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

Université BATNA 2

Faculté de technologie
Département d'Hydraulique

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : Hydraulique

Thème

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

Présenté par

KHEDIDJA ABDELHAMID
(Ingénieur d'État en Hydrogéologie. Magister en géologie appliquée)

Soutenue publiquement le 19/04/2016

Devant le jury composé de :

KALLA Mehdi	Président	Professeur	Université de Batna
BOUDOUKA Abderrahmane	Rapporteur	Professeur	Université de Batna
FEHDI Chemseddine	Examinateur	Professeur	Université de Tébessa
HOUICHI Larbi	Examinateur	Professeur	Université de Batna
CHABOUR Nabil	Examinateur	Maitre de conférences	Université de Constantine

RESUME

Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Tadjenant – Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines

La région explorée fait partie de la zone occidentale du grand bassin versant de Kébir Rhumel situé à l'Est Algérien. Du point de vue géologique la région étudiée est caractérisée par une formation de type sédimentaire dont la prédominance des affleurements correspond à des formations Mio-Plio-Quaternaires.

La présente étude a pour objectif essentiel d'étudier le comportement hydrodynamique de la nappe alluviale et de déterminer l'impact de la pollution naturelle ou anthropique sur la qualité physico chimique des eaux de la nappe superficielle de la zone Tadjenanet – Chelghoum Laid.

Les résultats du modèle hydrodynamique en régime transitoire étalée sur une période d'observation de 20 ans, montrent un bilan hydrogéologique de la nappe plus au moins équilibré traduit par un faible rabattement atteignant les 6 m au maximum.

L'étude du chimisme de la nappe alluviale a permis de dire que le comportement hydrochimique est caractérisé par une grande variabilité spatiale. La minéralisation augmente progressivement de l'Ouest vers Est coïncidant avec le sens d'écoulement principal des eaux souterraines. La concentration très élevée en nitrates est en liaison avec l'activité agricole dans la région.

L'analyse des cartes de vulnérabilité a mis en évidence une zone de forte vulnérabilité au centre la plaine, alors que les zones à moyenne vulnérabilité se localisent à l'Est sur la périphérie de Oued Rhumel, le reste du terrain a une faible vulnérabilité.

Mots clés : Hydrodynamique, nappe, alluvion, impact, qualité, eau.

ABSTRACT

Characterization of hydrodynamic parameters of the aquifer of Tadjenant-Chelghoum Laid and impact of pollution of surface water on groundwater

The region explored is part of the western area of the great watershed Kebir Rhumel located in eastern Algeria. From a geological point of view the study area is characterized by formation of sedimentary outcrops which predominantly corresponds to Mio- Plio-Quaternaryformations.

The main objective of this study is to study the hydrodynamic behavior of the alluvial aquifer and determine the impact of natural and anthropogenic pollution on the physico-chemical water quality of surface water in the area of Tadjenanet - Laid Chelghoum. The results of the hydrodynamic model transient over a period of observation of 20 years , show a water balance of the water more or less balanced results in low drawdown up to 6m. .

The study of the chemistry of the alluvial aquifer was concluded that the hydrochemical behavior is characterized by a large spatial variability. Mineralization increases gradually from west to east coinciding with the main direction of groundwater flow. Very high nitrate concentration is connected with agricultural activity in the region.

The analysis of vulnerability maps showed an area of high vulnerability to center the plain, while the average vulnerability areas are located to the east on the outskirts of Wadi Rhumel, the rest of the field at a low vulnerability.

Keywords: Hydrodynamics, nappe, alluvium, impact, quality, water.

ملـــــخـــص

دراسة هيروديناميكية للمكمن المائى لمنطقة تاجنانت – شلغوم العيد و أثر التلوث المياه السطحية على المياه الجوفية (شرق الجزائر)

تقع المنطقة المدروسة في الجهة الغربية لحوض التصريف كبير الرمال Kebir (Rhumel) و الذي يقع بالجهة الشرقية للجزا ئر.

من جهة نظر جيولوجية تتميز منطقة الدراسة بتكوينات روسوبية اغلبها عبارة عن نتوءات التي ترجع حقبتها الى العصر الرباعي البليوساني والميوساني, أين تحيط بالمنطقة تكوينات روسوبية تعود الى العصر الايوساني و الطباشيري.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو دراسة السلوك الهيدروديناميكي للمكمن المائي الجوفي الغريني وتحديد أثر التلوث الطبيعي والبشري على نوعية المياه الفيزيائية والكيميائية للمكمن المائي الجوفي السطحي للمنطقة الممتدة من تاجنانت الى شلغوم العيد.

نتائج نموذج الهيدروديناميكي المطبق على مدى فترة المراقبة المقدرة ب 20 عاما، تبين وجود توازن الى حد ما في حصيلة الماء المغذي للمكمن و المستغل مع تسجيل انخفاض في منسوب الماء الجوفي للمكمن يصل إلى 6 أمتار كحد أقصى. الدراسة الكيميائية لمياه المكمن الجوفي الغريني خلصت الى أن السلوك الكيميائي للمياه المدروسة يتميز بتغير كبير من منطقة الى اخرى و هذا بالتباين الكبير المسجل على التركيز للعناصر الكيميائية. الدراسة سمحت بتسجيل زيادة في الملوحة تدريجيا من الغرب إلى الشرق وتزامن ذلك مع الاتجاه الرئيسي لتدفق المياه الجوفية . أيضا نشير الى تواجد نسب عالية جدا في عنصر النترات والذي يرتبط أساسا مع النشاط الزراعي في المنطقة.

تفحص الخرائط المنجزة والخاصة بمدى قابلية المكمن المائي للتلوث تظهر بوجود هناك حدة لتلوث هذا الاخير في الجهة الوسطى للسهل مع قابلية متوسطة في الجهة الشرقية القريبة من وادي الرمال الى أضعف حدة في باقي المنطقة .

الكلمات المفتاحية : ديناميكية المياه، مكمن مائي، غرين، أثر، نوعية، الماء.

Dédicace

Je dédie cette thèse à

A la mémoire de mon très cher père et ma très chère mère

A ma femme et mes enfants
A mes frères et sœurs
A toute ma famille

REMERCIEMENTS

Je tiens dans un premier temps à remercier le Professeur BOUDOUKHA Abderrahmane, de l'université de Batna d'avoir accepté de m'encadrer et suivre mon travail de près avec sa rigueur scientifique et ses conseils qui m'ont bien orienté dans l'élaboration de cette thèse. Je le remercie surtout pour sa disponibilité malgré ses responsabilités. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements vont également à KALLA Mehdi, Professeur à l'université de Batna d'avoir accepter de présider mon jury de soutenance, aux membres examinateurs : HOUICHI Larbi ; Professeur à l'université de Batna, FEHDI Chemseddine ; Professeur à l'université de Tébessa et CHABOUR Nabil, Maître de conférence (A) à l'université de Constantine d'avoir bien voulu assister et juger cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aux personnels de laboratoire de la station d'épuration de Batna et de laboratoire de chimie de l'université de Batna.

Je tiens à remercier le directeur du Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg Philippe Ackerer qui m'a bien accueilli dans son laboratoire et m'a permis de contacter des chercheurs dans le domaine de géochimie et la modélisation des écoulements souterrains et de surfaces, tels que Mr Gérard Schafer.

J'ai l'agréable tâche de 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 :

- A.N.R.H. de Constantine (service d'hydrologie et hydrogéologie) ;
- Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Mila ;
- Subdivisions d'hydraulique de Tadjenanet et de Chelghoum Laid.

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 tous les amis qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser cette thèse, je cite spécialement mes collègues du Département des sciences de la terre et de l'univers de l'université de Batna Derias T, Belkheri L ,Briniss N et Djenba S pour les bons moments passés ensemble et les échanges scientifiques ainsi que Mr Baghiani B, de département de biologie pour son aide pendant la campagne d'analyses chimique des eaux .

Mes remerciements les plus sincères vont également à ma famille pour son soutien moral et sa patience pendant les moments difficiles dans la réalisation de ce travail. Grâce à eux, les moments de découragement furent rares et brefs. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

GENERALITES ET ETAT DES CONNAISSANCES	N° Page
1. Introduction…….……..……..	**01**
2. Problématique…….....	**01**
3. Objectif et méthodologie…….……...	**02**
4. Caractères physico-géographiques…….……	**04**
4.1. Situation géographique…….……..	**04**
4.2. Orographie……..….....	**06**
4.3. Réseau hydrographique ……..……	**06**
4.4. Géomorphologie……..……	**06**
4.4 .1. Relief …….	**06**
4.4.2. Plaine …….….....	**07**
4.5. Végétation…….……...	**07**

CHAPITRE I : CADRE GEOLOGIQUE

1. Introduction ……..….....	**08**
2. Description générale des diverses unités géologiques ……..…..	**09**
2.1. Tertiaire et Quaternaire…….….....	**09**
2. 2. Eocène méridional……..	**09**
2.3. Eocène centrale ……..	**09**
2.4. Eocène inférieur……..……	**10**
2.5. Crétacé supérieur et ultra-supérieur…….....	**10**
2.6. Crétacé inférieur et moyen…….….....	**10**
2.7. Le Trias……..……..	**10**
3. Lithostratigraphie de la région d'étude…… ….…….....	**10**
3.1. Formations peu ou pas tectonisées …….....	**10**
3.1.1. Quaternaire……..……	**11**
a. alluvions récentes……..……..	**11**
b. Terrasses, formation de pente et Quaternaire indéterminé…… ….....	**11**
c. Glacis polygéniques……	**11**
d. Villafranchien : croûtes calcaires……...	**11**
e. Sebkha…….	**11**
f. Sols salés…….….....	**11**
g. Formations dunaires……..... …….	**11**
3.1.2. Mio – Pliocène continental……..	**11**

3.2. Formations tectonisées……..... **12**
3.2.1. Unité supérieure à matériel Eocène……..... **12**
3.2.2. Nappe du Djebel Sattor et unités Eocènes à Nummulites et à Huîtres ……..... **12**
a. Lutétien à Huîtres……..... **12**
b. Yprésien et Lutétien à débris…….. **12**
c. Yprésien et Lutétien à Nummulites…… **12**
d. Sénonien supérieur Lumachellique……...… **12**
3.2.3. Nappe néritique Constantinoise……...… **12**
a. Aptien calcaire…….……... **12**
b. Barrémien carbonaté……..……. **12**
c. Néocomien calcaire……. **13**
d. Jurassique carbonaté……..……. **13**
3.2.4. Ensemble allochtone Sud-Sétifien ……..…….. **13**
a. Miocène marin transgressif……. **13**
b. Barrémien…….…..... **13**
3.2.5. Trias exotique ou extrusif…….…..... **13**
3. Analyse structurale……..…..... **13**
3.1. Ensemble Allochtone Sud-Sétifien…….……. **13**
3.2. Unités du trias diapyrique.. ……..…….…..... **16**
3.3. Unités du Crétacé-Eocène…… **16**
3.4. Unités Mio-Pliocène transgressives……..... **17**
4. Description géologiques à partir des logs de forage et données géophysiques…….. **17**
5. Conclusion…….. **20**

CHAPITRE II : CADRE HYDROCLIMATIQUE

1. Introduction…….…….. …… **22**
2. Caractéristiques climatiques de la région d'étude……..… **22**
3. Etude des paramètres climatiques…… …… **23**
3.1. Précipitations……...……..... **23**
3.2. Coefficient pluviométrique…….. **25**
3.3. Les températures…….. **26**
3.4. Diagramme pluviothermique…….. **27**
3.5. Indice d'aridité…… ……..... **28**
3.6. Indice d'Euverte……... **29**
4. Etablissement du bilan hydrologique ……. **30**
4.1. Analyse des différents éléments du bilan……..... **30**
4.1.1. Précipitations .…….…… **30**
4.1.2. Evapotranspiration……..... **30**
4.1.2.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)……... **30**
4.1.2.2. Les réserves facilement utilisables (R.F.U)……..……. **31**
4.1.2.3. Evapotranspiration réelle……... **32**
4.1.2.3.1. Méthode de Thornthwaite……..…. **32**
4.1.2.3.2. Méthode de L. Turc…….……... **32**
4.1.2.3.3. Méthode de A. Coutagne……..….. **32**

4.1.3. Estimation du ruissellement et de l'infiltration……..... **33**
5. Analyse morphométrique…….…. **35**
5.1. Introduction……..... **35**
5.2. Variation de l'altitude……..…..... **36**
5.3. Forme du bassin……..……. **37**
5.4. Densité de drainage……..... **37**
5.5. Profil en long……..……. **38**
6. Conclusion……..... **38**

CHAPITRE III : GEOMETRIE DU COMPLEXE AQUIFERE

1. Introduction …….……..…. **40**
2. Situation de l'étude…….……..… **40**
3. Répartition des sondages électriques…….……..….... **41**
4. Interprétation…….……. **41**
4.1. Examen de quelques familles de S.E…….....…..……....…… **41**
4.1.1. Sondage électrique à l'extrême-Ouest, coupe A……....…. **42**
4.1.2. Sondage électrique étalon B3……..…….… **42**
4.2. Cartes de résistivité…….……...… **43**
4.2.1. Carte de résistivité AB = 200 m …….....…..... **43**
4.2.2. Carte de résistivité AB = 400 m…….……...…..... **44**
4.2.3. Carte de résistivité AB = 3000 m……..... **45**
4.3. Interprétation des Coupes géo électriques…….....……... **45**
5. Carte du substratum…….…… **49**
6. Carte de résistance transversale ……..... **49**
7. Conséquences hydrogéologique et conclusion…….…….. **50**

CHAPITRE IV : HYDROGEOLOGIE

1. Introduction…….……...… **52**
2. Aquifère du Mio-Plio- Quaternaire…….……...… **53**
2.1. Description ……...……... **53**
2.2. Géométrie de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire ……..… **53**
3. Piézométrie…….…. **54**
3.1. Inventaire des points d'eau…….…..……..... **54**
3.2. Conditions aux limites ……..……..… **55**
3. Interprétation de la carte piézométrique (Mai 2007)……..…… **55**
4. Interprétation de la carte piézométrique (Sep 2007)……..……..... **56**
5. Battement de la nappe……....…… **57**
6. Evolution de l'état piézométrique ……....….. **58**
6.1. Interprétation de la carte piézométrique (Mai 2013) ……..… **58**
6.2. Evolution spatio-temporelle de l'état piézométrique de l'aquifère ……....…… **59**
7. Carte d'égale épaisseur de la couche mouillée……..……..….. **60**
8. Les caractéristiques hydrodynamiques …….……....…. **61**
8.1. Interprétation des données……..…. **61**

8.2. Courbe de remontée……..…….... **61**
9. Répartition de la transmissivité et de la perméabilité……. **63**
9.1. Carte de transmissivité …… **63**
9.2. Carte de perméabilité……..……...…. **64**
10. Conclusion ……..……..…. **65**

MODELISATION

1. Introduction…….....…. **66**
2. Formulations mathématiques…….…. **67**
2.1. Loi de Darcy ……... **67**
2.2. Equation de conservation de la masse……..……... **68**
2.3. Equations d'état…….…….…. **68**
2.4. Equation de diffusivité……..…… **69**
2.5. Résolution par les différences finies…….……... **69**
3. Conditions initiales et conditions aux limites……..……. **71**
3.1. Conditions initiales…….……. **71**
3.2. Conditions aux limites……...…… **71**
4. Les étapes de l'élaboration du modèle…… **72**
4.1. Introduction des données……..……... **72**
4.2. Calage du modèle……..…….. **72**
4.3. Exploitation du modèle…….……... **72**
5. Application du modèle en 3d au système aquifère…….…… **73**
5.1. Introduction…….. **73**
5.2. Objectifs…….……..…… **73**
5.3. Discrétisation du domaine……..……. **74**
5.4. Données initiales…….…… **74**
5.5. Calage du modèle en régime permanent…….……..... **75**
5.5.1. Optimisation du champ de la perméabilité……... **76**
5.5.2. Bilan hydrogéologique issu du calage……..... **77**
6. Exploitation du modèle et simulation……. **78**
7. Conclusion……..…. **83**

CHAPITRE V : HYDROCHIMIE

1. Introduction…….....……. **84**
2. Matériels et moyens d'analyse……..... **84**
3. Caractéristiques physico-chimiques…….…….. **85**
3.1. Caractérisation des eaux de l'aquifère……..... **85**
3.2. Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques……..... **87**
3.2.1. Paramètres physiques……..... **87**
3.2.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH)…….. **87**
3.2.1.2. La conductivité électrique……..... **88**
3.2.2. Paramètres chimiques…….……. **89**
3.2.2. 1. Le calcium…….…….. **89**
3.2.2. 2. Le magnésium……....…….. **90**

3.2.2. 3. Le sodium……..…… **91**
3.2.2. 4. Les bicarbonates…….…….. **92**
3.2.2.5. Les chlorures……..... **93**
3.2.2.6. Sulfates……...……. **94**
3.2.2.4. Les nitrates…….…… **95**
3.2.2.4.1. Evolution spatiale des nitrates…….…….. **97**
3.2.2.4.2. Influence de la profondeur de l'eau sur la teneur en nitrates…….…… **97**
3.2.2.5. Nitrites……... **98**
3.2.2.6. Ammonium…….……... **99**
3.2.2.7. Phosphates……..……... **99**
3.2.3. Evolution spatiale des fores azotées……..……... **99**
4. Faciès chimique des eaux…….…….. **100**
4.1. Diagramme de SCHOELLER-BERKALLOF……. **100**
4.2. Diagramme de PIPER…….……. **102**
4.3. Répartition spatiale des faciès chimiques…….……... **103**
5. Analyse statistique des données physico- chimiques……..……... **105**
5.1. Corrélation entre les éléments……..……... **106**
5.2. Analyse en composantes principales…….…..... **110**
5.2.1. Choix de la méthode……...…….. **110**
5.2.2. Résultats et interprétations……...……. **110**
6. Equilibres chimiques et indices de saturation……. **113**
6.1. Degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral……..…… **113**
6.2. Etat des minéraux dissouts dans l'eau……..…… **114**
7. Aptitude des eaux à l'irrigation…….....……... **117**
7.1. Introduction……..... **117**
7.2. Risque de sodicité et de salinité (Méthode de Richard)……..……... **117**
7.3. Classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau…….. **119**
8. Etude de la potabilité des eaux…….…..……... **121**
8.1. Introduction……..... **121**
8.2. La salinité…… **121**
8.3. La dureté totale…… **122**
8.4. Potabilité des eaux……..... **122**
9. Conclusion……..... **124**

CHAPITRE VI : VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA NAPPE ALLUVIALE

1. Introduction …….……... **125**
2. Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité…….…….. **125**
3. Vulnérabilité de la nappe alluviale par la méthode DRASTIC……..…… **126**
3.1. Présentation de la méthode DRASTIC…….……... **126**
3.2. Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques……... **129**
3.2 .1. Profondeur de la nappe (D)……..…….. **129**
3.2 .2. La recharge efficace (R)……...…….…….. **130**

3.2 .3. Nature de la zone saturée (A)…….....…. **131**
3.2 .4. La nature du sol (S)…… ……...……. **132**
3.2 .5. La topographie (T)……..…… **134**
3.2 .6. Nature de la zone non saturée (I)…….……... **135**
3.2 .7. Conductivité hydraulique (C)……..…… **136**
3.3. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution)……... **137**
4. Vulnérabilité de la nappe alluviale par la méthode de l'indice de contamination…..... **139**
4.1. Présentation de la méthode…….…. **139**
4.2. Carte de la vulnérabilité à la pollution……...……..… **140**
5. Conclusion……..……..….. **141**

CHAPITRE VII : IMPACT DES EAUX USEES SUR LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUEDES EAUX SOUTERRAINES ET EAUX DE SURFACE

1. Introduction…….…… **142**
2. Pollution d'oued Rhumel……...…. **142**
3. Différentes sources de pollution……...…… **143**
3.1. Pollution agricole……...…. **143**
3.2. Pollution d'origine domestique ……..... **143**
3.3. Pollution d'origine industrielle……...……. **143**
4. Caractérisation de la pollution……..... **143**
4.1. Sites d'échantillonnage……...……. **143**
4.2. Résultats des analyses physicochimiques……...……..... **145**
5. Evolution de la pollution……...… **146**
6. Interaction eaux de surface- eaux souterraine…….…. **147**
7. Conclusion…….....…. **148**
CONCLUSION GENERALE…….…….....…. **149**
RECOMMANDATION……..…...…….…. **153**
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE…….…….....…. **154**
ANNEXE……..……...…… **160**

Liste des figures

N° de figure	Titre	Page

Figure.1 Localisation du sous bassin du Tadjenanet – Chelghoum Laid …… ……... **4**

Figure.2 Localisation du barrage Hammam Grouz à l'aval de la plaine (image satellitaire)…….**5**

Figure.3 Localisation de la zone d'étude sur le plan régional …….. **5**

Figure.4 Réseau hydrographique de la région d'étude …… **6**

Figure 5. Schéma structural de la méditerranée occidentale. (M. Durand Delga, 1969)……**8**

Figure.6 Carte géologique de la région d'étude- d'après J.M.VILA (1980) Extrait de la carte de Sétif - 1/200000 ……... **14**

Figure.7 Carte géologique du sous bassin de Tadjenanet - Chelghoum Laid Selon J .M.Villa 1980.....**15**

Figure.8 Coupes géologiques à travers la région d'étude ……. **15**

Figure.9 Extrait de la carte tectonique de M.Keiken 1962 ……. **16**

Figure.10 Description lithologique à partir des logs des forages implantés dans le terrain d'étude……**20**

Figure.11 Carte bioclimatique de l'Est Algérien (Cote M., 1998) …… **23**

Figure.12 Répartition saisonnière des précipitations. Station de Hammam Grouz……. **24**

Figure.13 Variation des précipitations moyennes mensuelles ……. **24**

Figure.14 Variations des précipitations moyennes interannuelles.Station Hammam Grouz (1988/89 - 2003/2004)…….. **25**

Figure.15 Variation des températures moyennes mensuelles (1988 - 2004)…….. **27**

Figure.16 Variations des températures moyennes interannuelles…… **27**

Figure.17 Diagramme ombro-thermique ……..**28**

Figure.18 Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone …… **29**

Figure.19 Bilan hydrique simplifié de la station de Hammam Grouz (1988/1989 - 2003/2004)…… **34**

Figure.20 Bloc diagramme du bassin versant de Tadjenanet – Chelghoum laid……**36**

Figure.21 Courbe hypsométrique du sous bassin de Tadjenanet – Chelghoum Laid ……..**37**

Figure.22 Profil en long de l'amont de Oued Rhumel et ses affluents …….. **38**

Figure.23 Carte de position des sondages électriques dans la plaine de Tadjenanet-Chelghoum Laid..**41**

Figure.24 Courbe du sondage électrique A5. ……... **42**

Figure.25 Courbe du sondage électrique d'étalonnage B3…… **43**

Figure.26 Carte de résistivité AB = 200 m……. **44**

Figure.27 Carte de résistivité AB = 400 m ……..**44**

Figure.28 Carte de résistivité AB = 3000 m…… **45**

Figure.29 Coupes géoélectriques A, C, D et E …… **47**

Figure.30 Coupes géoelectriques B' ,C',D' et E' ……**48**

Figure.31 Carte du substratum ……**49**

Figure.32 Carte de la résistance transversale ……**50**

Figure.33 Coupe hydrogéologique …….. **54**

Figure.34 Carte d'inventaire des points d'eau ……... **55**

Figure.35 Carte piézométrique. Mai 2007 …….. **56**

Figure.36 Carte piézométrique. Septembre 2007 ……... **57**

Figure.37 Carte de battement de la nappe ……....**58**

Figure 38. Carte piézométrique. Mai 2013 …….....…….**59**

Figure 39. Evolution spatio- temporelle de la piézométrie selon le sens d'écoulement……**60**

Figure.40 Carte d'égale épaisseur de la couche mouillée ……**60**

Figure.41 Essai de pompage – courbes de remontée …….....**62**

Figure.42 Carte de transmissivité en 10^{-4} m^2/s …….. **64**

Figure.43 Carte de perméabilité en 10^{-4} m /s …….. **64**

Figure.44 Résolution par modèle des problèmes hydrogéologiques……..**67**

Figure 45. Bilan des flux sur une maille (i)……**70**

Figure.46 Discrétisation de la zone d'étude ……... **75**

Figure.47 Reconstitution de l'état piézométrique en régime permanent ……**76**

Figure.48 Carte de la perméabilité de la nappe issue du modèle ……... **77**

Figure.49 Bilan hydrique de la nappe alluviale de Tadjenanet – Chelghoum Laid issu du modèle en régime permanant ……... **78**

Figure 50. Reconstitution de l'état piézométrique en régime transitoire. Mai 2013……**79**

Figure.51 Simulation d'une exploitation à long terme ……. **80**

Figure.52 Evolution temporelle de la piézométrie (scénario 1) ……. **80**

Figure.53 Bilan hydrique de la nappe alluviale de Tadjenanet – Chelghoum Laid issu du modèle en

régime transitoire …… **81**

Figure.54 Carte piézométrique résultant du deuxième scénario…….. **82**

Figure 55. Carte piézométrique résultant du troisième scénario ……..…**82**

Figure.56 Carte d'inventaire des points d'eau ayant fait l'objet d'une analyse physico- chimique…...**85**

Figure.57 Coefficient de variation des variables physico-chimiques mesurées des eaux souterraines..**86**

Figure.58 Carte du pH ……. **88**

Figure .59 Carte de la conductivité électrique ……..**89**

Figure.60 Carte de calcium ……**90**

Figure.61 Carte du magnésium …….. **91**

Figure .62 Carte de sodium …… **92**

Figure.63 Carte des bicarbonates …… **93**

Figure .64 Carte des chlorures …… **94**

Figure .65 Carte des Sulfates …….. **95**

Figure.66 Cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991) ……... **96**

Figure.67 Carte des nitrates …….. **96**

Figure.68 Evolution spatiale des nitrates selon l'écoulement ……. **97**

Figure.69 Relation nitrate – profondeur de l'eau ……...**98**

Figure.70 Mécanisme de la pollution de l'eau par les nitrates. Julien, 2003 ……**98**

Figure.71 Evolution spatiale des formes azotées et les phosphates selon l'axe d'écoulement…….. **99**

Figure.72 Diagramme de Schoeller-Berkallof. Mai 2000……**101**

Figure.73 Diagramme de Piper. Mai 2007…… **102**

Figure.74 Répartition des faciès chimiques selon les rapports caractéristiques ……. **103**

Figure.75 Carte des faciès chimiques .Mai 2007 ……... **104**

Figure.76 Répartition spatiale des faciès chimique de la nappe alluviale .Mai 2007…….. **105**

Figure.77.A. Corrélation entre la conductivité électrique et quelques éléments chimiques majeurs...**108**

Figure.77. B. Corrélation significative entre quelque élément chimique…….. **109**

Figure.78 Cercle de corrélation et répartition des variables……..**113**

Figure.79 Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux

souterraines de la nappe alluviale…… **116**

Figure.80 Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR ……. **118**

Figure.81 Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la méthode de Richard .Mai 2007…….. **119**

Figure.82 Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox ……... **120**

Figure.83 Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la méthode de Wilcox **.**Mai 2007……**121**

Figure.84 Diagramme de potabilité des eaux de la nappe alluviale Tadjenanet- Chelghoum Laid – Normes Algérienne selon Boudoukha et al. 1999 ……**123**

Figure.85 Carte indicielle : profondeur de l'eau .Mai 2007……. **130**

Figure.86 Carte indicielle : Recharge efficace ……... **131**

Figure.87 Carte indicielle : Matériau aquifère …….. **132**

Figure.88 Carte indicielle : Type du sol ……..**133**

Figure. 89 Carte indicielle : Pente du terrain …….. **134**

Figure.90 Carte indicielle : Impact de la zone non saturée ……. **136**

Figure.91 Carte indicielle : Conductivité hydraulique …….. **137**

Figure.92 Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tadjenanet – Chelghoum Laid selon la méthode DRASTIC …….. **138**

Figure.93 Carte de l'indice de contamination ……. **140**

Figure.94 Carte de vulnérabilité à la pollution selon la méthode de l'indice de contamination…... **141**

Figure.95 Carte d'inventaire des points de prélèvement des eaux de surface. Mai2007 et les différentes sources de pollution dans la région d'étude …….. **145**

Figure.96 Photos représentant les stations de prélèvements des eaux de surface …… **145**

Figure.97 Evolution spatiale des éléments de pollution des eaux de surface sur le long de Oued Rhumel …… **147**

Figure.98 Interaction eau de surface –eau souterraine à l'aval d'Oued Rhumel ……..…….. **148**

Liste des tableaux

N° du tableau	Titre	Page
Tableau.1	Coordonnées de la station climatologique de Hammam Grouz……	**22**
Tableau.2	Les précipitations moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles. Station de Hammam Grouz 1988/89 à 2003/04 ……..	**23**
Tableau.3	Les précipitations et températures moyennes annuelles à la station de Hammam Grouz 1988/89 à 2003/04 ……	**25**
Tableau.4	Coefficient pluviométrique……	**26**
Tableau.5	Les températures moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles à la station de Hammam Grouz. 1988/89 à 2003/04 ……..	**26**
Tableau.6	Indice d'Euverte à la station de Hammam Grouz. 1988/89 à 2003/04 ……..	**29**
Tableau.7	Evapotranspiration potentielle mensuelle. Station de Hammam Grouz. 1988/89 à 2003/04 …….	**31**
Tableau.8	Calcul de l'ETR par les différentes méthodes ……	**33**
Tableau.9	Bilan hydrologique de la station de Hammam Grouz (1988-2004) selon la relation de Thornthwaite ……	**34**
Tableau.10	Répartition altimétrique du bassin versant de Tadjenanet – Chelghoum Laid……	**37**
Tableau.11	Calage du SE B3 sur les données du forage de Chabet Rmali ……..	**44**
Tableau.12	Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère superficiel …….....	**63**
Tableau.13	Bilan hydrique calculé en régime permanant……...	**78**
Tableau.14	Bilan hydrique calculé en régime transitoire ……	**80**
Tableau.15	Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques des eaux la nappe alluviale de Tadjnanet- Chelghoum Laid**.** Mai2007……	**86**
Tableau.16	Estimation de la qualité de l'eau selon le pH ……...……..	**87**
Tableau.17	Répartition des teneurs en nitrates dans la région d'étude. Mai 2007……...	**97**
Tableau.18	Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson……..	**106**
Tableau.19	Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'aquifère Tadjenanet-Chelghoum Laid ……	**107**
Tableau.20	Caractéristiques de l'ACP appliquée aux données physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale ……	**111**

Tableau.21 Corrélations variables – facteurs ……...**111**

Tableau.22 Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans l'eau ……. **115**

Tableau.23 Classification des eaux souterraines de la région de Tadjenanet-Chelghoum Laid selon les valeurs de TDS (Davis et De Wiest, 1967) …….. **121**

Tableau.24 Classification de l'eau selon la dureté totale …….. **122**

Tableau.25 Méthodes d'estimation de la vulnérabilité choisies ……. **126**

Tableau.26 Poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al, 1987) ……... **127**

Tableau.27 Classes et notes des sept paramètres (Lallemand- Barèes .1994)..... **128**

Tableau.28 Notation et pondération selon la profondeur …….. **.129**

Tableau.29 Notation et pondération du paramètre de la recharge ……. **130**

Tableau.30 Notation et pondération du matériau aquifère ……. **131**

Tableau.31 Notation et pondération de la nature du sol …… **133**

Tableau.32 Notation et pondération du facteur de la pente ……... **134**

Tableau.33 Notation et pondération de la zone non saturée …….. **135**

Tableau.34 Notation et pondération de la conductivité hydraulique …….. **136**

Tableau.35 Intervalle des classes de l'indice de contamination ……. **139**

Tableau.36 Indice de contamination …….. **140**

Tableau.37 Résultats d'analyses chimiques des eaux de surface…… **146**

GENERALITES ET ETAT DES CONNAISSANCES

GENERALITES

1. Introduction

Les besoins de l'homme en eau augmentent considérablement dans le temps et touchent des domaines de plus en plus nombreux pour satisfaire ses exigences de confort et d'agrément et pour répondre à une demande économique croissante. Cependant, les ressources en eau sont inégalement réparties dans le monde. L'eau douce, celle qui est essentielle à nos besoins, ne représente que 1 % du total des eaux présentes sur Terre, le reste étant formé par les eaux salées des mers et des océans. L'eau douce est donc un capital limité, renouvelable mais fragile, car menacé par une consommation croissante et par de multiples pollutions.

L'eau utilisable par l'homme se présente sous 3 formes : l'eau de pluie, les eaux de surface (les fleuves, les lacs, etc.) et les eaux souterraines. Dans les régions arides et semi arides, il est nécessaire de chercher l'eau dans les profondeurs de la terre à l'aide de puits ou de forages, parfois très profonds. Dans les pays à climat non désertique, où les ressources en eau sont issues des eaux de pluie et de surface, elles sont captées à l'aide de barrages et de retenues collinaires.

L'eau, cette ressource rare et vulnérable reste parmi les principales préoccupations de notre pays, durant ces dernières décennies. La rareté de cette denrée nous a incité à adopter les techniques d'investigation plus modernes pour sa protection, vu les méconnaissances des potentialités aquifères, leurs exploitation et leur gestion anarchiques.

2. Problématique

La région de ‘’Tadjenanet – Chelghoum Laid’’ est située en Algérie orientale dans les hautes plaines sétifiennes à environ 60 km au Sud du chef-lieu de la wilaya Mila. Il s'agit d'une plaine de superficie de 1000 km² environ, de nature lithologique hétérogène, caractérisée par un matériel détritique varié d'âge Mio-Plio- Quaternaire. Certaines formations peuvent constituer un réservoir important d'eau souterraine (alluvions, sable, calcaire lacustre, gravier).

Sa situation en zone semi-aride implique une évaporation prononcée à même de basculer le bilan dans un déficit chronique, hormis les périodes caractérisées par des épisodes pluvieux.

La vocation agricole de la région depuis l'époque coloniale, lui donne une importance considérable dans ce domaine. D'autre part, la dispersion de la majorité des populations dans les zones rurales, impose une implantation tout aussi diffuse des puits d'exploitation d'eau souterraine et leur éloignement des grandes villes, pousse la population à se focaliser sur l'activité agricole.

La diversification des cultures et la croissance des vergers sur la plaine ainsi que l'accroissement des populations ont eu pour conséquences une augmentation des besoins en eau pour l'irrigation et pour les besoins domestiques. Par conséquent le nombre de puits n'a cessé d'augmenter d'une année à l'autre avec une demande croissante à cause de l'implantation de forages de profondeur moyenne ainsi que l'implantation anarchique des puits à usage individuel. Ceci a conduit à une mauvaise gestion des potentialités hydriques de la région. Cette situation exige une étude approfondie des possibilités hydrauliques du système aquifère de la plaine de Tadjenanet – Chelghoum Laid, ainsi que l'effet de l'agriculture, l'installation des différentes unités industrielles dans les deux villes, Tadjenanet et Chelghoum Laid. Cette situation peut entrainer un risque de pollution de nature diverse, agricole, industrielle et domestique des eaux souterraine ainsi que des eaux de surface (barrage de Oued el Athmania situé à l'aval de la plaine). Cette situation est aggravée par l'absence de stations d'épurations dans la région et que tous les rejets des eaux usées sont déversés dans l'oued du Rhumel sont aucun traitement préalable.

3. Objectif et méthodologie

Notre tâche s'est limitée à une exploration sur terrain du réservoir aquifère superficiel de la région de Tadjenanet –Chelghoum Laid, afin d'acquérir les données nécessaires, à cet effet. On essayera à partir d'un traitement statistique et cartographique, de donner une vision meilleure sur l'évolution des caractéristiques hydrodynamiques et chimiques des eaux souterraines de la région. On abordera également des techniques géophysiques, hydrodynamiques et hydrochimiques, permettant l'appréciation de la vulnérabilité de ce système aquifère.

L'agriculture dans notre région d'étude représente la première activité socio-économique et la plus consommatrice des ressources hydriques. Il est donc nécessaire de la prendre en compte pour assurer une gestion efficace de l'eau. En effet la combinaison de la cartographie géologique, géophysique, hydrogéologique et hydrochimique des données récoltées sur terrain et leurs interprétations, peut constituer un excellent outil pour

appréhender les grandes potentialités aquifères, leur répartition spatiale ainsi que leur degrés de vulnérabilité aux diffèrent types de pollutions naturelle ou anthropique.

L'effet des changements climatiques a un impact sur le renouvellement des réserves souterraines d'où la nécessité d'élaborer un modèle mathématique pour une bonne gestion des ressources dans la plaine en fonction des variations climatiques qui affectent le bilan hydrologique et en fonction de l'augmentation des besoins avec l'accroissement de la population et des activités économiques. Pour atteindre ces objectifs, nous avons adopté la méthodologie suivante :

- Dans une première étape : nous avons procédé à un inventaire complet de tous les points d'eau (forage et puits), captant l'aquifère alluvial du Mio-Plio-Quaternaire ;
- Dans une deuxième étape : afin de définir l'évolution spatio- temporelle de la piézométrie de l'aquifère en fonction des conditions climatiques, nous avons réalisé deux compagnes piézométriques, l'une à fin de la période des hautes eaux (Mai 2007), et l'autre à la fin de la période de basses eaux (Septembre 2007).

Par ailleurs, nous signalons qu'une série d'essais de pompage a été réalisée durant la période de Mai 2007.

Dans une dernière étape qui correspond à la dernière phase de la récolte des données: nous avons effectué des prélèvements d'échantillon d'eau pour effectuer des analyses chimiques des eaux souterraines de cet aquifère.

La dernière étape de notre travail, correspond à l'interprétation des données.

Le présent manuscrit se compose de six chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons le cadre géologique dans lequel nous avons abordé la lithologie et la structure du terrain ;

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons les paramètres hydroclimatiques afin de quantifier les différentes composantes du bilan ;

Dans le troisième chapitre, nous étudierons la géométrie de l'aquifère par l'intermédiaire de l'analyse de la prospection électrique qui a été effectuée dans la région ;

L'étude hydrogéologique a été abordée dans le quatrième chapitre, afin d'évaluer les potentialités de cet aquifère par une modélisation de son comportement hydrodynamique;

Dans le cinquième chapitre, nous traiterons le chimisme des eaux souterraines de cet aquifère et son évolution spatiale à l'aide de la cartographie hydrochimique;

Dans le sixième chapitre, nous présenterons le concept de la cartographie de la vulnérabilité à la pollution.

Le dernier chapitre sera consacré à l'étude de l'impact des eaux usée sur la qualité physicochimique des eaux souterraines et eaux de surface.

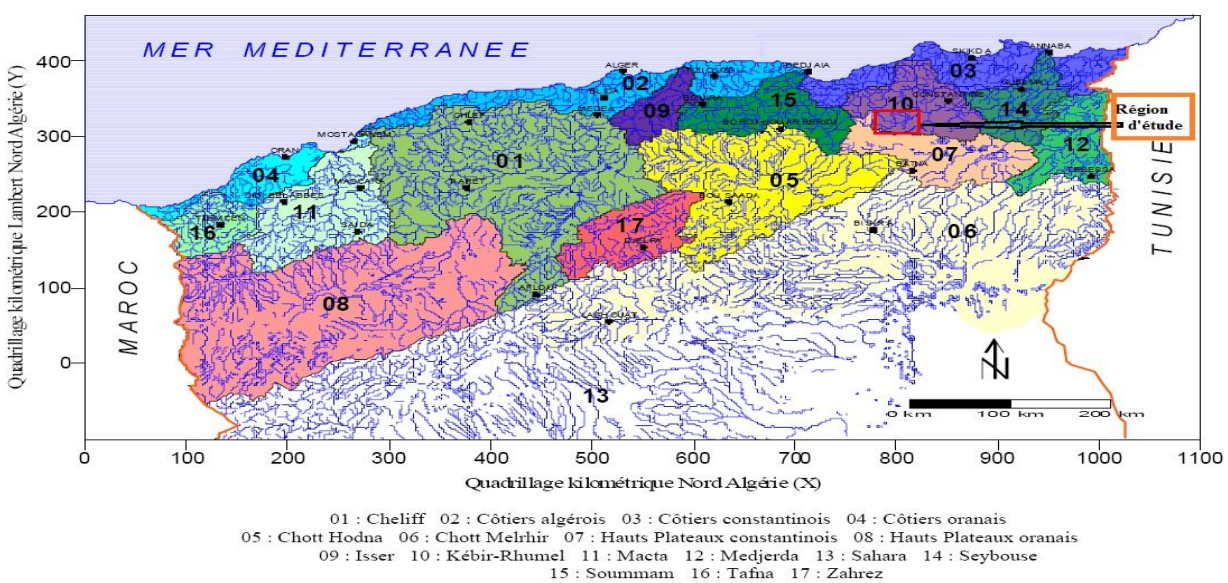
Finalement, nous donnerons une conclusion générale de cette étude, dans laquelle, nous mettrons en évidence les résultats auxquels nous avons abouti, d'autre part nous proposerons sur la base de ces résultats, des solutions adéquates pour préserver cette ressource, ainsi qu'un programme de travail complémentaire pour une éventuelle étude supplémentaire.

4. Caractères physico-géographiques

4.1. Situation géographique

La région explorée fait partie de la zone occidentale du grand bassin versant de Kébir Rhumel situé à l'Est Algérien (fig.1, 2 et 3). Cette plaine est située à 60 km environ au sud ouest du chef lieu de la wilaya de Mila. Au Nord, elle est limitée par la commune de Benyahia Abderrahmane, au Sud par la commune de Oueled Khlouf , à l'Est par Oued Athmania et à l'Ouest par Bir El Arch. Cette région, a une superficie d'environ 1000 km^2 et administrativement, elle est rattachée à la wilaya de Mila.

La région est traversée par un cours d'eau appelé Oued Rhumel qui traverse la plaine d'Ouest en Est ; il prend sa source vers 1 160 m dans les marges méridionales du Tell, au Nord-Ouest de Bellaa. Il draine, suivant une orientation Sud-Ouest–Nord-Est, la région Tadjenanet-Chelghoum Laid, puis franchit le Rocher de Constantine en s'encaissant profondément (200 m de dénivellation) dans des gorges calcaires de Constantine.La région est caractérisée par un climat semi-aride, avec un hiver pluvieux et froid et un été sec et chaud.



01 : Cheliff 02 : Côtiers algérois 03 : Côtiers constantinois 04 : Côtiers oranais
05 : Chott Hodna 06 : Chott Melrhir 07 : Hauts Plateaux constantinois 08 : Hauts Plateaux oranais
09 : Isser 10 : Kébir-Rhumel 11 : Macta 12 : Medjerda 13 : Sahara 14 : Seybouse
15 : Soummam 16 : Tafna 17 : Zahrez

Figure 1. Localisation du sous bassin du Tadjenanet – Chelghoum Laid



Figure 2. Localisation du barrage Hammam Grouz à l'aval de la plaine (Image satellitaire)



Figure 3. Localisation de la zone d'étude sur le plan régional

4.2. Orographie

La plaine est caractérisée par la présence de quelques massifs carbonatés tel que Djebel Tnoutit (1170 m), Djebel Chebka (1044 m) et Maazoula El-Guablia (984 m). On remarque également la présence de quelques collines réparties à travers la plaine.

4.3. Réseau hydrographique

De point de vue hydrographique la zone étudiée correspond à la haute vallée de l'Oued Rhumel, bassin presque circulaire, fermé en aval par l'extrémité orientale de Dj.Grouz. Elle est drainée par oued Rhumel qui ne coule qu'à la faveur des précipitations à l'amont du barrage. Il a donc un écoulement temporaire de direction Ouest – Est, sa pente est régulière avec 830 m d'altitude à Tadjenanet, 720 m avant Hammam Grouz, et 760 m à mi-distance aux environs de Chelghoum Laid. (Fig.4). A l'amont du barrage, les ressources souterraines du bassin assurent à l'oued Rhumel, à l'aval du barrage, un soutien en période d'étiage de 90 à 100 l/s en moyenne. (ANRH de Constantine).

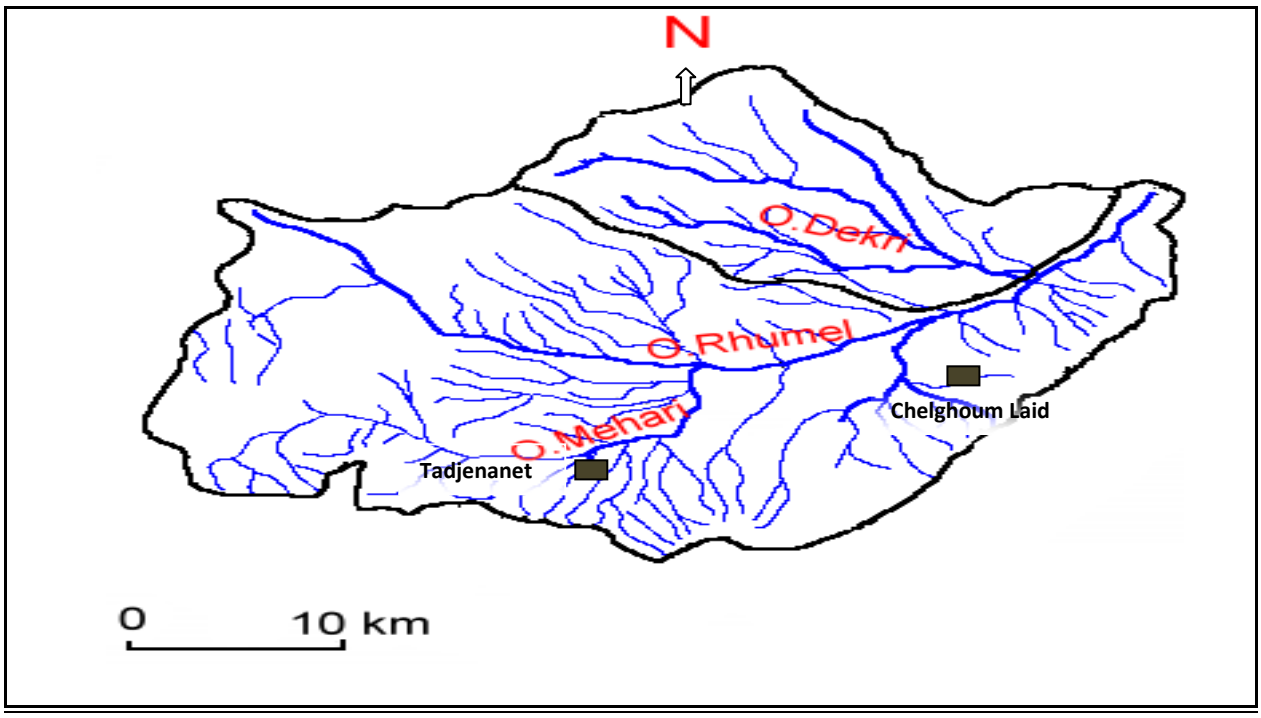


Figure 4. Réseau hydrographique de la région d'étude

4.4. Géomorphologie

Du point de vue géomorphologique, on distingue les trois formes.

4.4 .1. Relief

La région étudiée présente des reliefs importants avec une altitude comprise entre 1044 m et 1170 m, caractérisant la partie Sud et Sud Est du terrain. Il s'agit des massifs

carbonatés de Djebel Tnoutit, Djebel ed Dess , Djebel Grouz ,Djebel Tikouya et Djebel Chebka.

4.4.2. Plaine

Sur le plan géologique, la plaine est caractérisée par une large dominance des formations quaternaires (alluvions et terrasses, glacis souvent encroûtés) et Mio-Pliocènes (argiles et marnes, avec niveaux de calcaires lacustres, grès et conglomérats). La majorité du terrain étudié est caractérisé par une surface relativement plane dont la pente n'excède pas 10 %, avec des altitudes qui varient entre 700 m à l'Est et 930 m à l'Ouest. Cette disposition topographique favorise le ruissellement des eaux de surface vers les dépressions de l'Ouest vers l'Est.

4.5. Végétation

L'aspect général de la région est typique des hautes plaines sétifiennes à paysage faiblement vallonné, de grandes étendues sans reliefs et de teinte généralement rougeâtre. Région à climat beaucoup plus continental et semi-aride, est en grande partie cultivée par des céréales. Seuls quelques lambeaux de forêts de chêne vert, à l'état de broussailles, sont localisés sur les éminences calcaires. L'affleurement des formations carbonatées du Crétacé sont en majeure partie dénudées. La région au printemps n'est qu'un immense tapis vert, à l'automne après les labours il n'y a plus qu'une seule couleur, le brun rougeâtre de l'argile interrompue par des taches claires ou grises de la croûte calcaire récente.

.

CHAPITRE I

CADRE GEOLOGIQUE

CADRE GEOLOGIQUE

1. Introduction

L'étude géologique a pour but de préciser succinctement les terrains rencontrés et leur contexte géologique. La feuille au 1/200.000 de Sétif fournit à l'exception de la chaîne calcaire Kabyle et du socle Kabyle, et à partir de l'étude originale menée par Vila (1980), une série très complète des unités de l'orogène alpin d'Algérie orientale.

Du Nord au Sud et de haut en bas, cet édifice a pu être distingué (fig. 5):

- Le domaine des flyschs ;
- Le domaine tellien ;
- Le domaine néritique de la plate forme Sétifienne ;
- Les domaines parautochtones et autochtone hodnéen.

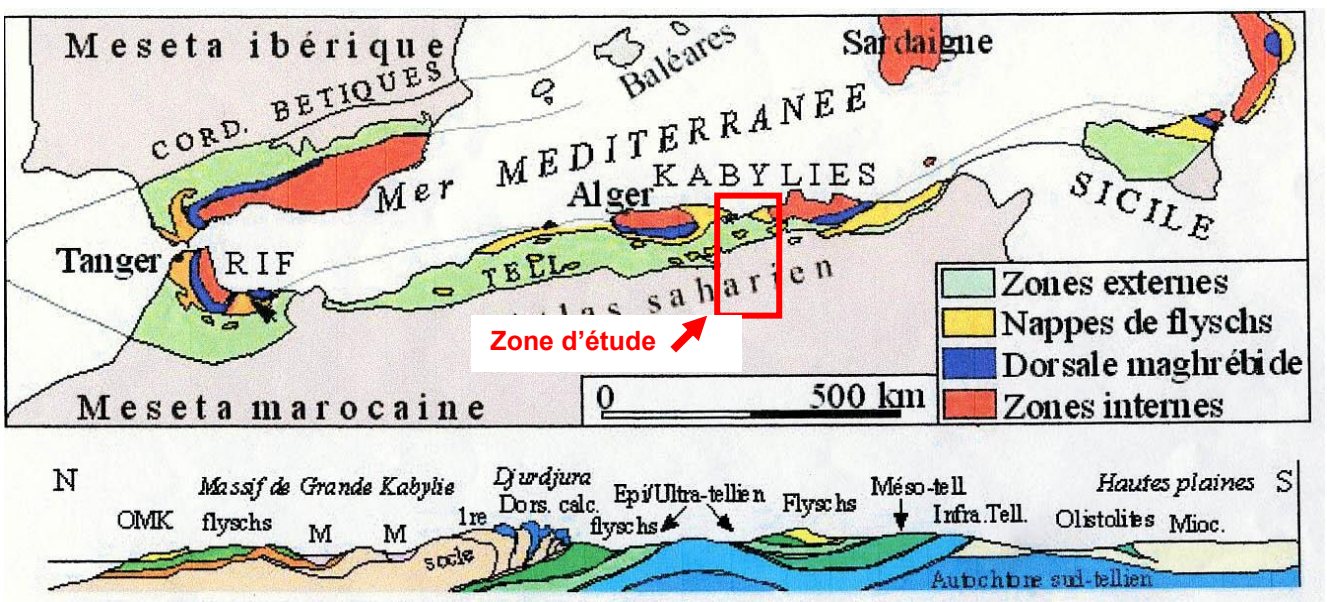


Figure 5. Schéma structural de la méditerranée occidentale.
(M. Durand Delga, 1969)

Au domaine des flyschs doivent être rattachées : la nappe numidienne, la nappe du flysch mauritanien et la nappe du flysch Massylien.

Au domaine tellien appartiennent plusieurs unités : la nappe ultratéllienne, la nappe de type Barbacha, la nappe de type Draa El-Arba, la nappe de type Beni-Abdellah, l'unité supérieure à matériel Eocène , la nappe Bibanique , la nappe de Djemila et l'unité inférieur à matériel Eocène, la nappe du Djebel Sattor, les unités à matériel Eocène et à Huître et la nappe péni-tellienne.

Dans la plate forme allochtone, la nappe néritique Constantinoise est relayée vers l'Ouest

par l'ensemble allochtone Sud sétifien. La région de Tadjenanet – Chelghoum Laid est située à cheval entre le domaine tellien au Nord et hodnéen au Sud.

Du point de vue stratigraphique, les formations rencontrées sont en majeur partie d'origine continentale et lacustre.

2. Description générale des diverses unités géologiques

L'examen des travaux de Vila 1980 et Durozoy 1960, ainsi que les logs stratigraphiques des forages implantés dans le terrain d'étude, ont permis de visualiser les différentes séries stratigraphiques. Les principaux affleurements rencontrés dans la région d'étude sont de haut en bas:

- Les terrains récents du Quaternaire.
- le Miocène et le Pliocène,
- l'Eocène inférieur,
- le Crétacé supérieur et moyen
- le Trias

2.1. Tertiaire et Quaternaire

Le Miocène inférieur est formé de minces lambeaux d'argiles gréseuses se trouve tout à fait au Sud de la zone étudiée. Les terrains du Miocène supérieur (Pontien), Pliocène et Quaternaire, sont tous d'origine continentale. On n'y retrouve pas la continuité latérale classique des terrains sédimentaires marins. Il s'agit essentiellement d'argiles rouges dans lesquelles s'étendent des bancs de calcaires lacustres, grés et conglomérat, toujours restreints en épaisseur et en étendue, avec changements latéraux de faciès rapides. Les argiles, en certains endroits (Nord-Ouest, vers le Dj. Ed Dess, au Sud-est du Dj.Grouz et autour des affleurements éocènes, contiennent de nombreux blocs ou cailloutis ou débris de silex. Vers le Sud-est de la zone étudiée, contre le relief qui s'étend du Dj.Chebka au Dj.Tikouya, nous avons constaté un redressement, jusqu'à la verticale des couches tertiaires. En surface, il existe assez souvent une couche dure, calcaire englobant des cailloutis, de quelques mètres au plus, appelée croûte calcaire.

2. 2. Eocène méridional

A la base se trouvent des calcaires massifs cristallins à nombreuses Nummulites (150m), au sommet se trouvent des marnes jaunes.

2.3. Eocène centrale

Entre Tadjenanet et Chelghoum Laid, à Draa Mestaoua et Karouach à la base de Thanétien, Yprésien et Lutétien inférieur, se trouve une assise de calcaire gris et de calcaire marneux à silex (280 m), se débitant à l'affleurement, en blocs décimétriques. Au

sommet (Lutétien supérieur) se trouvent des marnes jaunes (300 m), gypseuses parfois. Durozoy, 1960.

2.4. Eocène inférieur

La lithologie de cette série est différente suivant que nous la considérons au centre de la zone étudiée ou au Sud.

2.5. Crétacé supérieur et ultra-supérieur

Cette série est subdivisée par les géologues en de nombreux étages (Cénomanien supérieur, Emschérien-Santonien-Auturien, Maestrichtien, Montien. Ces deux derniers regroupés parfois sous le terme de Dano-Montien. Elle est essentiellement marneuse et argileuse, et probablement très épaisse (centaine de mètres). Au Sud du dj Chebka, elle est gypseuse. Le Maestrichtien est calcaire dans l'extrême Ouest de la zone. Ces niveaux sont notés par Durozoy (1960), dans sa carte géologique de Tadjenanet, intercalés entre les écailles des calcaires éocènes au voisinage de la RN 5 entre Tadjenanet et Chelghoum Laid.

2.6. Crétacé inférieur et moyen

Le Crétacé constitue une unité épaisse de 500 à 1000 mètres (ou plus, si l'on considère les calcaires jurassiques sous-jacents) de nature calcaire pour l'essentiel. Ces calcaires sont massifs, cristallins ou dolomitiques, ils se débitent, à l'affleurement, en blocs dépassant parfois plusieurs mètres cubes. Ils forment Dj. Grouz, qui correspond à un vaste bombement de l'unité crétacée et le massif de Dj. Tnoutit.

2.7. Le Trias

Ce sont des argiles rouges gypseuses et salifères. Elles apparaissent au Nord vers le Dj Ed Dess et au Sud et Sud-Est, en une série, d'affleurements, alignés Sud-Ouest à Nord-Est, correspondant sûrement à un ‘’accident ‘’ tectonique profond. Les argiles triasiques traversent les terrains plus jeunes du Crétacé et de l'Eocène en les découpant à l'emporte-pièce et en les rebroussant suivant le style diapirique.

3. Lithostratigraphie de la région d'étude

L'étude lithostratigraphique de la région permet de diviser les formations de la région en deux séries : (fig. 6, 7 et 8)

- Formations peu ou pas tectonisées ;
- Formations tectonisées.

3.1. Formations peu ou pas tectonisées :

De haut en bas on distingue :

3.1.1. Quaternaire

Les formations Quaternaires occupent presque la totalité du terrain.

a. Alluvions récentes

Elles apparaissent sur tout le profil de Oued El-Mahri, ces dépôts sont formés d'une banquette de limon gris et de graviers.

b. Terrasses, formation de pente et Quaternaire indéterminé

Ce sont des formations de pente correspondant à des terrasses dilacérées ou à des alluvions anciennes sur lesquelles se sont développés des sols bruns peu ou pas calcaires.

Au Quaternaire indéterminé sont rapporté des placages dispersés de nature variée qui occupent un grand espace sur les niveaux marneux.

c. Glacis polygéniques

Ils affleurent sur toute la périphérie des principaux reliefs (Djebel Tnoutit, Rokbet El-Djemel). Ils correspondent à des surfaces très faiblement pentées près des plaines dont la pente augmente progressivement vers la montagne, ils sont recouverts d'un matériel clastique faiblement calibré et très fragmenté. Vers le bas, ils deviennent plus anguleux et plus grossier.

d. Villafranchien : croûtes calcaires

Ce sont les formations les plus caractéristiques des hautes plaines sétifiennes, elles sont constituées de bancs calcaires, des travertins, des croûtes calcaires, des carapaces calcaires, de calcaire lacustre blanc et de limon avec une épaisseur de 50 m environ.

e. Sebkha

Ce sont des vases salées, souvent inondées pendant l'hiver et recouvertes par des croûtes de sel en été, ils sont localisés au Sud et au Sud Est du terrain.

f. Sols salés

Il s'agit de limon salé à végétation typique de sol salsolacées correspondant à des sols hydromorphes incultes, très mal drainés.

g. Formations dunaires

Ce sont des amas éoliens de sables calcareux et de poussière limoneuse mêlée à des débris coquilliers fins (Gastéropodes) ou à des végétaux.

3.1.2. Mio – Pliocène continental

Il affleure sur une grande partie du terrain, ce sont des calcaires lacustres, des marnes rouges, des limons et de sables rouges. L'ensemble de ces formations présente des faciès très variables. En bordure des reliefs actuels, s'enrichissent en conglomérats rougeâtres

mal cimentés, l'ensemble a une épaisseur de 100 à 150 m environ.

3-2- Formations tectonisées

3-2-1- Unité supérieure à matériel Eocène

Il s'agit de lambeaux de séries avec les trois termes classiques de l'Eocène tellien, dont la série commence parfois à la fin du Sénonien.

a- Yprésien et Lutétien :

Ce sont des calcaires marneux schistosés à patine blanche, à cassure noire, à silex noires et à Globigérines.

b- Marnes fini-Crétacées et Paléocènes à boules jaunes.

C'est une série de marnes noires d'au moins 180 m d'épaisseur. Sa base est tronquée par un contact anormal.

3-2-2- Nappe du Djebel Sattor et unités Eocènes à Nummulites et à Huîtres

a- Lutétien à Huîtres

Il s'agit d'une centaine de mètres de marnes jaunâtres, très riches en intercalations Lumachellique à Ostrea multicostata.

b- Yprésien et Lutétien à débris

Ils forment une barre calcaire débutant par des niveaux phosphatés glauconieux et comportant des silex à son tiers inférieur. D'abondant débris de Gastéropodes, de Lamellibranches et d'entroques rendent l'aspect du faciès très granuleux.

c- Yprésien et Lutétien à Nummulites

Des calcaires identiques contiennent des Nummulites dans la partie Est de la carte au Sud Est de Tadjenanet.

d- Sénonien supérieur Lumachellique

Il est marqué par le développement de gros bancs Lumachelliques à Ostréidés associés à des marnes jaunes et à des calcaires sparitiques, parfois glauconieux. Il affleure au Sud du terrain.

3.2.3. Nappe néritique Constantinoise

a. Aptien calcaire

Il débute par une barre à Rudistes de 15 m et se poursuit par 150 m de calcaire bien lité à Salpingoporella.

b. Barrémien carbonaté

Le Barrémien franc débute par des calcaires plus ou moins dolomitiques à algues : Salpingoporella Muelhbergü.

Au sommet, le Barrémien supérieur a livré : Palorbitolina lenticulaire avec quelques très

rares niveaux marneux.

c. Néocomien calcaire

Il est formé par des dolomies cristallines, souvent bréchoides de couleur claire et mal litée.

d. Jurassique carbonaté

La série attribuée au Jurassique supérieur, comprend des dolomies des micrites en alternance avec des dolomies et calcaires dolomitiques.

3.2.4. Ensemble allochtone Sud-Sétifien

a. Miocène marin transgressif

Le Miocène débute par des conglomérats rougeâtres qui ravinent largement son substratum. Il affleure au Sud du Rokbet El-Djemel où les niveaux marneux sont surtout visibles.

b. Barrémien

Le Barrémien est formé par une série complexe composée de calcaire, de dolomies et de grés avec de minces intercalations argileuses ou marneuses à Djebel Tnoutit.

3.2.5. Trias exotique ou extrusif

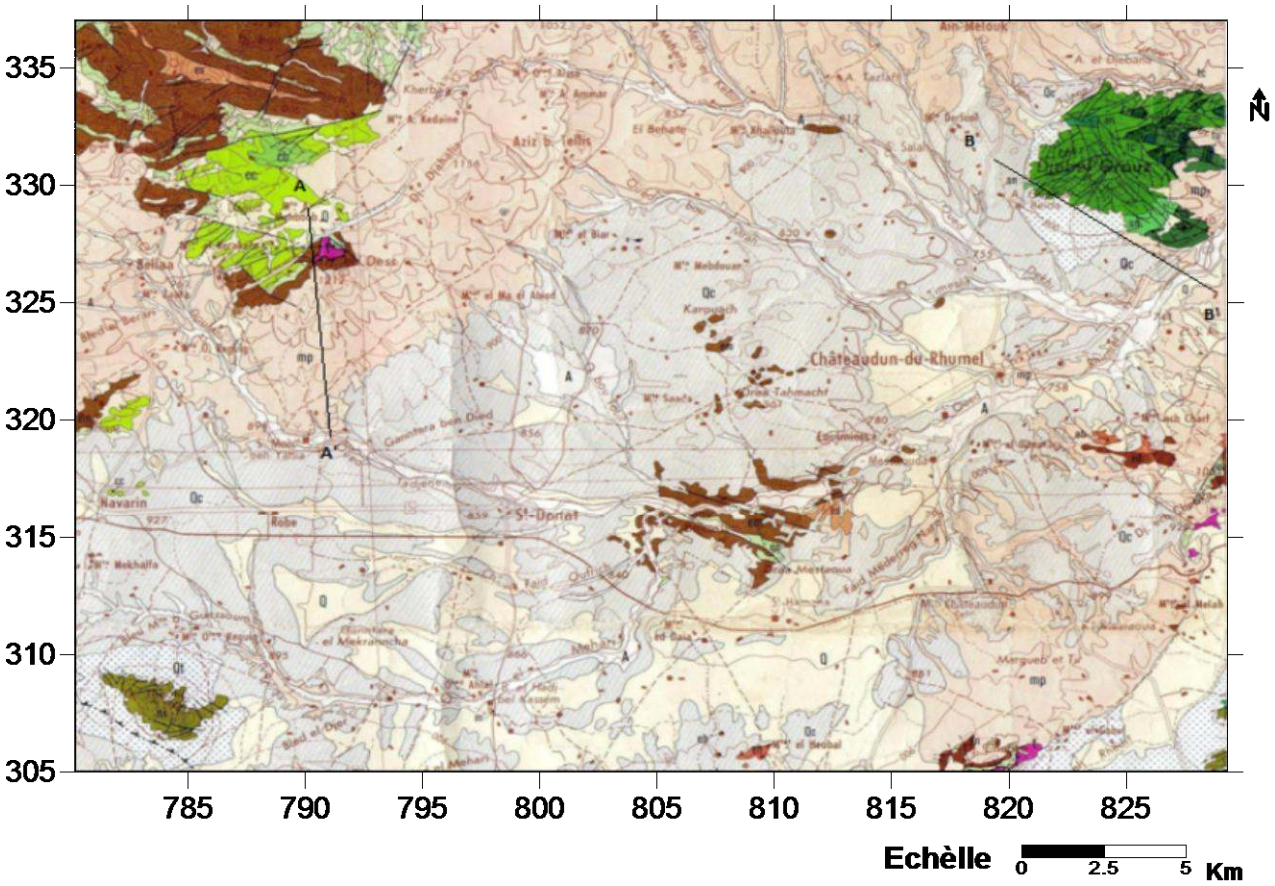
Il est formé par des argiles varicolores, gypses, cargneules, des glaçons calcaro-dolomitiques. Il affleure au Nord et au Sud-est du terrain d'étude.

3. Analyse structurale

3.1. Ensemble Allochtone Sud-Sétifien

A quelques exceptions, l'ensemble allochtone Sud-sétifien est constitué par toute une série d'écailles en relais constituant le trait dominant de la géologie structurale de la région. Cet ensemble possède une série surtout carbonatée du Lias au Cénomanien.

La masse chevauchante de Djebel Tnoutit apparaît comme un élément de l'ensemble allochtone Sud – sétifien. Vers l'Est son contact de base va rejoindre le front des masses allochtones de la nappe néritique Constantinoise .Fig. 9.Vers l'Ouest cette surface est visible jusqu'à la terminaison occidentale du Djebel Zdimm laquelle s'enfonce en tunnel sous la nappe tellienne de la feuille de Ain Taghrout.



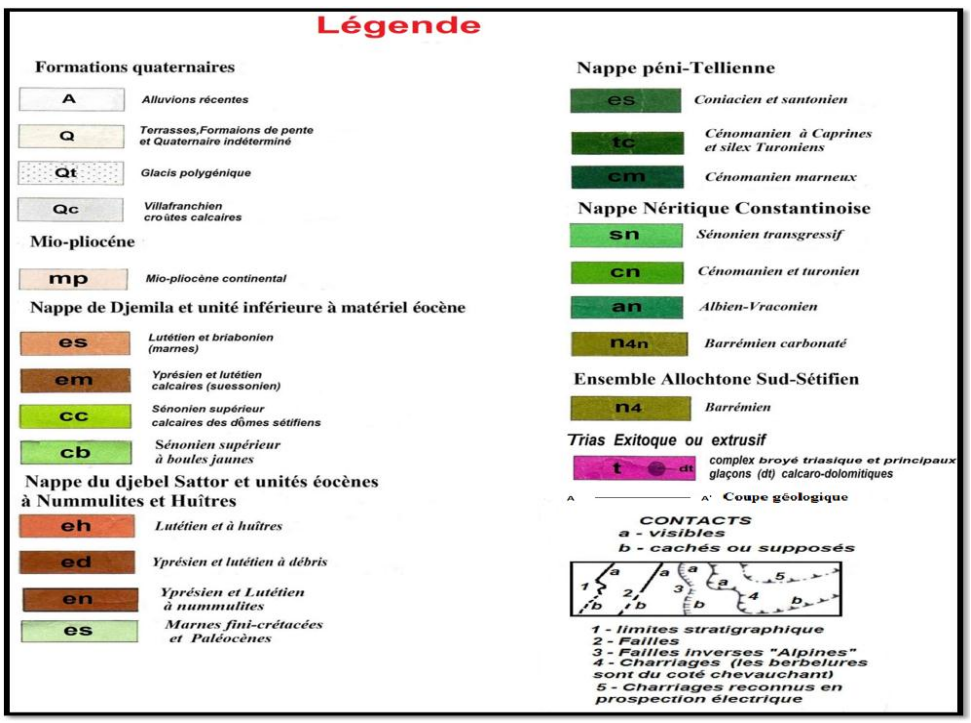


Figure 6. Carte géologique de la région d'étude- d'après J.M.VILA (1980)

Extrait de la carte de Sétif - 1/200000

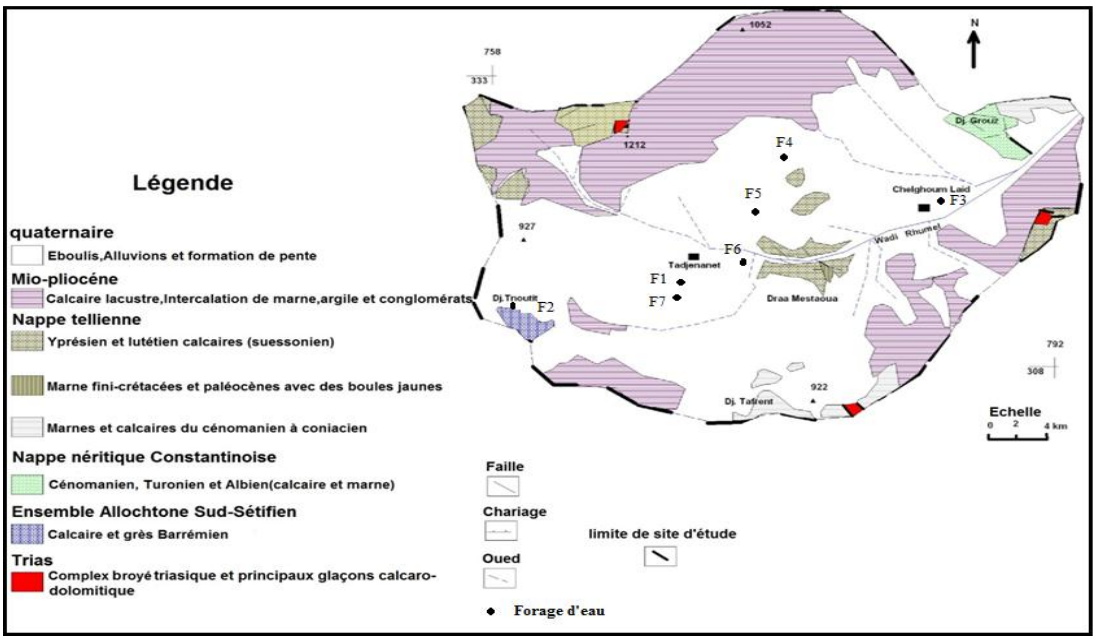


Figure 7. Carte géologique du sous bassin de Tadjenanet - Chelghoum Laid
Selon J .M.Villa 1980

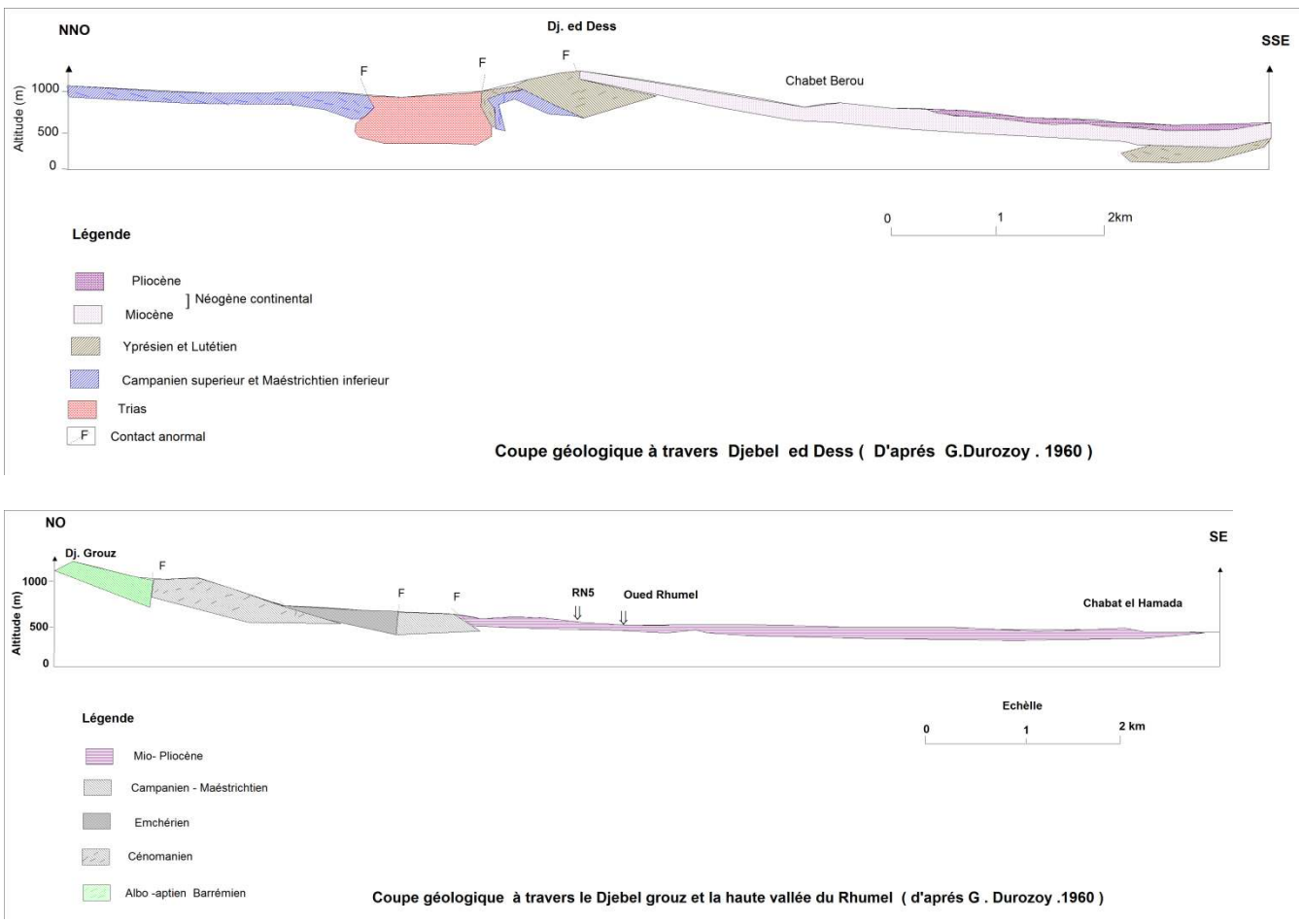


Figure 8. Coupes géologiques à travers la région d'étude

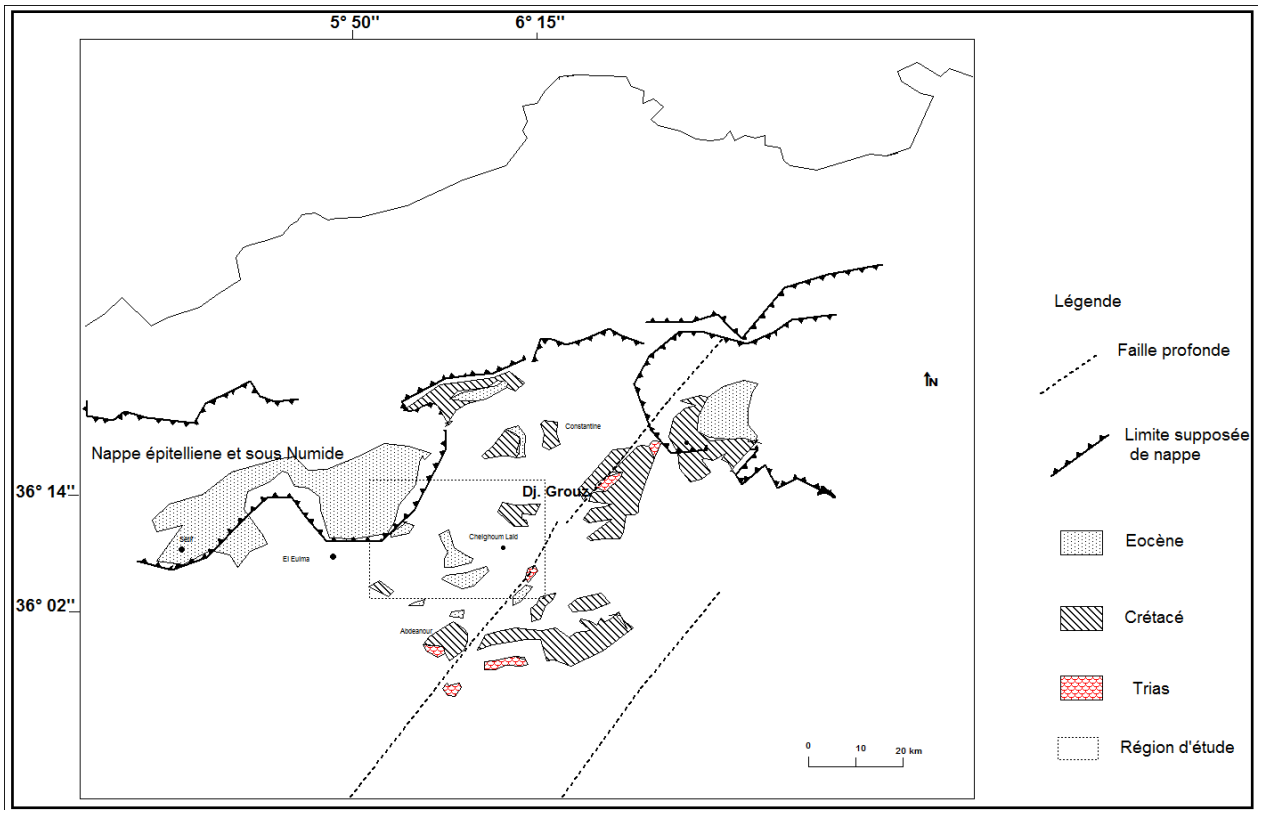


Figure 9. Extrait de la carte tectonique de Keiken, 1962

Un aperçu de la région nous permet de distinguer deux types de tectoniques :

-Une tectonique anté-miocène de style cassant qui favorise la karstification ;

-Une tectonique post-miocène de style souple.

La première se manifeste dans la partie Est et la deuxième dans la partie Ouest en accentuant la tectonique précédente.

Suivant les caractéristiques structurales et stratigraphiques des terrains, on peut les subdiviser en trois unités principales :

1. unités du Trias diapir
2. unités du crétacé –éocène.
3. unités du Moi-pliocène transgressives

3-2-Unités du Trias diapirique

De faciès gypso-salin avec des lambeaux de calcaire, leur remontée a produit des charriages, des déversements et des chevauchements

3-3-Unités du Crétacé-Eocène

Caractérisant les aires anticlinales de directions NE-SW avec un faciès néritique du Crétacé moyen et inférieur. Ces massifs sont découpés par des failles longitudinales. Les zones synclinales (zone d'effondrement) de facies marneux du Crétacé supérieur et

Nummulitique, sont en plus déversées et faillés de direction NW- SE au voisinage des massifs et EW aux axes des synclinaux.

Ces mouvements ne sont pas produits à la fin du Lutétien et sont accentués à la fin de l'Oligocène

3.4. Unités Mio-Pliocène transgressives

Ces unités caractérisent la partie Ouest de la région représentée par les bombements anticlinaux qui se sont produits à la fin du Miocène et accentués après le Villafranchien.

4. Description géologiques à partir des logs de forage et des données géophysiques

Plusieurs forages ont été réalisés dans la région et seuls quelques-uns ont fait l'objet d'un suivi relativement correct. Nous allons essayer de faire leur description tout en faisant le lien avec la géologie et la géophysique.

Un forage a été réalisé à 4 Km au Nord de Tadjenanet, de coordonnées Lambert suivantes : x=795.70 km et y=322.80 km vers le Chabet Rmali (Fig. 10). Sa profondeur est de 278 m. Durozoy (1960) donne les indications suivantes, mis à part argiles et marnes qui constituent l'essentiel :

- de 26.50 à 32.50m, calcaire lacustres
- de 72 à 79m, calcaire lacustres
- de 216 à 241m, galets
- de 241 à 278m, calcaire de l'Eocène inférieur.

La géophysique parait affirmer le non enracinement des calcaires éocènes centraux, tout au moins vers le Sud. Une solution serait la suppression par érosion de toute l'épaisseur des calcaires éocènes sur le pourtour des amas '' centraux'', puis dépôts des terrains tertiaires et quaternaires (fig. 10). Une seconde solution pourrait être apportée par les explications tectoniques récentes concernant le domaine tellien de l'Algérie orientale. Depuis les découvertes de la S.N REPAL (1952)**,** de vastes mouvements de chevauchement du Crétacé, et de charriage (nappes et écailles) touchant l'Eocène, depuis le Nord, ont été mis en évidence dans la région de Bordj Bou Arreridj et Sétif et, dans celle de Constantine. Ce sont les forages profonds, l'étude des disharmonies de structure et les groupements de microfaunes fossiles qui ont permis de dresser des cartes tectoniques nouvelles (KIEKEN .1962). Les études géologiques indiquent :

- un Crétacé inférieur et moyen, calcaire, épais (500,1000 m ou plus), découpé en compartiments polygonaux par de très nombreuses failles (fig. 9).
- Un crétacé supérieur marno-argileux, qui peut être très épais (plus de 1000m pour le Sénonien vers Bordj Bou Arreridj).

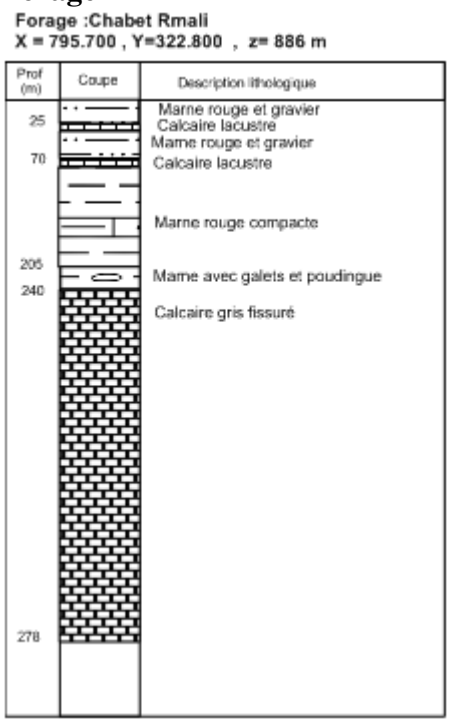
- Un Eocène inférieur, moins épais, qui présente le faciès à Nummulites et un faciès sans Nummulites, de tectonique extrêmement souple avec plis déversés vers le Sud pour le deuxième.
- Le Mio-plio-quaternaire, constitue le toit de la formation éocène (fig. 10).

La tectonique du Crétacé est nettement différente de celle de l'Eocène ''central''. Elle peut indiquer des mouvements indépendants du second par rapport au premier, facilité par la plasticité des argiles et des marnes du Crétacé supérieur. Un argument dans ce sens nous est apporté par Durozoy (1960), qui constate l'identité de faciès entre la zone de Sétif (Eocène sans Nummulites, nappé) et celle ''centrale'' de notre zone. On peut comprendre ainsi :

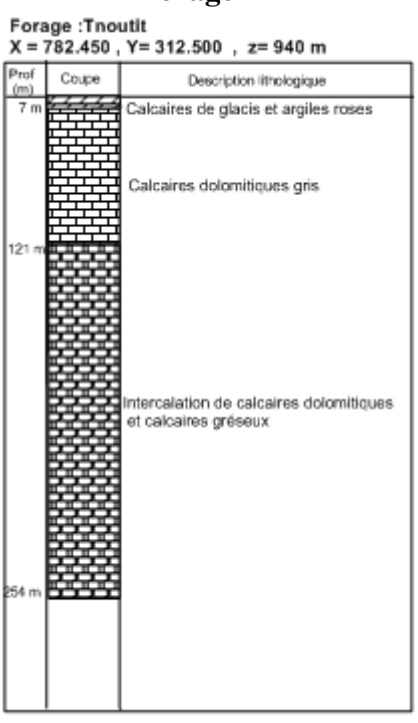
- les plissements en accordéon de l'Eocène central ;
- le voisinage, à moins de 10 Km, des deux faciès ;
- Le passage sans transition de l'Eocène ''central'' au vaste domaine Sud argilo marneux (fig. 10).

Nous pouvons aussi supposer en allant dans le même sens, de grand dérangement dans l'ordre géologique des marnes et argiles sous-jacentes à l'Eocène central, ce qui peut poser des questions sur la nature géologique véritable du substratum profond et sur l'éventuel rôle des argiles triasiques.

Forage 1

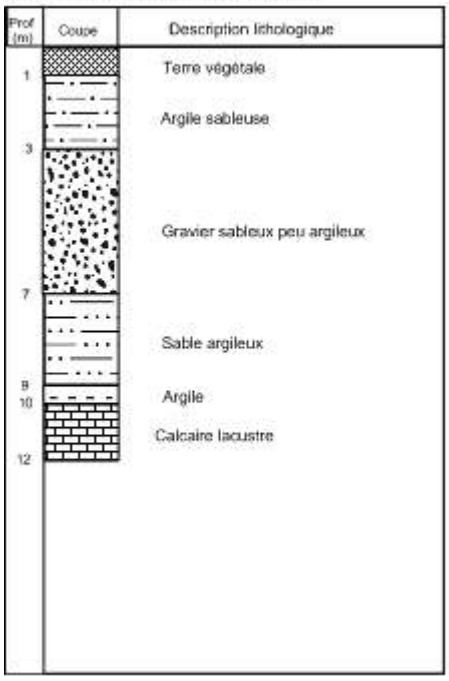


Forage 2



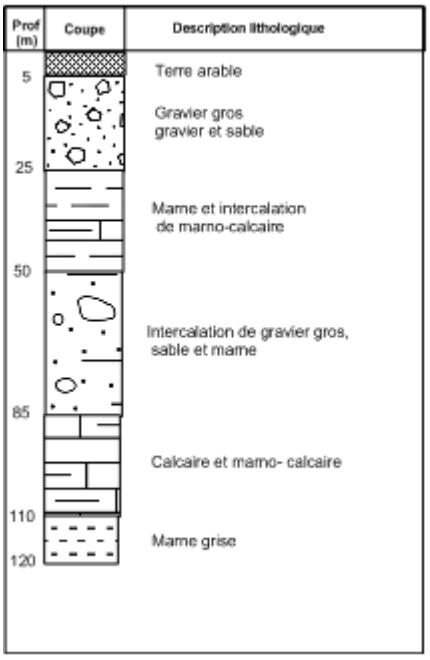
Forage 3

Forage : Chelghoum Laid
X =811.600 , Y=322.800 , z= 764 m



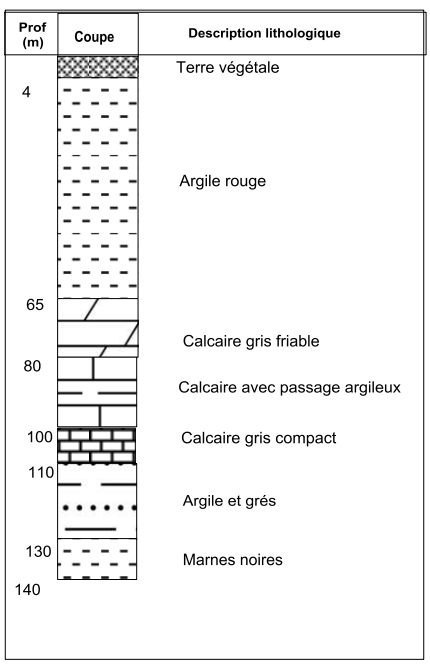
Forage 4

Forage :Bir Merghade
X =801.200 , Y= 329.800 , z=878 m



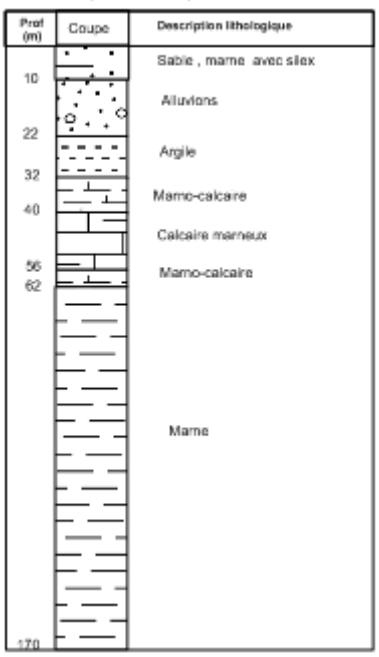
Forage 5

Forage :Feidh Nafaa
X =798.150 , Y=322.450 , z=852 m



Forage 6

Forage : Karir
X =798.635 , Y=318.271 , z=800 m



Forge7

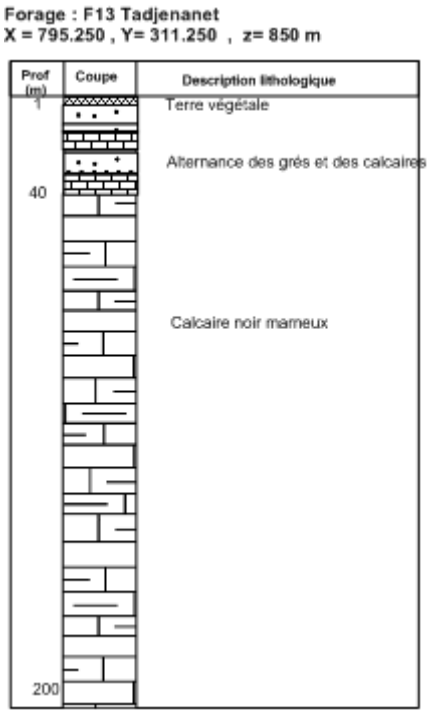


Figure 10. Description lithologique à partir des logs des forages implantés dans le terrain d'étude

5. Conclusion

La région de Tadjenanet – Chelghoum Laid est située à cheval entre le domaine tellien au Nord et hodnéen au Sud. Du point de vue stratigraphique, les formations rencontrées sont en majeur partie d'origine continentale et lacustre. Il s'agit essentiellement d'argiles rouges dans lesquelles s'étendent des bancs de calcaires lacustres, grés et de conglomérat, toujours restreints en épaisseur et en étendue, avec changements de faciès rapides. Les argiles, en certains endroits (Nord-Ouest, vers le Dj. Ed Dess, au Sud-est du Dj.Grouz et autour des affleurements éocènes), contiennent de nombreux blocs ou cailloutis ou débris de silex.

Du point de vue tectonique la région d'étude est caractérisée par deux styles de tectoniques :

-Une tectonique anté-Miocène de style cassant qui favorise la karstification ;

-Une tectonique post-Miocène de style souple.

La première se manifeste dans la partie Est et la deuxième dans la partie Ouest.

L'ensemble allochtone Sud-sétifien est constitué par toute une série d'écailles en relais constituant le trait dominant de la géologie structurale de la région. Cet ensemble possède une série surtout carbonatée du Lias au Cénomanien. La masse chevauchante de Djebel

Tnoutit apparaît comme un élément de l'ensemble allochtone Sud-sétifien. Vers l'Est, son contact de base va rejoindre le front des masses allochtones de la nappe néritique Constantinoise, caractérise la masse chevauchante de Djebel Grouz.

Ces masses chevauchantes de nature carbonatées ont une grande capacité hydrique contribuant à l'alimentation de la nappe alluviale. Les formations du Mio-Pliocène couvrant d'importantes superficies et ils ont de bonnes potentialités de point de vue hydrogéologique, dont leur l'épaisseur varie de 100 à 150 m .Ils sont constitué par des dépôts fluvio- lacustres, de limon, de sable, marne et argiles.

CHAPITRE II

CADRE HYDROCLIMATIQUE

CADRE HYDROCLIMATIQUE

1. Introduction

La connaissance des paramètres climatiques d'une région est indispensable pour l'évaluation des différents termes du bilan hydrologique. L'alimentation de l'aquifère se fait en grande partie par les précipitations météoriques. La région de Tadjenanet – Chelghoum Laid appartient au domaine des hautes plaines sétifiennes qui se caractérisent par des pluies moyennes annuelles de l'ordre de 400 mm. Du point de vue hydrologique la région est située dans la haute vallée du bassin versant de Kébir Rhumel avec une superficie de l'ordre de 1130 km^2. Dans cette approche hydroclimatique, nous avons utilisé les données de la station climatique de Hammam Grouz .On note que cette station se trouve juste à la limite Est de notre terrain, précisément à l'exutoire du bassin versant, dont les coordonnées sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1. Coordonnées de la station climatologique de Hammam Grouz

Station	Oued	Coordonnées		
Hammam Grouz	Rhumel	Longitude	Latitude	Z (m)
		6° 16’ E	36° 14’ N	736

2. Caractéristiques climatiques de la région d’étude

L’Algérie, du fait de sa situation géographique se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes (fig.11); la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde à climat semi-aride vers l’intérieur du pays (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara.

La région d’étude fait partie de la seconde zone, marquée par les risques et les aléas. Dans ce qui suit nous présentons un aperçu hydroclimatique, indispensable à la compréhension des processus d’alimentation et de restriction des eaux souterraines, ce qui nous permettra d’avancer dans la connaissance du comportement hydrologique des cours d’eau, et dans la variation des réserves des eaux souterraines. Ainsi, la variation des paramètres climatiques donne des indications sur l’évolution des concentrations des éléments chimiques, en fonction des saisons, tant au niveau des eaux souterraines qu’au niveau des eaux de surface.

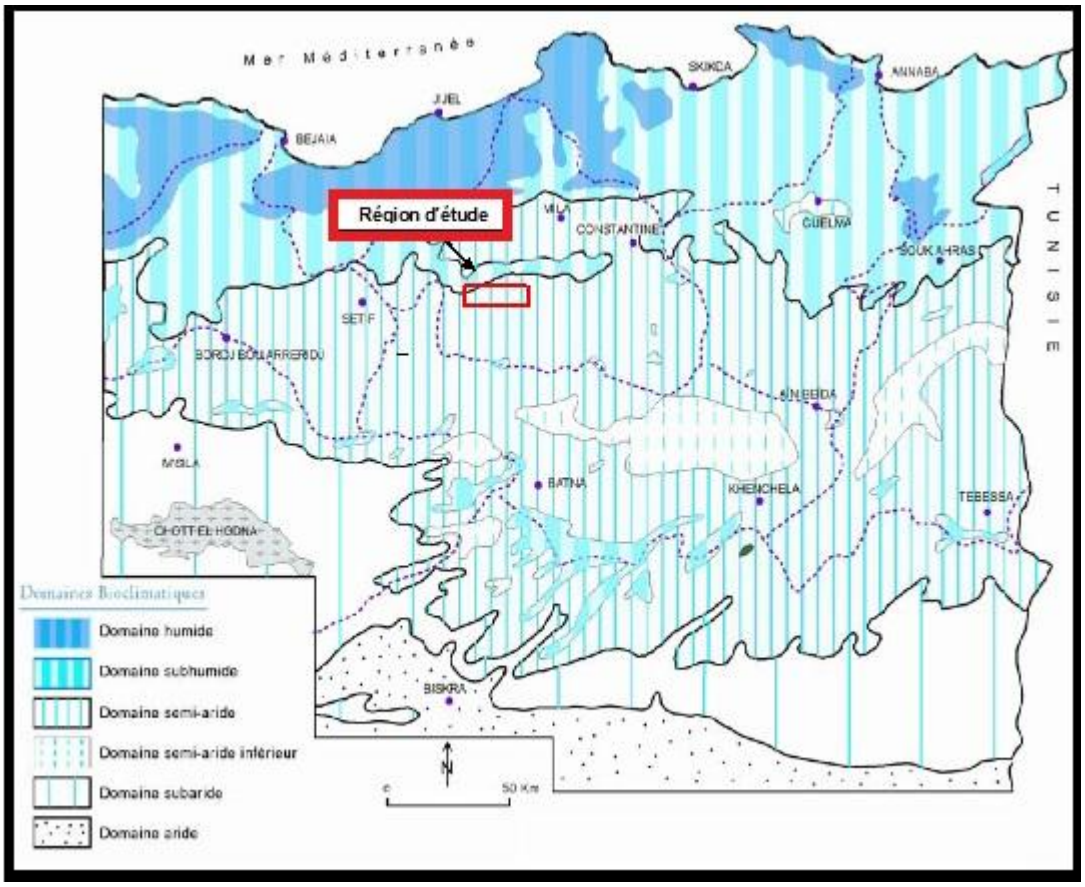


Figure 11. Carte bioclimatique de l'Est Algérien (Cote, 1998)

3. Etude des paramètres climatiques

Les différentes données climatiques sont celle recueillies au niveau de la station pluviométrique de Hammam Grouz (Tableau 2). Une période de seize ans (1988/89 à 2003/04) permet de caractériser des conditions climatiques locales de la région d'étude comme on le verra plus loin.

3.1. Précipitations

La pluie est un facteur climatique très important conditionnant l'écoulement saisonnier et par conséquent le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes. La pluviosité augmente avec l'altitude et diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer.

Tableau 2. Les précipitations moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles A la station de Hammam Grouz de 1988/89 à 2003/04

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Année
P(mm)	38.49	24.88	33.86	47.43	55.59	26.68	32.90	39.15	40.40	16.33	3.89	12.66	372.25
Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
	97.23 mm			129.70 mm			112.45 mm			32.88 mm			
	26.11%			34.84%			30.20%			8.83%			

L'étude des précipitations montre que les saisons les plus pluvieuses sont l'hiver avec 34.84% des pluies moyennes annuelles et le printemps avec 30.21%. L'automne représente 26.12% et l'été avec seulement 8.83% des précipitations moyennes annuelles. Fig.12.

La représentation moyenne mensuelle des précipitations sur une période de seize ans, nous a permis de constater que le mois de Janvier est le plus arrosé avec une moyenne mensuelle égale à 55.59 mm alors que le mois de juillet est le plus sec avec une moyenne mensuelle égale à 3.89 mm (fig.13). La moyenne interannuelle des précipitations pour la période de 1988 à 2004 est de 372.25 mm (Tab. 3).

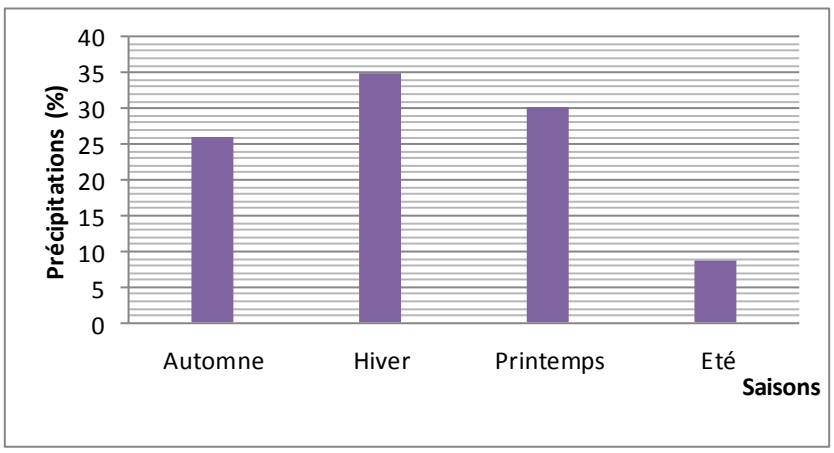


Figure 12. Répartition saisonnière des précipitations. Station de Hammam Grouz

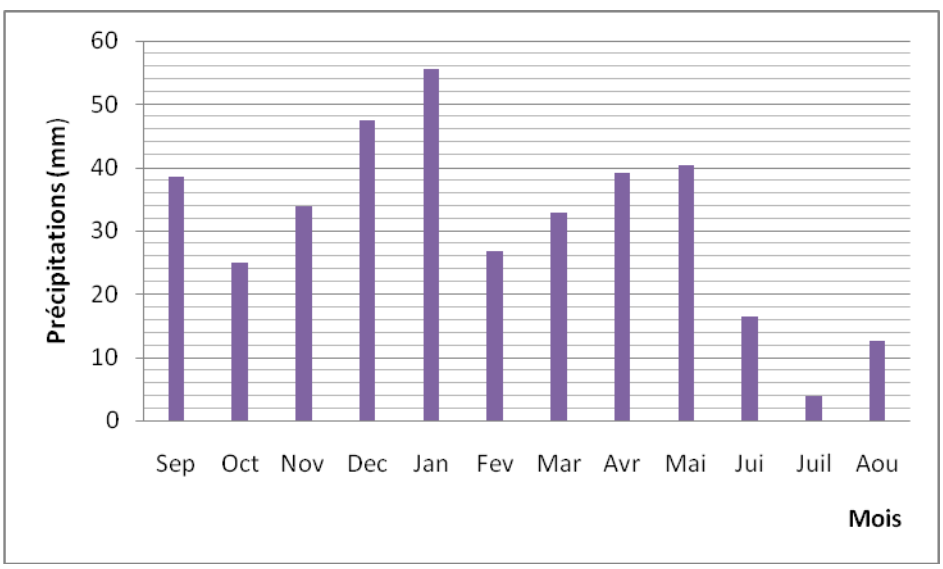


Figure 13. Variation des précipitations moyennes mensuelles

Tableau 3. Les précipitations et températures moyennes annuelles à la station de Hammam Grouz 1988/89 à 2003/04.

Année	**88/89**	**89/90**	**90/91**	**91/92**	**92/93**	**93/94**	**94/95**	**95/96**
P (mm)	292.2	273.3	417.5	513.5	147.6	245.2	425.7	512
T (°C)	15.59	14.68	14.68	13.76	15.51	15.86	15.28	15.06
Année	**96/97**	**97/98**	**98/99**	**99/00**	**00/01**	**01/02**	**02/03**	**03/04**
P (mm)	264.8	470.9	295	415.5	229.7	278.4	668.8	502.1
T (°C)	15.6	15.01	16.84	16.22	16.31	16.22	16.42	15.54

On constate que l'année la plus humide est 2002-2003, avec une moyenne annuelle égale à 668.80 mm alors que l'année la plus sèche est 1992-1993 avec une moyenne annuelle égale à 147.6 mm. Figure 14.

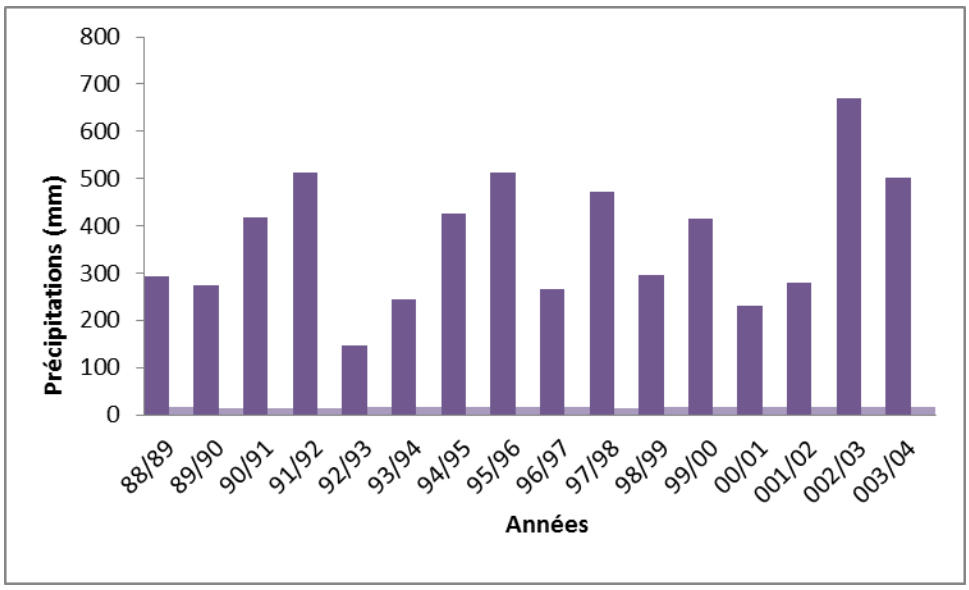


Figure 14. Variations des précipitations moyennes interannuelles. Station Hammam Grouz (1988/89 - 2003/2004).

3.2. Coefficient pluviométrique

Le coefficient pluviométrique est un paramètre climatique qui permet de déterminer les années déficitaires et les années excédentaires. Il est définit comme étant le rapport de la pluviométrie de l'année considérée à pluviométrie moyenne pour une station donnée.

$$Cp = P/Pa$$

Où

Cp : Coefficient pluviométrique ;

P : pluviométrie de l'année considérée (mm) ;

Pa : pluviométrie moyenne pour une période d'année (mm)

Si

Cp > 1 : l'année correspondante est excédentaire.

Cp < 1 : l'année correspondante est déficitaire.

D'après les valeurs des coefficients pluviométriques représentées dans le tableau n °4, on constate que la station de Hammam Grouz présente 08 années excédentaires et 08 années déficitaires sur toute la période d'observation (1988/89-2003/2004).

Tableau 4. Coefficient pluviométrique

Années	**88/89**	**89/90**	**90/91**	**91/92**	**92/93**	**93/94**	**94/95**	**95/96**
Cp	0.78	0.73	1.12	1.38	0.40	0.66	1.14	1.37
Années	**96/97**	**97/98**	**98/99**	**99/00**	**00/01**	**01/02**	**02/03**	**03/04**
Cp	0.71	1.26	0.79	1.12	0.62	0.75	1.80	1.35

3.3. Les températures

La température est un élément très important du climat, elle joue un rôle déterminant dans l'estimation du déficit d'écoulement qui intervient dans l'estimation du bilan hydrologique. Elle est liée à la durée d'insolation, à l'altitude et aux conditions climatiques locales de la région d'étude (Tab.5).

Tableau 5. Les températures moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles A la station de Hammam Grouz. 1988/89 à 2003/04

Mois	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dec**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Avr**	**Mai**	**Jui**	**Juil**	**Août**	**Année**
T (C°)	20.63	17.40	12.39	7.89	6.47	7.68	10.19	12.12	17.56	22.40	24.35	26.11	15.43
Saison	**Automne**			**Hiver**			**Printemps**			**Eté**			
	16.81			7.35			13.29			24.29			

L'étude de la variation moyenne mensuelle de la température montre que les mois les plus froids sont ceux de Décembre, Janvier et Février avec des températures moyennes mensuelles qui varient entre 6 et 8 °C. Par contre les mois les plus chauds sont ceux de Juin, Juillet et Août avec des températures moyennes mensuelles qui varient entre 22 et 26 °C (fig.15).

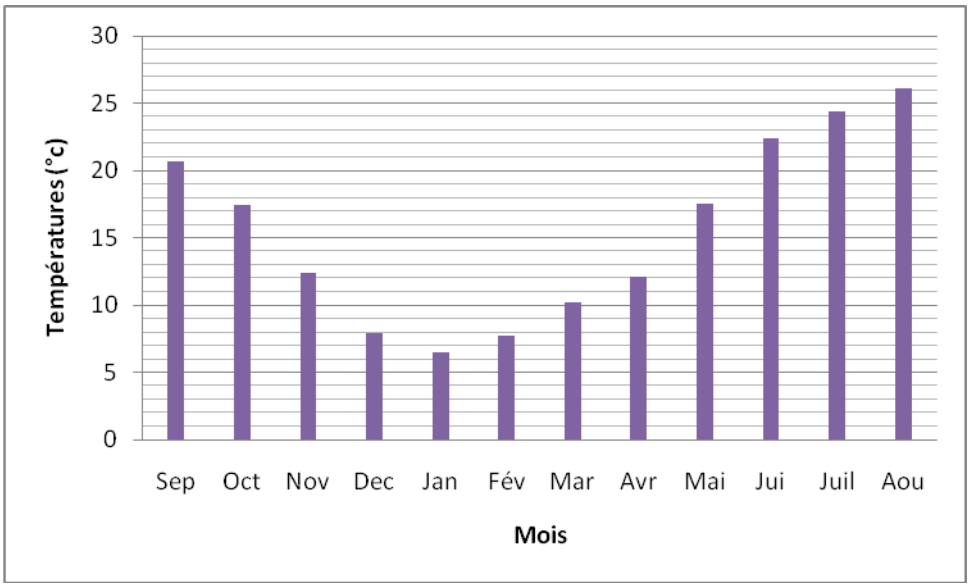


Figure 15. Variation des températures moyennes mensuelles (1988 - 2004)

La représentation inter–annuelle des températures sur une période de seize ans (1988/89 à 2003/04), montre que l'année la plus froide est celle de 1991/92 avec une valeur moyenne annuelle de 13.76 °C, alors que l'année la plus chaude est celle de 1998/99 avec une valeur moyenne annuelle de 16.84°C(fig.16).

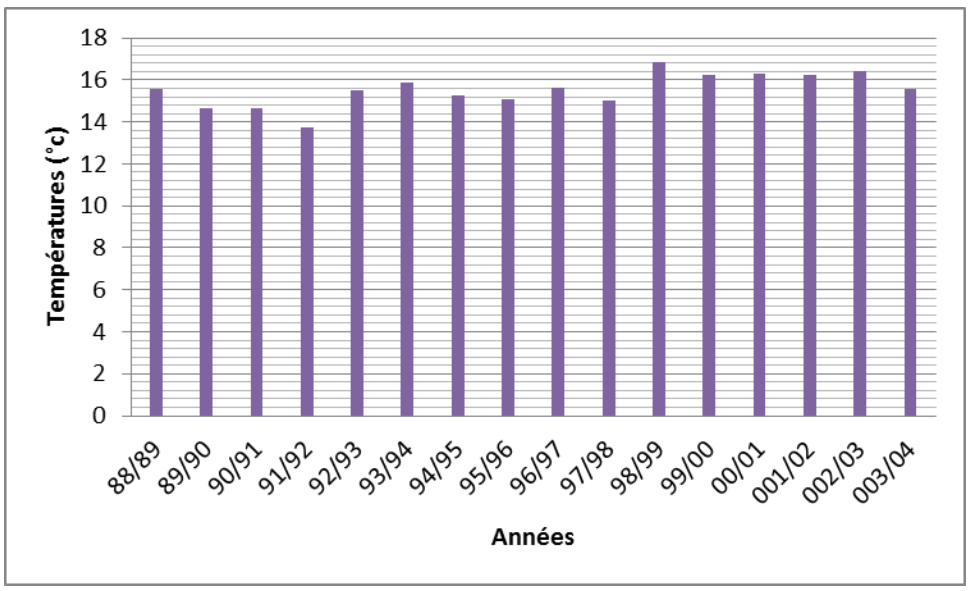


Figure 16. Variations des températures moyennes interannuelles

3.4. Diagramme pluviothermique

Selon Bagnouls et Gaussen une période sèche est une période pendant laquelle les précipitations totales du mois considéré sont inférieures ou égales au double de la température. La confrontation des données pluviométriques et celle des températures sur

le diagramme pluviothermique (fig.17) révèle que la période sèche s'étale sur quatre mois environ, du mois de juin au mois de septembre alors que la période humide s'étale sur le reste de l'année.

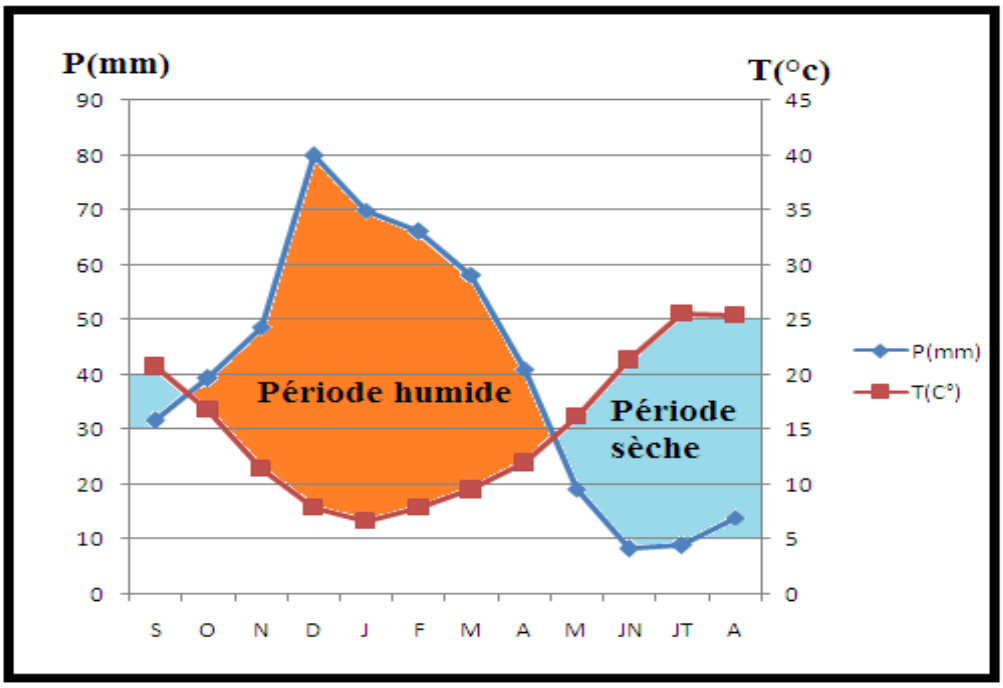


Figure 17. Diagramme ombro-thermique

3.5. Indice d'aridité

Cet indice permet d'identifier le type du climat caractérisant la région étudiée. La formule de De Martonne permet d'apprécier ce paramètre.

$$I = p/(t +10)$$

Où

P : précipitation moyenne mensuelle (mm) ;

T : température moyenne mensuelle (°C).

Pour :

20 < I <30 : le climat est tempéré;

10 < I < 20 : le climat est semi-aride,

7.5 < I <10 : le climat est steppique;

5 < I < 7.5 : le climat est désertique ;

I < 5 : le climat est hyper aride.

Pour notre région, comme t = 15.43° C et p = 372.25 mm permettent de donner un indice d'aridité de l'ordre de14.64, ce qui implique un climat semi-aride (fig.18).

.

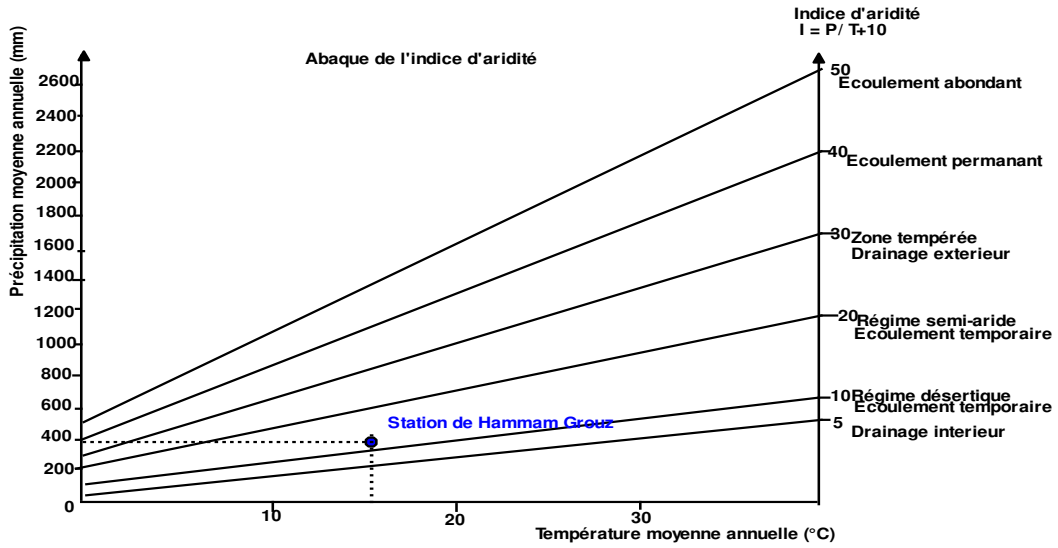


Figure 18. Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martone

3.6. Indice d'Euverte

Le rapport des précipitations et les températures moyennes établis mensuellement selon Euverte, permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol (Tab.6). Il permet également de définir plusieurs types de régimes:

- Un régime très sec où p/t <1 ;
- Un régime sec où 1<p/t<2;
- Un régime subhumide où 2<p/t<3;

Un régime humide où p/t >.

Où

P : précipitation moyenne mensuelle (mm);

T : température moyenne mensuelle (°C)

Tableau 6. Indice d'Euverte à la station de Hammam Grouz. 1988/89 à 2003/04

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
P/T	1.86	1.42	2.73	6.01	8.59	3.47	3.23	3.23	2.30	0.73	0.16	0.48

L'application de cette formule permet de constater que la région d'étude est caractérisée par un régime de type très sec pendant les mois d'été (Juin, Juillet et Août) et un régime sec pendant les mois de Septembre et Octobre. Le régime Humide caractérise la saison hivernale, le reste de l'année est de type sub-humide

4. Etablissement du bilan hydrologique

Le but principal 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 s'écrit de la manière suivante :

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

Où

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

Ex : excèdent moyen annuel (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm) ;

I : infiltration (mm) ;

R : ruissellement (mm).

ΔV : variation de la réserve, généralement très faible.

4.1. Analyse des différents éléments du bilan

4.1.1. Précipitations

Pour établir le bilan hydrologique, nous avons utilisés données des précipitations mesurées dans la station de Hammam Grouz sur une période de seize ans (1988/89 à 2003/04).

4.1.2. Evapotranspiration

Ce terme regroupe à la fois l'évaporation à partir des surfaces libres et la transpiration des végétaux. C'est l'élément le plus important du bilan hydrologique. Ce processus d'évapotranspiration à partir des sols dépend essentiellement de l'humidité, de la température, de l'insolation, de la couverture végétale.

4.1.2.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

Notre région appartient au domaine semi aride, on a jugé bon d'utiliser la méthode de Thornthwaite, pour faire sortir le maximum de paramètres. Cette méthode exprime le pouvoir évaporant au maximum de l'atmosphère au sol en fonction de la latitude, plus exactement de la durée théorique de l'insolation dans la région. La formule de cette méthode est la suivante

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

Avec:

- ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)
- I : indice thermique annuel ;
- $I = \sum_{i=1}^{i=12} i$ avec $i = (t / 5)^{1.5}$ avec i: indice thermique mensuel.
- t : la température moyenne mensuelle (°C)
- $a = (1.6\ I / 100) + 0.5$

Ces valeurs de l'ETP doivent être corrigées à l'aide d'un coefficient k qui dépend de la latitude de la station qui prend en compte la durée de l'insolation théorique tirée d'un abaque.

ETP corrigée = ETP.K (Tab. 7).

Tableau 7. Evapotranspiration potentielle mensuelle à la station de Hammam Grouz. 1988/89 à 2003/04

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû
t (°c)	20.63	17.40	12.39	7.89	6.47	7.68	10.19	12.12	17.56	22.40	24.35	26.11
i	8.38	6.49	3.90	1.98	1.47	1.90	2.91	3.77	6.58	9.48	10.75	11.93
ETP non corrigée(mm)	92.94	70.81	41.18	20.03	14.59	19.19	30.14	39.75	71.86	105.99	121.10	135.38
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16
ETP corrigée (mm)	95.72	68.68	35.41	16.82	12.69	16.31	31.04	43.72	86.95	129.31	150.16	157.04

4.1.2.2. Les réserves facilement utilisables (R.F.U)

Ce terme peut être utilisable à partir de la formule de Ricard.J 1979.

R.F.U =1/3 Da.He.P avec, Da = 1.4, He = 30%, P = 40 cm (Djouahra 1983).

Où : Da = densité apparente du sol ;

He : humidité équivalente du sol (capacité de rétention);

P : profondeur de la terre parcourue par les racines (m).

D'où la R.F.U = 56 mm

4.1.2.3. Evapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle est la quantité d'eau évaporée et transpirée réellement à partir du sol, des végétaux et des plans d'eau dans les conditions naturelles du bassin versant. Plusieurs formules et méthodes permettent de déterminer ce permettre.

4.1.2.3.1. 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'excèdent provenant des précipitations est emmagasiné dans le sol pour alimenter la RFU jusqu'à sa saturation. Son surplus sera attribué à l'excèdent (water 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 (Da).

4.1.2.3.2. 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)

Application :

P = 372.25, t =14.33°C , L= 869.43

ETR = 357.65mm, soit 96.07% des précipitations.

4.1.2.3.3. 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 $\lambda = 1/(0.8+0.14t)$

Où

t: température moyenne annuelle (°C).

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

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

-Application p=372.25mm, t= 15.43°C

$\lambda = 0.34$

$0.36 \leq P \leq 1.47$

Donc : $ETR = P - \lambda P^2 = 0.37 - 0.34 (0.37)^2$.

ETR = 323.45mm, soit 86.89% des précipitations.

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle calculée par les différentes méthodes sont récapitulées dans le tableau 8.

Tableau 8. Calcul de l'ETR par les différentes méthodes

Méthodes	ETR (mm)	% par rapport des précipitations
Thornthwaite	342.52	92.01
L. Turc	357.65	96.07
A .Coutagne	323.45	86.89

4.1.3. 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 :

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

avec:

R : ruissellement moyen annuel (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm).

On a : P= 372.25mm, ETP = 843.85mm; ce qui donne un ruissellement de :

R = 24.15mm, soit 6.51% des précipitations d'où une infiltration :

I = 5.58mm, soit 1.50% des précipitations

Les différents paramètres du bilan sont récapitulés dans le tableau 9 et Fig. 19.

Tableau 9. Bilan hydrologique de la station de Hammam Grouz (1988-2004) selon la relation de Thornthwaite.

Mois / Paramètre	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	TOTAL
t (°c)	20.63	17.40	12.39	7.89	6.47	7.68	10.19	12.12	17.56	22.40	24.35	26.11	15.43
ETP corrigée (mm)	95.72	68.68	35.41	16.82	12.69	16.31	31.04	43.72	86.95	129.31	150.16	157.04	843.85
P (mm)	39.49	24.88	33.86	47.43	55.59	26.68	32.90	39.15	40.40	16.33	3.89	12.66	372.25
VR	-57.23	-43.80	-1.55	30.61	42.90	10.37	1.86	- 4.57	- 46.55	-112.98	-146.27	-144.38	
R.F.U (mm)	-	-		30.61	56	56	56	51.43	4.88	-	-	-	
ETR (mm)	38.49	24.88	33.86	16.82	12.69	16.31	31.04	43.72	86.95	21.21	3.89	12.66	342.52
EX (mm)	-	-	-	-	17.51	10.37	1.86	-	-	-	-	-	29.74
DE (mm)	57.23	43.80	1.55	-	-	-	-	-	-	108.10	146.27	144.38	501.33

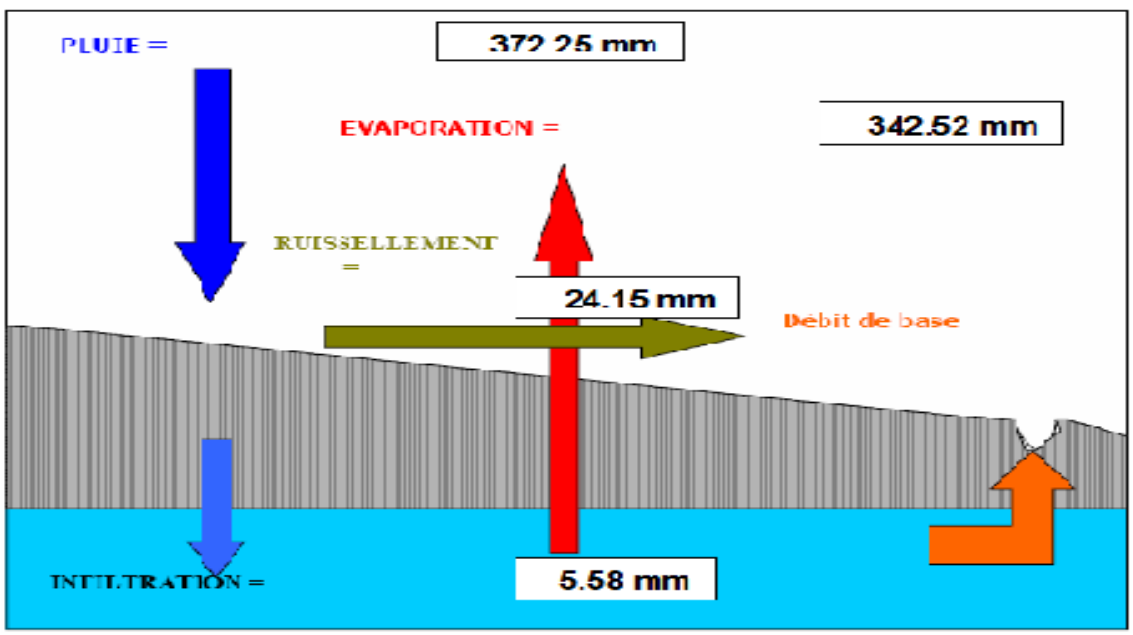


Figure 19. Bilan hydrique simplifié de la station de Hammam Grouz (1988/1989 - 2003/2004)

5. Analyse morphométrique

5.1. Introduction

Le sous bassin du Haut Rhumel est l'un des sept sous bassins du grand bassin versant Kebir Rhumel, alimentant le barrage du Hammam Grouz à Oued El Athmania (fig.20).

Le sous bassin couvre une superficie de 1120 Km^2 et il est limité :

- Au Nord les monts de Benyahia Abderrahmane et Bouhatem.
- Au Sud par les monts de Oueled khlouf et Ltaya.
- A l'Ouest par Dj Ouled Hammou et dj Tavoudach à coté de Bir ElArch .
- A l'Est par Dj Grouz et Dj Tikouya (Coté de Chelghoum Laid).

Ces principaux affluent sont O. Merdj el kebir, O. Boumrah, O.Timeslit,O.Maamra ,O.Oufrich, O.Mehari , O.Boutouil, constituant l'amont de oued Rhumel, le cours d'eau principal.

Le sous bassin-versant peut-être décomposé en quatre zones hydrologiques distinctes :

-Le Rhumel-amont (de Bellaa à Chelghoum Laid) avec Oued El Mehri, comme affluent. Il draine près de la moitié de l'aire du bassin au barrage ;

- L'Oued Dekri constitue, dans la partie Nord du bassin, le plus important affluent par ses capacités d'écoulement car charriant les eaux de ruissellement, issues des collines relativement arrosées du piémont Sud-tellien ;

-Le sous bassin, constitué par les affluents de la zone Sud-Est qui s'écoulent à partir d'une ligne de djebels Chebka-Tikouya;

- La zone hydrographique « inactive », au Sud de Tadjenanet (piémont du djebel Tafrent). En raison du double effet de l'évaporation et de l'infiltration, l'écoulement sur ces glacis fortement encroûtés atteint difficilement le cours principal. Le bassin du haut Rhumel est soumis en grande partie au climat semi-aride des Hautes Plaines.

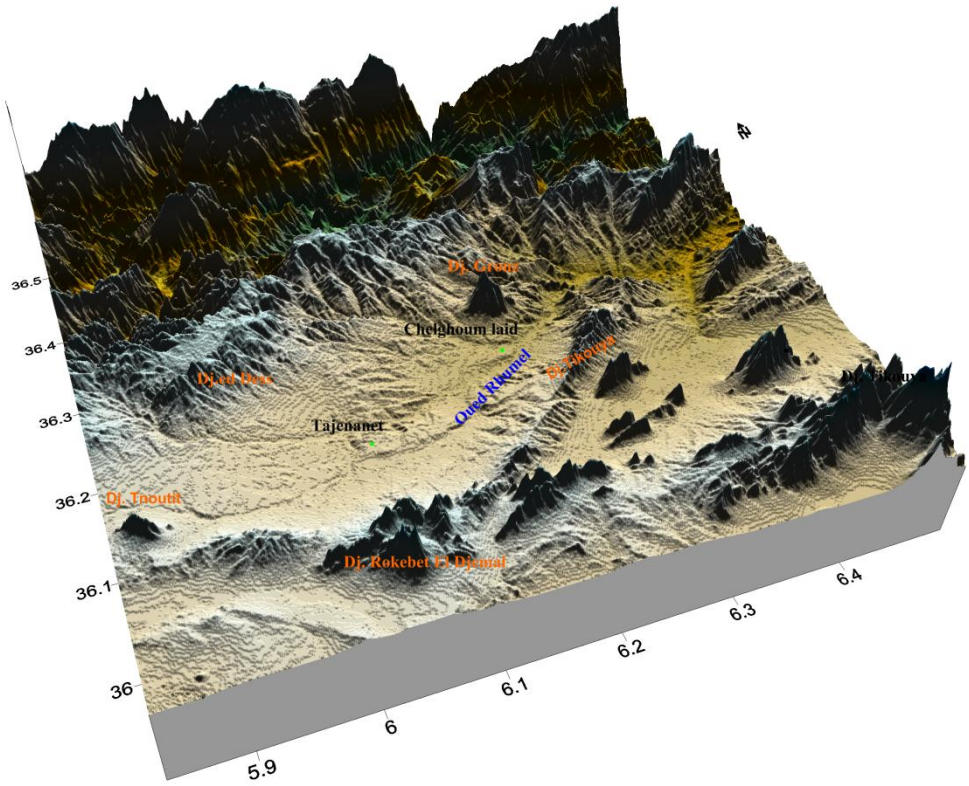


Figure 20. Bloc diagramme du bassin versant de Tadjenanet – Chelghoum laid

5.2. Variation de l'altitude

L'étude des classes d'altitude par tranches de 100 m (Tab. 10) a permis de définir une superficie totale du bassin versant de l'amont de oued Rhumel d'ordre 1120 km^2, dont le périmètre est d'ordre de 140 km.

La répartition des altitudes du bassin versant étudié, nous a permis de réaliser la courbe hypsométrique et le diagramme de fréquence altimétrique en fonction de la surface. Fig.21.

A partir de la courbe, nous pouvons déterminer :

Altitude médiane : 880m

Altitude moyenne : 898.45m

Dénivelée simple (H5% - H95%) : 313 m

Tableau 10. Répartition altimétrique du bassin versant de Tadjenanet – Chelghoum Laid

Classe d'altitude (m)	Superficie (Km²)	Superficie (%)	Superficie cumulée (km^2)	Superficie cumulées (%)
1200>	3.1815	0.284	3.1815	0.284
1200 - 100	38.7147	3.45	41.9163	3.74
1100 - 1000	116.7052	10.42	158.622	14.16
1000 - 900	301.2668	26.89	459.8888	41.04
900 - 800	540.3624	48.23	1000.2512	89.27
800 - 700	120.2188	10.73	1120.4494	99.9
700 - 600	0.0206	0.013	1120.47	100

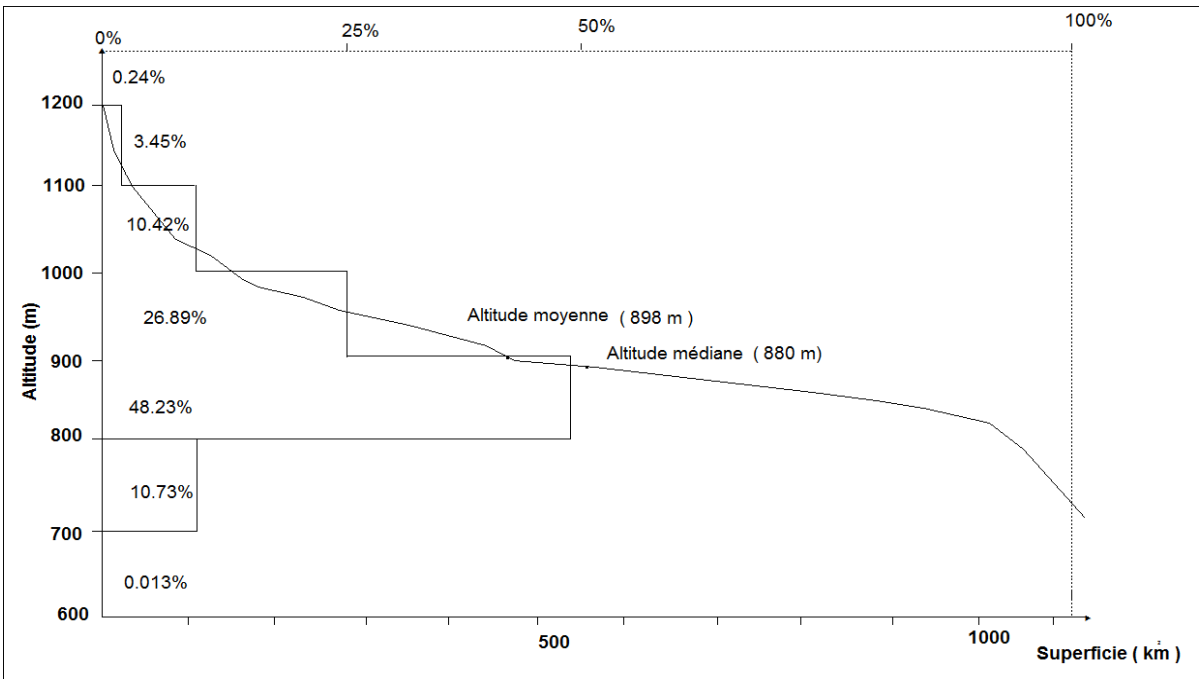


Figure 21. Courbe hypsométrique du sous bassin de Tadjenanet – Chelghoum Laid

5.3. Forme du bassin

La forme du bassin se détermine par l'indice de compacité de Gravelius donnée par la formule suivante :

$$K_c = 0.28.P/\sqrt{S}$$

où P et S sont respectivement, le périmètre et la surface du bassin.

Pour notre bassin $K_c = 1.17$, donc $K_c > 1.12$ autrement dit le bassin est allongé.

5.4. Densité de drainage

La densité de drainage d'un bassin donné est définie comme la longueur totale des cours d'eau de tout ordre sur la surface drainée.

$$D_d = L / A$$

où L : longueur totale cumulées des drains permanents et temporaire (km) ;

A : surface du bassin (km^2)**.**

On distingue la densité de drainage totale, permanant et temporaire.

Pour notre bassin D_d = 0.71 ^{2}km/km dont 0.61 km/km^2 de densité de drainage temporaire.

Ce qui explique que la majorité des cours d'eau sont généralement à sec à l' exception des périodes de crues à la faveur des pluies torrentielles.

5.5. Profil en long

D'après le profil tracé le long du cours d'eau principal, le Rhumel (fig. 22), il prend naissance à partir des monts de Bellaa sur une altitude de plus de 1100 m avec une direction perpendiculaire à la surface topographique jusqu'à son confluence avec oued El Mehri à l'aval de Tadjenanet, puis il change de direction au niveau de Draa Mastaoua au centre de la plaine vers l'Est, où il rencontre oued Dekri à l'aval de Chelghoum Laid. Depuis ce point, il maintient un parcours plus au moins rectiligne jusqu'à son engagement dans le barrage de Hammam Grouz à une altitude de 740 m.

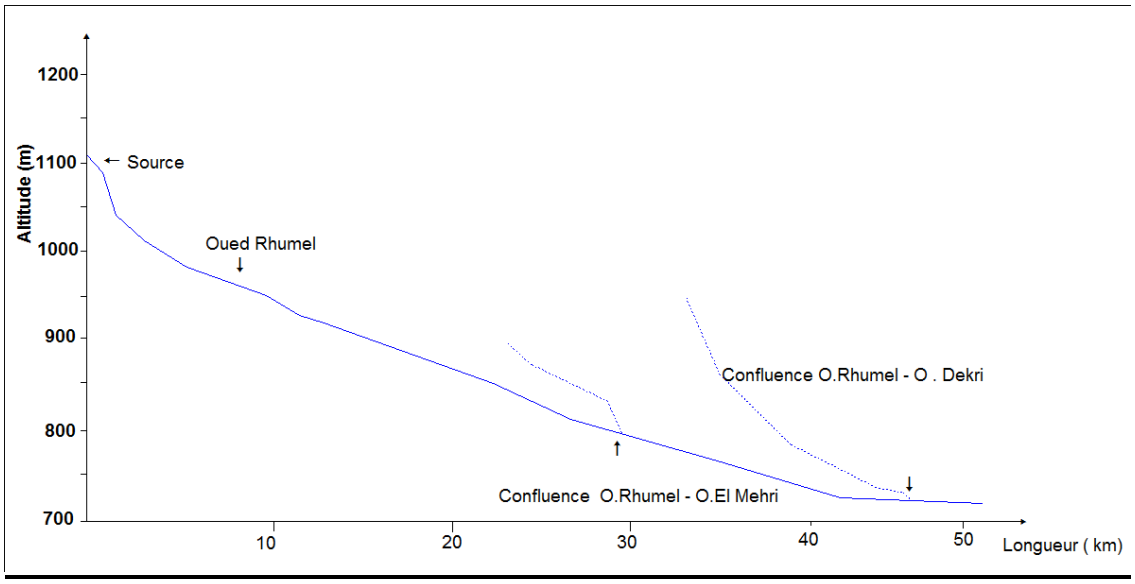


Figure 22. Profil en long de l'amont de Oued Rhumel et ses affluents

6. Conclusion

L'étude climatologique de la région étudiée montre que le climat dominant est typiquement semi-aride, de type continental caractérisé par une irrégularité annuelle et mensuelle. L'analyse morphométrique de notre bassin versant montre que le bassin est allongé avec la dominance d'une zones d'altitude comprise entre 800 et 1000 m, dont la

densité de drainage totale est d'ordre de 0.71 km/ km^2. L'établissement du bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite sur une période de seize ans (1988/89 -2003/2004) à la station de Hammam Grouz, montre que cette région est déficitaire, avec respectivement, une moyen annuelle des précipitations et de température de l'ordre de 372.25 mm et 15.43°C. L'évapotranspiration réelle représente 92% des précipitations, alors que l'infiltration est très faible et ne représente que 1.5% des précipitations (5.58 mm). Le bilan est caractérisé par un déficit d'écoulement qui s'étend du mois de juillet au mois d'octobre, avec une moyenne annuelle de l'ordre 501 mm et par un excédent égal à 29 mm, soit 8% des précipitations.

Ceci laisse supposer que l'alimentation de la nappe ne se fait pas uniquement par infiltration efficace, mais qu'une bonne partie de l'eau d'alimentation provienne par les formations carbonatées bordent la nappe.

CHAPITRE III

GEOMETRIE DU COMPLEXE AQUIFERE

GEOMETRIE DU COMPLEXE AQUIFERE

1. Introduction

La prospection électrique permet de quantifier l'effet produit par un courant électrique traversant le sous-sol. Il existe une grande variété de techniques utilisant les méthodes électriques. Par ailleurs, dans un domaine envisagé, il existe de nombreuses techniques de mesure. Les méthodes fondées sur la mesure du paramètre " résistivité ", (imaginées en l9l2 par les frères Schlumberger), sont actuellement les plus répandues, plus développées et les plus diversifiées.

La méthode utilisée dans le cas de Tadjenanet-Chelghoum Laid, est celle des sondages électriques (S.E) de type Schlumberger. Une campagne de géophysique par SE a été effectuée par la société Algérienne de géophysique (ALGEO) en 1977 dans la région de Tadjenanet-Chelghoum Laid. Le but était l'exploration des ressources en eau pour les besoins du complexe détergent (S.N.I.C.), localisé dans la zone industrielle de Chelghoum Laid. Une étude géophysique antérieure a été réalisée par la compagne générale de géophysique (CGG) en 1973 qui a concerné les hautes plaines sétifiennes et qui a touché la région de Tadjenanet, afin d'étudier les possibilités aquifères de la région.

Pour caractériser le sous-sol par la mesure de la résistivité, ce paramètre peut varier de la manière suivante : (Astier, 1971 ; Boudoukha, 2008)

- de 1 à quelques dizaines d'ohm.m pour les argiles et les marnes ;
- d'une dizaine à quelques centaines d'ohm.m pour les sables et les grès marneux ;
- d'une centaine à plusieurs milliers d'ohm.m pour les calcaires et les roches éruptives.

2. Situation de l'étude

La zone prospectée par ALGEO couvre 600 Km^2 et s'étend de part et d'autre de Chelghoum Laid (fig. 23).

- Vers l'Ouest, elle s'étend jusqu'à la limite administrative de la Wilaya de Mila en passant par Tadjenanet ;
- Vers l'Est, elle s'étend jusqu'à Hammam Grouz.

La partie couverte par l'étude de la CGG en 1973, elle s'étend de l'Ouldja à Bir el Arch à la limite ouest du terrain étudié.

3. Répartition des sondages électriques

Dans la zone étudiée, les sondages électriques ont été disposés suivant des profils de direction Nord-Sud, espacés de 4 km. Ces sondages étant distants d'environ 1 km sur ces profils. Les S.E., qui se trouvent dans la zone étudiée, forment les profils A, B, C, D, E, F, G, H et I (ALGEO.1977) et A', B', C' et D' (CGG.1973). Fig. 23.

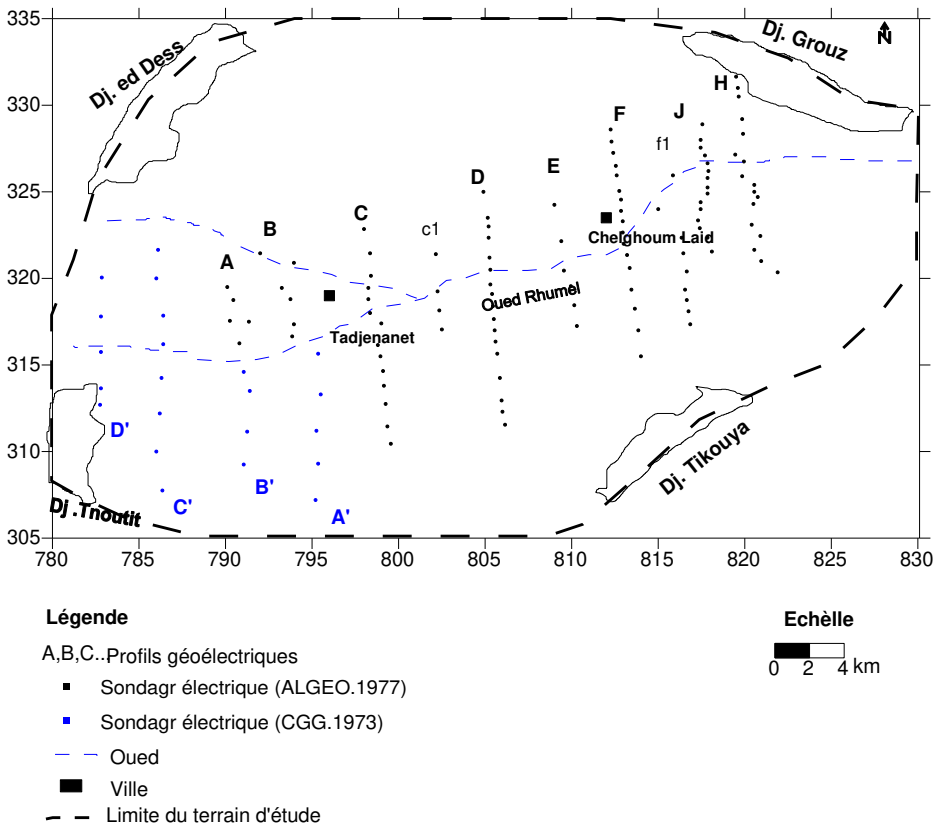


Figure 23. Carte de position des sondages électriques dans la plaine de Tadjnanet-Chelghoum Laid.

4. Interprétation

4.1. Examen de quelques familles de S.E

Une courbe de sondage électrique représente la variation de la résistivité en fonction de la demi-longueur des lignes AB. Elle traduit donc les variations de la résistivité apparente selon la profondeur d'investigation. L'interprétation de cette courbe, permet de déterminer les paramètres géoélectriques de la couche traversée par le courant. Les difficultés de l'interprétation des données géophysiques sont liées à l'absence de forages pouvant servir d'étalon, pour faire correspondre les résistivités aux terrains géologiques présents.

4.1.1. Sondage électrique à l'extrême-Ouest, coupe A

Parmi les courbes de sondages électriques qui présentent une forme complexe, celle du SE A5. Cette courbe montre la présence de cinq terrains où alternent des couches résistantes et couches conductrices : 100, 10,50 et 40 ohm.m. Fig. 24. La couche caractérisée par une résistivité de 50 ohm.m, correspondant à des calcaires lacustres ayant une épaisseur de 23 m se trouvant à une profondeur de 40 m environ.

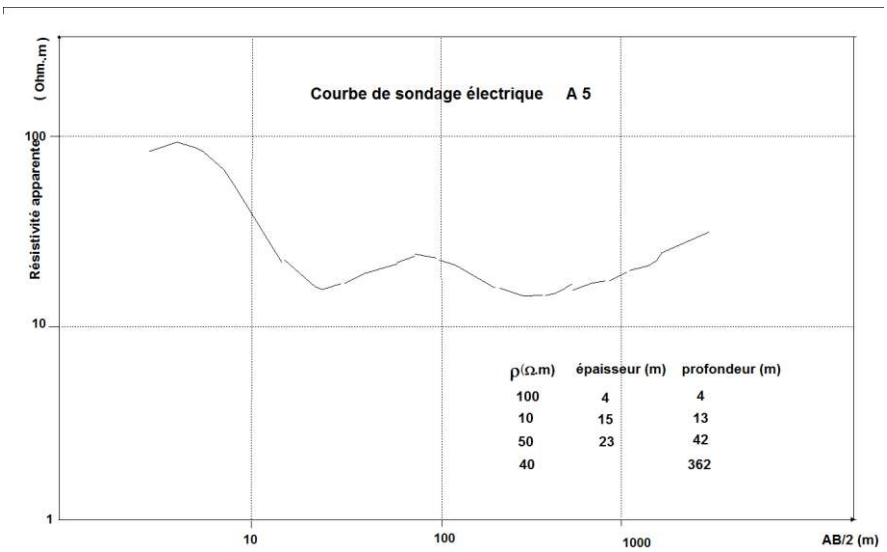


Figure 24. Courbe du sondage électrique A5.

4.1.2. Sondage électrique étalon B3

Un SE étalon en ligne AB=2000 m, a été réalisé à côté d'un forage d'une profondeur de 278 m dans la région de Chabet Rmali à l'Ouest de Tadjenanet aux coordonnées suivantes : X = 800 km, Y = 317 km.

La courbe a une forme du fond du bateau correspond électriquement à un trois terrains. L'analyse du log stratigraphique du forage, permet de voir qu'on a un empilement de six terrains mais leurs natures ne leur permettent pas de les distinguer électriquement. Fig. 25. Le calage de ces données permet d'avoir les résistivités électriques des couches correspondantes. Tableau 11.

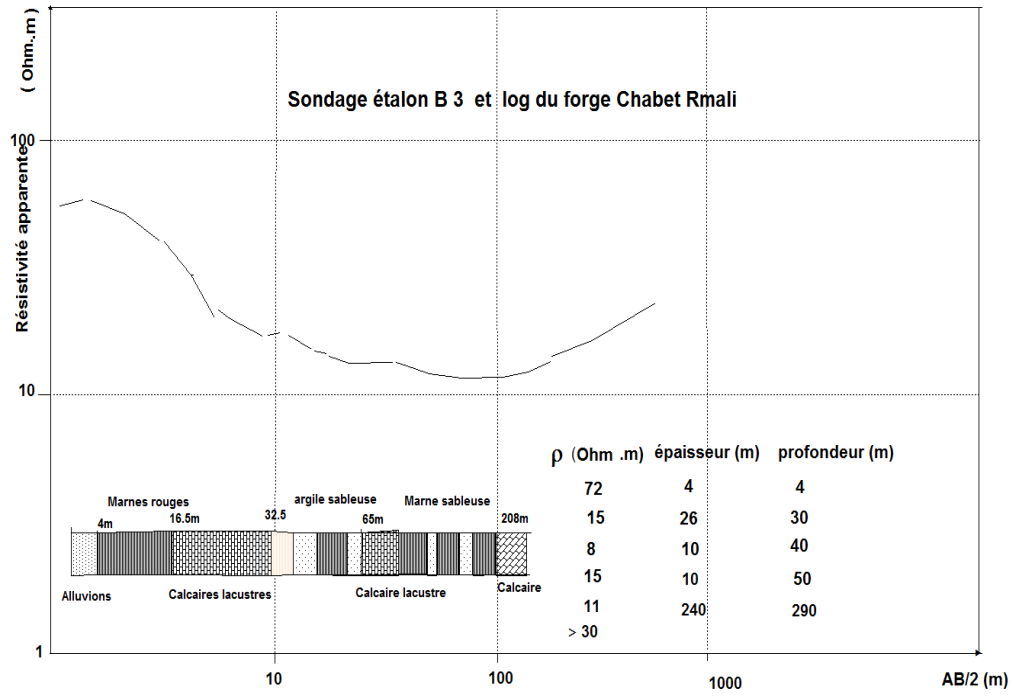


Figure 25. Courbe du sondage électrique d'étalonnage B3.

Tableau 11. Calage du SE B3 sur les données du forage de Chabet Rmali

Résistivité ohm.m	Lithologie	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
72	alluvions	4	4
15	Marne et Calcaire lacustre	26	30
8	Argile sableuse	24	33
15	Calcaire lacustre	94	127
11	Marne	240	290
> 32	calcaire		

4.2. Cartes de résistivité

Lors de cette compagne, les lignes d'injection AB étaient de 200 m, 400 m et 3000 m ce qui correspond à des profondeurs d'investigation moyennes respectives égales à 35 m, 65 m et 500 m. Ces différentes lignes AB ont permis de tracer les cartes de résistivité correspondantes.

4.2.1. Carte de résistivité AB = 200 m

Les résistivités égales ou supérieures à 150 ohm.m forment une tache au centre, au Sud et au Sud-Ouest. Cette tranche de résistivité correspond aux calcaires marneux du Crétacé et

de l'Eocène. Par ailleurs les valeurs plus faibles (voisines de 20 ohm.m), correspondent aux formations du Mio-Plio-Quaternaire (argile, marne, sable et alluvions). Fig. 26.

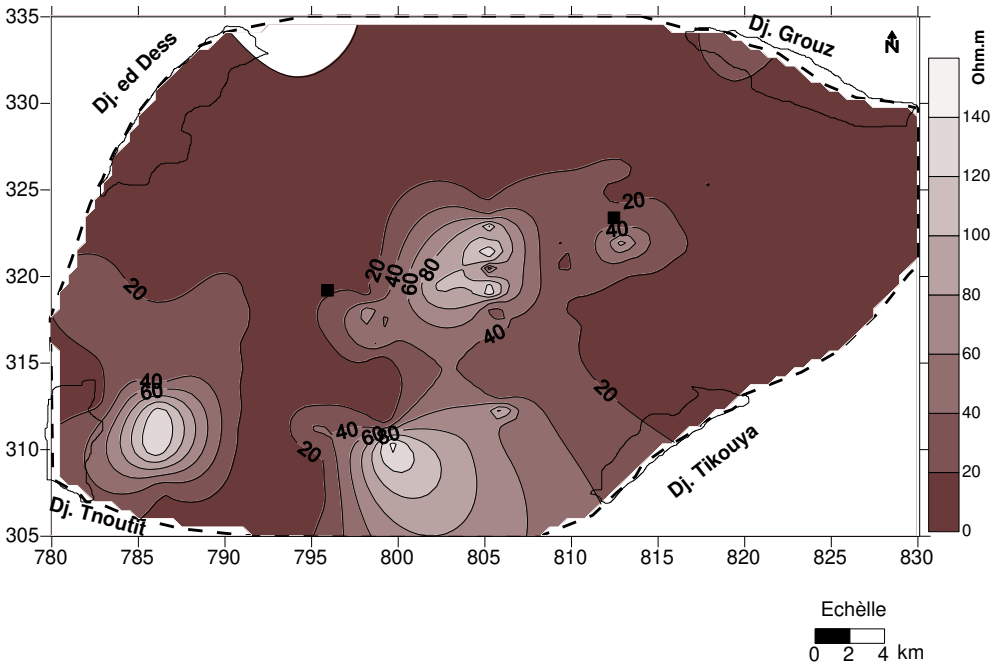


Figure 26. Carte de résistivité AB = 200 m

4.2.2. Carte de résistivité AB = 400 m

Cette carte permet de distinguer une répartition des plages de résistivité semblable à cette de AB=200 m. Il s'agit toujours des calcaires marneux de Crétacé et de l'Eocène. Le reste du terrain est occupé par une formation plus au moins conductrice caractérisant les formations du Mio-Plio-Quaternaire, de résistivité inférieure à 20 ohm.m. Fig. 27.

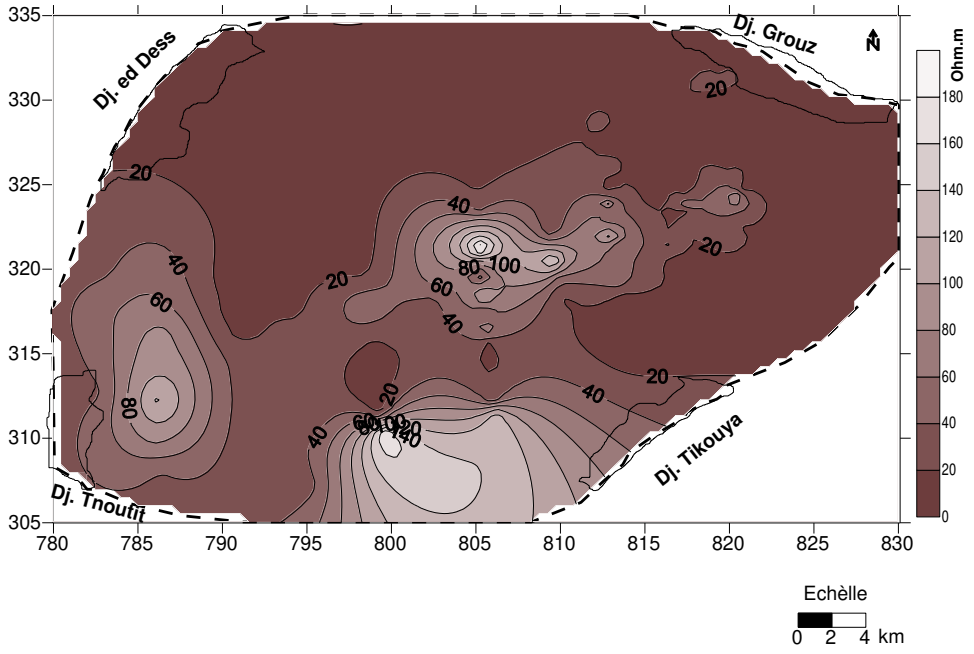


Figure.27 Carte de résistivité AB = 400 m

4.2.3. Carte de résistivité AB = 3000 m

L'examen de cette carte montre la variation de la résistivité à une profondeur moyenne de 500 m. A ce niveau, la résistivité moyenne est de l'ordre 50 ohm.m le long de Oued Rhumel. On retrouve également cette plage de résistivité au Nord-Est et à l'Ouest de Dj. Tikouya. Au Sud-Ouest, les calcaires du Barrémien du massif de dj. Tnoutit plongent jusqu'à 500 m de profondeur où ils sont caractérisés par une résistivité de 125 ohm.m. L'enracinement des dj. Grouz et Ed Dess, n'apparait pas en profondeur puisque la région est caractérisée par de faibles valeurs de résistivité (<30 ohm.m). Cette carte permet donc de délimiter en profondeur (500 m), les zones où la recherche d'eau est à éliminer. Fig. 28.

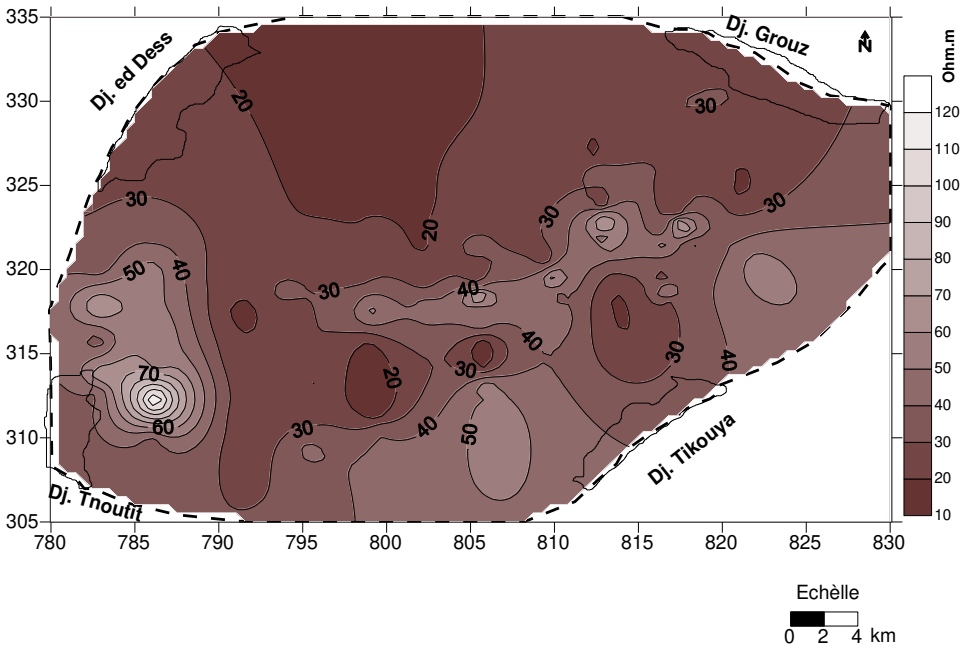


Figure.28 Carte de résistivité AB = 3000 m

4.3. Interprétation 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. 29 et 30. L'examen de ces coupes permet de tirer plusieurs remarques.

-Coupe A :

Le niveau, entre 20 et 60 m de profondeur et de 50 ohm.m est bien visible, correspond aux formations d'argiles sableuses et calcaires lacustres du Pliocène. Vers le Nord il affleure une formation très conductrice de trias.

-Coupe C et D :

Sur la coupe C, l'Eocène s'étend entre C6 et C11. Les couches conductrices sont abondantes. Sur D, le sous ensemble Nord est bien distinct du sous ensemble Sud. Un niveau résistant (d'après CGG 73), il se développerait vers le Sud et se subdivise en deux niveaux, l'un résistant qui pourrait appartenir au Crétacé supérieur (Maestrichtien) et l'autre conducteur qui correspond une formation triasique

-Coupe E :

La coupe E montre bien la formation de l'Eocène, avec des épaisseurs de 200 à 400 mètres, dont la résistivité moyenne est de l'ordre de 100 ohm.m. Le substratum remonte vers le sud, mais reste profond.

-Coupe G :

La coupe représente des niveaux conducteurs (marnes et argiles). Le substratum est relativement peu profond contre le flanc Sud-Est de dj. Grouz (ALGEO 1977).

Nous signalons l'affleurement des masses triasiques localisées dans les monts de Dj. Ed Dess au nord-ouest et Dj Tikouya au Sud-est.

L'examen des coupes D' et E' localisés dans la partie sud-ouest de Tadjenanet précisément le nord-ouest de El Oueldja , nous a permis de constater :

- La présence d'une masse très conductrice d'une résistivité inférieure à 10 Ω.m. Ces masses conductrices sont très épaisses et correspondent à des formations marneuses ou argileuses liées au Trais.
- La présence des masses résistantes épaisses qui ont été attribuées en général au Crétacé inférieur (calcaires et dolomies). Ces masses résistantes (100 à 300 Ω.m) surmontent parfois une formation conductrice.

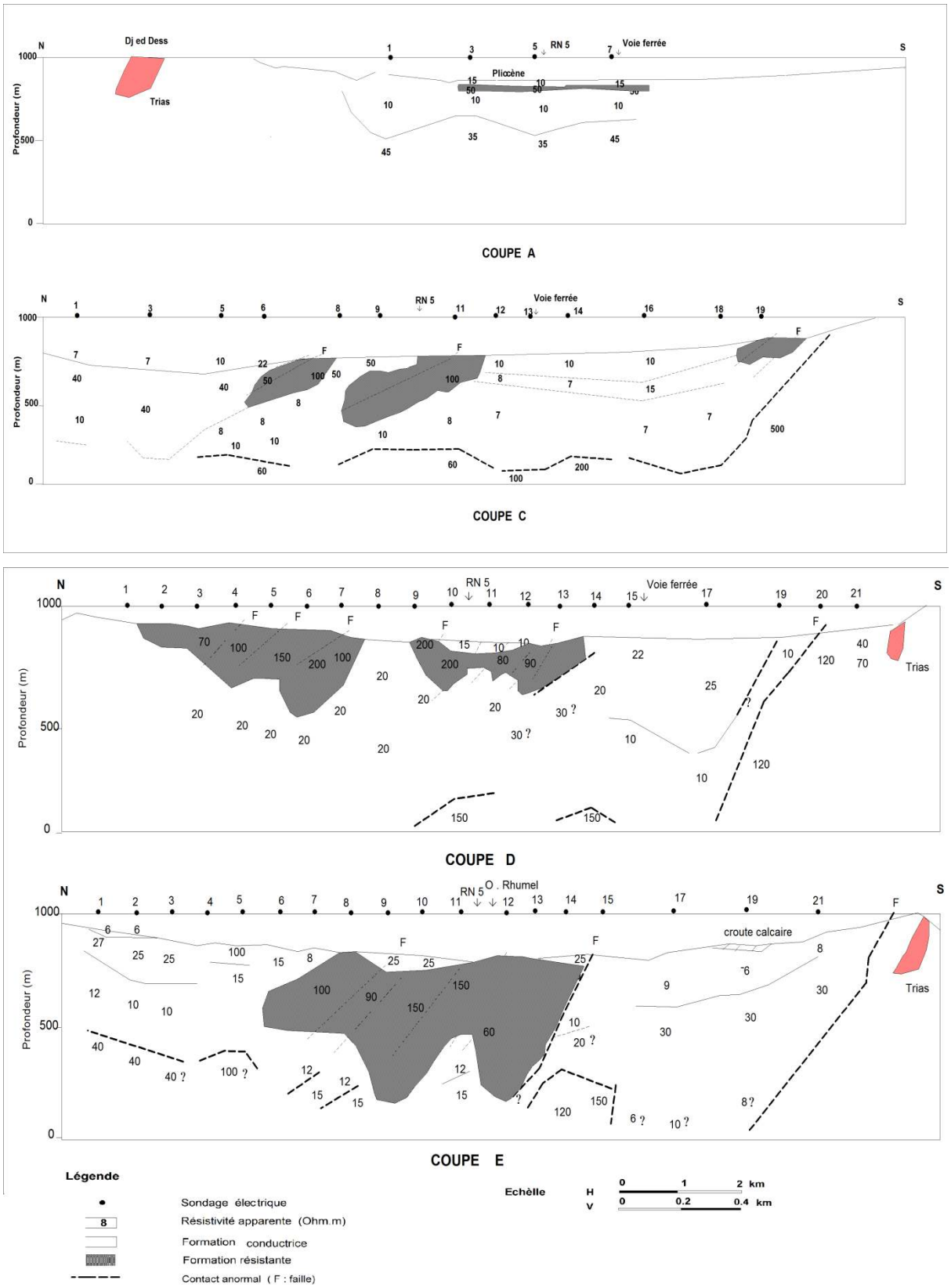


Figure 29. Coupes géoélectriques A, C, D et E

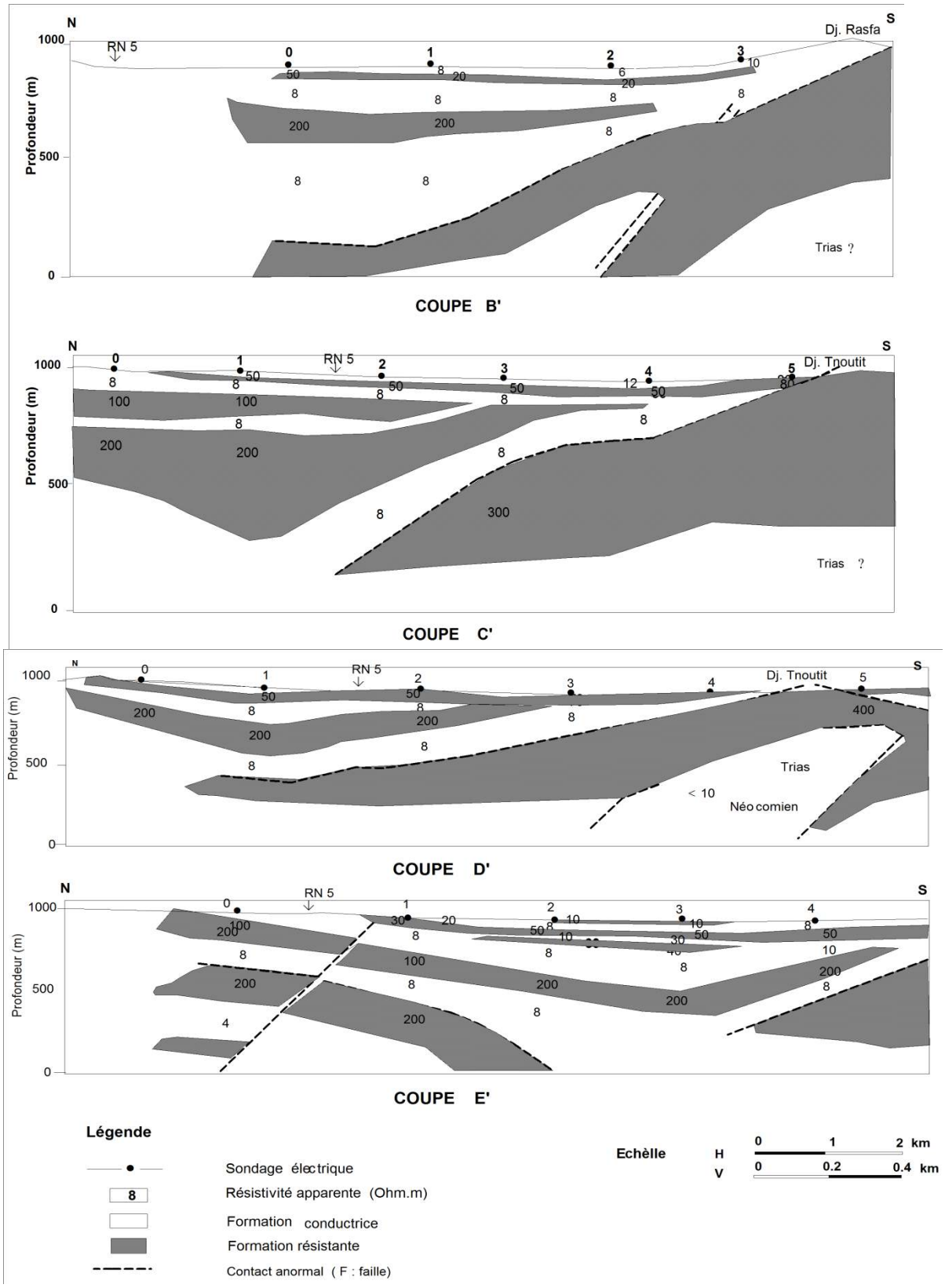


Figure 30. Coupes géoélectriques B' ,C',D' et E'

D'après la morphologie du substratum, on a des formes synclinales, avec un empilement de plusieurs couches successivement conductrices et résistantes. On distingue également

la présence de contacts anormaux dus probablement à la présence côte à côte de formations conductrices et de formations résistantes. La présence d'une formation résistante dont la résistivité moyenne varie entre 20 et 50 Ω.m, avec une épaisseur de l'ordre de 20 à 60 m attribuée à la formation de calcaires lacustres du Mio-Pliocène. Cette formation est tabulaire et elle a un substratum conducteur.

5. Carte du substratum

L'interprétation des coupes géoélectriques permet de renseigner sur la morphologie du substratum de l'aquifère des calcaires lacustres ce qui nous a permis de tracer une carte de substratum. Fig. 31. Le substratum étudié est formé par une couche conductrice dont la résistivité varie entre 8 et 10 Ω.m correspondant à des argiles, identiques sur toute la plaine.

Ainsi la carte du substratum montre que ce dernier remonte au partie ouest du terrain près de Djebel Tnoutit et Djebel Ed Dess . Le substratum devient plus profond en allant vers l'Est (d'environ 120 m de profondeur). Il présente une légère convexité au centre du terrain. Donc nous sommes en présence d'un substratum ayant une morphologie irrégulière qui épouse approximativement la topographie.

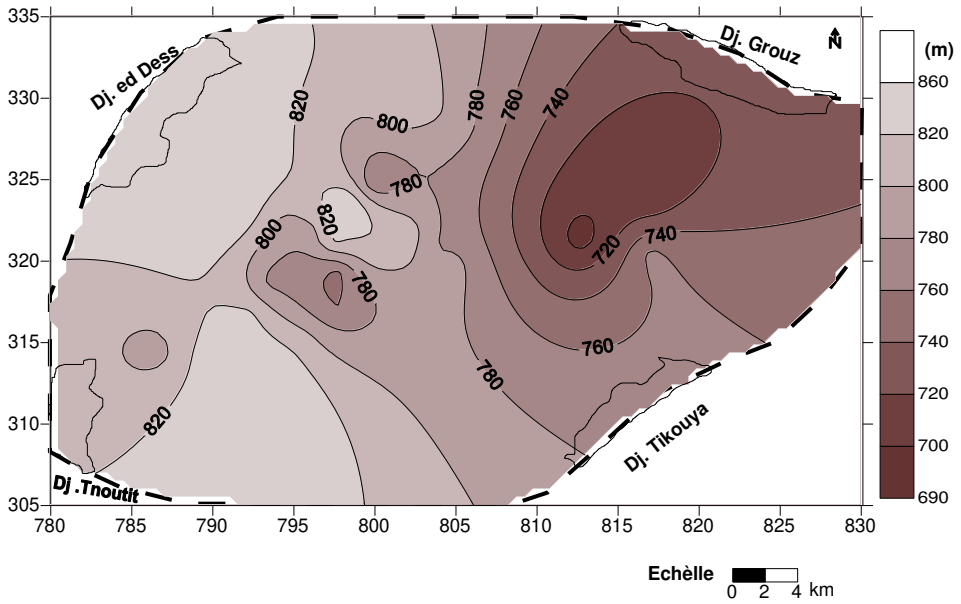


Figure 31. Carte du substratum

6. Carte de la résistance transversale

Pour étudier la potentialité de l'aquifère superficiel, nous avons établis une carte de la résistance transversale. Fig. 32. Cette dernière montre la variabilité de la résistivité de la couche en fonction de son épaisseur. A partir de cette carte, on remarque qu'au centre et à l'Est, une grande résistance transversale (8000 Ωm.m) donc de bonnes caractéristiques hydrogéologiques. Par contre au Nord et au Sud de Tadjenanet, ainsi que sur le flanc Sud

de Dj Grouz, on a de faibles valeurs de la résistance transversale (<2000 Ωm.m), traduisant la présence d'une formation de mauvaises caractéristiques hydrogéologiques.

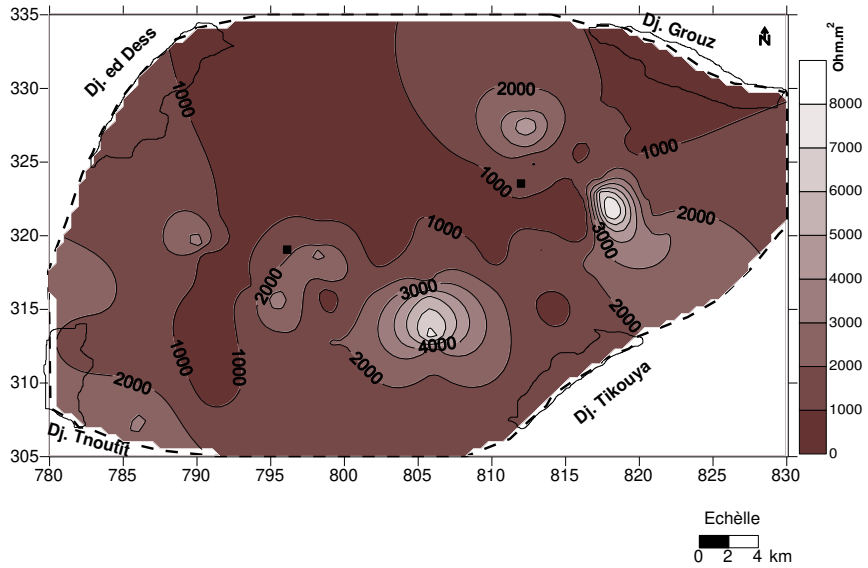


Figure.32 Carte de la résistance transversale

7. Conséquences hydrogéologiques et conclusion

L'étude géophysique de la région nous amène aux conclusions suivantes :

De grandes zones peuvent être éliminées, du fait de l'absence d'horizon intéressants (calcaires ou autre) et du fait de la trop grande profondeur du substratum.

- zone Sud
- zone Nord, excepté le début du profil D
- zone comprise entre l'Eocène ''central'' et Dj. Grouz (quelques S.E, toujours isolés, indiquent des bancs ''résistants'' de faible étendue).
- La zone extrême Sud est contaminée par la présence du Trias triasique.

La zone extrême Ouest vers le profil A, elle présente un banc à 50 ohm.m peu profond dont l'intérêt, s'il est aquifère, ne peut être que local. Le flanc Sud-Est de Dj Grouz offre une situation qui pourrait être favorable de même que pour les calcaires de l'éocène '' central '' qui ne semblent pas aquifères.

Les cartes établis selon les différentes profondeurs, nous ont permis de constater la présence de deux grandes formations géologiques. L'une a une résistivité moyenne inférieur à 50 Ohm.m correspondant aux formations du Mio-Plio-Quaternaire (argiles, alluvions, croutes calcaire, calcaire lacustre, alluvions) se trouvant sur la totalité du terrain (plaine et terrasse de oued Rhumel), l'autre plus au moins résistante (résistivité

sup. à 50 Ohm.m) caractérisant les formations carbonatées appartenant aux formations de l'éocène et du Crétacé. Ces deux formations peuvent avoir un intérêt hydrogéologique.

Le substratum de l'aquifère est constitué par une formation conductrice (argile et marnes), ayant une morphologie irrégulière, ce qui influencera sans doute le comportement hydrodynamique de l'aquifère.

CHAPITRE VI

HYDROGEOLOGIE

HYDROGEOLOGIE

1. Introduction

Les différentes études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques menées dans la région (KHEDIDJA, 2001 **;** CGG, 1973 **;** BENSOUILAH, 1995) ont montré l'existence de trois formations géologiques perméables permettant la formation de trois aquifères.

- Un aquifère dont la perméabilité est liée à un réseau de fissure caractérisé par une circulation karstique dans les formations calcaires néritiques du Crétacé et de l'ensemble allochtone su d Sétifien. (KHEDIDJA. 2001 **;** ISSAADI.1981).
- Un aquifère superficielle dans les alluvions du Quaternaire développé au niveau d'Oued Rhumel qui est en phase de déstockage.
- Un aquifère continu dans les formations fluvio- lacustres d'âge Mio-Pliocène.

Le premier s'étend sur toute la partie Nord Est de la région dans le massif carbonaté du Crétacé de Djebel Grouz et la partie Sud-Ouest, dans le massif carbonaté de Djebel Tnoutit. On retrouve également ce type d'aquifère dans les calcaires de l'Eocène qui affleurent dans la partie centrale de la plaine, au Nord et au Sud.

Le deuxième aquifère est peu épais et il est étroitement lié au cours d'eau. En période d'étiage, il alimente le cours d'eau, par contre en période de hautes eaux c'est l'inverse qui se produit. Le long de Oued Rhumel, cette nappe est en partie alimentée par l'aquifère des calcaires néritiques du Crétacé. Toutefois, il est intéressant de noter qu'une partie de cette nappe alluviale a une forte minéralisation suite à une intense évaporation. Son niveau piézométrique est relativement proche de la surface du sol, de 0 à 3m (FARAH, 1991), il a donc peu d'intérêt du point de vue hydrogéologique.

Par contre le troisième aquifère se trouvant dans les formations du Mio-Pliocène couvrant d'importantes superficies et il a de bonnes potentialités. L'épaisseur de l'aquifère varie de 100 à 150 m et il est constitué par des dépôts fluvio- lacustres offrant habituellement une coloration rougeâtres assez prononcée. Ces formations affleurent beaucoup plus sur la périphérie du bassin versant. Il s'agit des calcaires lacustres, de marne rouge, de limon et de sable rouge.

Dans cette partie on ne s'intéressera qu'au deuxième et troisième aquifère.

2. Aquifère du Mio-Plio- Quaternaire

2.1. Description

Cette nappe de grande extension, occupe la quasi-totalité de la région d'étude, elle s'étend de Bir El Arch à l'Ouest jusqu'à Oued Athmania à l'Est en passant par Tadjnanet et Chelghoum Laid. Cet aquifère s'est formé dans les grés, graviers, sables, alluvions et calcaires lacustres dans lesquels on y trouve des passages d'argile et de marnes. Le substratum est formé par des argiles et marnes du miocène.

L'alimentation de cet aquifère se fait à partir des précipitations par infiltration surtout durant les périodes de crue de oued Rhumel, et par une alimentation latérale à partir des formations carbonatées se trouvant sur les limites au niveau des Dj Dess, Tnoutit et Grouz. Nous signalons que cet aquifère est interrompu par des accidents tectoniques ou complètement érodés laissant ainsi apparaitre les calcaires de l'Eocène au centre du terrain, ce qui est confirmé par la prospection électrique. Ceci est très visible au bord de la route nationale5 (RN 5) entre Tadjnanet et Chelghoum Laid. Cet aquifère joue un rôle très important dans l'alimentation en eau potable des habitants de la région d'étude.

2.2. Géométrie de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire

Le dépouillement des log lithostratigraphiques de quelques forages mécaniques implantés dans la plaine d'étude nous a permis d'établir une coupe hydrogéologique. Fig. 33.

L'examen de la coupe hydrogéologique de direction Sud-Ouest - Nord Est, établie à partir des logs stratigraphiques des forages a mis en évidence la présence d'un remplissage Mio-Plio-Quaternaire, constituée par des dépôts très variés correspondant aux alluvions, grés ,sable et calcaire lacustres, d'épaisseur allant jusqu'à 110 m, reposant sur un substratum imperméable formé de marnes et argiles. L'aquifère superficielle devient mince près de Oued Rhumel suite aux contacts anormaux, qui laissent apparaitre les formations de l'Eocène au centre du terrain. À la partie sud-ouest, l'aquifère du Mio- Plio- Quaternaire est en contact direct avec la formation carbonatée du Crétacé par la mise en place d'un accident tectonique. Selon l'orientation de la coupe, l'écoulement des eaux souterraines convergent vers Oued Rhumel.

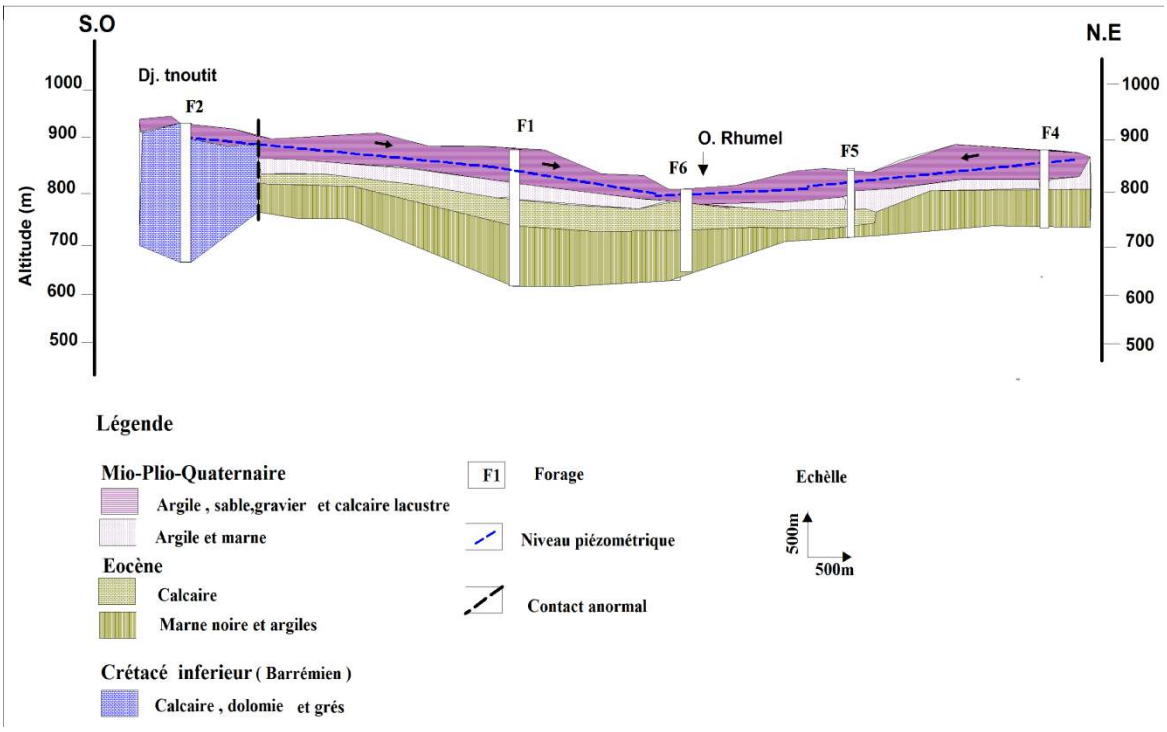


Figure 33. Coupe hydrogéologique

3. Piézométrie

La piézométrie schématise le fonctionnement de l'aquifère et son comportement hydraulique. Elle permet principalement :

*D'analyser la morphologie de la surface piézométrique;

*De définir la direction des axes principaux d'écoulement et des axes de drainage ;

*De définir les conditions aux limites.

3.1. Inventaire des points d'eau

Durant le mois de Mai de l'année 2007, nous avons effectué un inventaire de tous les points d'eau (puits et forages), implantés dans la plaine (annexe.1). En parallèle, nous avons mesuré les niveaux piézométriques dans les différents points d'eau. 67 points d'eau ont été recensés. Fig. 34. La forte densité des points d'eau, nous a permis d'adopter un maillage de l'ordre du Km². Les puits réalisés sont pour la plupart des ouvrages récents, forés à la main et soutenus par du parpaing, ayant un diamètre qui varie entre 1 m et 4 m. Ces ouvrages ne sont pas couverts et équipés par des pompes électriques. Tous ces points d'eau sont destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation des cultures maraîchères. Nous signalons que la majorité des puits sont imparfaits.

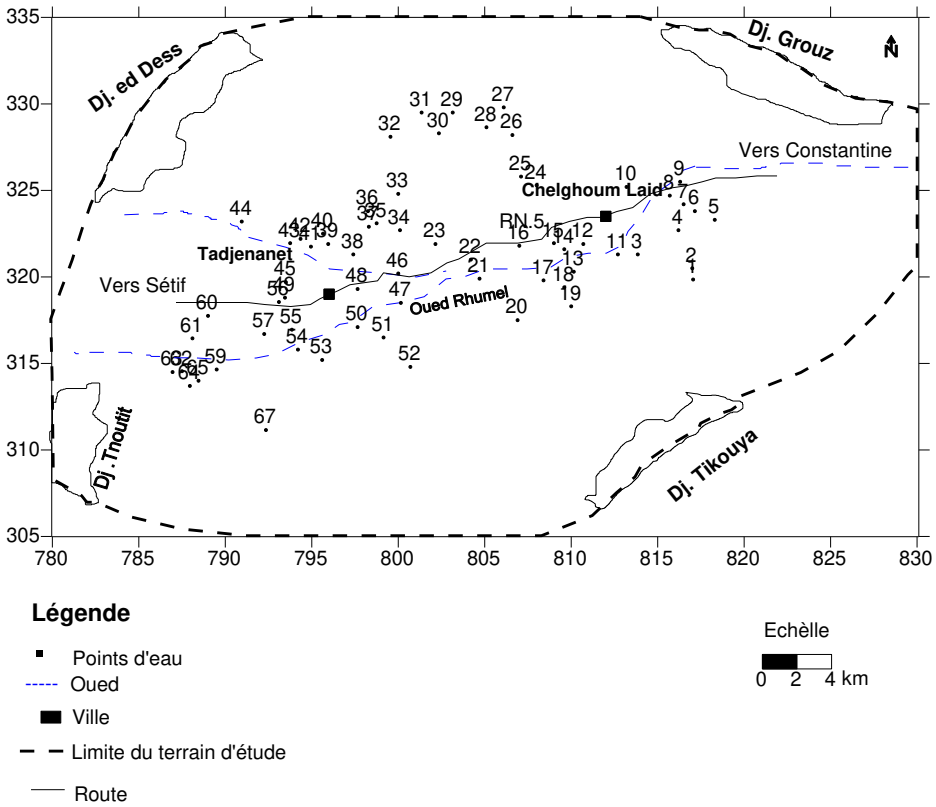


Figure 34. Carte d'inventaire des points d'eau

Les données piézométriques mesurées au niveau des 33 points d'eau retenus, nous ont permis de tracer :

- Deux cartes piézométriques la première au début de la période de basses eaux (Mai 2007) et la seconde à la fin de la période de basses eaux (Septembre2007) ;
- Une carte d'égale épaisseur de la couche mouillée ;
- Une carte de battement.

3.2. Conditions aux limites

L'analyse de la carte piézométrique (fig. 35) montre que la nappe a :

- Une limite à flux entrant à partir des massifs carbonatés qui encadrent la plaine au Nord, au Sud-Ouest, et au Nord ;
- Une limite étanche au Sud-Est du terrain caractérisée par la présence des formations imperméables évaporitiques et marneuses. Le substratum est formé par des argiles et des marnes.
- Une dépression piézométrique confondue avec la cuvette du barrage

3. Interprétation de la carte piézométrique (Mai 2007)

L'étude de la carte piézométrique (fig.35), montre que la nappe a une surface piézométrique irrégulière, sa profondeur par rapport au sol est variable. L'examen de l'allure des courbes isopièzes permettent de caractériser une dépression piézométrique à

la partie avale de Oued Rhumel suite à l'abaissement du substratum selon la direction Ouest -Est.

L'aquifère étudié est caractérisée par un écoulement convergeant vers l'est caractérisé par des courbes isopièzes fermées de direction Ouest – Est qui coïncide avec la morphologie du substratum. Les courbes isopièzes sont très serrées à l'Ouest et à l'Est traduisant un gradient hydraulique moyen de l'ordre de 3%, ce qui implique une faible perméabilité. Au centre et à l'extrême Est du terrain, les courbes sont plus espacées traduisant un gradient hydraulique plus faible de l'ordre de 1%. Ce faible gradient est dû à la bonne caractéristique du terrain.

L'alimentation se fait en grande partie par les formations carbonatées du Crétacé inférieur du Djebel Tnoutit et Djebel Grouz ainsi que les formations éocènes de Draa Mestaoua et Djebel ed Dess.

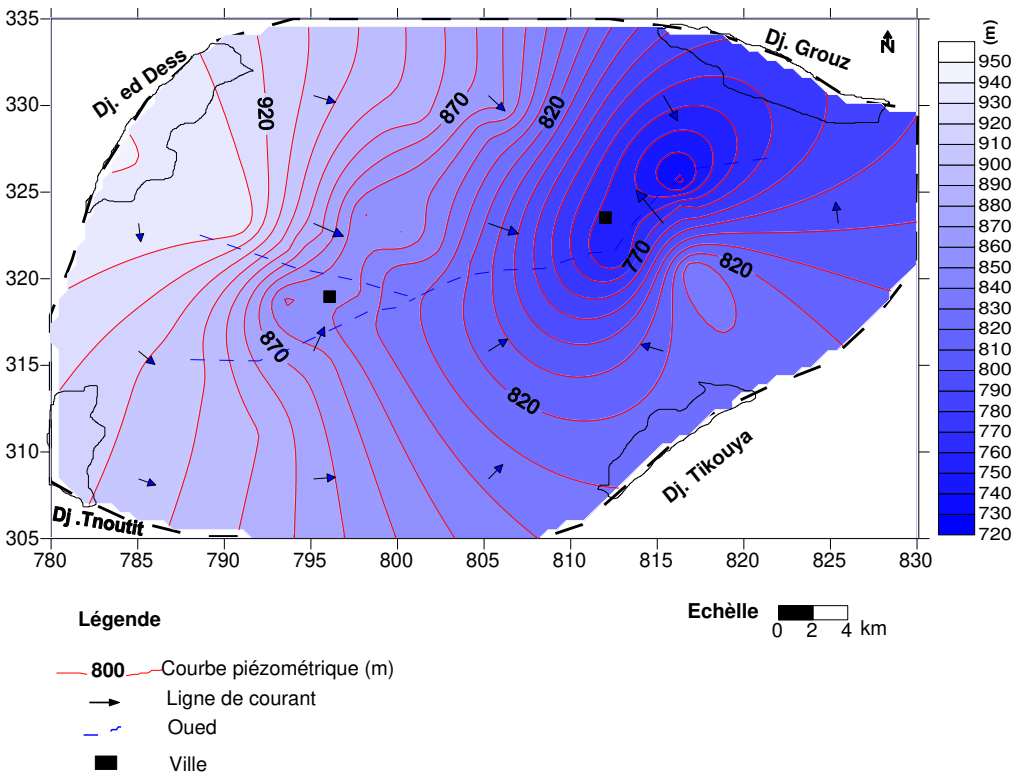


Figure 35. Carte piézométrique. Mai 2007

4. Interprétation de la carte piézométrique (Sep 2007)

Afin de voir l'évolution de la piézométrie de la nappe dans le temps, on a établi une deuxième carte piézométrique durant la fin de la période des basses eaux pendant laquelle l'exploitation est intensive, sous des conditions climatiques très défavorables. Fig. 36. La morphologie piézométrique de la nappe est identique à celle du mois de Mai

2000, ceci permet de dire que le comportement hydrodynamique de la nappe est stable dans le temps. La différence entre les deux périodes n'est visible qu'au niveau de la côte piézométrique comme le montre la carte de battement.

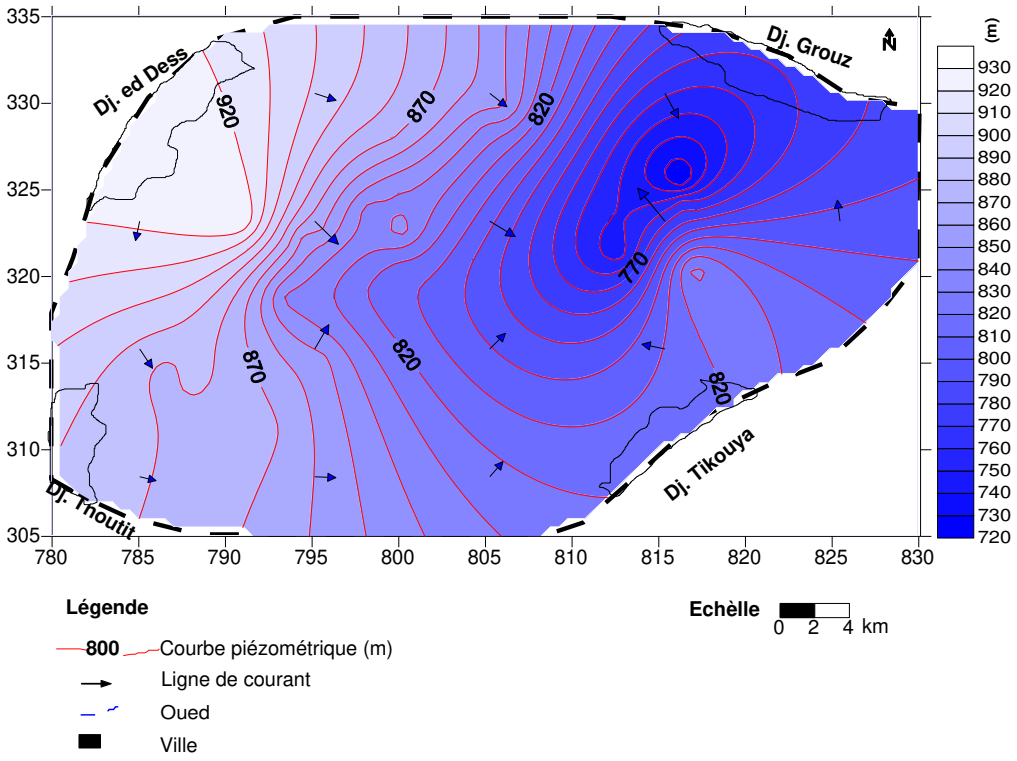


Figure .36 Carte piézométrique. Septembre 2007

5. Battement de la nappe

La confrontation des deux cartes piézométriques (Mai et Septembre 2007), nous a permis de tracer la carte de battement de l'aquifère. Fig. 37. Selon la carte établie on a enregistré un abaissement de la nappe de 1 à 8 m. Cet abaissement est dû à un excès de pompage, sous un régime non influencé. Les fortes valeurs de battement ont été enregistrées au centre du terrain (6 à 8 m). Ceci est dû à la présence d'un nombre élevé de points d'eau implantés dans cette zone. Par contre le reste du terrain n'a enregistré qu'un faible battement qui varie entre 1 et 2 m surtout à la périphérie de la nappe là où l'alimentation latérale est bien marquée.

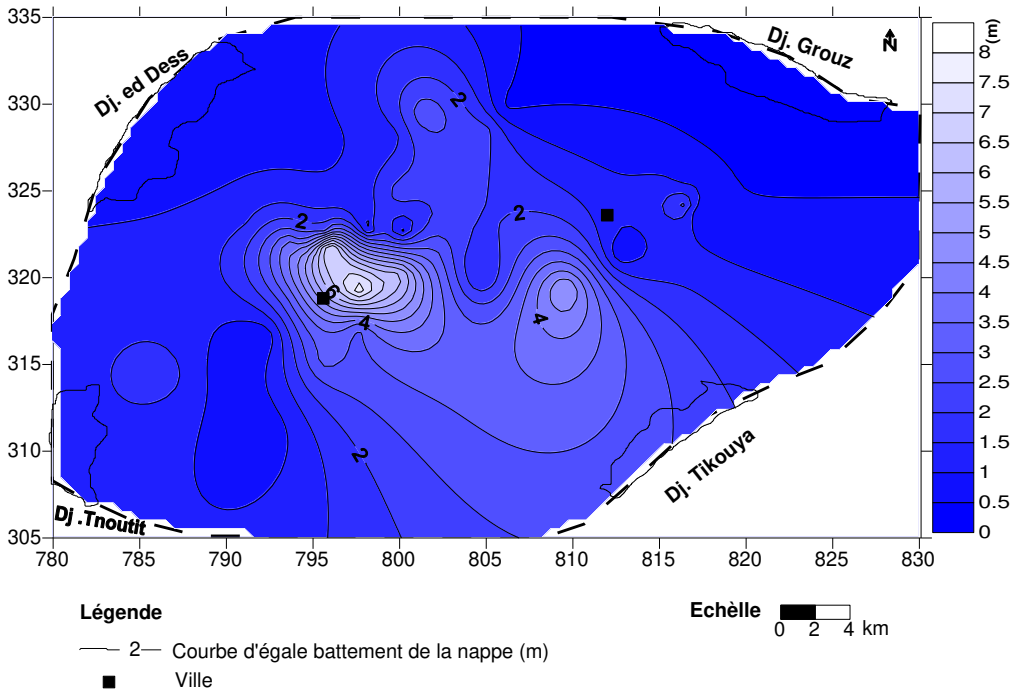


Figure 37. Carte de battement de la nappe

6. Evolution de l'état piézométrique

Afin de suivre l'évolution spatio-temporelle du niveau piézométrique de la nappe alluviale dans région d'étude, une campagne piézométrique a été réalisée durant la période de Mai 2013.

6.1. Interprétation de la carte piézométrique (Mai 2013)

L'examen de la carte piézométrique du mois de Mai 2013 (fig.38) nous a permis de constater que la nappe alluviale garde la même structure des courbes isopièzes avec une dépression piézométrique moins importante par rapport à celle de la période de Mai 2007. Ceci s'est traduit par de faibles rabattement dans sa partie Est. Le gradient hydraulique est devenue très important au centre, de l'ordre de 1% du soit à un fort écoulement ou à une surexploitation de la nappe à cet endroit.

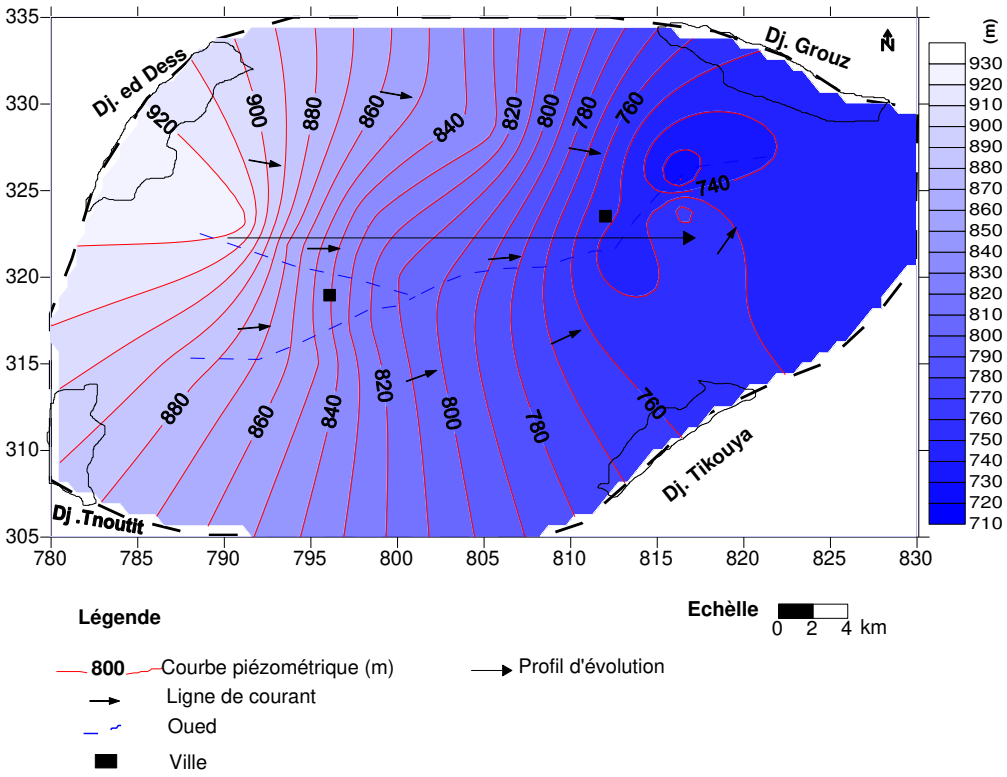


Figure 38. Carte piézométrique. Mai 2013

6.2. Evolution spatio-temporelle de l'état piézométrique de l'aquifère

L'allure générale des isopièzes entre la période de Mai 2007 et celle de Mai 2013 reste presque identique, l'écoulement se fait généralement de l'Ouest vers l'Est. L'axe principal d'écoulement convergent vers l'aval et coïncide avec la cuvette du barrage de Hammam Grouz. Fig. 39. L'examen de ce diagramme a permis de noter que la nappe est influencée par la surexploitation à l'aide de pompage et la diminution de la pluviométrie durant ces dernières années.

La nappe alluviale présente des forts abaissements du niveau piézométriques de l'ordre de 10 m dans sa partie centrale tandis que des faibles abaissements sont enregistrés dans la partie Est, estimée de 2m.

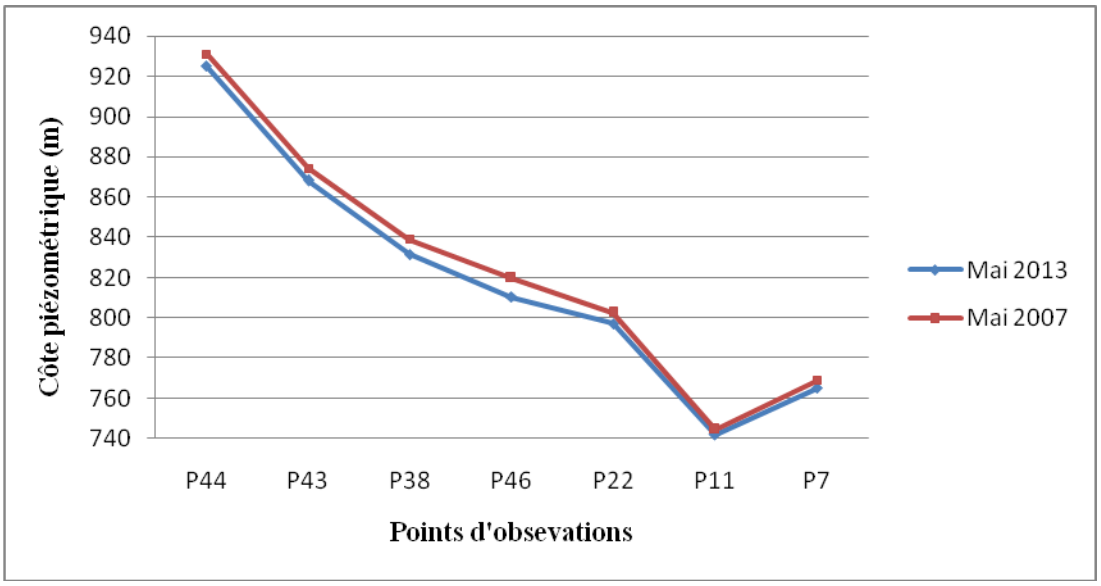


Figure 39. Evolution spatio- temporelle de la piézométrie selon le sens d'écoulement

7. Carte d'égale épaisseur de la couche mouillée

La superposition de la carte du substratum et la carte piézométrique (Septembre 2007), nous a permis de tracer une carte d'égale épaisseur de la couche mouillée de l'aquifère. Fig. 40. Cette carte montre que la zone la plus favorable à l'implantation d'éventuels futurs forages se trouve à l'Ouest et à l'Est du terrain, dont l'épaisseur est atteint de 86 m. Dans les régions centre et sud, l'aquifère possède une épaisseur très faible (inférieur à 10 m), ce qui implique l'irrégularité de la morphologie du substratum.

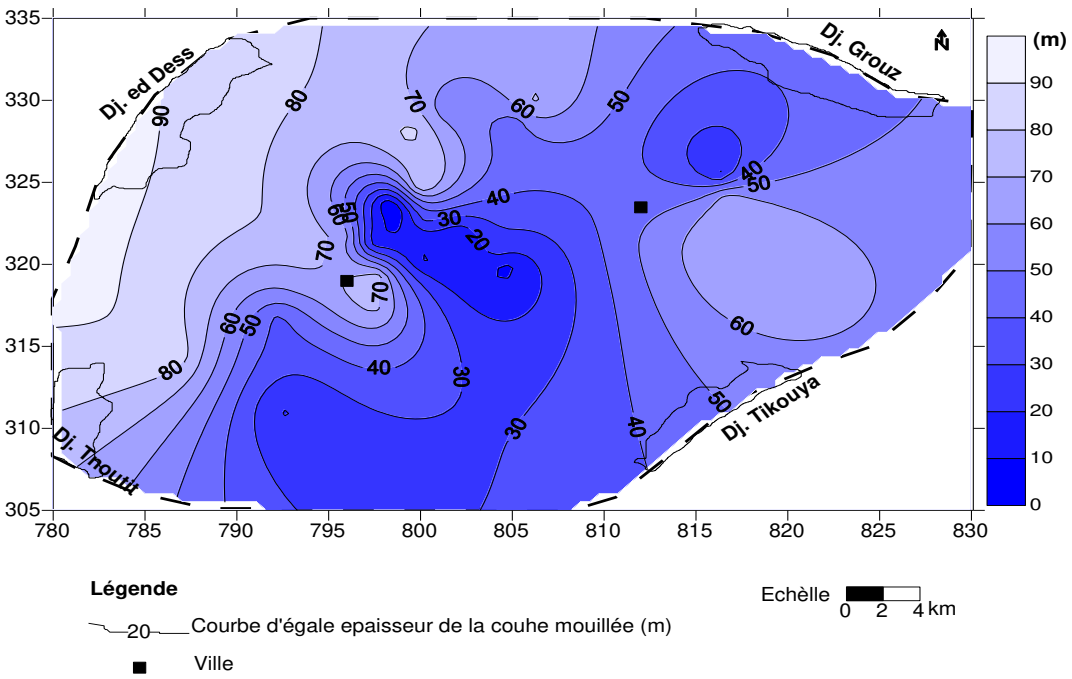


Figure .40 Carte d'égale épaisseur de la couche mouillée

8. Les caractéristiques hydrodynamiques

Pour mieux comprendre le comportement hydrodynamique de l'aquifère, une série d'essais de pompages a été réalisée sur six puits. Le choix des points d'eau s'est fait selon le type d'équipement et sa position dans la plaine. La durée de pompage varie entre 1 heure 40 mn et 3 heures 45 mn pour la descente et de 2 heures 15 mn à 3 heures pour la remontée.

8.1. Interprétation des données

Lors du pompage on s'est aperçu que le régime permanent n'a pas pu être atteint et que les puits tarissent au cours du pompage car, le débit de la pompe est beaucoup plus supérieur au débit d'alimentation, ce qui nous a donc obligé d'utiliser uniquement les données relatives à la remontée selon le modèle de C.V.Theis.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$ avec :

W (u) : fonction exponentielle de u

u : temps réduit

$$u = \frac{X^2 S}{4T t}$$

Où :

s : rabattement (m)

Q : débit de pompage (m^3/s)

T : transmissivité (m^2/s)

t : temps écoulé à un instant donné depuis le début de pompage (s)

S : coefficient d'emmagasinement

X : distance entre le puits et le piézomètre m).

8.2. Courbe de remontée

La courbe de la remontée est obtenue en portant sur un diagramme bi-logarithmique, la fonction s' = f (tp / t')

Où s' : rabattement résiduel (m) ;

t_p : temps de pompage (s) ;

t' : temps de remontée (s).

Les courbes de ces essais de pompage (fig.41) montrent que le rabattement résiduel diminue en fonction du temps. Au début, la remontée est rapide, puis elle décroît progressivement

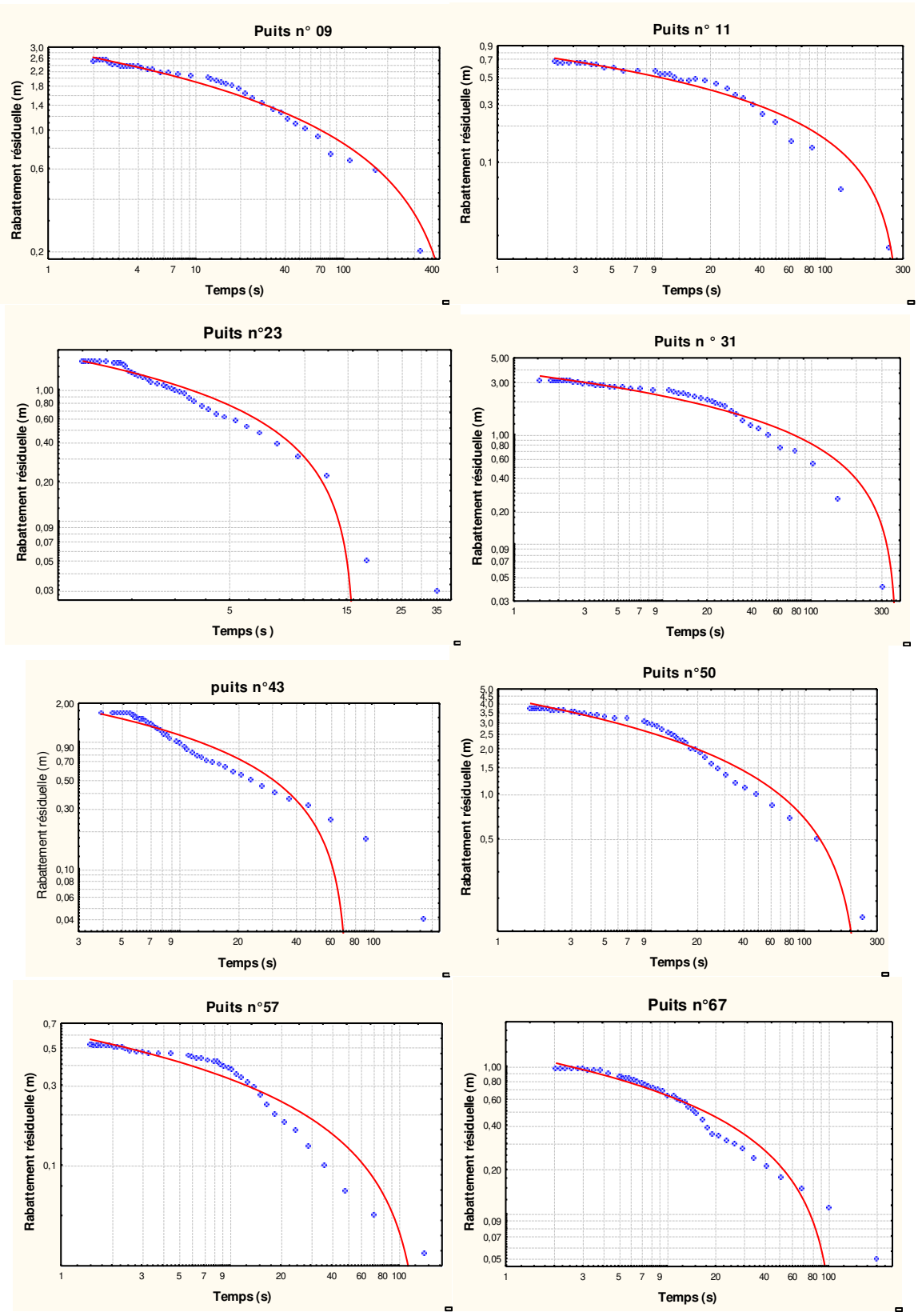


Figure 41. Essai de pompage – courbes de remontée

L'application du modèle de Thiès a permis la détermination de la transmissivité pour l'ensemble des essais effectues. Khedidja, 2007. Les résultats de cette interprétation ont été représentés dans le tableau 12.

Tableau 12. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère superficiel

N° du point d'eau	X (km)	Y (km)	Z (m)	Transmissivité (10^{-4} m²/s)	Epaisseur utile (m)	Perméabilité (10^{-4} m/s)
9	816.300	325.500	726	1.12	46.8	0.02
11	812.700	321.300	748	1.54	7.4	0.21
23	802.150	321.900	844	0.76	3.8	0.2
31	801.350	329.500	884	1.28	13.9	0.09
43	793.750	321.950	894	1.62	14.4	0.11
50	797.650	317.100	843	0.81	9	0.09
57	792.250	316.700	870	2.57	2.5	1.02
67	792.350	311.150	889	2.44	2	1.22
60	789.000	317.750	890	2.03	5.8	0.35

9. Répartition de la transmissivité et de la perméabilité

9.1. Carte de transmissivité

Le résultat des essais de pompage a permis de tracer une carte des transmissivités de la région. Fig. 42. Cette carte montre que l'aquifère est caractérisé par une transmissivité moyenne de l'ordre de $0.8.10^{-4}m^2/s$ dans la partie médiane et nord-est du terrain, ce qui implique probablement la présence des passages argileux. Par contre à l'Ouest et au Sud-Ouest, on a une transmissivité relativement plus élevée, de l'ordre de $2.10^{-4}m^2/s$. Ceci est du à la présence d'un matériel plus propre lié aux formations carbonatées de Djebel Tnoutit et Djebel Ed Dess.,

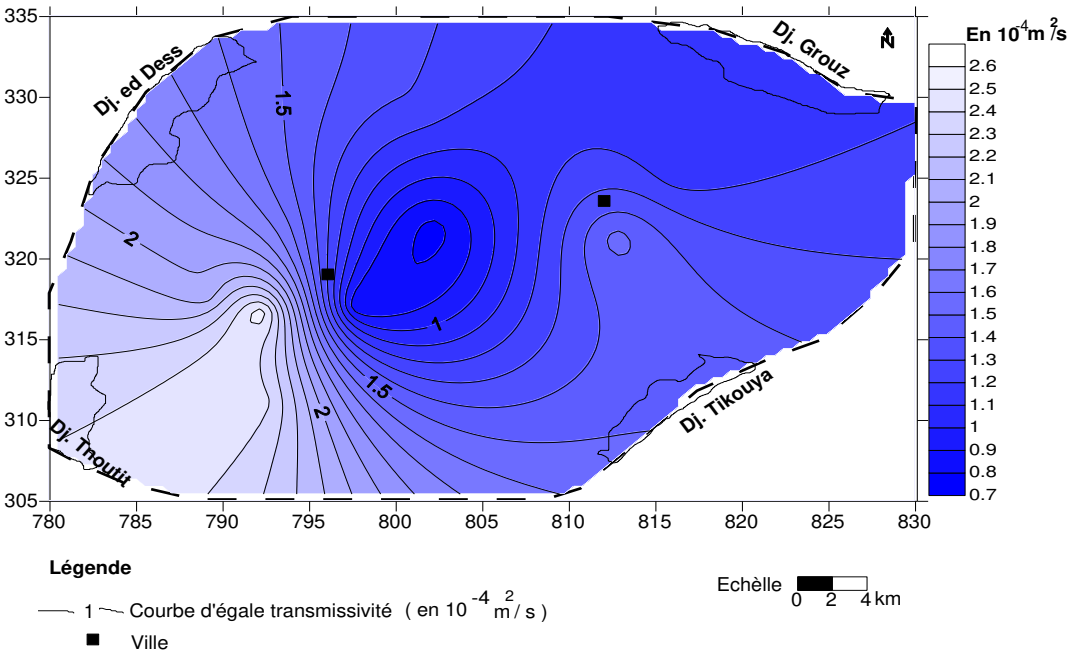


Figure 42. Carte de transmissivité en 10^{-4} m^2/s

9.2. Carte de perméabilité

La carte de perméabilité (fig.43) montre une augmentation de ce paramètre du Nord vers le Sud du terrain, avec une valeur maximale de l'ordre de $1.22.10^{-4}$ m /s au Sud-ouest de Tadjenanet, et une valeur minimale de l'ordre de 2.10^{-6} m /s au Nord du terrain au niveau du puits n° 9 situé au nord-est de Chelghoum Laid caractérisant la présence d'un matériau plus au moins fin.

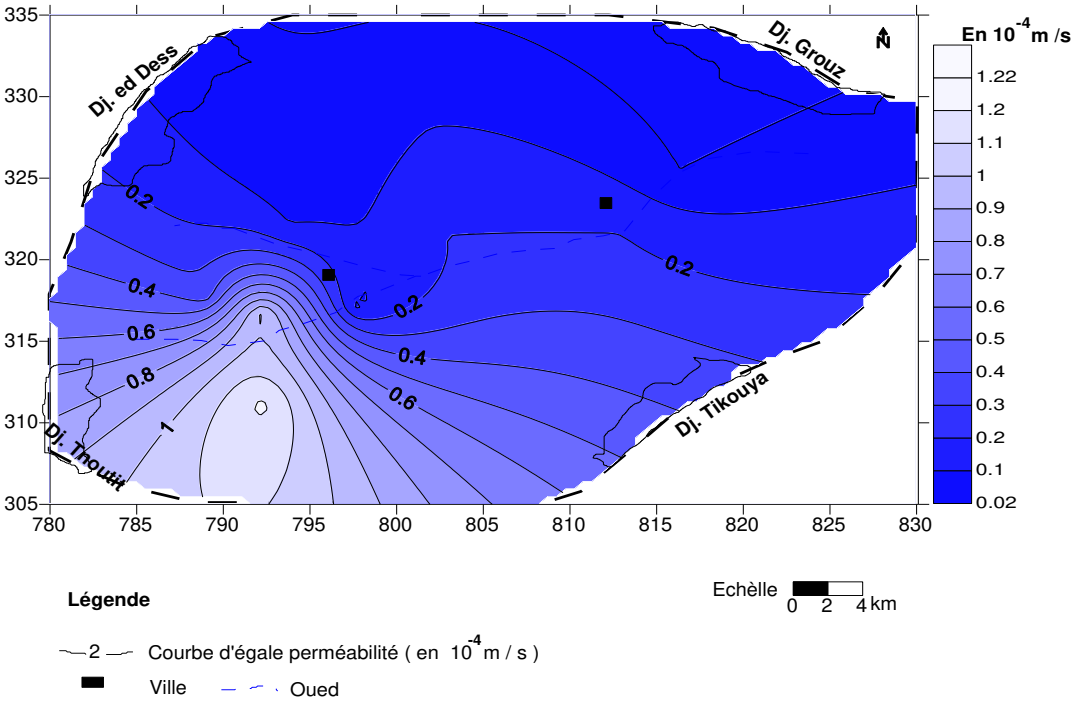


Figure 43. Carte de perméabilité en 10^{-4} m /s

10. Conclusion

L'étude hydrogéologique de la région de Tadjenanet - Chelghoum Laid nous a permis de dire que :

- Le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire est la formation aquifère la plus exploitée surtout par les agriculteurs (alluvions, sable et calcaire lacustre).
- L'aquifère est capté par un nombre élevé de puits et forages qui se répartissent sur l'ensemble du système aquifère, ce qui a conduit à l'abaissement du niveau piézométrique d'une manière alarmante atteint les 10 m.
- La morphologie piézométrique est plus au moins identique à celle de la surface topographique et elle du substratum
- L'alimentation de la nappe se fait essentiellement par les limites par déversement des eaux des formations Carbonatées limitrophes du Crétacé et de l'Eocène.
- L'aquifère présente des caractéristiques hydrodynamiques très variables, avec un maximum sur la limite sud-ouest. Les zones ayant les meilleures caractéristiques hydrodynamiques ne correspondent pas forcement aux zones ayant le maximum de l'épaisseur utile.

MODELISATION

1. Introduction

La mise en œuvre d'un modèle nécessite la compréhension du fonctionnement des aquifères et donc, requiert au préalable une description géométrique du système hydrogéologique ; en particulier les unités hydrogéologiques dont il est formé. Ceci nécessite obligatoirement une connaissance suffisante et relativement complète du milieu physique et du système d'écoulement. La réalisation d'un modèle numérique passe de ce fait par les étapes suivantes (fig.44):

a. élaboration d'un modèle conceptuel,

b. construction de la géométrie du modèle,

c. modélisation des écoulements.

Le modèle conceptuel correspond à une hypothèse sur le mode de fonctionnement d'un système ou d'un processus. Cette hypothèse peut être exprimée quantitativement sous la forme d'un modèle mathématique. Les modèles mathématiques sont des modèles abstraits qui assimilent les processus à des équations, les propriétés physiques à des constantes ou des coefficients intervenant dans ces équations, et les mesures de l'état du système à des variables. La plupart des modèles hydrogéologiques utilisés aujourd'hui sont des modèles mathématiques déterministes. Ils sont basés sur les principes de la conservation de masse, de la force d'impulsion et de l'énergie et décrivent des relations de causes à effets.

Pour toute modélisation de nappe de type déterministe, trois lois physiques élémentaires sont strictement nécessaires : loi de conservation de masse, loi de Darcy et les équations d'état.

Dans notre cas nous avons utilisé un modèle basé sur les différences finis, il s'agit du Modflow.

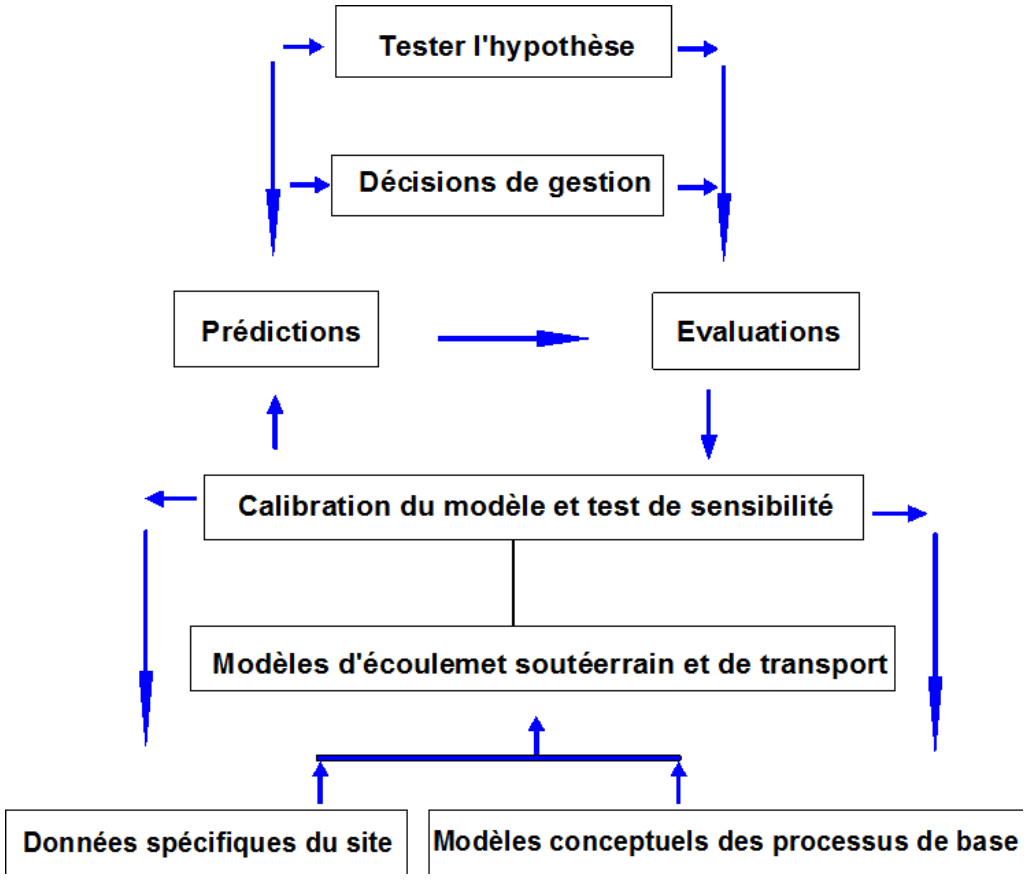


Figure 44. Résolution par modèle des problèmes hydrogéologiques

2. Formulations mathématiques

2.1. Loi de Darcy

Pour les fluides incompressibles, l'équation de mouvement se simplifie sous la forme tensorielle suivante :

$$U = -K.\text{grad } h$$

h : charge ou hauteur piézométriques,

K : tenseur de perméabilité,

U : Vitesse moyenne de DARCY.

Si l'on réduit le tenseur de perméabilité à ses composantes diagonales, en choisissant les axes des coordonnés colinéaires aux directions principales du tenseur K : Kxx, Kyy, Kzz.

La relation se décompose de la manière suivante :

$$\mathbf{Ux = - kxx \,.\, \partial h / \partial x}$$

$$\mathbf{Uy = - kyy \,.\, \partial h / \partial y}$$

$$\mathbf{Uz = - kzz \,.\, \partial h / \partial z} \,,$$

Avec :

Ux, Uy et Uz, les vitesses moyennes de filtration de Darcy.

2.2. Equation de conservation de la masse

L'équation de continuité exprime le principe général de la conservation de la matière au sein d'un volume fermé, c'est à dire la variation des flux entrant et sortant au sein d'un volume expérimental représentatif (VER) considéré. La déformation du milieu étant négligée, l'équation s'écrit :

$$\mathbf{div\ (\rho U) + \partial / \partial t\ (\rho \omega) + \rho q = 0}$$

ρ : Masse volumique de l'eau,

U : Vitesse de filtration de DARCY,

t : temps

ω : Porosité du milieu correspondant au rapport du volume des vides dans le VER sur le volume total,

q : Débit volumique d'eau prélevé (ou apportée) par unité VER en chaque point.

2.3. Equations d'état

Elles sont indispensables à l'application des deux lois précédentes car elles traduisent les variations des paramètres mécaniques de l'eau en mouvement et de la matrice rocheuse (masse spécifique, viscosité …) en fonction de la pression (Bonnet, 1982), elles s'écrivent de la manière suivante :

$$\mathbf{d\rho/\rho = \beta.dp} \quad \text{(eau)}$$

$$\mathbf{dv / v = - \alpha.d\sigma = \alpha.\ Dp} \quad \text{(matrice)}$$

ρ : Masse volumique de l'eau,

α : Coefficient de compressibilité de la matrice poreuse,

β : Coefficient de compressibilité de l'eau,

p: Pression interstitielle de l'eau,

σ : Contrainte effective au sein du volume élémentaire représentatif (VER) de volume v.

2.4. Equation de diffusivité

Les trois équations précédentes élémentaires de la circulation de l'eau en milieu poreux (nappe libre) se combinent pour donner l'équation de diffusivité suivante:

$$\mathbf{div\ (K\ grad\ h) = Ss.\ (\partial\ h\ /\ \partial\ t) + q}$$

S: coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu poreux sur tout le VER, égale à $\rho.g\ (\alpha+w.\beta\ )$

En faisant une intégration et une linéarisation, nous obtenons l'équation de diffusivité en nappe libre suivante :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=\frac{S}{T}+\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{Q}{T}$$

2.5. Résolution par la méthode les différences finies

Cette méthode consiste à discrétiser le domaine à modéliser en mailles carrées ou rectangulaires et à rechercher à définir sur chaque maille une fonction constante (Hi) choisie par l'approximation de la charge hydraulique. Les calculs se feront en admettant que la valeur de la charge hydraulique soit attribuée au centre de la maille. On y procédera de la même façon pour les différents paramètres de l'équation, en définissant sur chaque maille :

- une transmissivité Ti (ou la perméabilité Ki);

- un coefficient d'emmagasinement Si;

- un débit total algébrique Qi.

Les fonctions d'approximation auront à satisfaire uniquement les données locales (chaque maille), on obtient alors un système d'équations linéaires définissant les valeurs de Hi au centre des mailles.

Sachant que les calculs à l'intérieur d'une maille se font en fonction des nœuds environnants, on isole une maille du domaine (fig.45) avec ses quatre mailles voisines, que l'on désigne par N (nord), S (sud), E (est) et W(ouest) :

* Le principe de continuité qui implique la conservation du débit d'eau entrant algébriquement par les limites de la maille se traduit par :

$$\mathbf{Qn + Qs + Qe + Qw = Qi + Qem}$$

Avec **Qemi** : débit emmagasiné dans la maille i.

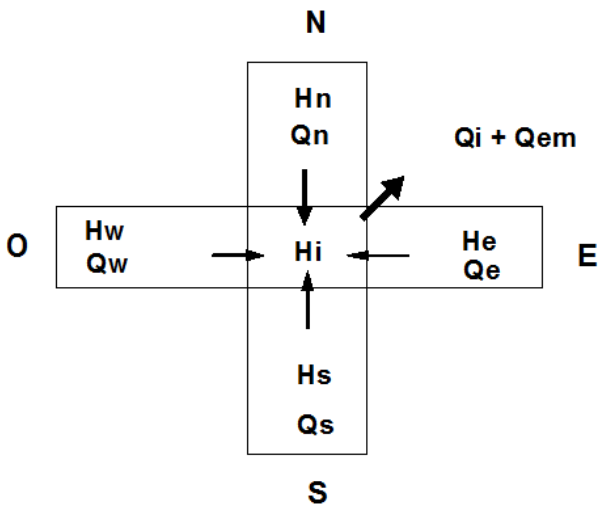


Figure 45. bilan des flux sur une maille (i).

* La loi de Darcy, permet de définir chaque composante du débit entrant en fonction de la transmissivité et du gradient hydraulique. Elle s'écrit :

$$\mathbf{Qn = Tn \,.\, a \,.(Hn - Hi) / a \;= Tn. \,.(Hn - Hi)}$$

Tn : Transmissivité de l'aquifère entre la maille I et sa voisine dans la direction Nord. Hi et Hn : Approximations de la charge respectivement sur les mailles I et N.

* L'équation d'état fournit l'expression du débit emmagasiné :

$$\mathbf{Qemi = a^2 . Si \,.(\, dHi/dt)\, dt}$$

Si : coefficient d'emmagasinement sur la maille i.

Tous ces calculs permettent d'obtenir :

$$\mathbf{Tn\ (\ Hn - Hi\ ) + Ts\ (\ Hs - Hi\ ) + Te\ (\ He - Hi\ ) + Tw\ (\ Hw - Hi\ ) = Qi + a^2.\ Si\ .dHi/dt}$$

Si l'on applique la même équation à chaque maille du modèle, on obtiendra un système différentiel linéaire du premier ordre à « n » équations, à « n » fonctions inconnues du temps (Hi), que nous pouvons résoudre. Pour simplifier la présentation, on adoptera la notation matricielle suivante :

$$\mathbf{[T].\ H = Q + a^{2}.\ [S]\ .dh/dt}$$

En définissant les vecteurs : H et Q, et les matrices T et S.

3. Conditions initiales et conditions aux limites

3.1. Conditions initiales

Elles sont définies par les valeurs de la charge « h » connue en tout point du domaine modélisé à un temps de référence t = 0.

3.2. Conditions aux limites

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 la diffusivité. On connaît quatre types de conditions aux limites.

a) Limite à potentiel imposé (condition de Dirichlet)

Tout au long de cette limite, la charge hydraulique est indépendante des conditions de circulation de la nappe. C'est le cas du contact d'une nappe avec un plan d'eau libre (mer, lac, oued)

b) Limites à flux impose (condition de Newman)

Le débit par unité de surface est constant ou nul le long d'une limite à flux imposé. On distingue les limites à flux nuls (contact de l'aquifère avec une formation imperméable) et les limites à flux imposé non nul qui sont matérialisées par les limites du domaine ou par les ouvrages de captage.

c) Condition de Fourrier

Définit le cas d'un oued dont le fond est colmaté et qui est en communication avec une nappe libre (drainage ou alimentation).

d) Conditions de surface libre

Deux conditions définissent une surface libre :

- Condition de potentiel **:** c'est la pression atmosphérique qui s'exerce sur tous points M de la surface libre. Exprimée en charge, on écrit : h = z

- Condition de flux **:** Si la nappe n'est pas alimentée par sa surface, le flux est nul et il s'écrit :

$$\mathbf{dh / dn = 0}$$

Si un flux traverse la surface libre de la nappe (alimentation ou évaporation). On a:

$$\mathbf{dh / dn = a}$$

n : normale orientée vers l'extérieur.

a : flux entrant ou sortant (positif ou négatif).

4. Les étapes de l'élaboration du modèle

4.1. Introduction des données

Après avoir défini les conditions initiales et les conditions aux limites et procédé à la discrétisation du domaine à modéliser en un certain nombre de mailles, nous introduisons pour chaque maille les données physiques du système à savoir:

- La côte piézométrique de la carte qui servira de référence,

- La géométrie de l'aquifère (la côte du toit du substratum),

- Les paramètres hydrodynamiques T, K, S.

-les paramètres climatiques (la recharge efficace)

4.2. Calage du modèle

Le but de cette phase quantitative est de reconstituer la variation des paramètres de l'aquifère en utilisant le modèle pour les affiner c'est à dire en minimisant les écarts entre les réponses du modèle (calculées) et les réponses du système (observées). Ce calage est important car il permettra de réaliser des simulations sur le domaine étudié.

4.3. Exploitation du modèle

C'est l'étape ultime où le modèle révèle son utilité, son intérêt principal est d'établir des prévisions des réactions hydrodynamiques futures du système aquifère à des scénarios d'aménagement éventuels (exploitation, sécheresse, recharge …), ou faire des simulations de la propagation des polluants vers la nappe.

5. Application du modèle en 3D au système aquifère

5.1. Introduction

Le modèle tridimensionnel MODFLOW (Mc Donald and Harbaugh, 1988) a été utilisé pour simuler les écoulements souterrains et estimer la recharge de la nappe. C'est un modèle à bases physiques, déterministe, capable de représenter des écoulements laminaires monophasiques tridimensionnels dans des systèmes multicouches. Il résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode des différences finies.

Le modèle permet d'estimer les ressources en eau à l'état actuel et de prévoir leur changement dans la future par proposition des scénarios, qui peuvent être choisis comme une stratégie de gestion de la ressource en eau sans trop de risque de défaillance.

5.2. Objectifs

L'objectif est de bâtir un modèle numérique d'écoulement afin de tester le modèle conceptuel. Le concept prévisionniste permettra une utilisation durable de la ressource suite à une éventuelle surexploitation. L'objectif principal de l'étude est la simulation des écoulements (simulation des directions des écoulements des eaux souterraines et la distribution des charges).

Il s'agit de ce fait de :

- estimer la recharge (les apports à partir des flux latéraux),
- prévoir les rabattements futurs et les conséquences des surexploitations,
- implanter au mieux les ouvrages à venir,
- gérer rationnellement les débits afin d'optimiser l'exploitation de la nappe (réaliser de nouveaux scénarios de prévision).

L'hypothèse d'un régime permanent implique des entrées et des sorties égales et des variations néglige de l'emmagasinement.

Les aquifères superficiels conditionnés par les infiltrations et l'évaporation sont, suivant les saisons, en régime transitoire traduis par des fluctuations du niveau piézométrique.

En revanche, pour les nappes profondes dont l'alimentation est assurée à partir des entrées latérales, les conditions de régimes transitoires sont établies quand les paramètres hydrauliques (perméabilité) sont assez faibles ou en situation d'exploitation intense (rapport flux/stock).

5.3. Discrétisation du domaine

Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources. L'aquifère a été discrétisé en 60 lignes et 100 colonnes. Les mailles sont carrées et ont pour dimension 500 mètres de côté.

Le modèle est ainsi constitué de 4000 mailles actives, totalisant une superficie de 1000 km^2 (fig.46).

5.4. Données initiales

Elles concernent :

- L'Etat piézométriques de référence qui a permis de caler le modèle en régime permanent. Il s'agit de la piézométrie du mois de Mai 2007 (fig.35.Chapitre. IV). La carte en courbes en isopièzes obtenue, semble en effet la mieux convenir à la reproduction d'un état stable.
- Les perméabilités reparties dans la zone d'étude (fig.43. Chapitre. IV),
- La moyenne annuelle des précipitations enregistrée à la station de Hammam Grouz, sur une période de seize ans (1988/89 à 2003/04) est de l'ordre de 371 mm,
- La part de l'infiltration efficace, évaluée à partir de la méthode de Thornthwaite est estimée de l'ordre de 7 mm/ an,
- Les conditions aux limites données par la carte piézométriques, généralement les écoulements des eaux souterraines d'un système aquifère sont régis par leurs conditions aux limites.

Des flux entrant au niveau des mailles de la bordure Nord-Ouest , sud-ouest , nord-est et sud-est, traduisant l'apport latéral à partir de ces zones.

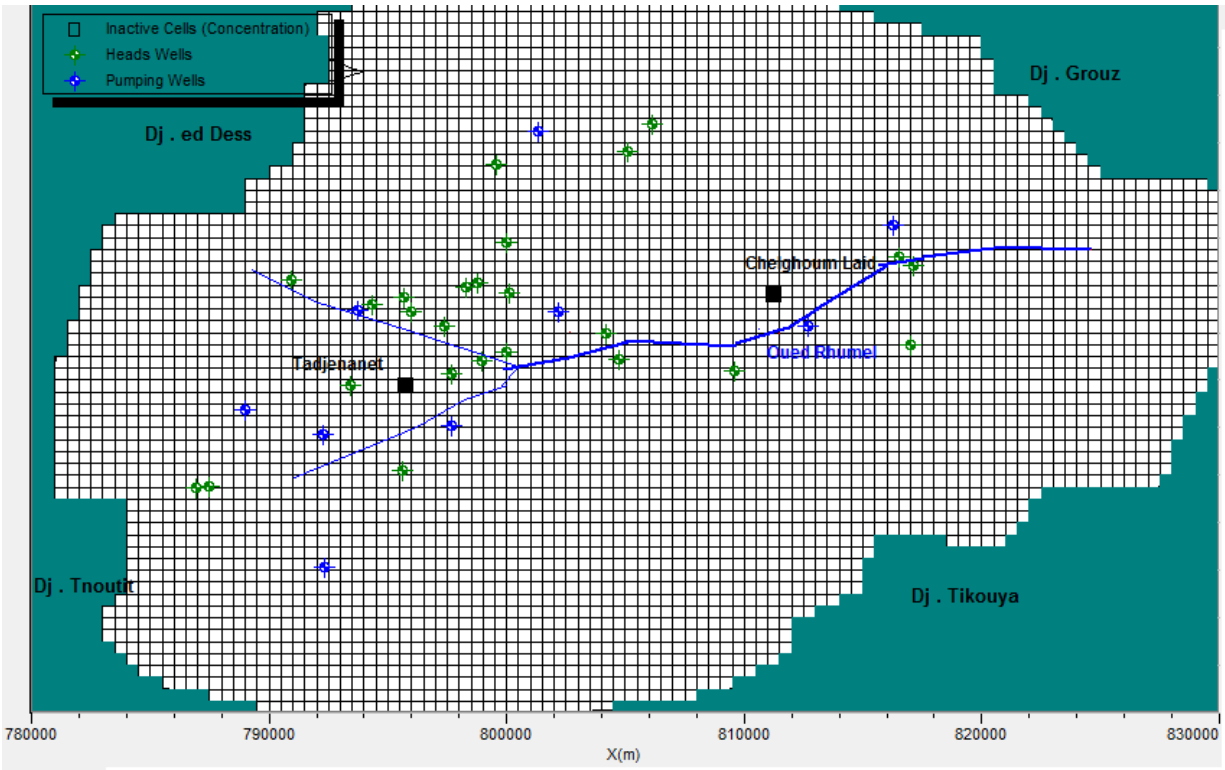


Figure 46. Discrétisation de la zone d'étude

Les mailles auxquelles il n'a pas été affecté de valeurs de débit ou de charge sont considérées comme étanches (partie nord et sud).

Dans le cas des fortes crues, la nappe alluviale possède un flux à potentiel imposée en liaison avec Oued Rhumel dans sa partie avale. Dans la partie centrale, l'affleurement des calcaires de l'Eocène plus au moins fissurée en liaison avec la nappe superficielle favorise à l'infiltration directe des eaux de l'oued.

5.5. Calage du modèle en régime permanent

Le calage du modèle doit permettre une synthèse de toutes les données du domaine discrétisé et la détermination des données manquantes. La technique consiste à ajuster l'état calculé à l'état réel en changeant certains paramètres hydrodynamiques, tel que la perméabilité.

- Reconstitution de la piézométrie

L'examen de la figure (fig.47) montre une bonne similitude entre la piézométrie mesurée et celle calculée par le modèle avec des écarts inférieurs à 1 m. A cet effet le modèle reste valable et le décalage entre les niveaux piézométriques calculés et mesurés dans certaines zones sont probablement dues à l'imprécision des mesures, et aux conditions hydrogéologiques spécifiques.

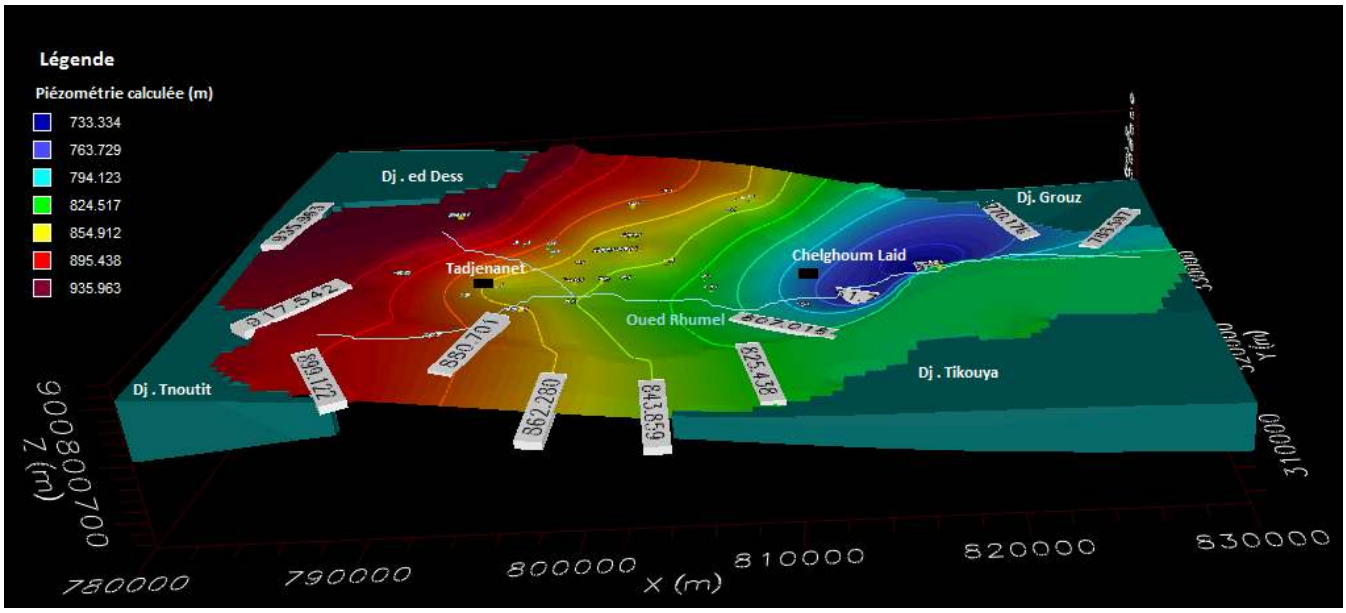


Figure 47. Reconstitution de l'état piézométrique en régime permanent.

5.5.1. Optimisation du champ de la perméabilité

Les différents itérations du modèle ont permis d'ajuster la conductivité hydraulique de l'aquifère dont les valeurs de la perméabilité s'échelonnent entre 10^{-6} m/s pour les secteurs à très faible perméabilité et 10^{-4} m/s pour les secteurs à forte perméabilité caractérisant la partie sud-ouest du terrain d'étude (fig.48).

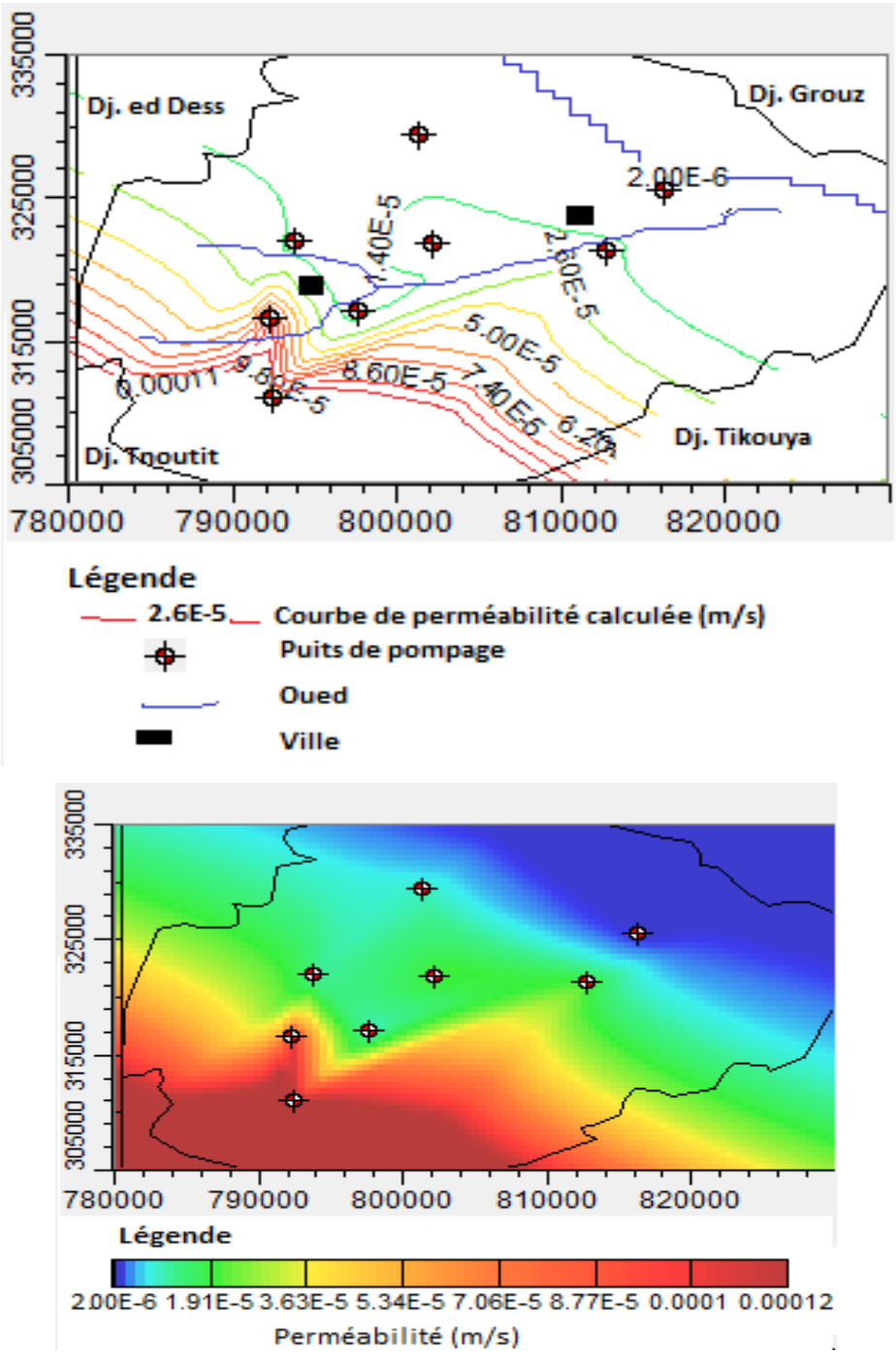


Figure 48. Carte de la perméabilité de la nappe issue du modèle

5.5.2. Bilan hydrogéologique issu du calage

La phase du calage en régime permanent a permis d'établir le bilan suivant (tab.13).

- Apport par les calcaires du crétacé et de l'éocène: 2044.3 m^3/j
- Apport par les précipitations (la recharge) : 20 559 m^3/j.
- Débit de pompage : 1250 m^3.

Tableau 13. Bilan hydrique calculé en régime permanant

Entrées (m^3/j)	Sorties (m^3/j)	Variations de réserve (m^3/j)	Stockage (m^3/j)
22603	**22605**	**-2**	**0**

Les résultats du bilan hydrique obtenus par le modelé, ont permis de révéler que le système d'écoulement de la nappe en régime permanant est dominé en entrée par la recharge latéral , et en sortie par le pompage intensif, dont la variation de réserve est estimée de 3.65 $m^{3.}$ Le bilan hydrique fait ressortir une recharge latérale totale de 50167.55 m^3, dont 40% représente l'apport par les précipitations (la recharge efficace).Fig.49.

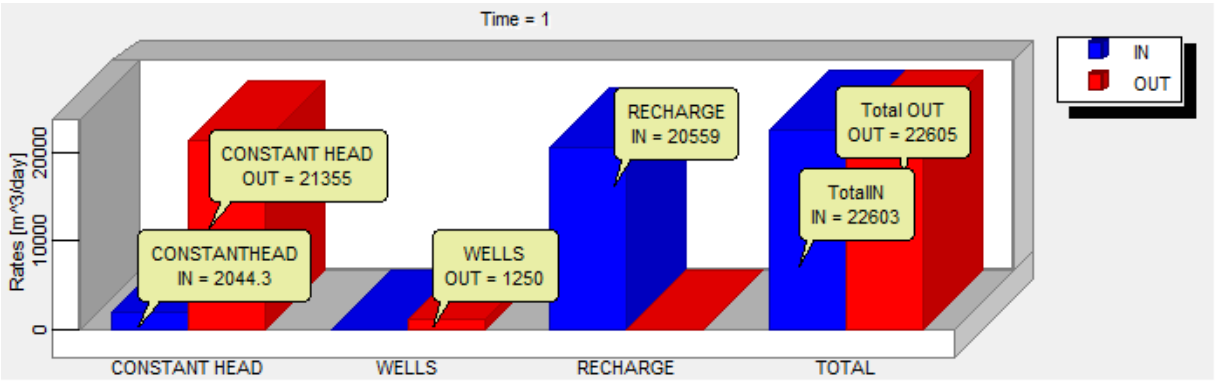


Figure 49. Bilan hydrique de la nappe alluviale de Tadjenanet – Chelghoum Laid issu du modèle en régime permanant

6. Exploitation du modèle et simulation

Afin de caractériser l'état piézométrique en régime transitoire nous avons procéder premièrement au calage du modèle. Il s'agit de la piézométrie du mois de Mai 2013 (fig.38 .Chapitre. IV). La technique consiste à ajuster l'état calculé à l'état réel.

L'examen de la figure (fig.50) montre une bonne similitude entre la piézométrie mesurée et celle calculée par le modèle avec des écarts inférieurs à 2 m. A cet effet le modèle reste valable et le décalage entre les niveaux piézométriques calculés et mesurés dans certaines zones sont probablement dues à l'imprécision des mesures, et aux conditions hydrogéologiques spécifiques.

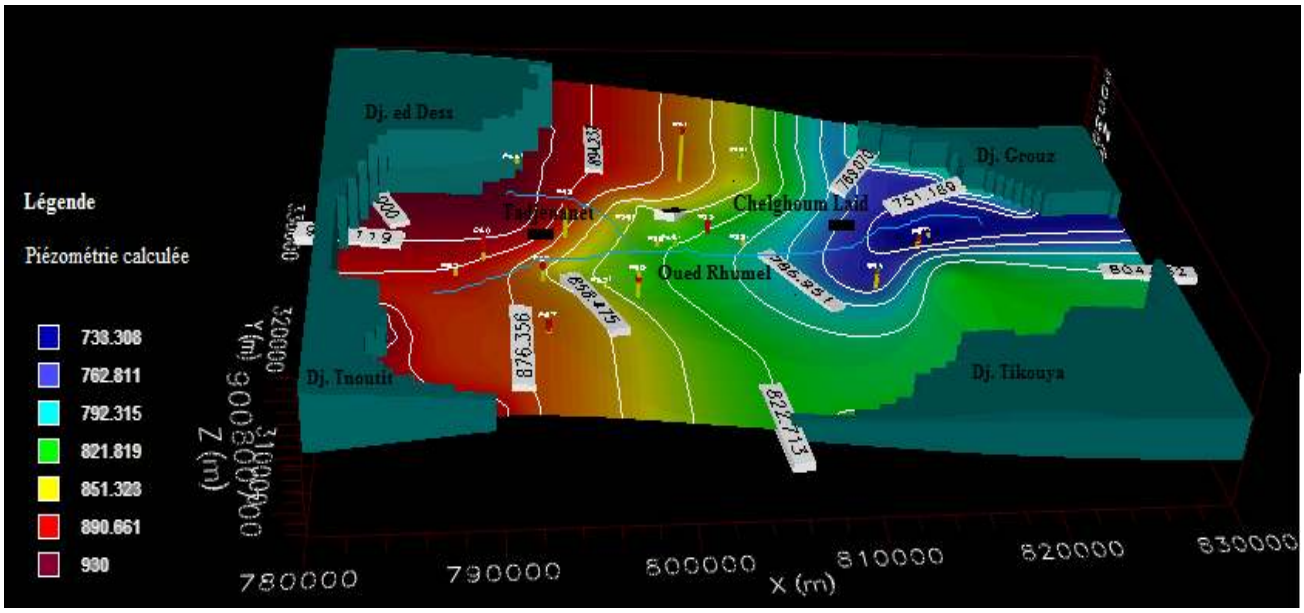


Figure 50. Reconstitution de l'état piézométrique en régime transitoire. Mai 2013

Apres la calibration du modèle, et à fin de l'exploiter en régime transitoire pour définir l'état future de la nappe et ses variation hydrodynamiques dans le temps, la simulation en ce régime transitoire a été effectuée sur une période de 20 ans.

Trois scénarios ont été proposés :

- 1er scénario : ce scénario sert à tester les capacités d'emmagasinement sur une période de 20 ans, qui correspondent à une exploitation à long terme. Les débits sortants pris en compte sont ceux de l'année de référence et sont maintenus constants. En gardant le nombre d'ouvrage de captage et leurs débits d'exploitation fixe. Dans ce scénario, deux cas ont été pris en compte : le premier cas sans recharge et le deuxième avec recharge. Le modèle ne semble pas être influencé par ce paramètre. Ce qui explique l'importance de l'apport latérale.

L'examen de la carte piézométrique obtenue avec ce scénario (fig.51), montre que la nappe garde sensiblement la même allure piézométrique et les mêmes directions d'écoulements, avec des rabattements estimés de 1 à 2m à l'ouest et de 5 à 6 m aux parties centre et Est du terrain d'étude . (fig.52).

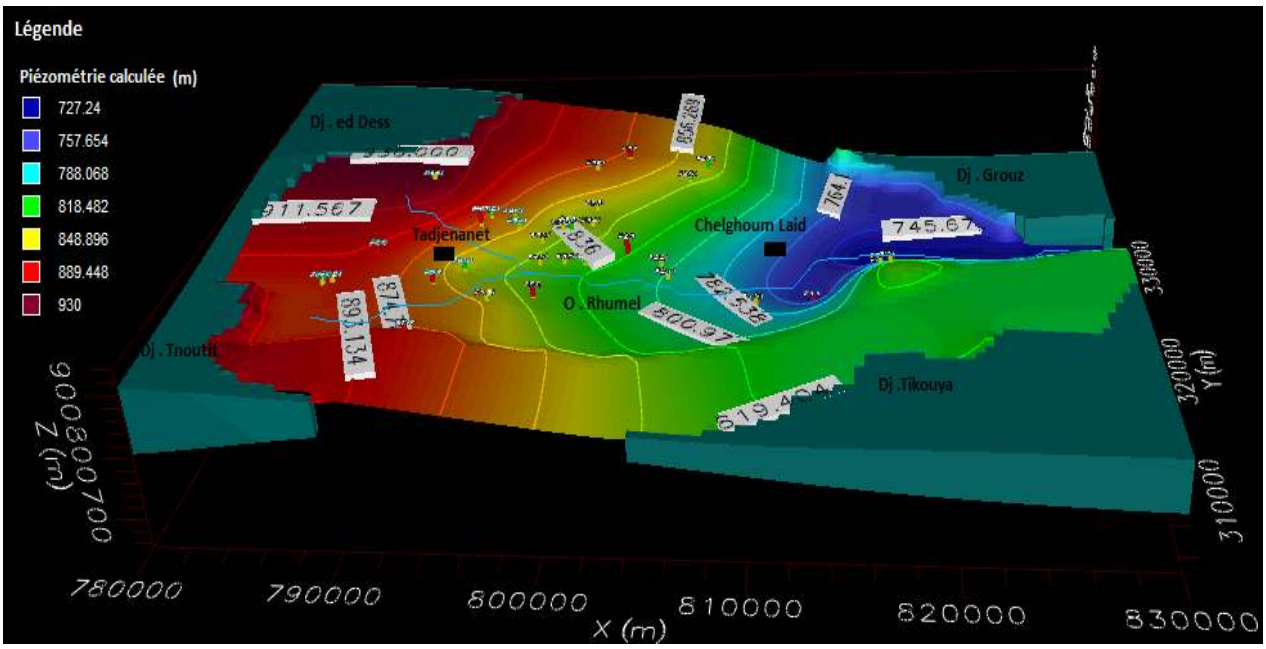


Figure 51. Simulation d'une exploitation à long terme.

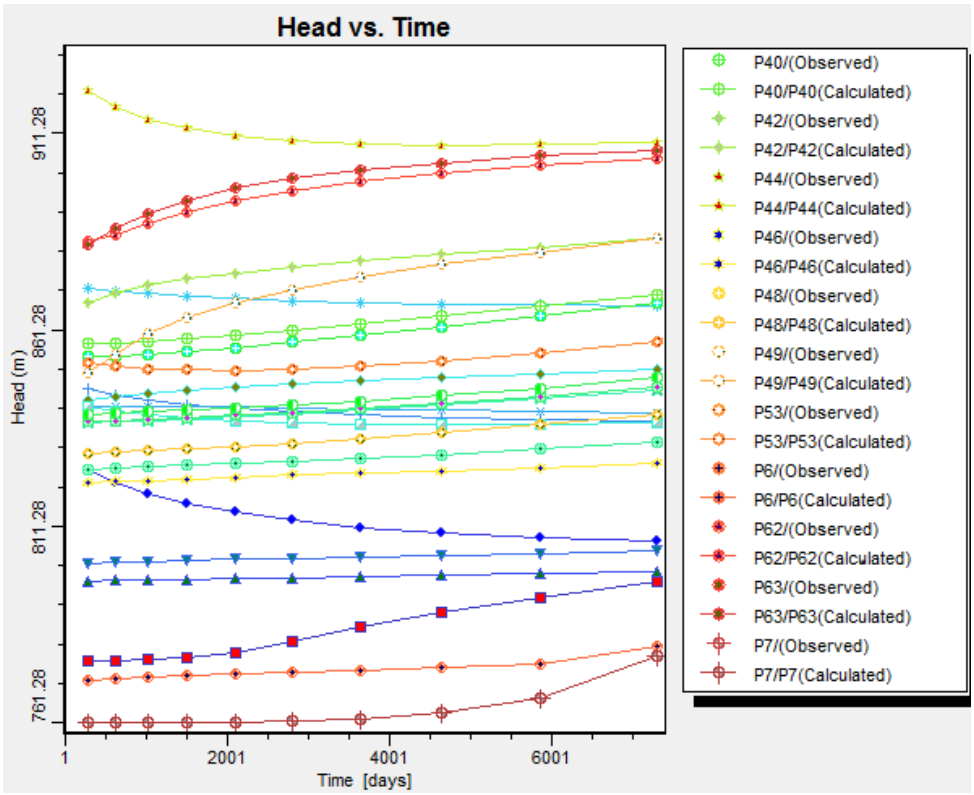


Figure .52 Evolution temporelle de la piézométrie (scénario 1)

La reconstitution du bilan global de l'aquifère en régime transitoire par évaluation de ses différentes composantes est représenté dans le tableau suivant (tab.14). Il dépend de la recharge et du régime de l'exploitation, ces deux paramètres présentent une forte irrégularité.

Tableau.14 Bilan hydrique calculé en régime transitoire

Entrées (m^3/j)	Sorties (m^3/j)	Variations de réserve (m^3/j)	Stockage (m^3/j)
63117	**63123**	- 6	**0**

L'examen de la figure (fig.53) nous a permis de constater que le bilan hydrique de la nappe après une période d'exploitation de 20 ans est influencé par la recharge latérale et du régime de l'exploitation, ces deux paramètres présentent une forte irrégularité.

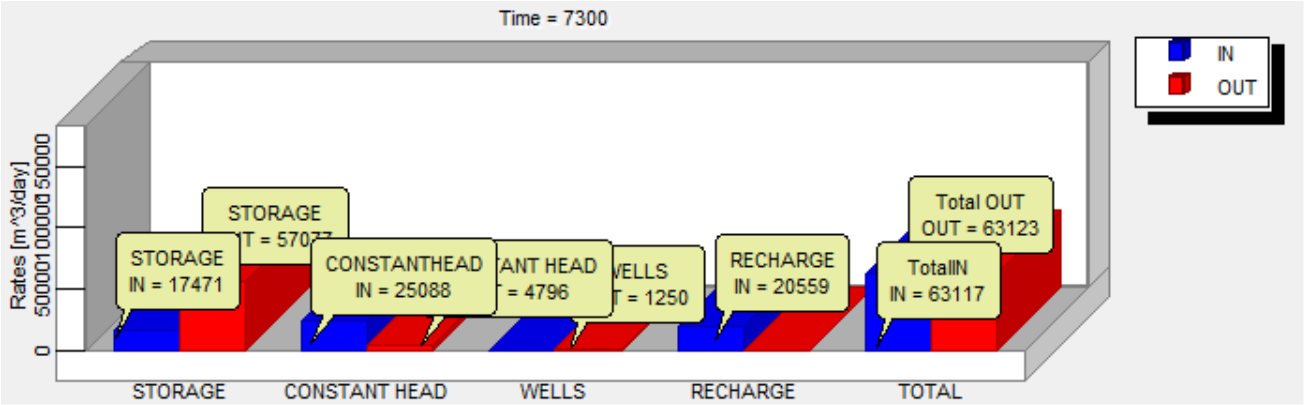


Figure.53 Bilan hydrique de la nappe alluviale de Tadjenanet – Chelghoum Laid issu du modèle en régime transitoire

- 2ème scénario : consiste à maintenir le même nombre de puits de pompage et de multiplier par dix leurs débits de pompage.

La simulation étalée sur 20 ans, nous a permis de constater que cette situation provoque des grandeurs de rabattement d'ordre de 2 à 3m dans la partie ouest et de 5 à 9m sur toute la partie centre et Est de la nappe. Fig. 54.

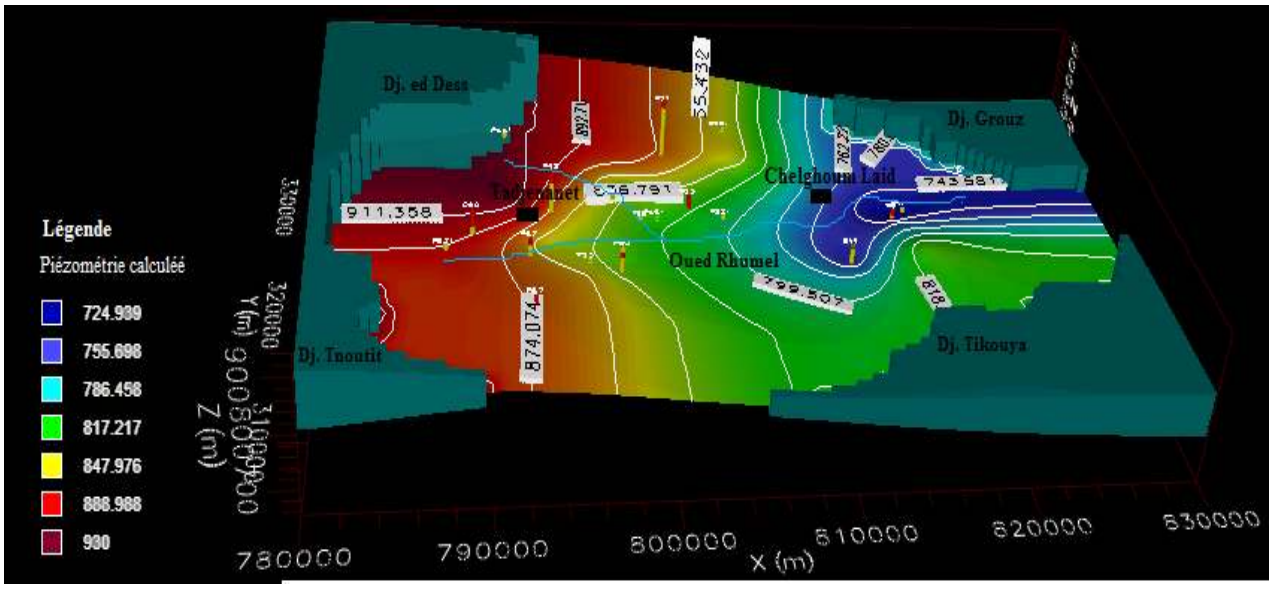


Figure.54 Carte piézométrique résultant du deuxième scénario.

-3ème scénario : implantation de nouveaux forages sur les limites

La simulation étalée sur 20 ans, nous a permis de constater que le modèle ne semble pas être influencé par cette proposition et la nappe garde la même allure du premier scénario. Fig .55.

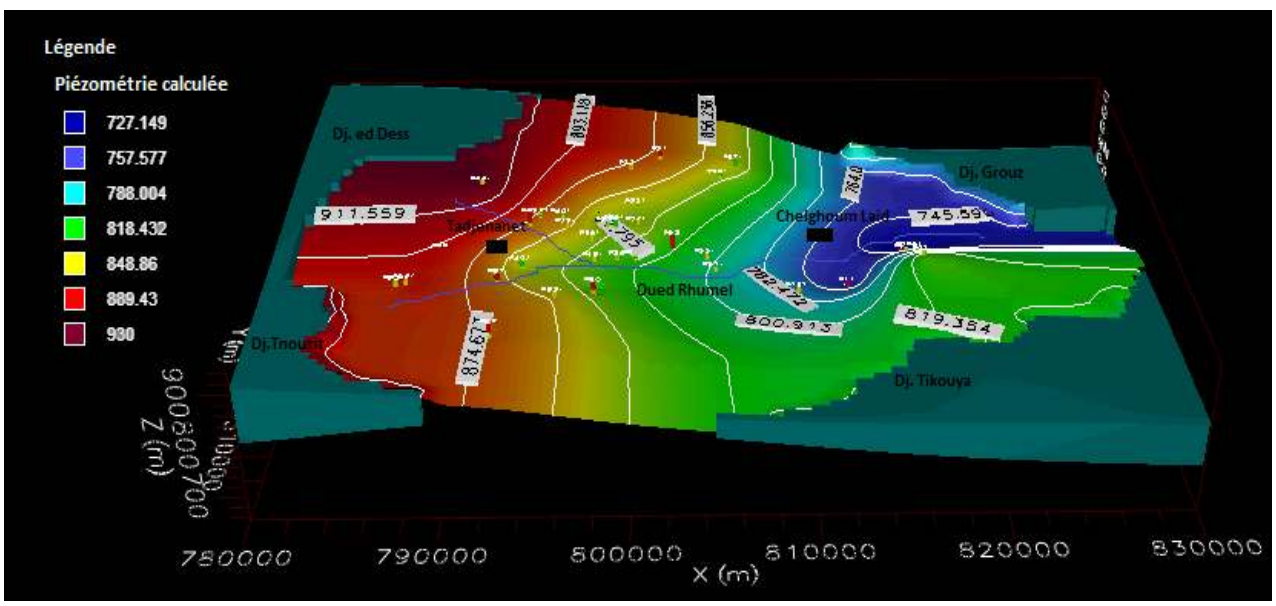


Figure 55. Carte piézométrique résultant du troisième scénario

7. Conclusion

La caractérisation hydrodynamique de la nappe alluviale de Tadjenanet - Chelghoum Laid en régime permanent simulé par MODFLOW, a permis d'identifier les principaux paramètres du bilan global de la nappe. Les simulations en régime transitoire effectuées sur une période de 20 ans, ont permis de constater que la nappe subirai un rabattements, atteignant les 6 m, étalé sur la partie centre et Est de la nappe avec des faibles grandeurs d'ordre 1 à 2 m enregistrés à la partie ouest . A cet effet, nous proposons, l'implantation d'éventuel ouvrage de captage aux extrémités des massifs carbonatés près des limites de la région d'étude à fin d'éviter une telle situation entrainant la pollution de la nappe surtout dans sa partie centrale, sachant que cette partie est connue par sa vocation agricole.

CHAPITRE V

HYDROCHIMIE

HYDROCHIMIE

1. Introduction

Tout travail hydrochimique consiste à recueillir des échantillons d'eau, tout en respectant les techniques de prélèvement prescrites. De procéder à un certain nombre d'analyse pour avoir une idée sur l'identité physico-chimique de l'eau et son mode de répartition spatiale dans le milieu environnant. La composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, de l'évolution hydrodynamique des écoulements de la nappe, de la profondeur de cette dernière et de la zone climatique. Elle donne de précieux renseignements sur les conditions de gisement et le mouvement des eaux souterraines.

Ce travail permet d'aborder :

- La nature et la qualité physico- chimique des eaux de la région
- De montrer les conséquences de la qualité des eaux souterraines sur le risque de dégradation des terres agricoles.
- Les problèmes de potabilité de l'eau dans la région.
-L'impact des facteurs anthropiques sur la qualité physicochimique des eaux de surface et eaux souterraine.

2. Matériels et moyens d'analyse

La campagne de prélèvements d'échantillons a été effectuée durant la fin de la période de hautes eaux (Mai 2007). Ces prélèvements ont été effectué selon une répartition et une fréquence qui dépend de la disponibilité des ouvrages, du type des formations géologiques et de la profondeur des eaux. Trente et trois (33) échantillons ont été pris au niveau des points d'eau (puits et forage). Fig. 56.

Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de la station d'épuration de Batna et dans un laboratoire privé d'analyse de sol et des eaux d'irrigation. Les éléments chimiques qui ont été dosés sont : Ca^{2+}, Mg^{2+},Na^{+} ;K^{+},HCO_3^{-},SO_4^{2-},Cl^{-},NO_3^{-},NO_2^{-} ,NH_4^{+},PO_4^{3-}. Les méthodes de dosage utilisées sont : la colorimétrie, la volumétrie et la spéctrophotométrie (RODIER, 1996). La température (T), la conductivité électrique (CE) et le pH ont mesurés sur terrain à l'aide d'un appareil portatif multi paramètres.

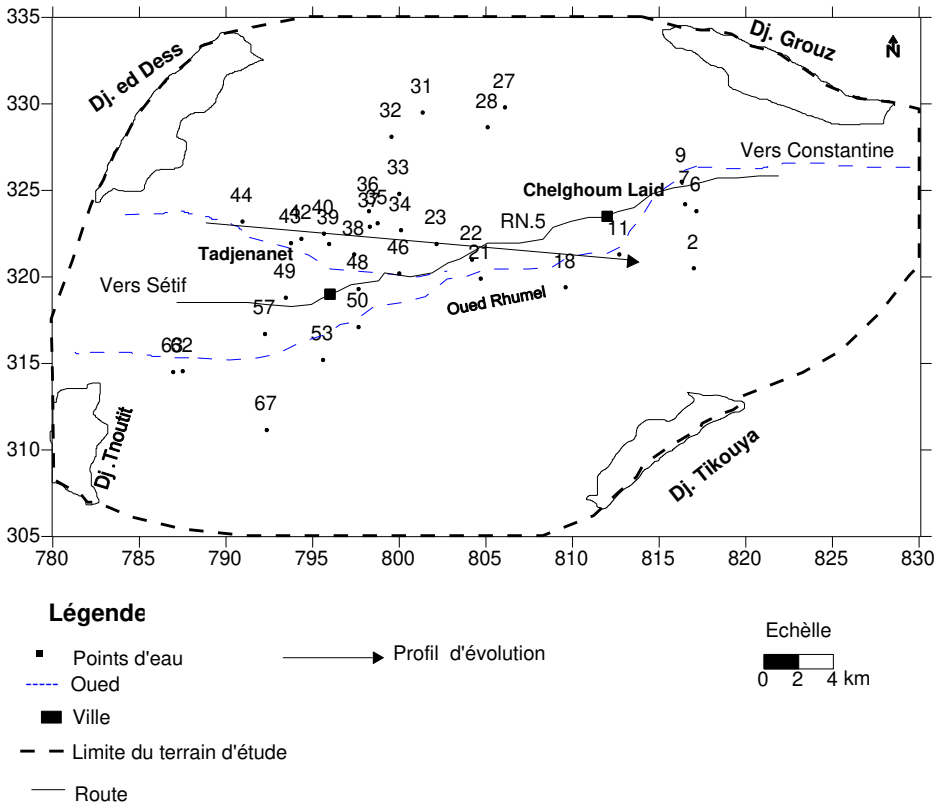


Figure 56. Carte d'inventaire des points d'eau ayant fait l'objet d'une analyse physico-chimique

3. Caractéristiques physico-chimiques

3.1. Caractérisation des eaux de l'aquifère

La composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, du temps de séjour, de l'évolution hydrodynamique, de la profondeur du niveau statique et du climat. La qualité de l'eau peut également être influencée par l'activité de l'homme dans le domaine de l'urbanisation, de l'industrialisation et surtout les différentes activités agricoles.

Un autre facteur qui a un effet considérable sur la qualité des eaux, surtout dans les régions arides et semi-arides, qui est l'augmentation de la salinité des eaux souterraines surtout pour les aquifères superficiels, résultant du phénomène de l'évaporation (Drever, 1997). Les résultats des analyses sont regroupés dans le tableau 15. La dispersion autour de la moyenne (m) de ces éléments s'est faite à l'aide de l'écart type (σ) et du coefficient de variation (CV= σ /m), on estime que la série est homogène lorsque CV <50%.

Tableau 15. Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques des eaux la nappe alluviale de Tadjnanet- Chelghoum Laid. Mai2007

Paramètres / Statistiques	T (°c)	pH	CE (µs/cm)	Ca^{+2} mg/l	Mg^{+2} mg/l	Na^{+} mg/l	K^{+} mg/l	HCO_3^{-} mg/l	SO_4^{-2} mg/l	Cl^{-} mg/l	NO_3^{-} mg/l	NO_2^{-} mg/l	NH_4^{+} mg/l	PO_4^{-3} mg/l
Max	19.2	8.63	3611	304.6	172.44	143	11.3	512.4	1100	339.15	486.4	0.05	0.56	2.2
Min	15.1	7.12	745	65.68	30.6	26.3	0.4	122	29	88.75	13	0.01	0.1	0.4
Moy	17.3	7.62	1465	148.39	70.67	76.95	6.71	256.43	272.63	191.58	102.6	0.02	0.25	0.95
Ecart type	1.11	0.34	693	68.29	39.37	28.0	2.5	97.14	298.46	79.02	81.95	0.01	0.18	0.6
CV (%)	6.42	4.46	47.30	46.02	55.71	36.39	37.26	37.88	109.47	41.24	79.87	50	72	63.16
Norme OMS (2004)		6.5-8.5	2000	100	50	200	12		250	250	50	0.2	0 .4	

Selon les résultats d'analyses la chimie des eaux, la nappe alluviale est caractérisée par une grande variation des concentrations des éléments chimiques : Na^{+} et Cl^{-} (26-339 mg/l), SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, et HCO_3^{-} (29-1100 mg/l), NO_3^{-} (13-486 mg/l), NH_4^{+}, PO_4^{3--}, NO2- (0.01-2.2 mg/l). On remarque que l'écart par rapport à la moyenne est considérable pour certains éléments tels que le magnésium, les sulfates et les nutriments. Fig. 57.

La grande variabilité des composés azotés telle que les nitrates est due probablement à l'utilisation des engrais chimiques et organiques dans l'agriculture et à la décomposition de la matière organique (Kehew, 2000). (Groupe 1). En ce qui concerne les sulfates qui proviennent de la dissolution des formations gypseuses, les concentrations élevées sont limitées dans l'espace et ne concernent pas toute la plaine. (Groupe 2).

La déviation du reste des paramètres par rapport à la moyenne est de l'ordre de 40%. Ceci peut être expliqué par une répartition assez régulière de la concentration de ces paramètres dans l'espace, excepté pour le magnésium où les fortes concentrations sont liées aux sulfates. (Groupe 3). Concernant les paramètres physiques, ils ont une répartition identique sur l'ensemble du terrain. (Groupe1).

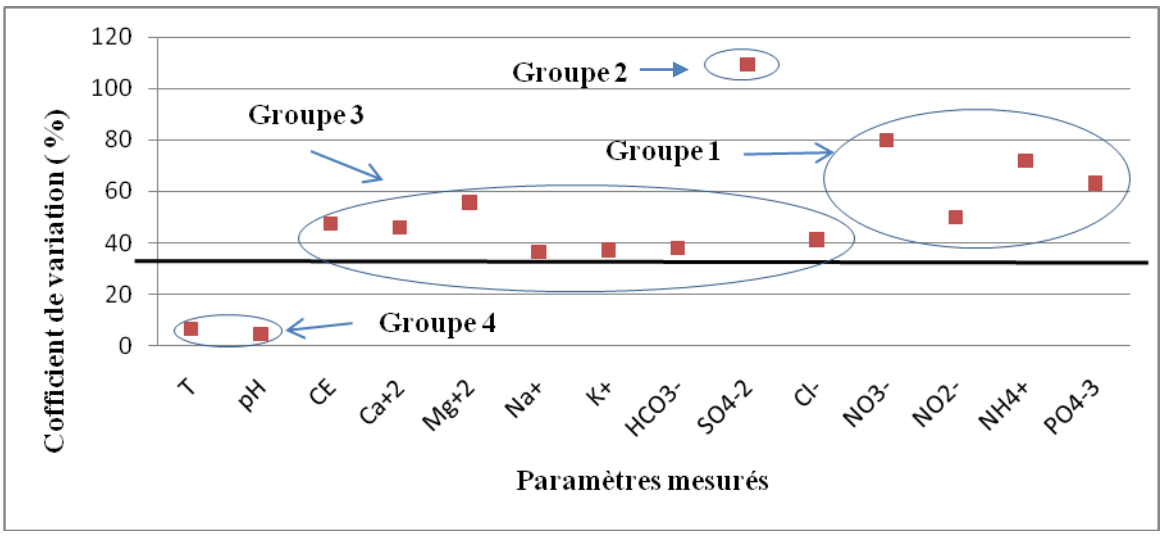


Figure 57. Le coefficient de variation des variables physico-chimiques mesurées des eaux souterraines

3.2. Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques

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

3.2.1. Paramètres physiques

3.2.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions H+ dans l'eau. Ce paramètre caractérise l'équilibre physico-chimique et dépend des facteurs multiples dont l'origine de l'eau. Le pH détermine l'acidité, l'alcalinité et la neutralité des solutions, il est lié à la nature du terrain. En général, la modification du pH dans l'eau est liée à la perte du gaz carbonique. Il convient aussi de signaler que la valeur du pH est fonction de la matière organique thermostable dissoute ou non dans l'eau. Généralement les valeurs de pH, diminuent pendant les périodes pluvieuses, cette diminution peut être attribuée au gaz carbonique qui charge les eaux d'infiltration à travers les différentes couches du sol. Les minéraux rencontrés seront dissous sous l'influence du H_2CO_3 (Drever, 1997).

A partir du pH, on peut classifier les eaux de la manière suivante (tab.16)

Tableau.16 Estimation de la qualité de l'eau selon le pH

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

D'après la carte de pH (fig.58) les eaux souterraines de la région, ce paramètre varie entre 7.2 et 8.63. La totalité des points échantillonnés sont conformes aux normes à l'exception du point d'eau n°44 situé à l'extrême nord où le pH est de l'ordre de 8.63. L'évolution spatiale du pH montre une légère variation de l'Ouest vers l'est.

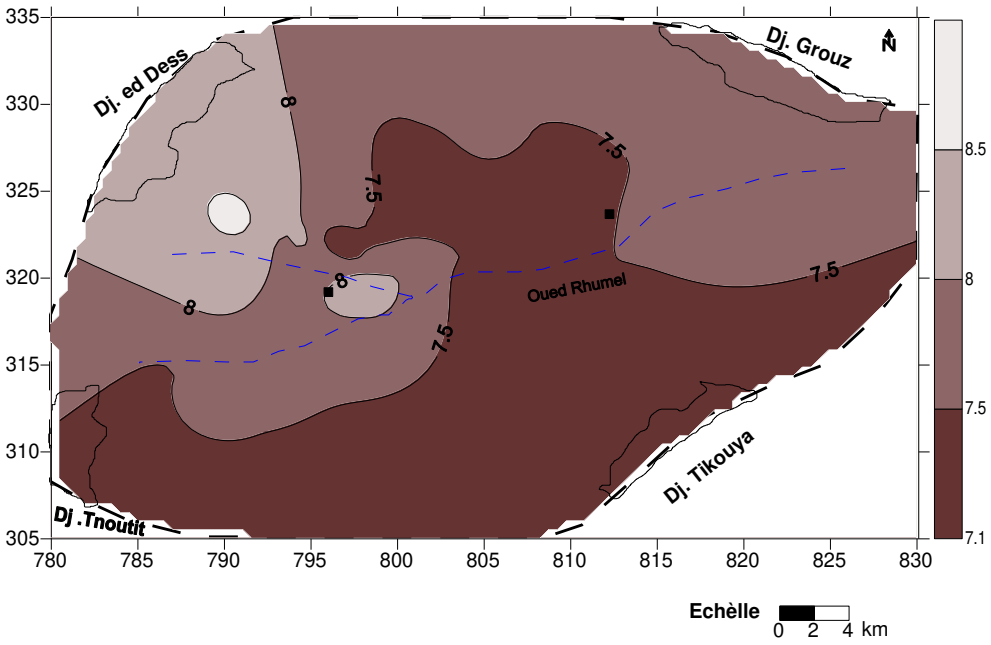


Figure 58. Carte du pH

3.2.1.2. La conductivité électrique

La conductivité électrique mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Sa variation permet de suivre l'évolution de la salinité globale de la chimie de l'eau. La classification des eaux en fonction de la conductivité électrique se présente de la manière suivante :

- Conductivité égale à 0.05 (µS/cm): eau déminéralisée
- Conductivité de 10 à 80 (µS/cm): eau de pluie
- Conductivité de 80 à 100 (µS /cm) : eau peu minéralisée
- Conductivité de 300 à 500 (µS /cm) : eau moyennement minéralisée
- Conductivité de 1000 à 3000 (µS /cm) : eau saline
- Conductivité supérieure à 3000 (µS /cm) : eau de mer.

La répartition de la conductivité électrique montre une augmentation dans le sens d'écoulement de l'Ouest vers l'Est. Le maximum est observé au centre avec 3610 µS/cm. Fig. 59.

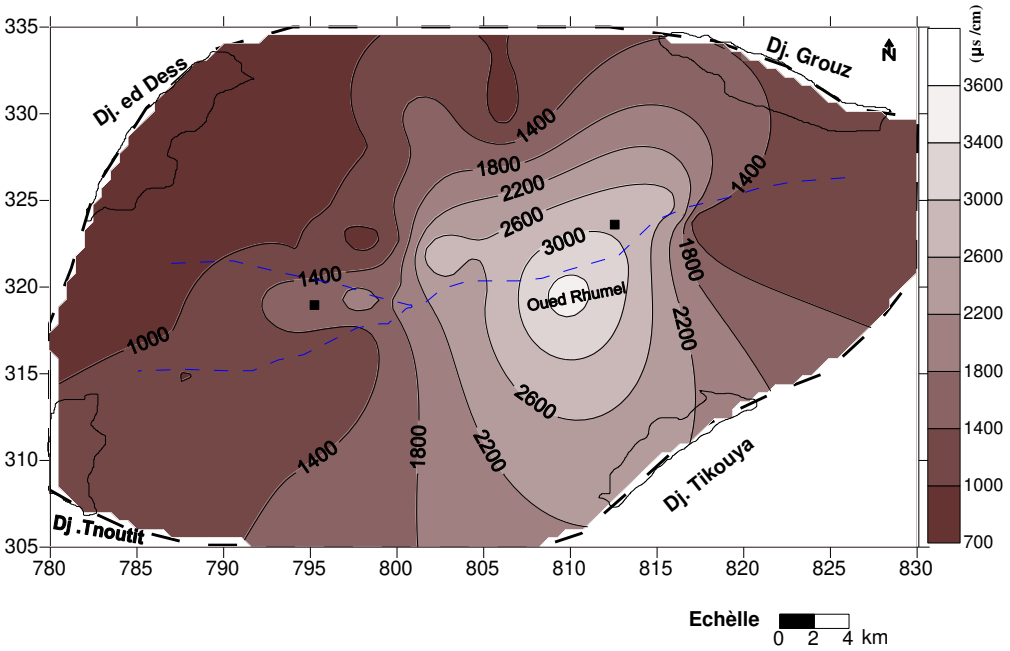


Figure 59. Carte de la conductivité électrique

3.2.2. Paramètres chimiques

3.2.2. 1. Le calcium

Le calcium, élément principal de la dureté de l'eau, est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates.

Dans les roches sédimentaires, il se présente sous forme de carbonates (calcite, dolomite et aragonite). (Derver 1997). Le calcium fait partie de quelques minéraux évaporitiques à savoir le gypse et l'anhydrite et aussi dans le minéraux argileux sous forme de Ca-montmorillonite (Hem, 1985).

L'examen de la carte de la répartition du calcium (fig.60), montre que la teneur la plus élevée ont est enregistrée au centre de la plaine, tandis que les faibles teneurs sont observées au sud-est de la zone d'étude, notamment prés de Djebel Tnoutit et au nord de Tadjnanet. Ceci est en étroite liaison avec l'évolution de la conductivité électrique.

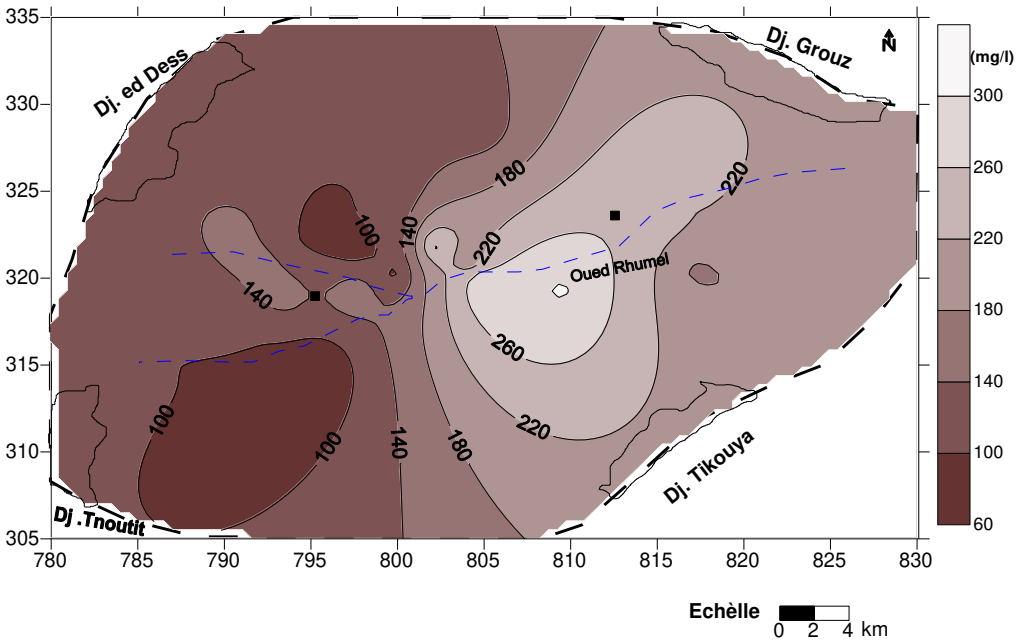


Figure 60. Carte de calcium

3.2.2. 2. Le magnésium

Le magnésium est un élément très répandu dans la nature (2.1% de l'écorce terrestre), élément aussi principal de la dureté de l'eau. Dans les roches sédimentaires ses origines sont comparables à ceux du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium comme la magnésite et la dolomite (Drever 1997).

L'étude de la carte de la répartition spatiale du magnésium (fig.61) montre une répartition similaire à celle du calcium. Les concentrations varient entre 32.49 mg/l et 172.44 mg/l. Les teneurs les plus élevées sont observées au niveau des points d'eau localisés le long de Oued Rhumel, au centre et au sud de la région d'étude. Ces fortes concentrations peuvent être attribuées au contact direct de ces eaux avec les argiles gypseuses et les formations carbonatés et dolomitiques limitrophes.

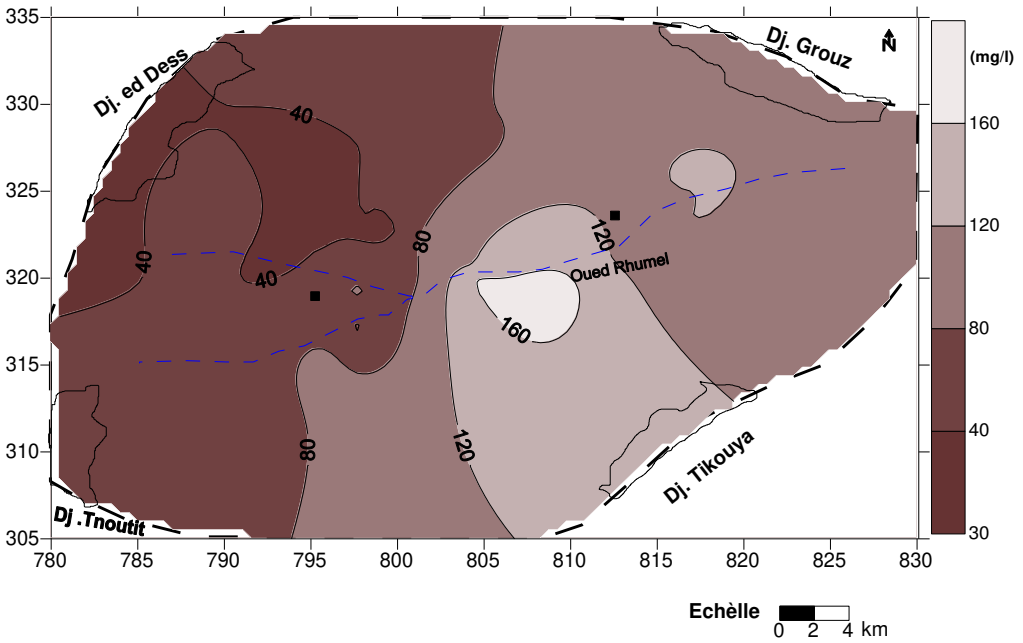


Figure 61. Carte du magnésium

3.2.2. 3.Le sodium

Cet élément, très abondant (environ 26g/kg de la croûte terrestre soit environ 2.8%) ne se rencontre pas naturellement à l'état natif mais toujours associé à d'autres éléments chimiques (Chlorures, sulfates….). Le principal minéral contenant le sodium est le sel gemme (chlorures de sodium). Des teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage ou de la percolation de terrains salés ainsi que de l'effet de la salinité marine.

Au niveau de la région d'étude les teneurs de sodium varient entre un minimum de 26.35 mg/l dans la partie sud-ouest du terrain et un maximum de 143.8 mg/l dans la partie Est.

La carte de la variation spatiale de cet élément (fig.62), montre que les plus grandes concentrations se localisent dans le secteur est vers le centre. Ces teneurs sont attribuées probablement des mécanismes chimiques différents liés à l'échange de base qui est influencés par le pompage et le sens d'écoulement. Les parties ouest et sud-ouest se caractérisent par de faibles teneurs avec un minimum d'ordre de 26 mg/l au niveau du point d'eau n°63.

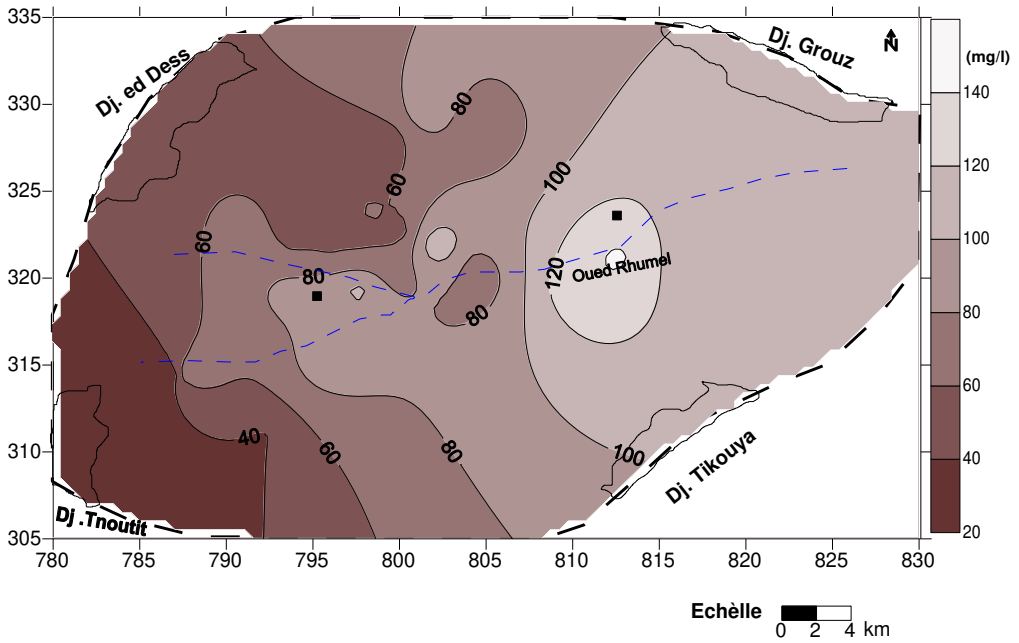


Figure 62. Carte de sodium

3.2.2. 4.Les bicarbonates

Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO_2) selon l'équation suivante:

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow 2HCO_3^- + Ca^{2+}$$

Les concentrations en bicarbonates dans les différents échantillons analysés, varient entre un minimum de 122 mg/l au niveau du puits n°63 et un maximum de 512.4 mg/l au niveau du puits n°11. L'évolution spatiale des bicarbonates (fig.63), montre une augmentation des concentrations de cet élément dans la partie est qui coïncide avec la zone de convergence des eaux souterraines de l'aquifère. Ces fortes teneurs sont dues probablement à la dissolution des calcaires lacustres de Moi-Pliocène au Nord et au Nord-Ouest de Tadjnanet, les formations carbonatées limitrophes d'âge Eocène, constituant le massif de Djebel Tikouya au sud-est et Draa Mestaoua ainsi que les formations d'âge Crétacé qui caractérisent le massif de Djebel Grouz.

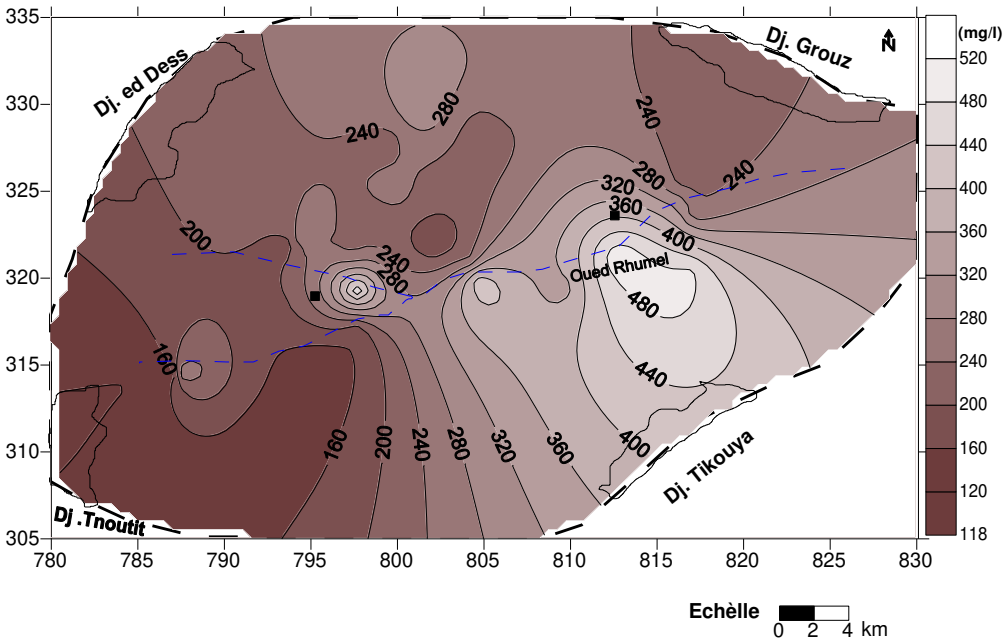


Figure 63. Carte des bicarbonates

3.2.2.5. Les chlorures

Très répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium ($CaCl_2$), les ions chlorures (Cl^-), la grande partie se trouve dans les océans, constituent environ 0.05 % de la lithosphère. De façon générale, l'ion chlorure est présent dans toutes les eaux à des concentrations différentes. Dans les eaux souterraines, les teneurs en ions chlorures peuvent atteindre quelques grammes par litre au contact de certaines formations géologiques.

Dans la région, la teneur varie entre un minimum de 88.75 mg/l enregistré au niveau du puits n°32 et un maximum de 339.15 mg/l enregistré au niveau du puits n°23. L'examen de la carte des chlorures (fig. 64), montre des concentrations élevées dans la partie centrale et sud-est du terrain identique à elle de sodium. Plus au Nord et au Nord-Ouest l'eau est moins chargée. La répartition des teneurs des chlorures se corrèle bien avec celles de sodium, ce qui confirme l'origine salifère de ces deux éléments.

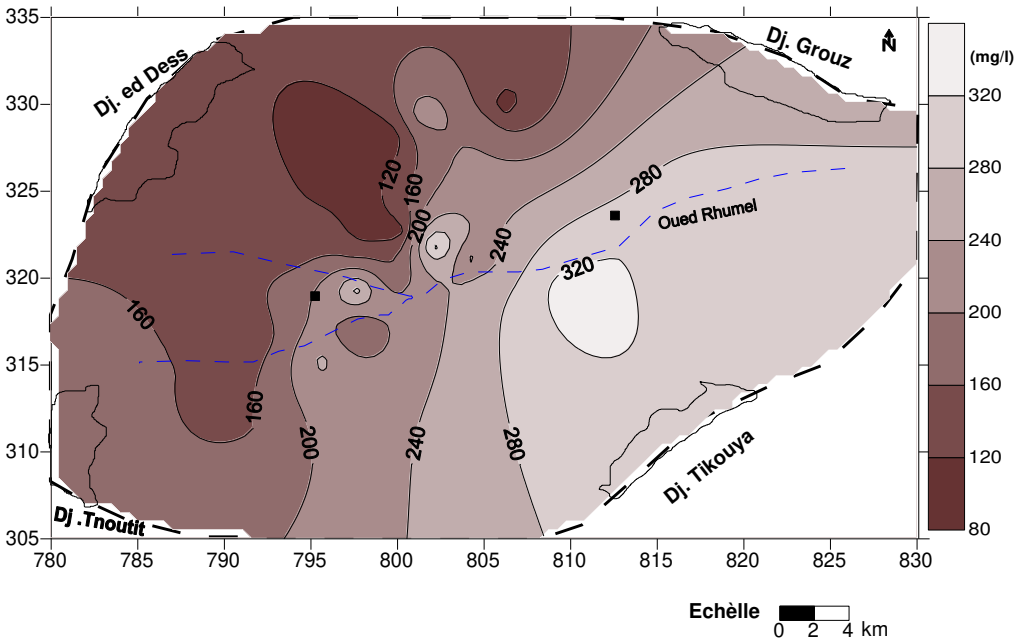


Figure 64. Carte des chlorures

3.2.2.6. Sulfates

Composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse (CaSO4, 2H2O). Une autre source de sulfates peut être attribuée à l'infiltration de sulfure utilisé comme fertilisant ou comme pesticide .le gypse se dissout très rapidement en contact avec l'eau, la réaction de dissolution de gypse est représentée par l'équation suivante (Freeze et Cheery, 1979):

$$CaSO_4, 2H_2O \longleftrightarrow Ca^{++} + SO_4^{2-} + 2H_2O$$

L'examen de la carte des sulfates (fig.65), nous a permis de constater que les eaux sont très riches en sulfates, les fortes concentrations se localisent à l'Est, et au centre avec des concentrations qui dépassent la norme, (1100mg/l) enregistrée au niveau du puits n°9. La plus faible teneur est d'ordre de 29 mg/l enregistrée dans le puits n°43. Les fortes teneurs sont liées à l'effet de la dissolution des formations évaporitiques.

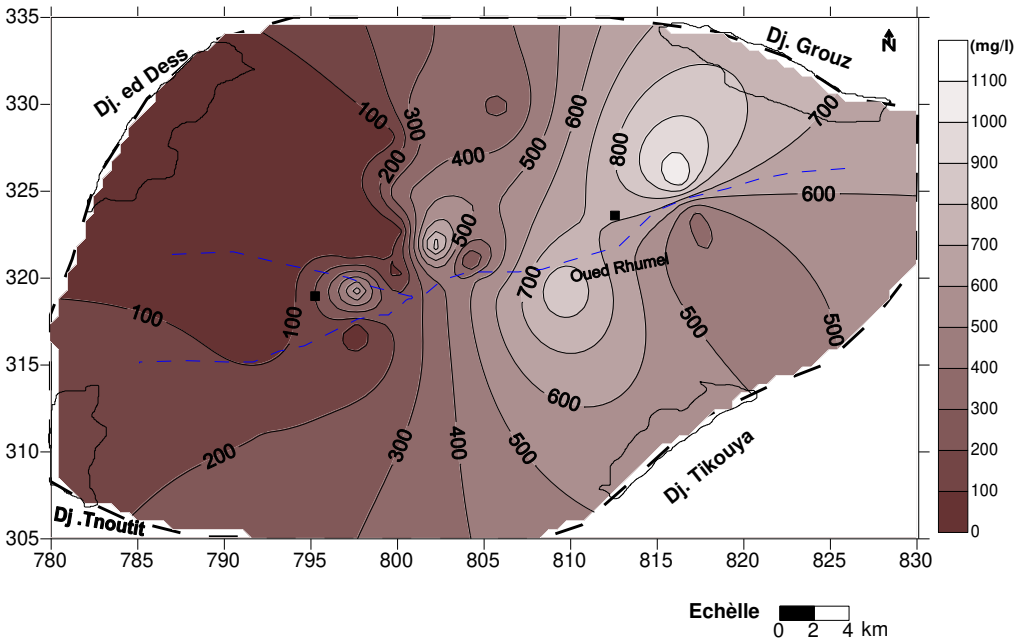


Figure 65. Carte des Sulfates

3.2.2.4. Les nitrates

Les nitrates sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface et sont accentuées par l'activité humaine qui accélère le processus d'enrichissement en éléments nutritifs par l'apport d'engrais sur les sols cultivés. 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 chimique.

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.

Le cycle de l'azote dans le sol est très complexe, il est représenté sous forme simplifiée dans la figure 66.

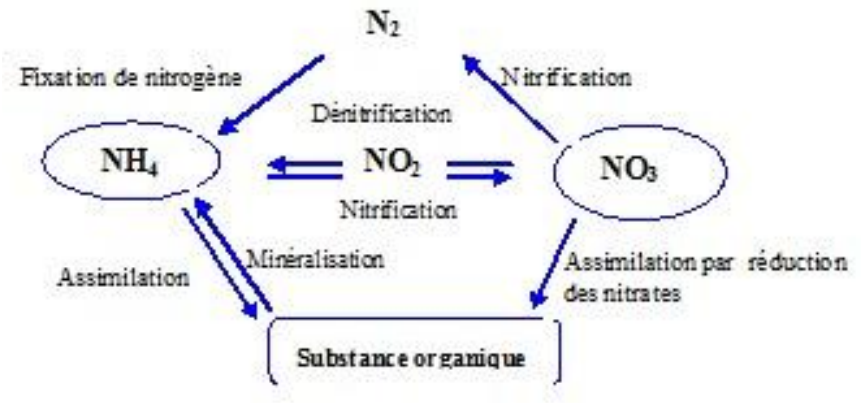


Figure 66. Cycle de l'azote dans le sol (Hill, 1991)

L'examen de la carte (fig.67) montre que les zones les plus exposées à la pollution par les nitrates se situent dans la partie centrale de la plaine, dû principalement à la nature alluvionnaire des terrains qui favorise l'immigration des éléments azotés vers la zone saturée sous l'effet de l'intensification des activités agricoles et l'excès de pompage. La forte teneur est enregistrée au niveau du puits n°23 avec une teneur de 486.41mg/l. Les faibles teneures sont enregistrées dans la partie sud-ouest du terrain vu la profondeur élevée de la nappe ainsi que la nature argileuse du toit de la nappe, ce qui protège la nappe contre les infiltrations des ions nitrates. La faible teneur est enregistrée dans le puits n°62 par une concentration d'ordre 13mg/l.

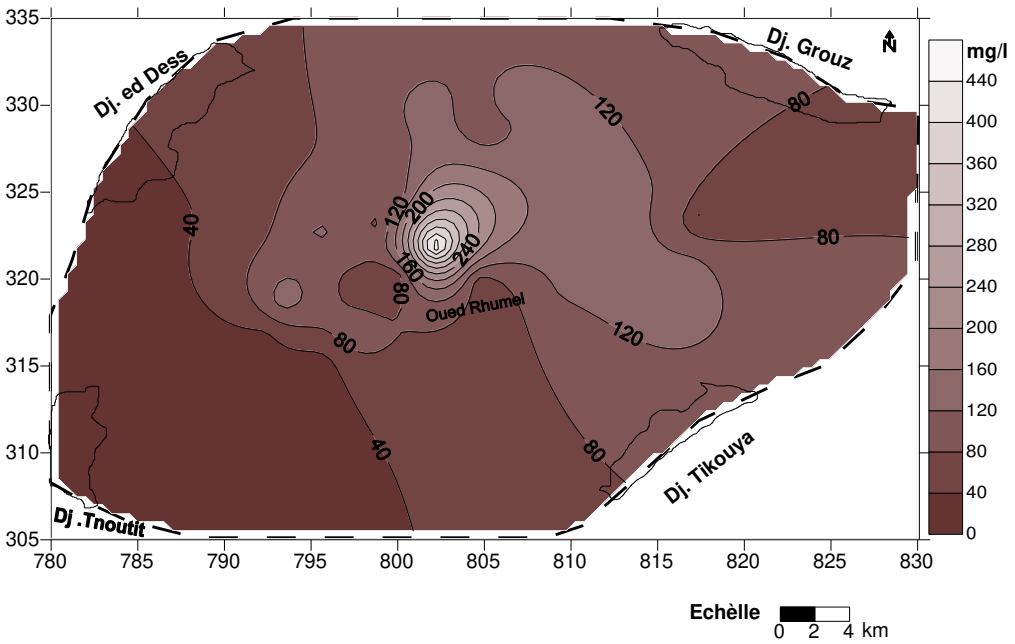


Figure 67. Carte des nitrates

La variation des teneurs en nitrates dans la région d'étude se répartit en 4 classes (tab. 17).

Tableau .17 Répartition des teneurs en nitrates dans la région d'étude. Mai 2007

Classe	Intervalle	Nombre	%
1	NO_3>200mg/l	1	3.03
2	100<NO_3<200mg/l	13	39.39
3	50<NO_3<100mg/l	12	36.36
4	NO_3<50mg/l	7	21.21

Ce tableau montre que 78.78% des points d'eau répartit sur la région possèdent des teneurs supérieur aux normes selon l'OMS fixée à 50 mg/l, par contre la reste des points d'eau présente des teneurs inférieures aux normes.

3.2.2.4.1. Evolution spatiale des nitrates

L'évolution spatiale des nitrates selon le long d'un profil Ouest-Est montre que les teneurs augmentent d'une manière alarmante. Le pic est atteint au puits 22 avec 180 mg/l et 140 mg/l à l'extrême Est. Cette situation est en liaison avec la présence d'une immense surface agricole où l'utilisation irrationnelle des engrais chimiques est excessive. Fig. 68.



Figure 68. Evolution spatiale des nitrates selon l'écoulement.

3.2.2.4.2 Influence de la profondeur de l'eau sur la teneur en nitrates

L'évolution de la concentration des nitrates en fonction de la profondeur de l'eau (fig. 69) montre que les points d'eau dont le niveau piézométrique est plus proche à la surface du sol, possèdent de fortes teneurs en nitrates. Ceci est dû à la facilité des ions nitrates d'être transportés par l'eau à travers la zone non saturée. Ceci est surtout marqué pour les

points d'eau se trouvant dans la partie Est et centrale. La figure suivante montre les différents mécanismes de pollution de l'eau par les nitrates. Fig. 70.

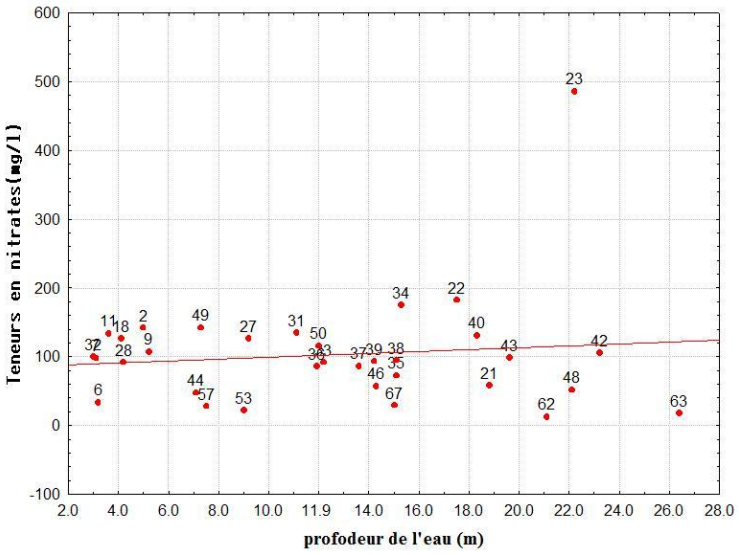


Figure 69. Relation nitrate – profondeur de l'eau

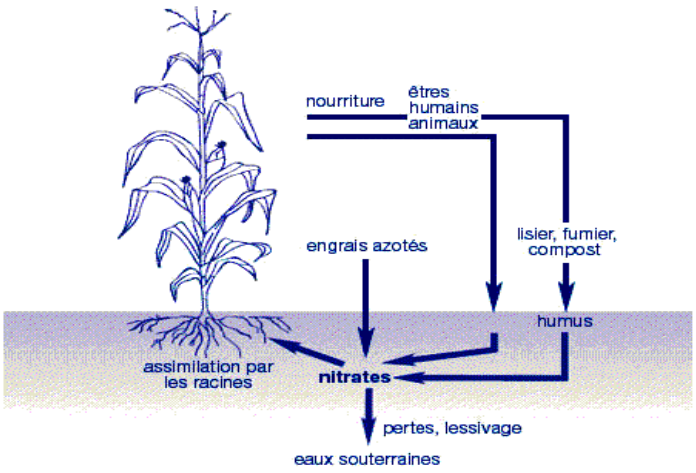


Figure 70. Mécanisme de la pollution de l'eau par les nitrates. Julien, 2003

3.2.2.5. Nitrites

Les nitrites représentent la forme la moins oxygénée et la moins stable de l'azote, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme toxique. Elle est due à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium. Les analyses montrent que les eaux souterraines de la région renferment des teneurs très faibles (0 à 0.05mg/l).

3.2.2.6. Ammonium

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence dans l'eau est liée soit aux rejets urbains soit aux rejets industriels. Les concentrations observées sont dans la région, sont inférieures à la norme et varient entre 0 à 0.56mg/l.

3.2.2.7. Phosphates

Les phosphates peuvent se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO_3, pyro $H_4P_2O_7$ et ortho H_3PO_4. En milieu aqueux, les formes méta et pyro tendant vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphate sont données par :

$$PO_4^{3-} + 3H+ \leftrightarrow HPO_4^{2--} + 2H^+ \leftrightarrow H_2PO_4^{2--} + H^+ \leftrightarrow H_3PO_4$$

Les concentrations observées au niveau de la région sont dans l'ensemble inférieures à la norme et varient entre 0 à 2.2 mg/l.

3.2.3. Evolution spatiale des formes azotées

L'examen de la figure d'évolution des différentes forme azotées selon le profil ouest est de l'écoulement, nous a permis de constater que l'apparition des nitrites et l'ammonium dans l'eau débute à partir d'un seuil d'une teneur moyenne en nitrates supérieur à 100 mg/l dans la partie centrale du terrain d'étude, les faibles concentrations dans l'eau de ces élément est dû aux conditions de réduction moins développées de la forme nitraté. Les phosphates deviennent plus au moins important dans la partie Est, lié à l'utilisation des engrais chimique de type NPK et aux rejets domestique et industrielle à l'aval de la ville Chelghoum Laid.(fig.71)

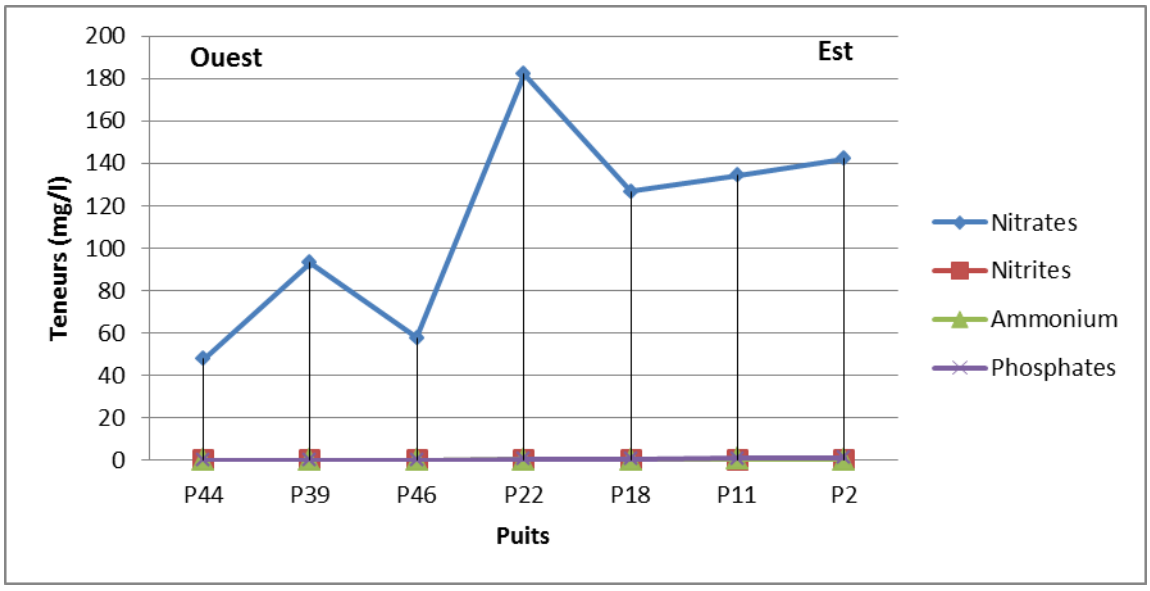


Figure 71. Evolution spatiale des formes azotées et les phosphates selon l'axe d'écoulement

4. Faciès chimique des eaux

A partir des calculs des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et la classification des ions (formule ionique) des données hydrochimiques de 33 points d'eau prélevés dans la plaine de Tadjenanet Chelghoum Laid, nous a permis de déterminer quatre faciès : classification de Stabler

- Le faciès sulfaté calcique
- Le faciès chloruré calcique.
- Le faciès bicarbonaté calcique.
- Le faciès chloruré magnésien.
- Le faciès sulfaté magnésien

Dont le faciès sulfaté calcique est le plus dominant avec 36 % des échantillons analysés, 30 % le faciès chloruré calcique, Le faciès bicarbonaté calcique, chloruré magnésien et sulfaté magnésien représentent respectivement 24 % ,6 % et 3 % des échantillons analysés.

D'après cette répartition préliminaire des faciès chimique des eaux il parait que l'influence des formations évaporitiques et carbonatées est bien marquée par la dominance des sulfates, chlorures et les bicarbonates selon le pôle cationique et par calcium et magnésium selon le pôle anionique.

Pour apprécier le faciès chimique des eaux, plusieurs techniques de traitement basées sur l'établissement des diagrammes de classification ont été utilisées tels que celui de Schoeller-Berkallof et Piper, ainsi que des méthodes de traitement statistiques, afin de mieux cerner les particularités des eaux étudiées.

4.1. Diagramme de SCHOELLER-BERKALLOF

Ce type de représentation, établie par Schoeler et repris par Berkallof, nous portons sur un semi logarithmique les quantités en réactions des anions et des cations sur l'axe des ordonnées et sur les abscisses les éléments chimiques à pas régulier, et ceci pour chaque point d'eau de prélèvement.

Le diagramme tracé pour la période de Mai 2007 (fig.72), confirme principalement un faciès sulfaté calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions sulfatés (SO_4^{-2}) et au calcium (Ca^{+2}). Secondairement on observe un chloruré calcique.

Généralement les graphiques qui sont marquées par des fortes concentrations et qui ont en première position sur la figure sont liés à la présence des terrains salifères ou évaporitiques caractérisent les puits se trouvant à l'est et au centre de la région d'étude.

Les nitrates présentent aussi des teneurs qui dépassent les normes témoignant ainsi l'apport anthropique vers la nappe.

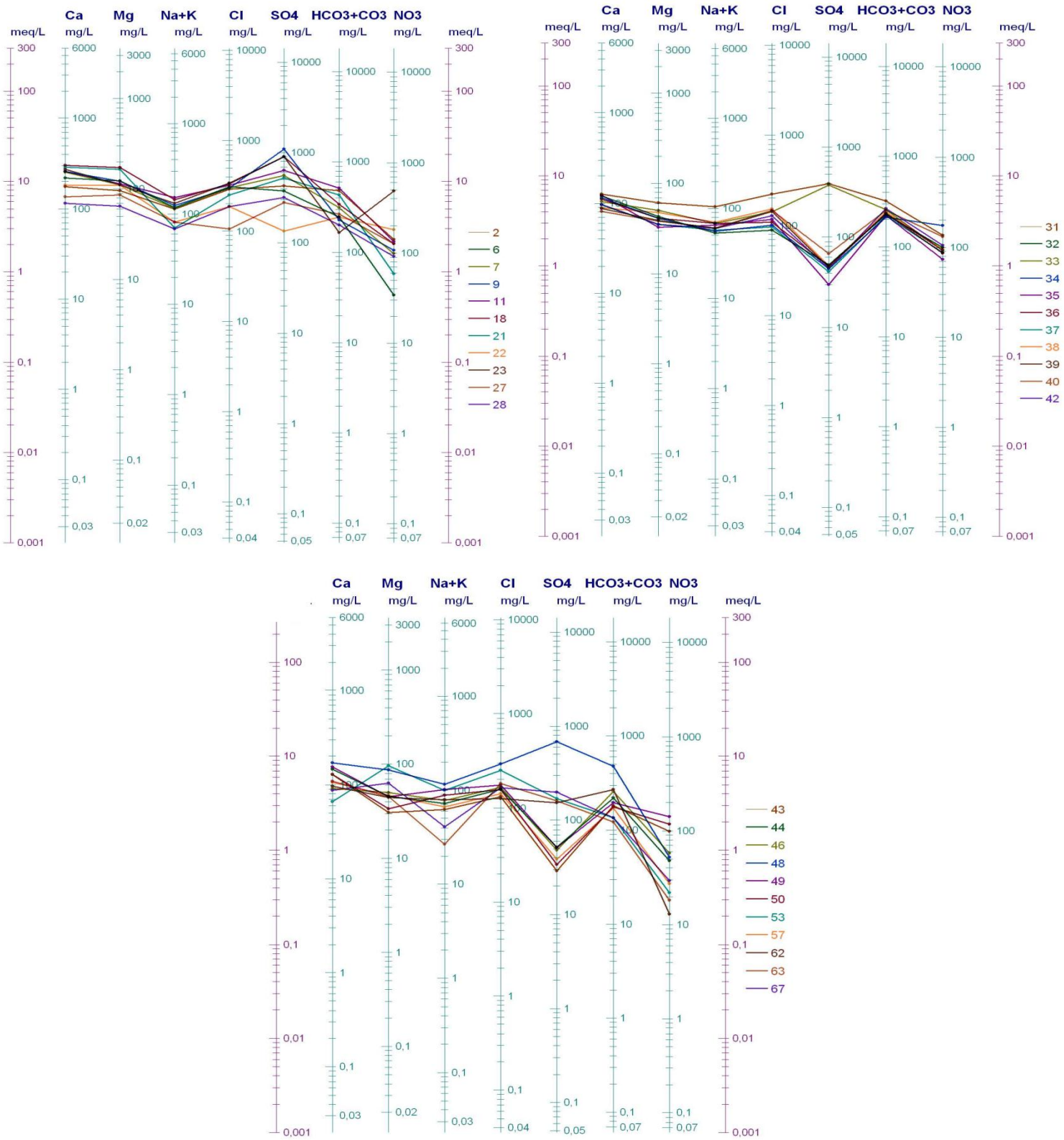


Figure 72. Diagramme de Schoeller-Berkallof. Mai 2000

4.2. Diagramme de PIPER

Ce diagramme est un autre mode de représentation graphique et de classification d'une eau analysée. De forme triangulaire, il est subdivisé en trois zones de faciès (fig.73).

Les nuages de points concentrés dans une zone représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques.

Les résultats d'analyse portés sur le diagramme de Piper confirment l'origine commune de ces eaux. Elles se regroupent en un seul pôle influencé par la dissolution des formations évaporitiques. Cette dissolution a générée plusieurs éléments chimiques, notamment les sulfates, les chlorures, le calcium, le magnésium. Qu'en allant de l'ouest vers l'est les eaux ont une tendance vers le pole anionique sulfaté. L'ensemble des points d'eau représentés sur le triangle relatifs aux cations se mettent au milieu (partie mixte) ont une tendance vers le pole calcique, excepte les points d'eau n°53et 67 situés à l'ouest du terrain d'étude.

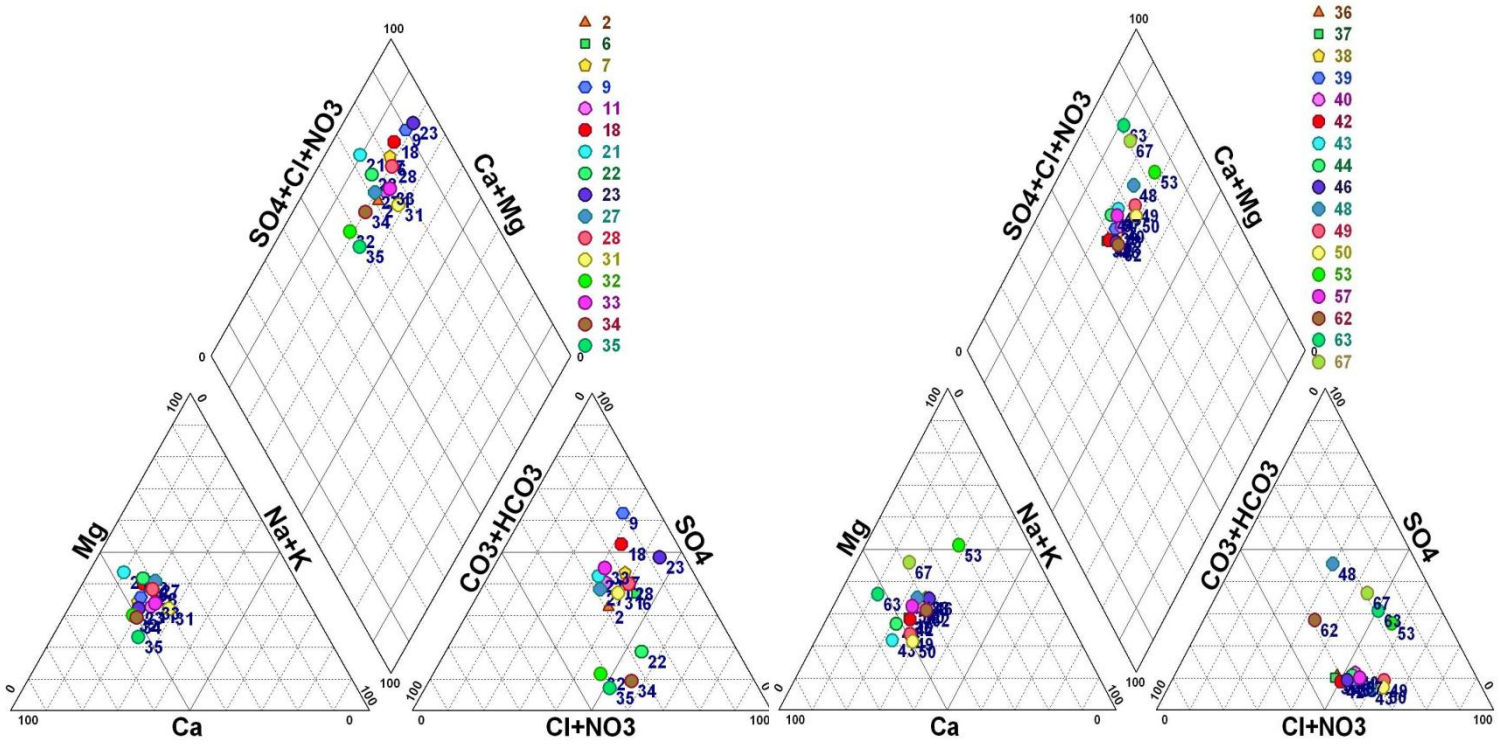


Figure 73. Diagramme de Piper. Mai 2007

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

L'examen des deux relations des rapports caractéristique nous a permis de révéler la dominance des ions sulfatés, chlorures et bicarbonatés avec le pôle cationique calcique, ce qui explique l'origine de ces eaux est de nature diverse (fig.74).

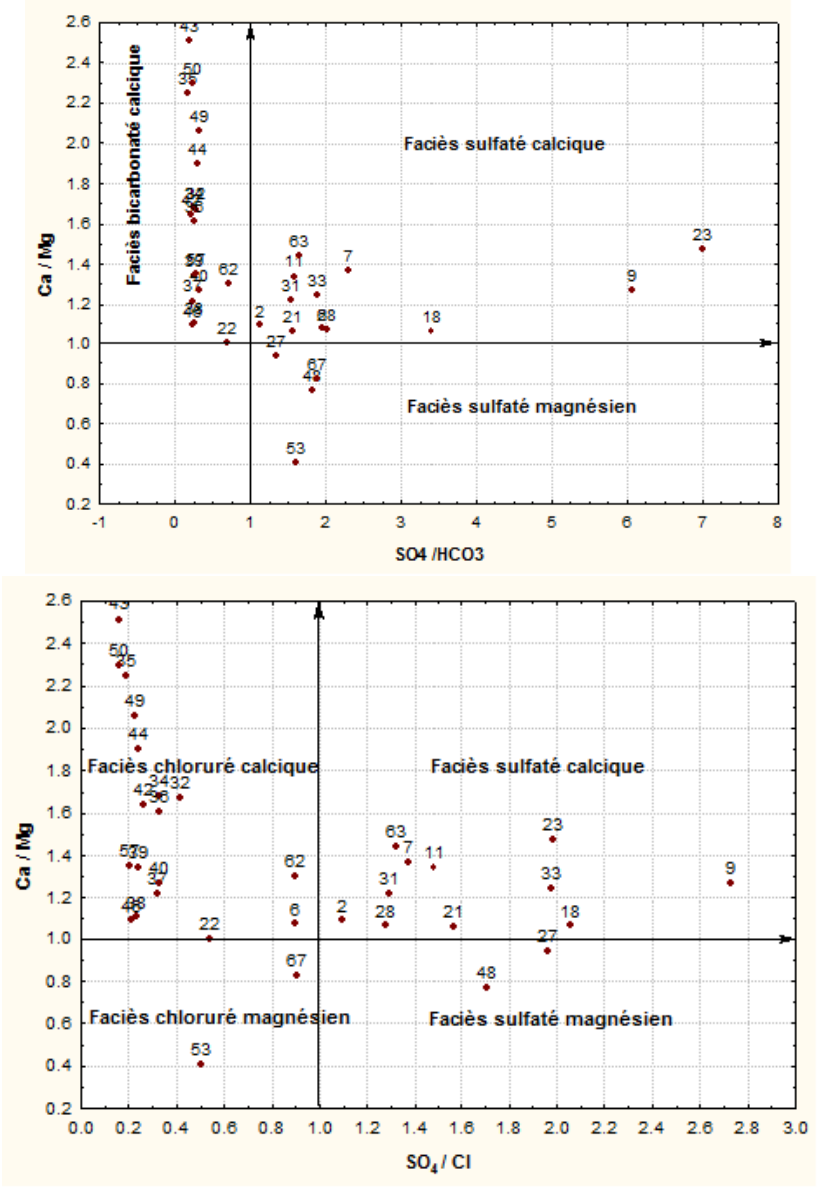


Figure 74. Répartition des faciès chimiques selon les rapports caractéristiques

4.3. Répartition spatiale des faciès chimiques

L'étude de la répartition spatiale des faciès n'est qu'en réalité que l'étude de la répartition des paramètres chimiques caractérisant ces faciès sur toute la plaine. Les paramètres dominants des eaux souterraines sont les sulfates, les chlorures et le calcium. D'après cette carte, nous constatons que les eaux passent d'un faciès chloruré et bicarbonaté à un faciès sulfaté. Fig. 75. La coexistence de ces faciès est en liaison avec la diversité

géologique des terrains. La présence de formations carbonatées et de formations salifères triasiques permet à l'eau d'avoir un faciès variable selon la nature du terrain.

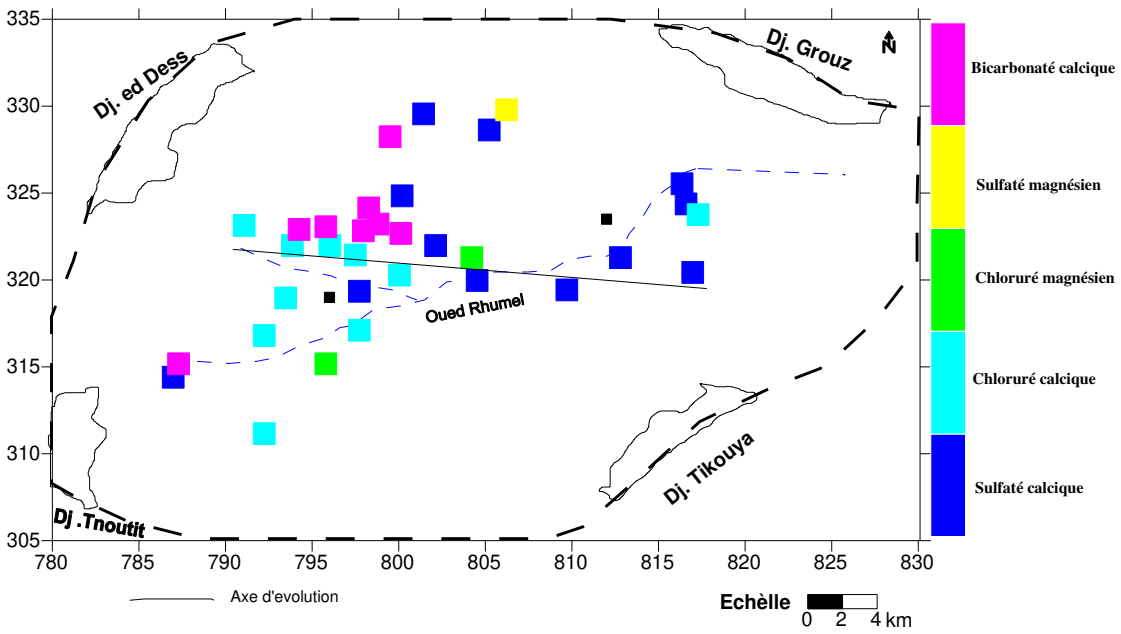
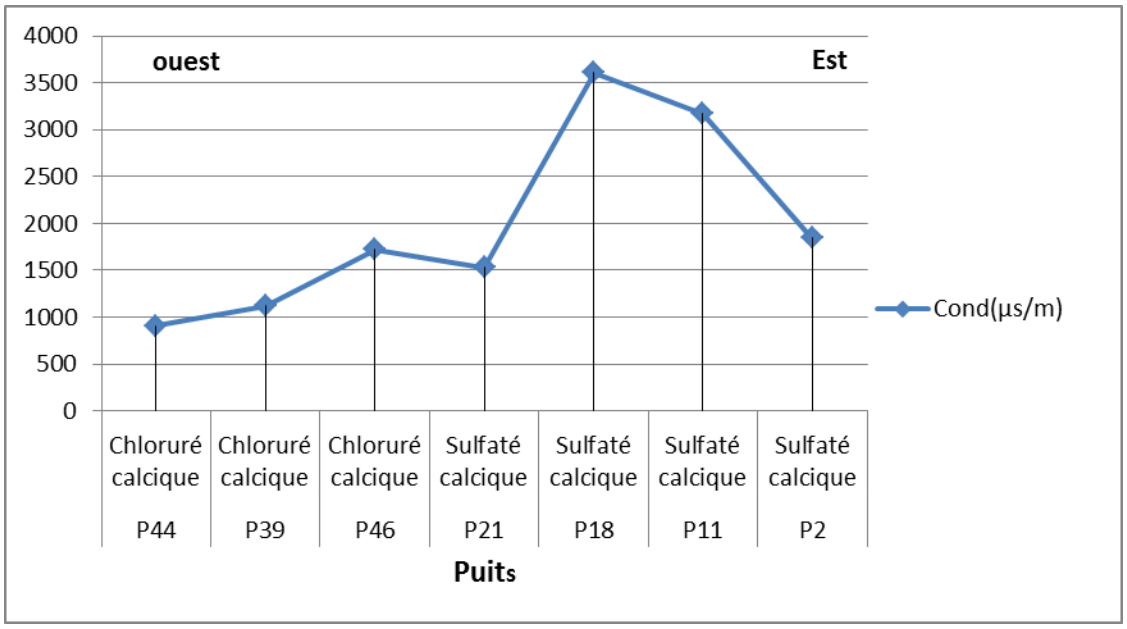


Figure 75. Carte des faciès chimiques .Mai 2007

L'étude de l'évolution spatiale des faciès chimiques des eaux de la nappe en liaison avec la conductivité électrique (fig.76) nous a permis de constater que selon l'axe d'écoulement, le faciès chloruré calcique et bicarbonaté calcique appariaient à l'ouest sont devenu sulfaté calcique au niveau du centre du terrain d'étude à partir des grandeurs de conductivité électrique supérieur à 1500 µS/m, dont elle atteint des valeurs très élevées d'ordre de 3600µS/m, ce qui est expliqué par l'accélération du phénomène de dissolution et l'effet d'échange de base entre les alcalins et alcalino- terreux.



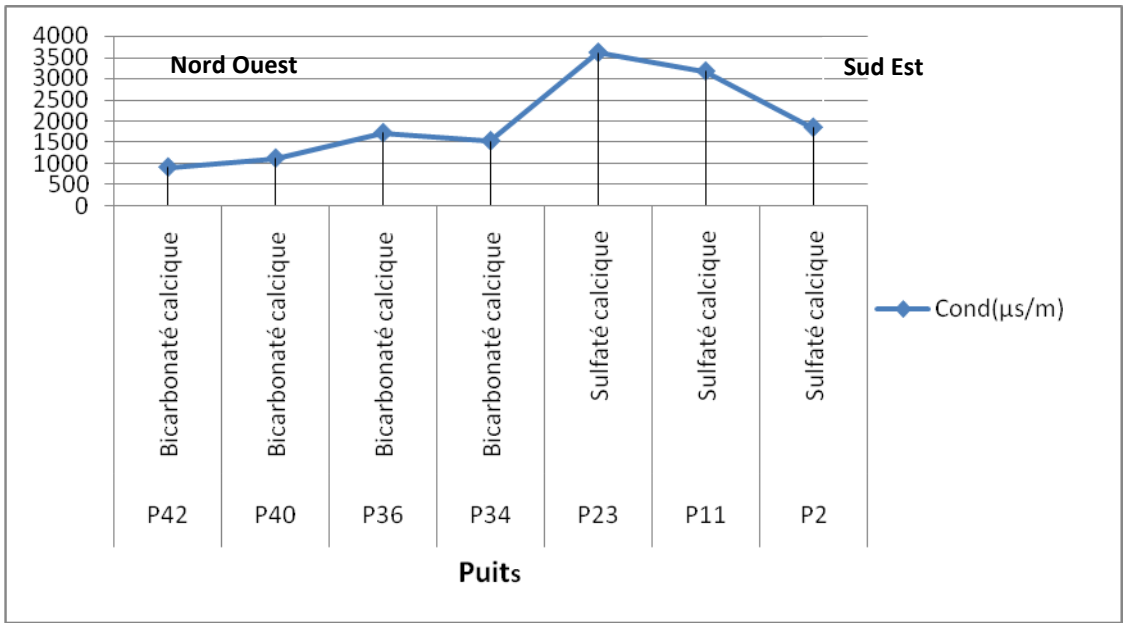


Figure 76. Répartition spatiale des faciès chimique de la nappe alluviale .Mai 2007

5. Analyse statistique des données physico- chimiques

L'analyse multidimensionnelle est une méthode statistique de description d'un tableau de données. Elle synthétise et classe les données et révèle les facteurs qui sont à l'origine de l'évolution des variables .Cette méthode constitue donc un outil de choix en hydrochimie, elle permet de remplacer une variable par une combinaison linéaire de plusieurs variables (Plagnes 2000).

5.1. Corrélation entre les éléments

Pour une meilleure caractérisation des paramètres chimiques et leurs évolutions, on a procédé à l'analyse statistique par corrélation des différents paramètres analysés durant la période d'investigation (anions majeurs, cations majeurs, pH, conductivité et éléments azotés).

La matrice de corrélation est une matrice carrée caractérisée par un coefficient de corrélation qui peut être utilisé pour distinguer la relation entre deux paramètres (Wuensch, 2001).

Les différentes relations entre les paramètres chimiques par l'estimation du coefficient de corrélation peuvent être déterminées sur la base du coefficient critique théorique tiré de la table de Bravais-Pearson en fonction du nombre de couples mis en jeux. (tab .18) Sur cette base le coefficient critique est égal à 0.40.

Une matrice de corrélations a été réalisée pour l'ensemble des prélèvements d'eau analysés à l'aide du logiciel STATISTICA Version 7. (tab .19).

Tableau. 18 Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson

v / e	**0.10**	**0.05**	**0.02**	v / e	**0.10**	**0.05**	**0.02**
1	0.9877	0.9969	0.9995	**17**	0.3887	0.4555	0.5285
2	0.9000	0.9500	0.980	**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	**45**	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.

Ceci nous permet de regrouper les corrélations de la manière suivante :

Groupe 1 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.9, ont une très grande relation linéaire.

Groupe 2 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation compris entre (0.80-0.90), ont une grande relation linéaire.

Groupe 3 : Les paramètres qui ont un coefficient de corrélation entre (0.70-0.80), ont une relation linéaire signifiante.

Groupe 4 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation entre (0.60-0.70), ont une bonne relation linéaire.

Groupe 5 : Les paramètres qui ont un coefficient de corrélation entre (0.40-0.60), ont une Relation moyenne à acceptable.

Groupe 6 : Les paramètres avec un coefficient de corrélation inférieur à 0.40, ont une faible relation linéaire.

Tableau 19. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'aquifère Tadjenanet-Chelghoum Laid

Variable	pH	Cond	Ca	Mg	Na	K	HCO_3	SO_4	Cl	NO_3	NO_2	NH_4	PO_4
pH	1.00												
Cond	-0.17	1.00											
Ca	-0.21	**0.70**	1.00										
Mg	-0.31	**0.63**	**0.86**	1.00									
Na	0.00	**0.77**	**0.73**	**0.70**	1.00								
K	0.10	**0.64**	**0.60**	0.46	**0.84**	1.00							
HCO_3	0.02	**0.45**	**0.49**	**0.48**	**0.52**	**0.56**	1.00						
SO_4	-0.20	**0.81**	**0.82**	**0.80**	**0.76**	**0.59**	**0.45**	1.00					
Cl	-0.07	**0.75**	**0.79**	**0.83**	**0.85**	**0.64**	**0.48**	**0.85**	1.00				
NO_3	-0.18	**0.48**	0.39	0.20	0.37	0.39	0.00	0.37	0.29	1.00			
NO_2	-0.21	**0.74**	**0.62**	**0.51**	**0.59**	0.48	0.09	**0.59**	**0.49**	**0.72**	1.00		
NH_4	-0.13	**0.71**	**0.51**	0.40	**0.62**	**0.50**	0.32	**0.52**	**0.50**	**0.70**	**0.75**	1.00	
PO_4	-0.17	**0.47**	0.37	0.23	0.35	0.31	0.13	0.41	0.28	**0.71**	**0.61**	**0.64**	1.00

Le coefficient de corrélation est couramment utilisé pour estimer la relation entre deux variables. C'est un outil statistique simple pour montrer le degré de liaison entre deux variables .L'examen de la matrice de corrélation, nous a permis d'établir quelques corrélations significatives entre les différents éléments (fig.77).

- Cond → Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{-2}, Cl^{-}, NO_3^{-}, NO_2^{-},NH_4^{+},PO_4^{---}.
- Ca^{2+} → Cond, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{-2},Cl^{-}, NO_2^{-},NH_4^{+}.
- Mg^{2+} → Cond , Ca^{2+},Na^{+}, K^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{-2} ,Cl^{-}, NO_2^{-} ,NH_4^{+}.
- Na^{+} → Cond , Ca^{2+}, Mg^{2+},K^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{-2} ,Cl^{-}, NO_2^{-},NH_4^{+}.
- K^{+} → Cond , Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^{-}, SO_4^{-2}, Cl^{-}, NO_2^{-} ,NH_4^{+}.
- Cl^{-} → Cond, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{-2}, NO_2^{-},NH_4^{+}.
- SO_4^{2-} → Cond, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, Cl^{-} ,NO_2^{-},NH_4^{+},PO_4^{---}..
- HCO_3^{-} → Cond, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, SO_4^{-2}, Cl^{-}.
- NO_3^{-} → Cond, NO_2^{-}, NH_4^{+}, PO_4^{---}.
- NO_2^{-} → Cond ,Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, SO_4^{-2}, Cl^{-}, NO_3^{-}, NO_2^{-},NH_4^{+},PO_4^{---}.
- NH_4^{+} → Cond ,Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, SO_4^{-2}, Cl^{-}, NO_3^{-} , NO_2^{-} ,NH_4^{+},PO_4^{---}.
- PO_4^{---} → Cond, SO_4^{2}, NO_3^{-} , NO_2^{-} , NH_4^{+}.

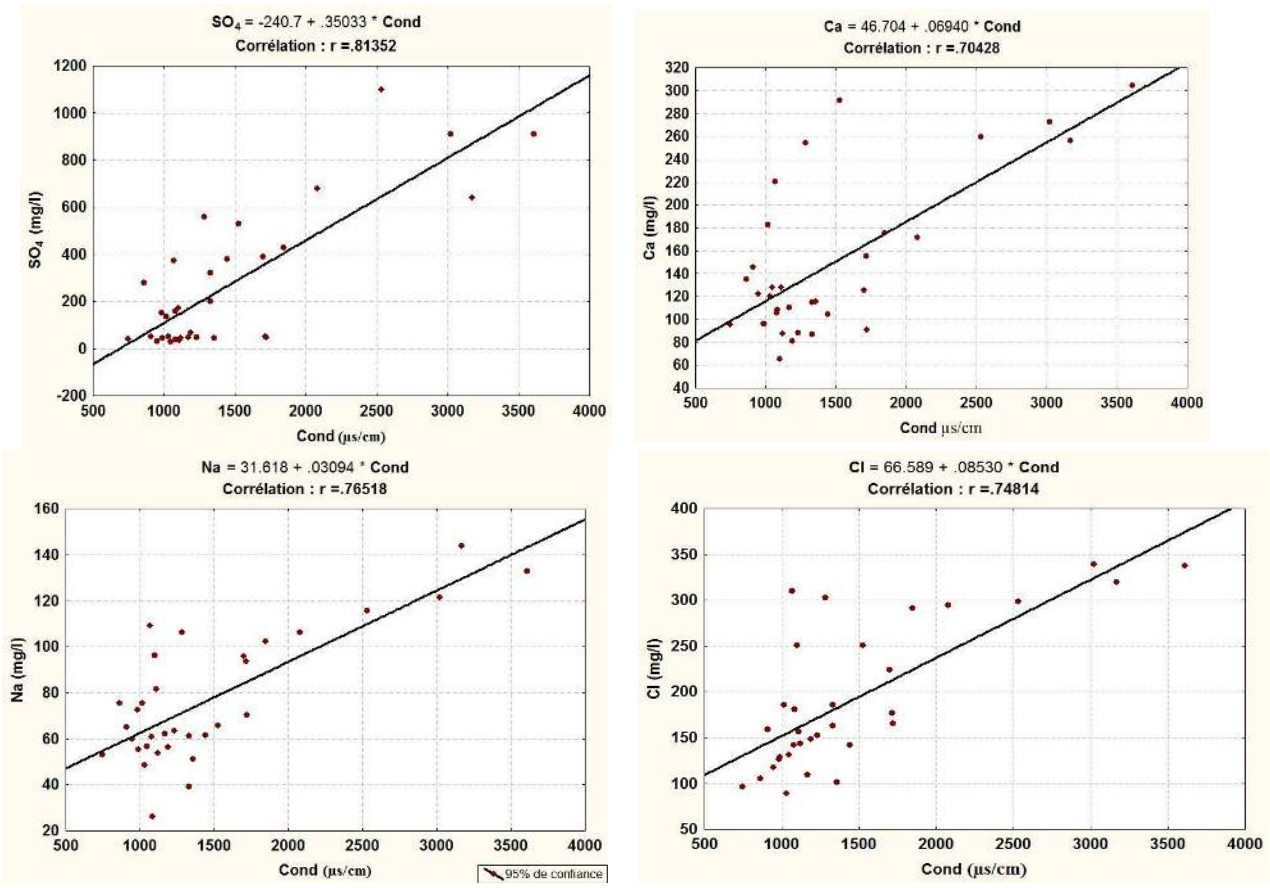


Figure.77.A. Corrélation entre la conductivité électrique et quelques éléments chimiques majeurs

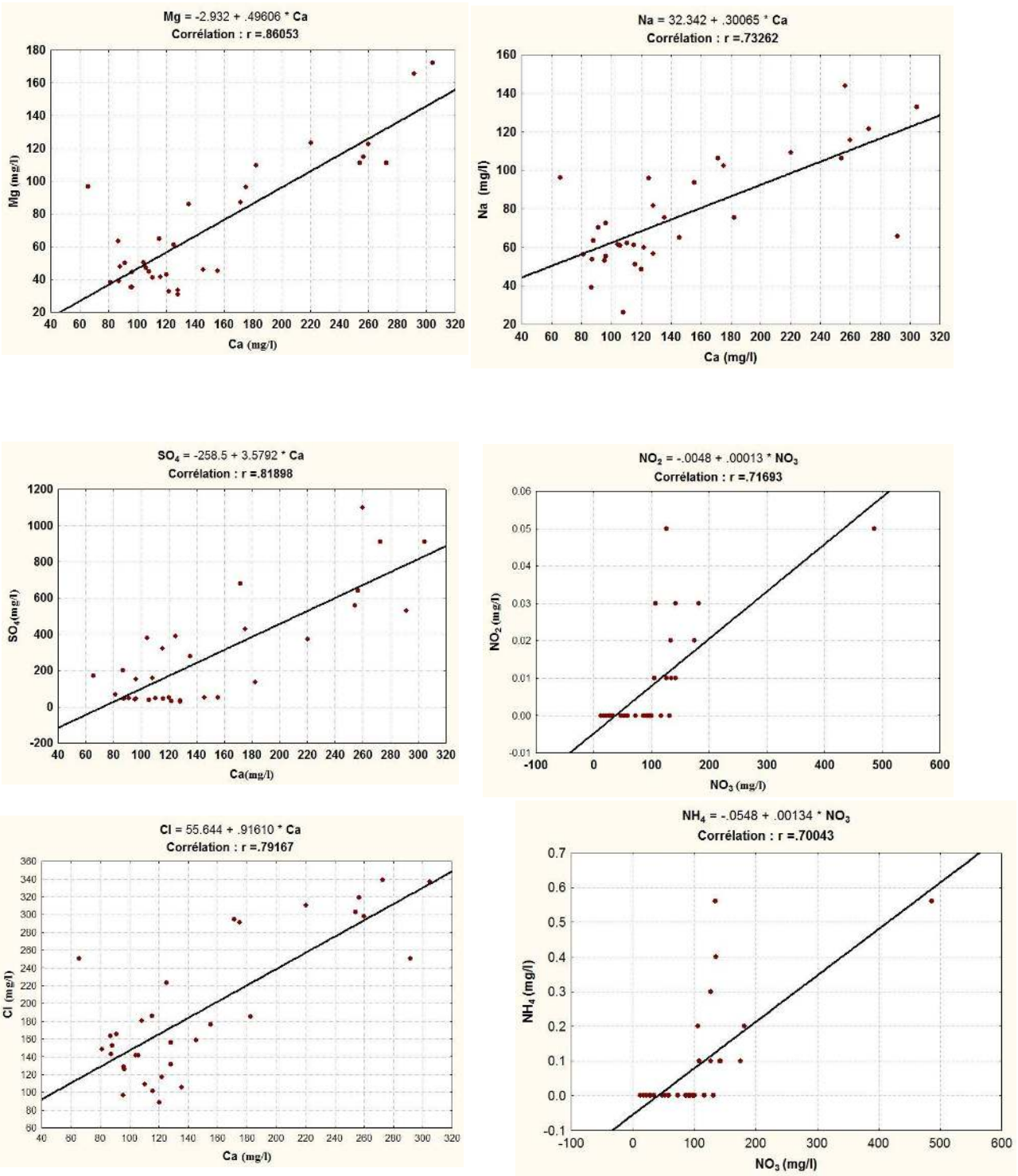


Figure.77. B. Corrélation significative entre quelque élément chimique

La conductivité électrique des différents échantillons, montre une bonne corrélation avec tous les éléments (R> 0.40). (fig. 77 .a). Ces fortes corrélations indiquent la contribution directe de ces éléments dans la salinité des eaux souterraines.

Les relations significatives entre Ca et HCO_3, Ca et Mg, Ca et Na, Ca et SO4, Ca et Cl (fig.77.b), témoignent de la diversité des faciès chimiques des eaux souterraines de la région.

5.2. Analyse en composantes principales

Le but de l'analyse statistique (ACP) 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. Il sera ainsi possible d'avoir une idée sur le comportement hydrochimique et les sites de pollution.

5.2.1. Choix de la méthode

La méthode regroupe le traitement de description et de comparaison simultanée des différentes variables et l'analyse des données multidimensionnelles (statistique descriptive).

Ce que nous cherchons à mettre en évidence, ce sont les liens éventuels qui pourraient regrouper deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution.

5.2.2 Résultats et interprétations

Le critère de Kaiser (Kaiser, 1960) a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère, seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données (tab.20). Trois composantes principales (CP) ont été retenues et les résultats montrent que trois CP représentent 70 % de la variance totale, ce qui est relativement bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie. (tab.21) A 2 % d'erreur le coefficient de corrélation critique de Pearson est de 0.4. Sur cette base, CP1 qui représente 55 % de la variance, est déterminé positivement par (Cond, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K+, HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-} , NH_4 et NO_2). C'est le facteur de la contamination par les éléments évaporitiques et carbonatés. Le CP2, qui représente 14 % de la variance totale est déterminé par une opposition entre HCO_3^{-} et les éléments NO_3^{-} et PO_4^{---}. Ce dernier facteur est donc celui de la pollution agricole. Tous les éléments sont corrélés négativement ave le pH. . La CP3 explique 9 % de la variance totale et il est déterminé par le reste des variables (pH). Donc CP1, CP2 et CP3 sont supposés 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. (fig.78 A).

La projection des individus nous a permis de révéler trois familles de qualité d'eau, la première et la deuxième correspondent aux zones de forte minéralisation qui sont localisées

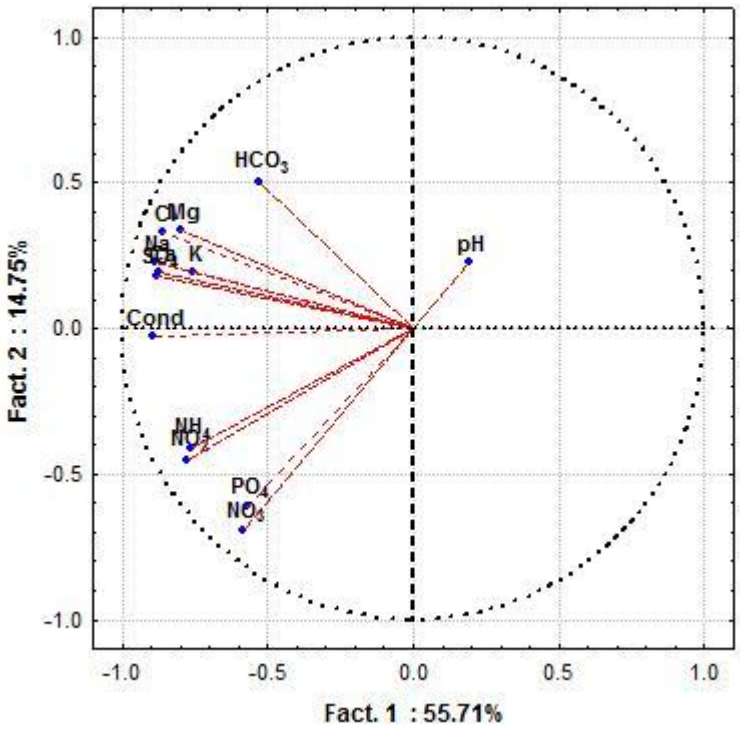
aux parties entre et l'est de la région d'étude. La troisième famille caractérise les zones où l'utilisation des produits de fertilisation des sols dans l'agriculture est intense (fig.78.B).

Tableau 20. Caractéristiques de l'ACP appliquée aux données physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale

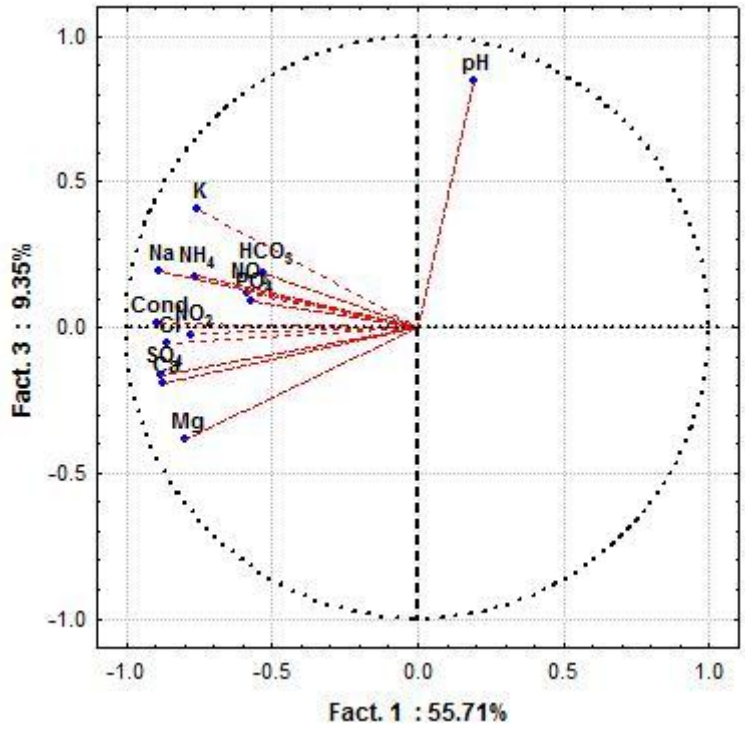
CP	Valeurs propres	% de la Variance du CP	Valeurs propres cumulée	Variance Cumulée
1	7.242182	55.70909	7.24218	55.7091
2	1.918036	14.75412	9.16022	70.4632
3	1.215513	9.35010	10.37573	79.8133

Tableau 21. Corrélations variables – facteurs

Variable	Fact .1	Fact .2	Fact .3	Fact .4
pH	0.190756	0.229883	0.844278	0.328593
Cond	-0.894274	-0.025058	0.015918	0.025968
Ca	-0.870201	0.190376	-0.191944	0.087844
Mg	-0.794997	0.336737	-0.381525	0.103359
Na	-0.887846	0.224295	0.191526	0.075405
K	-0.756924	0.195439	0.404575	-0.097153
HCO_3	-0.528547	0.504494	0.188524	-0.614313
SO_4	-0.883141	0.176514	-0.166224	0.127795
Cl	-0.857887	0.332886	-0.055952	0.195980
NO_3	-0.586088	-0.693896	0.119027	-0.012237
NO_2	-0.778730	-0.452654	-0.023592	0.207159
NH_4	-0.764060	-0.409135	0.175810	-0.136958
PO_4	-0.571502	-0.613317	0.088043	-0.207112

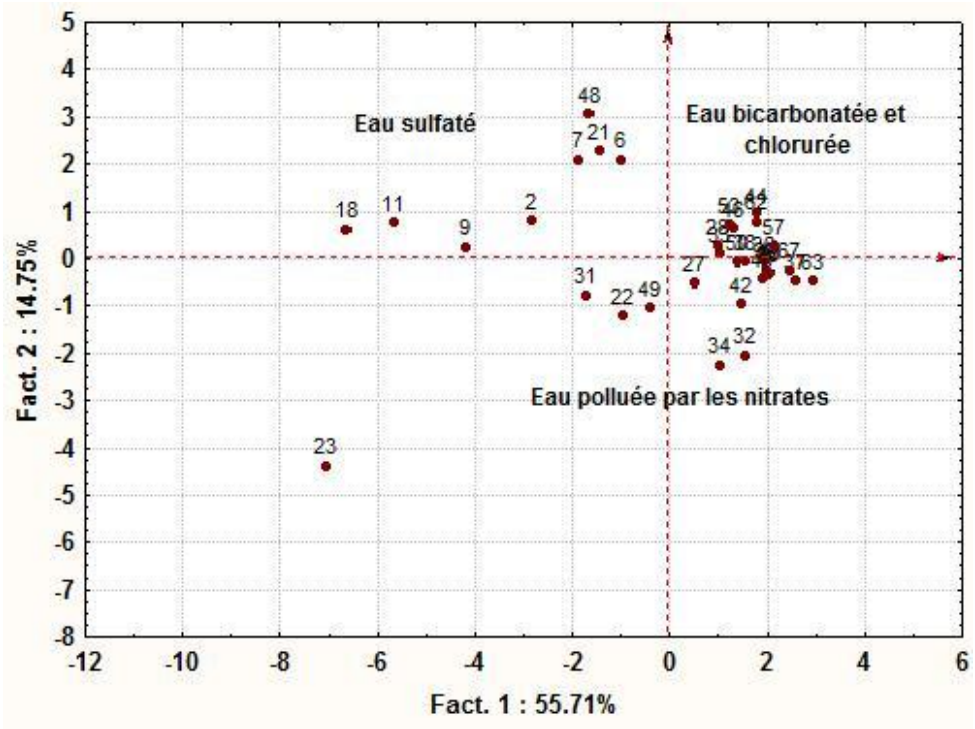


Plan factoriel (1×2)



Plan factoriel (1×3)

A* Projection des variables sur le plan factoriel



B* Projection des individus sur le plan factoriel (1×2)

Figure 78. Cercle de corrélation et répartition des variables

6. Equilibres chimiques et indices de saturation

6.1. Degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral

L'indices de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever, 1997).

Le degré de saturation peut être évalué à partir de l'équation suivante :

IS = log (KIAP/Ksp). Où :

KIAP = le produit d'activité ionique des ions.

Ksp = le produit de la solubilité du minéral.

IS = l'indice de saturation.

- Si le IS < 0. L'eau est sous-saturée en ce qui concerne un certain minéral, c'est-à-dire l'eau est encore capable de dissoudre ce minéral spécifique.

- Si le IS > 0. L'eau est sursaturée en ce qui concerne ce minéral. Et le minéral va précipiter

à l'intérieur de l'aquifère.

- Si le IS = 0. L'eau est en état d'équilibre.

L’objectif principal des indices de saturation est d’évaluer les activités ioniques sous les conditions de température et des forces ioniques prévues.

6.2. Etat des minéraux dissouts dans l'eau

Dans le but d’expliquer les mécanismes d’acquisition de la minéralisation, on a utilisé le programme PHREEQC-2 (version 2.10) pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques (la calcite, de l’aragonite, de la dolomite, du gypse, de l’anhydrite et l’halite).Tab.22.

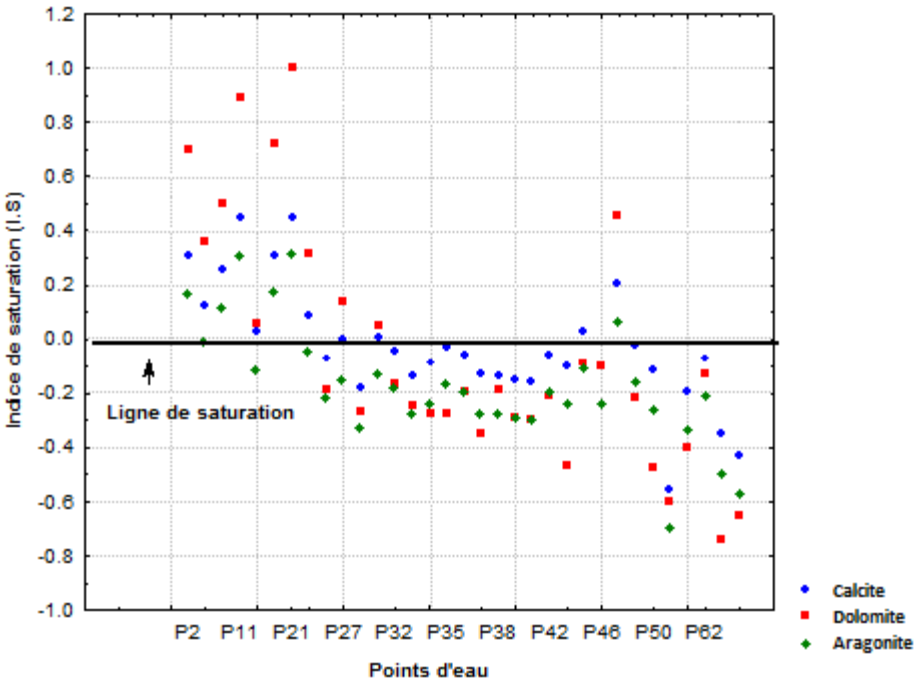
-les minéraux carbonatés présentent des degrés de saturation différents. En effet, celui de la calcite varie de -0.56 à 0.45, suivi par celui de la dolomite qui varie de -0.05 à 1 et enfin celui de l’aragonite qui varie de -0.70 à 0.31.

Si l’on admet que l’état d’équilibre se fait dans l’intervalle de - 0.5 à + 0.5, on peut dire que les trois minéraux sont légèrement sous-saturés et proche à état d’équilibre, (fig.79.a) dont les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de calcite et de la dolomite

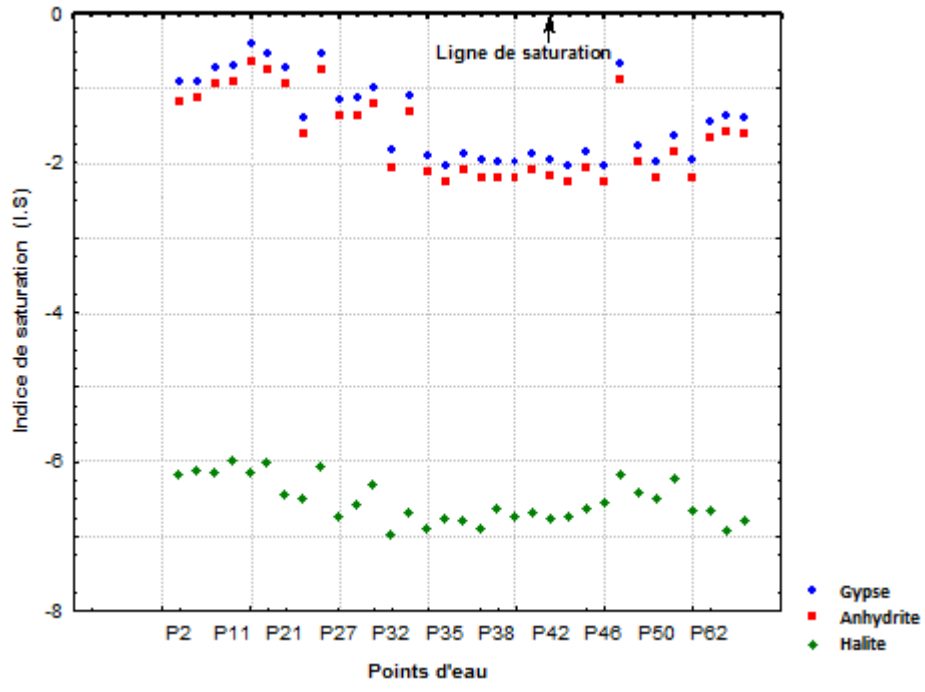
- Les minéraux évoporitiques montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés pour l’ensemble des échantillons analysés (sous-saturés) (fig.79.b). Le gypse enregistre des indices qui varient de -2.02 à -0.41, suivi de l’anhydrite dont l’indice varie de -2.24 jusqu’à -0.63 (83% des puits sont sous-saturés) et enfin l’halite dont les indices varient de -6.98 à -6.00 (donc très sous saturés) , ce qui permet aux ces éléments de se présenter dans l’eau à des concentrations élevées. Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de l’halite dans le chimisme.

Tableau. 22 Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans l'eau

Minéral / Pts d'eau	Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitiques		
	Calcite	**Dolomite**	**Aragonite**	**Gypse**	**Anhydrite**	**Halite**
	$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$	$CaCO_3$	$CaSO_42H_2O$	$CaSO_4$	NaCl
2	0.31	0.70	0.16	-0.92	-1.17	-6.18
6	0.13	0.36	-0.01	-0.91	-1.13	-6.12
7	0.26	0.50	0.11	-0.71	-0.93	-6.15
9	0.03	0.06	-0.12	-0.41	-0.63	-6.14
11	0.45	0.89	0.30	-0.69	-0.91	-6.00
18	0.31	0.72	0.17	-0.52	-0.74	-6.02
21	0.45	1.00	0.31	-0.72	-0.94	-6.45
22	0.09	0.32	-0.05	-1.39	-1.60	-6.50
23	-0.07	-0.19	-0.22	-0.52	-0.74	-6.07
27	-0.00	0.14	-0.15	-1.16	-1.37	-6.73
28	-0.18	-0.27	-0.33	-1.13	-1.35	-6.57
31	0.01	0.05	-0.13	-0.98	-1.20	-6.31
32	-0.04	-0.17	-0.18	-1.83	-2.05	-6.98
33	-0.14	-0.25	-0.28	-1.09	-1.31	-6.69
34	-0.09	-0.28	-0.24	-1.90	-2.12	-6.90
35	-0.03	-0.28	-0.17	-2.02	-2.24	-6.77
36	-0.06	-0.20	-0.20	-1.87	-2.09	-6.78
37	-0.13	-0.35	-0.28	-1.96	-2.18	-6.90
38	-0.14	-0.19	-0.28	-1.97	-2.19	-6.63
39	-0.15	-0.29	-0.29	-1.97	-2.19	-6.73
40	-0.16	-0.30	-0.30	-1.86	-2.08	-6.69
42	-0.06	-0.21	-0.20	-1.95	-2.17	-6.76
43	-0.10	-0.47	-0.24	-2.02	-2.24	-6.74
44	0.03	-0.09	-0.11	-1.84	-2.06	-6.63
46	-0.10	-0.10	-0.24	-2.02	-2.24	-6.56
48	0.21	0.46	0.06	-0.66	-0.88	-6.17
49	-0.02	-0.22	-0.16	-1.76	-1.98	-6.41
50	-0.12	-0.48	-0.26	-1.97	-2.19	-6.51
53	-0.56	-0.60	-0.70	-1.62	-1.84	-6.24
57	-0.20	-0.40	-0.34	-1.96	-2.18	-6.67
62	-0.07	-0.13	-0.21	-1.44	-1.66	-6.65
63	-0.35	-0.74	-0.50	-1.36	-1.58	-6.93
67	-0.43	-0.65	-0.57	-1.38	-1.60	-6.80
Moyenne	-0.02788	-0.05030	-0.17121	-1.40939	-1.62970	-6.52667
Min	-0.56000	-0.74000	-0.70000	-2.02000	-2.24000	-6.98000
Max	0.45000	1.00000	0.31000	-0.41000	-0.63000	-6.00000
Ecar type	0.221511	0.441415	0.220507	0.550284	0.549633	0.292486



a. Minéraux carbonatés



b. Minéraux évaporitiques

Figure 79. Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques dans les eaux souterraines de la nappe alluviale

7. Aptitude des eaux à l'irrigation

7.1. Introduction

L'irrigation avec des eaux riches en sels peut entraîner la fixation de sodium par le complexe adsorbant du sol. L'intensité du processus de salinisation dépend des caractéristiques du sol, de la qualité des eaux utilisées, des conditions de leur emploi et en particulier de l'efficacité du système de drainage. La sécheresse de la dernière décennie a engendré un déficit agricole (démontré par les calculs du bilan hydrique) suite à une forte évapotranspiration, influençant le taux de salinité des eaux. Afin d'étudier l'aptitude des eaux souterraine de la nappe alluviale à l'irrigation, nous avons procédé à utiliser les méthodes de classification de Richards et Wilcox, les plus fréquemment utilisées.

7.2. Risque de sodicité et de salinité (**Méthode de Richard**)

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium des sels de chlorures de sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. De part cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (Todd, 1980).

Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment Ca^{++} dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cet effet. 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 défini par la relation suivante :

$$S.A.R = Na^{++} / \sqrt{(Ca^{++} + Mg^{++})}$$

Où Na, Ca et Mg sont exprimés en méq/l.

Ces éléments chimiques sont utilisés en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau.

Le report des valeurs du SAR en fonction de la conductivité électrique sur le diagramme de Richard (fig.80) nous a parmi de dire que les eaux souterraines de la région, appartiennent à deux classes. Il s'agit de C3-S1 de qualité admissible et C4-S1 de qualité médiocre.

Donc on peut dire que les eaux souterraines de la région d'étude peuvent être utilisées sans risque pour le sol avec un risque de salinisation élevé dans la partie Est, et un risque de sodicité faible. L'eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés .

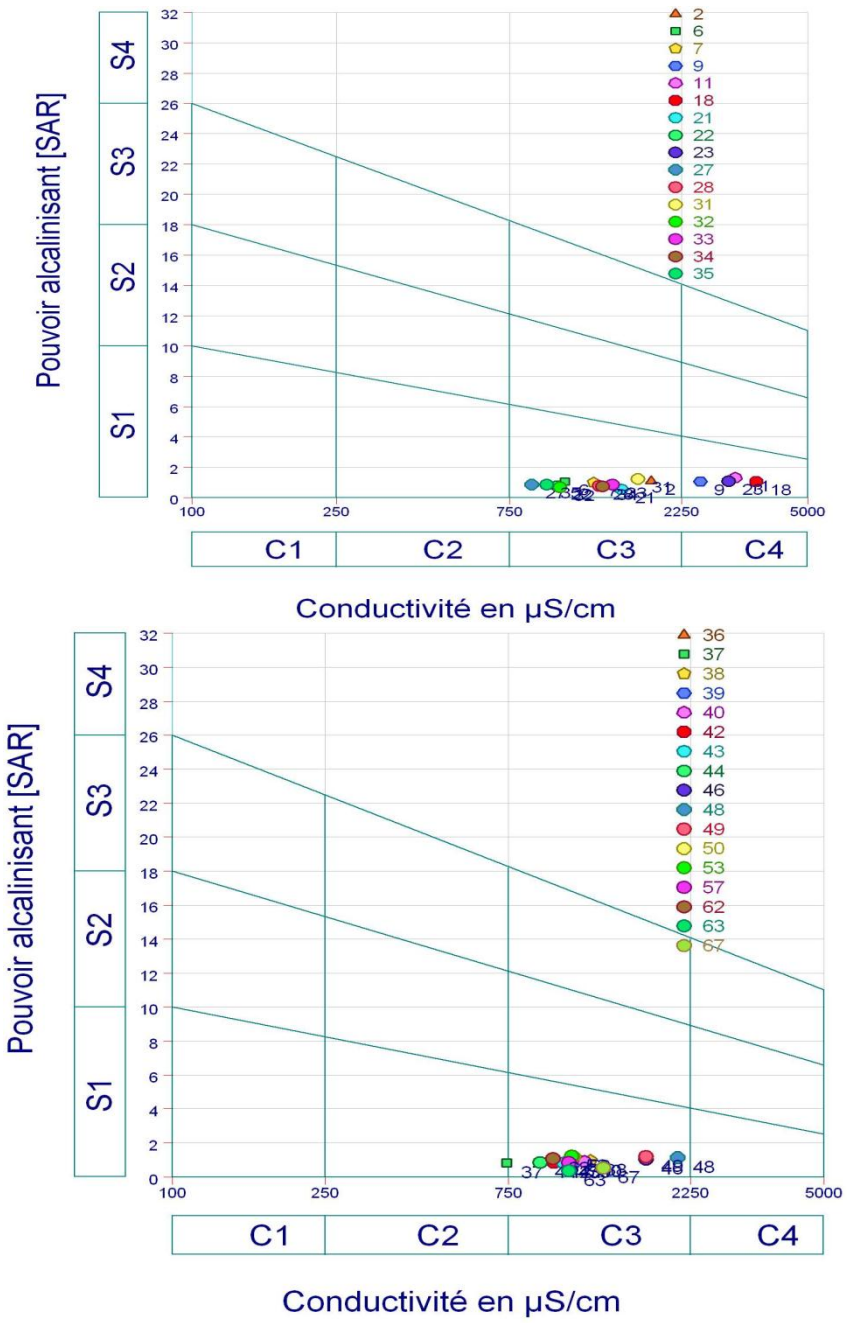


Figure 80. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR

Les eaux de qualité admissible occupent la presque totalité du terrain alors que les eaux de qualité médiocre se localisent au centre du terrain et aux alentours de Chelghoum Laid et au nord de Tadjenanet (Feidh Nafaa). Fig. 81.

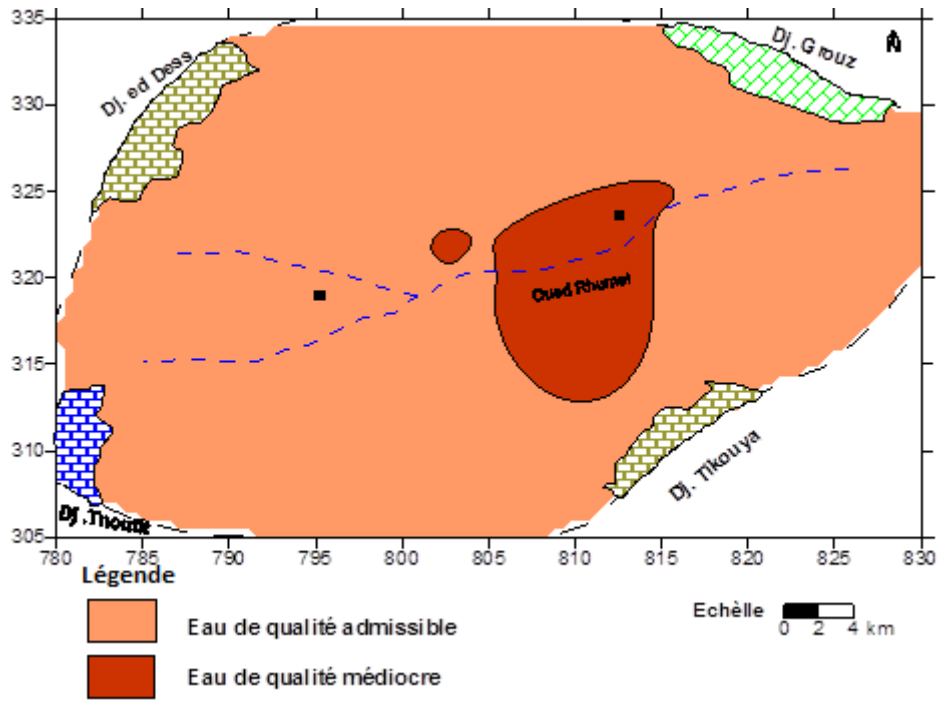


Figure 81. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la méthode de Richard. Mai 2007

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

Généralement il est connu que le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturés en sodium. En effet, dans un sol salé imprégné de NaCl, la perméabilité reste bonne tant que la solution saline percolante présente une charge élevée en électrolyte, charge qui maintient les argiles floculées (Servant 1975).

Si l'eau d'irrigation est chargée en sodium, le nombre d'ions Na combiné avec le sol, augmente, cependant une quantité équivalente en cations et essentiellement en Ca sera déplacée. On assiste alors à une dégradation de la structure, avec un gonflement des argiles ce qui entraine une imperméabilisation du milieu. Le processus de dessalement et de drainage risque alors d'être complètement stoppé. Dans le cas où le calcium est le cation dominant, l'échange se fait dans le sens inverse, créant ainsi un sol plus floculé et plus perméable. L'apport de $CaSO_4$ au sol peut par l'échange de base, améliorer la texture du sol ainsi que son drainage.

La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau, généralement connue en pourcentage du sodium, est définie par la relation :

Na%= Na/(Ca+Mg+Na+K))*100 Où tous les éléments sont exprimés en méq/l.

Cette classification définit cinq classes d'eau : Excellente, bonne, admissible, médiocre, et mauvaise.

La représentation du pourcentage de sodium en fonction de la conductivité sur le diagramme de Wilcox (fig.82), permet de constater que 84.84% des points d'eau ont une qualité bonne à excellente pour l'irrigation, 6% ont une qualité médiocre et 9% ont une qualité mauvaise. On remarque qu'on a une dégradation progressive de la qualité des eaux en se déplaçant de l'Ouest vers l'Est. Fig. 83.

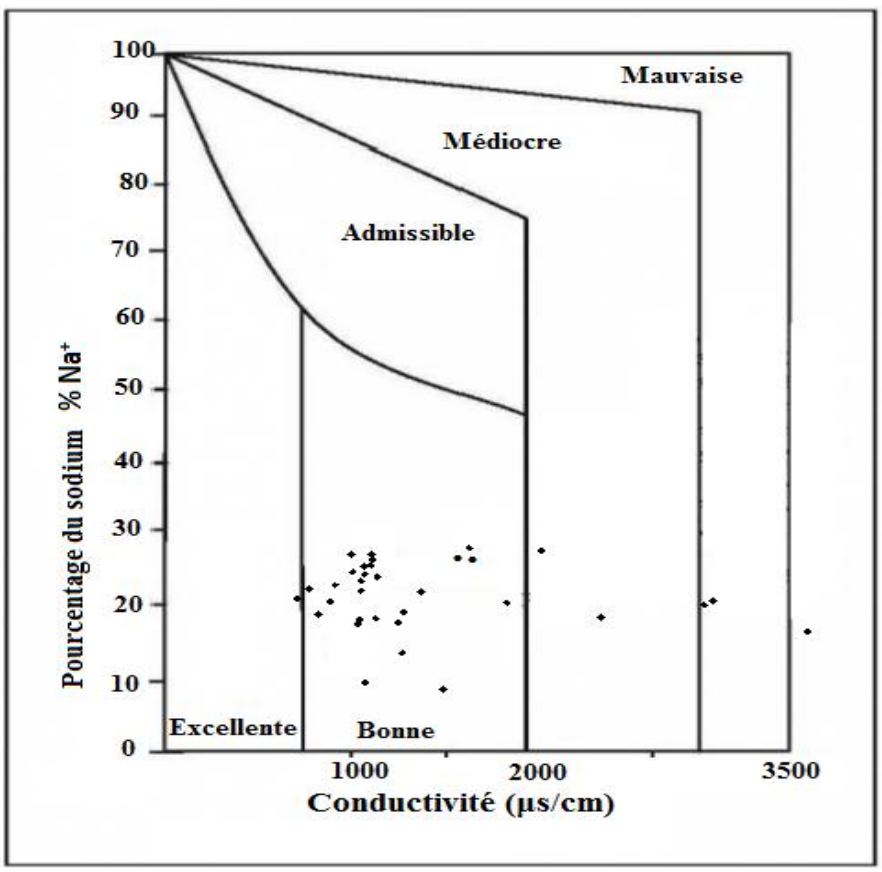


Figure 82. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox

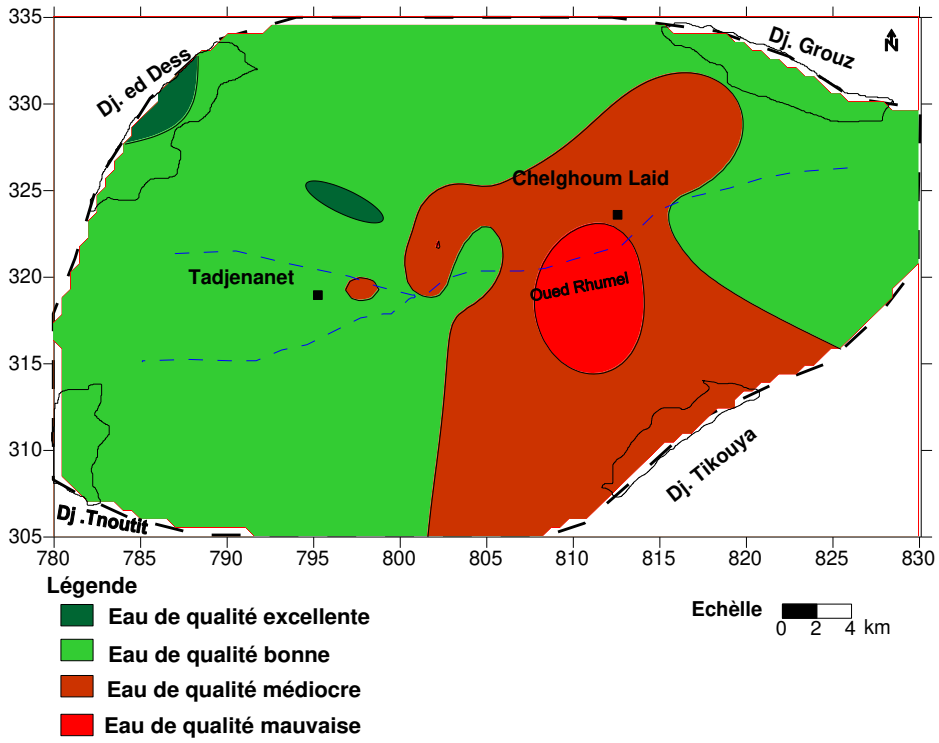


Figure 83. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la méthode de Wilcox. Mai 2007

8. Etude de la potabilité des eaux

8.1. Introduction

Le but de l'étude de la potabilité est de définir les critères auxquels doit répondre une eau destinée à l'alimentation humaine. En ce qui concerne l'eau de boisson, cette aptitude est déterminée à partir des concentrations des anions et des cations majeurs.

8.2. La salinité

Traditionnellement les eaux souterraines ont été souvent classées sur la base des valeurs de TDS (Davis et De Wiest, 1966).

La classification la plus souvent appliquée pour les eaux souterraines non fraîches est présentée dans le tableau 23.

Tableau 23. Classification des eaux souterraines de la région de Tadjenanet-Chelghoum Laid selon les valeurs de TDS (Davis et De Wiest, 1967)

Qualité de l'eau	TDS (mg/l)	% Echantillons	Nombre d'échantillons
Douce	0-1000	84.84	28
Saumâtre	1000-10000	15.15	5
Salée	10000-100000		
Saumure	> 100000		

D'après cette classification on remarque que les eaux souterraines de la région sont en général des eaux douces (0-1000 mg/l) avec 84.84% des cas tandis que les eaux saumâtres représentent 15.15%.

8.3. La dureté totale

La dureté totale est exprimée en degrés hydrotimétriques (°TH) ou degrés français (°F). Un degré français est la dureté d'une solution contenant 10 mg/l de $CaCO_3$. En toute rigueur la dureté totale ou titre hydrotimétrique d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. L'usage a limité cette notion à la dureté due aux ions calcium (dureté calcique) et aux ions magnésium (dureté magnésienne) et ne prend pas en compte les ions fer, aluminium, manganèse et strontium dont certains sont plutôt considérés comme interférents de l'analyse. La dureté totale ainsi définie peut être calculée par :

TH (°f) = Ca (mg/l) / 4,008 + Mg(mg/l) / 2,431 Où :

TH : Dureté totale en °F
Ca et Mg : concentrations de calcium et du magnésium en meq/L.

Les classes suivantes sont généralement adoptées pour caractériser la dureté de l'eau. (tab.24).

Tableau 24. Classification de l'eau selon la dureté totale

Dureté totale (°F)	**Qualité de l'eau**
TH< 8F°	Eau très douce
8≤ TH< 15	Eau douce
15≤ TH< 30	Eau moyennement dure
TH≥ 30	Eau très dure

Selon Rodier (1996), les eaux de qualité acceptable peuvent avoir une dureté jusqu'à 50 °F. A partir des données des eaux analysées, nous constatons 54.54% des points d'eau analysés représentent une qualité acceptable (dureté inferieur à 50f°), caractérisent la partie centrale et ouest du terrain.

8.4. Potabilité des eaux

Le report des résultats d'analyses physio chimique sur le diagramme de potabilité proposé par Boudoukha et al., (1999) pour les zones arides et semi arides (fig.84) nous a permis de constater que la plupart des eaux issues de la nappe alluviale du Mio-Plio-Quaternaire offrent une eau potable d'une qualité admissible dans la partie ouest du terrain, et médiocre dans la partie centrale et Est

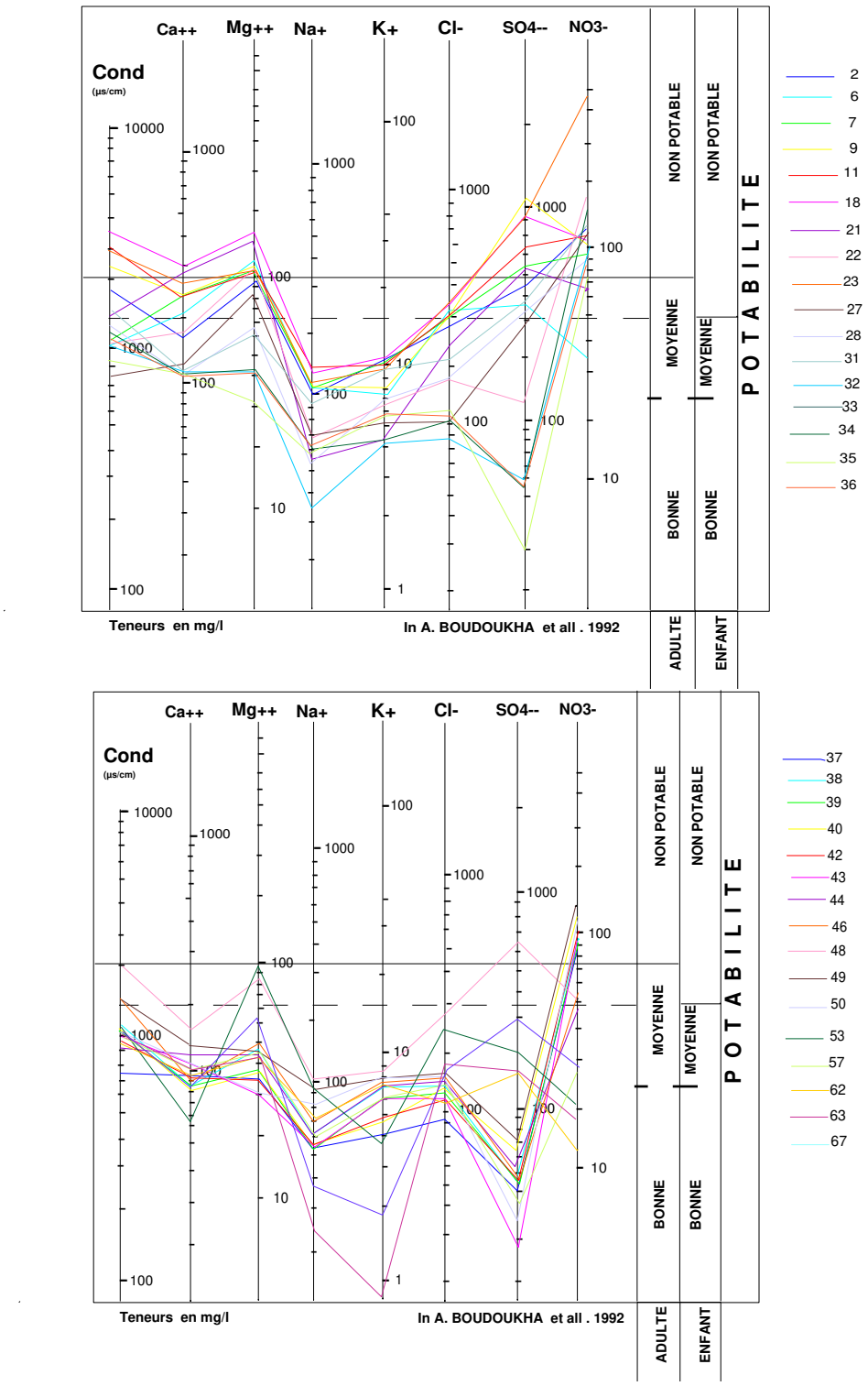


Figure 84. Diagramme de potabilité des eaux de la nappe alluviale Tadjenanet-Chelghoum Laid –Normes Algérienne selon Boudoukha et al. 1999

9. CONCLUSION

L'étude du chimisme de la nappe alluviale de Tadjenanet -Chelghoum Laid nous a permis de conclure que le comportement hydro chimique est caractérisé par une grande variabilité dans l'espace. La minéralisation augmente progressivement de l'Ouest vers Est coïncidant avec le sens d'écoulement principal des eaux souterraines. Les eaux sont caractérisées par une salinité faible à l'ouest près des monts de Djebel ed Dess et Djebel Tnoutitt, alors qu'elles présentent au centre et à l'Est, une minéralisation assez élevée près de la ville de Chelghoum Laid sur le long du oued Rhumel.

La conductivité électrique présente des variations importantes d'une zone à l'autre et oscille entre 745 µ.S/cm et 3600 µ.S/cm avec une moyenne de 1465 µ.S/cm.

La répartition spatiale des concentrations en éléments chimique a permis de sortir trois principaux types de faciès chimique, le faciès sulfatée calcique, chloruré calcique et bicarbonaté calcique avec un degré faible le faciès chloruré magnésien et sulfaté magnésien, dont le faciès chloruré calcique et bicarbonaté calcique appariaient à l'ouest et le faciès sulfaté calcique au niveau du centre du terrain d'étude où les eaux possèdent des grandeurs très élevés de la conductivité électrique , ce qui est expliqué par l'accélération du phénomène de dissolution des roches évaporitiques et l'effet d'échange de base entre les alcalins et alcalino terreux. Leurs répartition de la nature lithologique et les conditions d'alimentation de l'aquifère.

Analyse statistique des données physico- chimiques de l'ensemble des points d'eau a permis de montrer l'existence deux origine de polluants chimiques de nature diverse au niveau des eaux de la nappe alluviale avec des concentrations élevées d'éléments chimiques , l'un est dû à l'effets d'une pollution naturelle par l'effet de la salinité d'où la forte concentration des eaux en éléments chimiques de Ca^{++},Mg^{++} ,HCO_3^-,Cl^-, $SO4^{--}$.

Le deuxième type de polluants est d'origine anthropiques marquée par la forte concentration en $NO3^-$ dû essentiellement à l'utilisation intensive des engrais chimique dans l'agriculture. Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques a montré que les premiers ont tendance précipiter avant les seconds, ceci a permis aux éléments chimiques provenant de la dissolution des gypses d'acquérir des teneurs importantes. Concernant l'aptitude de ces eaux à l'irrigation, nous constatons que les eaux de la zone Ouest de la région d'étude peuvent être utilisées sans risque sur le sol, avec un risque de salinisation aux parties centre et Est du terrain d'étude dont l'eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés.

CHAPITRE VI

VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA NAPPE ALLUVIALE

VULNERABILITE A LA POLLUTION DE LA NAPPE ALLUVIALE

1. Introduction

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, non mesurable et sans dimension. La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la qualité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins importants relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dite.

Les cartes de vulnérabilité montrent quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface et les réservoirs contenant la première nappe d'eau souterraine, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains. La vulnérabilité à la pollution doit être considérée sous trois aspects :

- L'introduction de polluants dans les nappes, c'est-à-dire le transit, selon un trajet surtout vertical, de corps polluants, entraînés par les eaux d'infiltration ou des fluides polluants depuis la surface du sol jusqu'à une nappe souterraine, à travers le sol et des roches non saturées d'eau ;
- La propagation de la pollution : l'écoulement de l'eau ainsi polluée, entraînée par le mouvement naturel de la nappe atteinte, plus ou moins rapidement, selon les caractéristiques de l'aquifère et la pente ;
- La persistance plus ou moins prolongée : après la suppression du foyer de pollution, la durée de séjour est fonction du renouvellement naturel de l'eau dans l'aquifère et également de la nature du polluant.

L'élaboration de la carte de vulnérabilité est basée sur la superposition de plusieurs cartes. La carte finale permet de visualiser une zonation selon le degré de vulnérabilité (fort, moyen et faible).

2. Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses. La multiplicité des Méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés (la réglementation, les activités Humaines, les polluants), que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode pour une utilisation spécifique à leur pays. Il est difficile de sélectionner une méthode d'évaluation de la vulnérabilité. Diverses Raisons peuvent motiver le choix d'une méthode par rapport à une autre. Dans la présente

étude, deux méthodes ont été appliquées : la méthode DRASTIC et la méthode des indices de contaminations (Kherici 1993). (Tab.25).

Tableau 25. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité choisies

Méthodes / Paramètres	DRASTIC	Indice de contamination
Topographie	X	
Epaisseur / Texture du sol	X	X
Caractéristiques de la zone non saturée	X	
Profondeur à la nappe	X	X
Caractéristiques hydrogéologiques	X	X
Perméabilité	X	X
Concentration des éléments chimiques		X

3. Vulnérabilité de la nappe alluviale par la méthode DRASTIC

3.1. Présentation de la méthode DRASTIC

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

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

[**R**] : Recharge de l'aquifère

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

[**S**] : Soil media (nature du sol)

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

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

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

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

Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (Id) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur

donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (Id) calculé est élevé. Cet indice est défini de la manière suivante:

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

où

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

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

n : notation accordée à chaque paramètre

Le tableau ci-après contient les poids attribués à chacun des paramètres ci-dessus. Les poids les plus élevés (5) sont attribués à la nature lithologique et à l'épaisseur de la zone non saturée. Les poids les plus faibles (1 et 2) sont attribués respectivement à la pente et à la nature lithologique du sol. (Tab.26).

Tableau 26. Poids attribués aux paramètres DRASTIC (Aller et al, 1987)

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

-Le système de notation appliqué :

Pour chacun des paramètres DRASTIC, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa (tab. 27).

Tableau 27. Classes et notes des sept paramètres (Lallemand- Barèes 1994)

D : Profondeur de la nappe (m)		**R : Recharge (mm)**	
Valeurs (m)	Notation	Valeurs (mm)	Notation
0 – 1.5	10	25.5	9
1.5 – 4.5	9	17.5 – 25.5	8
4.5 – 9	7	10 – 17.5	6
9 - 15	5	5 - 10	3
15 - 22	3	0 - 5	1
22.5- 30	2		
>30	1		

A : Nature de la zone saturée		**S : Nature du sol**	
Description	Notation	Description	Notation
Calcaire karstique	10	Mince ou absent	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Grès massif	6	Limons sableux	6
Métamorphique altéré	4	Terre grasse	5
Métamorphique	3	Limons silteux	3
Massive shale	2	Argiles	1

T : Topographie (pente)		**I : lithologie de la couche vadose**	
Valeurs (%)	Notation	Description	Notation
0 à 2	10	Calcaire Karstique	10
2 à 6	9	Sable et gravier	9
6 à 12	5	Sable et gravier avec silt et argile	8
12 à 18	3	Grès	6
> 18	1	Calcaire	6
		Silt et argile	1

C : Conductivité hydraulique	
Valeurs (m/s)	Notation
$> 9{,}4.10^{-4}$	10
$4{,}7.10^{-4}$ - $9{,}4.10^{-4}$	8
$32{,}9.10^{-5}$ - $4{,}7.10^{-5}$	6
$14{,}7.10^{-5}$ - $32{,}9.10^{-5}$	4
$4{,}7.10^{-5}$ - $14{,}7.10^{-5}$	2
$4{,}7.10^{-7}$ - $4{,}7.10^{-5}$	1

3.2. Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques

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

3.2 .1. Profondeur de la nappe (D)

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur Déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met du temps à atteindre la surface piézométrique. Pour la nappe alluviale de Tadjenanet –Chelghoum Laid, ce paramètre a été déterminé pendant les relevés Piézométriques du mois de Mai 2007. Le calcul des indices pour ce paramètre a été fait selon le tableau 28.

Tableau 28. Notation et pondération selon la profondeur

Intervalle (m)	Dn	Dp	Dn.Dp
1.5 – 4.5	**9**	**5**	**45**
4.5 – 9	**7**	**5**	**35**
9 - 15	**5**	**5**	**25**
15 - 23	**3**	**5**	**15**
23 - 31	**2**	**5**	**10**

Ces indices ont permis d'établir la carte thématique du paramètre profondeur (fig.85). L'observation de la dite carte montre que les plus faibles indices sont répartis dans la partie sud-ouest prés de Djebel Tnoutit. Leurs valeurs ne dépassent pas 15, alors que les plus importants indices se situent dans la zones centrale et Est du terrain d'étude, le long du oued Rhumel, avec des valeurs de 35 à 45.

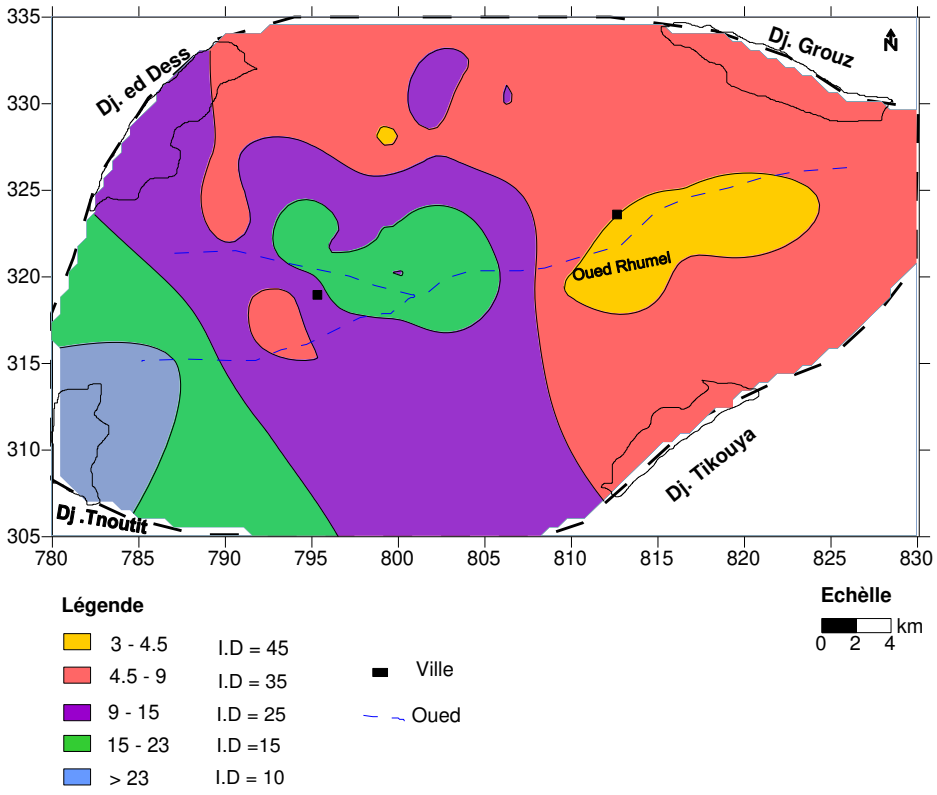


Figure 85. Carte indicielle : profondeur de l'eau .Mai 2007

3.2 .2. La recharge efficace (R)

La recharge efficace joue un rôle déterminant dans le transfert de la lame d'eau depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère sous-jacent. Elle concerne la quantité d'eau qui franchit la surface du sol pour renouveler les réserves d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans l'aquifère. Les résultats du bilan hydrologique montrent que la valeur de ce paramètre est estimée à 7 mm sur l'ensemble de la région d'étude. (Tab.29)

Tableau 29. Notation et pondération du paramètre de la recharge.

Intervalle (cm)	Rn	Rp	Rn.Rp
00 - 05	1	4	4

L'indice DRASTIC est de l'ordre de 4 répartie sur la totalité de la plaine (fig.81).

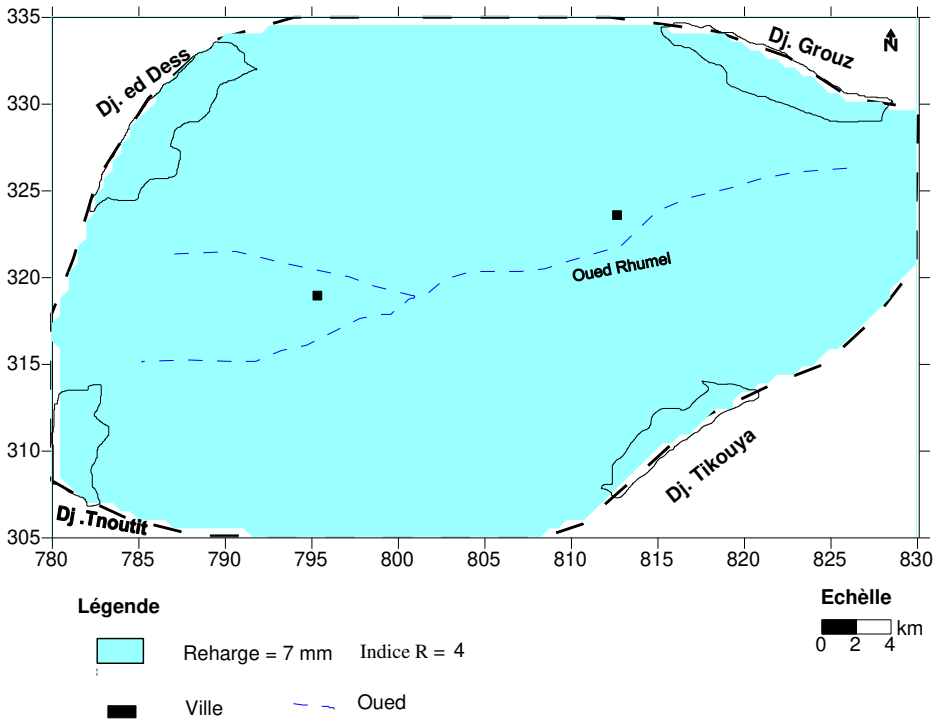


Figure 86. Carte indicielle : Recharge efficace

3.2.3. Nature de la zone saturée (A)

Ce paramètre désigne la lithologie de l'aquifère. Son identification a été basée sur les logs des forages et des puits creusés pour le captage de la nappe. Les rapports de prospections géophysiques (CGG 1973, ALGEO 1978) et les coupes géo-électriques interprétatives ont été également exploités Ces documents ont montré que la nature lithologique de notre aquifère d'étude est constitué essentiellement des alluvions, graviers, sables, argiles sableuses, limons et calcaire lacustre.

Les indices correspondant à ce paramètre ont été estimés selon la notation illustrée dans le tableau N° 30.

Tableau 30. Notation et pondération du matériau aquifère

Nature du milieu aquifère	An	Ap	An.Ap
Alluvions et gravier	8	3	24
Sable argileux	4	3	12
Calcaire lacustre	6	3	18

L'examen de la carte des matériaux de la zone saturée montre que les indices les plus importants se situent à la périphérie de oued Rhumel et les plus faibles au centre et l'Est du terrain d'étude (fig.87).

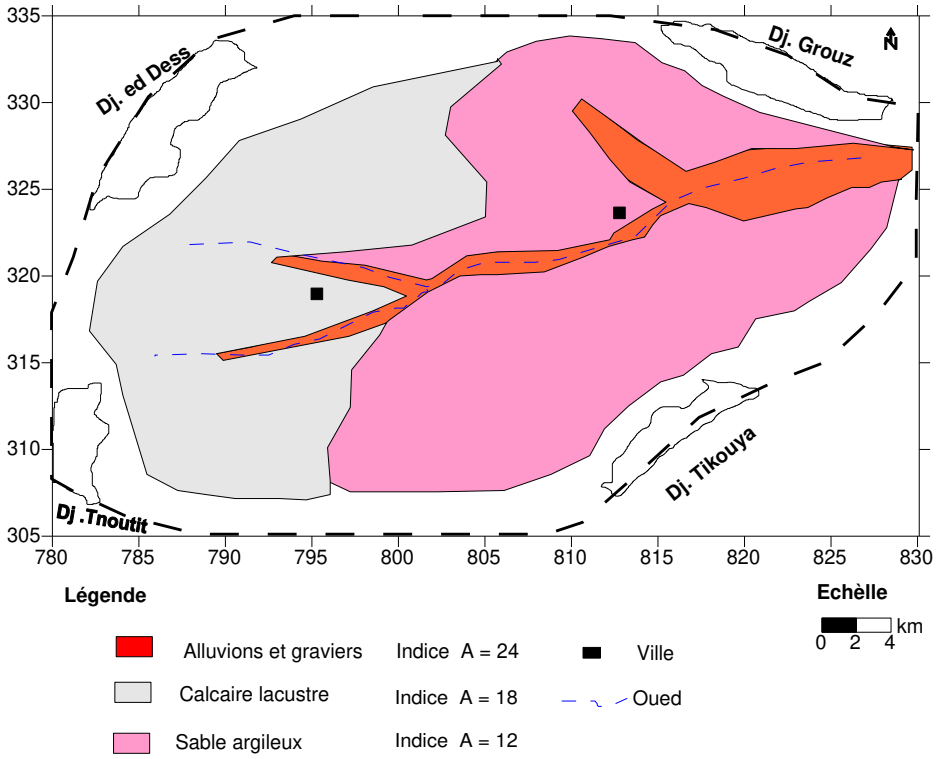


Figure 87. Carte indicielle : Matériau aquifère

3.2 .4. La nature du sol (S)

La nature de la surface du sol influe sur la pénétration des polluants vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande. Ce paramètre joue un rôle important dans la détermination des zones polluées.

Les informations recueillies à partir des rapports et des cartes pédologiques établis sur les hautes plaines sétifiennes (A.N.R.H de Constantine),ainsi que la consultation des études agro-pédologiques ont permis de constater que la nature du sol de la région d'étude est de type calcimagnésique, occupe la totalité de la plaine, avec texture fine et parfois grossière (terre grasse) . À proximité des bordures, près des massifs carbonatés et au centre du terrain,

le sol est de type peu évolué d'apport colluvial, caractérisé par une épaisseur très mince. Les valeurs indiciaires ont été déterminées selon les différentes natures de sol (tab.31).

Tableau 31. Notation et pondération de la nature du sol

Nature du sol	Sn	Sp	Sn.Sp
Terre grasse sableuse	6	2	12
Terre grasse argileuse	3	2	6
Sol mince	10	2	20

L'examen de la carte des indices relatifs à la nature du sol (fig.88) montre que le sol est de type calcimagnésique ave une texture grossière caractérisé par une dominance sableuse repartie sur le long de oued Rhumel, représente un risque de vulnérabilité moyen .Le sol de type peu évolué d'apport colluvial se répartit au abord des massif carbonatés entourés la région d'étude représente un risque élevé de vulnérabilité. Le reste du terrain est caractérisé par un sol plus au moins argileux de texture fine.

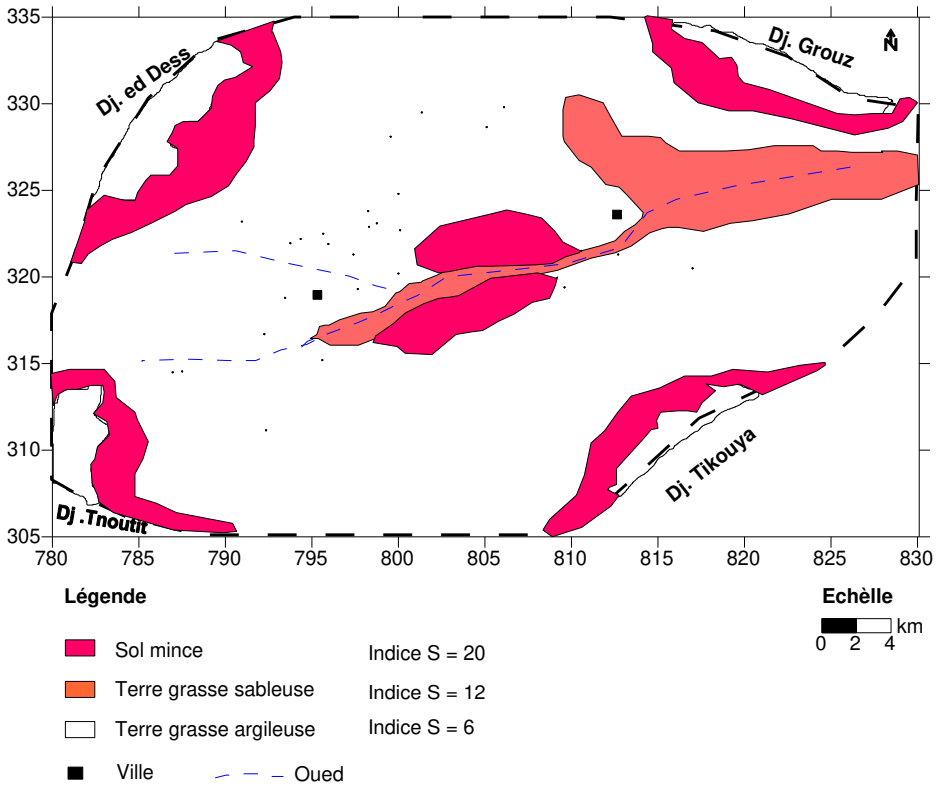


Figure 88. Carte indicielle : Type du sol

3.2 .5. La topographie (T)

Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. Les valeurs de pentes ont été estimées en se référant aux cartes topographiques au 1/50000 de Tadjenanet et Chelghoum Laid, et elles sont présentés dans le tableau N ° 32.

Tableau 32. Notation et pondération du facteur de la pente.

Intervalle (%)	Tn	Tp	Tn.Tp
0 – 2	10	3	30
2 – 6	9	3	27

L'examen de la carte indicielle montre deux plages de pente. La première varie de 0 à 2 % qui occupe la majorité de la plaine, tandis que la seconde varie de 2 à 6 %, caractérise les zone de la limite topographique du terrain d'étude (fig.89).

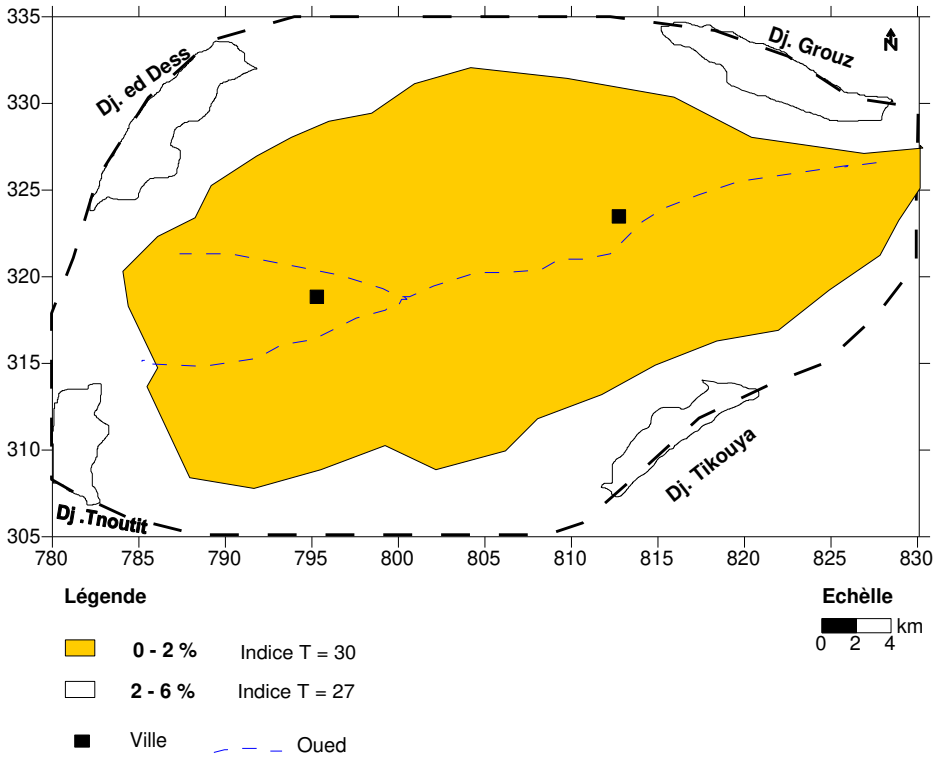


Figure 89. Carte indicielle : Pente du terrain

3.2 .6. Nature de la zone non saturée (I)

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

La consultation des différents documents géologiques et géophysique (cartes et coupes), nous a permis de dire que le milieu non saturé est constitué par un matériau détritique de granulométrie très hétérogène, repartie sur la totalité de la plaine d'étude (sable et gravier avec limon et argile. Les indices correspondant à ce paramètre ont été estimés selon la notation illustrée dans le tableau N° 33.

Tableau 33. Notation et pondération de la zone non saturée.

Intervalle (%)	In	Ip	In.Ip
Gravier et sable argileux	6	5	30
Argile sableux	4	5	20

Selon la carte des indices relative à l'impact de la zone non saturée (fig.90) , on constate que la partie centrale et Est du terrain d'études , sur le long de oued Rhumel possède un indice très élevé (Indice I = 30) .

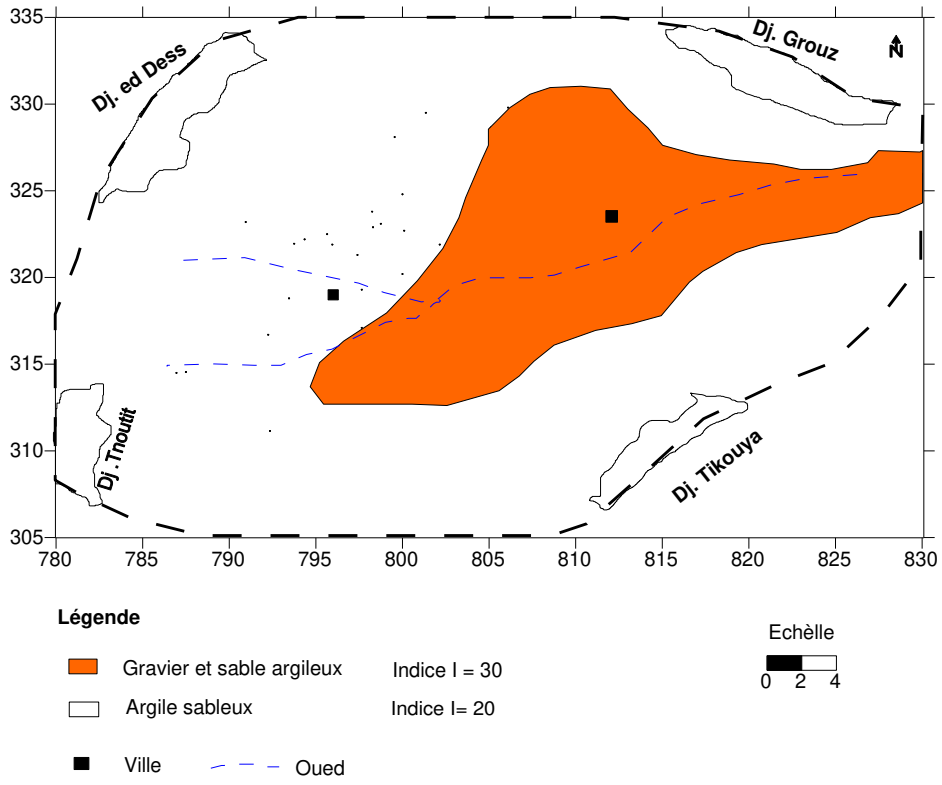


Figure 90. Carte indicielle : Impact de la zone non saturée

3.2 .7. Conductivité hydraulique (C)

La perméabilité de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de propagation des polluants dans la nappe. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide. L'estimation des indices de ce paramètre a été faite selon les intervalles présentés dans le tableau N° 34.

Tableau 34. Notation et pondération de la conductivité hydraulique

Intervalle (m/s)	Cn	Cp	Cn. Cp
$4{,}7.10^{-5}$ - $14{,}7.10^{-5}$	2	3	6
$4{,}7.10^{-7}$ - $4{,}7.10^{-5}$	1	3	3

L'établissement de la carte de perméabilité de l'aquifère alluviale (fig.40, Chapitre IV.)

A mis en évidence deux zones de conductivité hydraulique .La première zone est caractérisée par une variation de la conductivité hydraulique entre varie entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s qui s'étale sur la partie sud-ouest du terrain d'étude ; Ce qui donne un indice DRASTIC 3. La

deuxième zone se caractérise par des valeurs de conductivité hydraulique varient entre 10^{-5} et 10^{-4} caractérise le reste du terrain (fig.91).

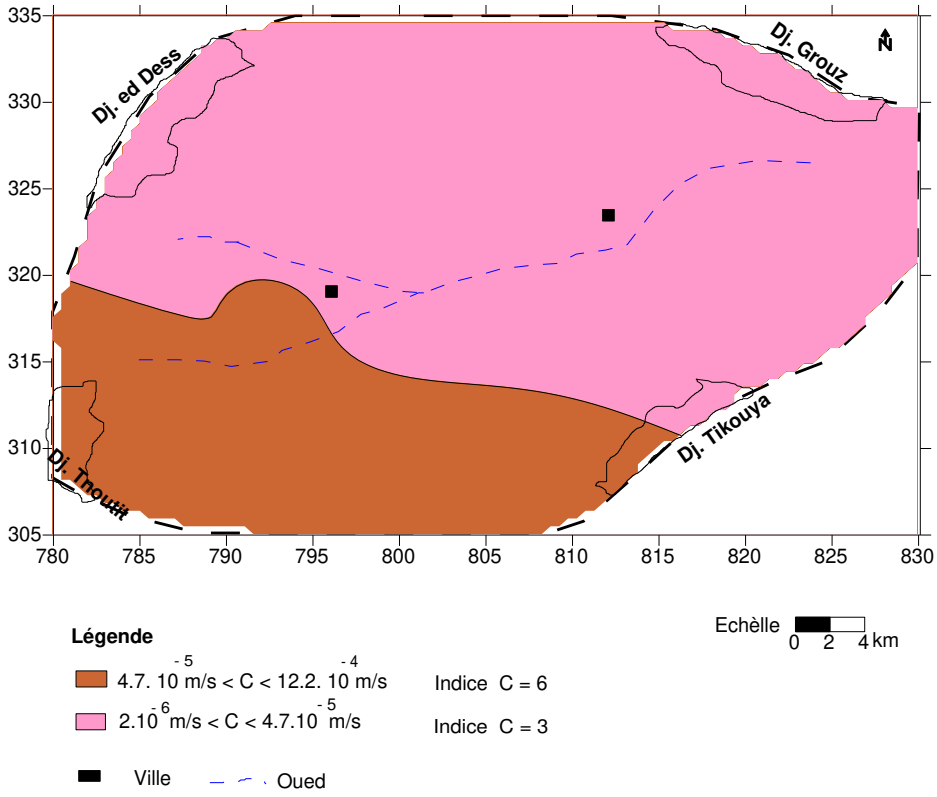


Figure 91. Carte indicielle : Conductivité hydraulique

3.3. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution)

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

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

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

L'examen de la carte de vulnérabilité de l'aquifère étudié (fig.92), nous a permis d'identifier un indice DRASTIC qui varie entre 55 et 124, e qui met en évidence une nappe à vulnérabilité moyenne à faible à la pollution

-La zone de vulnérabilité moyenne, occupe la partie centrale et Est du terrain d'étude sur le long de oued Rhumel dont l'indice de vulnérabilité varie de 100 à150 qui est due essentiellement la faible profondeur de la surface piézométrique et à la nature de la couche vadose. Elle est située dans les aires influencées par les activités agricoles et les rejets urbains.

- la zone de faible vulnérabilité, se localise dans le reste du terrain d'étude. Son indice de vulnérabilité varie de 55 à 100.

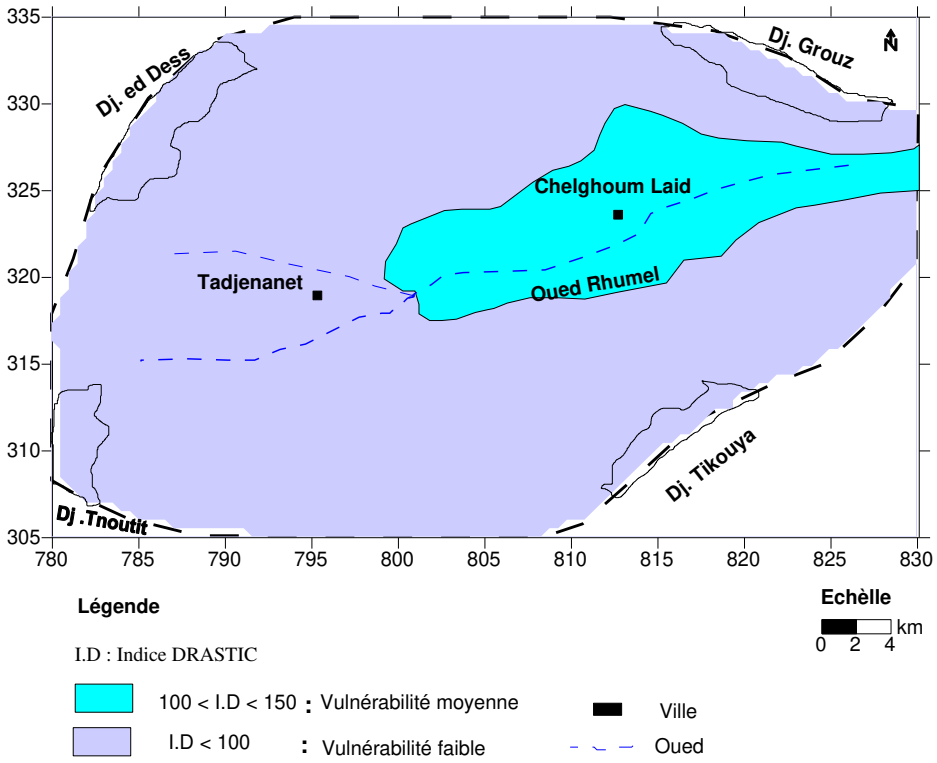


Figure 92. Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tadjenanet – Chelghoum Laid selon la méthode DRASTIC

4. Vulnérabilité de la nappe alluviale par la méthode de l'indice de contamination

4.1. Présentation de la méthode

L'étude hydrochimique des eaux souterraine de l'aquifère alluviale, nous a conduit à dire que les concentrations très élevés en éléments chimiques sont liés principalement au lessivage des roches magasins et à l'activité humaine (épandage d'engrais, rejets urbains industrie ….etc.)

Afin d'étudier la contamination des eaux de la nappe, nous avons appliqué la méthode basée sur le calcul d'un indice regroupant l'ensemble des éléments chimiques considérés comme étant d'origine anthropique.

Cette méthode consiste à admettre des intervalles de classes pour chaque élément. La somme des classes pour chaque élément donne un indice final, (Kherici. 1993), qui est d'autant plus élevé, que le point de prélèvement est contaminé et donc vulnérable à la pollution.(tab.35)

L'indice est défini comme suit :

$$IC= \Sigma([Na^+]+ [SO_4^{--}]+ [Cl^-]+ [NO_3^-])$$

Tableau .35 Intervalle des classes de l'indice de contamination

Classes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Na^+ (mg/l)	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000				
Cl^- (mg)	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000				
SO_4^{--} (mg)	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000				
NO_3^- (mg/l)	< 15	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95

D'après le tableau de calcul de cet indice, les forts indices caractérisent essentiellement la partie centrale et la partie Est du terrain, liés essentiellement aux teneurs très élevées en nitrates, quant aux faibles indices, ils sont localisés sur les bordures et la partie ouest du terrain (tab.36).

Tableau.36 Indice de contamination

N° pts d'eau	2	6	7	9	11	18	21	22	23	27	28	31	32	33	34	35	36
IC	19	8	16	19	19	20	12	21	66	17	14	18	13	13	20	10	12
N° pts d'eau	37	38	39	40	42	43	44	46	48	49	50	53	57	62	63	67	
IC	12	12	12	16	14	12	8	9	12	17	15	6	6	4	5	6	

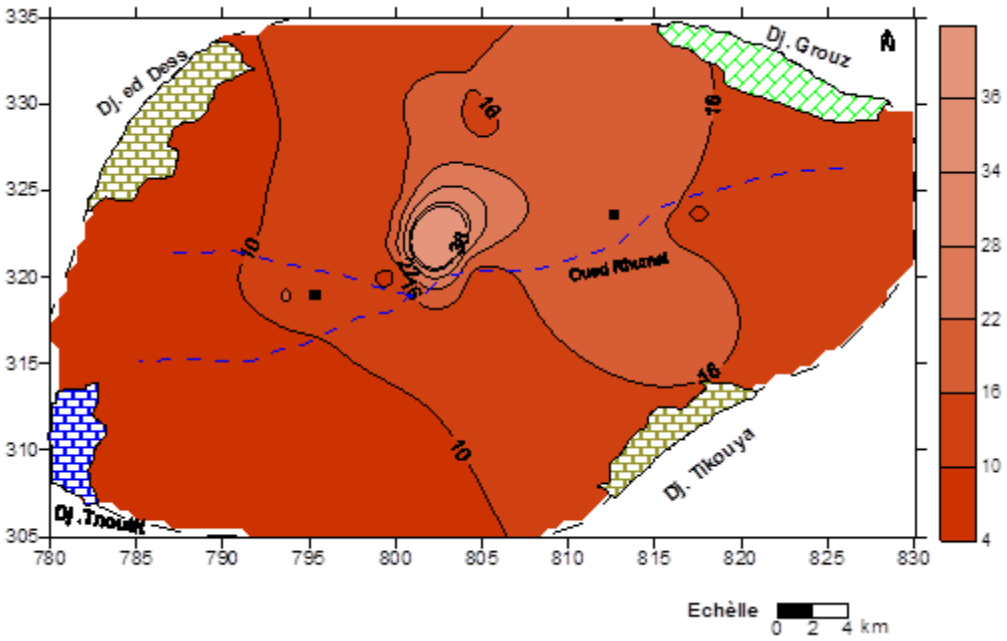


Figure 93. Carte de l'indice de contamination

4.2. Carte de la vulnérabilité à la pollution

Le but de l'établissement de cette carte est de montrer la susceptibilité de la nappe aquifère à la pollution, afin de mieux apprécier la fragilité des captages d'eau potable existants, de mieux cerner les zones à risque lors du choix de nouveaux sites des captages, et de prévoir les mesures nécessaire pour lutter contre les risques de pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle .

La combinaison des différentes cartes , de la perméabilité, de la profondeur du plan d'eau, de la nature du sol, la pente du terrain et celle des indices de contamination (concentration des éléments chimiques), nous a permis de dresser la carte de vulnérabilité de la nappe alluviale sur la base du paramètre principale de l'indice de contamination (Kherici. 1993).

La carte finale issue de la méthode de l'indice de contaminations (fig.94), fait ressortir trois secteurs de faible, de moyenne et de forte vulnérabilité.

D'après la carte, Les zones de faible occupe presque la surface totale de la plaine d'étude, alors que les zones à forte vulnérabilité se localisent au centre du terrain et les zones à moyenne vulnérabilité s'étalent du centre à l'Est du terrain d'étude sur le long de oued Rhumel.

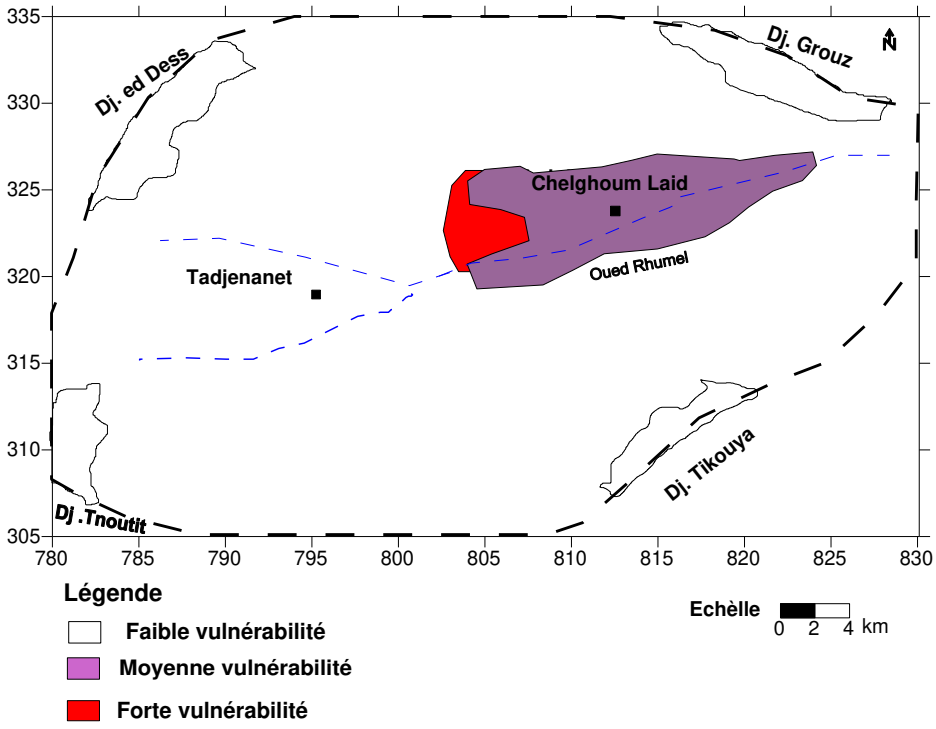


Figure 94. Carte de vulnérabilité à la pollution selon la méthode de l'indice de contamination

5. Conclusion

L'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale basée sur l'établissement de la carte d'estimation de la sensibilité de la nappe d'eau souterraine à la contamination de manière générale selon la méthode d'estimation DRASTIC et de l'indice de contamination a mis en évidence une zone de forte vulnérabilité au centre la plaine ; cela nous amène à conclure que cette zone est déjà contaminée, alors que les zones à moyenne vulnérabilité se localisent au centre, à l'Est sur la périphérie de oued Rhumel, le reste du terrain à une faible vulnérabilité.

CHAPITRE VII

IMPACT DES EAUX USEES SUR LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET EAUX DE SURFACE

IMPACT DES EAUX USEES SUR LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET EAUX DE SURFACE

1. Introduction

Le développement industriel et la concentration de la population, font que le rejeté des différents polluants dans le réseau hydrographique, crée des situations critiques et néfaste sur l'hygiène et la santé humaine. Le rejet des eaux usées domestiques, industrielles ou agricole, ont évidemment des conséquences considérables sur l'environnement. Toute étude concernant la qualité des eaux passe obligatoirement par la connaissance précise des différentes sources de pollution potentielle. A cet effet nous avons établi un inventaire des différentes sources susceptibles de contribuer à la pollution que ce soit des eaux de surfaces ou souterraines.

2. Pollution d'oued Rhumel

Les facteurs de pollution des eaux de oued Rhumel sont multiples et liés essentiellement à la vocation agricole de la région, la nature des différents rejets domestiques et industrielles. Nous signalons que le déversement des eaux usées de la ville de Tadjenanet et Chelghoum Laid se font au niveau d'oued Rhumel, ce dernier en période d'étiage se transforme en égout à ciel ouvert. En période de déficit hydrique, le pompage intensif à la périphérie de oued, engendrent localement des axes d'écoulement dans le sens de oued-nappe, transmettant ainsi la pollution vers la nappe souterraine.

Nous signalons que les deux grandes villes dans notre région d'étude (Tadjenanet et Chelghoum Laid) se situent le long d'oued Rhumel avec une population estimée plus de 100.000 habitant. Les deux agglomérations possèdent des décharges non contrôlées où l'une est située à l'amont de oued Rhumel (environ 1km au nord-ouest de Tadjenanet).

Devant cette situation environnementale alarmante et le manque des stations d'épuration, on a essayé de contribuer à l'étude de l'impact des eaux usées sur la qualité des eaux de surface et souterraines par le bais d'une analyse physicochimiques.

3. Différentes sources de pollution

3.1. Pollution agricole

L'usage de plus en plus généralisé d'engrais pose actuellement un grave problème de pollution agricole. Il est notamment induit par les activités agricoles par l'épandage des fertilisants chimiques, en particulier les engrais azotés et les phosphates qui ont pour conséquence un enrichissement des sols et des eaux en nitrates et en phosphates. Il faut signaler également l'activité liée à l'élevage du bétail, les fosses à purins non étanches, le fumier, les eaux de lavage d'étables …etc

La région de Tadjnanet-Chelghoum Laid 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, et à partir de pompage des eaux usées non traitées, s'écoulant dans l'oued.

3.2. Pollution d'origine domestique

Il s'agit d'une pollution aussi diversifiée qu'importante. La vie domestique contribue, pour une part significative, à la dégradation de la qualité des eaux de surfaces et par la suite à la qualité des eaux souterraines, nous distinguons la pollution domestique et la pollution biologique, par les différents rejets d'eau (eaux ménagères, fosses septiques, station d'essence, abattoir, déchets hospitaliers…). Le déversement des rejets domestiques dans la région, se fait directement dans l'oued Rhumel sans contrôle.

3.3. Pollution d'origine industrielle

L'industrie a également une part prépondérante dans la pollution d'oued Rhumel, en particulier le complexe des détergents et produits d'entretien (ENAD) de Chelghoum Laid, les unités industrielles installés le long de la route N°5 en amont de oued Rhumel en particulier les unités de vente et fabrication de trait à soudé et limonaderies.

4. Caractérisation de la pollution

4.1. Sites d'échantillonnage

Afin d'étudier l'impact des eaux usées sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines et de surface (eau de barrage Hammam Grouz), nous avons procédé à des prélèvements le long de oued Rhumel selon une direction d'écoulement des eaux de surface et souterraine, Ouest Est. Le premier prélèvement a été effectué à l'aval de la ville de Tadjnanet à Karir, le

deuxième a été effectué à l'aval de la ville de Chelghoum Laid à Mzara, et le dernier prélèvement a été effectué au niveau de la cuvette du barrage Hammam Grouz. Fig. 95 et 96.

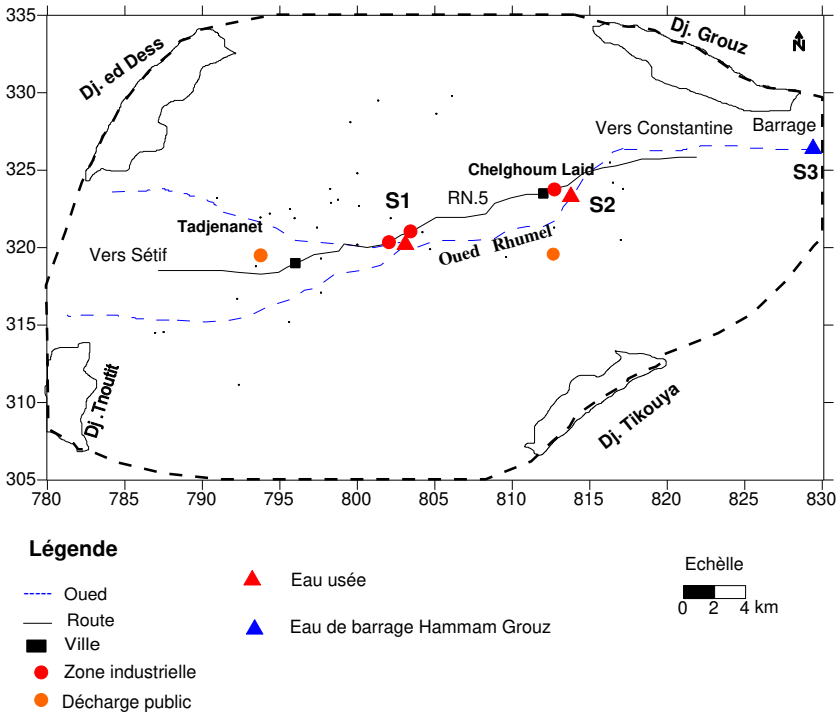


Figure 95. Carte d'inventaire des points de prélèvement des eaux de surface. Mai2007 et les différentes sources de pollution dans la région d'étude





Station 1. Karir (Amont de oued Rhumel) **Station 2. MZARA (Aval de oued Rhumel)**





Station 3. Barrage de Hammam Grouz **Complexe des détergents - Chelghoum**

Figure 96. Photos représentant les stations de prélèvements des eaux de surface

4.2. Résultats des analyses physicochimiques

Les éléments chimiques qui ont été dosés sont : chlorures (Cl), sulfates (SO_4), nitrates (NO_3), nitrites (NO_2), phosphates (PO_4), fer (Fe), cuivre (Cu) et demande chimique et biochimique en oxygène (DCO et DBO_5). Les paramètres physiques qui ont été mesurés sont : la conductivité, pH et le degré hydrotimétrique (TH).

D'après les résultats d'analyse regroupés dans le tableau n° 37, on constate que les concentrations dépassent la norme telle que les sulfates et les chlorures avec la présence des éléments métallique toxique (Fe et Cu). Ces fortes teneurs caractérisent une pollution des eaux, traduisant par de fortes valeurs de la DCO et DBO_5

Tableau 37. Résultats d'analyses chimiques des eaux de surface

Station	Cond (µs.cm)	pH	TH(°f)	Cl	SO_4	NO_3	NO_2	PO4	Fe	Cu	Cd	DCO	DBO_5	DCO / DBO_5
S1 (Karir)	1919	7.5	102	539.6	432	14.26	1.03	0.146	0.053	0.03	0	115	55	2.09
S2 (Mzara)	2280	7.9	86	532.5	640	12	2.7	2.95	0.213	0.04	0	198	92	2.15
S3 (Barrage)	1277	8.9	165	215	480	39	0.15	0.114	0.127	0.13	0	289	141	2.04
Norme (OMS)	2500	6.5 - 8.5	30	200	250	50	0.2	5	0.2	1	0.05			

Teneurs en mg/l

5. Evolution de la pollution

D'après l'évolution spatiale des éléments chimique, nous constatons une légère élévation de la salinité des eaux de surface de l'amont vers l'aval, puis elle diminue au niveau du barrage Hammam Grouz sous l'effet du phénomène de la dissolution. Fig. 97. Pour le reste des éléments, on s'aperçoit qu'on a une augmentation de tous les éléments ce qui montre une forte pollution en liaison avec la nature des effluents. Les fortes valeurs de DCO et DBO_5, montrent la présence d'une charge polluante importante mobilisée à partir des eaux usées rejetées dans l'oued Rhumel vers les eaux de barrage de Hammam Grouz. Cette constatation a été déjà faite dans les études antérieures (Boudoukha et Boulaarak, 2013).

Le rapport de la demande chimique en oxygène et la demande biochimique pendant 5 jours nous a permis d'apprécier la dégradabilité de la matière organique (AFNOR .1971).

Il est proche de 1.5 pour les eaux vanne, de 2 pour les eaux usées urbaines, et entre 3 et 5 pour les effluents issus des stations d'épuration et des zones industrielles. Les analyses des eaux de la région, montrent le rapport DCO/DBO_5 est légèrement supérieur à 2, ce qui explique l'absence de la matière organique non biodégradable et confirme l'arrivée d'une pollution urbaine.

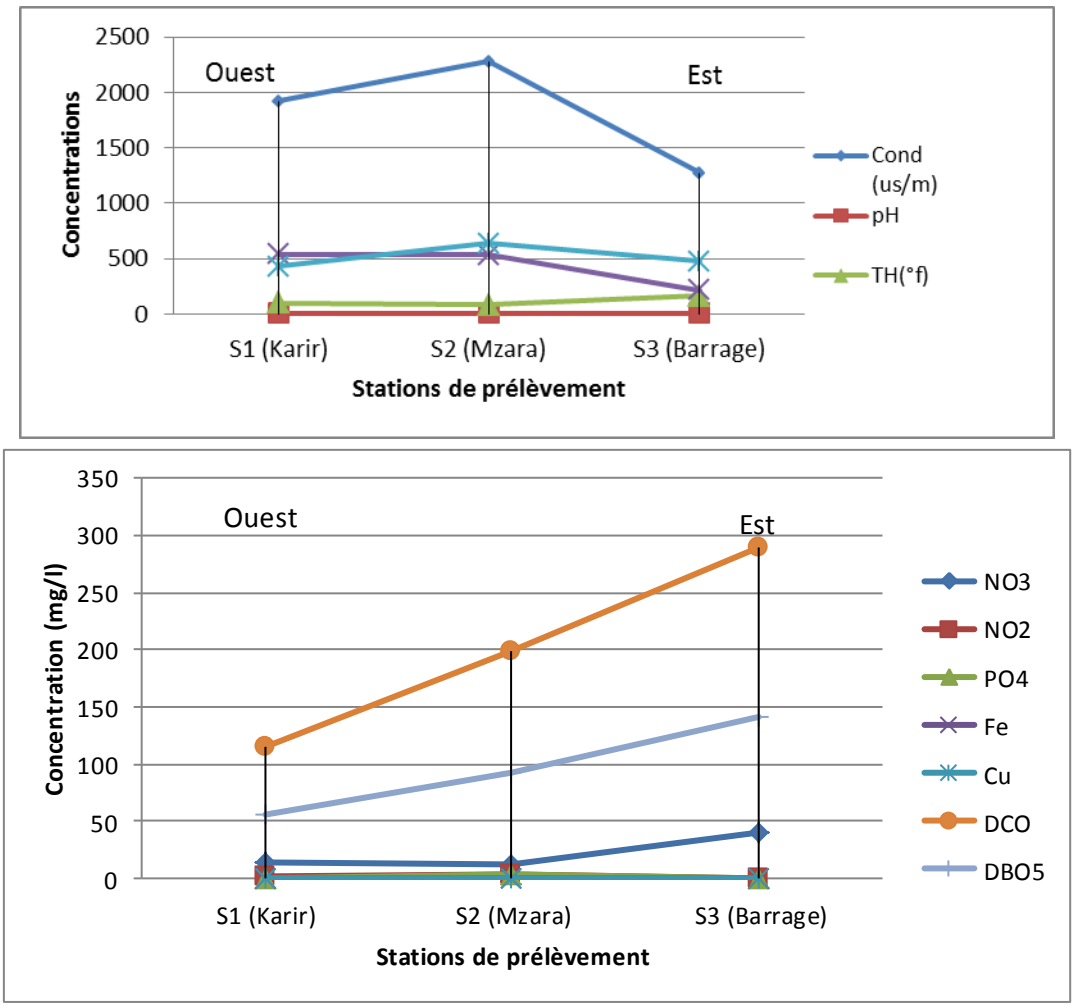


Figure.97 Evolution spatiale des éléments de pollution des eaux de surface sur le long de Oued Rhumel

6. Interaction eaux de surface- eaux souterraine

L'analyse des résultats physicochimiques des eaux souterraines et des eaux de surface, nous a conduit à constater que la salinité des eaux de surface est semblable pratiquement aux valeurs moyenne de celle des eaux souterraines de la nappe alluviale.

En terme des élément de pollution, les fortes concentration des éléments azoté trouves dans les eaux de la nappe ne sont expliqués, que par leurs origines anthropiques par l'effet directe de l'infiltration des eaux de surface chargés en sels (rejets domestique et industriel) ou par le lessivage des terrain dans la zone non saturée (engrais azotés), ce processus est

accentusurtout dans la période d'étiage, caractérisant principalement la partie centrale et Est sur le long de oued Rhumel , ou il y a un pompage intense de la nappe .(fig.98)

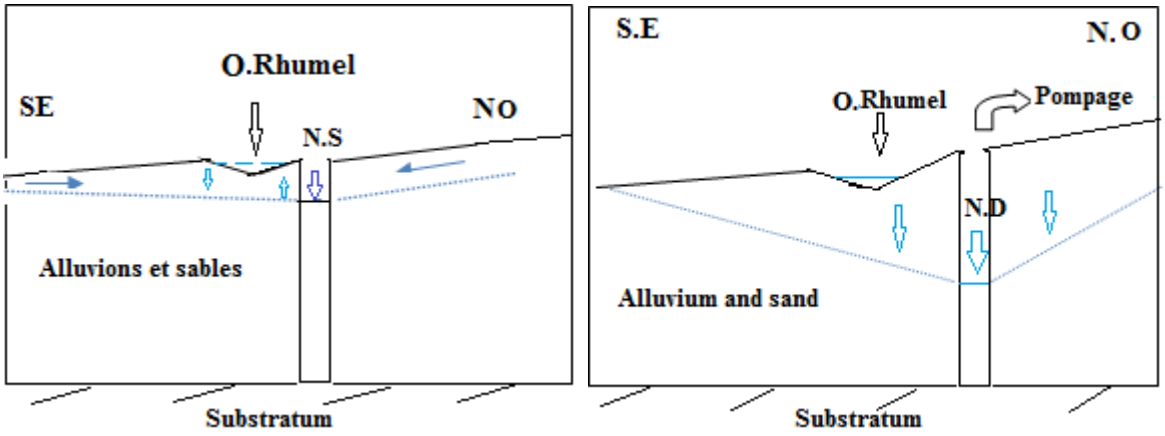


Figure.98 Interaction eau de surface –eau souterraine à l'aval d'Oued Rhumel

8. Conclusion

D'après les concentrations élevées des indicateurs de pollution, nous constatons que les eaux de surface montrent un apport conséquent en matières polluantes d'origine naturelle par le lessivage des terrains géologiques ,et d'origine anthropique par les différentes nature de rejets déversée à l'amont de l'oued, surtout de nature urbaine.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de e travail, nous pensons avoir contribué à une assez bonne connaissance des paramètres intervenant dans l'étude de la caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de la nappe alluviale de Tadjenanet –Chelghoum Laid, ainsi que leurs impacts environnementaux.

Cette étude a permis de dévoiler et maîtriser les phénomènes qui se posent dans la région d'étude, et d'assurer une meilleur exploitation et une bonne protection de la nappe contre la pollution.

La région explorée fait partie de la zone occidentale du grand bassin versant de Kébir Rhumel situé à l'Est Algérien.

Du point de vue géologique la région étudiée est caractérisée par une formation de type sédimentaire dont la prédominance des affleurements correspond à des formations Mio-Plio-quaternaires. La description lithologique a montré une hétérogénéité dans les formations (alluvions, argiles, sables, grès, limons, et les évaporites riches) caractérisant l'aquifère de la région de Tadjenanet-Chelghoum Laid, qui issue d'une eau fortement minéralisée. On note également la présence des formations du crétacé et Eocène de nature carbonatés entourant la région d'étude, avec quelque affleurement d'éocène au centre du terrain. Ces formations à un intérêt hydrogéologique important, contribuant à l'alimentation de la nappe alluviale. Nous signalons l'affleurement des formations triasiques au contact de l'Eocène, caractérisent les monts de ed Dess et Tikouya au nord-ouest et sud-est consécutive.

L'analyse des données climatiques de la région, a mis en évidence un climat de type semi-aride, avec des étés chauds et secs et des hivers froids et humides. Les précipitations et les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 466.89 ml /an et 15.43°C respectivement.

Le bilan hydrique est dans son ensemble est déficitaire, avec une moyen annuelle des précipitations d'ordre de 372.25mm et température moyenne annuelle de 15.43°C. L'évapotranspiration réelle représente 92% des précipitations, alors que l'infiltration est très faible et ne représente que 1.5% des précipitations.

L'étude géophysique exécuté dans la région d'étude a permis d'identifier la géométrie et l'extension des différentes formations géologiques susceptibles d'être aquifères. L'examen des coupes géoélectriques et des cartes d'iso résistivités ont mis en évidence l'irrégularité morphologique du substratum, ainsi que l'identification de la géométrie des trois aquifères, le premier dans les formations du Mio-plio-Quaternaire qui est l'objet de notre thème d'étude, le deuxième dans les formations carbonatées d'Eocène et le troisième caractérise les formations carbonatés du crétacé.

L'examen de la carte piézométrique, réalisée en Mai 2007, indique un écoulement de direction principal Ouest- Est coïncidant avec l'axe d'écoulement des eaux de surfaces de oued Rhumel. L'alimentation de la nappe, est assurée essentiellement par les formations carbonatées limitrophes du Djeble ed Dess,Tnoutit, Grouz et Tikouya. La variation spatiotemporelle de la surface piézométrique est expliquée par le changement des paramètres climatiques et aux effets dû à l'excès de pompage.

L'interprétation des données de pompage d'essai, a montré que les zones favorables à l'implantation d'éventuel ouvrages d'eau, et s'avèrent intéressantes du point de vue potentialité aquifère se localisent au sud-ouest, près des massif carbonatés de Djebel Tnoutit.

Pour une meilleur gestion et exploitation des ressources en eau de la nappe alluviale de Tadjenanet –Chelghoum laid et de prévoir leur évolution future au cour et à long terme, on a essayé de pratiquer une approche par modélisation numérique tridimensionnelle, en régime transitoire fondé sur la méthode des différences finies. Le modèle ayant pour finalité l'optimisation de l'exploitation des réserves, permettront de placer une limite d'exploitation et de choisir les meilleurs sites potentiels d'exploitation.

Les résultats du modèle hydrodynamique en régime transitoire étalant sur une période d'observation de 20 ans, correspondent à la surexploitation de la nappe par une multiplication des débits pompés, montre un bilan hydrique de la nappe plus au moins équilibré traduit par un faible rabattement atteignant les 6 m, étalé sur la partie centre et Est de la nappe avec des faibles grandeurs d'ordre 1 à 2 m enregistrés à la partie ouest. A cet effet, nous proposons, l'implantation d'éventuel ouvrage de captage aux extrémités des massifs carbonatés entourés la région

d'étude à fin d'éviter une telle situation entrainant la pollution de la nappe surtout dans sa partie centrale, sachant que cette partie est connue par sa vocation agricole.

L'étude du chimisme de la nappe alluviale de Tadjenanet -Chelghoum Laid nous a permis de conclure que le comportement hydrochimique est caractérisé par une grande variabilité dans l'espace. La minéralisation augmente progressivement de l'Ouest vers Est coïncidant avec le sens d'écoulement principal des eaux souterraines. Les fortes minéralisations observées sont attribuables à une mise en solution au niveau des sols ou dans l'aquifère d'une part, et à l'activité anthropique d'autre part, liés principalement à l'utilisation irrationnelle des engrais chimique dans l'agriculture. Cette situation a été confirmée par les résultats de l'analyse en composantes principales.

La cartographie hydrochimique a montré une zonalité des concentrations d'éléments dosés ; où on constate une élévation de la salinité d'amont en aval dans le sens de l'écoulement.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques a montré que les premiers ont tendance précipiter avant les seconds, ceci a permis aux éléments chimiques provenant de la dissolution des gypses d'acquérir des teneurs importantes.

Concernant l'aptitude de ces eaux à l'irrigation, nous constatons que les eaux de la zone Ouest de la région d'étude peuvent être utilisées sans risque sur le sol, avec un risque de salinisation aux parties centre et Est du terrain d'étude.

L'étude de l'impact des eaux usées sur la qualités des eaux de surfaces du barrage Hammam Grouz ,et d'après les concentrations élevées des indicateurs de pollution organique , il semble que les eaux de surface du barrage Hammmam Grouz montrent un apport conséquent en matières polluantes d'origine naturelle par lessivage des terrains géologiques ,et d'origine anthropique par les différentes nature de rejets déversée à l'amont de l'oued, ainsi que une pollution agricole dû au épandage en masse des engrais chimique sur des surface étendue localisée en amont du barrage.

Dans le but d'évaluer la vulnérabilité de la nappe alluviale de la région de Tadjenanet-Chelghoum Laid à la pollution, et pour préserver cette ressource, on a adapté à établir deux cartes de vulnérabilité relative aux indices DRASTIC et de contaminations calculés. Ces

dernières tiennent compte de plusieurs facteurs, lithologique, piézométrique et hydrochimique.

L'analyse des deux cartes de vulnérabilité a mis en évidence une zone de forte vulnérabilité au centre la plaine ; cela nous amène à conclure que cette zone est déjà contaminée, alors que les zones à moyenne vulnérabilité se localisent du centre à l'Est sur la périphérie de oued Rhumel, le reste du terrain à une faible vulnérabilité.

Finalement, il est évident que ces synthèses sont relatives à une période d'observation très limitée, et pour une étude très approfondie, nous proposons de l'effectuée à travers un suivi spatiotemporel, par la mise au point des modèles hydrodynamique et hydrochimique étalant sur des périodes d'investigation et d'exploitation diverses, qui vont renseigner, non seulement, sur des informations sur l'origine des eaux, mais aussi sur l'état du réservoir et la qualité de ses eaux.

RECOMMANDATIONS

Selon les 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 et de surfaces :

- 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 centrale et Est, et modérer les pompages dans les puits déjà existants ;
- Adopter de nouvelles techniques d'irrigation (le goutte à goutte par exemple) plus économiques de l'eau (pas de pertes par évaporation, 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 Rhumel, 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 et par la suite le barrage, par la mise en place des stations d'épuration à l'aval des villes de Tadjenanet et Chelghoum Laid.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anonyme :

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressource Hydrique

Fiche technique des forages. D.H.W.Mila.

Carte topographique et géologique de Tadjenanet, n°118.Ehelle 1/ 500000.

Carte topographique de Chelghoum Laid, n° 119. Echelle 1/ 50000.

Carte géologique de Sétif ,1/ 200000.

Carte et rapports pédologiques des hautes plaines Sétifiennes .A .N.R.H de Constantine.

AFNOR ,(1971). Détermination de la demande biochimique en oxygène (D.B.O). Norme T 90-103. A.F.N.O.R., Paris, 5 p.

ALLER .L et al , (1987). DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrologic settings. U. S. EPA, Robert S. Kerr Environmental ResearchLaboratory, Ada, OK, EPA/600/2-85/0108, 163 pp.

A.L.G.E.O (Société Algérienne de Géophysique), (1977). Etude par prospection géophysique dans la région de Chelghoum Laid.

Astier. J.L, (1971) .Géophysique appliquée à l' hydrogéologie. Edition Masson&Cie. Paris.

Bakalowicz . M, (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'état Université P. et M. Curie Paris VI.

Barroin .G, 1990. La pollution des eaux par les phosphates. La recherche, 221.p 620-627.

Bensouilah .S, (1995). Contribution à l'étude hydrogéologique des hautes plaines sétifiennes dans le cadre de la haute vallée de l'oued Rhumel en amont d'oued Athménia.Th.Magi.Univ.Constantine.184p.

Bonnet. T, (1982). Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. Thèse de doctorat d"état en science (géologie appliquée). INP lorraine – NANCY. document BRGM N°34.

Boudoukha. A, Djaffer. R, Retima. A, Djabri. L et Souag. M, (1999). Proposition de normes de potabilité des eaux domestiques pour l'Algérie du Nord. Eudil Info-EAU. Edit. Engineering Environment Consult. n° 24. 4-7.

Brinis. N, (2011). Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en zone aride cas de l'aquifère d'El-Outaya, region Nord-Ouest de Biskra .Algerie. Thèse de doctorat, Univ. Mohamed Kheider – Biskra, 191p.

Castany. G, (1963). Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641p.

Castany. G, (1968). Prospection et exploitation des eaux souterraines. Ed. Dunod Paris France 683p.

Castany. G, (1982). Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334p.

Chabour. N, (2008): Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. Thèse de doctorat d'état .Université mentouri, Constantine. 176p.

C.G.G (Campagne générale de Géophysique), (1973). Etude par prospection géophysique des hautes plaines Sétifiènnes. DHW de Mila –Algérie. 53p.

Code de l'eau, (1983). Loi83.17 du 16 juillet 1983.Journal officiel de la république Algérienne.

Davis. S. N, R. J. M. De Wiest , (1966). Hydrogeology. New York, Wiley, 463 p.

Djabri. L, (1996). Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'État. Université de Annaba 280p.

Debieche .T. H, (2002) : Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Thèse de doctorat. Univ. De franche comté. 199p.

Djouhra.R, (1983). Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Ain- Azel, mémoire d'ingéniorat .USTHB Bab Elzouar, 64p.

Drever .J .I, (1997). The geochemistry of natural waters. 3rd ed. New York – Prentice-Hall INC. 1997; 436 pp.

Duchaufour. P,(2001). Introduction à la science du sol. Sol, Végétation, Environnement. Dunod.

Durand. D.M, (1969) . Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie .Serv.géol .Algérie,N.S.,Bull.n°39,p.89-131.

Durozoy. G, (1960). Les ressources en eau des massifs calcaires crétacés de la région de Constantine, étude d'hydrogéologie appliquée, direction de l'hydraulique et de l'équipement rural, service des études scientifiques, Alger.

Duchaufour. P, (2001) : Introduction à la science du sol, végétation, environnement. 6ème édition, Dunod, Paris, pp.286-294.

Farah. A.S, (1991). Etude du comportement d'un oued en zone méditerranéenne semi- aride d'Afrique du nord et ses causes naturelles et anthropiques, l'oued Rhumel, Algérie .Thèse de doctorat,Univ. Orléans, 271p.

Fehdi. CH, (2006). Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes d‟acquisition de la salinité des eaux souterraines du complexe aquifère 131 Morsott- el Aouinet (N.E. Algérien).thèse de doctorat es science. Université Badji Mokhtar-Annaba.188p.

Freeze. A.R, Cherry J.A, (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 604 p.

HILL .M, (1991). Nitrates and nitrites in food and water. Ellis Horwood, 194 pp.; New York.

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

ISSAADI. A, (1981). Etude hydrogéologique des massifs du Guerion et Fortars. Thèse,3ème cycle, Univ. Haouari Boumedienne, Alger.

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.

Kieken. M, (1962). Esquisse tectonique de l'Algérie du nord .Présentation de la carte tectonique au 100.000ème .Pub . Carte .gèol. Algerie. N° série .Bul.n° 31.

Kehew.A.E, (2000). Applied chemical hydrogeology, Prentice-Hall international (UK) limited, London, 368p.

Khedidja. A, (2001). Etude de la vulnérabilité de l'aquifère des calcaires lacustres de la région de Bir EL-Arch (W.de Sétif) .thèse de magister. Université de Tébessa.87 p

Khedidja.A, Boudoukha.A, (2013). Risk assessment of agricultural pollution on groundwater quality in the high valley of Tadjenanet – Chelghoum Laid (Eastern Algeria) Publication au Journal International. Science and engineering. Desalination and water treatment /Vol.51, January 2013, pp.292- 301.

Kherici .N, (1993) . Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieux industriel et agricole (Annaba – la Mafragh) NE de l'Algérie. Thèse de Doctorat Es-Sciences Université de Annaba 170p.

Konikow.L.F , Grove. D.B, (1977). Derivation of Equations Describing Solute Transport in Ground Water. U.S. Geol. Survey Water-Res. Inv. 77-19: 30 pp.

Konikow.L.F, Reilly.T.E, (1998). Groundwater Modeling In: The Handbook of Groundwater Engineering [J.W. Delleur, ed.], CRC Press, Boca Raton 20:1-20.40.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2006). Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable, mises à jour en 2006 sont la référence en ce qui concerne la sécurité en matière d'eau potable.

Lacroix. M, (1991). Impact de l'irrigation sur un aquifère alluvial. Dynamique du système Basse Durance : nitrates et isotopes (cartographie), piézométrie (modélisation mathématique). Thèse Doct. Univ. 161 p.

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

Macko. S.A, Ostrom. N.E, (1994). Pollution studies using stable isotopes. In :Lajtha K. And Michener R., Stable isotopes in ecology. Blackwell,Oxford, pp.45-62.

McDonald .J .M, Harbaugh .A.W, (1988).A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, techniques of water resources investigations of the U.S Geological Survey Book,6, pp.586.

Mebarki. A, (1982). Le bassin du Kébir Rhumel .Ressources en eau et aménagement en Algérie. Thèse 3 ème cycle, université de NancyII.303p.

Marsily De. G, (2004). Cours d'hydrogéologie. Université pierre & marie curie. 226p.

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

Plagnes .V, (2000). Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Documents du BRGM 294.

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

Ricard. J, (1979). Evaluation des ressources d'un aquifère d'après l'analyse du bilan en eau : application au système aquifère de Tebessa-Morsott (Algérie) Université des sciences et techniques du Languedoc de Montpellier 2. Thèse : Sciences de l'eau

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

Rouabhia Aek, 2006 : vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma el Abiod Nord-Est Algerien. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar- Annaba.197p.

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

Schoeller. H, (1962). Les eaux souterraines: Géochimie, eaux du gypse et des terrains salifères , Masson et Cie édition Paris IV, 362 pages.

Servant. J, (1975). Contribution à l'étude des sols halomorphes. L'exemple des sols sales du Sud et du Sud-Ouest de la France. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Montpellier.

S.N REPAL (Société Nationale de Recherche et d'exploitation des Pétroles en Algérie, (1952).Région sud telliennes et atlas saharien, 19th Int. Géol.

Stumm. W, Morgan. J.J, (1996). Aquatic chemistry ,3rd edn.Wiley- Interscience, New York, 1022p.

TODD. K, (1980). Groundwater hydrology. Seconde Edition. New York, J.Wiley & Sons, 510 pages.

Travi. Y, Mudry. J, (1997). Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afriques de l'ouest.Hydrogéologie 1:13-21p.

Thornthwaite .C. W, (1980). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Review,* 38 : 55-94.

VILA. J.M, (1977). Carte géologique de l'Est d'Algérie, feuille n° N-0-3-4 de Sétif au 200 000ème, 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.

Wilcox. L.V, (1948). The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture TechBull 962, Washington DC.

Wilcox.L.V,(1955).Classification and use for irrigation waters. USDA, Circ.969,Washington, D.C., 119 p.

Wuensch, K. L. (2001). Principal component analysis. [document disponible en ligne]. http://core.ecu.edu/psyc/wuenschk/MV/FA/PCA.doc

ANNEXE

Annexe : Inventaire des points d'eau (puits, forages) Mai 2007

N° Points d'eau	X(km)	Y (km)	Z (m)	Prof (m)	NS (m)	Côte piézométrique (m)
1	817.05	319.85	848	10	4.8	843.2
2	817	320.5	840	13	5	835
3	813.85	321.3	782	9,5	6	776
4	816.2	322.7	759	65	14	745
5	818.3	323.3	796	30	7.2	788.8
6	817.15	323.8	773	10	3.2	769.8
7	816.5	324.2	772	45	3.1	768.9
8	815.7	324.7	738	60	9.7	728.3
9	816.3	325.5	726	52	5.2	720.8
10	813.2	325.2	725	10	2.8	722.2
11	812.7	321.3	748	11	3.6	744.4
12	810.7	321.9	772	14	6.2	765.8
13	810.15	320.3	768	65	9.4	758.6
14	809.6	321.6	773	50	11.1	761.9
15	809	321.95	782	28	7.8	774.2
16	807	321.8	809	70	14.2	794.8
17	808.4	319.8	785	66	21.5	763.5
18	809.6	319.4	781	13	4.1	776.9
19	810	318.3	874	10,5	6.7	867.3
20	806.9	317.5	837	12	8.7	828.3
21	804.7	319.9	816	70	18.8	797.2
22	804.2	321	820	18	17.5	802.5
23	802.15	321.9	844	26	22.2	821.8
24	808	325.3	797	75	18.5	778.5
25	807.1	325.8	805	55	10	795
26	806.6	328.2	846	70	14.3	831.7
27	806.1	329.8	861	12	9.2	851.8
28	805.1	328.65	844	11	4.2	839.8

29	803.15	329.5	872	85	12.7	859.3
30	802.35	328.3	867	20	3	864
31	801.35	329.5	884	25	11.1	872.9
32	799.55	328.1	876	9	3	873
33	800	324.8	854	60	12.2	841.8
34	800.1	322.7	861	19,5	15.3	845.7
35	798.75	323.1	852	24	15.1	836.9
36	798.25	323.8	849	22	11.9	837.1
37	798.3	322.9	851	17	13.6	837.4
38	797.4	321.3	854	42	15.1	838.9
39	795.95	321.9	870	45	14.2	855.8
40	795.65	322.5	880	33	18.3	861.7
41	794.95	321.75	874	30	17.5	856.5
42	794.35	322.2	884	32	23.2	860.8
43	793.75	321.95	894	34	19.6	874.4
44	790.95	323.2	938	16	7.1	930.9
45	793.5	319.7	863	18	3.7	859.3
46	800	320.2	834	75	14.3	819.7
47	800.15	318.5	821	60	11.7	809.3
48	797.65	319.3	852	65	22.1	829.9
49	793.45	318.8	848	25	7.3	840.7
50	797.65	317.1	843	21	12	831
51	799.15	316.5	834	15	10.8	823.2
52	800.7	314.8	845	20	16.2	828.8
53	795.6	315.2	865	15	9	856
54	794.2	315.8	868	17	8.1	859.9
55	793.85	316.95	872	11	6.8	865.2
56	793.1	318.55	875	18	8.7	866.3
57	792.25	316.7	870	10	7.5	862.5
58	791.15	315,5	888	25,5	13.2	874.8
59	789.5	314.65	895	27	18.5	876.5
60	789	317.75	902	28	21.7	880.3

61	788.1	316.45	904	29	22	882
62	787.5	314.55	908	26	21.1	886.9
63	786.95	314.5	903	31	26.4	876.6
64	787.95	313.7	900	26	25	875
65	788.45	314	900	23	19.9	880.1
66	790.6	312,75	901	27	25.6	875.4
67	792.35	311.15	889	17	15	874