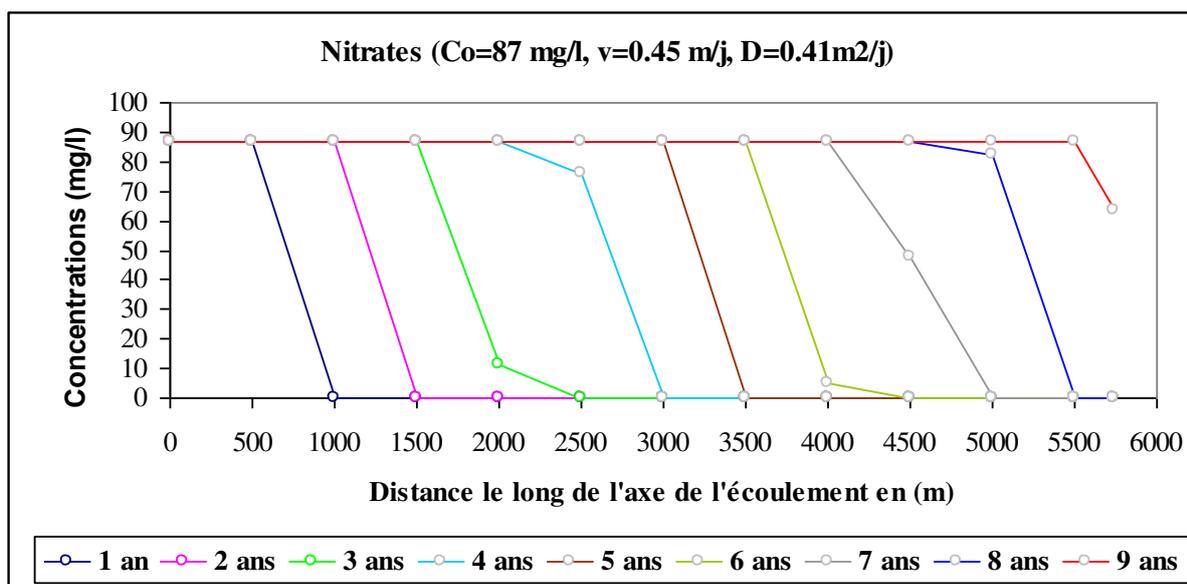


Fig. VI.1. Variation spatio-temporelle des concentrations des nitrates du modèle calé

VI.2.1.2- Simulation

Ce calage a permis de faire des simulations projetées de 10, 15, 20 et 25 ans. Ceci a permis de voir le temps nécessaire pour atteindre la valeur maximale de la charge polluante des nitrates avec 100% de la concentration initiale (87 mg/l). Les résultats des simulations montrent que la pollution des eaux de la nappe par les nitrates atteint sa valeur maximale de la concentration initiale à la dixième (10) année et polluer une distance d'environ 6 Km (Tableau VI.2).

Tableau VI.2- Résultats des simulations projetées (10, 15, 20 et 25 ans)

Distances (m)	Temps (ans)			
	10	15	20	25
0	87	87	87	87
500	87	87	87	87
1000	87	87	87	87
1500	87	87	87	87
2000	87	87	87	87
2500	87	87	87	87
3000	87	87	87	87
3500	87	87	87	87
4000	87	87	87	87
4500	87	87	87	87
5000	87	87	87	87
5500	87	87	87	87
5738	87	87	87	87

VI.2.2- Modèle bidimensionnel (2D) TDAST

VI.2.2.1- Phase de calage

Pour le modèle bidimensionnel, nous avons choisi les mêmes étapes que pour le modèle unidimensionnel. Cette phase a été réalisée pour les mêmes points, les mêmes concentrations que précédemment et la même période. Par contre les paramètres de calage qui ont été suivis sont les suivants : v : la vitesse d'écoulement moyenne en m/jour, R : le coefficient de retard, α et λ : les taux de décroissance, D_L : le coefficient de dispersion longitudinale en m^2/j et D_T : le coefficient de dispersion transversale en m^2/j (Fig. VI.2).

Le calage a nécessité 34 tâtonnements pour aboutir à une erreur <0.73% entre la concentration mesurée au point n°07 en 2007 (64 mg/l) et la concentration calculée au point n° 14 en 2016 (63.536 mg/l). Ceci a nécessité la fixation des paramètres de dispersion comme suite : $C_0 = 87$ mg/l, $v = 1.2$ m/j, $D_L = 1.3m^2/j$, $D_T = 1$ m^2/j $R = 0.65$, $\lambda = 0$ et $\alpha = 0$.

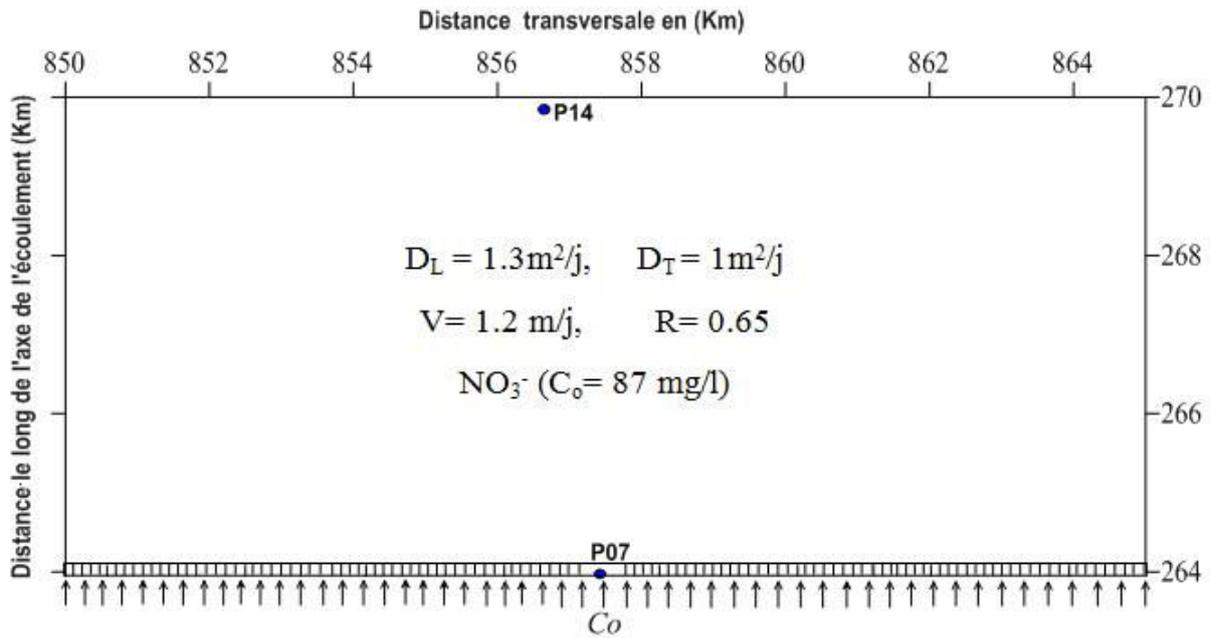


Fig. VI.2- Esquisse du domaine d'application du modèle TDAST

Le calage a permis de montrer la propagation de la charge polluante des nitrates pour la période d'étude (9 ans) de Mars 2007 à Février 2016. Où cette charge à atteint au point d'arrivée (point n°14) la concertation de 63.536 mg/l, représente 73% de la valeur maximale (Fig.VI.3).

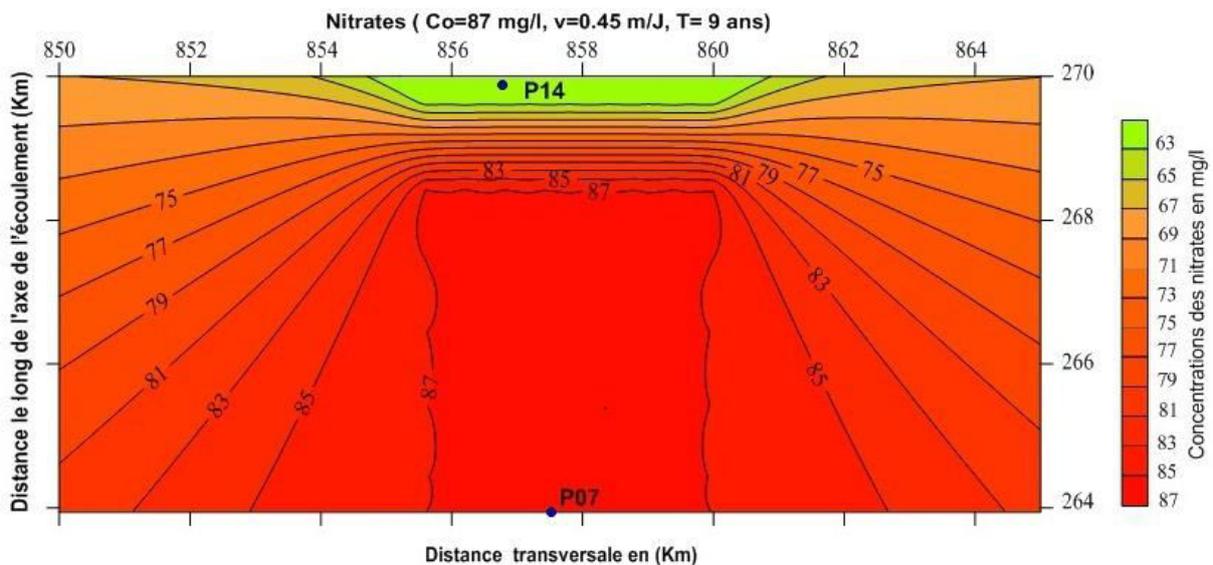


Fig. VI.3- Variation de la concentration des nitrates simulée par le modèle TDAST

VI.2.2.2- Simulation

Les simulations projetées par le modèle TDAST (2D) donne les même résultats que le modèle ODAST (1D) et montrent aussi que la pollution en nitrates atteint sa valeur maximale de concentration initiale à la dixième (10) année et couvre une surface d'environ 120 Km² .

Conclusion

La modélisation de la variation de la concentration des nitrates dans les eaux souterraines de l'aquifère de Chemora à l'aide des codes ODAST (1D) et TDAST (2D), montrent que la simulation de pollution des eaux de la nappe par les nitrates nécessite au moins 10 ans (2007-2017) pour polluer une distance d'environ 6Km et surface d'environ 120 km² avec la valeur maximale de concentration initiale (87mg/l).

Pour suivre l'évolution future de la pollution, il est nécessaire de faire des mesures pour connaître l'accroissement ou la diminution de la pollution. Si c'est il y a une augmentation de la concentration au point d'arrivée, donc c'est un indicateur d'addition d'autres flux polluants. Si c'est le contraire il y a une dilution par l'arrivée des apports d'eau et le pompage intensif de la nappe.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La connaissance des paramètres morphométriques, géologiques, hydrogéologiques et les principales sources de pollution de la région de Chemora, nous a permis de cerner les différents problèmes liés à la nature et à l'origine de la pollution, qui menace la qualité des eaux de cette région. Nous pouvons dire que la zone d'étude présente un sous bassin versant allongé et fermé, entouré par les monts de Dj. Amrane au Sud-ouest, Dj. Bouarif à l'Ouest, ceux de Merzeklel et Lefdjoudj à l'Est, et Marhsel au Nord. L'écoulement de surface se fait vers un lac salé caractérisant les hautes plaines algériennes. Cet endoréisme résulte des conditions tectoniques et des variations climatiques cycliques ayant prévalu durant le Quaternaire.

L'analyse morphométrique, du sous bassin versant de Chemora montre que le réseau hydrographique est très peu développé, l'indice de pente et l'indice de compacité permettent d'avoir une tendance vers le ruissellement, ce qui aura sans doute des percussions sur la réponse hydrologique.

La lithologie du sous bassin versant permet de voir que les formations prédominantes sont celles des calcaires du Crétacé inférieur et Crétacé supérieur. Cependant, les formations du Quaternaire sont localisées dans la partie centrale de la zone d'étude et celles du Miocène sont situées dans la partie Sud-ouest de la plaine.

La lithostratigraphie permet de voir que la région montre l'existence de trois (03) aquifères :

- Un aquifère superficiel se trouvant dans les formations du Quaternaire ;
- Un aquifère profond dans les formations carbonatées du Crétacé;
- Un aquifère dans les formations du Miocène de Timgad.

L'analyse climatique a permis de voir que, le climat de la région est semi-aride à hiver frais et été sec. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 321 mm/an, la température moyenne annuelle est de l'ordre 16.34⁰C, l'évapotranspiration réelle moyenne annuelle est de l'ordre de 938 mm, le ruissellement et l'infiltration sont faibles et totalisent respectivement 12,50 mm et 11,50 mm.

L'étude hydrogéologique menée, concerne l'aquifère superficiel, constitué essentiellement par des formations du Quaternaire qui recouvre la majorité de la zone d'étude. L'alimentation de cet aquifère se fait principalement par déversement à partir des massifs calcaires de Djebel

Fedjoudj, Djebel Merzklél et Djebel Bouarif, et accessoirement par les précipitations efficaces lors des épisodes orageuses.

Les cartes piézométriques de la région montre l'existence de deux sens d'écoulements; le premier vers le Nord-Est par l'intermédiaire d'un axe de drainage qui converge vers le lac salé (Garaet Annk Djemel) qui représente l'exutoire principal de l'aquifère. Ce lac représente également une limite à potentiel imposé. Le deuxième écoulement général se fait vers le sud et rejoint l'axe de drainage Sud-Est pour aboutir au lac salé.

Les essais de pompage ont permis d'estimer :

- ✓ Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, dont la transmissivité moyenne est de l'ordre de $T = 3.9 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, la perméabilité moyenne de $0.26 * 10^{-4} \text{ m/s}$ et un coefficient d'emmagasinement moyen de 6% .
- ✓ Le volume total prélevé annuellement de la nappe alluviale pour l'agriculture, l'AEP et les besoins industriels est estimé à $3,48 \times 10^6 \text{ m}^3$.

L'analyse et l'interprétation des données hydrochimiques ont montré un comportement variable du chimisme des eaux souterraines de la nappe superficielle de la région de Chemora dans l'espace et temps. La minéralisation augmente de Sud-ouest vers le Nord-est le long du sens d'écoulement souterrain. La conductivité électrique présente des valeurs élevées dans la partie Sud-Ouest près de Djebel Amrane et près de Garaet Ank Djemel. La salinité est expliquée par les valeurs de la conductivité électrique qui représente $CE_{\min} = 870 \mu\text{S/cm}$ et $CE_{\max} = 9580 \mu\text{S/cm}$ durant la période de Mars 2007, cependant pour la période de Février 2016 $CE_{\min} = 940 \mu\text{S/cm}$ et $CE_{\max} = 5350 \mu\text{S/cm}$.

La représentation graphique des points d'eaux analysés sur le diagramme de Piper permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines qui présente une famille principale : Chloruré et sulfaté calcique pendant les deux campagnes de Mars 2007 et Février 2016.

Les indices de saturation des minéraux calculés pour certains minéraux, montrent que les eaux souterraines sont généralement à état d'équilibre en ce qui concerne la plupart des phases minérales carbonatés, et sous-saturées pour la phase évaporite.

Le traitement statistique par les méthodes statistiques (CAH et ACP) a permis de montrer respectivement l'existence deux groupes pour la CAH et trois groupes pour l'ACP. Pour la CAH les données de la période de Février 2016 est caractérisée par le groupe **G1** regroupant

(Ca, HCO₃, SO₄ et NO₃) et par le groupe **G2** regroupant (CE, Mg, Na+K, Cl et NO₃). Le premier groupe représente les eaux des forages de la zone Sud ayant une eau moins saline. Le deuxième groupe représente les eaux des forages de la zone Nord et Sud-Est ayant une eau de salinité plus élevée en liaison avec le lac salé.

L'ACP montre l'existence de trois groupes. Le groupe 1 formé par les eaux de la partie Sud-Ouest caractérisées par une eau minéralisée et polluée par les nitrates. Le troisième groupe est caractérisé par des eaux faiblement minéralisées en liaison avec les formations carbonatées. Le groupe 2 concerne la partie Nord-Est et il représente un terme de passage entre les deux groupes extrêmes.

L'analyse des cartes d'aptitude des eaux souterraines de la région de Chemora à l'irrigation, montre que les eaux de la partie centrale de la zone Sud-ouest et au piémont Nord du djebel Fedjoudj sont de qualité admissible. Le reste du terrain est le siège d'une eau de qualité médiocre à mauvaise.

La qualité chimique des eaux selon les normes algériennes, (2000), celles de l'O.M.S, (2006) et le Degré Hydrotimétrique (D.H.T), montre que la majorité des eaux souterraines de la région de Chemora sont de qualité chimique médiocre à mauvaise et donc impropre à la consommation.

La modélisation de la variation de la concentration des nitrates dans les eaux souterraines de l'aquifère de Chemora à l'aide des codes ODAST (1D) et TDAST (2D), a montré que cette pollution pourrait polluer une distance d'environ 6Km et surface d'environ 120 km² avec la valeur maximale de concentration initiale (87mg/l) au bout d'une dizaine d'années.

L'utilisation irrationnelle des fertilisants et engrais chimiques riches en éléments azotés dans la pratique de l'agriculture de la région, est la cause principale de la pollution des eaux souterraines. Cette pollution influe sur de la qualité de l'eau et la rende non potable. Les secteurs les plus affectés dans la région sont le centre de la partie Sud et Sud-ouest (Plaine de Chemora-Remila), caractérisée par l'agriculture intense, les poulaillers et l'élevage des bétails.

RECOMMANDATIONS ET SOLUTIONS

Recommandations et solutions

Conformément aux articles relatifs à la loi de 2003 suivi par la lettre (b), le code des eaux a pour but d'assurer la protection des eaux contre la pollution, le gaspillage, la surexploitation et prévenir les effets nuisibles (Art 1). A cet effet un certain nombre de recommandations peut être proposés, afin de lutter contre la dégradation de la qualité des eaux souterraines:

- ✓ Arrêter, immédiatement, les nouveaux creusements de puits dans les secteurs où la nappe alluviale est vulnérable à la pollution, surtout au niveau de la partie Sud et Sud-ouest, et modérer les pompages dans les puits déjà existants ;
- ✓ Adopter de nouvelles techniques d'irrigation plus économiques de l'eau (le goutte à goutte par exemple ou par aspersion) où il n'y a pas : de pertes par évaporation, des fuites,... que le système gravitaire, le plus répandu dans la région.
- ✓ Raisonner les apports en engrais azotés pour éviter les sur-fertilisations qui sont très répandues dans la région ;
- ✓ Maîtriser le stockage et l'utilisation des déjections animales ;
- ✓ Eviter l'implantation des ouvrages d'AEP le long des berges de oued Chemora-Boulhilet, afin d'éviter le flux imposé oued -nappe, ce qui amènerait une modification de la qualité des eaux de la nappe.
- ✓ Réaliser un traitement préalable des rejets avant qu'ils atteignent l'oued, par la mise en place des stations d'épuration à l'aval des villes de Chemora et Boulhilet.
- ✓ Maîtriser les rejets solides par l'aménagement de la décharge publique et la bonne gestion.

ANNEXES

Annexes

Annexe n°01 :

Tableau II.04. Tableau de la Colonne stratigraphique et conséquence hydrogéologique

systeme	Etage	Symbole	Description lithologique	Les affleurements	Epaisseur (m)	Intérêt hydrogéologique	
Quaternaire		e	Eboulis	Frangent le relief de Djebel Fedjoudj.	150	perméable	
		A	Alluvions actuelles et récentes.	À l'Ouest du Djebel Fedjoudj et le long des vallées de l'Oued Chemora -Boulhilet et Garaet Ank Djemel			
		Q	Terres arables, limons anciens et Quaternaire indifférencié.	Zones plates cultivables.			
		Q ^t	Glacis polygénique nappant les reliefs.	Couvrent de très vastes surfaces en pente douce			
		Q ^c	Croûtes calcaires massives. Sols de Sebka, sols salés et dunaires.	- Occupant de vastes espaces dans les zones basses au Sud-est. -Au bord Nord du sous bassin (Garaet Ank Djemel et ses environs).			
Miocène		m	Serravalien-Tortonien: grès inférieurs blancs fissurés peu grossiers,	Bassin de Timgad	-	perméable	
Crétacé inférieur		C ³ , C ^{1b} , C ^{1a}	Coniacien, Cénomaniens moyen, Cénomaniens basal	Djebel Amrane.	150, 300	impermeable	
		C ^{2b} , C ^{2a} , C ^{1e}	Turonien moyen et supérieur, Turonien basal, Cénomaniens supérieur	Djebel Amrane A l'Est du Djebel Amrane (Legrine)	150-200 150	perméable	
	Aptien	n ^{5a}	Marnes grises.	-Affleurent mal à Djebel Fedjoudj sous les éboulis.	75	impermeable	
		n ^{5b}	Calcaires à Miliolidés Orbitolines et dolomitiques	Djebel Fedjoudj.	175	perméable	
		n ^{5c}	Calcaires à Miliolidés,Orbitaline et Ovalvéolina reicheli.	Djebel Fedjoudj (Theniet El-Korfane).	50	perméable	
	Barrémien	n ^{4c}	Dolomites sombres et calcaires fins noirs	Dj Sidi Bouzid	50	perméable	
		n ^{4d}	à dominante gréseuse.	Affleure à Sidi Bouzid. près de Bouirhsène à Djebel Bouarif	80	perméable	
	Albien		n ⁶	Argiles, marnes et grès ferrugineux	Au bord Ouest du sous bassin, visible à Dj Bouarif	250m	impermeable

Annexe n°02:

Essais de pompage

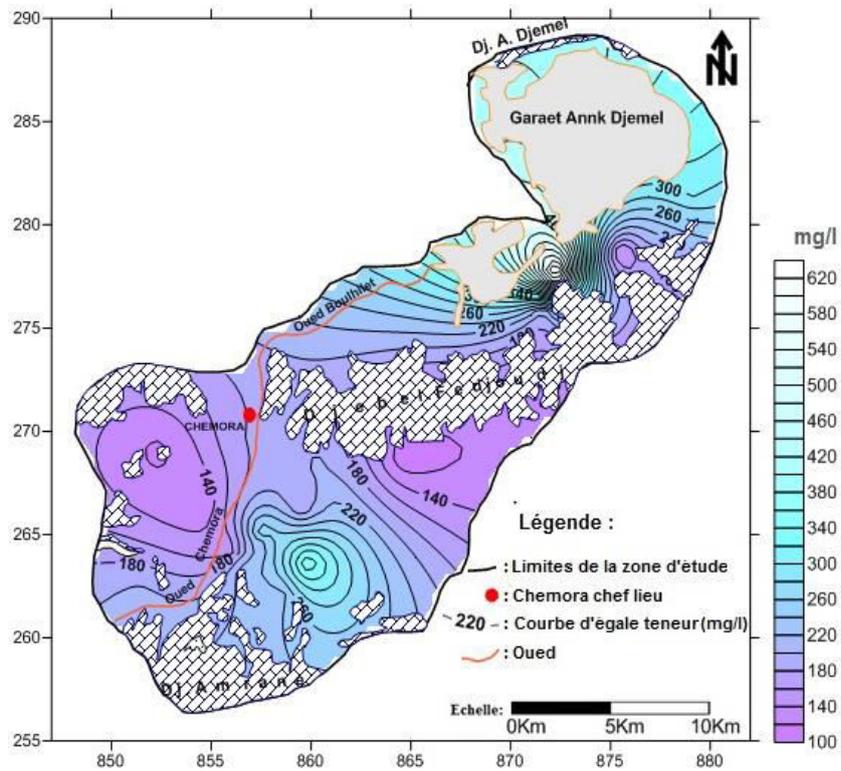
Essais de pompage -Forage n°05			
Descente		Remonté	
Temps(s)	Rabat (m)	Temps (s)	remonté (m)
0	0	0	12.24
2	1.31	2	10.93
4	1.78	4	10.46
8	2.14	8	10.1
16	2.83	16	9.41
32	3.27	32	8.97
64	4.02	64	8.22
128	5.16	128	7.08
256	6.24	256	6
512	7.09	512	5.15
1024	8.11	1024	4.13
1800	9.55	1800	2.69
3600	12.24	3600	0
5400	12.24	5400	0
7200	12.24	7200	0
9000	12.24		
10800	12.24		
12600	12.24		
14400	12.24		

Essais de pompage -Forage n°12			
Descente		Remonté	
Temps(s)	Rabat (m)	Temps (s)	remonté (m)
0	0	0	23.83
60	13.01	1	23.83
120	13.14	1.01	23.7
180	13.22	1.02	23.66
240	13.31	1.03	23.5
300	13.39	1.05	23.37
360	13.48	1.07	23.18
420	13.55	1.09	22.82
480	13.67	1.12	22.15
540	13.75	1.14	21.54
600	13.83	1.16	21.13
660	13.92	1.19	20.57
720	14.03	1.25	19.73
780	14.11	1.32	18.11
840	14.2	1.4	17.42
900	14.29	1.48	16.79
1020	14.37	1.58	16.1
1200	14.46	1.75	15.33
1320	14.58	1.97	14.66
1500	14.67	2.24	14.07
1800	14.74	2.61	13.52
2100	15.09	3.12	13.44
2400	15.27	4.21	13.36
2700	15.54	6.47	13.27
3000	15.81	14.01	13.23
3300	16.13	33.56	13.12
3600	16.45	111	13.12
3900	16.77		
4200	17.1		
4500	17.53		
4800	17.95		
5400	18.63		
6000	19.24		
6600	19.88		
7200	20.47		
7800	21.19		
8400	21.68		
9000	22.04		
9600	22.26		
10200	22.43		
10800	22.65		
11700	22.87		
12600	23.13		
13500	23.32		
14400	23.46		
15600	23.53		
16800	23.61		
18000	23.68		
19800	23.74		
21600	23.8		
25200	23.83		
28800	23.83		

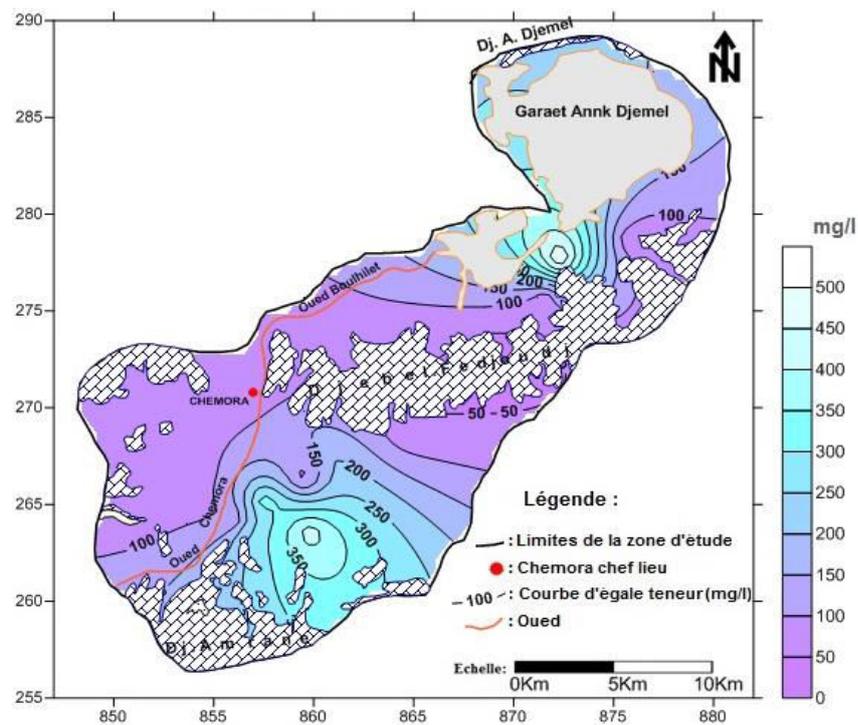
Essais de pompage -Forage n°16			
Descente		Remonté	
Temps(s)	Rabat (m)	Temps (s)	remonté (m)
0	0	0	1.02
600	0.14	1	1.02
900	0.17	1.11	1
1200	0.19	1.24	0.97
1500	0.21	1.4	0.91
2100	0.22	1.62	0.85
2700	0.24	1.91	0.82
3300	0.26	2.33	0.79
3900	0.28	2.63	0.73
4500	0.31	3	0.68
5400	0.36	3.5	0.63
6300	0.45	4.2	0.58
7200	0.55	5.25	0.52
8100	0.65	6	0.46
9000	0.76	7	0.41
10200	0.87	8.4	0.38
11400	0.95	10.5	0.33
12600	1.01	14	0.29
13800	1.02	16.8	0.25
14400	1.02	21	0.2
25200	1.02	28	0.17
		42	0.14
		84	0.13
		420	0.13

Essais de pompage -Forage n°22			
Descente		Remonté	
Temps(s)	Rabat (m)	Temps (s)	remonté (m)
0	0	0	2.1
120	0.06	1	2.09
180	0.1	1.98	2.08
240	0.13	2.95	2.07
300	0.15	3.9	2.06
360	0.18	4.84	2.05
420	0.2	5.76	2.04
480	0.22	6.64	2.03
540	0.25	7.56	2.02
600	0.27	8.44	2.01
900	0.36	9.31	2
1200	0.45	13.44	1.97
1500	0.55	17.29	1.95
1800	0.65	20.86	1.93
2100	0.76	24.2	1.9
2400	0.87	27.31	1.88
2700	0.95	30.25	1.86
3000	1.01	32.97	1.84
3300	1.07	35.59	1.82
3600	1.15	38.05	1.8
4500	1.38	40.33	1.79
5400	1.57	46.54	1.76
6300	1.85	51.93	1.73
7200	2.1	56.54	1.69
		60.5	1.66
		64.02	1.58
		67.22	1.47
		69.94	1.34
		72.46	1.23
		75.16	1.11
		77.07	1.04
		79.08	0.56
		80.67	0.41
		82.31	0.35
		84.03	0.27
		85.21	0.16
		86.43	0.16

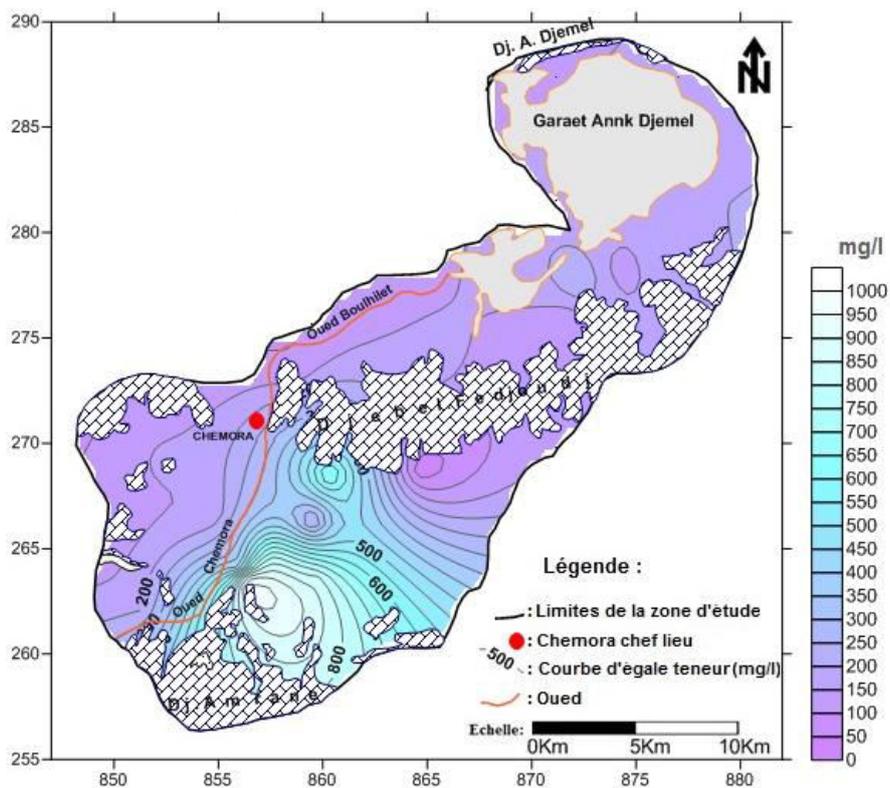
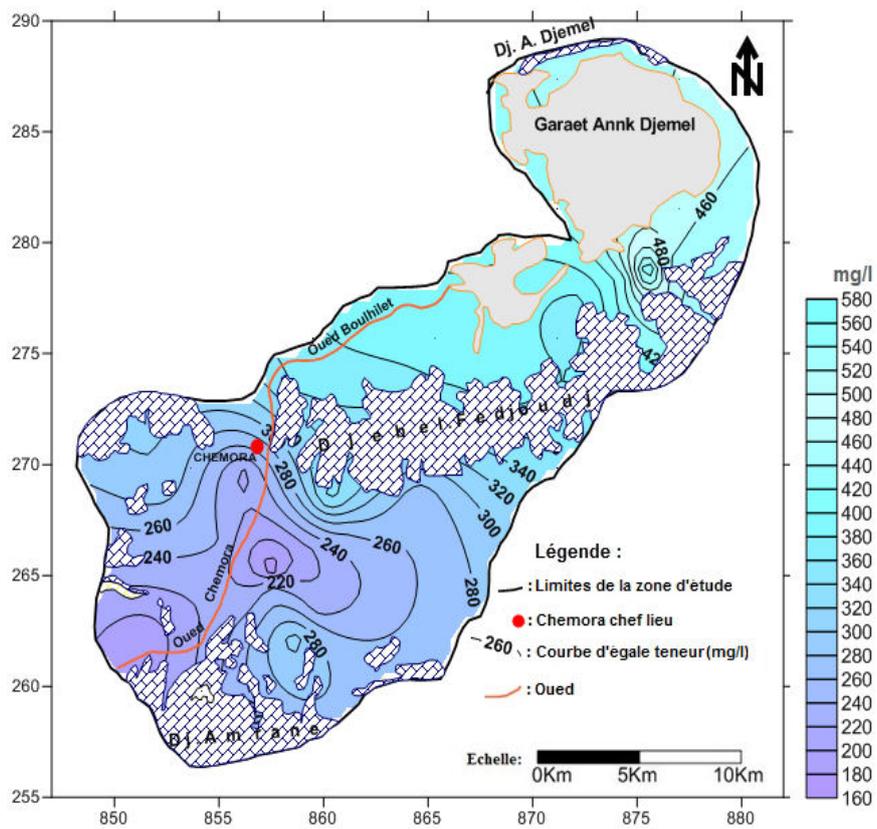
Annexe n°03 : **Cartes des éléments chimiques**
Compagne de Mars 2007

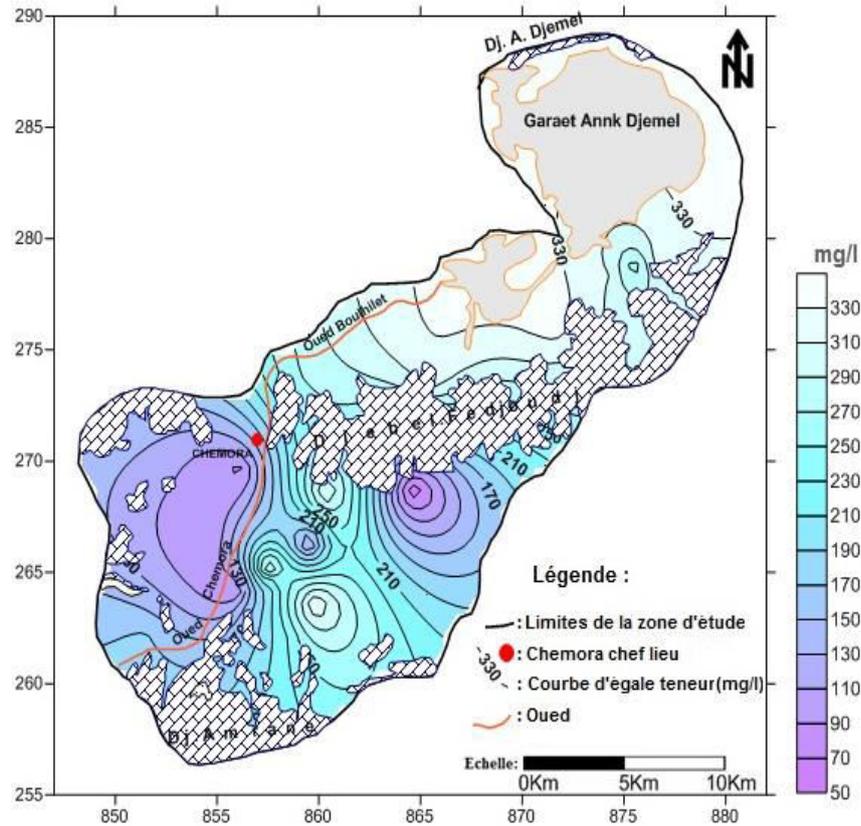
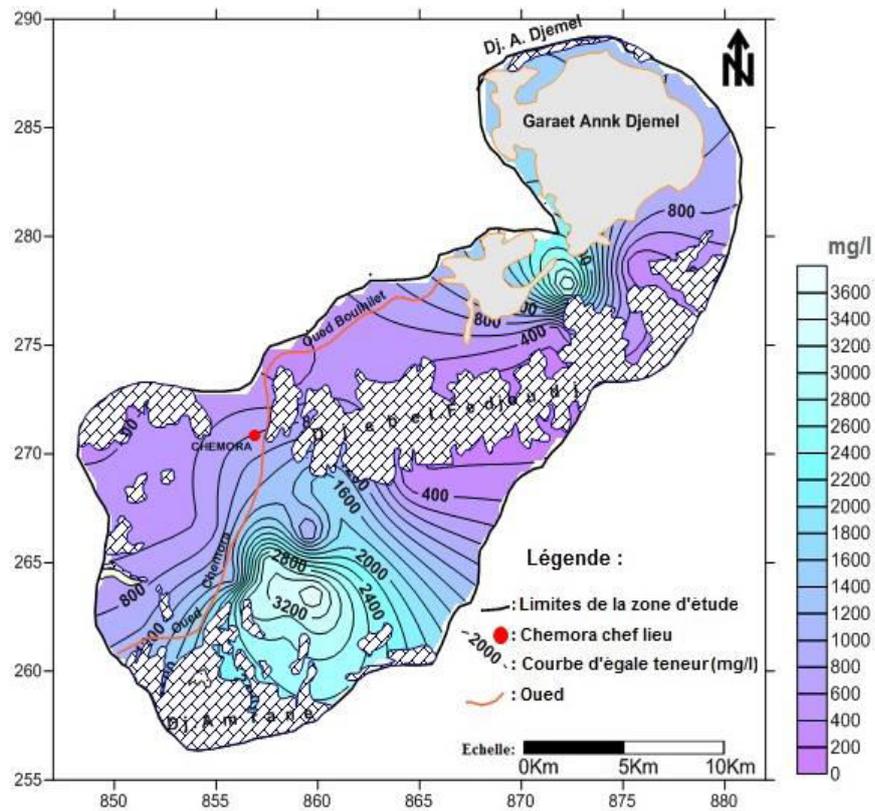


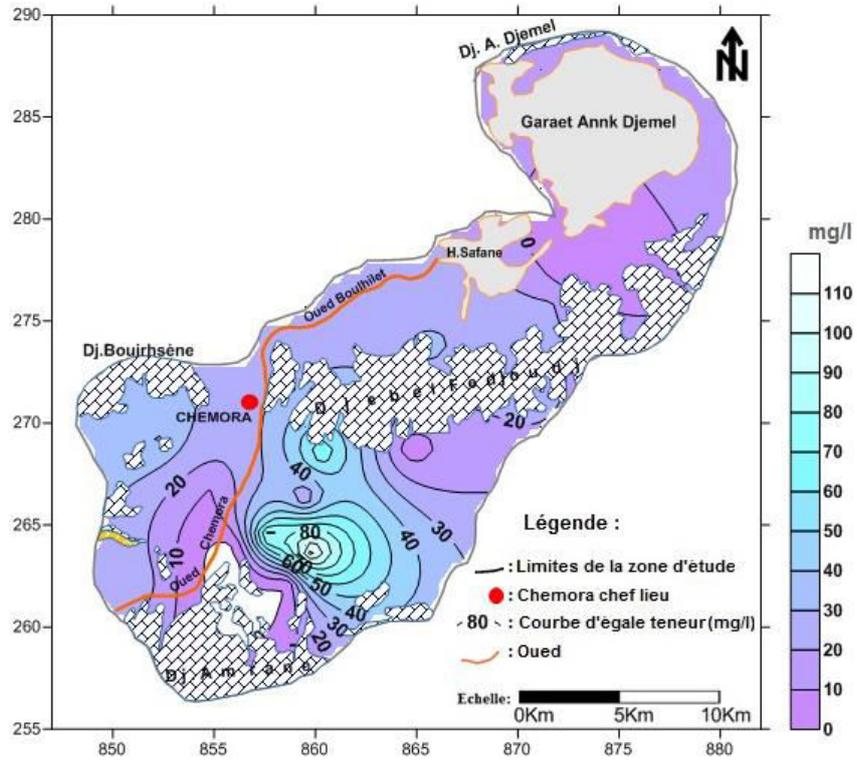
Carte de calcium Ca^{++}



Carte de magnésium Mg^{++}

Carte de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ Carte des bicarbonates HCO_3^{--}

Carte des chlorures Cl^- Carte des sulfates SO_4^{2-}



Carte des nitrates NO_3^-

Annexe n°04 :

Tableau Evolution des indices de saturation des minéraux dissous

N° Point	Campagne du mois de Mars 2007						Campagne du mois de Février 2016					
	Eléments carbonatés			Eléments évaporitiques			Eléments carbonatés			Eléments évaporitiques		
	Aragonite	Calcite	Dolomite	Anhydrite	Gypse	Halite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Anhydrite	Gypse	Halite
1	-0.37	-0.23	-0.38	-1.47	-1.25	-7.82	-0.35	-0.2	-0.45	-1.22	-1	-5.61
2	-0.59	-0.44	-0.65	-0.7	-0.48	-5.37	0.15	0.29	0.64	-1.4	-1.18	-6.12
3	0.12	0.26	0.85	-0.67	-0.45	-5.59	0.08	0.23	0.75	-1.1	-0.88	-5.95
4	0.2	0.35	0.65	-0.88	-0.66	-6.24	-0.08	0.06	0.04	-1.58	-1.36	-7.03
5	-0.05	0.09	0.58	-0.36	-0.15	-5.3	0.2	0.34	1.23	-1.43	-1.21	-5.96
6	-0.07	0.07	0.55	-0.47	-0.25	-5.45	0.05	0.2	0.26	-1.42	-1.2	-6.55
7	0.01	0.15	0.71	-0.55	-0.33	-5.52	-0.12	0.02	-0.15	-1.46	-1.24	-6.69
8	0.24	0.38	1.24	-0.59	-0.37	-5.39	0.35	0.49	1.44	-1.01	-0.79	-6.03
9	-0.31	-0.16	0.01	-0.55	-0.34	-5.54	0.08	0.22	0.54	-1.14	-0.92	-6.47
10	-0.35	-0.21	-0.25	-0.86	-0.64	-6.1	-0.01	0.14	0.17	-1.5	-1.28	-7.03
11	-0.23	-0.08	-0.11	-0.79	-0.57	-6.11	0.14	0.28	0.6	-1.25	-1.03	-6.26
12	-0.67	-0.53	-0.98	-1.2	-0.98	-6.34	0.1	0.24	0.4	-1.3	-1.08	-6.16
13	-0.16	-0.01	0.14	-1.06	-0.84	-6.43	0.03	0.17	0.26	-1.63	-1.41	-7.32
14	-0.23	-0.09	-0.15	-0.85	-0.63	-6.36	0.09	0.23	0.27	-1.46	-1.24	-6.97
15	0.25	0.4	0.65	-1.16	-0.94	-6.15	0.08	0.23	0.37	-1.44	-1.22	-6.19
16	0.24	0.38	0.64	-1.22	-1	-5.91	0.18	0.33	0.36	-1.47	-1.25	-6.17
17	-0.11	0.03	-0.18	-1.39	-1.17	-6.03	0.24	0.39	0.4	-1.45	-1.23	-6.1
18	-0.13	0.02	0	-1.2	-0.98	-6.07	0.18	0.32	0.58	-1.39	-1.17	-6.11
19	-0.05	0.09	0.41	-0.16	0.06	-5.8	0.35	0.49	0.48	-1.42	-1.21	-5.98
20	-0.1	0.05	0.39	-0.8	-0.58	-6.14	0.24	0.38	0.83	-1.53	-1.31	-5.99
21	-0.01	0.13	0.38	-1.58	-1.36	-5.97	0.29	0.43	0.46	-1.43	-1.21	-5.96
22	-0.08	0.07	0.05	-1.17	-0.95	-5.87	0.28	0.43	0.77	-1.62	-1.4	-6.01
23	0.12	0.27	0.52	-0.73	-0.51	-5.84	0.3	0.44	0.83	-1.4	-1.18	-5.99

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

DANS LE CADRE

DE LA THESE

Publications

- 1- Ghodbane. M, Boudoukha. A, Benaabidate. L, 2016. Hydrochemical and statistical characterization of groundwater in the Chemora area, Northeastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 57(32) 14858-14868.
- 2- Boudoukha. A et Ghodbane. M, 2014. Characterization of the mineralization of the Chemora water table (Eastern Algeria) by geochemical and statistical methods. *Handbook on the Applied Sciences and Engineering*, 1, 16-25.
- 3- Messaoud Ghodbane, Abderrahmane Boudoukha, 2011. Etude de la contamination des eaux souterraines de la zone Nord de Chemora par les nitrates –Est Algérien-. *Secheresse*, 2194-2011.

Communications Internationales

- 1- Messaoud Ghodbane, Abderrahmane Boudoukha, 2009. Study of the water quality in the area of Chemora - East Algeria. International conference on integrated water resources management -(GIRE) - 10-12/11/2009 Batna- Algeria.
- 2- Messaoud Ghodbane, Abderrahmane Boudoukha, 2010. Estimation de la pollution des eaux souterraines de la Région de Chemora par les nitrates -Est Algérien-. International conference on The Mobilization of the water resources Annaba- Algeria 22-23/10/2010.
- 3- Boudoukha A. & Ghodbane M, 2014. Characterization of the mineralization of the Chemora water table (Eastern Algeria) by geochemical and statistical methods. International Scientific Conference on Applied Sciences and Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia. December 20-21, 2014.
- 4- Messaoud Ghodbane, Abderrahmane Boudoukha, Aissam Gaagai. 2016. Impact the Lake Salts on the Groundwater Quality of the Northern Zone in the Chemora Area, Northeastern Algeria". International conference on integrated environmental management for sustainable development 27-30/10/2016-Sousse- Tunisia.
- 5- Messaoud Ghodbane, Abderrahmane Boudoukha, Aissam Gaagai. 2016. Estimation of groundwater pollution by nitrates in the northern zone of the Chemora - East Algeria. International conférence on integrated environmental management for sustainable development 27-30/10/2016-Sousse- Tunisia

Communications nationales

- 1- Messaoud Ghodbane, Abderrahmane Boudoukha. 2010. Etude de la Pollution des eaux souterraines la région de Chemora - Est Algérien. Conférence nationale sur : Les risques industriels et environnement (RIE 2010)- 27/03/2010- Skikda- Algérie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- ABDELBAKI C et BOUKLI HACENE F., (2007).** Etude du phénomène de dégradation des eaux souterraines du groupement urbain de Tlemcen, *Revue des Energies Renouvelables*, 10, 257- 263.
- A.N.R.H., (1960).** Agence Nationale des Ressources Hydriques. Annuaire hydrologique de l'Algérie.
- ALBERTO W.D., DEL PILAR D.M., VALERIA A.M., FABIANA P.S., CECILIA H.A., DE LOS ANGELES B.M., (2001).** Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Cordoba-Argentina). *Water Res.* 35, 2881-2894.
- ALTHER G.A., (1979).** A simplified statistical sequence applied to routine water quality analysis: a case history. *Ground Water.* 17, 556-561.
- APPELO C.A.J. et POSTMA D., (1993).** Geochemistry, groundwater and pollution. *Journal of Hydrology*, 155, 1-2, 295-296.
- ASIF M., WAQAS M., MUHAMMAD W.M. et FAROOQ A., (2011).** Application of Multivariate Statistical Techniques for the Characterization of Groundwater Quality of Lahore, Gujranwala and Sialkot (Pakistan). *Pak. J. Anal. Environ. Chem.* 12, N° 1 & 2, 102-112.
- ATTOUCHEIK L., (2006).** Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youssef (Sétif) et son impact sur l'environnement. *Mémoire de magistère. IST. USTHB, Algérie.*
- AYERS R. S., WESTCOT D. W., (1988).** La qualité de l'eau en agriculture. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, 29, Édit. FAO, Rome, 174 p.
- BAALI F., (2007).** Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien, *Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar-Annaba. Algérie.* 152 p.
- BARBIER V., (2011).** Nitrates et pesticides dans l'eau destinée à la consommation, *Observatoire Régional de l'environnement : O.R.E*, 4, 18p.
- BEAUCHAMP J., (2006).** Qualité et pollution des eaux souterraines, *université de Picardie Jules Verne. Eau et environnement*, 1, 7p.
- BEAUDRY. T, TARDAT HENRY. M, (1984).** Chimie des eaux, édition. Les griffons d'argiles, 1^{ère} édition, INC Canada.
- BELHADJ M.Z., BOUDOUKHA A., AMROUNE A., GAAGAI A., ZIANI D., (2017).** Caractérisation statistique de la qualité des eaux souterraines de la région Nord du bassin du Hodna, M'Sila. Sud-est Algérien. *Larhyss Journal*, 31, 177-194.
- BELKHIRI L., (2005).** Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Ain Azel, Wilaya de Sétif -Est Algérien, *Mémoire de magistère, Université de Batna, Algérie.* 168 p.
- BELKHIRI L., BOUDOUKHA A., MOUNI L., (2010).** A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data. *Int. J. Environ. Res.* 5(2), 537-544.

- BENCER S., BOUDOUKHA A., MOUNI L., (2016).** Multivariate statistical analysis of the groundwater of Ain Djacer area (Eastern of Algeria). *Arab Journal Geosci (2016) 9:248 DOI 10.1007/s12517-015-2277-6.*
- BERMOND R., VUICHAARD R., (1973).** Les paramètres de la qualité des eaux. Documentation Française, Paris, 179p.
- BOUDERKA N., SOUID A.K., LAKHILI F., LAHRACH A, BENABDELHADI M.,(2016).** Evaluation de l'impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines de la nappe du Gharb, *European Scientific Journal, 12, 509-524.*
- BOUDOUKHA A., BELHADJ M.Z., BENKADJA R., (2012).** Impact d'une pollution anthropique et d'une contamination naturelle sur la qualité des eaux du barrage de Zit Emba. Est algérien. *La Houille Blanche, 4,34-41.*
- BOUDOUKHA A., BOULAARAK M., (2013).** Pollution des eaux du barrage de Hammam Grouz par les nutriments (Est algérien). *Bull. Serv. Géol. Nat. 24 (2). 139-149.*
- BOUDOUKHA A et GHODBANE M., (2014).** Characterization of the mineralization of the Chemora water table (Eastern Algeria) by geochemical and statistical methods. *International Scientific Conference on Applied Sciences and Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia. December 20-21, 2014. Handbook on the Applied Sciences and Engineering, 1, 16-25.*
- BOUDOUKHA A., et MESSAID B., (2014).** Caractérisation électrique des formations aquifères de l'Est algérien. *Courrier du Savoir. 18, 77-82.*
- BOUDOUKHA. A, BOUGUERNE. A, MEBARKIA. A, (2014).** Impact du changement climatique et de l'activité anthropique sur la qualité des eaux du barrage Ain Zada. Algérie *International Journal for Environment & Global Climate Change. 2(3), 74-75.*
- BOUGUERNE A., BOUDOUKHA A., BENKHALED A., MEBARKIA A., (2017).** Assessment of surface water quality of Ain Zada dam (Algeria) using multivariate statistical techniques. *International Journal of River Basin Management. 15(2), 133–143. DOI: 10.1080/15715124.2016.1215325*
- BOUROCHE J., SAPORTA G., (1980).** L'analyse des données, *Presses Universitaires de France 127p.*
- BRINIS N., BOUDOUKHA A., DJAIZ F., (2014).** Etude de la salinité des eaux souterraines dans les zones arides. Cas de l'aquifère d'El-Outaya. Région Nord-ouest de Biskra. ALGERIE. *International Journal of Environment & Water. 3 (1), 44-51.*
- BRINIS N., BOUDOUKHA A., AHMED HAMEL A., (2015).** Analyse statistique et géochimique de la dynamique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du synclinal de Gharissa. Algérie orientale. *Larhyss Journal. 22,123-137.*
- BUREAU D., (1986).** Approche sédimentaire de la dynamique structurale. Evolution mésozoïque et devenir orogénique de la partie septentrionale du fossé saharien (Sud- Ouest constantinois et Aurès, Algérie). *Thèse Doct. ès sci, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 2., 1^{ère} partie. 441 p.*
- CASTANY G., (1982).** Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. *Dunod Edit. Paris, 334p.*

CLEARY R.W., UNGS M.J., (1978). Groundwater pollution and hydrology, mathematical models and computer programs, *Report. 78-WR-15, Water Resources, Programs, Princeton Univ, Princeton, N.J.*

COTTARD C., (2008). Les nitrates, Eduterre : Site de production ressources pédagogiques en sciences de la terre et de l'environnement. *Institut Français de l'éducation.*

CÜNEYT G., GEOFFREY D., THYNE J.E., MCCRAY A., KEITH T., (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, *Hydrogeology Journal, 10, 455-474.*

DAVID ET AL., (2000). Potential importance of bacteria and fungi in nitrate assimilation in soil, *Soil Biology and Biochemistry, 39, 1737-1743.*

RECOUS ET AL., (1990). Microbial immobilization and ammonium and nitrate in cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry, 22, 913-922.*

DJENBA S., BOUDOUKHA A., BENCER S., (2015). Approche hydrochimique de l'aquifère superficiel de Ain Djacer. Est algérien. *Larhyss Journal, 24, 281-299.*

DREVER J.I., (1997). The geochemistry of natural waters, *3rd edn, Prentice Hall, New Jersey, 436p.*

DUSSART B., (1966). Limnologie : Etude des eaux continentales. *Gauthier-Villars, Ed., Paris. Collection Géobiologie, Ecologie, Aménagement. 704 p.*

ETCHANCHU D AND PROBST J.L., (1988). Evolution of the chemical composition of the Garonne River water during the period 1971-1984. *Journal des Sciences Hydrologiques, 33,3, 243-256-8eme édition: Dunod, Paris.*

FARNHAM I.M., STETZENBACH K.J., SINGH A.K., JOHANNESSON K.H., (2000). Deciphering groundwater flow systems in Oasis Valley, Nevada, Using trace element chemistry, multivariate statistics and Geographical Information System. *Math. Geol. 32, 943-968.*

FEHDI C., BOUDOUKHA A., ROUABHIA AEK., SALAMEH E., (2011). Origin of groundwater salinity in the Morsott-El Anoint basin, Northeastern Algeria: hydrochemical and environmental isotopes approaches. *Desalination and Water Treatment. 36, 1-12.*

GAAGAI A., BOUDOUKHA A., BOUMEZBEUR A., BENAABIDATE L., (2017). Hydrochemical characterization of surface water in the Babar watershed (Algeria) using environmetric techniques and time series analysis. *International Journal of River Basin Management. 15(3), 361-372. DOI: 10.1080/15715124.2017.1299157.*

GHANDRICHE H., (1991). Modalités de la superposition de structures de plissement chevauchement d'âge alpin dans les Aurès (Algérie). *Thèse de l'Université de Paris-Sud, centre d'Orsay. 189 p.*

GHODBANE M., (2009). Etude de la contamination des eaux souterraines de la zone Nord de Chemora par les nitrates, Est Algérien. *Mémoire de Magister. Univ. Batna, Algeria, 147p.*

GHODBANE M., BOUDOUKHA A., BENAABIDATE L., (2016). Hydrochemical and statistical characterization of groundwater in the Chemora area, Northeastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 57(32), 14858-14868.

GOUAIDIA L., GUEFAIFIA O., BOUDOUKHA A., HEMILA M.L., (2013). Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : Exemple de la plaine de Meskiana, nord-est algérien. *Geo-Eco-Trop.*, 37(1), 81-92

GUELLAL S., VILLA J.M., (1973). Carte géologique de la région de Boulhilet (Ex-Lutaud), n° 147, 1/ 50000. Extrait de la carte géologique d'Ain Beida- Est d'Algérie, 1/200000.

GUERRAICHE Z., BOUDOUKHA A., BENKADJA R., (2016). Variation of the chemical composition of Grouz dam waters. Eastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*. 57(11), 4878-4887. DOI: 10.1080/19443994.2014.995131

GUILLAUD J.F AND BOURIEL L., (2007). Concentration-time evolution of the flow and nitrate in 25 rivers in Brittany (France). *Rev. Sci. Eau*, 20(2), 213-226.

GUILLAUME J., (2008). Influence des activités agricoles sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Analyse par modélisation des impacts des systèmes de grande culture sur les fuites de nitrate dans les plaines alluviales. *Thèse de doctorat, Université de Toulouse*, 229p.

GÜLER C., THYNE G.D., MCCRAY J.E., TURNER A.K., (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*.10, 455-474.

HCEFLCD : Haut Commissariat aux Eaux et Forêt et la Lutte Contre la Désertification. Maroc, (2007). Etude diagnostique de la zone humide AL Massira-Faija, cercle d'EL Brouj et Cercle de Settat, 242p.

I.G.N : Institut géographique national, (1955), Carte topographique de Boulhilet (Ex- Lutaud), Feuille n°174. Echelle 1/ 50000.toponymie de la carte, 1/200000.

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE (J.O.) N° 51/00. Arrêté du 26 juillet 2000, relatif aux caractéristiques de qualité d'une eau minérale naturelle et d'une eau de source.

JULIEN T., (2003). Action N moins de nitrate dans l'eau. *Office fédérale de l'agriculture (suisse) [En ligne] 2003 Disponible sur : <http://www.nitrate.ch/frameset.html>.*

KAISER H. F., (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141-151.

KHEDIDJA A., BOUDOUKHA A., (2014). Risk assessment of agricultural pollution on groundwater quality in the high valley of Tadjenanet: Chelghoum Laid (Eastern Algeria), *Desalin and Water Treat*, 52(22-24), 4174–4182.

KHEDIDJA A., (2015). Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Tadjnant -Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines. *Thèse de Doctorat- es -sciences, Université de Batna 2,162p.*

KHEDIDJA A., BOUDOUKHA A., (2015). Characterization of the salinity of the alluvial aquifer in the upper valley of Wadi Rhumel (eastern Algeria). *Desalination and Water Treatment* 56, 629-637.

KIM K.H., YUN S.T., CHOI B.Y., CHAE G.T., JOO Y., KIM K., KIM H.S., (2009). Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea). *J Contam Hydrol*, 107(3), 114–127.

LAFFITE R., (1939). Etude géologique de l'Aurès, Algérie. Stratigraphie- Description régionales, 15, 484p.

LANDREAU A et ROUX C., (1985). Teneurs en nitrates des nappes phréatiques de la France. Etat des connaissances - 2^{ème} édition. *Rapport BRGM 85 SGN 442 EAU, 18 p.*

LEFEBVRE J., (1988). Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles avec exemples d'applications, 3^{ème} édition, 273p.

LENNTECH., (1998-2017). Qualité des eaux souterraines, *Lenntech BV, Distributieweg, 3, 2645 EG Delfgauw.*

LOPPMANN W., BOURHANE A., ASFIRANE F, (2011). Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau, emploi des outils géochimiques isotopiques et géophysiques, *Onema, BRGM, 129 p.*

MARMI R., (1995). Les bassins continentaux de l'avant pays de la chaîne alpine Nord orientale. Etude stratigraphique, sédimentaire, structurale et géochimique. *Thèse de doctorat de l'université d'Henri Poincaré, Nancy1. 283p.*

MABARKIA A., HAOUCHINE A., BOUDOUKHA A., NEDJAI R., (2017). Assessment of nutrient contamination in surface water, case study of Ain Zada dam (North-East of Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017, 9(3), 1358-1377.*
Doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v9i3.8>

MENANI M.R., (1991). Etude hydrogéologique de la plaine d'El-Madher (Algérie orientale), Géologie, climatologie, hydrogéologie et modélisation des écoulements souterrains de l'aquifère Moi-Plio-Quaternaire. *Thèse de doctorat, univ de Nancy I G.E.S., 409p.*

MENG S.X., MAYNARD J.B., (2001). Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from Butucatu aquifer in Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology, 250, 78-97.*

MIQUEL M., (2003). Rapport sur la qualité de l'eau et l'assainissement en France. Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, N° 2979 Assemblée Nationale, N°261 Sénat.

OMS., (2006). (WHO, WORLD ORGANISATION HEALTH). Guidelines for drinking water quality, *Recommendations-2^{ème} édition. Geneva, WHO, 1993, 1, 1-130.*

- PASCAL V., EMMANUEL L., JEAN-MARIE M., CELINE S., CECILE G ET NICOLAS B., (2009).** La pollution du bassin de la Seine par les nitrates, *Agence de l'eau Seine-Normandie*, 6, 01- 43.
- PIPER A.M., (1944).** A graphic procedure in geochemical interpretation of water analysis. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 25 (6): 914-928
- RATEL O ET DEBRIEU C., (2012).** Elimination des nitrates des eaux potables, Office International de l'Eau, *Document technique FNDAE. 66/72329, G 7896, F5647. 71p.*
- REMBERG A., (1971).** Le sodium et la vie, 2^{ème} édition, PUF, Paris.
- RICHARDS L.A., (1954).** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, *Agric. Handbook. 60. USDA, Washington D.C., 160p.*
- RODIER J., (1984).** L'analyse de l'eau, eaux naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 7^{ème} édition Dunod, Paris, France.
- RODIER J., LEGUBE B., MERLET N., BRUNET R., (2009).** L'analyse de l'eau -9^{ème} édition,- Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer: *Analyse de l'eau, 9^{ème} édition, Paris, Dunod. 1600 p.*
- SERHAL H., MAILLOT H., BERNARD D., BASTIN S., (2004).** Modélisation du transfert de l'eau et des nitrates dans La zone non saturée. Application au bassin versant de Houle et Moule. *Journal Algérien sur les Régions arides, Numéro spécial, 89-95.*
- SPEARMAN C., (1904).** General intelligence, objectively determined and measured, *American Journal of Psychology, 15, 201-293.*
- TAHAR-CHERIF. Z., (1994).** Méthodes Spectroscopiques d'analyses chimiques, édition OPU.
- TIRI A., LAHBARI. N and BOUDOUKHA. A., (2014).** Multivariate Statistical Analysis and Geochemical Modeling to Characterize the Surface Water of Oued Chemora Basin, Algeria. *Natural Resources Research, 33(4), 379-391*
- TIRI A, LAHBARI N and BOUDOUKHA. A., (2015).** Assessment of the quality of water by hierarchical cluster and variance analyses of the Koudiat Medouar Watershed, East Algeria. *Appl. Water Sci. DOI 10.1007/s13201-014-0261-z*
- TIRI A., LAHBARI N and BOUDOUKHA A., (2016).** Hydrochemical characterization of surface water in the Timgad watershed, Eastern Algeria. *Desalination and Water Treatment. 57(2), 562-571.*
- TURIN A., (1990).** La pollution des eaux souterraines par les nitrates en Lorraine, *Revue Géographique de l'Est, 30, 257-273.*
- VAN GENUCHTEN M.TH., ALVES W.J., (1982).** Analytical Solutions of the one-dimensional convective-dispersive Solute Transport Equation, *U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin N°. 1661, 149p.*
- VILA J.M., (1977).** Carte géologique de l'Est d'Algérie, feuille n°146. 147. 148. 173. 174. 175. 201. 202. 203, d'Ain Beida, 1/200000. *Service de la carte géologique d'Algérie.*

- VILA J.M., (1980).** La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. *Thèse de Doctorat- es -sciences, Université Pierre et Marie curie, Paris VI.* 665p.
- WARD J.H., (1963).** Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal Amerc Stat Assoc*, 58, 236-244.
- WEBB B.W ET WALLING D.E., (1985).** Controls on the nutriment content of suspended sediment transported by British rivers, *The Science of the Total Environment*, 266: 113-123.
- WILCOX L.V., (1948).** The quality of water for agricultural use. *US Dept Agriculture. Tech Bull 962, Washington DC.*
- WILCOX L.V., (1955).** Classification and use for irrigation waters. *USDA, Circ.969, Washington, D.C., 119 p.*
- WILLIAMS R.E., (1982).** Statistical identification of hydraulic connections between the surface of a mountain and internal mineralized sources. *Ground Water.* 20, 466-478.
- YEKDELI K.A.K., TABARAKI R.A., KARIMI H.B., NIKORAZM M.C., ABBASI S.C., (2010).** Classification of Iranian bottled waters as indicated by manufacturer's labellings, *Food Chemistry*, 120, 1218-1223.
- ZIANI D., BOUDOUKHA A., BOUMAZBEUR A., BENAABIDATE L., FEHDI C., (2016).** Investigation of groundwater hydrochemical characteristics using the multivariate statistical analysis in Ain Djacer area, Eastern Algeria. *Desalination and Water Treatment.* 57 (2016) 26993–27002 doi: 10.1080/19443994.2016.1180474.