

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة

Année 2016

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES

Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souf (SE Algérie)

Option: Hydrogéologie

Par: BOUSELSAL Boualem

(Ingénieur d'état en hydrogéologie, Magister en hydrogéologie)

DIRECTEUR DE THÈSE: Mr. KHERICI Nacer

Pr, Univ. BADJI Mokhtar Annaba

DEVANT LE JURY :

PRESIDENT: Mr. DERRADJI El-Fadel

Pr, Univ. BADJI Mokhtar Annaba

EXAMINATEURS : Mr. ZOUINI Derradji

Pr, Univ. BADJI Mokhtar Annaba

Mr. HACINI Messaoud

Pr, Univ. KASDI Merbah Ouargla

Mr. DJIDEL Mohamed

Pr, Univ. KASDI Merbah Ouargla

Mr. MAOUI Ammar

Pr, Univ. 08 Mai 1945 Guelma

Remerciements

REMERCIEMENTS

Je tenais à remercier comme il se doit les personnes qui ont partagé avec moi l'aventure de ce travail. Ma première pensée va tout naturellement à mon directeur de thèse **KHERICI Nacer** qui a suivi ce travail dans tous ses détails avec une rigueur scientifique exceptionnelle, ce qui m'a donné le courage pour poursuivre la réalisation de ce projet de recherche. Je tiens à le remercier pour son encadrement et son soutien. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoigné en me confiant ce travail. Merci pour sa grande chaleur humaine et pour sa disponibilité quotidienne. Grâce à lui, les moments de découragement connus de tous les thésards furent rares et brefs.

Je tiens à remercier également monsieur **DERRADJI El-Fadel**, professeur à l'université de BADJI Mokhtar Annaba, d'avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et qui a bien accepté de me faire le grand honneur de présider le Jury de ma soutenance.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury de thèse messieurs, le professeur **ZOUINI Derradji** de l'université de BADJI Mokhtar Annaba, le professeur **HACINI Messaoud** de l'université de KASDI Merbah Ouargla, le professeur **DJIDEL Mohamed** de l'université de KASDI Merbah Ouargla et le professeur **MAOUI Ammar** de l'université de 08 Mai 1945 Guelma, qu'ont consacrés une part importante de ses temps à la lecture et à l'évaluation de ce travail.

Je dois aussi remercier le personnel de l'ANRH de Ouargla et de la DHW d'El Oued, où j'ai eu l'appui logistique pour réaliser mes campagnes d'échantillonnage. Mes remerciements vont également au responsable du Laboratoire de chimie de l'ANRH et de l'ADE d'El Oued, au sein duquel j'ai effectué mes analyses chimiques des eaux.

Mes sincères remerciements vont au Chef du département des sciences de la terre et de l'univers monsieur **BELKSIER Mohamed Salah** et tous les enseignants du département pour leurs soutiens et encouragements.

Je suis extrêmement reconnaissant à ma famille et mes amis, qui m'ont beaucoup aidé et qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu à chaque moment.

Ma reconnaissance à tous les habitants d'El Oued qui m'ont autorisé à utiliser leurs puits et forages pour effectuer les prélèvements d'eau et les mesures piézométriques.

Merci à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin et je leur témoigne de mon profond respect.

ملخص.

منطقة الدراسة هي جزء من ولاية الوادي تقدر مساحتها بحوالي 500 كلم² ذات ارتفاع يتراوح ما بين 64م و 100م، كما ان سطح منطقة الدراسة مشغول من طرف الكثبان الرملية و الرق و المناطق الحضارية و الاغواط و المناطق الزراعية المنسقية و المسطحات المائية الحرّة.

خلال الثلاثون سنة الأخيرة عانت منطقة الوادي من ظاهرة صعود مياه الطبقة المائية الحرّة و كانت النتائج المتربّبة على ذلك كارثية سواء على الإنسان أو المحيط، حيث أدت إلى غرق بساتين النخيل و تلوث مياه الطبقة المائية الحرّة و تدهور البيئة المعيشية للسكان و التغيير التدريجي لشغل الأراضي في المنطقة.

في هذا العمل أجرينا دراسة هيدروجيولوجية و هيدروكيميائية لتوضيح تأثير ظاهرة صعود مياه الطبقة المائية الحرّة للوادي على الإنسان و البيئة و تقييم نتائج الحلول المقترنة من أجل معالجة هذه الظاهرة.

منطقة الدراسة تعد جزء من النظام المائي لمنطقة الصحراء الشمالية الشرقية و يتكون هذا الأخير من ثلاث خزانات مائية : الخزان المائي للمداخل القاري و الخزان المائي للمركب النهائي و الخزان المائي الحرّ. هذا الأخير الذي يتكون بدوره من الرمل و الحجر الرملي و الطين الرملي تتراوح نفادية الخزان المائي بين 1.1×10^{-4} و 2.6×10^{-4} م/تا وأما قاعدته الكتيمة التي تتكون من الطين فيتراوح عمقها في منطقة الدراسة ما بين 40 و 70م و أما حدودها الجانبيّة فهي تمتد إلى خارج منطقة الدراسة.

بيّنت دراسة الخرائط البيزومنتريّة أن سبب ظاهرة صعود المياه راجع إلى عمل الإنسان و ذلك بتسرّب مياه الصرف في المناطق الحضريّة و مياه خزان المركب النهائي في المناطق الزراعية المنسقية إلى الطبقة المائية الحرّة. كما لاحظنا أن إنجاز أبار الضخ في المحيط العمراني للوادي أدى إلى هبوط مستوى المياه بحوالي 4 م في الجزء الشمالي الشرقي من منطقة الدراسة.

تعتبر مياه الطبقة المائية الحرّة غير صالحة للشرب حسب معايير مياه الشرب الجزائريّة كما أنها ذات نوعية ردّيّة إذا استعملت في الري أما عملية دراسة مياه الصرف المعالجة فتبين أنها غير صالحة للسقي بالرجوع إلى المعايير الدوليّة FAO و معايير منظمة الصحة العالميّة.

تغلب سحن المتّبّرات على مياه الطبقة المائية الحرّة و التي يرجع أصلها إلى ذوبان صخور المتّبّرات (الجبس و ملح الطعام) إضافة إلى العناصر الكيميائيّة التي تأتي من تسرّب مياه خزان المركب النهائي و مياه خزان المداخل القاري و كذلك تبادل العناصر مع التكوينات الطينيّة بالإضافة إلى العناصر الملوثة الآتية من النشاط البشري.

إن تركيز التّنّرات في مياه الطبقة المائية الحرّة هو غالباً أعلى من المعيار الموصى به من طرف منظمة الصحة العالميّة و توجّد التّراكيز العالية في المناطق الحضريّة و الزراعيّة المنسقية من مياه الطبقة المائية الحرّة و أما التّراكيز المنخفضة للتّنّرات فقد سجلت في الاغواط التي غمرتها المياه و المغطاة بالقصب و المناطق النائيّة البعيدة عن المحيط العمراني و المسطحات المائية الحرّة.

إن دراسة درجة حساسية الطبقة المائية الحرّة للتلّوث حسب طريقة DRASTIC بيّنت أن 66.78% من الطبقة المائية الحرّة ذات درجة حساسية عالية للتلّوث، مقابل 21.34% ذات درجة حساسية متوسطة . تعدّ المناطق الحضريّة و المناطق الفلاحية المنسقية هي أكثر المناطق حساسية للتلّوث.

الكلمات الدالة : الوادي، الخزان المائي، البيزومنتري، السحنة التّبّرية، نوعية المياه، حساسية المياه.

Abstract.

The zone of study takes part of the El-Oued wilaya, shared on a surface about 500Km². It is characterized by a set of the sand dunes of altitude varies between 64m and 100m. The surface of the zone of study is occupied by the dune massifs, Ergs, urban center, Ghouts, irrigated agricultural zones and zones of surface water.

During the last 30 years, the region of El-Oued knew an upwelling in the water levels of the surface water table. The consequences of this phenomenon are fatal for the man and the environment. We note the flooding of palm groves, the pollution of the surface water table, the deterioration of the living environment of the inhabitants and the progressive change in land use.

In this work, we led a hydrogeologic and hydrochemical study, allows to define the impact of the upwelling of the unconfined aquifer on the man and the environment, and evaluated the results of the solutions adopted to resolve this problem.

The study area is part of the aquifer system of the northern Sahara (SASS), the latter consists of three aquifers; an unconfined aquifer, and two confined aquifers (the Terminal Complex (TC) and the Continental Intercalary (CI)). The unconfined aquifer consists of sand, sandstone and sandy clays. Its Permeability ranges between 1.1×10^{-4} m/s to 2.6×10^{-4} m/s. The bedrock is clay, its depth oscillates between 40m and 70m, but their lateral boundaries are outside the study area.

Examination of piezometric maps, shows that the cause of upwelling is anthropological due to the infiltration of wastewater in urban and irrigation water from deep aquifers (CT), in agricultural areas. The piezometric map of May 2012, shows a decrease of groundwater level (of about 4 m), in the NE part, due to the pumping effect in the vertical drainage system of the city of El Oued. The waters of the unconfined aquifer are undrinkable, we refer to the Algerian standards for drinking water. They are poor quality for irrigation, more even treated wastewater is inappropriate for irrigation of agricultural land refer to international standards of irrigation water and World health organization (WHO).

The waters of the surface water table is dominated by evaporite facies as having origins; the dissolution of evaporites (gypsum and halite), mixing with the waters of deep aquifers (TC and CI), the base exchange and anthropological pollution.

The nitrates in the waters of the unconfined aquifer are generally higher than the standard recommended by WHO. Urban and agricultural areas irrigated from the water table, showing strong values, against the flooded Ghouts covered with reeds, the isolated areas and the discharge of the city of El Oued, showing low values.

The application DRASTIC method of vulnerability (Engel et al, 1996) shows that 78.66% of the surface of the shallow aquifer has a high vulnerability. The class of the average vulnerability has only 21.34% of the surface of the aquifer. Urban and agricultural areas irrigated by wells capturing terminal complex (TC) are most vulnerable.

Keywords: El-Oued, aquifer, piezometric, evaporite facies, water quality, vulnerability.

Résumé

Résumé.

La zone d'étude fait partie de la wilaya El-Oued, elle occupe une superficie d'environ 500Km². Elle est caractérisée par un ensemble des dunes de sables d'altitudes varie entre 64m et 100m. La surface de la zone d'étude est occupée par les massifs dunaires, les Ergs, les zones urbaines, les Ghouts, les zones agricoles irriguées et les zones d'eau libre.

Au cours des 30 dernières années, la région d'El-Oued a connu une remontée des eaux de la nappe libre. Les conséquences de ce phénomène sont néfastes pour l'homme et l'environnement. On note, le noyage des palmeraies, la pollution de la nappe libre, détérioration du cadre de vie des habitants et changement progressif de l'occupation des sols. Dans ce travail, nous avons mené une étude hydrogéologique et hydrochimique, permet de préciser l'impact de la remontée des eaux de l'aquifère libre sur l'homme et l'environnement, et d'évalué les résultats des solutions prises pour résoudre ce problème.

La zone d'étude fait partie au système aquifère du Sahara septentrional (SASS), ce dernier est constitué de trois aquifères; un aquifère libre, et deux aquifères captifs (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)). L'aquifère libre est constitué de sables, de grés et des argiles sableuses. Sa perméabilité oscille entre 1.1×10^{-4} m/s à 2.6×10^{-4} m/s. Le substratum est argileux, son profondeur oscille entre 40m et 70m, mais leurs limites latérales se trouvent hors la zone d'étude.

L'examen des cartes piézométriques, montre que la cause de la remontée des eaux est anthropique, due à l'infiltration des eaux usées sous les centres urbains et les eaux d'irrigation des aquifères profondes de CT, sous les zones agricoles. La mise en marche de réseau de drainage vertical, a provoqué la diminution de niveau piézométrique (d'ordre de 4 m), dans la partie NE, due à l'effet de pompage dans le réseau de drainage vertical de la ville d'El Oued. Les eaux de l'aquifère libre sont non potable, on référent aux normes algérienne pour l'eau potable. Elles sont de mauvaise qualité pour l'irrigation, en plus même les eaux usées épurées sont non convenable à l'irrigation des terres agricoles en référent aux normes internationale des eaux d'irrigation de FAO et aux normes de l'OMS.

Les eaux de l'aquifère libre sont dominées par les faciès évaporitiques, ayant comme origines; la dissolution des évaporites (gypse et halite), le mélange avec les eaux des nappes profondes (CT et CI), l'échange de base et les apports anthropiques (pollution).

Le taux de nitrates dans les eaux de l'aquifère libre est généralement supérieur à la norme recommandée par l'OMS. Les zones urbaines et les zones agricoles irriguées à partir de la nappe libre, affichant des valeurs fortes, par contre les Ghouts inondés recouverts de roseaux, les régions isolées et le rejet de la ville d'El Oued, affichant des valeurs faibles.

L'application de la méthode de vulnérabilité DRASTIC (Engel et Al, 1996) montre que 78.66% de la surface de l'aquifère superficiel présente une vulnérabilité forte. La classe de la vulnérabilité moyenne présente seulement 21.34% de la surface de l'aquifère. Les zones urbaines et les zones agricoles irriguées par des forages captant les nappes de complexe terminale sont les plus vulnérables.

Mots clés: El-Oued, aquifère, piézométriques, faciès évaporitiques, qualité eau, vulnérabilité.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE	1
 PARIE 01: GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE.	
1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.	3
1.1. Situation géographique.	3
1.2. Topographie d'El-Oued.	3
1.3. Occupation du sol dans la zone d'étude.	5
1.3.1. Carte d'occupation de sol 2010.	5
1.3.2. Évolution de l'occupation du sol dans la zone d'étude.	7
1.3. Cadre sociologique d'El-Oued.	10
1.4. Cadre économique d'El-Oued.	10
1.4.1. L'artisanat	10
1.4.2. Le commerce	10
1.4.3. L'industrie	11
1.4.4. L'agriculture et élevage.	11
1.5. Ressources hydriques.	12
1.5.1. L'alimentation en eau potable (AEP).	12
1.5.2. L'alimentation en eau pour l'irrigation(AEA).	13
1.5.3. L'alimentation en eau pour industrie (AEI).	13
2. CONTEXTE GEOLOGIQUE.	13
2.1. Cadre tectonique et structural.	13
2.2. Cadre géologique régionale.	14
2.3. Cadre géologique de la zone d'étude.	15
2.3.1. Le Secondaire (Crétacé).	16
2.3.2. Le tertiaire.	18
2.3.3. Le Quaternaire.	20
3. CADRE CLIMATOLOGIQUE.	22
3.1. Introduction.	22
3.2. Précipitation.	22
3.2.1. Précipitations annuelles.	22
3.2.2. Précipitations moyenne mensuelles.	23
3.3. Température.	23
3.4. Le Vent.	24
3.5. L'humidité.	24
3.6. La durée d'insolation.	25
3.7. Diagramme Pluvio-thermique.	25
3.8. Diagramme d'Emberger.	26
3.9. Evapotranspiration.	26
3.9.1. Evapotranspiration potentielle (ETP).	27
3.9.2. Evapotranspiration réelle (ETR).	27
3.10. Bilan hydrique.	28
4. CONCLUSION.	29

PARITIE 02: ETUDE HYDROGEOLOGIQUE.

1. PRESENTATION DE SYSTEME AQUIFERE DE SAHARA SEPTENTRIONAL.	30
1.1. Extension de système aquifère de Sahara septentrional.	30
1.2. Définition des nappes aquifères du SASS.	31
1.2.1. Nappe libre.	31
1.2.2. Nappe du complexe terminal (CT).	32
1.2.3. Nappe du Continental Intercalaire (CI).	34
2. L'EXPLORATION GEOPHYSIQUE DE L'AQUIFERE LIBRE D'EL-OUED.	36
2.1. Aspects théoriques de la méthode de sondage par prospection électrique.	36
2.2. Méthodes de prospection électrique.	37
2.2.1. Le traîné électrique.	39
2.2.2. Le sondage électrique vertical.	39
2.2.3. Interprétation des sondages électriques verticaux.	40
2.3. Etalonnage des sondages électriques à l'aide des forages.	41
2.4. Interprétation des Coupes géoélectriques.	42
2.5. Cartes du substratum argileux de la nappe libre d'El-Oued.	47
3. APPORTS D'ANALYSE DES LOGS DES FORAGES D'EAU.	48
3.1. Généralités sur les forages d'eau.	48
3.1.1. Les tubages pleins.	49
3.1.2. La crêpine.	49
3.1.3. Le massif filtrant.	50
3.2. Les forages hydrauliques dans le Sahara septentrional.	51
3.2.1. Considérations générales.	51
3.2.2. Règlements sur les forages.	51
3.2.3. Forages de Continental Intercalaire (CI).	51
3.2.4. Forages au Complexe Terminal (CT).	55
3.3. Récolte et analyse des données des forages.	56
3.4. Interprétations des coupes hydrogéologiques réalisées dans la zone d'étude.	57
3.5. Lithostratigraphie des nappes aquifères d'El-Oued	63
4. ETUDE GEOTECHNIQUES DE LA ZONE NON SATUREE.	64
4.1. Analyses granulométriques de la zone non saturée.	64
4.2. Répartition des fins dans la zone non saturée.	66
4.3. Masse volumique des sols de la zone non saturée.	66
4.4. Analyses chimiques de la zone non saturée.	67
4.4.1. Les carbonate dans la zone non saturée.	68
4.4.2. Les sulfate dans la zone non saturée.	68
4.4.3. Les insolubles dans les sols de la zone non saturée.	69
4.4.4. Le pourcentage de NaCl dans la zone non saturée.	70
4.5. Essai de cisaillement rectiligne.	70

Table des matières.

5. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE LIBRE.	71
5.1. Mesure de perméabilité par la méthode de Muntz.	71
5.1.1. Principe de mesure.	71
5.1.2. Carte de perméabilité de l'aquifère libre.	73
5.2. Essais de pompage dans l'aquifère libre d'El Oued.	74
5.2.1. Essai de pompage à El-Oued.	75
5.2.2. Essai de pompage à Kouinine.	76
5.2.3. Essai de pompage à Nakhla.	76
5.2.3. Essai de pompage à Ourmes.	77
5.3. Comparaison des résultats de mesure de perméabilité.	78
6. PIEZOMETRIE DE L'AQUIFERE LIBRE D'EL OUED.	78
6.1. Le réseau de surveillance d'Oued Souf.	78
6.2. Historique de la remontée des eaux dans la zone d'étude	79
6.3. Compagnes de mesure réalisée par BG.	81
6.3.1. Piézométrie de la nappe libre en mars-avril 2001.	81
6.3.2. piézométrie de la nappe phréatique en septembre 2001.	82
6.3.3. variations du niveau piézométrique entre septembre 2001 et mars-avril 2001.	82
6.3.4. piézométrie de la nappe phréatique en avril 2002.	86
6.4. Piézométrie de juin 2010.	88
6.5. Piézométrie d'avril 2012.	89
7. CONCLUSION.	90

PARTIE 03: ETUDE HYDROCHIMIQUES.

1. QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE LIBRE.	91
1.1. Matériels et méthode.	91
1.2. Faciès chimiques des eaux de la nappe libre.	91
1.2.1. Compagne de juin 2010.	92
1.2.2. Compagne de mai-juin 2012.	92
1.2.3. Compagne de juin 2015.	93
1.3. La norme algérienne pour l'eau potable.	93
1.4. Paramètres physico-chimiques	95
1.4.1. Température de l'eau.	95
1.4.2. Le potentiel d'hydrogène (pH).	97
1.4.3. La conductivité électrique (CE).	97
1.4.4. Le résidu sec.	98
1.4.5. La dureté.	98
1.4.6. Le Calcium (Ca^{+2}).	99
1.4.7. Le Magnésium (Mg^{+2}).	99
1.4.8. Le Sodium (Na^+).	100
1.4.9. Le Potassium (K^+)	101

Table des matières.

1.4.10. Les Chlorures (Cl ⁻)	101
1.4.11. Les sulfates (SO ₄ ⁻²).	102
1.4.12. Les bicarbonates (HCO ₃ ⁻) et de carbonate (CO ₃ ⁻²).	102
1.5. Les substances indésirables	103
1.5.1. Les nitrates (NO ₃ ⁻).	103
1.5.2. Le fluor (F ⁻).	104
1.5.3. Les métaux lourds.	104
1.6. Qualité microbiologique de l'eau.	105
1.7. Aptitude des eaux à l'irrigation.	106
1.7.1. Conductivité.	107
1.7.2. La méthode de Richards :	107
1.7.3. Classification de Wilcox.	108
1.8. Qualité des eaux usées et sa possibilité d'utilisée en agriculture.	109
1.8.1. Gestion des eaux usées dans la zone d'étude.	109
1.8.2. Présentation du lagunage aéré.	112
1.8.3. Qualité des eaux usées épurées destinées à l'irrigation.	112
2. QUALITE DES EAUX DE COMPLEXE TERMINAL ET DE CONTINENTAL INTERCALAIRE.	115
2.1. Faciès chimiques des eaux de CT et de CI.	116
2.2. Étude de potabilité des eaux de CT et CI.	117
2.2.1 La Température.	117
2.2.2. La Conductivité électrique.	118
2.2.3. Potentiel d'Hydrogène (pH).	118
2.2.4. Calcium (Ca ⁺²).	118
2.2.5. Magnésium (Mg ⁺²).	119
2.2.6. Le Sodium (Na ⁺).	119
2.2.7. Le Potassium (K ⁺).	120
2.2.8. Le Sulfate (SO ₄ ⁻²)	120
2.2.9. Le Chlorure (Cl ⁻).	120
2.2.10. Bicarbonates (HCO ₃ ⁻).	121
2.2.11. Le fluor (F ⁻) dans les eaux de CT et de CI.	121
2.2.12. Les nitrate dans les eaux de CT et de CI.	122
2.3. L'aptitude des eaux de CT et de CI et l'irrigation.	122
3. ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX DE LA NAPPE LIBRE.	124
3.1. Analyse en Composantes Principales (A.C.P.).	124
3.2. La matrice de corrélation des éléments chimiques.	125
3.3. Etude des rapports caractéristiques.	125
3.3.1. Couple Na ⁺ - Cl ⁻ .	126
3.3.2. Couple Ca ⁺² - SO ₄ ⁻² .	126
3.3.3. Couple Na ⁺ - SO ₄ ⁻² .	127
3.3.4. Couple Ca ⁺² -Cl ⁻ .	127

Table des matières.

3.3.5. Couple SO_4^{2-} - Cl^- .	127
3.3.6. Couple Na^+ - Ca^{+2} .	128
3.3.7. Couple $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ - Conductivité.	128
3.4. Etude de l'indice de saturation.	129
3.5. Phénomène d'échange de base dans la nappe libre.	130
4. CARTOGRAPHIE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE.	131
4.1. Conductivité électrique	131
4.1.1. Carte de conductivité électrique d'avril 2002.	131
4.1.2. Carte de conductivité électrique de juin 2010.	133
4.2. Les nitrates dans les eaux de la nappe libre.	134
4.2.1. Carte de nitrates d'avril 2002.	134
4.2.2. Carte de nitrates dans la nappe libre en juin 2010.	136
4.2.3. Carte de nitrates de mai 2012.	136
5. CONCLUSION.	137

PARTIE 4 : VULNERABILITE DES EAUX DE L'AQUIFERE LIBRE A LA POLLUTION

1. CONCEPT DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES.	139
2. PRESENTATION DES METHODES DE VULNERABILITE DRASTIC ET GOD.	139
2.1. La méthode DRASTIC.	139
2.2. La méthode GOD.	143
2.3. Mesures et préparation des données.	144
2.3.1. La profondeur d'eau de la nappe.	144
2.3.2. La recharge de la nappe.	145
2.3.3. La lithologie de l'aquifère.	145
2.3.4. La topographie d'El-Oued.	145
2.3.5. La nature de la zone non saturée.	145
2.3.6. La conductivité hydraulique de l'aquifère.	145
2.4. Cartographie des paramètres de vulnérabilité et comparaison des cartes.	145
3. DETERMINATION DES COTES DES PARAMETRES DRASTIC ET GOD.	146
3.1. Détermination de côte des paramètres des méthodes DRASTIC.	146
3.1.1. Profondeur de la surface de la nappe.	146
3.1.2. Recharge de la nappe.	147
3.1.3. Nature de la zone saturée.	148
3.1.4. Nature du sol.	149
3.1.5. Topographie d'El-Oued.	149
3.1.6. Nature de la zone non saturée.	149
3.1.7. Conductivité hydraulique de l'aquifère libre d'El-Oued.	149
3.1. Détermination de côte des paramètres des méthodes GOD.	150
4. CARTES DE VULNERABILITE DRASTIC ET GOD DE L'AQUIFERE LIBRE.	151
4.1. Cartes de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère libre d'El-Oued.	151

Table des matières.

4.2. Cartes de vulnérabilité GOD de l'aquifère libre d'El-Oued.	152
5. VALIDATION ET COMPARAISON DES METHODES VULNERABILITES DRASTIC ET GOD.	153
5.1. La carte de vulnérabilité DRASTIC.	154
5.2. La carte de vulnérabilité GOD.	155
6. CONCLUSION.	155
CONCLUSION GENERALE.	157
RECOMMANDATIONS	159
BIBLIOGRAPHIE.	160

L I S T E D E S F I G U R E S

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude dans la wilaya d'El-Oued.	3
Figure 2 : Situation des communes dans la zone d'étude.	4
Figure 3 : Topographie de la zone d'étude à l'El-Oued.	4
Figure 4: Carte d'occupation de sol de région d'El-Oued (OSS 2010 modifiée).	6
Figure 5 : Photo satellite de la zone d'étude en 1987.	7
Figure 6: Photo satellite de la zone d'étude en 2000.	8
Figure 7: Photo satellite de la zone d'étude en 2005.	9
Figure 8: Photo satellite de la zone d'étude en 2009.	9
Figure 9 : Coupe géostructurale transversale régionale du Sahara (WEC, 2007).	14
Figure 10: Cartes géologiques de l'Algérie (OSS 2003).	15
Figure 11: Carte géologique de la zone d'étude (extrait de la carte de NO Afrique 1976).	16
Figure.12 : Colonne stratigraphique de deux forages de CI existant dans la zone d'étude.	19
Figure13: Colonne stratigraphique de forage CT dans la zone d'étude	22
Figure 14: Histogramme des variations annuelles des précipitations.	22
Figure 15: Histogramme de précipitations moyennes mensuelles (1978-2010).	23
Figure 16: Histogramme des températures moyennes mensuelles (1978-2010).	23
Figure 17: Histogramme de la vitesse moyenne mensuelle de vent (1978-2010).	24
Figure 18: Histogramme d'humidité moyenne mensuelle (1978-2010) d'El Oued.	24
Figure 19: Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle (1978-2010).	25
Figure 20: Courbe Pluvio-thermique d'El-Oued (1978-2010)	25
Figure 21: Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1978-2010)	26
Figure 22: ETP et ETR (en mm) calculée par la méthode de Thorntwaite (1978/2010).	27
Figure 23: Etat de réserve facilement utilisable et de déficit agricole d'El-Oued.	28
Figure 24: Coupe hydrogéologique des aquifères du SASS (UNESCO 1972).	31
Figure 25: Présentation des formations des nappes de complexe terminal à El Oued.	32
Figure 26: Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS 2003).	33
Figure 27 : Carte d'extension des Systems Aquifères (CT et CI) en Algérie	35
Figure 28 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).	35
Figure 29: Quadripôle de Schlumberger	38
Figure 30: Les matériels de sondages électriques.	38
Figure 31: Schéma de l'abaque à deux terrains.	41
Figure 32 : Schéma des abaques à trois terrains.	41
Figure 33: Carte de positionnement des sondages électriques verticaux et des coupes géoélectriques dans la zone d'étude.	42
Figure 34 : Coupe géoélectrique N°1.	43
Figure 35: Coupe géoélectrique N°2.	44
Figure 36: Coupe géoélectrique N°3.	44
Figure37: Coupe géoélectrique N°4.	45
Figure 38: Coupe géoélectrique N°5.	46
Figure 39: Coupe géoélectrique N°6.	47

Liste des figures.

Figure 40: Carte du substratum argileux de la nappe libre d'El-Oued dans la zone d'étude.	48
Figure 41: Les types des crépines.	50
Figure 42: Emplacement du massif filtrant dans le forage.	51
Figure 43: Positionnement des coupes géologiques dans la zone d'étude.	57
Figure 44: Coupe hydrogéologique N°1.	58
Figure 45: Coupe hydrogéologique N°2.	59
Figure 46: Coupe hydrogéologique N°3.	60
Figure 47: Coupe hydrogéologique N°4.	60
Figure 48: Coupe hydrogéologique N°5.	62
Figure 49: Colonne lithostratigraphique et répartition des aquifère dans la zone d'étude.	63
Figure 50: Inventaire des points d'échantillonnage pour l'étude géotechnique.	64
Figure 51: Les courbes granulométriques de quelque échantillon de la zone non saturée.	65
Figure 52: Histogramme de la composition granulométrique de la zone non saturée.	65
Figure 53: Répartition des fins dans la zone non saturée.	66
Figure 54: Répartition de masse volumique apparente des sols dans la zone non saturée.	67
Figure 55: Histogramme de résultats des analyses chimiques de la zone non saturée.	67
Figure 56: Répartition des carbonates dans la zone non saturée.	68
Figure 57: Carte des répartitions des sulfates dans la zone non saturée.	69
Figure 58: Carte des répartitions des insolubles dans la zone non saturée.	69
Figure 59: Carte des répartitions de NaCl dans la zone non saturée.	70
Figure 60: Courbes des essais de cisaillement rectiligne des sols de la zone non saturée.	71
Figure 61 : Dispositif de H. Darcy.	72
Figure 62 : Infiltromètre Muntz pour une mesure de coefficient de perméabilité K.	72
Figure 63: Carte de perméabilité des sols de l'aquifère superficielle d'El-Oued	74
Figure 64: Carte de positionnement des sites des essais de pompage.	75
Figure 65: Essai de pompage long duré à El-Oued.	75
figure 66: Essai de pompage long duré à Kouinine.	76
figure 67: Essai de pompage long duré à Nakhla.	77
figure 68: Essai de pompage long duré à Ourmes.	77
Figure 69: Inventaire des forages de drainage vertical de la ville d'El-Oued (ONA 2006).	79
Figure 70: Etat des Ghouts d'El Oued en 2014 (Remini, 2006 modifié).	81
Figure 71: Carte piézométrique de la nappe phréatique en mars-avril 2001	83
Figure 72: Carte piézométrique de la nappe phréatique en septembre 2001	84
Figure 73: Carte des variations du niveau piézométrique entre sept et mars-avril 2001.	85
figure 74: Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril 2002.	87
Figure 75: Carte piézométrique de la zone d'étude de juin 2010.	88
Figure 76: Carte piézométrique de la zone d'étude d'avril 2012.	89
Figure 77: Diagramme de Piper des eaux de la nappe libre (juin 2010).	92
Figure 78: Diagramme de Piper des eaux de la nappe libre (mai-juin 2012).	93
Figure 79: Diagramme de Piper des eaux de la nappe libre (mars 2015).	94
Figure 80: Histogramme de variations de la température des eaux de la nappe libre.	95

Liste des figures.

Figure 81: Histogramme de variations du pH des eaux de la nappe libre.	97
Figure 82: Histogramme de variations de la conductivité des eaux de la nappe libre.	98
Figure 83: Histogramme de variations du résidu sec des eaux de la nappe libre.	98
Figure 84: Histogramme de variations de la dureté des eaux de la nappe libre.	99
Figure 85: Histogramme de variations du calcium de la nappe libre.	99
Figure 86: Histogramme de variations du magnésium de la nappe libre.	100
Figure 87: Histogramme de variations du sodium de la nappe libre.	100
Figure 88: Histogramme de variations du potassium de la nappe libre.	101
Figure 89: Histogramme de variations du chlorure de la nappe libre.	101
Figure 90: Histogramme de variations des sulfates dans la nappe libre.	102
Figure 91: Histogramme de variations du bicarbonate dans la nappe libre.	103
Figure 92 : Histogramme de variations des nitrates dans la nappe libre.	103
Figure 93: Histogramme de variations de fluor dans la nappe libre (Laouini, 2009).	104
Figure 94: Histogramme de variations de Mn, Pb et Zn dans la nappe libre.	105
Figure 95: Le diagramme de Richards des eaux de la nappe libre de 2010, 2012 et 2015.	108
Figure 96: Le diagramme de Wilcox des eaux de la nappe libre d'El Oued (juin2010).	109
Figure 97 : Schéma directeur d'assainissement des eaux usées et pluviales de Souf	111
Figure 98 : Histogrammes de variation des paramètres physico-chimiques des eaux brutes et traitées dans la station de Kouinine (2012).	115
Figure 99: Le diagramme de Piper des eaux de la nappe CT(2012).	116
Figure 100: Le diagramme de Piper des eaux de la nappe CI(2012).	117
Figure 101: Le diagramme de Richards des eaux de la nappe CT.	123
Figure 102: Le diagramme de Richards des eaux de la nappe CI.	123
Figure 103. Projection des variables sur le plan factoriel 1-2.	125
figure 104: Relation $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$	126
figure 105: Relation $\text{Ca}^{+2} - \text{SO}_4^{2-}$.	126
figure 106: Relation $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$.	127
figure 107: Relation $\text{Ca}^{+2} - \text{Cl}^-$.	127
figure 108: Relation $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$.	128
figure 109: Relation $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{+2}$.	128
figure 110: Relation $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ - Conductivité.	129
Figure 111: Variation de l'indice de saturation des minéraux (mai-juin 2012).	130
Figure 112: Carte de conductivité électrique de la nappe libre (avril 2002) (BG, 2002).	132
Figure 113: Carte de conductivité électrique en $\mu\text{S}/\text{cm}$ de juin 2010.	133
Figure 114: Carte de conductivité électrique en $\mu\text{S}/\text{cm}$ de juin 2012.	134
Figure 115: Carte des taux de nitrate dans la nappe libre en avril 2002.	135
Figure 116: Carte des taux de nitrate dans la nappe libre en juin2010.	136
Figure 117: Carte des taux de nitrate dans la nappe libre en mai 2012.	137
Figure.118 : Illustration des paramètres DRASTIC (Richard Franklin and Al, 2009)	141
Figure 119: Carte des côtes de profondeur du plan d'eau suivant la méthode DRASTIC.	146
Figure 120: Carte de la recharge de la nappe libre d'El-Oued (BG, 2004).	148

Liste des figures.

Figure 121: Carte des perméabilités de l'aquifère libre d'El-Oued	150
Figure 122 : Carte de profondeur de l'aquifère libre suivant la méthode GOD.	151
Figure 123: Carte de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère libre d'El-Oued.	152
Figure 124 : Carte de vulnérabilité GOD des eaux de l'aquifère libre d'El-Oued à la pollution	153
Figure 125: Carte des taux de nitrate dans la nappe phréatique en mai 2012.	154

LISTE DES TABLEAUX.

Tableau 1: Caractéristiques géographiques de station climatique (OMN : 2010).	22
Tableau 2: Précipitations moyenne mensuelles d'El Oued (1978/2010).	23
Tableau 3: Températures moyennes mensuelles d'El-Oued (1978/2010).	23
Tableau 4: Vitesses moyenne des vents mensuels en (m/s) (1978/2010).	24
Tableau 5: Humidité relative moyenne mensuelle (1978 – 2010).	24
Tableau 6: La durée d'insolation moyenne mensuelle (1978 – 2010).	25
Tableau 7: Données des précipitations et des températures moyennes	25
Tableau 8: Bilan hydrique de la station de Guemar (1978/ 2010) par la méthode de THORNTWAITE.	28
Tableau 9 : Plage de variation de résistivité des roches	40
Tableau 10 : Plage de variation de résistivité des eaux.	40
Tableau 11 : Résistivités des formations géologiques dans la région d'El-Oued.	42
Tableau 12: Programme de boue pour les forages CI.	53
Tableau 13: Répartition des faciès chimiques de la compagnie de juin 2010.	92
Tableau 14: Répartition des faciès chimiques de la compagnie de mai-juin 2012.	93
Tableau 15: Normes algérienne pour l'eau minérale naturelle et l'eau de source.	96
Tableau 16: Les paramètres microbiologiques des eaux de la nappe libre	106
Tableau 17 : Variations des températures dans les eaux de CT et de CI.	117
Tableau 18 : Variations de la CE dans les eaux de CT et de CI.	118
Tableau 19 : Variations du Ph dans les eaux de CT et de CI.	118
Tableau 20 : Les teneurs de Calcium Ca^{2+} dans les eaux de CT et de CI.	119
Tableau 21: Les teneurs de Magnésium Mg^{2+} dans les eaux de CT et de CI.	119
Tableau 22: Les teneurs de Sodium Na^+ dans les eaux de CT et de CI.	119
Tableau 23: Les teneurs de Potassium (K^+) dans les eaux de CT et de CI.	120
Tableau 24 : Les teneurs de Sulfate SO_4^{2-} dans les eaux de CT et de CI.	120
Tableau 25 : Les teneurs de Chlorure Cl^- dans les eaux de CT et de CI.	121
Tableau 26 : Les teneurs de Sodium Na^+ dans les eaux de CT et de CI.	121
Tableau 27 : Les teneurs de fluor (F^-) dans les eaux de CT et de CI.	122
Tableau 28: Les teneurs de Nitrate (NO_3^-) dans les eaux de CT et de CI.	122
Tableau 29: Corrélation facteurs–variables.	124
Tableau 30 : La matrice de corrélation des éléments chimiques.	125
Tableau 31: Indice d'échange de base dans la nappe libre (mai-juin 2012).	130
Tableau 32: Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC et	142
Tableau 33 : Classes de la vulnérabilité DRASTIC (Engel et al, 1996).	143
Tableau 34 : Côtes accordées aux paramètres de la méthode GOD (Foster, 1987).	144
Tableau 35: Classes de la vulnérabilité GOD (d'après Foster, 1987)	144
Tableau 36. Les côtes des paramètres de vulnérabilité de GOD.	151
Tableau 37: Coïncidence entre les concentrations en nitrates et les différentes classes de vulnérabilité de la méthode DRASTIC.	156

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'indépendance l'accroissement démographique, le développement agricole et industriel dans le Sahara ont entraîné une augmentation considérable de la demande en eau. Mais la rareté des précipitations, nécessite le recours aux ressources en eau souterraines.

Dans la région d'El-Oued Souf, les prélèvements des eaux de complexe terminal (CT) et de continentale intercalaire (CI) augmentent chaque année (1134 Hm³ en 1999, 1566 Hm³ en 2010 et 1722 Hm³ en 2012), ses quantités d'eaux prélevées sont rejetées directement dans la nappe superficielle sans aucun traitement.

Au cours des 30 dernières années, la région d'El-Oued Souf a connu une remontée des eaux de la nappe superficielle. Les conséquences de ce phénomène sont néfastes pour l'homme et l'environnement. La conséquence est le noyage des palmeraies et leurs asphyxies, le noyage des fosses domestiques et la propagation de la pollution bactériologique dans la nappe, et contamination des eaux par les nitrates d'origines domestique et agricole. Aussi la remontée provoque la forte minéralisation d'eau de la nappe libre, conséquence de l'évaporation intense à partir des plans d'eau libre et la dissolution des sels qui sont l'origine d'affaissement des terrains à travers la région d'El-Oued. La remontée a conduit également au changement progressif de l'occupation des sols.

Ainsi la zone touchée par la remontée des eaux s'étend sur une superficie de 3 000 km². Sur laquelle habitent 380 000 habitants, qui sont répartis sur 18 communes. Les causes de la remontée des eaux de la nappe superficielle sont multiples; le pompage intensif des nappes profondes (Complexe terminal et Continental intercalaire) à des fins agricoles et d'approvisionnement en eau potable des populations. Ce phénomène est aggravé par l'insuffisance des infrastructures d'assainissement dans la Wilaya d'El-Oued et l'absence d'exutoire due à la faiblesse de la pente du relief.

Le présent travail a pour but de répondre aux préoccupations suivantes:

- Quels sont les caractéristiques climatologiques, géologiques et socio-économiques de la région ?
- Quel est la géométrie de l'aquifère libre d'El-Oued ?
- Quels sont les relations existantes entre l'aquifère superficiel et les aquifères profonds ?
- Quel est la qualité des eaux souterraines, vis-à-vis aux normes algérienne et de l'OMS ?
- Quel est la qualité des eaux usées traitées et leurs possibilités d'utilisation dans l'agriculture ?
- Quels sont les origines de la minéralisation des eaux de la nappe libre ?

Introduction générale

- Quels sont les différents polluants chimiques existant dans l'eau ainsi que leurs origines?
- Quel est le degré de vulnérabilité de l'aquifère libre ?
- Quels sont les paramètres qu'influencent le plus sur la vulnérabilité?
- Quels sont les recommandations qu'il faut adoptés pour résoudre le problème de la remontée des eaux et mieux gérer les ressources hydriques dans la région ?

Le travail proposé est structuré selon quatre parties:

Dans la **Première Partie**, nous présentons des généralités sur la zone d'étude, relatives à la situation géographique, à l'occupation de sol, aux caractéristiques socio-économiques de la région, à la géologie et à la climatologie.

Dans la **Deuxième Partie**, nous présentons une étude hydrogéologique de la zone d'étude, en commençant par la présentation et la localisation de la zone d'étude dans le SASS, puis par l'identification de l'aquifère libre en utilisant les sondages électriques verticaux et l'analyse des logs stratigraphiques des forages hydrauliques existants dans la région. Egalement une étude géotechnique sur la zone non saturée qu'est l'intermédiaire entre les phénomènes de surface (activités anthropiques, facteurs climatiques etc.) et la nappe a été menée en, de plus étude hydrodynamique pour déterminer la répartition spatial des paramètres hydrodynamiques dans l'aquifère et en fin nous avons analysé la piézométrie de la nappe et son évolution dans le temps et dans l'espace.

La **Troisième Partie**, est consacrée à l'hydrochimie où nous avons évalué les qualités physico-chimiques et biologiques des eaux de différents aquifères d'El Oued par apport à la norme algérienne et les normes de l'OMS, ainsi que son aptitude à l'irrigation. L'origine de la minéralisation des eaux de la nappe libre est constitué un passage obligatoire dans toute étude hydrochimique car elle permet de comprendre l'interaction eau roche dans l'aquifère, les mélanges avec les eaux des aquifères profonds et influence des facteurs anthropiques sur la qualité des eaux. Et en fin la cartographie des paramètres de pollution et leurs évolution dans le temps.

La **Quatrième Partie**, est consacrée à l'étude de vulnérabilité à la pollution des eaux de l'aquifère libre en appliquant deux méthodes DRASTIC et GOD. Le test de validation à permis de favoriser la méthode qui présente un fort pourcentage de coïncidence entre cette dernière et la carte de nitrates.

A l'issue de ce travail nous présentons une **Conclusion générale** et des **Recommandations** faisant sortir les résultats de l'étude et à prendre en considération.

Partie 1:

Généralités sur la zone d'étude

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.

1.1. Situation géographique.

La wilaya d'El-Oued (Fig.1) est située au Sud Est algérien à 500 Km d'Alger, elle est limitée par les wilayas de Biskra, Khencela et Tébessa au Nord, Djelfa au Nord-Ouest, Ouargla au Sud et Sud-ouest et la Tunisie à l'Est. Elle occupe une superficie de 44586 km², avec une population de 750 840 habitants (estimation fin 2013) répartie à travers 30 communes regroupées dans 12 daïras.

La zone d'étude (Fig.2) fait partie de la wilaya El-Oued, étendue sur neuf communes (El-Oued, Kouinine, Ourmes, Trifaoui, Oued Al Alenda, Robbah, Nekhla, Ogla et Bayada) Elle occupe une superficie d'environ 500Km² et se situe entre les coordonnées UTM : X = 290000 E/315000 E, et Y = 3680000 N/3700000 N.

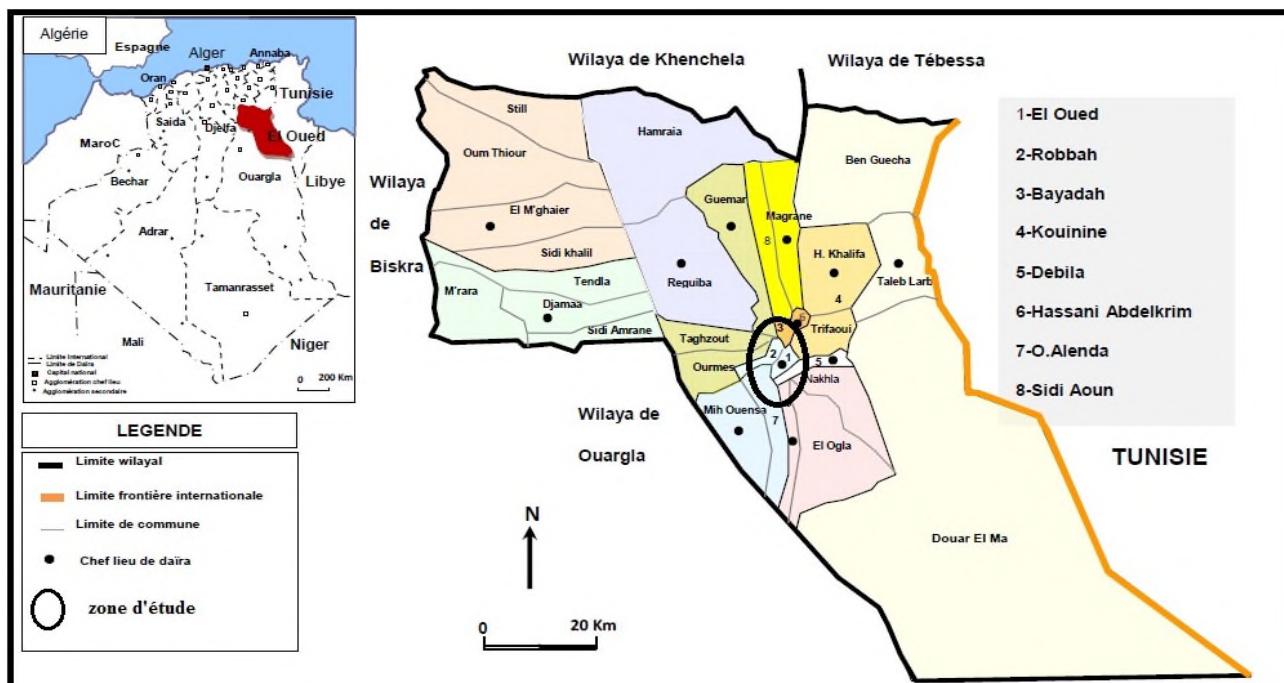


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude dans la wilaya d'El-Oued.

1.2. Topographie d'El-Oued.

La zone d'étude fait partie du grand Erg oriental, qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable d'origine continentale d'altitudes oscillantes entre 64m et 100m (Cornet, 1964).

La pente de la zone d'étude(Fig.3) est très faible oscille entre 0.2% à 1.5%, comme titre d'exemple nous donnerons les valeurs de pente dans quelques points sur la carte :(A =0.8%), (B = 0.2%) (C= 0.75%), (D = 1.5%) et (E=0.3%). Elle est généralement orienté Sud-Nord, avec des dépressions dans le centre ville d'El-Oued aux niveaux de ; chott et hôtel Louss. Il faut signaler l'existence dans la zone d'étude des « ghout » (entonnoirs artificiels creusés par les habitants pour planter les palmiers et les légumes).

Partie 1: Généralités sur la zone d'étude.

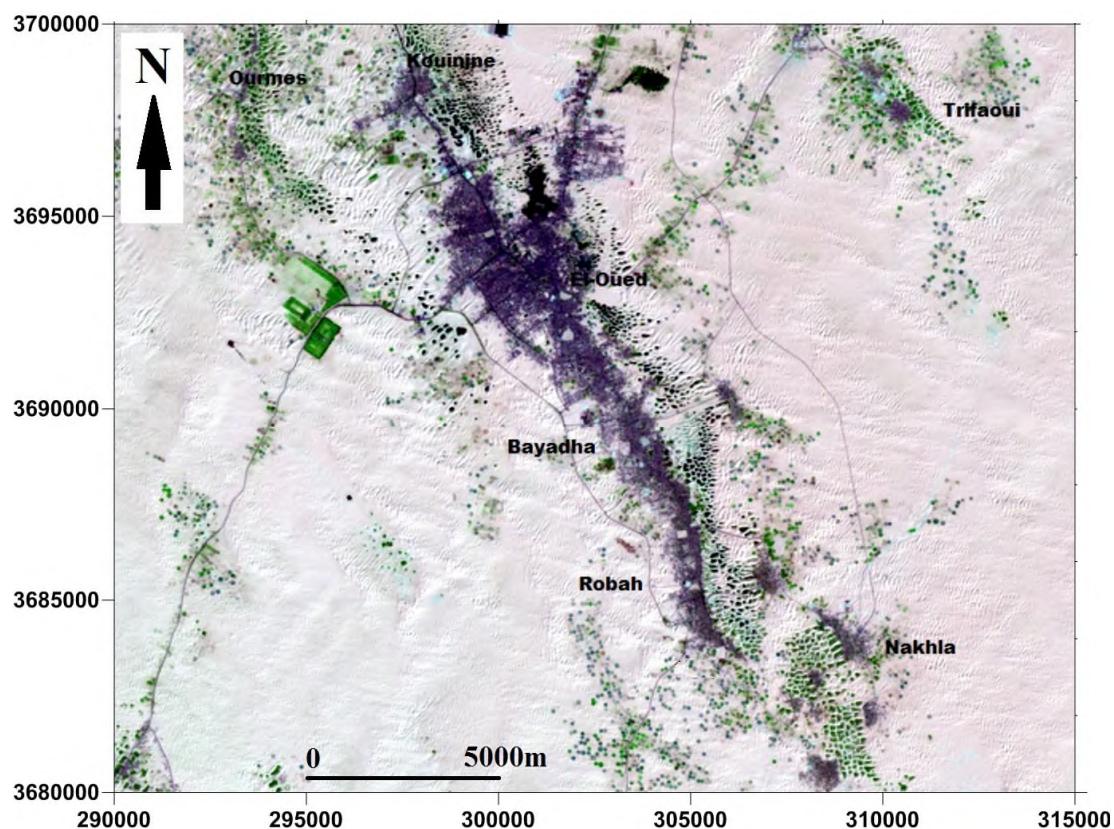


Figure 2 : Situation des communes dans la zone d'étude.

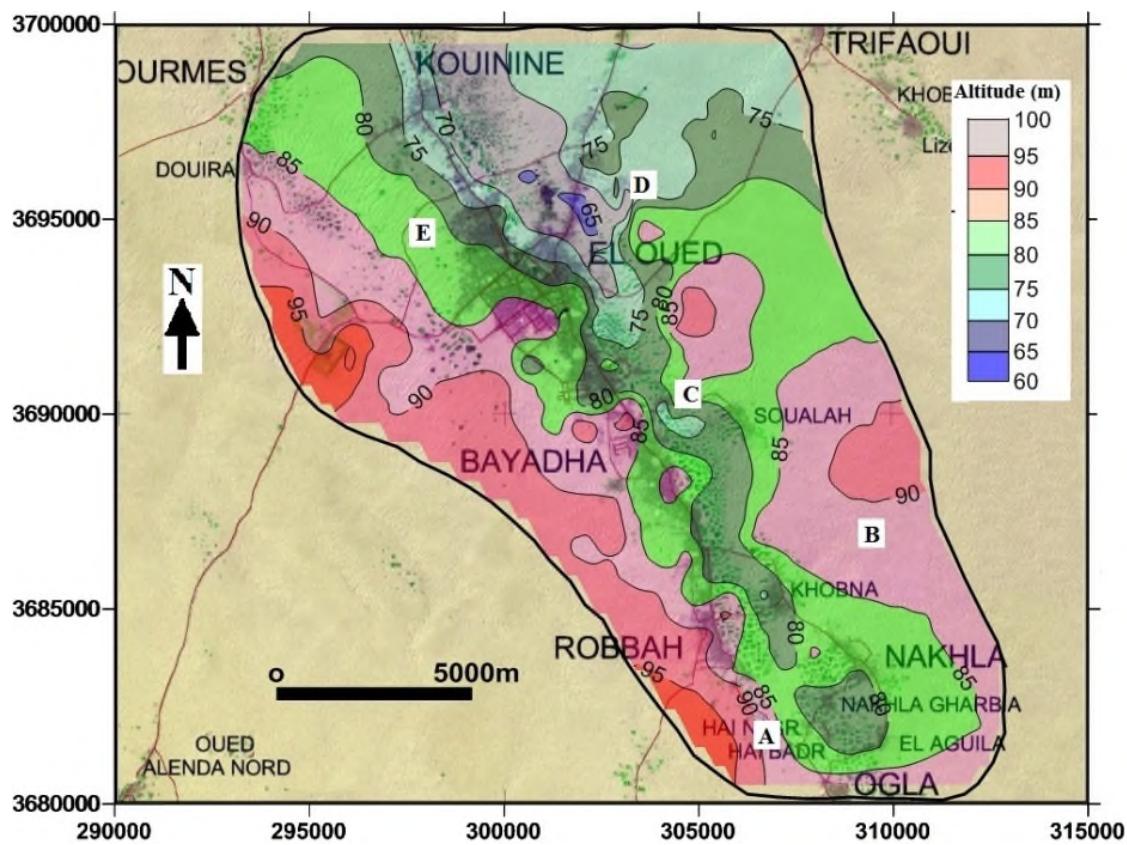


Figure 3 : Topographie de la zone d'étude à l'El-Oued.

1.3. Occupation du sol dans la zone d'étude.

1.3.1. Carte d'occupation de sol 2010.

La zone d'étude qui fait partie de ce qu'on appelle le Souf, est située dans une mer de sable de couleur jaune ocre, issue de dépôts quaternaires (Cornet 1964). D'après la carte d'occupation du sol (OSS 2010) (Fig.4), la surface de la zone d'étude est occupée par :

- **Les massifs dunaires** : ce sont des agglomérations de sables éoliens forment des collines, leurs altitude moyenne de 80 m, le plus "haut sommet" du Souf est une dune de 127 m située à 2 km au sud d'Amiche.
- **Les Ergs** : les ergs sont des massifs dunaires stables. Ils sont constitués par le sable que le vent arrache aux regs et aux hamadas. Paradoxalement, l'eau y abonde en profondeur, assurant la cohésion des grains de sable et la stabilité des lignes générales du relief. Cette eau est parfois celle des précipitations qui provoquent alors le développement brusque d'une végétation herbacée, souvent éphémère.
- **Les zones urbaines** : le dynamisme économique et démographique de la ville fait progresser le tissu urbain dans toutes les directions, essentiellement le long de l'axe routier nord-sud, réalisant une conurbation linéaire de 18 km dont les limites se confondent avec Kouinine au Nord et Bayadha au Sud, on ajoute aussi quelques agglomérations isolées de faible population: Obla, Nakhla, Khobna, Trifaoui et Ourmes.
- **Les Ghouts** : L'appellation Ghout signifie « cuvette » et symbolise la forme prise par les palmeraies traditionnelles de la Wilaya de Oued Souf. Ce système agraire ingénieux consiste en effet à aller chercher l'eau directement dans la nappe phréatique de la région en plantant les palmiers de telle sorte que les racines des arbres atteignent la nappe phréatique et s'alimentent ainsi sans recours à un système d'irrigation. Les Ghouts de Oued Souf sont d'un genre unique de par le monde, ils sont classés comme organisation ingénieuse au patrimoine agricole universel par la FAO. Ils sont un pôle qui attire bon nombre de passants et de touristes, tant ce site naturel saharien est captivant.
- **Les zones agricoles irriguées** : Ce sont des surfaces cultivées irriguées intensivement par des pivots en parcelles circulaires, de petit diamètre (une dizaine de milliers de parcelles de

Partie 1: Généralités sur la zone d'étude.

40 à 100 m de diamètre inventoriée), à cette classe ont été alloués : maraîchage, céréales et pommes de terre. Ces parcelles sont souvent mélangées avec des oliveraies. Dans la région en effet, et alors que les Ghouts forment une base d'irrigation quasi invariante à l'échelle de quelques années, les pivots d'irrigation constituent une structure extrêmement volatile et instable ; des centaines, de pivots peuvent apparaître ou disparaître en l'espace de une, deux ou trois années (OSS 2010).

- **Les zones d'eau libre :** ce sont des dépressions où les eaux d'irrigation et d'assainissement se convergent, ces plans d'eau sont souvent très salés.

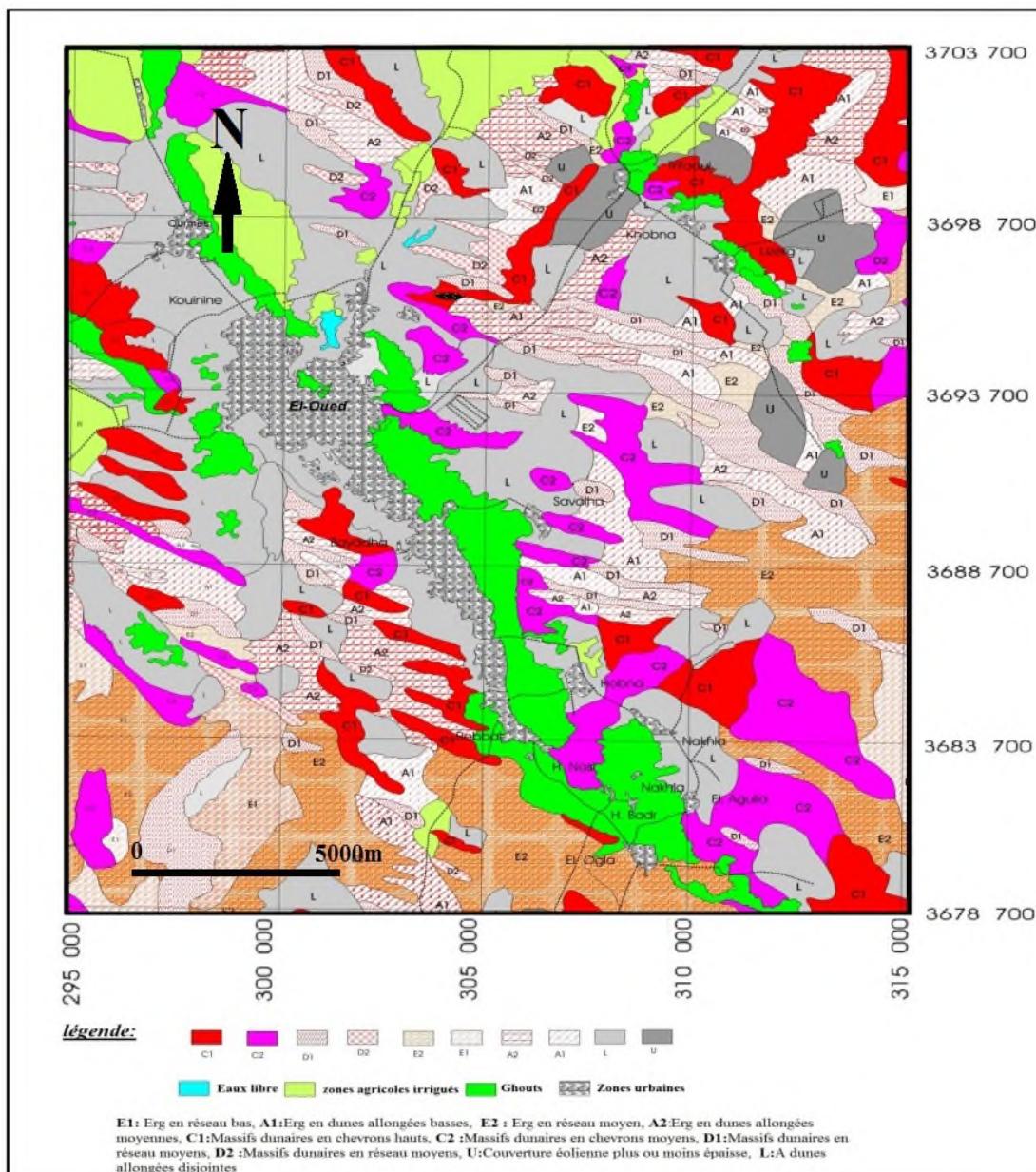


Figure 4: carte d'occupation de sol de région d'El-Oued (OSS 2010 modifiée).

1.3.2. Évolution de l'occupation du sol dans la zone d'étude.

L'analyse des photos satellites de la zone d'étude, montre une évolution dans l'occupation de sol dans la période étendue de 1987 à 2009 :

Photo 1 de 1987: dans les années 80, le problème de la remontée des eaux était au début, on voit encore (Fig.5), l'existence des palmeraies dattiers cultivés dans des cratères artificiels appelés (ghout), Les palmeraies dictent une forme de croissance fortement linéaire, le long d'une dépression nord-sud. Les zones urbaines limitant les ghouts de coté ouest, on voit aussi que l'agriculture est exercée seulement dans les ghouts.

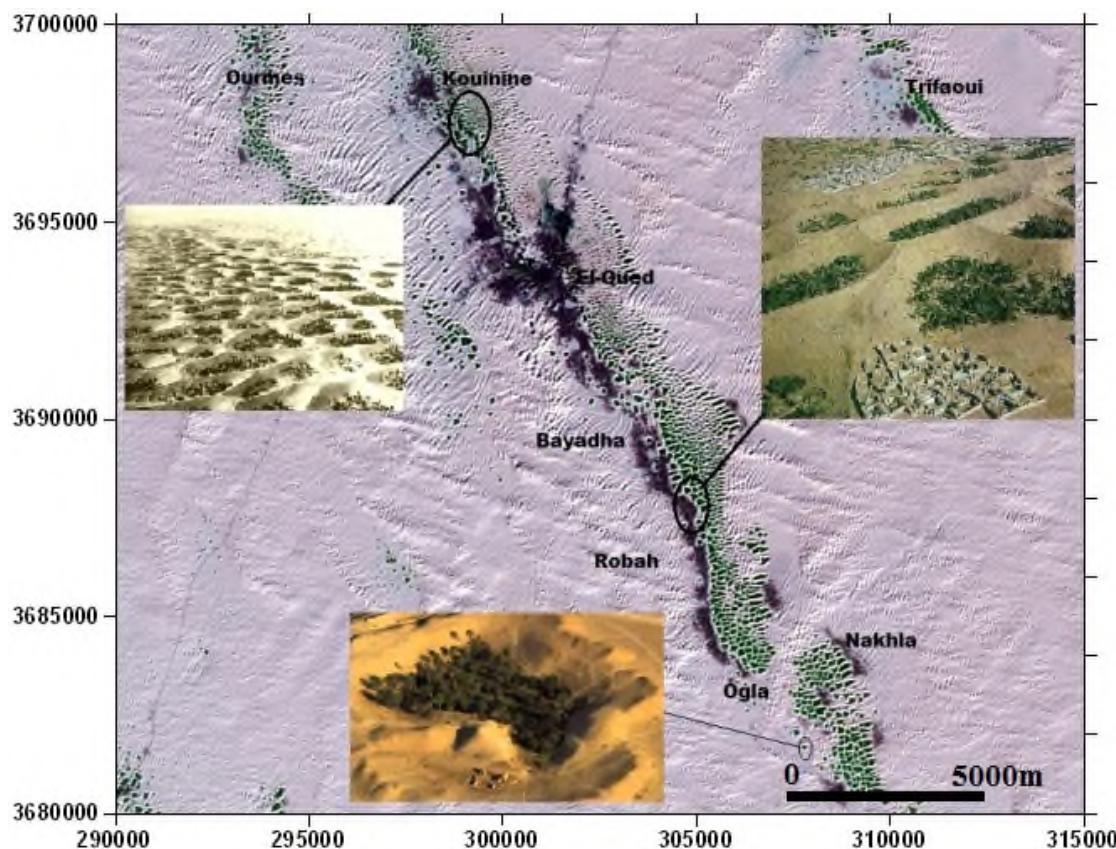


Figure 5 : photo satellite de la zone d'étude en 1987.

Photo 2 de 2000: nous remarquons la disparition des palmeraies et noyage des ghouts (Fig.6), où on constate que plus de 1000 Ghouts inondés sur un total de 9500 à la commune d'EL Oued seulement. Ceci s'est traduit par une perte de plus de 150000 palmiers dattiers, à cause de l'asphyxie, selon la direction agricole d'El Oued. Cette disparition est traduite par remplacement de la couleur verte dans la photo 1 par la couleur noire dans la photo 2, le tissu urbain se repousse vers l'ouest, à cause de la croissance démographique, la couleur bleue ciel dans la partie nord représente les eaux de surface apparues dans les zones de dépression (Sidi Mestour, hôtel Louss, Chot et zone de rejet de la ville d'El-Oued). Les habitants

Partie 1: Généralités sur la zone d'étude.

commencent à exercer la culture sur la surface en dehors des ghouts inondés, comme à Nakhla, plantation de Mehri et Bayadha.

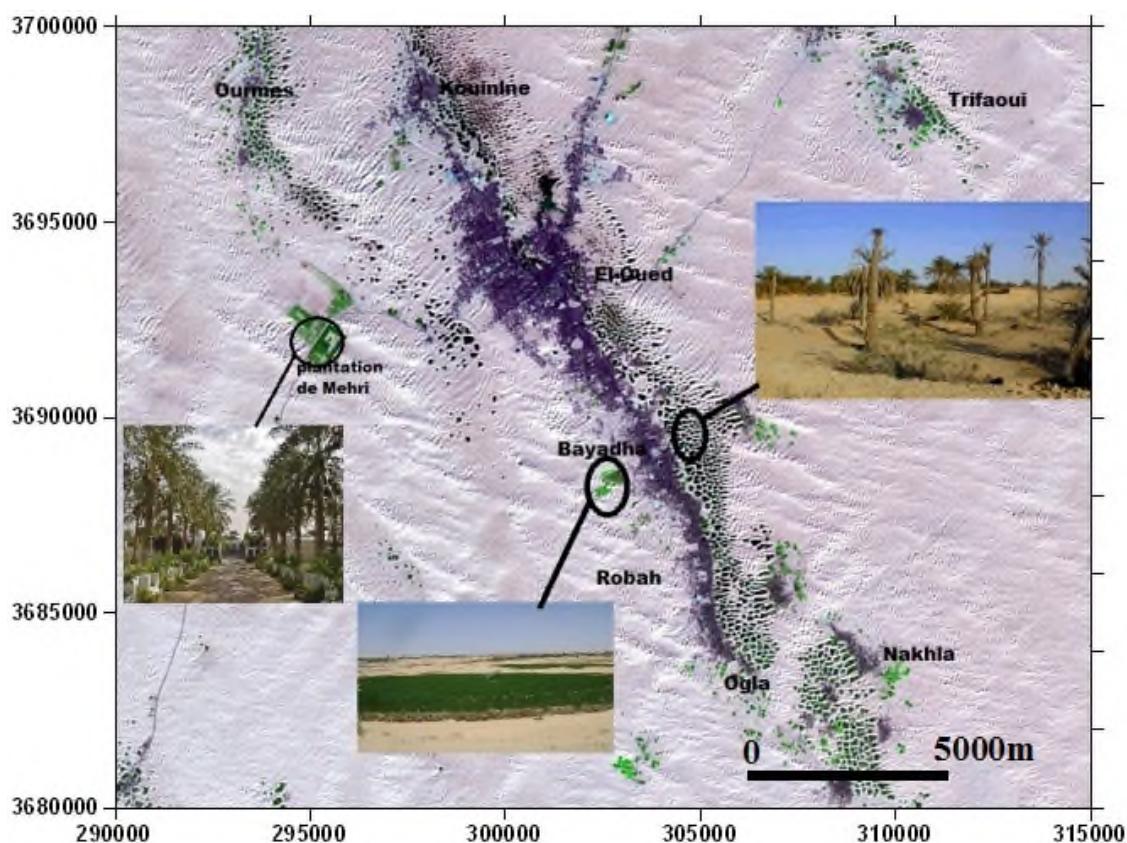


Figure 6: photo satellite de la zone d'étude en 2000.

Photo 3 de 2005: les roseaux repousse dans les ghouts inondés est remplaçants les palmeraies morts, les zones agricoles connues une très grande extension sur toute la zone d'étude (Fig.7), les agriculteurs ont profité des aides de gouvernement pour construire des nouveaux puits améliorés dans la nappe phréatique pour irrigués les surfaces cultivées, causant une baisse locale de niveau piézométriques, surtout au sud ; Ogla, Nakhla et Robah. Par contre à la ville d'El-Oued, le niveau d'eau ne s'asse pas à accroître, la superficie de la zone de rejet (nord de la ville) agrandie entre 1987 et 2005.

Photo 4 de 2009: devant les risques des ghouts inondés sur l'homme et l'environnement (crient un milieu idéal pour la croissance des moustiques, source probable des maladies à transmission hydrique), le service de l'hydraulique a décidé de remplir les ghouts avec des sables dunaires. Les zones agricoles deviennent de plus en plus abondantes (Fig.8), elles ont donné à la région une autre identité économique comme une région d'agriculture de légumes et de la pomme de terre.

Partie 1: Généralités sur la zone d'étude.

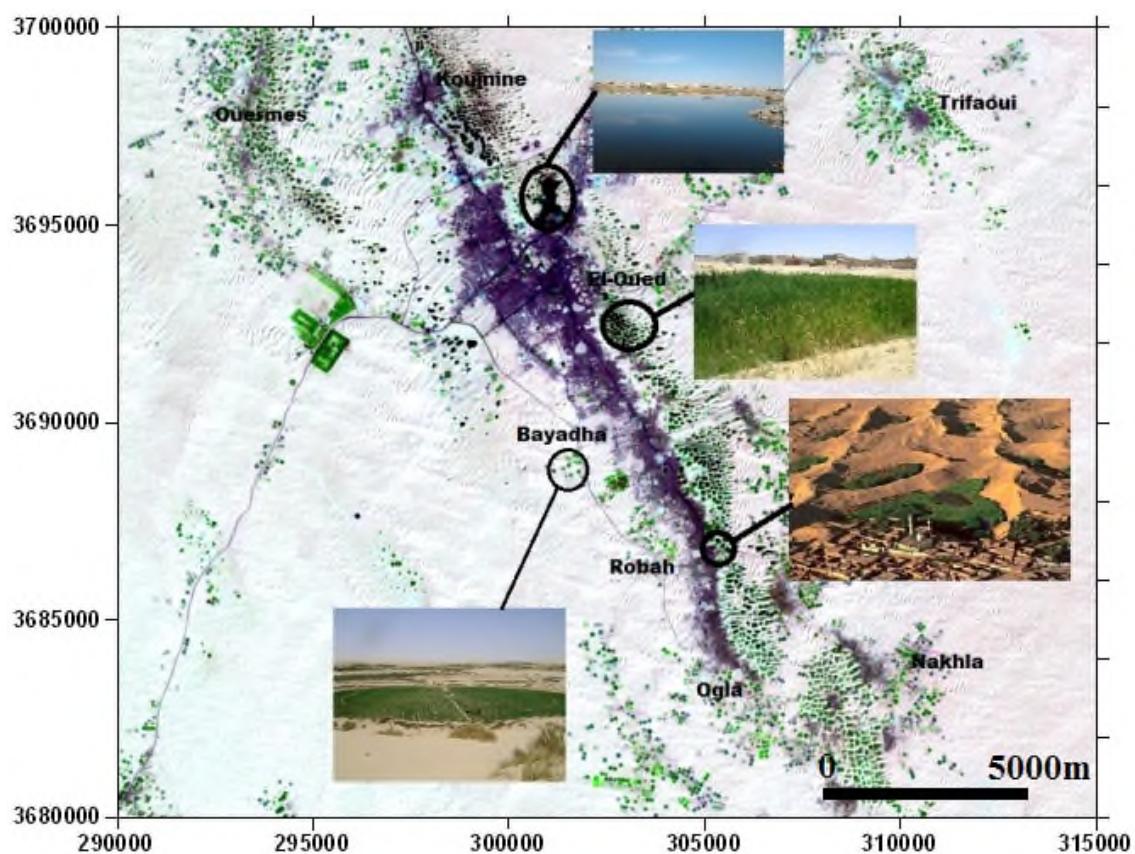


Figure 7: photo satellite de la zone d'étude en 2005.

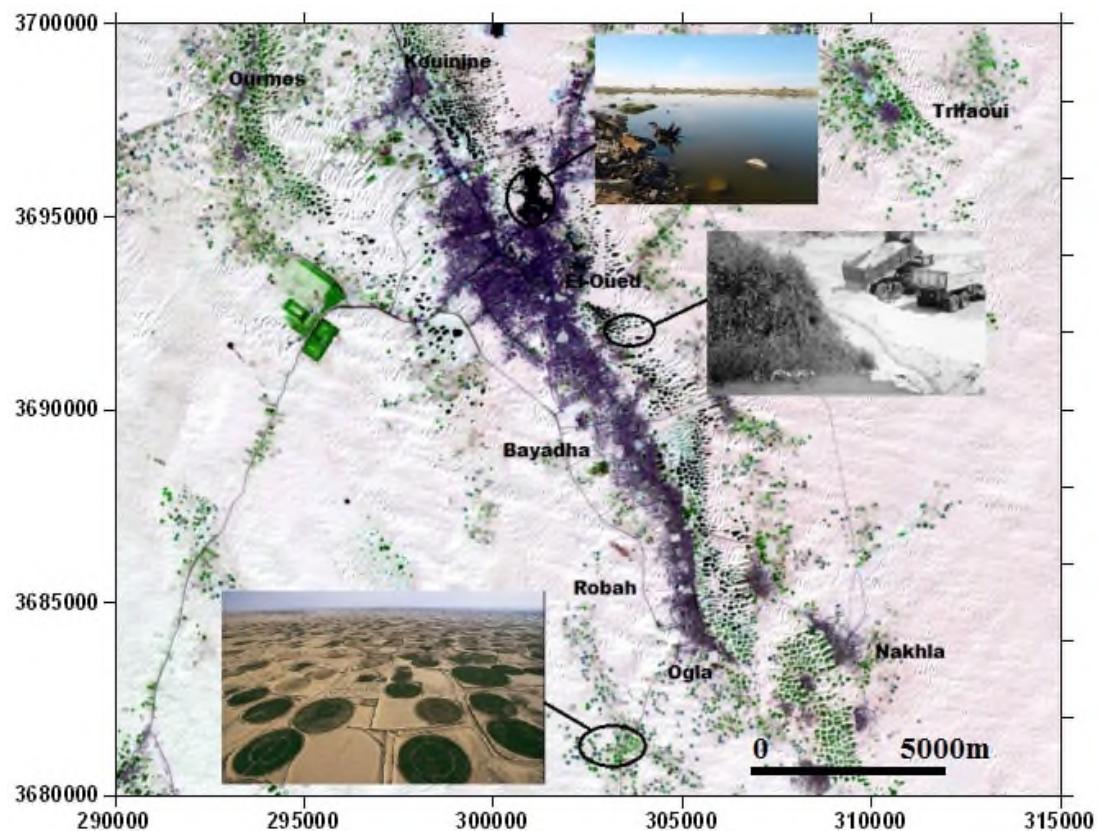


Figure 8: photo satellite de la zone d'étude en 2009.

1.3. Cadre sociologique d'El-Oued.

La zone d'étude (Fig.2) fait partie de Souf, elle regroupe les centres urbains les plus importants de la wilaya d'El-Oued qui s'étend de l'Ogla au sud à Kouinine au nord, avec des zones agricoles sur les bordures Est et Ouest des centres urbains.

El-Oued devint une commune depuis 1957, une wilaya depuis janvier 1984, ce découpage a pour but de faciliter les conditions de vie sociale, culturelle, professionnelle et de limiter les difficultés dues à l'isolement, aujourd'hui elle repose sur une superficie égale à 44 586 km² divisé en 30 communes avec une population de 750 840 habitants et une densité de 16.84 hab/km², le taux d'accroissement de population est égal à 3.4% selon le recensement de l'ONS de 2008.

La population de la commune d'El Oued a quadruplé ses effectifs en l'espace de trente deux ans, selon les recensements de la population et de l'habitat en 1966, 1987, 1998 et 2008. Plus précisément entre 1966 et 1998, passant de 24 747 habitants à 105 957 habitants. Cela représente un apport moyen de 2 707 hab/an. Depuis 1998, la croissance démographique continue d'être rapide et importante, de 1998 à 2008, elle est passée de 106 000 à 134 699 habitants, avec un apport annuel moyen de 2870 habitants,

1.4. Cadre économique d'El-Oued.

Les manifestations de la vie quotidienne traduisent un système d'organisation qui tient compte des possibilités économiques, de la vocation agricole, commerciale et artisanale. Les principales activités, exercés dans la région d'El-Oued sont :

1.4.1. L'artisanat.

El Oued à toujours était un centre artisanal, notamment pour les objets liés à l'ancienne technologie de l'agriculture. Il s'agit des tailleurs, des tapissiers, des maçons, des cordonniers, des menuisiers, des bijoutiers et des forgerons.

1.4.2. Le commerce.

La wilaya d'El Oued compte 29 143 opérateurs économiques inscrits à l'année 2014. La ville d'El-Oued seule compte 3 200 commerçants. Grâce à la position géographique entre trois Etats (Algérie, Tunisie, Libye), El-Oued a acquis une position stratégique exceptionnelle, on peut dire que la ville d'El Oued est un centre d'échange commercial, très actif, ainsi elle constitue le centre d'achat de toute la région d'El-Oued, d'où l'importance de son marché.

Cette activité commerciale se traduit par le grand axe commerçant qui, sur plus de 15km, s'allonge le long de la Route Nationale de Kouinine-Robbah où la densité commerciale y est forte au centre 15 à 20 établissements pour 100 m pour décroître vers les extrémités de 4 à 5.

1.4.3. L'industrie.

La wilaya d'El Oued dispose d'un tissu industriel considérable, elle se caractérise par un nombre important des activités industrielles et considérée comme leader dans le domaine de fabrication des produits cosmétiques et d'hygiènes corporelles et aussi des produits d'entretiens, voici le bref inventaire des unités industrielles d'El-Oued:

- parfums et cosmétique 20 unités.
- transformation du plastique 15 unités.
- Fabrication carrelage 7 unités.
- transformation aluminium 6 unités.
- Insecticides et détergents 4 unités.
- Semoulerie, pâtes alimentaire 3 unités.
- unité déminéralisation eau 2 unités.
- unité de fabrication de peinture 1 unité.
- unité de fabrication des boissons 1 unité.

1.4.4. L'agriculture et élevage.

Agriculture : La wilaya d'El Oued a connue ces dernières années un essor constant de sa production agricole faisant d'elle l'une des plus riches régions agricoles à l'échelle nationale. Elle dispose d'une superficie agricole utile de 76 410 Ha dont 75 100 Ha irrigués et elle est considérée parmi les premières régions dattiers du pays. Ce statut de « pôle agricole » par excellence est reflété, outre par la phoeniciculture, vocation principale de la région et aussi, par le degré atteint par les cultures de la pomme de terre, l'oléiculture, la culture du tabac et autres cultures maraîchères.

La phoeniciculture (terme employé pour la culture du palmier dattier) est exercée dans des ghouts saharienne, ces derniers symbolisent la forme prise par les palmeraies traditionnelles de la Wilaya de Oued. Ce système agraire ingénieux consiste en effet à aller chercher l'eau directement dans la nappe phréatique de la région en plantant les palmiers de telle sorte que les racines des arbres atteignent la nappe phréatique et s'alimentent ainsi sans recours à un système d'irrigation, c'est le principe de la culture Bour (en sec), on n'importe pas d'eau d'irrigation mais les palmiers va chercher lui-même ce dont il a besoin. Les limites des ghouts atteignent la frontière libyenne au sud et voisinent avec les Monts des Nemamchas, suivant une ligne passant par Negrine, s'étire à l'est à la frontière tunisienne et à l'ouest par l'immense oasis d'Oued Righ. La production des dattes est de 2 137 520 quintaux (toutes espèces

confondues) sur une superficie de 36 317 ha dont la production de Deglet Nour est de 1 423 000 quintaux.

La wilaya d'El Oued s'est imposée à la tête des régions productrices de la pomme de terre avec une contribution de 24% à la production nationale, les récoltes obtenues ces dernières années pour la pomme de terre placent cette wilaya saharienne, du grand erg oriental, en tête des zones productrices à l'échelle nationale (apparaissant comme une réponse à l'ennuiement des Ghouts), à la faveur de la réunion des facteurs et conditions pédoclimatiques propices au développement de cette culture. La production de la pomme de terre est de 11 725 000 quintaux sur une superficie de 35 000 ha soit un rendement de 335 quintaux/ha.

L'oléiculture, expérience récente dans la wilaya, a, après un début timide, gagné du terrain, avec l'intérêt croissant que lui accordent les agriculteurs de la région pour atteindre aujourd'hui une surface de 2 913 ha d'oliveraies ayant donné lieu à une production annuelle de 15 000 quintaux d'olives de bonne qualité nutritive, selon les responsables de la direction locale des services agricoles (DSA).

Elevage : Le développement agricole et de l'élevage dans la wilaya a commencé, depuis l'année 2000, en atteignant en 2014 une surface de 2.215 hectares structurés en 41 périmètres agricoles, éparpillés à travers les 30 communes de la wilaya, dont la grande part est revenue aux collectivités à vocation agricole. Cette démarche d'extension de la surface agricole a fait passer le nombre des exploitations agricoles dans la wilaya d'El Oued à 48 400 entités ayant impulsé le développement agricole et l'élevage, pour la production de viandes rouges.

1.5. Ressources hydriques.

Dans la région d'étude, la rareté des précipitations et l'augmentation de la demande sur l'eau, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et pour l'industrie, nécessite le recours des ressources en eau profondes, les prélèvements des eaux de complexe terminal et de continentale intercalaire augmentent chaque année (1134 Hm³ en 1999, 1566 Hm³ en 2010 et 1722 Hm³ en 2012)

1.5.1. L'alimentation en eau potable (AEP).

Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable sont principalement effectués à partir de 98 forages dans la nappe du Complexe Terminal et 2 forages dans la nappe du Continental Intercalaire (CI). En 2010, les ressources mobilisables à but d'AEP sont d'ordre de 103.816 Hm³, dont 93.750 Hm³ de CT et 10.066 Hm³, ce qu'il représente un débit de 28 4427 m³/j.

1.5.2. L'alimentation en eau pour l'irrigation(AEA).

Les ressources en eau est fortement exploitées pour l'irrigation, surtout pour la culture de la pomme de terre qui a connu un fort développement depuis la fin des années 2000. Seulement 21 forages dans le CT produisant $12\ 453\ \text{Hm}^3/\text{an}$, sont recensés par la direction de l'hydraulique d'El-Oued, les autres sont frauduleux, vue l'interdiction de plantation des forages nouveaux dans le CT.

1.5.3. L'alimentation en eau pour industrie (AEI).

La consommation d'eau industrielle est faible vu l'absence des grandes unités industrielles dans la région. Les ressources mobilisables à des fins industrielles ne représentent que 3.55 % du total des ressources mobilisables (Khachana 2014). Les besoins industriels en eau en 2010 sont estimés à $4.12\ \text{Hm}^3/\text{j}$ en 2010.

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE.

2.1. Cadre tectonique et structural.

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique: le Nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine et la plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée. Elle est constituée d'un socle précambrien recouvert de sédiments phanérozoïques transgressifs.

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de $780\ 000\ \text{Km}^2$. Ce bassin, est une vaste zone d'épandage, constitue d'une importante dépression topographique, laquelle est sous tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques sub-verticaux.

La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacé forme un vaste synclinal (Fig.9) dont le fond a un très grand rayon de courbure. Les couches sédimentaires semblent s'épaissir du Nord d'El Oued vers le centre de cette dépression, ce qui montre que l'approfondissement suit de près la sédimentation. Donc si nous désirons retracer l'évènement paléogéographique d'Oued Souf, il faut noter qu'au cours de la jeunesse de l'immense dépression au début du Quaternaire et sous l'effet de la sédimentation, le centre de celle-ci (dépression) se déplace en fonction du temps vers le Nord, tout en donnant naissance à des nouvelles dépressions correspondant actuellement à la zone des chotts, où leur naissance ne s'est effectuée qu'à la fin du Quaternaire. Ces caractéristiques ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara, de plusieurs aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès.

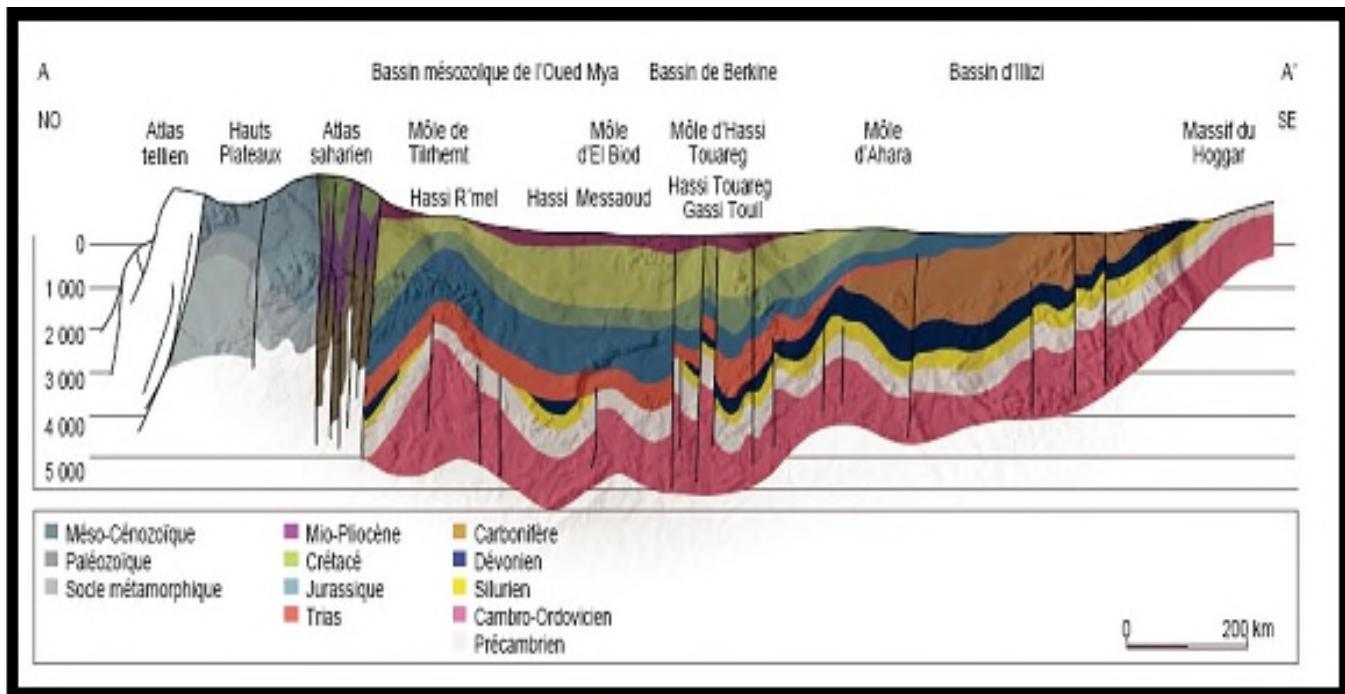


Figure 9 : Coupe géostructurale transversale régionale du Sahara (WEC, 2007).

2.2. Cadre géologique régionale.

En Sahara algérien, les travaux de G. Busson (1963, 1967 et 1970) et de J. Fabre (1976) constituent les références de base pour une bonne compréhension de la géologie du Sahara algérien. Toutefois, un complément d'information est recherché dans les différentes cartes géologiques qu'ont couvrant cette région (Fig.10) (SASS 2002). Des études récentes sont réalisées par SONATRACH et ENAGEO, ces auteurs ont travaillés et publiés des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, surtout dans le cadre de la géologie pétrolière.

Notre région d'étude fait partie de la plate forme saharienne constituée d'un bouclier précambrien, n'émergeant des sédiments qu'ils surmontent que dans le Sahara Central (Massif du Hoggar) et le Sahara Occidental (Massif des Eglab) (UNESCO, 1972).

À la base de l'édifice sédimentaire il y a des terrains paléozoïques marins contenant des niveaux aquifères salés et des gisements d'hydrocarbure au-dessus, et en discordance on rencontre des formations d'âge Secondaire et Tertiaire qui peut dépasser 3000 m d'épaisseur dans le centre du bassin (régions d'Ouargla, Touggourt, El Oued ainsi que sur la bordure des Aurès Zibane). Le Quaternaire représenté essentiellement par des sables dunaires, atteint parfois plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. L'existence de sable éoliens dans les dunes provient essentiellement de l'érosion du Hoggar.

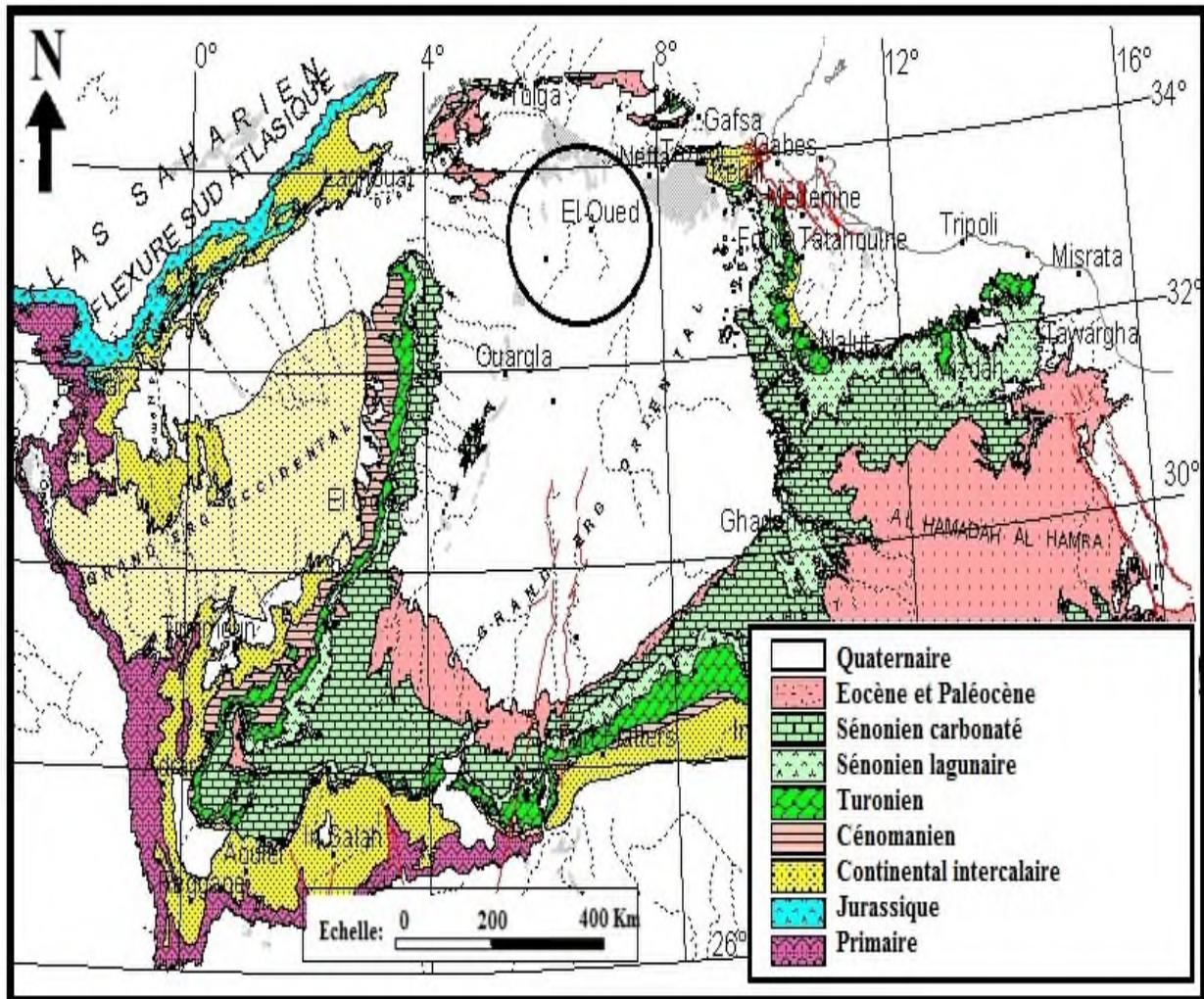


Figure 10: cartes géologiques de l'Algérie (OSS 2003).

2.3. Cadre géologique de la zone d'étude.

La région d'étude est située exactement dans la partie Nord-est de la plate forme saharienne. La carte géologique d'El-Oued montre que seuls les terrains d'âge Quaternaire et Mio-Pliocène sont visibles à la surface. Ils sont représentés par des dunes et cordons d'Erg. (Fig.11). La succession des terrains et leurs descriptions lithologiques ont été rendus possibles grâce à l'interprétation des logs de forage d'eau, réalisés dans la zone d'étude (Fig.12 et Fig.13), on distingue de bas en haut :

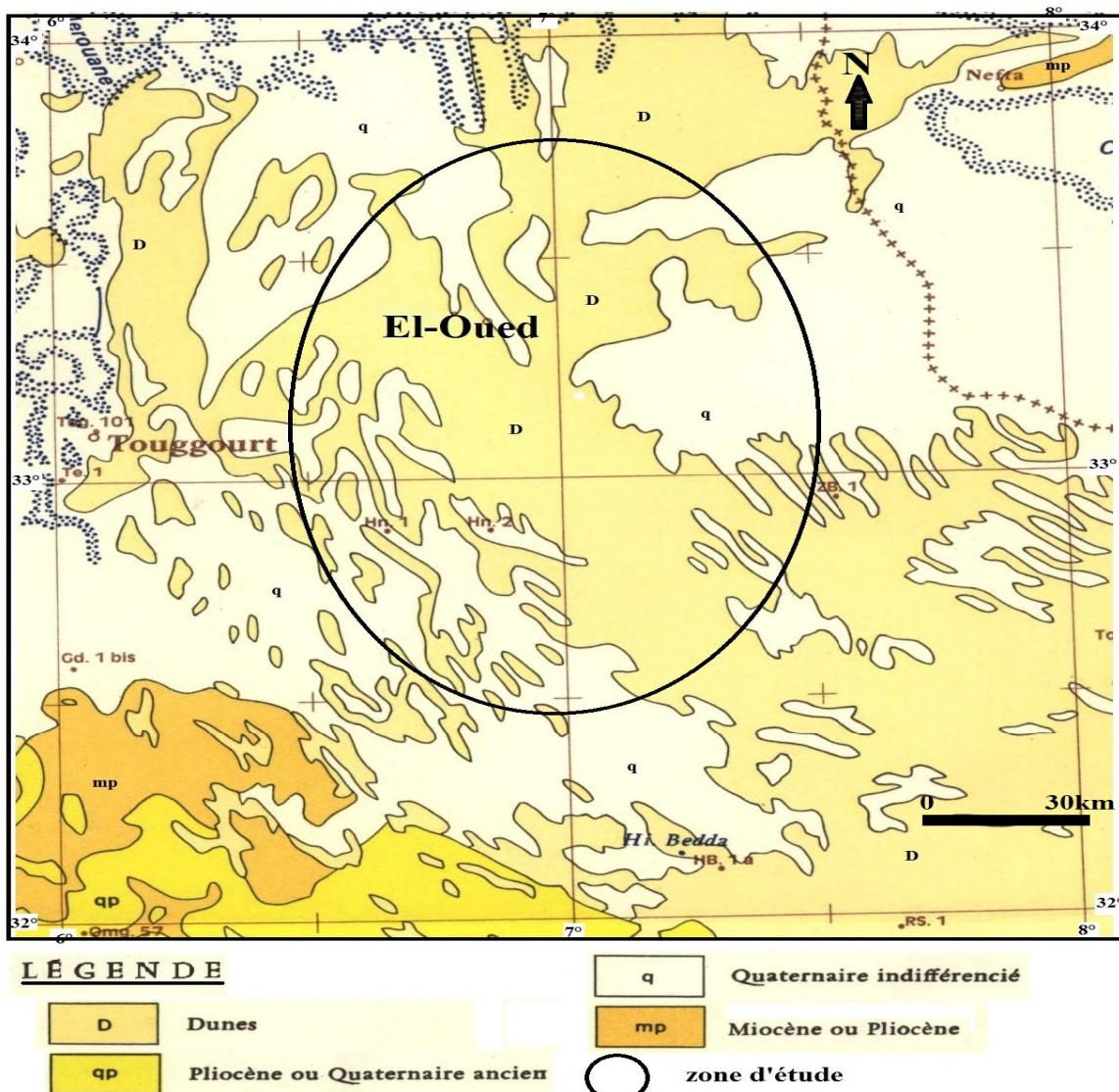


Figure 11: Carte géologique de la zone d'étude (extrait de la carte de nord ouest Afrique 1976).

2.3.1. Le Secondaire (Crétacé).

2.3.1.1. Le Barrémien : Le Barrémien est la période qui vit un épandage généralisé des formations détritiques du Crétacé inférieur jusqu'à dans le Bas-Sahara (SASS 2010). Ces formations se présentent sous forme de grès fins ou grossiers et d'argiles provenant apparemment du Sud (Hoggar). Dans la région de Touggourt, les sondages ont traversé des grès arkosiques. Les bancs carbonatés sont peu nombreux et cantonnés au Nord-Est du Sahara algérien

Dans la zone d'étude, cet étage est capté par les forages du continental intercalaire réalisés dans cette région (3forages). Il présente une alternance de grés avec passages d'agrile et

parfois des intercalations de calcaires dolomitiques. Nous rencontrons également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 237 m à 270 m.

2.3.1.2. L'Aptien : est un bon repère lithologique dans les sondages. Il est représenté dans la grande partie du Bas-Sahara, par 20 à 30 m en moyenne, de dolomies alternant avec des lits d'anhydrite, d'argiles et de lignite (sédimentation lagunaire). L'Aptien est caractérisé, dans le Sahara algérien, par une très grande homogénéité de faciès et d'épaisseur. Il semble coïncider avec un ralentissement des apports terrigènes et de la subsidence. C'est une période de stabilité de la plate-forme (SASS 2010).

Dans la zone d'étude, cet étage est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. D'après les forages réalisés dans la région, l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas 40 m.

2.3.1.3. L'Albien : il est caractérisé par un retour massif de la sédimentation terrigène. Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sous-jacent attribué au Cénomanien. L'Albien gréseux est formé de grès fins avec quelques intercalations carbonatées. Vers les bords du bassin (Tinrhert et Tademaït) les sédiments deviennent plus grossiers.

Dans la zone d'étude, cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grés, de sables et surtout par des calcaires avec passages de silex et d'argile.

La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure est caractérisée par l'apparition des faciès argilo-carbonatés. D'après les sondages captant le continental intercalaire l'épaisseur de cet étage est environ 90 m.

2.3.1.4. Le Vraconien : est une zone de transition entre l'Albien gréseux et le Cénomanien argilo-carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques. On rencontre aussi de calcaires gris clair argileux. Cet étage constitue la couverture de l'Albien par des niveaux argileux. L'épaisseur de cet étage dans toute la zone d'étude varie entre 90 m et 120 m.

2.3.1.5. Le Cénomanien : les forages réalisés dans cette région ont montré que cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. La limite inférieure de cet étage est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui le distingue nettement, tandis que sa limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspond à la base du Turonien. L'épaisseur de cet étage dans toute la zone d'étude est environ 120 m.

2.3.1.6. Le Turonien : cet étage représente la base du complexe terminal. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies microcristallines

compactes avec des intercalations de calcaires et parfois de marnes. Les forages de la région montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 95m.

2.3.1.7. Le Sénonien: la plupart des études géologiques effectuées à travers le Sahara algérien montrent que le Sénonien est formé de deux ensembles très différents de point de vue faciès : l'un correspond au Sénonien lagunaire, situé à la base, et l'autre le Sénonien carbonaté au-dessous.

a. Sénonien lagunaire : Le Sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporitique avec des argiles aisément différenciables de celles du Turonien.

Il est constitué également d'anhydrite, de calcaires dolomitiques, d'argiles et surtout de bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine les 150 m. La limite inférieure de cette formation coïncide avec le Turonien de la dernière intercalation anhydritique. Son épaisseur oscille entre 270 m et 300 m.

b. Sénonien carbonaté : la limite entre le Sénonien lagunaire et le Sénonien carbonaté n'est pas toujours bien nette, la limite supérieure du Sénonien carbonaté est encore plus floue, en effet, il y a pratiquement une continuité lithologique entre le Sénonien et l'Eocène carbonaté, car les deux niveaux sont formés de calcaires de même nature. Seule la présence de Nummulites permet d'identifier l'Eocène.

Le Sénonien carbonaté est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques, avec des intercalations marno-argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés et de dolomies vacuolaires. Son épaisseur oscille entre 200 m et 330 m.

2.3.2. Le Tertiaire.

2.3.2.1. L'Eocène : Avant la fin d'Eocène carbonaté, la mer quitte définitivement le Sahara, qui connaîtra un régime de sédimentation continental. On distingue dans l'Eocène deux ensembles de point de vue lithologique; l'Eocène carbonaté à la base et l'Eocène évaporitique au-dessus.

L'Eocène carbonaté est constitué de calcaire d'une puissance qui peut atteindre 340 m, ces calcaires sont très fissurés marqués par des pertes de boues totales ou partielles dans les forages traversent cette couche.

L'Eocène évaporitique est constitué d'alternance de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrites. Elle renferme de Nummulites et Globigérines. C'est cette formation que l'on désigne dans le bas-Sahara sous le nom d'Eocène évaporitique. Dans la région d'El-Oued, l'épaisseur de cet étage varie entre 150 m (forage de 19 mars) et 340 m (forage DW-101).

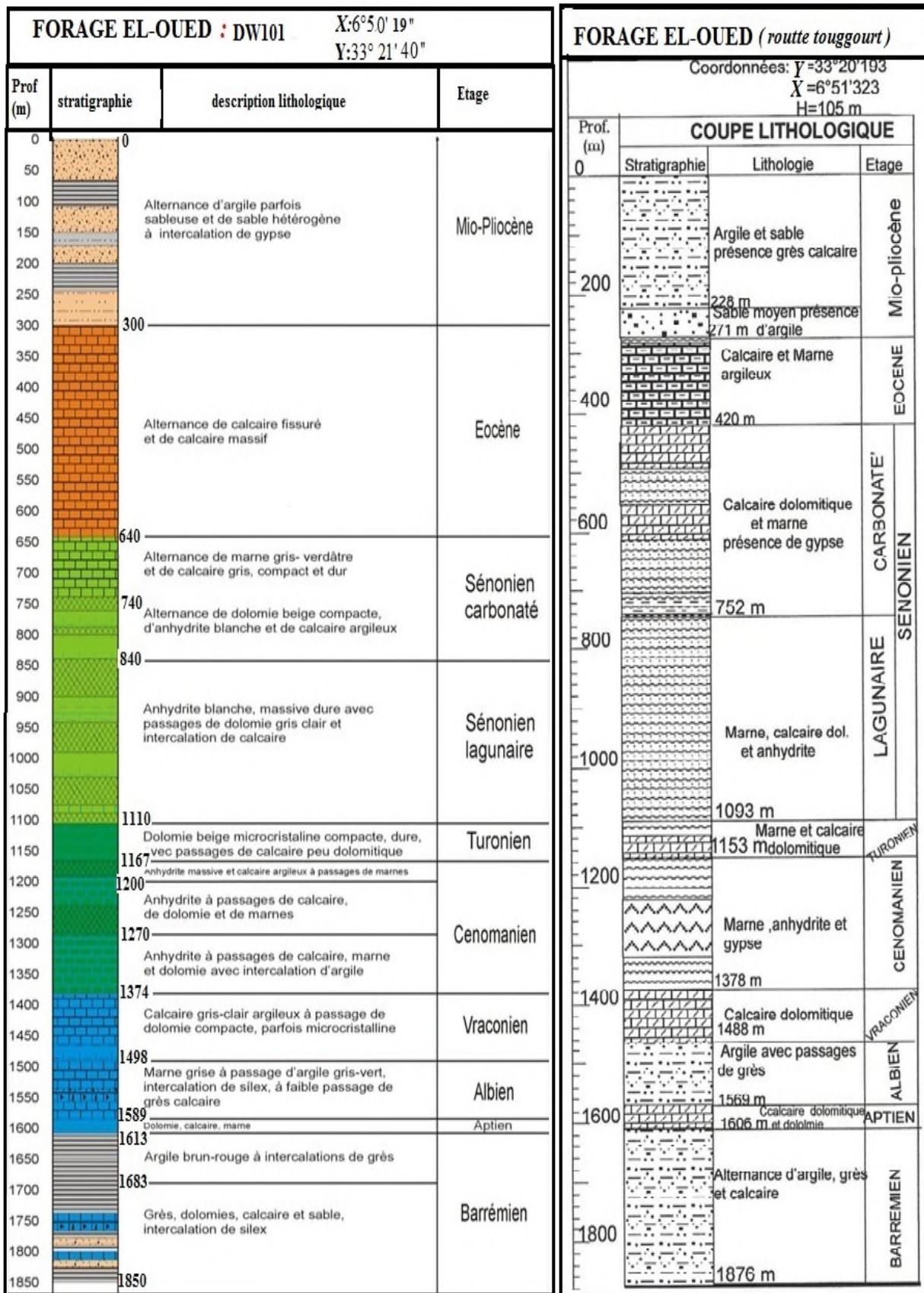


Figure.12 : Colonne stratigraphique des forages de CI existant dans la zone d'étude. (DHW El-Oued)

2.3.2.2. Le Mio-Pliocène : Il repose en discordance indifféremment sur le Primaire, d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomanien et l'Eocène d'autres parts (Fig. 25). Il appartient à l'ensemble appelé communément complexe terminal (CT) (Kilian.C 1933). Bel et Demargne (1966) séparent cet horizon en quatre niveaux sur la plupart de l'étendue du Sahara oriental. La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montre que le Mio-Pliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo-argileux avec des intercalations gypseuses, marneuses et des passages de grés et de calcaires.

Dans la zone d'étude, l'interprétation des sondages montre que le Mio-Pliocène est constitué des intercalations de deux niveaux sableux et un niveau argileux (Fig.13). On distingue de bas vers le haut:

- Niveau 1 : sableux avec intercalation de grés et de graviers, son épaisseur varie entre 30 m et 60 m, sur toute l'étendue de la zone d'étude. C'est en fait à ce niveau que se trouve le principal horizon aquifère du complexe terminal (CT), on appelle (2^{ème} nappe de sable).
- Niveau 2 : c'est une formation argileuse avec des passées de sables argileux, de marne et de gypse, dont les limites inférieure et supérieure demeurent toujours confondues, il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique. Cette couche n'existe que dans certaines zones.
- Niveau 3 : c'est le deuxième niveau sableux, son épaisseur varie entre 6 m et 100 m, il constitue le premier horizon aquifère de CT (1^{ère} nappe de sable du complexe terminal). la limite supérieure de ce niveau demeure toujours confondue à cause de sa forte teneur en argiles.

2.3. Le Quaternaire.

Le Quaternaire est formé par des dépôts sableux de type éolien donnant naissance à des dunes, localement intercalés de lentilles d'argiles, d'argiles sableuses et gypseuses. Ces sables forment d'énormes accumulations dans le grand Erg oriental. C'est au niveau de cet horizon que l'on rencontre la nappe phréatique. A la base de Quaternaire on rencontre une formation argileuse faiblement sableuse.

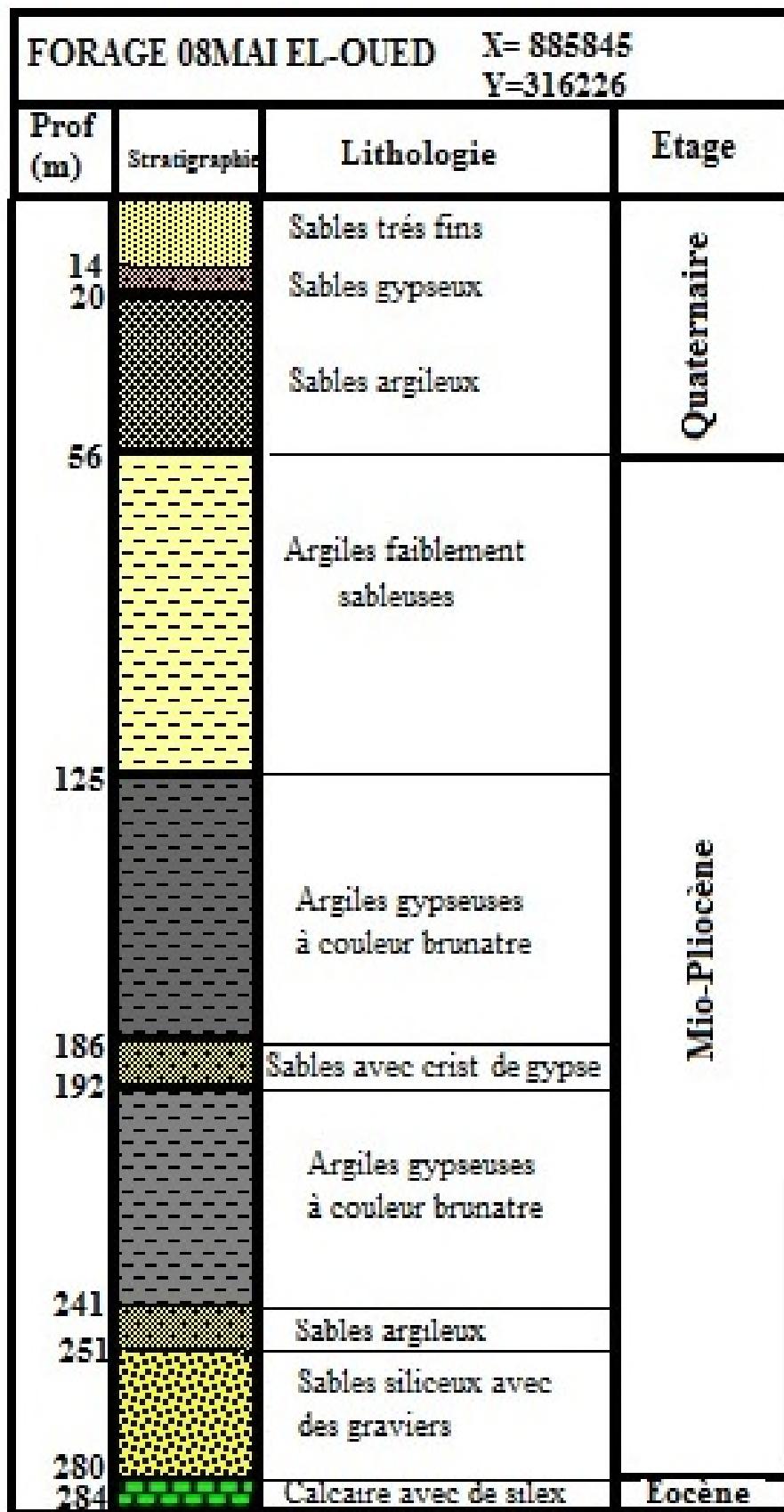


Figure13: Colonne stratigraphique de forage CT dans la zone d'étude

3. CADRE CLIMATOLOGIQUE.

3.1. Introduction.

L'Algérie, est partagée en trois zones climatiques distinctes, la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride aux hauts plateaux et enfin un climat aride, qui caractérise le grand Sahara. La wilaya d'El-Oued se trouve au Nord du Sahara Oriental, le littoral d'Annaba se trouve à 390 km au Nord, le littoral de Gabés à 305 km à l'Est, El-Oued est à 1100 km au Nord de tropique de Cancer et à 3 700 km de l'Equateur.

La connaissance des caractéristiques climatologiques est nécessaire pour l'étude hydrogéologique, il est indispensable pour l'établissement d'un bilan hydrique et pour l'évaluation de la recharge de réservoir souterrain (nappe phréatique) par infiltration.

Les données climatologiques traitées relevées de l'Office National Météorologique d' El-Oued (ONM), sont reparties sur une période de 33 ans (1978-2010). La station climatique(ONM) est située dans la Daïra de Guemar (Tab.1), au Nord de ville d'El Oued.

Tableau 1: Caractéristiques géographiques de station climatique (OMN : 2010).

Station	Code A.N.R.H	Altitude (m)	Longitude	Latitude
Guemar	13 04 09	64	06°47'E	33°30'N

3.2. Précipitation.

3.2.1. Précipitations annuelles.

La courbe des variations annuelles des précipitations (1978-2008) (Fig.14) montre que l'année la plus pluvieuse est l'année 1990 avec une hauteur annuelle de 209.1 mm et l'année la plus sèche est celle de 1983 avec une hauteur annuelle de 15.9 mm. La moyenne interannuelle de précipitation est 70.03 mm.

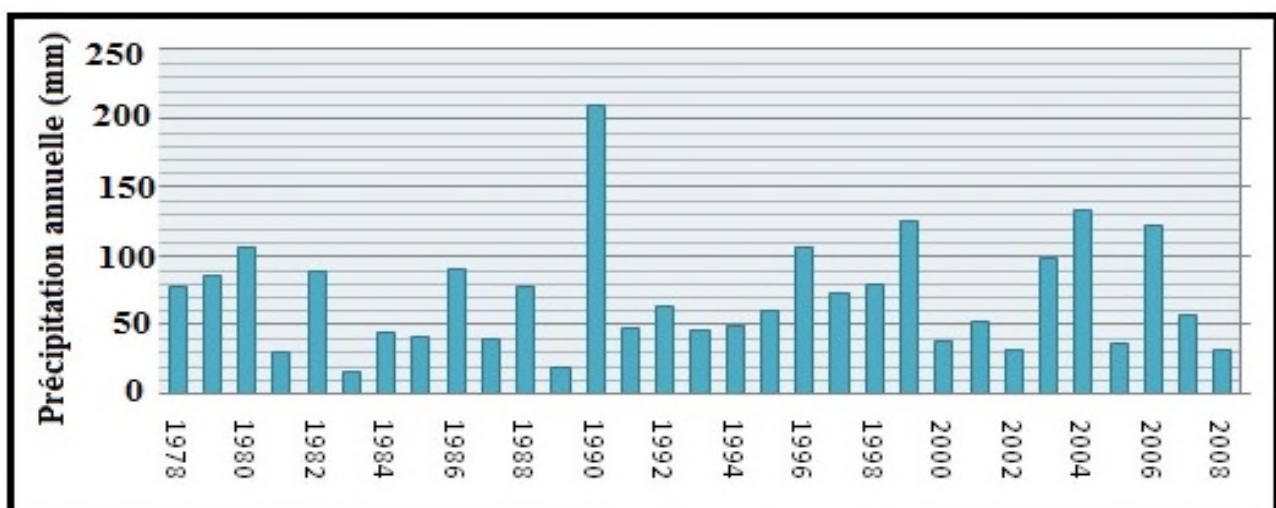


Figure 14: Histogramme des variations annuelles des précipitations.

3.2.2. Précipitations moyenne mensuelles.

Selon les données de tableau (Tab.2), nous avons établi la courbe de variation moyenne mensuelle interannuelle des précipitations (Fig.15). L'histogramme, donne un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations dans la région d'étude. On constate que le mois de janvier est le plus arrosé avec 16.53 mm, et le mois de juillet est le moins arrosé avec 0.48 mm. La moyenne interannuelle de précipitation est d'ordre de 74.9 mm.

Tableau 2: Précipitations moyenne mensuelles d'El Oued (1978/2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout
P(mm)	5.6	7.29	8.66	6.51	16.53	6.63	8.49	6.90	4.53	1.44	0.48	1.83

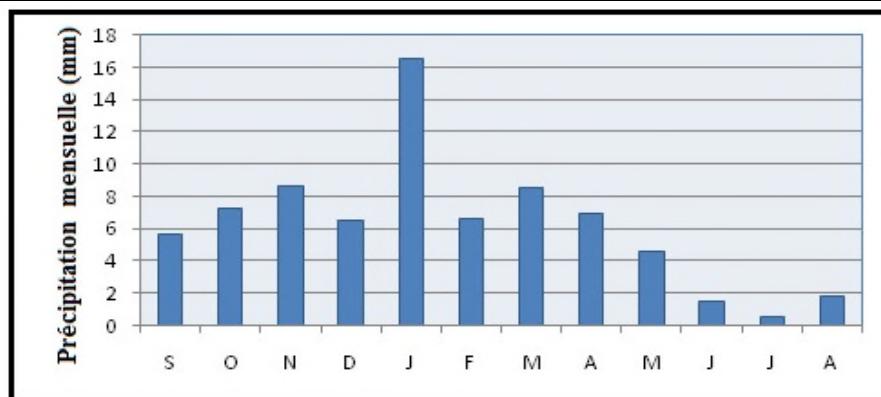


Figure 15: Histogramme de précipitations moyennes mensuelles (1978-2010).

3.3. Température.

Les températures moyennes journalières oscillent entre 29°C et 42°C à l'ombre pendant l'été. Durant la période allant de 1978 à 2010, la moyenne annuelle des températures est 21.3°C. Les variations moyennes mensuelles des températures (Fig.16 et Tab.3) montrent qu'elle est maximale au mois d'août avec une valeur d'ordre de 32,35 °C et minimale au mois de janvier avec une valeur d'ordre de 10,27 °C.

Tableau 3: Températures moyennes mensuelles d'El-Oued (1978/2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout
T(c°)	27.8	22.1	15.42	11.18	10.27	12.6	16.22	20.06	24.98	29.45	32.24	32.35

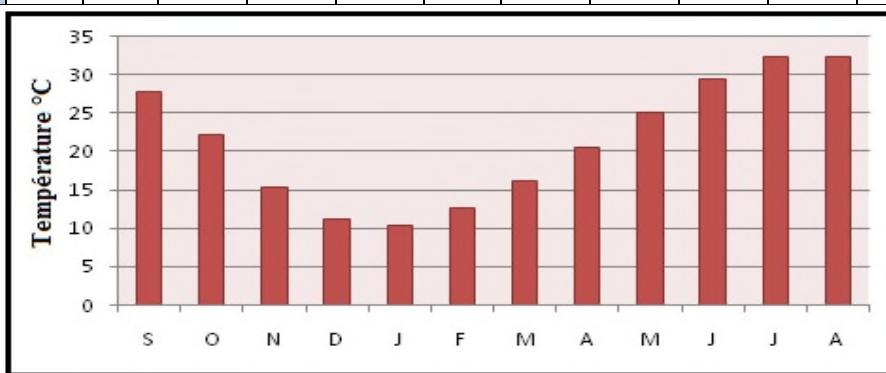


Figure 16: Histogramme des températures moyennes mensuelles (1978-2010).

3.4. Le Vent.

Les vents de direction Est et Nord-est prédominent, puis à un degré moindre ceux de direction Ouest et Sud-ouest, caractérisés par le Sirocco. Généralement c'est au printemps (Fig.17 et Tab.4) que les vents sont les plus forts, ils sont chargés de sables éoliens donnant au ciel une teinte jaune et peuvent durer jusqu'à trois jours consécutifs avec une vitesse allant de 40 à 50 Km/h.

Tableau 4: Vitesses moyenne des vents mensuels en (m/s) (1978/2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout
Vitesse(m/s)	3.15	2.37	2.23	2.44	2.19	2.56	3.33	4.05	4.13	3.68	3.39	3.11

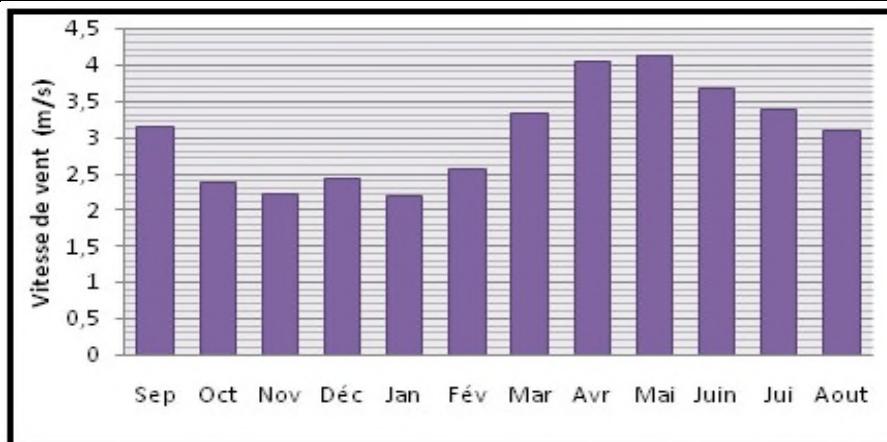


Figure 17: Histogramme de la vitesse moyenne mensuelle de vent (1978-2010).

3.5. L'humidité.

L'humidité représente le pourcentage de l'eau existant dans l'atmosphère. L'humidité moyenne de la région (Fig.18 et Tab.5) est minimum pendant le mois de juillet avec une valeur de l'ordre de 32.19 % et maximum pendant le mois de décembre avec une valeur de 65,33 %. L'humidité relative est de 62.44 % en hiver et de 34.26 % en été.

Tableau 5: Humidité relative moyenne mensuelle (1978 – 2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout
Humidité	46.76	53.43	60.97	65.33	65.26	56.75	49.19	44.03	39.52	35.27	32.19	35.32

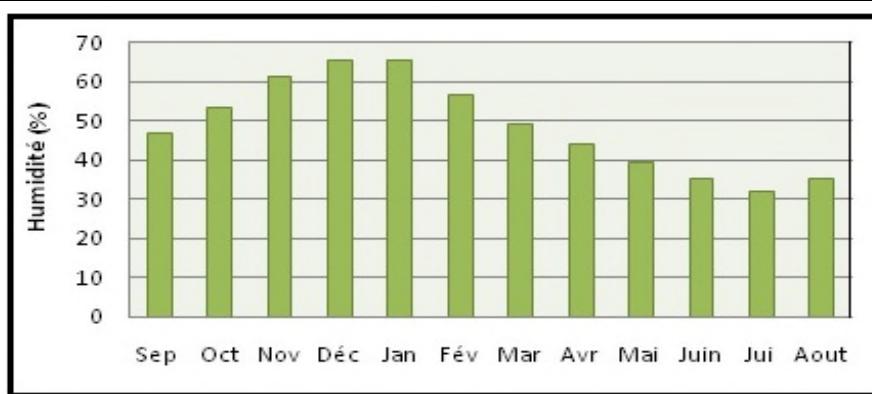


Figure 18: Histogramme d'humidité moyenne mensuelle (1978-2010) d'El Oued.

3.6. La durée d'insolation.

La région d'El-Oued reçoit une quantité de lumière solaire relativement très forte (Fig.19 et Tab.6), le maximum est atteint au mois de Juillet avec une durée d'insolation de 353.29 heures et le minimum est enregistré au mois de Décembre avec une durée de 227.35 heures.

Tableau 6: La durée d'insolation moyenne mensuelle (1978 – 2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou
Insolation	271.	257.1	277.6	227.3	238.1	247.2	275.8	283.7	307.0	344.2	353.2	323.1

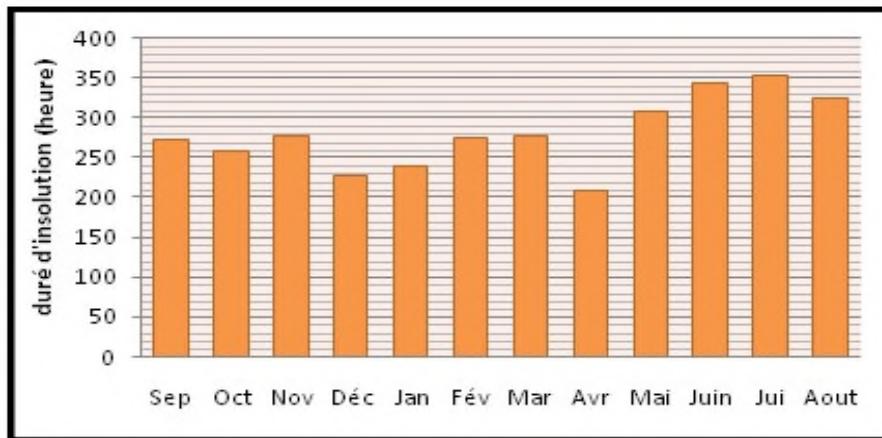


Figure 19: Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle (1978-2010).

3.7. Diagramme Pluvio-thermique.

Les valeurs des précipitations et des températures enregistrées au niveau de la station de Guemar sur une période de 33 années, permettent l'établissement du diagramme pluviothermique (Fig.20). Suivant Gaussen et Bagnouls, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations (mm) est inférieur ou égale au double de la température moyenne ($^{\circ}\text{C}$) du même mois. Le diagramme pluviothermique montre que la période sèche est étendue sur les douze mois de l'année dans la zone d'étude.

Tableau 7: Données des précipitations et des températures moyennes mensuelles.

M	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P	11,2	14,58	17,32	13,02	33,06	13,26	16,98	13,8	9,06	2,88	0,96	3,66
T	27.8	22.1	15.42	11.18	10.27	12.6	16.22	20.06	24.98	29.45	32.24	32.35

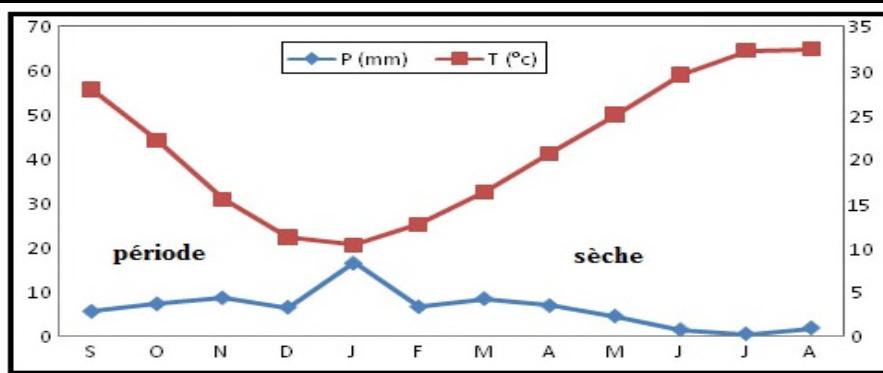


Figure 20: Courbe Pluvio-thermique d'El-Oued (1978-2010)

3.8. Diagramme d'Emberger.

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger (1955) a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q (Fig.21). Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q = \frac{3.43 P}{(M - m)}$$

Q : facteur des précipitations d'Emberger

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud ($^{\circ}\text{C}$).

m : moyenne des minima du mois le plus froid ($^{\circ}\text{C}$).

Le calcul de facteur d'Emberger dans la zone d'El-Oued donne les valeurs suivantes :

$$Q = \frac{3.43 \times 74.9}{(32.35 - 10.27)} = 11.63 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$$

Selon la position sur le Diagramme d'Emberger (fig 26) la zone d'étude est caractérisée par un climat saharien avec un hiver chaud.

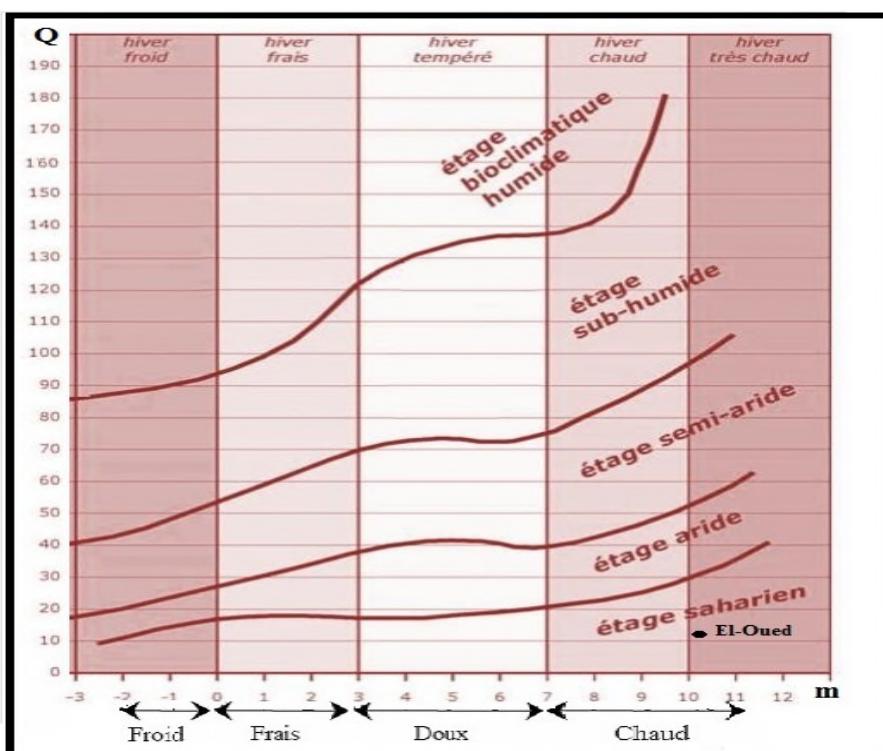


Figure 21: Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1978-2010)

3.9. Evapotranspiration.

Plusieurs expressions empiriques, introduisant les paramètres climatiques, ont été établies pour l'évaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR) et/ou potentielle (ETP). La méthode utilisée dans ce travail est celle de Thornthwaite (1948) puisque cette méthode semble la plus utilisée est celle qui donne les résultats les plus cohérents dans les zones méditerranéennes (Rkiouak, 1996 et Stitou El Messari, 2002).

3.9.1. Evapotranspiration potentielle (ETP).

La formule proposée par Thornthwaite (in Belkacem, 1994 et Stitou El Messari, 2002) permet le calcul de l'évapotranspiration potentielle en millimètres, à partir de la température moyenne mensuelle (T) par l'expression : $ETP = 16 [10 T / I]^a K$. Avec :

t : la température moyenne mensuelle du mois considéré.

ETP : l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau).

K : un coefficient d'ajustement mensuel.

I : appelé indice thermique annuel

Le paramètre : $a = 0.016 * I + 0.5$

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (Fig.22) obtenue est de 1164.2 mm. Le maximum s'enregistre au mois de juillet (216.2 mm) et le minimum au mois de janvier (9.4 mm).

3.9.2. Evapotranspiration réelle (ETR).

Elle a été déterminée également à l'aide de la méthode de Thornthwaite. Cette méthode part d'un bilan hydrique du sol, dans lequel on estime la réserve facilement utilisable exprimée en millimètres de hauteur d'eau. En plus, cette méthode tient en compte les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. En considérant que les réserves superficielles en tant que réserves facilement utilisables (RFU) sont de l'ordre de 100 mm.

L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle (Fig.27) est de 74.9 mm avec un maximum au mois de janvier (13.8 mm) et un minimum au mois de juillet (0.5 mm). L'évapotranspiration réelle représente 100% la pluviométrie moyenne annuelle.

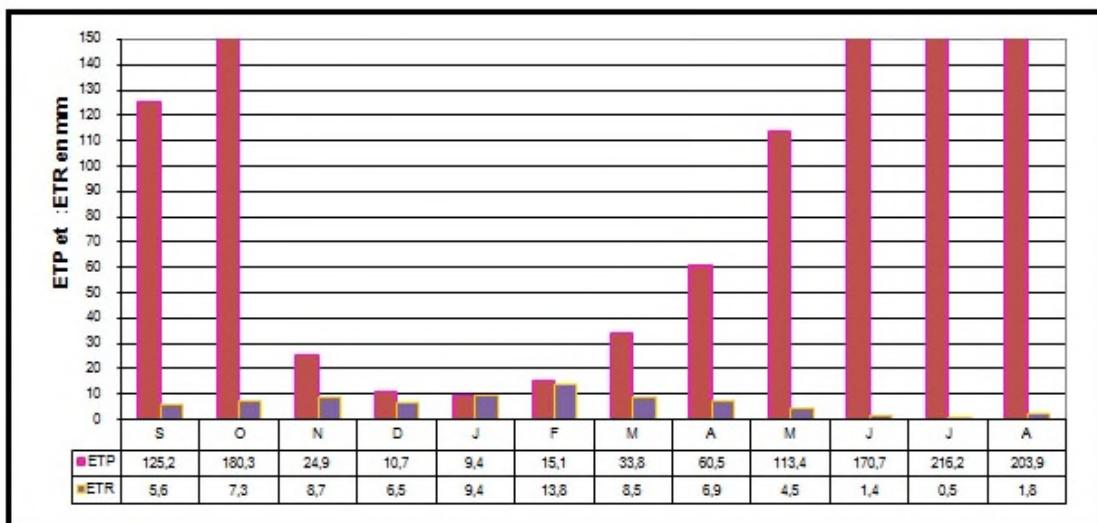


Figure 22: Evapotranspirations potentielle et réelle mensuelle (en mm) calculée par la méthode de Thorntwaite sur la période 1978/2010.

3.10. Bilan hydrique.

Le bilan hydrique d'El-Oued (Tableau 11), dans la période (1978-2010) suivant la méthode de Thorntwaite est déficitaire, la quantité d'eau précipitée sera vite évaporée parce que évapotranspiration potentielle (ETP) est plus importante que les précipitations, sauf au mois de janvier, le réserve facilement utilisable est nulle pendant les onze mois de l'année (Fig.23).

Le déficit agricole est présent pendant onze mois de l'année, elle atteindra son maximum au mois de juillet 215.7mm.

Le bilan hydrique de la région d'El-Oued montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable, la recharge de la nappe est faite par les eaux la ré-infiltration due à l'irrigation et les eaux urbaines (les eaux usées domestiques).

Tableau 8: Bilan hydrique de la station de Guemar (1978/ 2010) par la méthode de THORNTWAITE.

	T	P	ETP	ETR	RFU	DA	EX
S	27,8	5,6	125,2	5,6	0	119,6	0
O	33,1	7,29	180,3	7,3	0	173	0
N	15,42	8,66	24,9	8,7	0	16,3	0
D	11,18	6,51	10,7	6,5	0	4,2	0
J	10,27	16,53	9,4	9,4	7,1	0	0
F	12,6	6,63	15,1	13,8	0	1,3	0
M	16,22	8,49	33,8	8,5	0	25,3	0
A	20,06	6,9	60,5	6,9	0	53,6	0
M	24,98	4,53	113,4	4,5	0	108,9	0
J	29,45	1,44	170,7	1,4	0	169,2	0
J	32,24	0,48	216,2	0,5	0	215,7	0
A	32,35	1,83	203,9	1,8	0	202,1	0
Annuel	22,1	74,9	1164,2	74,9		1089,3	0

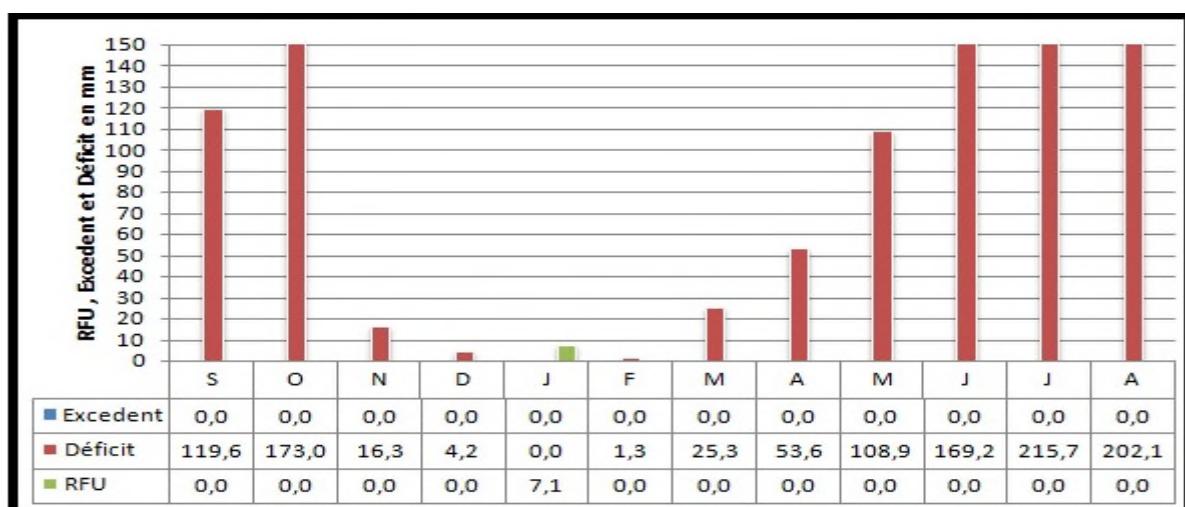


Figure 23: Etat de réserve facilement utilisable et le déficit agricole dans la région d'El-Oued.

4. CONCLUSION.

La zone d'étude est située au Sud Est algérien à 500 Km d'Alger, elle fait partie de la wilaya El-Oued, étendue sur neuf communes et occupe une superficie d'environ 500Km². Elle fait partie du grand Erg oriental, qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable d'altitudes varie entre 64m et 100m, avec une pente très faible (0.2% à 1.5%). La carte d'occupation du sol montre que la surface de la zone d'étude est occupée par les massifs dunaires, les Ergs, les zones urbaines, les Ghouts, les zones agricoles irriguées et les zones d'eau libre.

De point de vu géologique la zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional. Sur la carte seuls les terrains d'âge Quaternaire et Mio-Pliocène sont visibles, la succession des terrains et leur description lithologique ont été rendus possibles grâces à l'interprétation des logs de forage d'eau. On distingue, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire y succède. Il est constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques dizaines de mètres, où seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique.

L'étude climatologique montre que le climat de la zone d'étude est saharien avec un hiver chaud. La précipitation moyenne interannuelle est d'ordre de 74.9 mm, le mois de janvier est le plus arrosé avec 16.53 mm, et le mois de juillet est le moins arrosé avec 0.48 mm. La température moyenne annuelle est 21.3°C, elle est maximale au mois d'août avec une valeur de 32,35 °C et minimale au mois de janvier avec une valeur de 10,27 °C. Le bilan hydrique de la zone d'étude est déficitaire, conséquence d'une faible précipitation et d'une forte évapotranspiration, la réserve facilement utilisable est nulle durant les douze mois de l'année et la recharge par la pluie efficace est négligeable.

Partie 2:

Etude hydrogéologique de l'aquifère libre d'El Oued Souf

1. PRESENTATION DE SYSTEME AQUIFERE DE SAHARA SEPTENTRIONAL.

1.1. Extension de système aquifère de Sahara septentrional.

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) est partagé entre trois pays : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Il recouvre une étendue de plus d'un million de km², dont 70 % se trouvent en Algérie, 6 % en Tunisie, et 24 % en Libye. Le SASS est la superposition de deux principales couches aquifères; la formation du Continental Intercalaire, CI, la plus profonde et celle du Complexe Terminal, CT (Fig.24).

Le bassin sédimentaire du Sahara septentrional (BG, 2002) couvre une superficie de 780 000 km². Ce bassin possède une envergure de 1800 km E-W et de 900 km N-S (OSS, 2003). Il est limitée au Nord-ouest par les piémonts du versant Sud de l'Atlas saharien, au Nord par l'accident sud atlasicque au Nord des Chotts, relayé vers le golf de Gabès par la faille d'El Hamma - Médenine. A l'Ouest, la limite se situe au niveau de l'Oued Saoura-Reggane, au Sud par un alignement Est-ouest, de plateaux (Hammadas) du Tinrhert et du Tademaït. Enfin, la limite Nord-est se situe un peu après les reliefs du Dahart et celle du Sud-est parcourt la région de Syrte et va jusqu'à la ville de Hun en Libye (Castany, 1982).Ce bassin, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique (Fig.10). La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques subverticaux. Les pendages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au nord-est du bassin (Busson.G, 1970 ; Fabre.J, 1976 ; SASS 2002). Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire y succède. Il est constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres. Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique.

Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois aquifères (UNESCO, 1972 ; OSS, 2003 ; Guendouz et Al, 2006; Saibi et Al, 2009; Khechana, 2014), un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)).

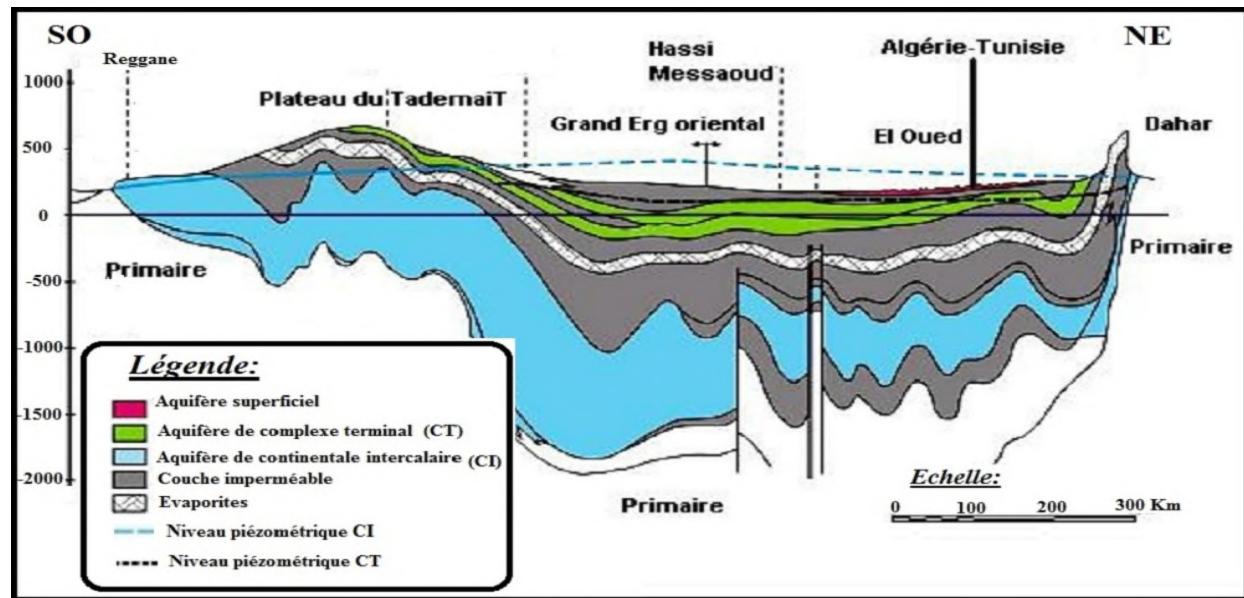


Figure 24: Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrional (UNESCO 1972).

1.2. Définition des nappes aquifères du SASS.

1.2.1. Nappe libre.

La nappe libre présente dans toute l'Oasis du Souf correspond essentiellement à la partie supérieure des formations continentales déposées à la fin du Quaternaire, elle peut être rencontrée à des profondeurs variant de 1 et 20 mètres (BG2002).

Vu son importance, cette nappe représentait la source principale d'irrigation d'importantes palmeraies, elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui sont en nombre de 16000 puits.

La nappe libre est constituée de formations détritiques d'âge quaternaire et mio-pliocène représentées par des sables, grés, sables argileux et des argiles sableuses avec un substratum constitué d'argiles. La profondeur du substratum dans la région de Souf est comprise entre 50 et 90 m (Senoussi et al, 1992 ; Meziani et al, 2011). La porosité efficace a été définie de la nappe libre, comprise entre 6 % et 23 %. Ces valeurs sont usuelles pour des sables fins (BG, 2003).

La circulation des eaux dans cette nappe est relativement lente sur toute la région d'El-Oued, particulièrement dans les zones caractérisées par l'existence de lentilles argileuses qui influent sur la perméabilité des sables. Excepté dans la région des Chotts la nappe libre est présente sur toute la région de Souf.

Les principales sources d'alimentation de cette nappe sont les pluies torrentielles, l'infiltration des eaux domestiques sous les zones urbaines, viennent s'ajouter depuis quelques années, les eaux d'irrigation provenant des nappes profondes (CT et CI).

1.2.2. Nappe du complexe terminal (CT).

Le terme de complexe terminal regroupe sous une même dénomination un ensemble de nappes aquifères qui sont situées dans des formations géologiques différentes allant du Sénonien supérieur (carbonaté) au Mio-Pliocène (détritique). Dans le bassin oriental, la nappe du complexe terminal s'étale sur près de 350 000 Km², et limitée à l'Ouest par la dorsale du M'zab, au Nord par l'accident majeur de l'Atlas saharien, à l'Est par le Dahar, au Sud par la ligne passant au Nord de l'axe d'In Salah-Zarzaïtine sous l'Erg oriental. D'après (D.H.W, 2005), nous rappelons l'existence de 3 nappes dont les deux premières correspondent respectivement aux nappes des sables d'âge mio-pliocène et pontien (Fig.25), alors que la dernière correspond à la nappe des calcaires d'âge sénonien à éocène supérieur.

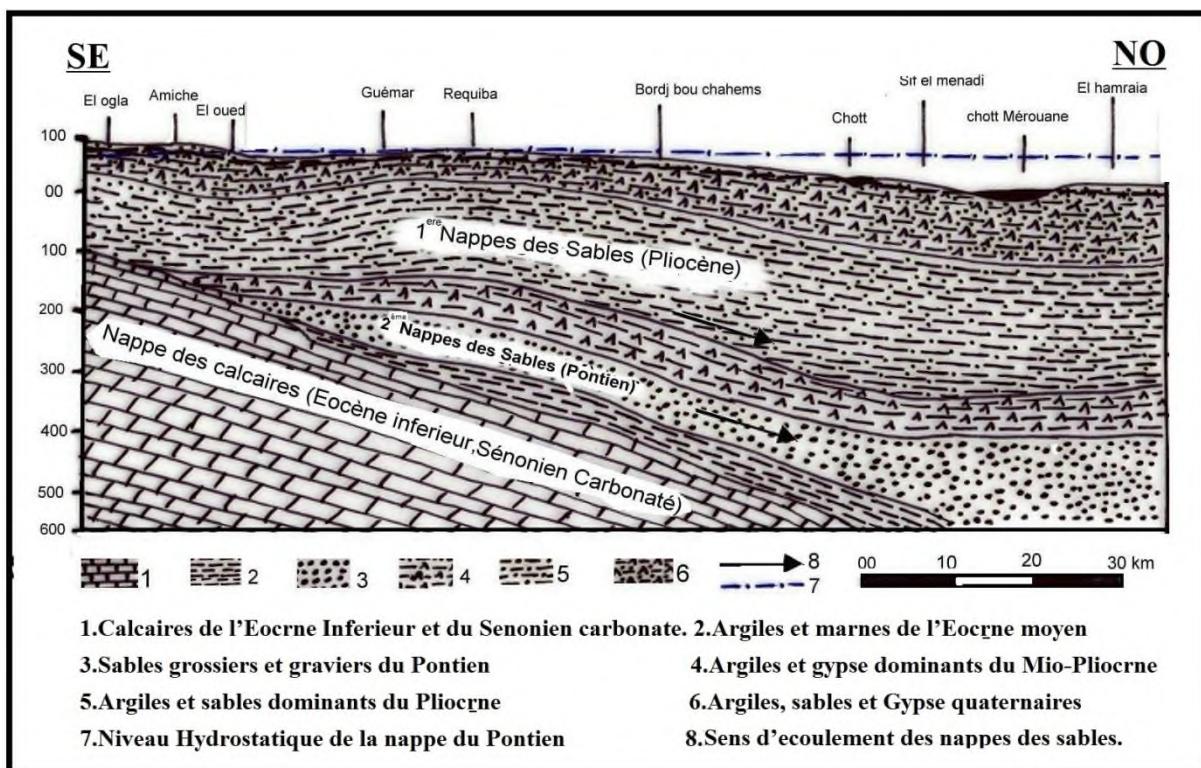


Figure 25: Présentation des formations aquifères du complexe terminal à El Oued.

L'écoulement des eaux de la nappe du CT (Fig.26) s'oriente vers les chotts du Sahara Oriental ; Melghir et Merouane en Algérie, Rharsa et Djerid en Tunisie. Alors que dans le bassin occidental les eaux de la nappe se mélangent avec celles du Continental Intercalaire (OSS 2003 ; Guendouz et al 1992-1995).

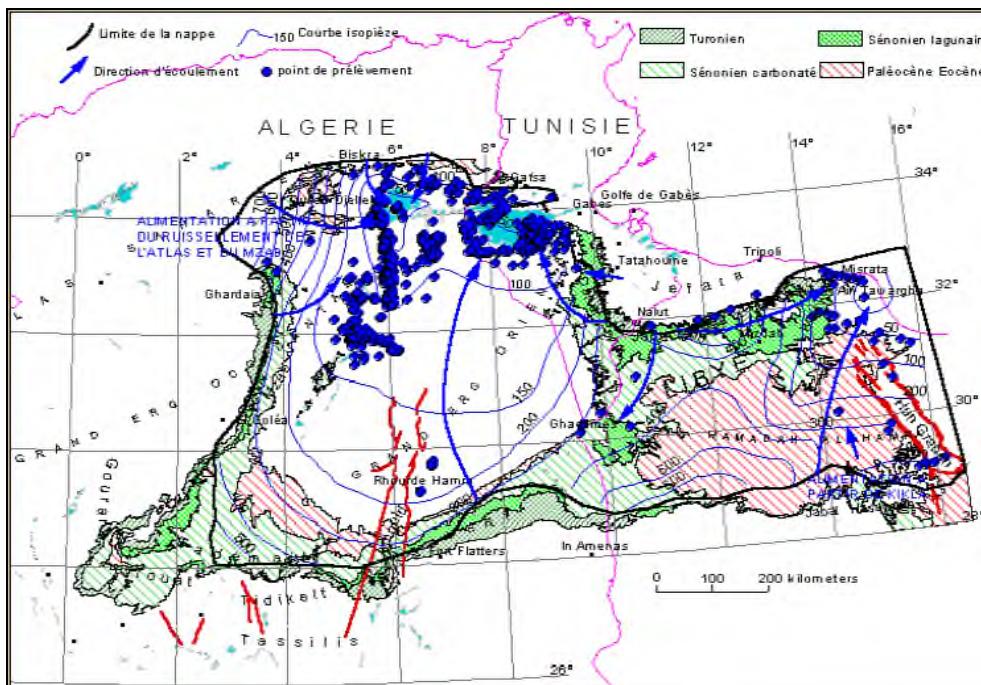


Figure 26: Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS 2003).

1.2.2.1. Nappe des Sables.

Au sein de ces niveaux sableux viennent s'engendrer deux nappes de type captif, dont la première correspond à la formation supérieure du complexe terminal appelée communément réservoir du "Sub-Souf". Cette nappe constituée de sables grossiers et faisant partie du Complexe Terminal, émerge progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud au Rustine. Dans la région d'étude elle se trouve en moyenne à 280 mètres de profondeur. Il faut mentionner également l'existence d'une deuxième nappe de sables d'âge pontien. Au dessus des bancs supérieurs de la nappe des calcaires et en contact avec les marnes de l'éocène inférieur et des graviers siliceux constituant donc une deuxième nappe captive en continuité avec la nappe du pontien du sud Tunisien, la profondeur de cette nappe varie entre 400 et 450 mètres, quant à l'épaisseur utile de cette nappe elle est de 50 mètres environ.

L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-ouest vers le Nord-est, autrement dit vers la zone des Chotts (Melghir et Merouane).

Dans les zones à fortes exploitations telles que la ville d'EL Oued, l'extraction des eaux se fait par pompage. Par contre dans les régions où l'exploitation est moindre à Taleb Larbi et Douar EL Maa, la nappe est artésienne : c'est le cas de la nappe de Pontien.

1.2.2.2. Nappe des Calcaires.

Le Complexe Terminal du Souf possède une lithographie plus complexe. Les forages captant cette nappe montrent l'existence de deux niveaux durs servants de repère pour la classification des eaux souterraines. Du Sud au Nord nous observons l'existence d'un premier niveau

calcaire mieux individualisé, parfois il est purement calcaire, quelque fois il est formé par des calcaires gypseux et correspond ainsi au niveau inférieur.

Le niveau supérieur, principalement représenté par des calcaires siliceux est considéré comme une zone de transition entre la nappe des calcaires et celle des sables. Dans l'ensemble ces deux niveaux sont séparés par des formations tantôt marneuses, tantôt sableuses en passant par des argiles (rouges).

Les forages profonds captant cette nappe, nous montrent que sa profondeur varie entre 350 et 700 mètres, mais il faut mentionner également que cette dernière n'est pratiquement pas exploitée dans la région du Souf.

1.2.3. Nappe du Continental Intercalaire (CI).

Le terme du Continental Intercalaire, correspond ainsi aux formations continentales du Crétacé inférieur, qui ne peut être que la période continentale intercalée entre deux cycles sédimentaires; la régression marine suivie d'une transgression du Crétacé supérieur.

Le Continental Intercalaire (C.I) occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien. Le réservoir aquifère du continental intercalaire est considérable, il représente le plus important aquifère dans le Sahara septentrional, du à son extension (plus de 600 000 Km²) et à son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. L'intérêt majeur de ce système aquifère réside dans la grande quantité d'eau stockée au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire et peut être maintenant exploitée, il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisé par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoires.

Le réservoir est constitué par des sables et des grés d'âge crétacé inférieur. La nappe est confinée entre un toit, constitué par une épaisse couche d'argiles et de marnes d'âge Cénomanien, alors que le mur est constitué des argiles d'âge néocomien. L'épaisseur totale du réservoir dépasse 250 m dans les plus grandes parties du Sahara Septentrional. Elle atteint 1000 m au Nord-Ouest.

Le C.I affleure dans la partie Sud et Sud-ouest (Fig.27) par contre il plonge en profondeur vers le Nord-est, captive sous le M'Zab, le Tademaït, le Grand Sud tunisien et la Hamada Al Hamra, et artésienne dans l'oued Rhig-Souf-Djerid-Fedjej (Besbes M et al 2007).

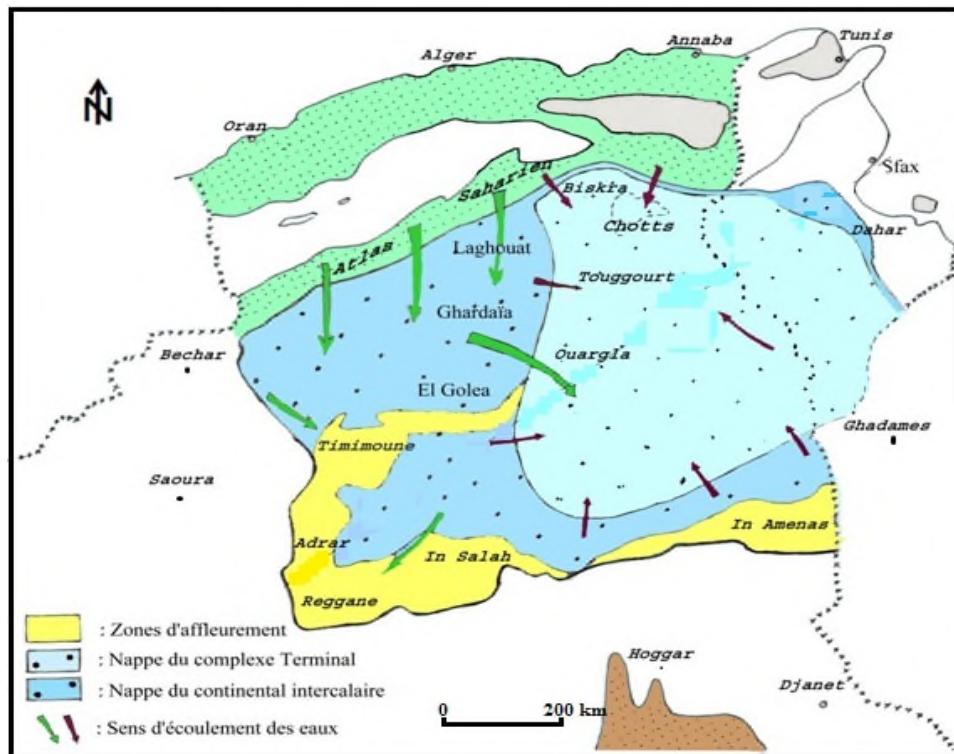


Figure 27 : Carte d'extension des Systèmes Aquifères (CT et CI) en Algérie

L'écoulement de la nappe du CI (Fig.28) se produit du piedmont de l'Atlas vers les zones des Foggaras au sud, du Tinhert et du Djebel Hassaouna vers le golfe de Syrte et vers l'exutoire tunisien du golfe de Gabès. Les exutoires naturels du CI sont formés par les bordures occidentales et méridionales du Tademaït où se trouvent les foggaras du Gourara, du Touat et du Tidikelt et les remontées dans la zone du Chott Fedjaj.

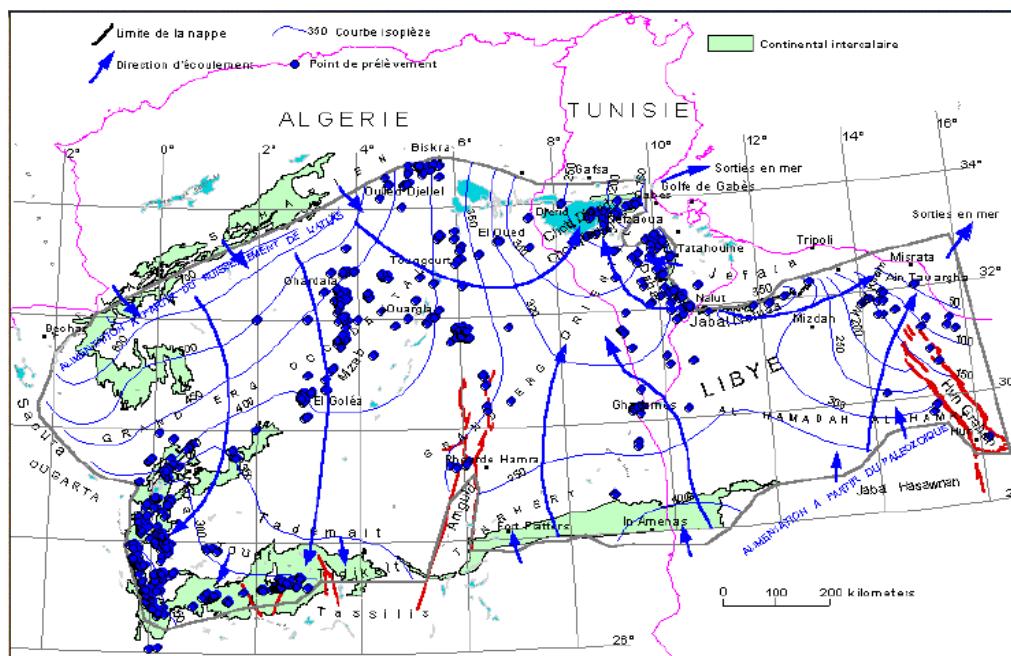


Figure 28 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).

2. L'EXPLORATION GEOPHYSIQUE DE L'AQUIFERE LIBRE D'EL-OUED.

La géophysique est un outil complémentaire indispensable à une étude hydrogéologique, elle complète les données d'un forage quand la zone d'étude est vaste et complexe. Les irrégularités sont généralement détectées de même que pour la puissance, l'allure et la structure de la formation étudiée.

Deux compagnes de géophysiques ont été exécutées dans la région d'El-Oued par l'entreprise (ENAGEO), la méthode utilisée est le sondage électrique vertical basé sur la mesure de la résistivité des roches, le nombre total des sondages électriques verticaux est 362 SEV, 126 SEV pour explorer la nappe libre (68 SEV se trouvent dans la zone d'étude), couvrent la région d'El-Oued (d'Oued Alenda Sud-Ouest à Hassi Khalifa Nord-Est et Robah Sud-Est à Hassi Hoba Nord-Ouest), avec des AB = 500m. Le but de cette étude géophysique est la détermination de la lithologie des formations investiguées par SEV et l'élaboration d'une carte de substratum argileux de la nappe libre d'El-Oued.

2.1. Aspects théoriques de la méthode de sondage par prospection électrique.

La prospection électrique implique la détection d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. Il existe une grande variété de techniques utilisant les méthodes électriques, on peut mesurer par exemple la chute de potentiel ou l'intensité de courant électrique. Par ailleurs, dans un domaine envisagé, il existe de nombreuses techniques de mesure. Les méthodes fondées sur la mesure du paramètre "résistivité" sont actuellement les plus répandues, plus développées et les plus diversifiées (méthodes imaginées en 1912 par les frères Schlumberger).

La résistivité (ρ) d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à laisser passer le courant électrique, on mesure; la résistivité électrique du roche. C'est un paramètre complexe qui dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont la nature et la quantité de la solution contenue dans la formation.

La résistivité des formations varie en fonction de leurs teneurs en eau, la minéralisation de l'eau et de la quantité d'argile. Les nombreuses expériences faites pour trouver la relation entre ; la résistivité des roches, la porosité, et la résistivité d'eau d'imbibition ont abouti à diverses formules plus ou moins empiriques dont la plus connue est celle d'ARCHIE (1942) :

$$\rho_r = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^{-m} \cdot S_w^{-n}$$

Où : ρ_r = résistivité électrique de la roche (en $\Omega \cdot m$).

ρ_w = résistivité électrique de l'eau d'imbibition (en $\Omega \cdot m$).

Φ = Porosité de la roche en (%).

S_w = degré de saturation en eau des pores en (%), pour les roches saturées =1

m = facteur de cimentation, sensiblement constant pour une roche donnée. Il dépend de la forme des pores, des liaisons entre pores, de la compaction, elle est entre 1,3 pour les sables non consolidés et 2,2 pour les roches très cimentées (calcaires, dolomies).

a = facteur qui caractérise la lithologie et varie entre 0,6 à 2 ($a < 1$ pour les roches à porosité inter-granulaire, et $a > 1$ pour les roches à porosité de fracture).

L'exposant n varie très peu avec les formations, sa valeur est environ de 2 pour la plupart des formations de porosité normale dont la teneur en eau est comprise entre 20 et 100 %.

On a l'habitude de regrouper sous le terme de facteur de formation $F = a \cdot \Phi^{-m}$; dans la pratique on admet pour les formations meubles, sables et grès, la formule de «HUMBLE» $F = 0,62 \cdot \emptyset^{-2,15}$ et pour les roches bien cimentées: $F = 1 \cdot \emptyset^{-2}$.

En cas de saturation complète ζ_r est surtout fonction de la porosité ; par conséquent plus une roche saturée et poreuse, plus elle contient d'eau et plus sa conductivité augmente, on admettre Alor que le paramètre résistivité se trouve ainsi directement lié à la teneur en eau que renferme la roche.

La loi d'ARCHIE, pour une roche saturée, exprime la relation entre la résistivité de la roche, sa porosité, et la résistivité du liquide imbibant les pores.

$$\rho_r = \rho_w \cdot a \cdot \emptyset^{-m} \text{ ou } \rho_r = F \cdot \rho_w \quad (\text{Pour } S_w = 1).$$

Cette loi n'est rigoureusement applicable que pour les roches à porosité inter-granulaire et saturée en eau. En présence d'argile on utilise la formule suivante :

$$\rho_r = (\emptyset + \emptyset_{\text{argile}})^{-2} \rho_w$$

Où : $\emptyset_{\text{argile}}$: Porosité avec un pourcentage d'argile.

A noter que d'autres facteurs intervient dans la résistivité d'une roche dont il faudra souvent tenir compte ; il s'agit de la température, la répartition géométrique des pores et leurs modes de communications.

2.2. Méthodes de prospection électrique.

La mesure de la résistivité électrique s'effectue généralement à l'aide du quadripôle de Schlumberger (Fig.29), on envoi dans le sol un courant électrique d'intensité I , crée par un générateur (piles accumulateur) à l'aide de deux électrodes A et B. les électrodes de réception M et N permettent de mesurer la différence de potentiel ΔV provoquée par le passage courant (Fig.30). On obtient la résistivité apparente grâce à la formule suivante :

$$\rho = K \Delta V / I ; \text{ Déduit de la loi d'Ohm}$$

Ou : K = est coefficient qui ne dépend que de la géométrie du dispositif, pour le dispositif de Schlumberger ($K = \pi A_M \cdot A_N / M_N$ pour un quadripôle symétrique).

ΔV et I sont mesurés respectivement à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre. La profondeur d'investigation d'un tel dispositif est fonction de l'écartement des électrodes d'émission A et B, ainsi que des épaisseurs et des résistivités des formations sont approximativement et empiriquement de l'ordre de $(1/4 \text{ à } 1/10) * AB$.

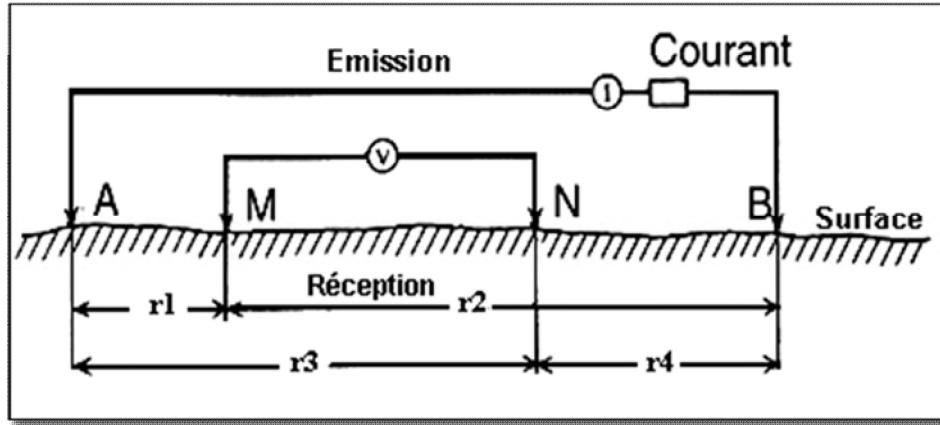


Figure 29: quadripôle de Schlumberger



Figure 30: Les matériels de sondages électriques.

Lorsque les filets de courant circulent entièrement dans un même niveau homogène, la résistivité mesurée correspond à la résistivité vraie de terrain, c'est le cas notamment des mesures test ou paramétriques effectuées sur des formations sub-affleurantes, d'épaisseurs et d'extensions suffisamment importantes par rapport à l'écartement de la ligne d'émission (AB). Généralement les filets de courant traversent plusieurs horizons différents, dans ce cas, la résistivité est fonction des résistivités de différentes couches et de leurs épaisseurs. Les résistivités mesurées sont dites résistivités apparentes, grâce à ces valeurs que nous essayons de déterminer les résistivités vraies ρ_i et les épaisseurs h_i caractérisant chaque niveau.

La présence d'une structure dans le sol se manifeste par une anomalie de la résistivité apparente ρ_a dépendant de nombreux paramètres (dimension et profondeur de la structure, dimensions du dispositif, contraste électrique entre la structure et le milieu environnement). Afin de déduire des informations concernant les causes des anomalies observées sur le terrain, il est nécessaire de connaître la relation qui existe entre une structure et son anomalie. Pour cela deux techniques sont employées, le traîné et le sondage électrique vertical, en effet ces deux méthodes sont complémentaires.

Si le sous-sol est homogène et isotrope, avec un dispositif de ce type on obtiendra la résistivité vraie, Si par contre, le sous-sol est hétérogène, on mesurera la résistivité apparente, qui est fonction de la nature du sous-sol et de la dimension du dispositif utilisé (le Schlumberger: La distance MN est petite par rapport à AB. En général $MN < AB/5$).

2.2.1. Le traîné électrique.

Dans la technique du traîné le dispositif AMNB est déplacé à travers champs. Selon des profiles plus au moins parallèles, tout en gardant constant l'espacement AB. La mesure ainsi obtenue correspond au centre. Les horizons géologiques explorés par cette méthode correspondent à une profondeur à peu près constante. Les résultats de résistivité apparente sont reportés sur des cartes et permettent de déduire les niveaux de même résistivité électrique et de délimiter leurs extensions. Ces cartes constituent un document qui complète l'interprétation géologique et permettent de faire un choix sur les emplacements éventuels de sondages électriques.

2.2.2. Le sondage électrique vertical.

Dans la méthode du sondage électrique on recueille des informations géologiques à la verticale d'un point donné, en poussant l'investigation toujours plus profondément. Pour cela, on effectue une série de mesures en agrandissement à chaque fois la longueur de la ligne d'émission AB, tout en gardant fixe le centre du dispositif.

En reportant, sur un graphe bi-logarithmique, les valeurs des résistivités apparentes mesurées en fonction de la longueur de ligne AB ; on obtient une courbe du sondage électrique dont l'interprétation va servir à déterminer graphiquement les résistivités ρ_i et les épaisseurs h_i des différents niveaux lithologiques.

La variation de résistivités des roches et des eaux (Tab.9), est d'ordre de 1 à quelques dizaines d' $\Omega \cdot m$ pour les argiles et les marnes, d'une dizaine à quelques centaines d' $\Omega \cdot m$ pour les sables et les grès marneux et d'une centaine à plusieurs milliers d' $\Omega \cdot m$ pour les calcaires, grés, granite et les roches éruptives.

Tableau 9 : plage de variation de résistivité des roches

Résistivités ($\Omega \cdot m$)	Caractéristiques lithologiques	Age de formation
10 à 70	Alluvions limoneuses de surface	Quaternaire
100 à 200	Alluvions sableuses sèches	
50 à 100	Alluvions sableuses humides	
Jusqu'à 1000	Alluvions grossières (galets et sables) sèches	
80 à 90	Alluvions grossières humides	
3 à 5	Marnes	Miopliocène
Jusqu'à 40	Marno-gréseuses	
7 à 10	Marnes	Miocène
Jusqu'à 500	Grès et Poudingues	
< à 3	Marnes	Oligocène
Jusqu'à 500	Flysch gréso- argileux	
50 à 80 parfois > à 100	Marno-calcaires	Crétacé
40 à 50	Tufs volcaniques	/

La conductibilité d'un électrolyte dépend en fait de la teneur en ions et de la mobilité des différents ions en solution et du degré de dissociation (Chapellier.D, 2000). La résistivité des eaux est en relation inverse avec le degré de minéralisation (Tab.10).

Tableau 10 : plage de variation de résistivité des eaux.

Types d'eau	Concentration ppm	Résistivité $\Omega \cdot m$	Conductibilité MS/cm
Eau potable	500	12	833
Eau médiocre	1000	6	1666
Eau mauvaise	2000	2.8	3571
Eau non potable	8000	0.75	13333
Eau de mer	35000	0.2	50000
Eau de Vichy	5167	1.2	8000
Eau de robinet	311	18	550

2.2.3. Interprétation des sondages électriques verticaux.

Lorsque $AB/2$ est petit, le courant se concentre dans la première couche et ρ_a tend vers ρ_1 . Plus on écarte A et B, plus la proportion totale du courant qui passe dans la deuxième couche augmente, ρ_a délaisse ρ_1 et devient nuancée par ρ_2 (Michel.C et al 2006). Lorsque $AB/2$ est très grand, la majorité du courant passe dans le deuxième milieu et ρ_a tend vers ρ_2 .etc. Les sondages se présentent sur papier bi-logarithmique avec $AB/2$ en abscisse et ρ_a en ordonnée.

Dans le cas de deux couches l'interprétation de graphe se fait par superposition du sondage effectuée aux abaques deux couches (Fig.31) disponibles (Wenner ou Schlumberger), les axes doivent être de même dimension. On déplace la courbe sur les abaques jusqu'à ce qu'elle se superpose à une des courbes des abaques, ensuite l'aide de la position de l'origine de l'abaque, on peut trouver ρ_1 et h_1 et connaissant à quelle droite on est superposée, on aura ρ_2 .

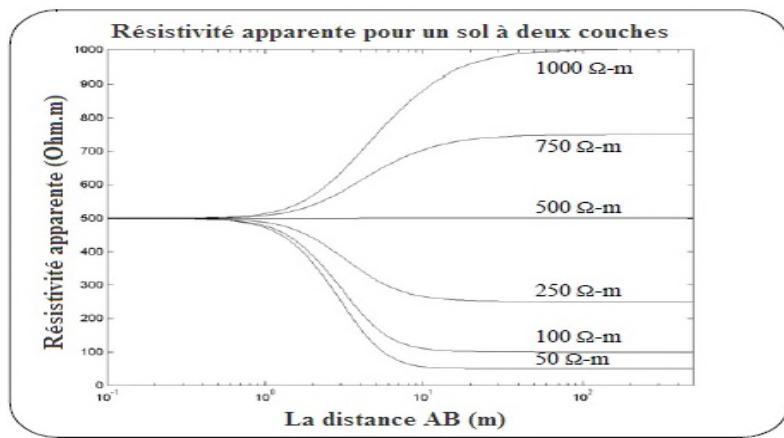


Figure 31: Schéma de l'abaque à deux terrains.

Dans le cas de trois couches l'interprétation se fait aussi en comparant (ajustant) la courbe expérimentale avec les abaques. On interprète la partie gauche (AB/2 petit) de la courbe à partir de l'abaque 2 couches. On obtient ainsi h_1 , ρ_1 et ρ_2/ρ_1 . On note alors le point (h_1, ρ_1) sur la courbe expérimentale. A partir des valeurs trouvées, en plaçant le point (h_1, ρ_1) sur l'origine de l'abaque trois couches, on cherche la courbe de l'abaque qui se superpose le mieux à la courbe de terrain. Il y'a quatre combinaisons des terrains possibles (Fig.32) : Conducteur compris entre deux résistants, sondage de type « H », résistants compris entre les deux conducteurs, sondage de type « K », résistivité qui augmente par paliers, sondage de type « A » et résistivité qui augmente par paliers, sondage de type « Q ».

On obtient ainsi h_2/h_1 et ρ_2/ρ_1 , de la même manière, on peut interpréter une courbe de sondage quatre ou cinq couches.

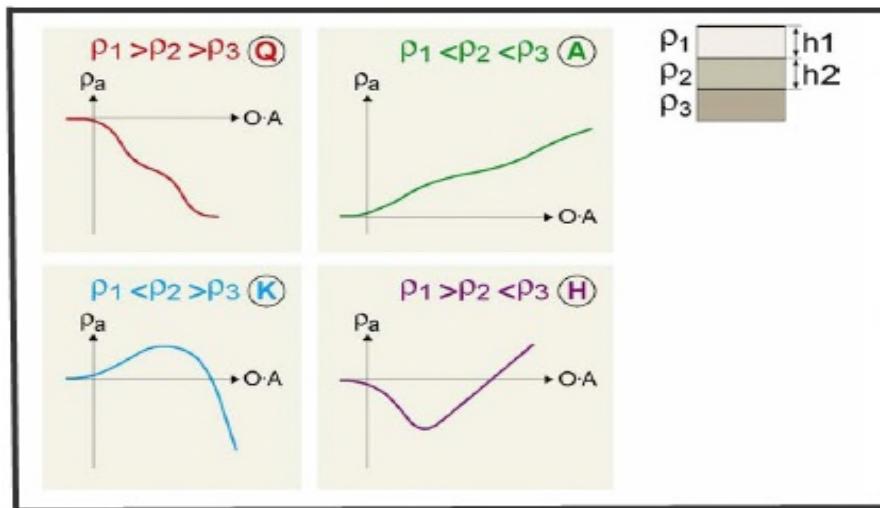


Figure 32 : Schéma des abaques à trois terrains.

2.3. Etalonnage des sondages électriques à l'aide des forages.

Pour établir une échelle des résistivités fiable, les mesures de la résistivité sont comparées aux descriptions lithologiques de forage proche, cinq forages P₅₆, P₅₁, P₄₃, P₄₆ et P₄₄, sont choisis par

ENAGEO pour étalonner les SEV. Les forages se localisent respectivement à l'emplacement des SEV 15, 131, 76, 30.

Après la comparaison entre les sondages électriques et mécaniques nous avons emprunté une échelle des résistivités (Tab.11), servi comme modèle pour interprétation des SEV et établissement des coupes géoélectriques.

Tableau11 : résistivités des formations géologiques dans la région d'El-Oued.

Formation	Résistivité
Sables	> 100 $\Omega \cdot m$
Argiles	< 10 $\Omega \cdot m$
Sables argileux	20 à 100 $\Omega \cdot m$
Argiles sableuses	10 à 20 $\Omega \cdot m$

2.4. Interprétation des Coupes géoélectriques.

La zone d'étude est explorée par 68 sondages électriques verticaux (SEV), regroupés dans quatre coupes géoélectriques, couvrent la majeure partie de la surface de la zone d'étude, leurs positionnement est déterminé dans la figure33.

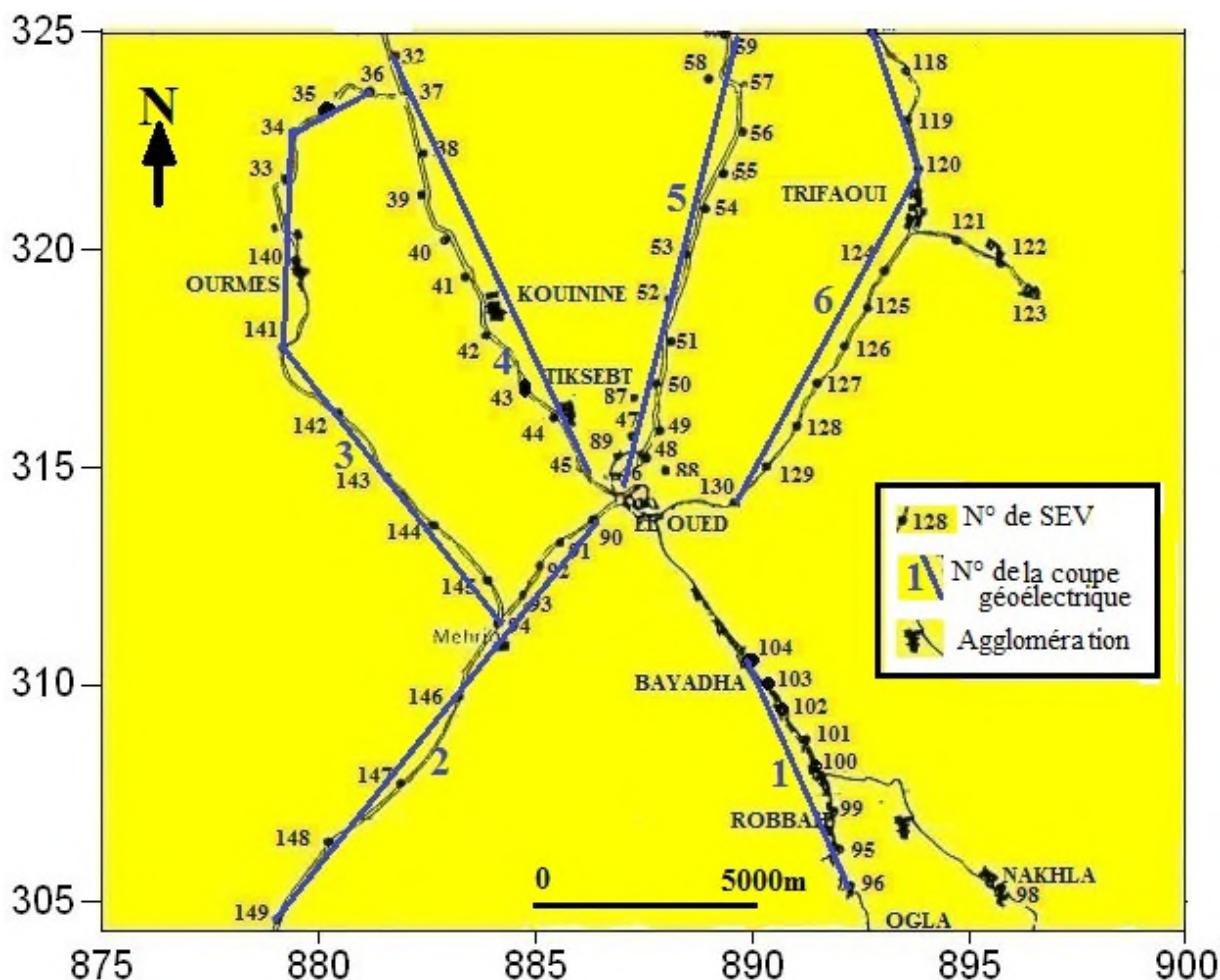


Figure 33: Carte de positionnement des sondages électriques verticaux et des coupes géoélectriques dans la zone d'étude.

2.4.1. Coupe 1.

La coupe (Fig.34) est orientée Nord au Sud, sur la route qui relie Bayadha à Oglia, débute à partir du SEV104 à SEV 96. La coupe montre la présence de trois terrains :

- Un terrain résistant qui correspondant aux sables dunaires d'épaisseur pouvant atteindre 10 m.
- Un deuxième terrain moins résistant (entre 10 et 20 $\Omega \cdot m$), d'épaisseur constante d'ordre de 15 m, ce terrain correspond à une formation de sables argileux. On remarque l'affleurement de ce terrain entre SEV99 et SEV 103 à la suite de la disparition du sable dunaires.
- Un troisième terrain conducteur constitué des argiles sableuses très épaisses (environ 35 m).
- A la base on trouve un substratum argileux est très conducteur et de résistivité inférieure à 10 $\Omega \cdot m$.

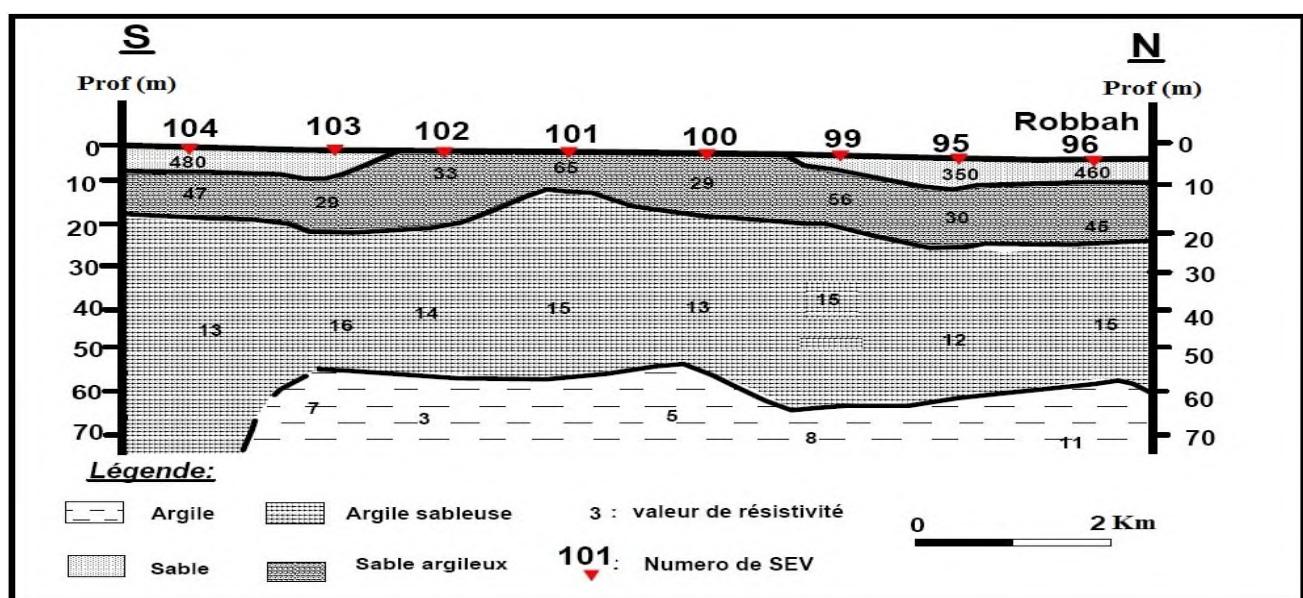


Figure 34 : Coupe géoélectrique N°1.

2.4.2. Coupe 2.

Cette coupe (Fig.35) est orientée Sud Ouest-Nord Est relie les sondages 149 à 90 d'El-Oued vers Oued El-Alenda. Elle met en évidence la succession des terrains suivants :

- Un terrain superficiel sableux très résistant ayant une épaisseur variable (inférieure à 10 m). La valeur maximale est enregistrée au sondage 149 (plus que 700 $\Omega \cdot m$).
- Un deuxième terrain conducteur constitué probablement par des argiles sableuses très épaisses (environ 60 mètres).
- Un troisième terrain très conducteur, il s'agit du substratum argileux.

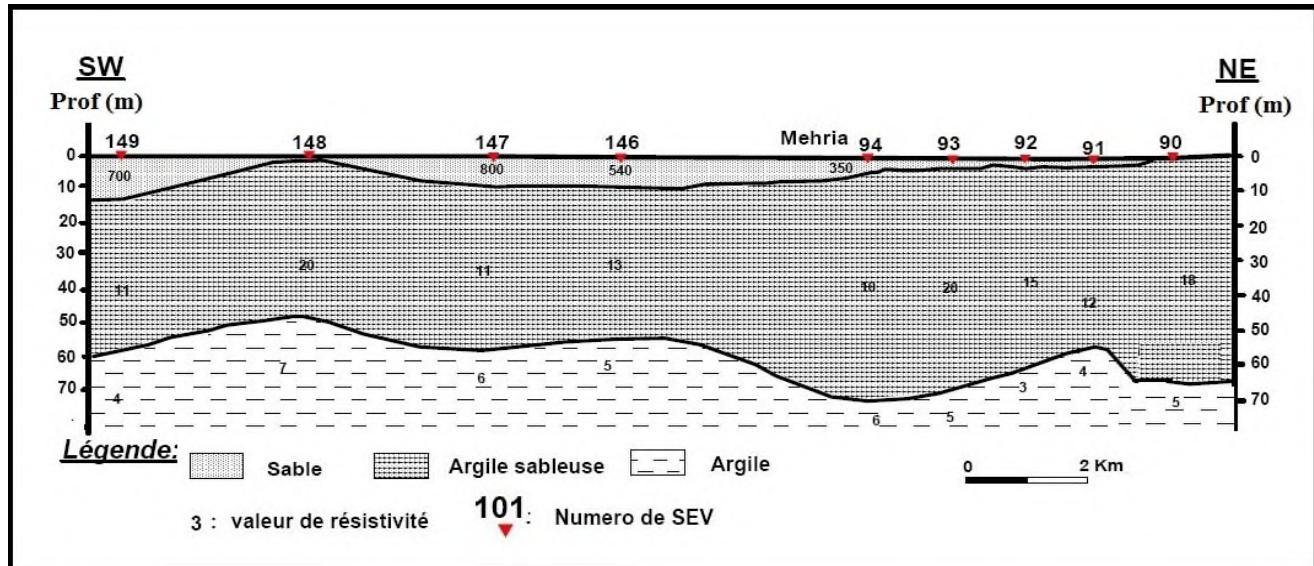


Figure 35: Coupe géoélectrique N°2.

2.4.3. Coupe 3.

Cette coupe (Fig.36) allant de Bou-Baïda au Nord à Oum Sahini au Sud en passant par Ourmes (relie SEV 94 à SEV 36). met en évidence 3 terrains:

- Un premier terrain de résistivité variant de 575 Ω.m jusqu'à 135 Ω.m, avec une épaisseur variant de 10 m à 25 m, correspondant aux sables plus au moins humides.
- Un deuxième terrain conducteur présentant des valeurs de résistivité comprises entre 12 et 20 Ω.m et correspondant aux sables argileux, son épaisseur parfois atteindre les 50 mètres.
- Enfin le substratum argileux dont la résistivité ne dépasse pas les 10 Ω. m.

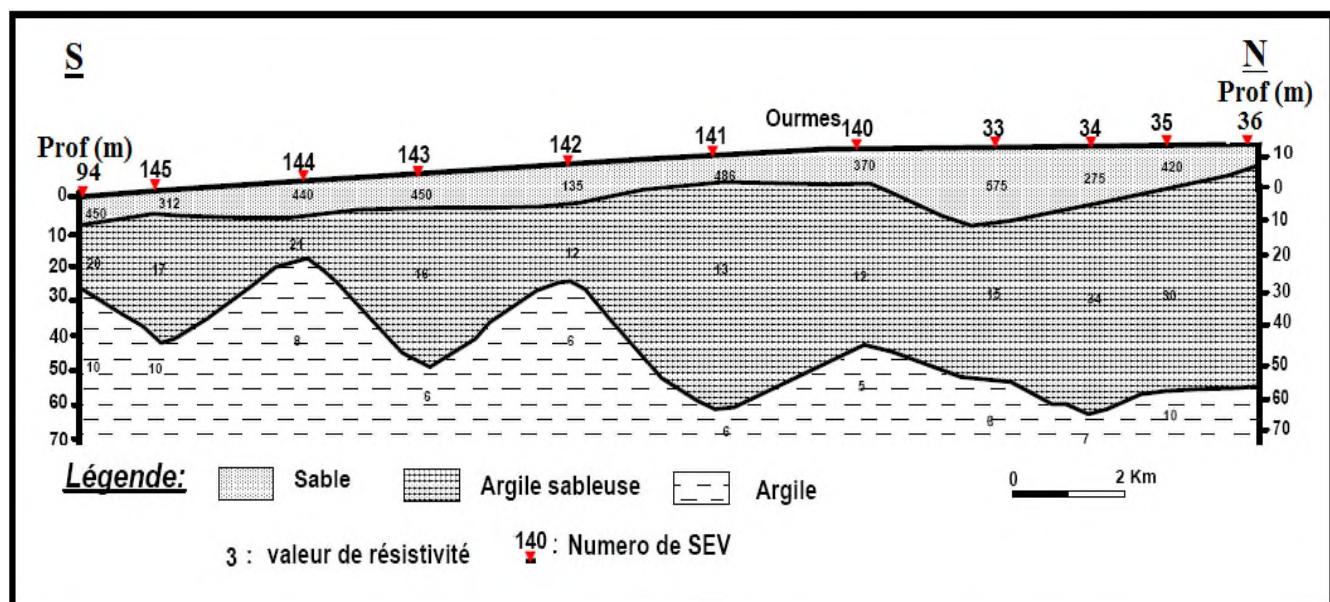


Figure 36: Coupe géoélectrique N°3.

2.4.3. Coupe 4.

La coupe (Fig.37) est orientée Sud-Est, Nord-Ouest débute à partir du SEV 45 à la sortie Nord Ouest de la ville d'El Oued et va jusqu'au SEV 32 au Sud de Guemar en passant par Kouinine. Le long de cette coupe nous remarquons la succession de Terrains suivants :

- Un Terrain superficiel très résistant d'épaisseur variable 5 à 10 mètres correspondant à la couverture des sables dunaires.
- Un deuxième terrain de résistivité sensiblement constante et d'épaisseur importante de l'ordre de 55 mètres par endroits, il correspond à des argiles sableuses. Dans la partie de Sud Est entre Kouinine et Tiksebt, les sables dunaires surplombent une lentille de sable argileux d'épaisseur pouvant atteindre 40 mètres. Dans la partie Nord Ouest du profil apparaît une lentille de sables argileux de faible épaisseur sous cette formation.
- Un troisième terrain est très conducteur de résistivité excédent rarement les $10 \Omega.m$.

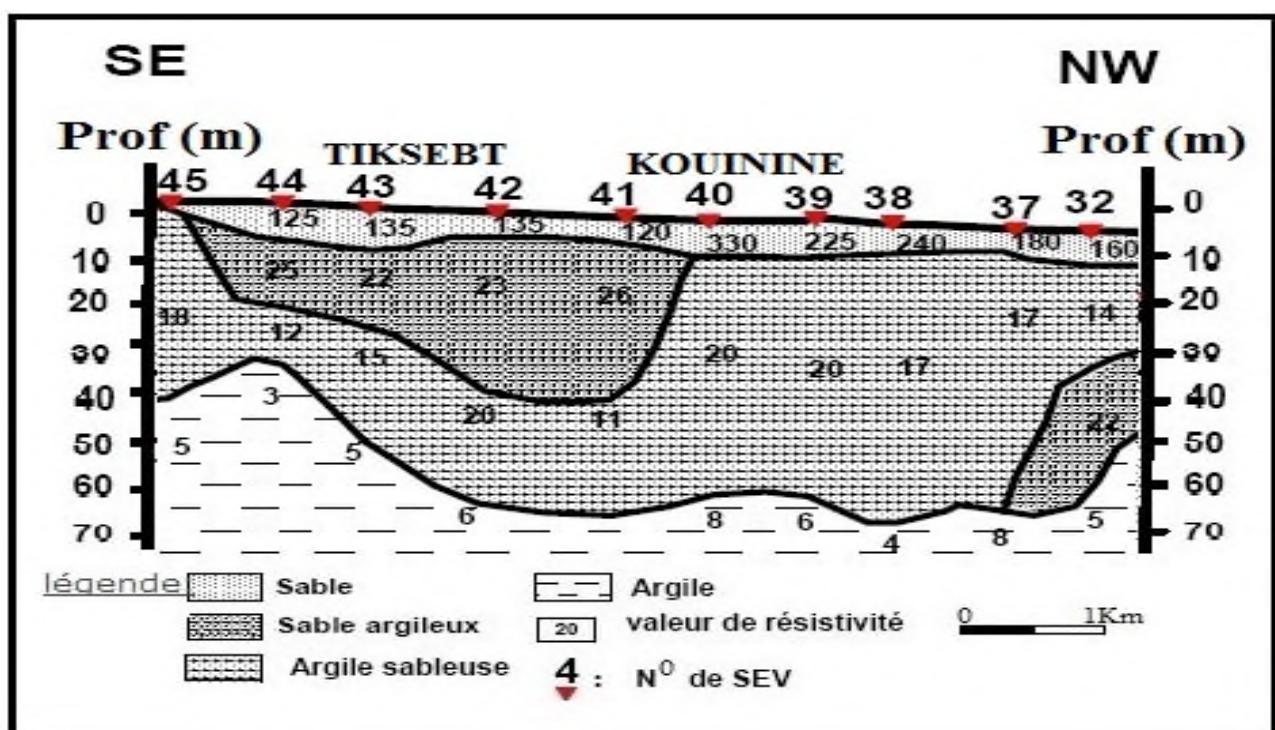


Figure37: Coupe géoélectrique N°4.

2.4.5. Coupe 5.

Cette coupe (Fig.38) est orientée Sud-Ouest à Nord-Est débute du SEV 48 situé à la sortie Nord d'El-Oued jusqu'au SEV 86 sur la route allé vers de Hassani Abd Alkrim. Cette coupe montre la succession des terrains suivants:

- Une couche superficielle résistante d'épaisseur allant de 5 à 15 mètres, caractérisée par une résistivité élevée oscillent entre $159 \Omega.m$ et $375 \Omega.m$. Cette formation correspond à des sables dunaires.

- Une deuxième couche moins résistante (résistivité proche de 20 $\Omega \cdot m$) à la partie Sud-Ouest de la coupe, entre les sondages 52 et 48, c'est une formation de sables argileux, avec une épaisseur qui peut atteindre 40m.
- la formation de sables argileux disparaît complètement au profit d'une troisième couche généralement plus conductrice que la précédente (résistivité proche de 20 $\Omega \cdot m$) d'épaisseur variable de 25 à 40 mètres. Cette formation correspond à des argiles sableuses.
- En fin la quatrième couche très conductrice et de résistivité ne dépassant pas les 10 $\Omega \cdot m$, il s'agit d'argiles.

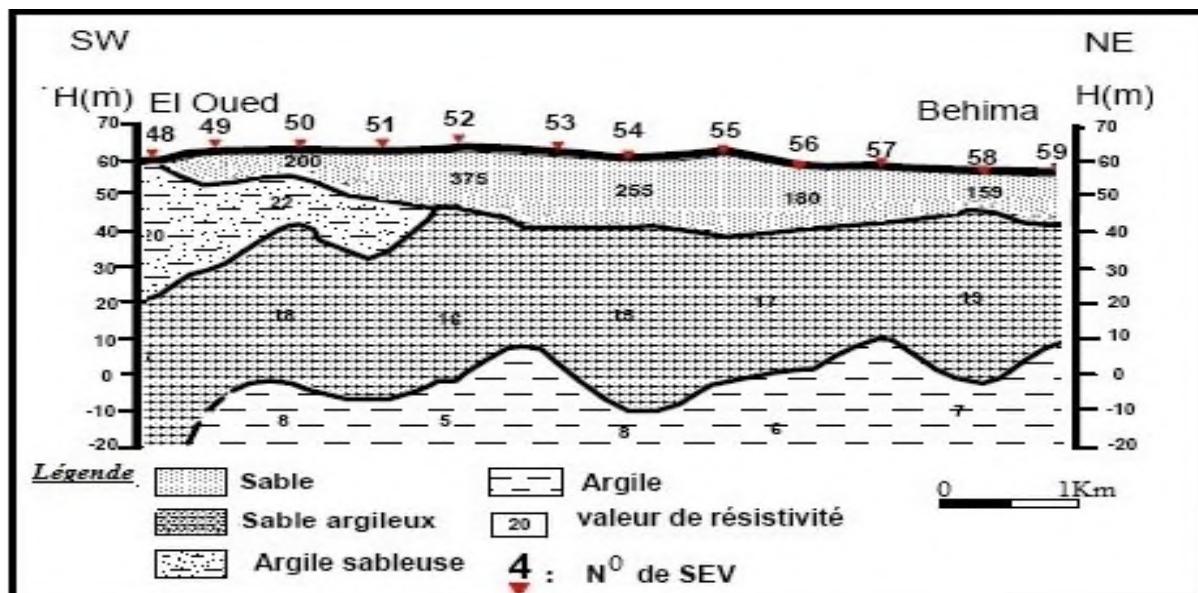


Figure 38: Coupe géoélectrique N°5.

2.4.6. Coupe 6.

Cette coupe (Fig.39) est interprétée selon les sondages réalisés le long de la route qui relie Zgoum à El -Oued en passant par Trifaoui, elle est orientée Sud-Ouest, Nord- Est, débute à partir du SEV 130 à la sortie Nord Ouest de la ville d'El Oued et va jusqu'au SEV 117. Elle montre la présence de trois terrains :

- Un terrain résistant qui correspondant aux sables dunaires d'épaisseur pouvant atteindre 20 mètres.
- Un deuxième terrain conducteur de résistivité comprise entre 10 et 20 $\Omega \cdot m$ et d'épaisseur pouvant atteindre 55 mètres, ce terrain correspond à une formation argilo-sableuse.
- Le substratum argileux est très conducteur et de résistivité inférieure à 10 $\Omega \cdot m$.

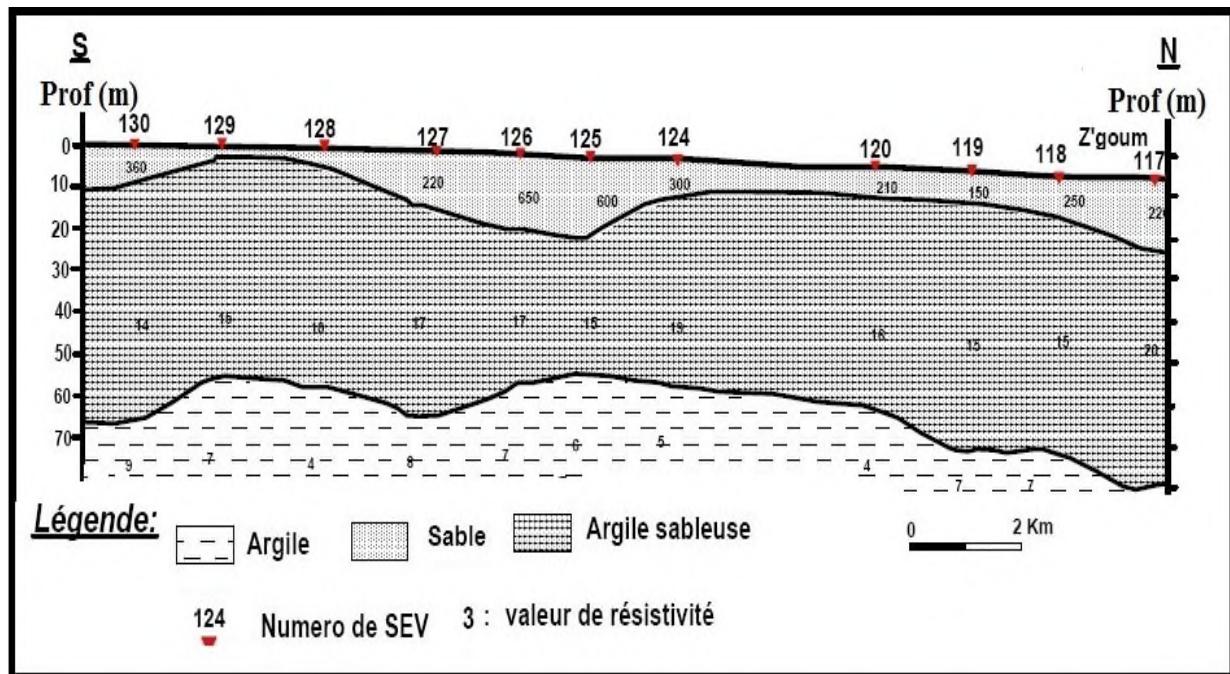


Figure 39: Coupe géoélectrique N°6.

2.5. Cartes du substratum argileux de la nappe libre d'El-Oued.

La carte de substratum de la nappe libre d'El-Oued (Fig.40) a été établie grâce aux données des sondages électriques verticaux et des coupes géoélectrique réalisées par l'ENAGEO en 1993, à la suite de la première campagne des mesures géophysique et les données des logs stratigraphiques des forages d'eaux réalisés dans la région. On observe que la morphologie de substratum argileux est presque régulière dans toute la zone d'étude, leur profondeur dans la plupart des cas est comprise entre 40 m et 70 m. mais il est très difficile de fixer la profondeur de substratum avec une grande précision à cause de la continuité lithologique et de la résistivité entre les argiles sableuses et l'argile. On ajoute aussi que les limites latérales de la nappe libre, n'a pas été atteint étant donné que cette dernière s'étend au-delà de la frontière avec la Tunisie.

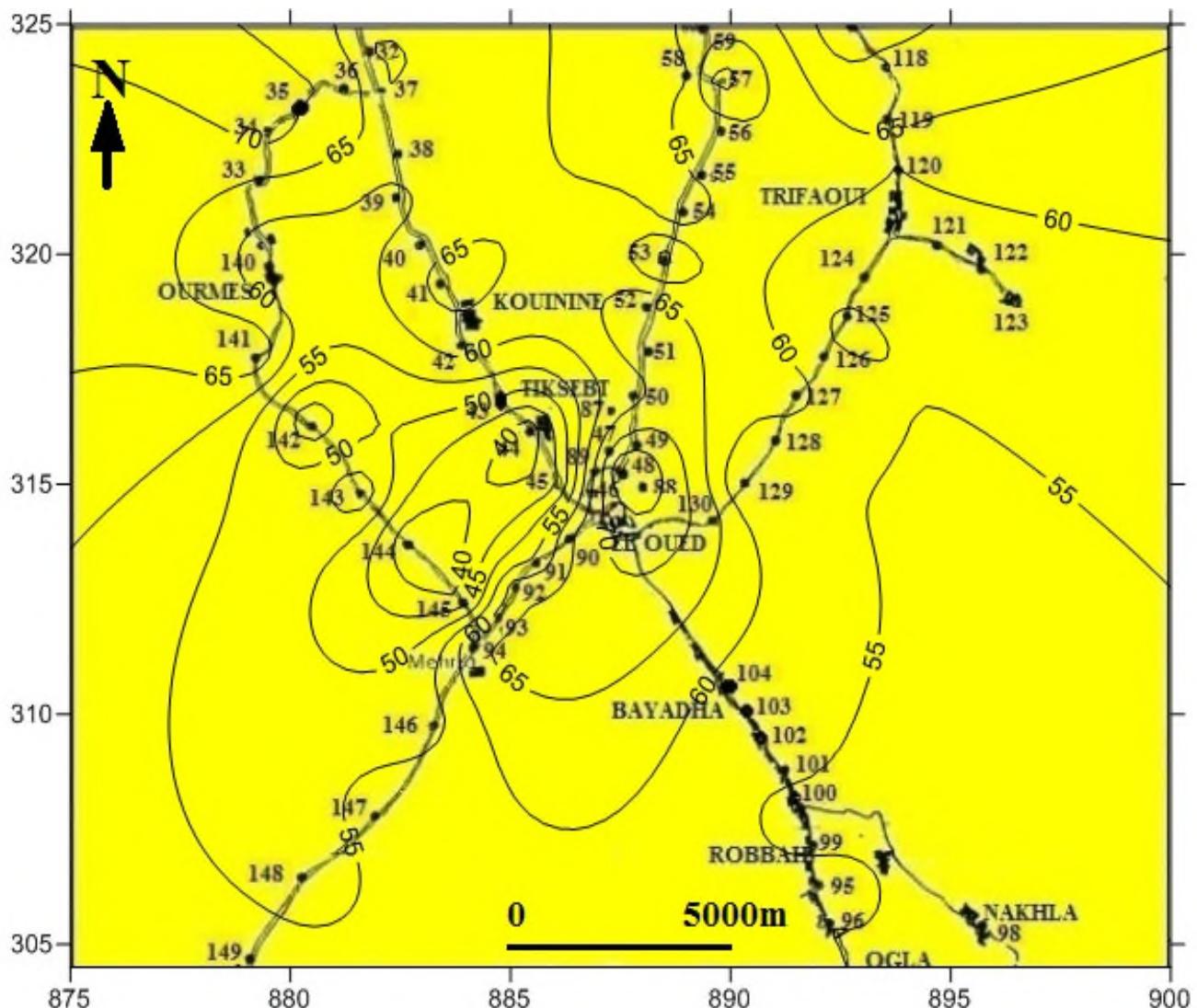


Figure 40: Carte du substratum argileux de la nappe libre d'El-Oued dans la zone d'étude.

3. APPORTS D'ANALYSE DES LOGS DES FORAGES D'EAU.

3.1. Généralités sur les forages d'eau.

Les techniques de captage des eaux souterraines classiquement mises en œuvre dans les milieux poreux et fracturés sont peu variées. Le choix de la technologie est à adapter en fonction non seulement de l'hydrogéologie mais également de contraintes externes ; topographie, hydrographie, risques de salinisation, de transfert de pollution depuis la surface, occupation des sols, conditions d'exécution et d'équipement .etc.

Le forage, à la différence d'un puits, est un trou vertical profond et de diamètre plus restreint. Il est creusé par un procédé mécanique à moteur (foreuse) en terrain consolidé ou non, pour exploiter des aquifères. Il existe de nombreuses méthodes de foration dont la mise en œuvre dépend de paramètres très divers, les plus utilisés en Algérie sont ; le forage rotary circulation directe, le forage au marteau fond de trou (MFT) et le forage par percussion.

On peut citer deux types de forages ; le forage de prospection, utilisé dans un contexte hydrogéologique difficile (par exemple présence d'aquifères multicouches avec des niveaux d'eau salée), il s'avère intéressant de réaliser des forages de prospection. Ils permettent de s'assurer de la présence et de la qualité de l'eau souterraine, de connaître la nature de l'aquifère, ou d'établir les relevés d'une campagne de prospection géophysique. Ils sont en général réalisés et équipés en petit diamètre (43 mm à 100 mm), puis soit conservés en piézomètre, soit rebouchés et abandonnés. Des essais de pompage simples permettent de vérifier la présence d'eau. La réalisation d'une campagne de forages de prospection est fréquente avant de réaliser un forage d'exploitation de diamètre important (> 200 mm). Une fois le forage de prospection fait, s'il s'avère positif il sera alésé et équipé pour devenir un forage d'exploitation. Ces derniers sont des ouvrages permettant d'atteindre et d'exploiter une nappe d'eau souterraine, même située à des profondeurs importantes, au-delà de 500 mètres. Un forage d'exploitation d'eau est destiné à permettre l'extraction de l'eau contenue dans une formation aquifère. C'est pourquoi, quelle que soit la méthode de forage retenue, l'équipement comporte toujours une colonne d'exploitation maintenant le terrain dans la partie supérieure non aquifère proprement dit.

Trois éléments essentiels constituent l'équipement de forage d'exploitation sont, Les tubages pleins, les crépines ou tubages perforés et le massif filtrant.

3.1.1. Les tubages pleins.

La fonction de tube plein est de canaliser l'eau depuis la ressource jusqu'en surface, de tenir mécaniquement les terrains traversés, de participer à l'individualisation de l'eau captée du reste du forage ou de la surface et de permettre la fixation du matériel de tête d'ouvrage (supportée la pompe immergée, raccordement au réseau de surface). Le débit d'exploitation espéré et la profondeur finale à atteindre conduisent à déterminer les caractéristiques des outils de forage et le diamètre des tubages à utiliser. D'autre part, en fonction du débit souhaité, le choix de la pompe immergée imposera le diamètre des tubages.

3.1.2. La crépine.

La crépine constituée l'élément principal de l'équipement d'un ouvrage d'exploitation d'eau. Placées à la suite du tubage plein, face à une partie ou à la totalité de la formation aquifère, les crépines doivent : Permettre la production maximale d'eau claire sans sable, résister à la corrosion due à des eaux agressives, résister à la pression d'écrasement exercée par la formation aquifère en cours d'exploitation, avoir une longévité maximale et induire des pertes de charge minimales. Il existe plusieurs types de crépines industrielles en acier (Fig.41) :

- Crépines à trous ronds : utilisé en terrains durs, sa densité de perforation est de 10%.

- Crépine à trous oblongs : avec des fentes rectangulaires verticales, de largeur au moins égale à l'épaisseur de la tôle, longueur standard 3 cm, sa densité de perforation varie de 10% à 20%.
- Crépine à prussiennes, avec des perforations rectangulaires horizontales, formant souvent, de bonne résistance mécanique, mais de faible pourcentage de perforation.
- Crépine à nervures repoussées, réalisé à plat puis roulé et soudé, de bonne résistance mécanique du fait du faible enlèvement de métal, de pourcentage de vide variant de 3 à 27%.
- Crépine type Johnson, à ouverture horizontale continue sur toute la longueur de la crépine, obtenue par enroulement en hélice d'un « fil enveloppe profile » soudé sur des génératrices métallique verticales. Les avantages principaux de telle crépine sont : la régularité et la précision des ouvertures, les faibles risques de colmatage et le coefficient d'ouverture le plus élevé par rapport aux autres crépines.

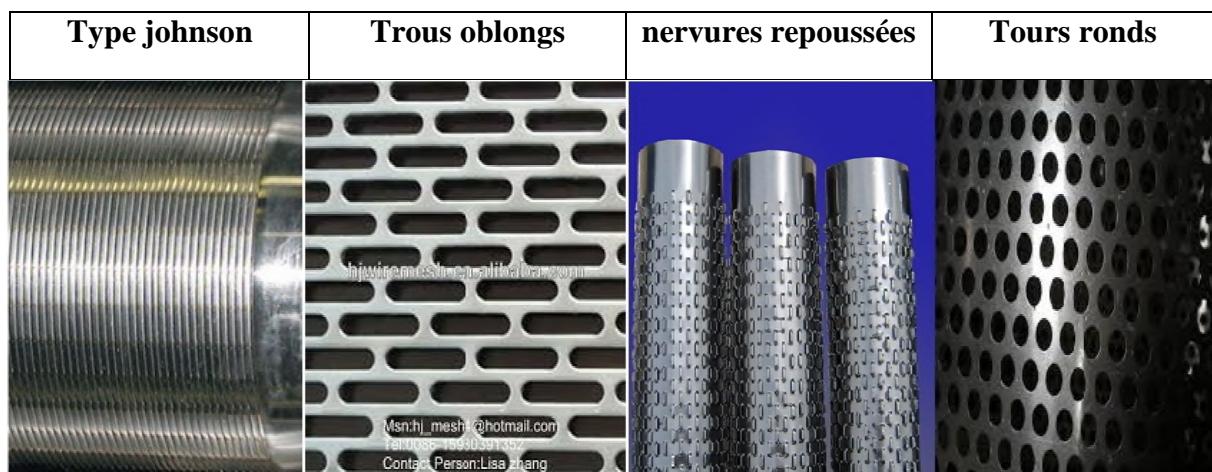


Figure 41: Les types des crépines.

3.1.3. Le massif filtrant.

Le massif filtrant (Fig.42) constitué des matériaux meubles formés d'éléments calibré (graviers, Granulats), disposé dans l'espace annulaire entre la crépine et les parois de puits pour empêcher l'érosion souterraine et prévenir le colmatage et la réduction conséquente de l'efficacité de puits. Le gravier filtre doit être assez uniforme, calibré, propre, rond et siliceux de préférence. Il ne doit pas être calcaire, ni concassé. Par ailleurs, il faut savoir qu'un gravier additionnel de granulométrie surdimensionnée dans une formation sableuse fine, peut provoquer un ensablement de l'ouvrage. Par contre, un massif filtrant de granulométrie trop fine peut conduire à une exploitation partielle de la nappe et rendre difficile l'élimination de la boue de forage.

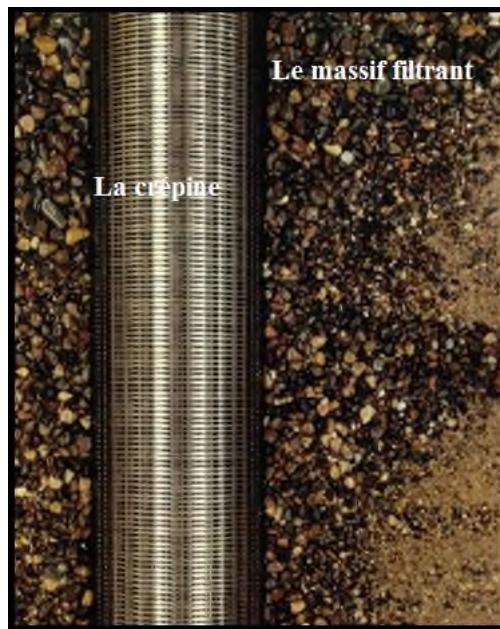


Figure 42: Emplacement du massif filtrant dans le forage.

3.2. Les forages hydrauliques dans le Sahara septentrional.

3.2.1. Considérations générales.

Le Sahara septentrional est défini par les limites d'extension des nappes du continental intercalaire (CI) et du complexe terminal (CT). Ces limites sont constituées; au Nord par la ligne de Crète de l'Atlas saharien de la frontière Tunisienne jusqu'à Benhar, au Sud par une ligne reliant Reggane-In Salah et In Amenas, au l'Ouest par le méridien passant par Ain Sefra, Timimoun et raggane et au l'Estpar le frontières Algéro-Tunisienne et Algéro- Lybienne.

3.2.2. Règlements sur les forages.

Les dispositions du décret 86-277 du 2 septembre 1986 relatif à la concession des travaux des recherches des captages d'eau et l'exécute de tout forage hydraulique dans le bassin du Sahara Septentrional est soumise à l'avis technique préalable de l'ANRH.

Le forage à exécuter doit faire l'objet par le maître d'ouvrage d'un rapport comportant :

- Les coordonnées exactes du forage.
- La profondeur prévisionnelle.
- L'usage de l'eau (AEP, irrigation, industrie).
- Les débits et pressions attendus.
- La coupe géologique et l'équipement prévisionnel du forage.

3.2.3. Forages de Continental Intercalaire (CI).

L'exécution d'un forage au CI nécessite l'établissement d'un programme qui prend en compte:

- la profondeur prévisionnelle de la couche aquifère à capter.

- les caractéristiques des couches à traverser, en particulier, la présence des couches salifères, nécessitant des dispositions techniques spéciales notamment de double tubage.
- les conditions géologiques particulières (pertes totales, éboulements. etc.)
- les caractéristiques des forages réalisés dans la région.

3.2.3.1. Exécution et équipement : Après exécution des opérations successives de forage et d'alésage de différents diamètres, et la mise en place des tubages et des crépines, l'équipement du forage sera constitué de tube guide, de colonne technique, de colonne de production et de colonne de captage. Ces tubes et crépines seront munis de centreurs.

Pour la mise en place du tube guide on procède à un forage de diamètre 32 pouces sur longueur minimum de 25 mètres, en suite on met en place un tubage de diamètre 26 pouces et on fait la cimentation totale de l'espace annulaire. Les raccords seront obligatoirement filetés et non soudés.

L'ouverture des crépines est déterminée par l'analyse granulométrique, les échantillons de terrain (cuttings) seront recueillis tous les 5 m (minimum) dans la couche aquifère et seront prélevés, tous les 10 m dans les formations situées au-dessus de l'aquifère. En règle générale, il est conseillé une ouverture qui laisse passer 50% des grains. La longueur de la colonne de captage ne doit pas excéder 200 m et doit comporter au moins 75% de crépines.

Il faut mentionner dans cette partie que la crépine utilisée dans le captage de l'aquifère du continental intercalaire est en double parois pour résister à la pression très forte (Annexe n°3), et aussi on ne procède pas à la mise en place du massif filtrant, vu l'impossibilité de leur introduction dans l'espace annulaire.

3.2.3.2. Diagraphie : La diagraphie fournie un certain nombre d'informations sur les terrains traversés par le forage ou l'état de trou nu. Le programme de boue sera donc déterminé en fonction des informations à recueillir de la diagraphie. Dans le cas des forages du continental intercalaire, l'enregistrement des diagraphies suivantes est obligatoire : Polarisation Spontanée(P.S), Gamma Ray, Laterolog, Diamètreur et Résistivité.

3.2.3.3. Le programme de boue : il doit être établi en tenant compte, des terrains des aquifères et des couches supérieures ; Mio-Pliocène, Sénonien, les zones de pertes de boue, la présence des formations géologiques salifères et les zones de fortes pressions de couche (CI). Dans les zones salifères, la boue de forage devra être saturée en sel. A titre indicatif, les caractéristiques principales de la boue à utiliser sont illustrées dans le tableau les suivantes :

Tableau 12: Programme de boue pour les forages CI.

	Densité g/cm ³	• Viscosité	• Filtrat cm
Colonne de technique	• 1,20	• 80	15 à 20
Colonne de production	1,35 à 1,40	• 45 à 60	• 10
Colonne de captage	• 1,30	• 45 à 60	4 à 5

3.2.3.4. Cimentation : La cimentation est une opération fondamentale dans l'exécution des forages profonds à l'Albien. Elle doit être particulièrement efficace pour protéger les tubages contre toute corrosion externe et assurer la solidité et l'étanchéité parfaite de la colonne de production.

L'Opération de préparation du lait de ciment consiste à remplir avec un mélange eau + ciment (laitier de ciment), l'espace annulaire au dessus du réservoir de CI, jusqu'à la surface du sol. Le dosage est d'environ 50 litres d'eau pour 100 kg de ciment, ce qui donne 75 litres de laitier. Si vous disposez de bentonite, utilisez le mélange suivant : 70 litres d'eau, 4 kg de bentonite et 100 kg de ciment; ce mélange évitera à l'eau de filtrer hors du ciment, mais le temps de prise sera légèrement supérieur. A titre indicatif : les caractéristiques de ciment sont: densité (1,85-1,90), dosage (50 litres d'eau pour 100 kg de ciment), nature de ciment (Portland ou équivalent, résistant aux sulfates).

La mise en place de ciment consiste à remplir l'espace annulaire jusqu'au niveau du sol, et laisser sécher un minimum de 12 heures avant d'effectuer les opérations de développement. La cimentation doit être faite en règle générale avant les essais de pompage. Cependant, lorsqu'il n'est pas possible d'attendre 12 heures, il est toujours possible de faire une cimentation après les opérations de développement et d'essais de pompage, dans la mesure où un bouchon d'argile a été déposé au dessus du gravier filtre.

L'opération de cimentation étant réalisée sous pression, elle sera considérée achevée lorsque le ciment sort en tête de puits de façon régulière et simultanée tout autour de l'espace annulaire. Pour contrôler la qualité d'exécution de la cimentation, on procédera aux diagraphies de contrôle suivantes : CBL/Densité variable et CET/Evaluation des cimentations.

3.2.3.5. Essais des débits : Les essais des débits, constituent une opération obligatoire qui doit suivre la phase de développement. Ils sont réalisés dans l'objectif de déterminer le débit d'exploitation du forage (CI et CT). Ces essais doivent se dérouler comme suit :

- Mesure de la pression en tête (Pression Statique P_o vanne fermée).
- Réalisation de cinq paliers de débits croissants pour obtenir cinq points sur la courbe caractéristique.
- Les débits peuvent correspondre à des pressions : $P_o/5,2P_o/5, 3P_o/5, 4P_o/5$ et P_o (vanne ouverte).

- Les mesures de pression et débit seront prises toutes les 15 minutes, de manière alternative.
On change de palier quand 6 mesures successives donnent le même résultat.
- Fermeture du forage pendant un temps égal à celui du dernier palier. Observation de la remontée aux rythmes ci-après (par mesure de pression):
 - toutes Les minutes pendant les 5 premières minutes.
 - toutes les 2 minutes jusqu'à la fin du 1^{ère} quart heure.
 - toutes les 5 minutes jusqu'à de la 2^{ème} quart heure.
 - toutes les 10 minutes jusqu'à de la 1^{ère} heure.
 - toutes les 15 minutes jusqu'à de la 2^{ème} heure.
 - toutes les 30 minutes jusqu'à de la 3^{ème} heure.
 - toutes les heures ensuite si nécessaire.
- Le programme pourra être adapté aux conditions d'essais par l'hydrogéologie de l'Administration.
- Les essais des débits devront être obligatoirement réalisés en présence de l'hydrogéologue de l'Administration.

3.2.3.6. Equipement de surface : L'équipement de surface doit permettre d'assurer :

- La sécurité de l'ouvrage.
- La commodité d'exploitation et d'entretien.
- Le réglage du débit désiré.
- Le contrôle de la nappe.

Il doit comporter, une vanne de tête en acier inox (adaptée au débit, à la pression, au degré de corrosivité et à la température des eaux), une prise de pression en tête de forage et une vanne de service et un dispositif de réglage du débit.

3.2.3.7. Contrôle des forages : Pour assurer la conservation des nappes profondes de CI, les contrôles périodiques des forages profonds (CT et CT) sont obligatoires. Ils sont à la charge de la personne physique ou morale qui exploite le forage. Les objectifs du contrôle est ; la suivie de l'évolution des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe, la suivie des caractéristiques hydrauliques du forage et de son équipement, la suivie de la qualité des eaux et la maintenance de têtes de forage.

Le contrôle par l'Administration comporte les opérations suivantes :

- Une inspection annuelle de l'équipement de surface devra être réalisée pour vérifier l'état de fonctionnement des vannes et équipement constituant la tête de forage.

- Les opérations d'entretien courant devront être réalisées au cours inspection (manœuvre de la vanne de tête, nettoyage, graissage.etc.).
- Les fuites d'eau devront être impérativement signalées.
- Analyse d'eau du forage devra être réalisée annuellement pour contrôler la qualité d'eau.
- Des opérations spécifiques de contrôle du forage et devront être réalisées tous les 10 ans.

3.2.4. Forages au Complexe Terminal (CT).

3.2.4.1. Forage de reconnaissance : La phase de reconnaissance consiste à la foration d'un trou de diamètre $8\frac{1}{2}$ pouces jusqu'à la profondeur finale prévue. Cette phase doit permettre l'enregistrement des diagraphies et le recueil des échantillons en vue de l'analyse granulométrique de l'établissement de la coupe géologique des terrains traversés et l'équipement du forage. L'exécution d'un forage au Complexe Terminal nécessite l'établissement d'un programme qui prend en compte :

- La profondeur prévisionnelle de la couche aquifère à capturer et du débit escompté.
- Les caractéristiques des couches traversées en particulier la présence des nappes en surface.
- Les conditions géologiques particulières (pertes totales, éboulements.etc.).
- Les caractéristiques des forages réalisés la région.

3.2.4.2. Exécution et équipement: Après exécution des opérations successives de forage et d'alésage en différents diamètres et de mise. En place des tubages et crépines, l'équipement du forage sera constitué comme suit :

Pour la mise en place du tube guide procède à un forage en diamètre 32 pouces sur une profondeur minimum de 25 m, à la mise en place d'un tubage en acier grade J-55, de diamètre 26 pouces et la cimentation totale de l'espace annulaire.

Pour la mise en place de la colonne de production on procède à l'alésage en diamètre $24\frac{1}{4}$ pouces du toit de l'aquifère à la mise en place d'un tubage en acier grade J-55 de diamètre $18\frac{5}{8}$ pouces et à la cimentation de tout l'espace annulaire.

Pour la mise en place de la colonne de captage on procède à l'alésage en diamètre $12\frac{1}{4}$ pouces du toit de l'aquifère à la profondeur finale, à la mise en place d'une crépine en acier inoxydable de type à file enroulé, de diamètre $9\frac{5}{8}$ pouces, la section du fil de crépine devra être trapézoïdale, la crépine doit être surmontée d'un Liner en DIOX en vue de canaliser l'écoulement et permettre une réserve de gravier. Pour les forages à fort débit artésien on utilisera une suspension par un Liner Hanger.

Un massif de gravier siliceux roulé doit être mis en place pour améliorer la filtration de l'eau et assurer une bonne stabilité de la colonne de captage. Le gravillonnage sera décidé quand on

à $d_{10} < 0,25$ mm et $1 < CU < 5$. Les dimensions des grains du massif de gravier seront déterminées par les dimensions d'orifices des crépines, elles mêmes fonction de la granulométrie du terrain.

L'ouverture des crépines étant calibré en fonction de la granulométrie des formations captées, les échantillons de terrain (cutings) devront être recueillis tous les 5 m (au minimum dans la couche aquifère). Il sera alors procédé d'une analyse granulométrique. Dans les formations situées au dessus de l'aquifère les échantillons de terrain seront prélevés tous les 10 m.

3.2.4.3. Diagraphies : Le programme de diagraphies dont le but essentiel, est la délimitation des formations aquifères, peut-être adapté par l'hydrogéologie de l'Administration. Néanmoins, les enregistrements suivants sont obligatoires : polarisation Spontanée(P.S), Résistivité, Diamètre, Laterolog, Microlog.

3.2.4.4. Programme de boue : Le programme de boue doit-être établi en tenant compte: des terrains de mauvaise tenue, des zones de pertes de boue et des risques de colmatage dus à l'invasion des formations aquifères par la boue. Les principales caractéristiques de la boue à utiliser sont les suivantes : Densité (1.20), Viscosité (50 à 60 Marsh) et Filtrat (15 cm³).

3.2.4.5. Equipement de surface : La tête de forage doit-être peinte et montée sur un socle bétonné, entouré d'un caniveau de collecte et d'évacuation des eaux. Pour les forages artésiens une prise de pression doit-être installée juste avant la vanne la distribution. Pour les forages en pompage, lors de l'installation de la pompe d'exploitation, un emplacement doit-être aménagé en vue de réaliser les mesures de niveau, à l'aide d'une sonde de diamètre 2 p.

3.3. Récolte et analyse des données des forages.

Nous avons effectué des recherches pour récolter les logs de forage hydraulique à partir de l'ANRH (74 forages) et DHW d'El-Oued (60 forages), les logs de forage existants sous formes de plan sur papier ou comme des fichiers PDF. L'analyse des logs de forage à montré que la description des logs est faite temps en temps par des personnes non spécialisés (des techniciens en forage, des hydrauliciens, des ingénieurs en génie civile.etc.), on remarque aussi l'absence de la précision des cotes de formations particulièrement dans la détermination de la lithologie de la nappe libre dans les forages profonds (CI et CT). Les coordonnées des forages anciens sont parfois illisibles, ou la description de différentes couches traversées est illisible, et en fin les âges des couches parfois sont absents ou faite d'une manière imprécise. A la fin de sélection ils me restants des dizaines de forages, qu'on a servis pour établir des coupes lithologiques.

L'identification des couches aquifère reposent sur la détermination des formations géologiques de point de vue hydrogéologiques. Ils existent trois types des formations hydrogéologiques

(Castany, 1982) ; perméable, ce sont les gisements d'eau souterraine et l'origine des aquifères, elles sont constituées des matériaux ayant la propriété de laisser traverser de l'eau à des vitesses appréciables sous l'impulsion de différence d'altitude (nappe libre), ou par décompression de l'aquifère (nappe captive). Ce sont ; les graviers, les alluvions, les sables, les calcaires fissurés, les roches magmatiques fissurés.etc. Les formations hydrogéologiques imperméable, imposant les limites géologiques de l'aquifère, dont la vitesse de l'écoulement d'eau souterraine est très faible, pratiquant non mesurable, qualifié imperméable, les grandes quantités d'eau qu'ils renferment ne peuvent extraites. Ce sont ; les argiles, les marnes, les schistes .etc.

Et enfin les formations hydrogéologiques semi-perméables à l'origine de l'aquifère multicouches, ces formations (sables très fin, sables argileux, limons .etc.) sont de très faible perméabilité, dans les conditions hydrodynamiques favorables elles permettant les échanges verticaux ascendant et descendant entre les aquifères superposées par la drainance.

3.4. Interprétations des coupes hydrogéologiques réalisées dans la zone d'étude.

Les données des logs de forage hydraulique réalisés dans la zone d'étude, offrent une source importante et exacte pour comprendre la structure de sous sol et identifiés les aquifères d'El-Oued. Les corrélations lithostratigraphiques des forages hydrauliques permettent d'établissement de cinq coupes hydrogéologiques dans la zone d'étude (Fig.43).

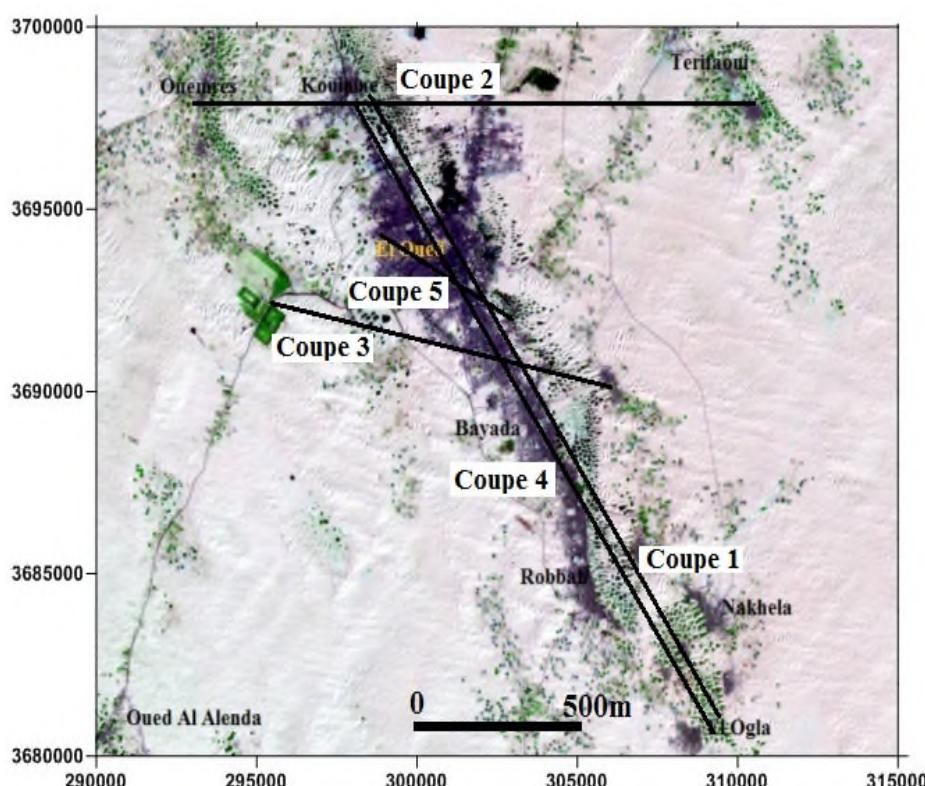


Figure 43: Positionnement des coupes géologiques dans la zone d'étude.

Coupe 01:

la coupe (Fig.44) est orientée NO-SE, en allant de Kouinine vers El Oglia, on remarque la succession des formations géologiques où l'Eocène se trouve à la base, constitué d'une intercalation de calcaire et de marne, suivi de Mio-Pliocène, qui repose en discordance sur l'Eocène carbonaté, il est représenté en général par des intercalations de deux niveaux sableux et un niveau argileux, l'épaisseur de chaque niveau est variable d'un endroit à l'autre. Il faut mentionner que ces formations sont souvent mélangées avec des proportions de gypse, calcaire, grés et marne parfois à un degré où on peut pas mettre des limites entre le niveau argileux et les niveaux sableux. Le Quaternaire est constitué de dépôts de sables éoliens donnant naissance à des dunes, intercalés avec des lentilles d'argiles, de sables argileux, d'argiles sableuses, de grés et de gypse à sa base on rencontre une couche d'argiles parfois faiblement sableuses.

De point de vue hydrogéologique on distingue sur la coupe plusieurs nappes, de haut en bas :

- La nappe libre constituée de sables et de sables argileux, l'épaisseur moyenne du réservoir est 60m, le substratum est représenté par des argiles légèrement sableuses.
- Les nappes de complexe terminal représentées par trois nappes; deux nappes de sables constituées de sables d'âge mio-pliocène et une nappe de calcaires d'âge éocène et sénonien carbonaté. La deuxième nappe de sable est en contact direct ou séparé par une fine couche de marne avec la nappe de calcaire, cette particularité distingue les nappes du complexe terminal de la zone d'étude des autres régions du Sahara septentrional (la figure 25).

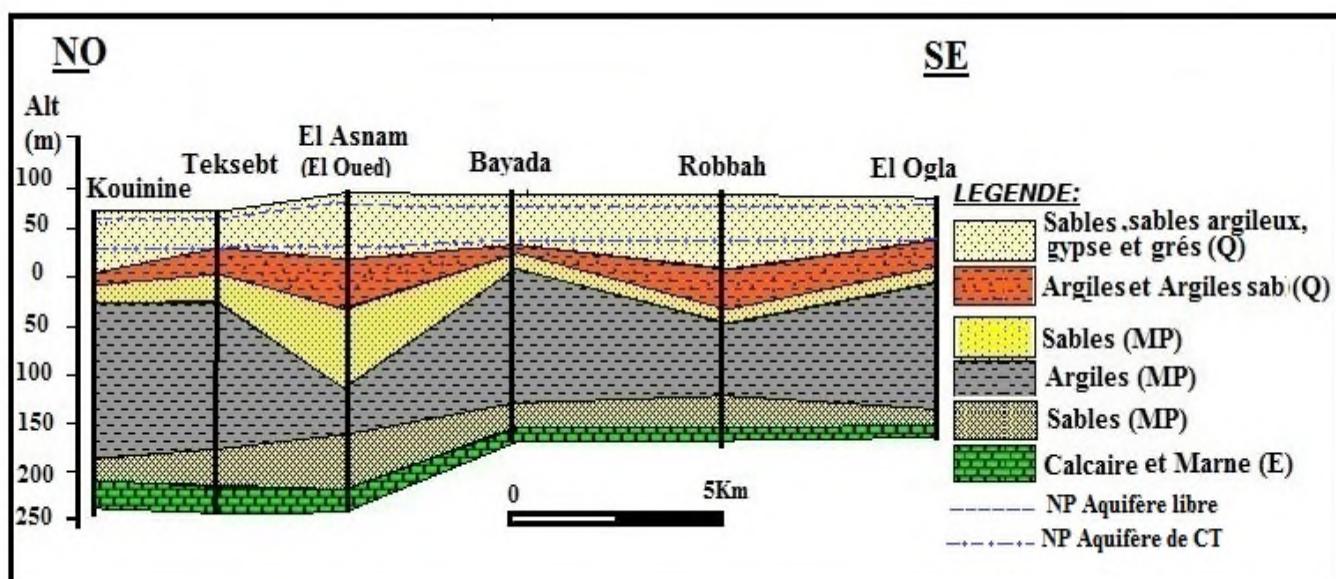


Figure 44: Coupe hydrogéologique N°1.

Coupe 2:

La coupe (Fig.45) est orientée O-E, en allant de Ouermes vers Trifaoui, on remarque la même succession des formations géologiques que la coupe 1, l'Eocène se trouve à la base constitué d'une intercalation de calcaire et de marne, le Mio-Pliocène est représenté en général par intercalations de deux niveaux sableux et un niveau argileux. Le premier niveau est sableux avec des passés de gypse, de grés et de calcaire, correspond au première nappe de sable de CT, son épaisseur varie de 30 m à 60 m, suivi d'un niveau argileux compact avec des intercalations de grés à Trifaoui et argileux marneux faiblement gypseux à El-Oued et Kouinine, à la base de Mio-Pliocène on rencontre une formation sableuse avec des intercalations de grés et de graviers, correspondre au deuxième nappe de sable de CT. Le Quaternaire est représenté à la surface par une couche de sables intercalés avec des lentilles d'argiles sableuses, de grés et de gypses, son épaisseur est d'environ 60 m, représente la nappe superficielle. À la base du Quaternaire, il ya un niveau argileux faiblement sableux d'une épaisseur qui varie de 25 m vers Ouermes à plus de 80 m vers El-Oued et Trifaoui.

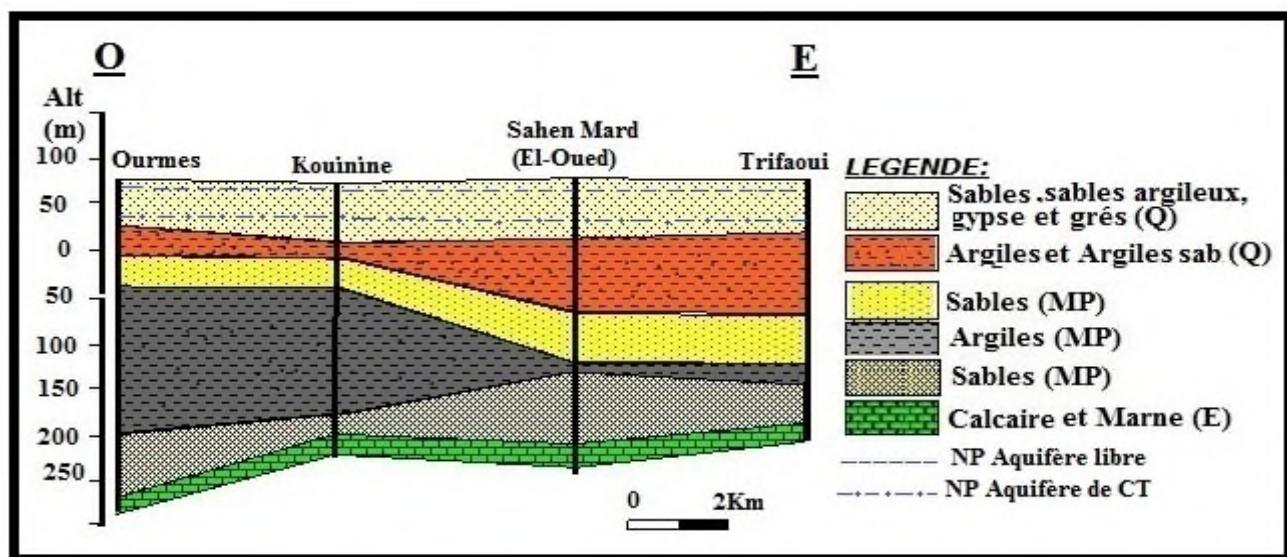


Figure 45: Coupe hydrogéologique N°2.

Coupe 3:

La coupe (Fig.46) est orientée NNO-SSE, sur une longueur de 10 Km, on rencontre les formations géologiques de bas en haut ; l'Eocène supérieur formé de calcaire et de marne, le Mio-Pliocène constitué de sables et d'argiles, et en fin le Quaternaire formé de sable et argile. Le toit de Mio-pliocène et le mur de Quaternaire sont souvent confondu, ils sont constitués par un empilement de niveaux alternativement sableux, argileux, sablo-argileux, gypseux et des passages de marne, de grés et de calcaire. Dans cette coupe on remarque que la première nappe de sable est confondue avec les formations d'argiles et d'argiles sableuses, on fait

cette nappe n'est pas exploitée dans la région où on remarque que tous les forage de CT captant la deuxième nappe de sable à cause de son épaisseur très importante et sa bonne perméabilité.

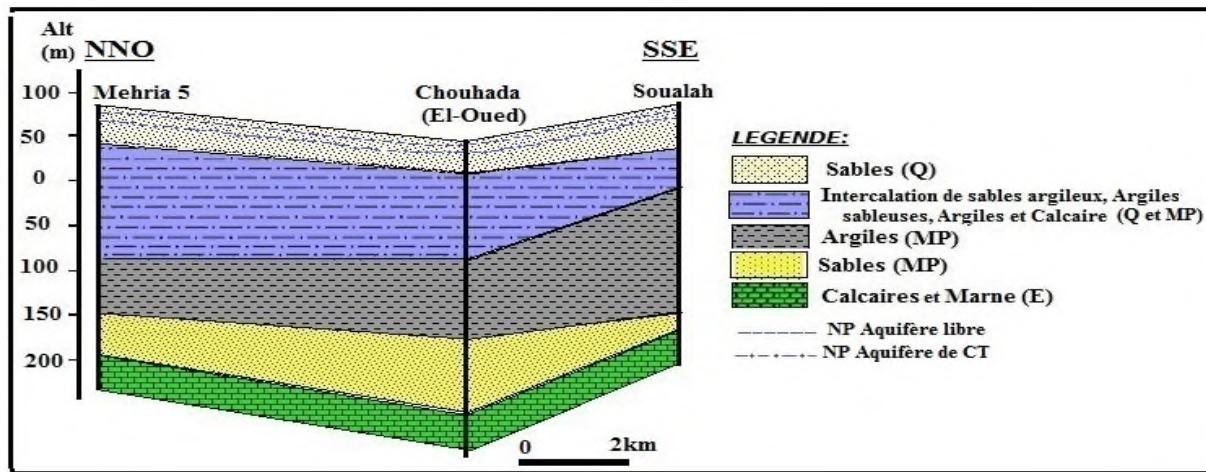


Figure 46: Coupe hydrogéologique N°3.

Coupe 4 :

La coupe(Fig.47) a été réalisée sur la base de logs de forages captant la nappe superficielle, elle est orientée SE-NO, en allant de El Oglia vers Kouinine, On constate que le Quaternaire est représenté par des sables fins éoliens avec des passées de gypse de la surface jusqu'au 25m de profondeur, suivis de grés à ciments gypseux friables. Par endroits, on remarque l'absence des grés qui ont été remplacés par des argiles sableuses, la couche la plus basse est constituée par des argiles sableuses avec un pourcentage de sable décroissant vers le bas. On signale aussi l'existence des bancs de grés calcaieux et de marne d'épaisseur décimétriques. A la base on trouve une formation argileuse plastique et compacte contenant une légère proportion de sable, sa profondeur moyenne est de l'ordre de 60 m.

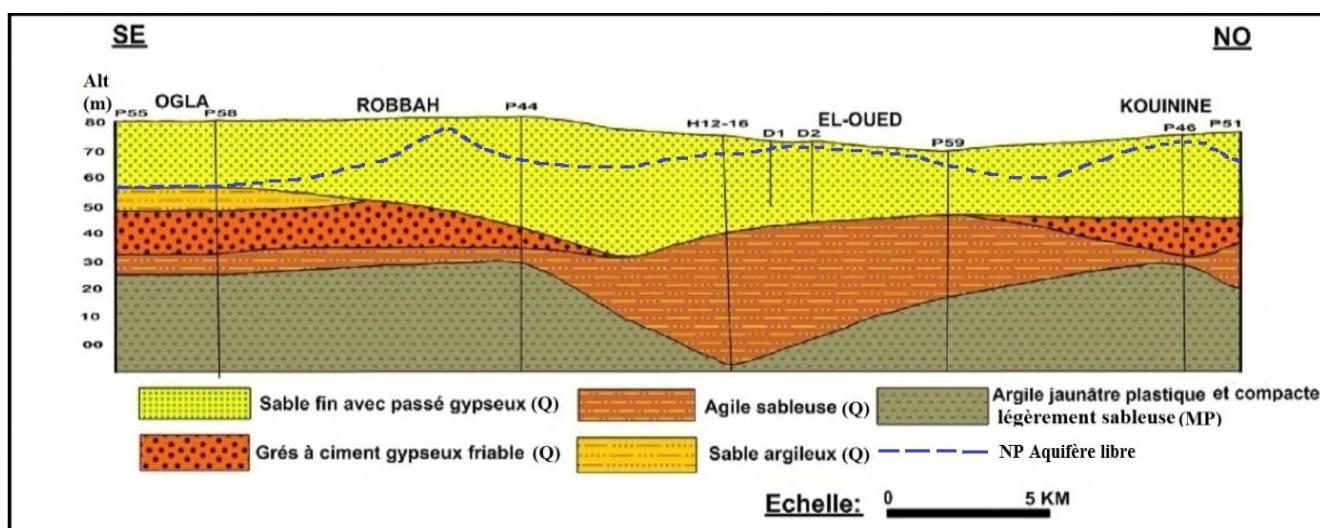


Figure 47: Coupe hydrogéologique N°4.

Coupe 5:

La coupe (Fig.48) est réalisée sur la base des trois logs de forages de CI existant dans la zone d'étude, elle est orientée SE vers le NE. Cette coupe traverse les nappes d'eau existantes dans la région d'El-Oued. On peut définir les trois aquifères ainsi que leurs lithologies :

La nappe libre occupe la partie superficielle de la région d'étude, elle est représentée d'une manière générale par le sable, sable argileux avec gypse. L'épaisseur de cette nappe ne dépasse pas 75m.

Les Nappes du complexe terminale: le toit du complexe terminale correspond à une côte moyenne de 120 m, elle commence par les sables, les deux horizons de sable d'âge mio-pliocène (la première et la deuxième nappe de sables), sont séparés par une couche d'argile gypseuse, d'épaisseur moyenne de 50m. La nappe de calcaire se rencontre à une profondeur d'environ 250m jusqu'au 700m, elle est constituée de calcaire fissurée et de dolomie d'âge éocène et sénonien carbonatée.

La nappe du continental intercalaire d'âge albien et barrémien (le principal réservoir se trouve au Barrémien à l'inverse d'Ouargla où le grand réservoir est d'âge Albien), le toit de CI se trouve à une profondeur de 1490m dans le forage de DW-102, à 1460m dans le forage de 19 mars et à 1500m dans le forage de DW-101. Le réservoir de CI est constitué d'alternance de sable, grés, dolomie et calcaire. Le mur de CI est constitué des argiles d'âge néocomien (OSS 2003), il se trouve à une profondeur qui dépasse 1850m.

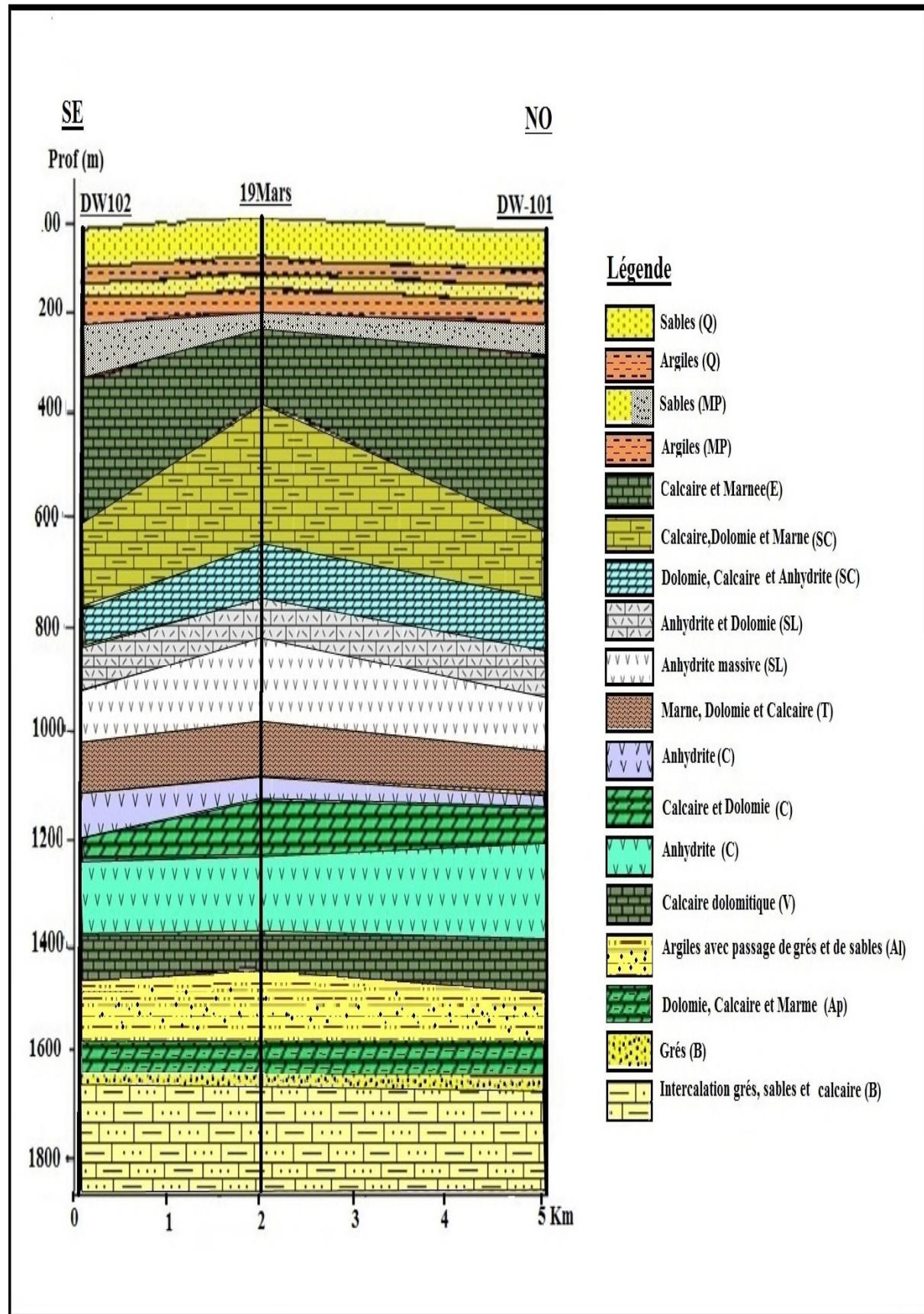


Figure 48: Coupe hydrogéologique N°5.

3.5. Lithostratigraphie des nappes aquifères d'El-Oued

A l'instar des coupes hydrogéologiques réalisées dans la zone d'étude, nous avons établi une colonne lithostratigraphique (Fig.49) qui montre la répartition des aquifères et les caractéristiques hydrogéologiques des formations représentées dans la zone d'étude.

Nature hydrogéologique	Nom de la Nappe	Nature lithologique	Sous Syst et Etage		Syst	Ere
Niveau perméable	nappe libre	Sables				
Niveau Imperméable		Argiles				
Niveau perméable	1 ^{ère} nappe de sable	Sables			Pliocène	
Semi -perméable		Argiles gypseuses				Néogène
Niveau perméable	2 ^{ème} nappe de sable	Sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène		
Niveau perméable	nappe des calcaire	Calcaire fissuré	Inférieur	Éocène		paléogène
Semi-perméable		Évaporites, argiles	Sénonien carbonaté	Sénonien lagunaire	Sénonien	
Niveau imperméable		Marne, Dolomie et Calcaire			Turonien	
Niveau imperméable		Argiles, marne			Cénomanien	
Niveau perméable		Calcaire dolomitique	Vraconien			
Niveau perméable	Le continental intercalaire (CI)	Sables et Grés			Albien	Crétacé
Semi-perméable		calcaire, marne			Aptien	
Niveau perméable		calcaire, sable			Barrémien	

Figure 49: Colonne lithostratigraphique et répartition des aquifères dans la zone d'étude (Bouselsal.2007 modifié).

4. ETUDE GEOTECHNIQUES DE LA ZONE NON SATUREE.

Des essais ont été effectués au laboratoire des travaux publics du sud d'Ouargla au mai 2012, sur des échantillons prélevés de la zone non saturée, pour déterminer les caractéristiques géotechniques de la zone d'étude. A cet effet 30 échantillons sont prélevés de différents endroits (Fig.50) à des profondeurs de 50 cm et de 3 m par la tarière manuelle.

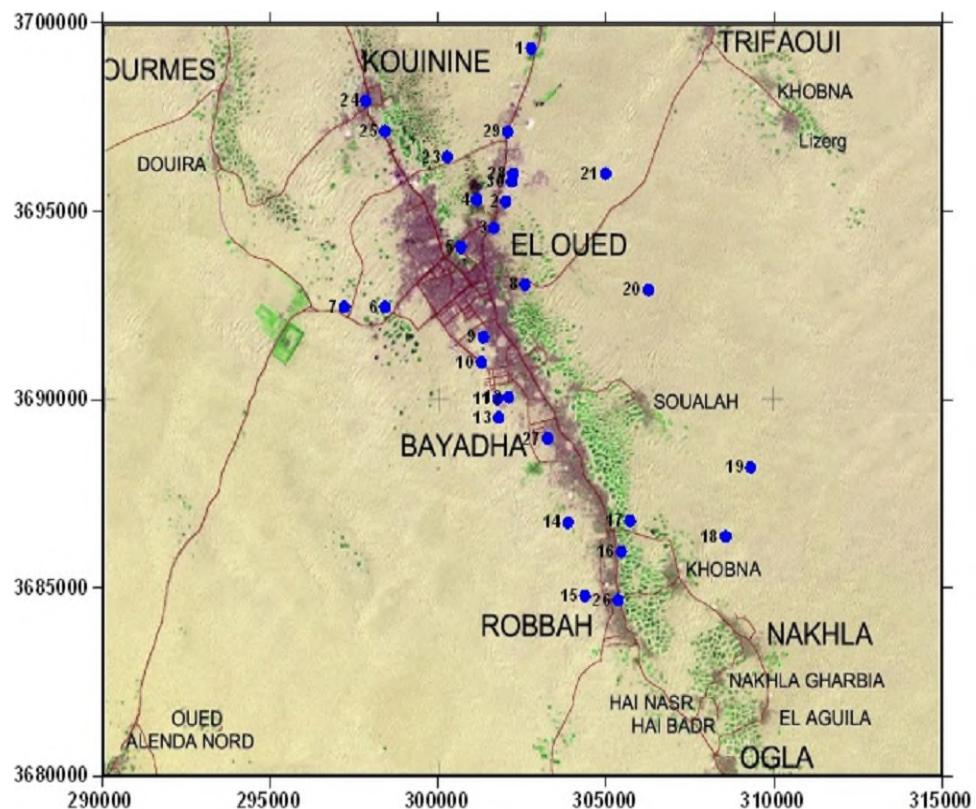


Figure 50: inventaire des points d'échantillonnage pour l'étude géotechnique.

4.1. Analyses granulométriques de la zone non saturée.

L'analyse granulométrique est un essai qui a pour but de déterminer la répartition des grains suivant leurs dimensions, par un tamisage mécanique pour les grains supérieurs à 0.080mm. Les résultats sont présentés sous forme des courbes granulométriques. L'analyse granulométrique se fait en général par tamisage sous l'eau, lorsque les matériaux ne contiennent pas d'éléments argileux ou limoneux, l'analyse granulométrique peut se faire par tamisage à sec.

Les courbes granulométriques des 30 échantillons prélevés de la zone d'étude, montrent une grande ressemblance dans la forme générale des courbes (Fig.51).

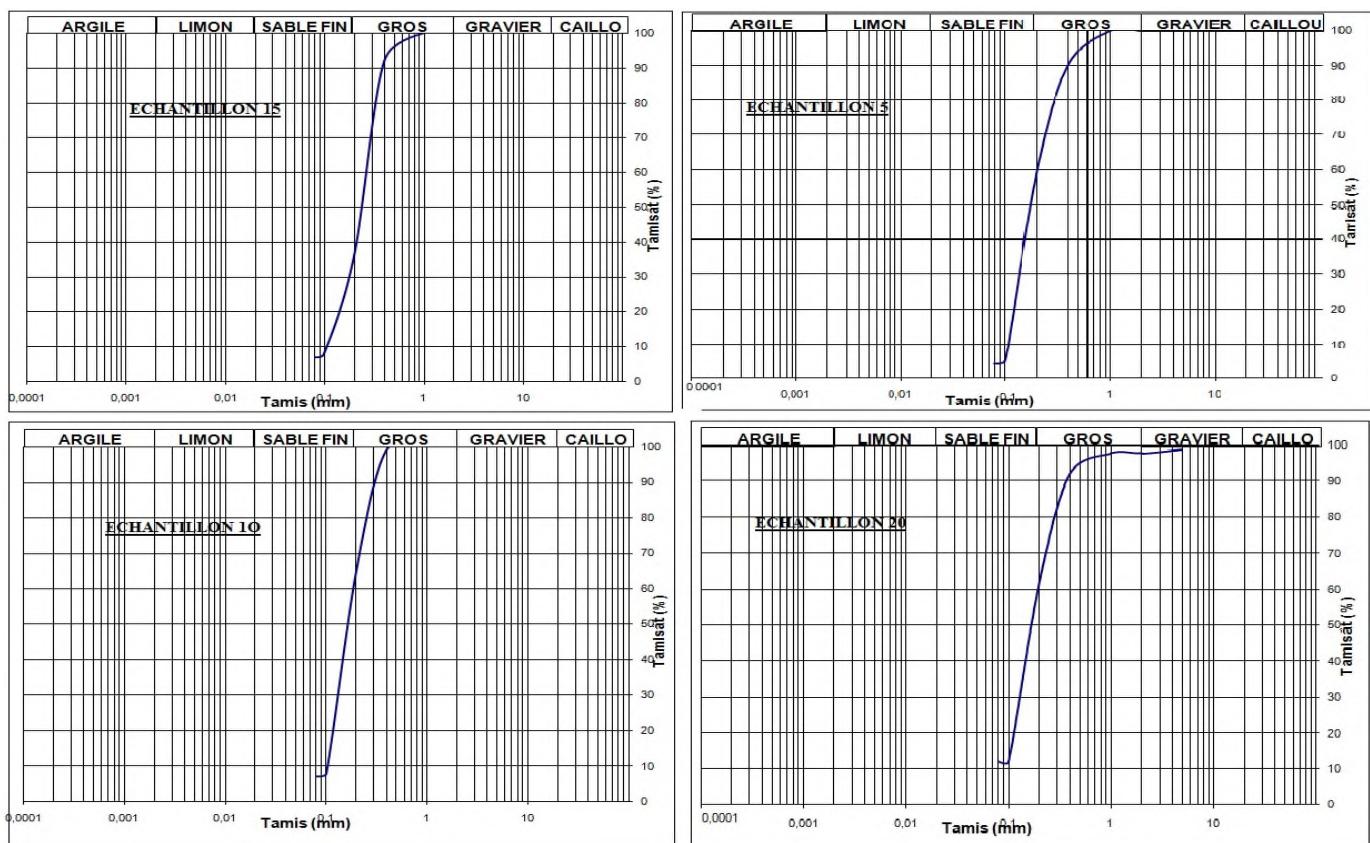


Figure 51: les courbes granulométriques de quelques échantillons de la zone non saturée.

Les résultats des essais granulométriques réalisés sur les différents échantillons sont représentés dans l'histogramme de la figure 53. Nous remarquons que la zone non saturée d'El-Oued est dominée par les sables (sable grossier, sable moyen et sable fin), leur pourcentage oscille entre 75% à 92%. La fraction fine est généralement inférieure à 10% sauf pour les échantillons E₁₆, E₁₇, E₂₀, E₂₂ et E₂₅, le pourcentage de grés est très faible à absent dans les échantillons analysés.

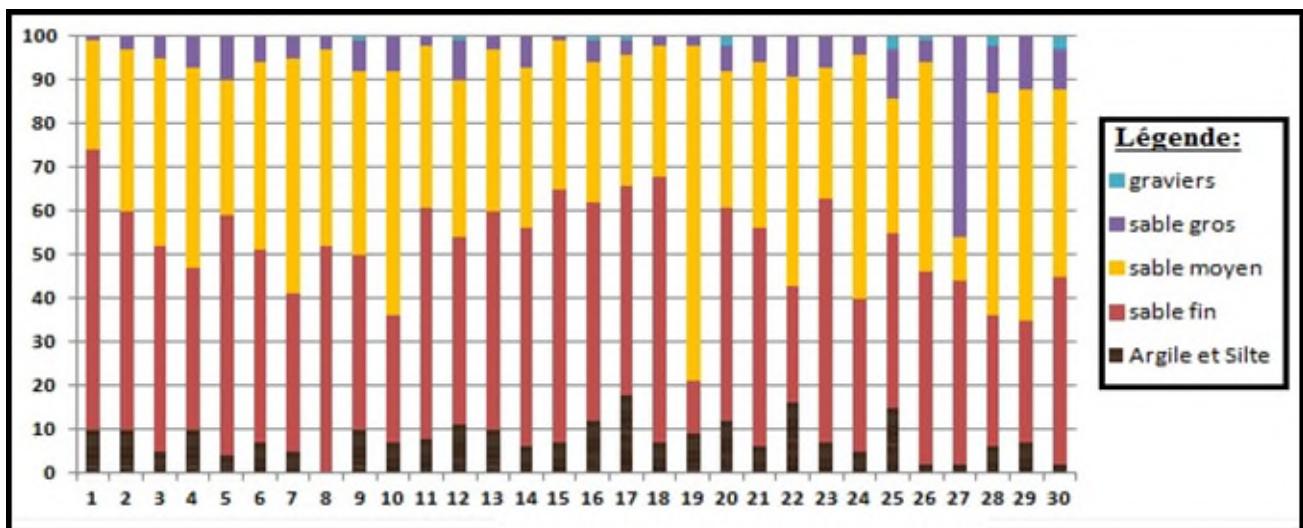


Figure 52: Histogramme de la composition granulométrique de la zone non saturée.

4.2. Répartition des fins dans la zone non saturée.

Le pourcentage des fins (Fig.53) varie d'un endroit à l'autre, les valeurs les plus fortes sont mesurées dans les zones de dépressions et les zones agricoles, les valeurs faibles sont mesurées dans les échantillons prélevés des dunes de sable.

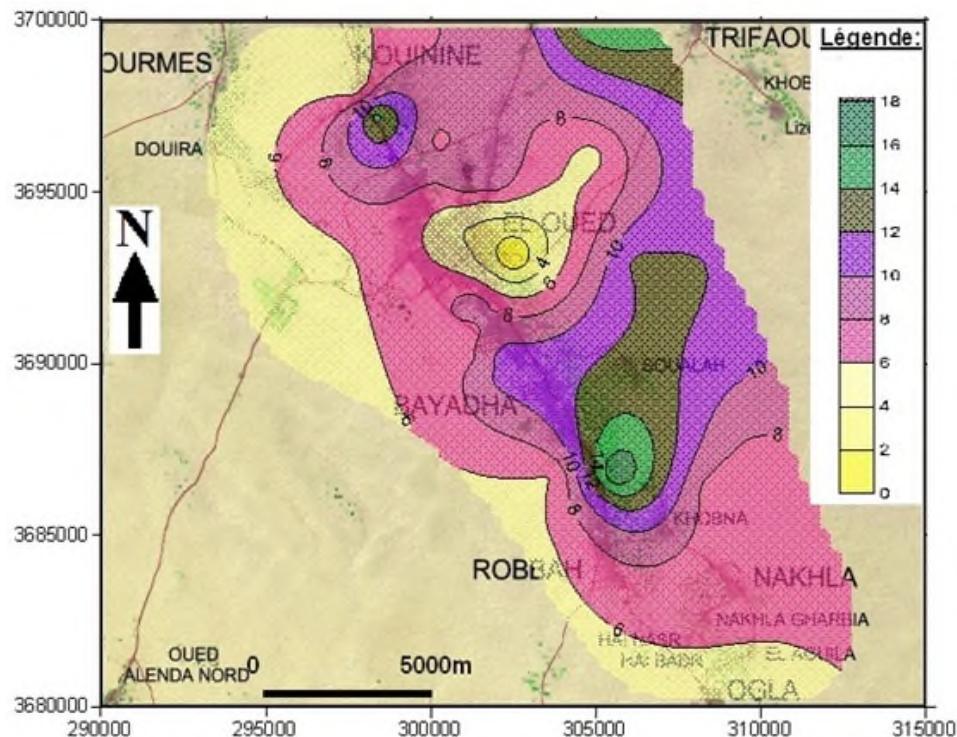


Figure 53: Répartition des fins dans la zone non saturée.

4.3. Masse volumique des sols de la zone non saturée.

La masse volumique des sols, oscille entre 1.54 et 1.69, la carte de la répartition de la masse volumique apparente des sols de la zone d'étude (Fig. 54), montre que les sols lourds se trouvent au NO de la zone d'étude, et les sols légers se trouvent à l'Ouest de Bayadha et à l'Est de Kouinine.

Le poids spécifique des grains est celui du matériau constituant le squelette solide du sol. On le représente par le symbole γ_s qui est défini par : $\gamma_s = w_s/v_s$ où v_s et w_s représentent respectivement le volume des grains solides constituant l'échantillon et le poids de ces grains. Les valeurs des poids spécifiques obtenues au laboratoire varient de 2.59 t/m^3 et 2.65 t/m^3 .

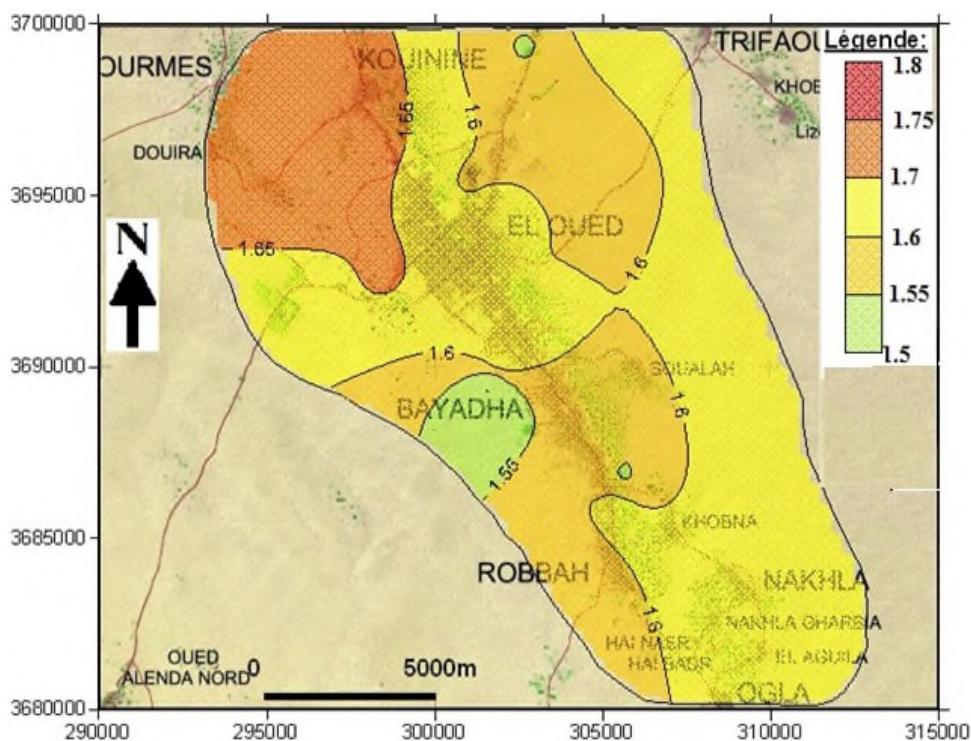


Figure 54: Répartition de la masse volumique apparente des sols de la zone non saturée.

4.4. Analyses chimiques de la zone non saturée.

25 échantillons répartis dans la zone d'étude sont analysés, pour déterminer le pourcentage de carbonate, de sulfate, des insolubles et la concentration de NaCl dans le sol de la zone non saturée. Les résultats des analyses sont représentés dans l'histogramme de la figure 55. On remarque que le pourcentage des solubles varie entre 16% et 25%. Ce pourcentage est très important et il a des conséquences graves sur les constructions surtout que la région est menacée par le problème de la remontée des eaux de la nappe libre.

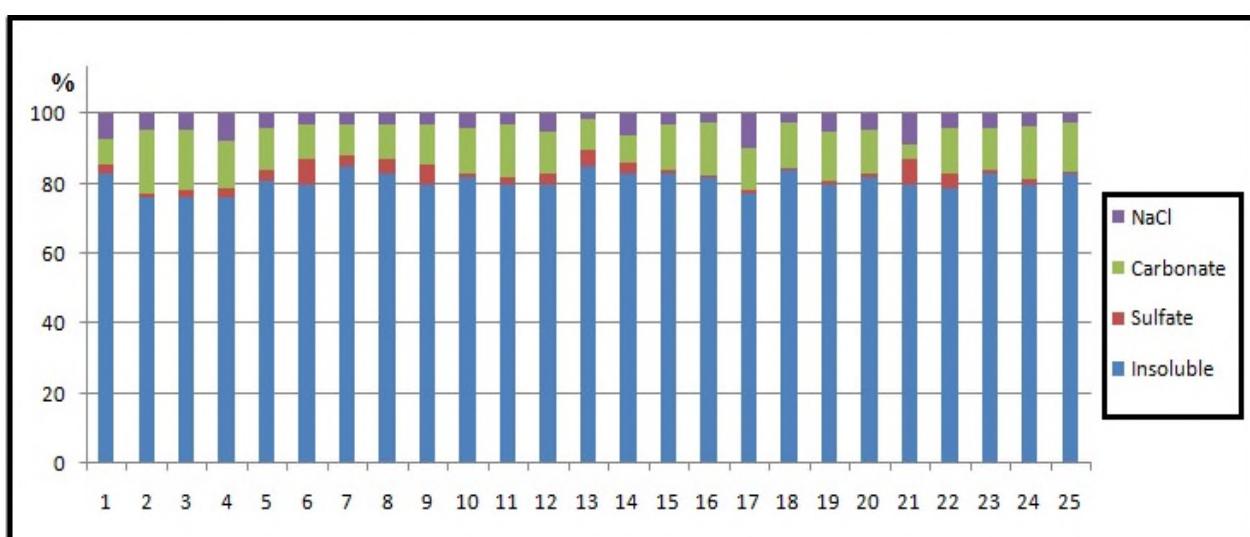


Figure 55: Histogramme de résultats des analyses chimiques des sols de la zone non saturée.

4.4.1. Les carbonates dans la zone non saturée.

La carte de répartition des carbonates dans les sols de la zone non saturée (Fig. 56), montre que le pourcentage des carbonates oscille entre 7% et 20%. les valeurs les plus faibles sont mesurées à l'est et l'ouest de la ville d'El-Oued et Bayadha, et les plus fortes sont mesurées au sud et au nord de la zone d'étude.

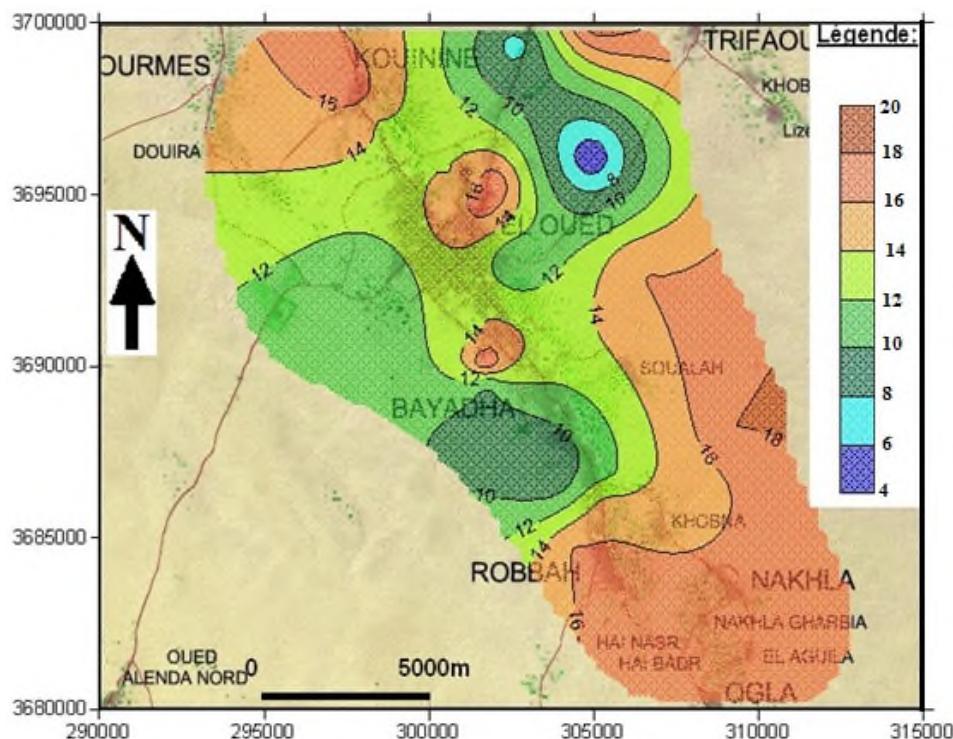


Figure 56: répartition des carbonates dans les sols de la zone non saturée.

4.4.2. Les sulfate dans la zone non saturée.

Les sulfates, dans les sols, se trouvent sous différentes formes, on cite à titre indicatif : Sulfate de sodium (Na_2SO_4), sulfate de magnésium (MgSO_4), sulfate de calcium (CaSO_4), etc.

Cette fraction présente une importance considérable vis à vis du béton et devient nocive envers ce béton utilisé pour les fondations lorsque le taux dépasse les 3% en présence d'eau.

La fraction des sulfates est exprimée sous forme de gypse avec la formule chimique ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). les taux de sulfates oscillent entre 0.68% et 4.56%, la carte de répartition des sulfates dans la zone d'étude représentée dans la figure 57, montre que les valeurs les plus fortes sont mesurées à la ville d'El-Oued et Bayadha, et les plus faibles sont mesurées au sud et à l'est de la zone d'étude, et au sud de Kouinine.

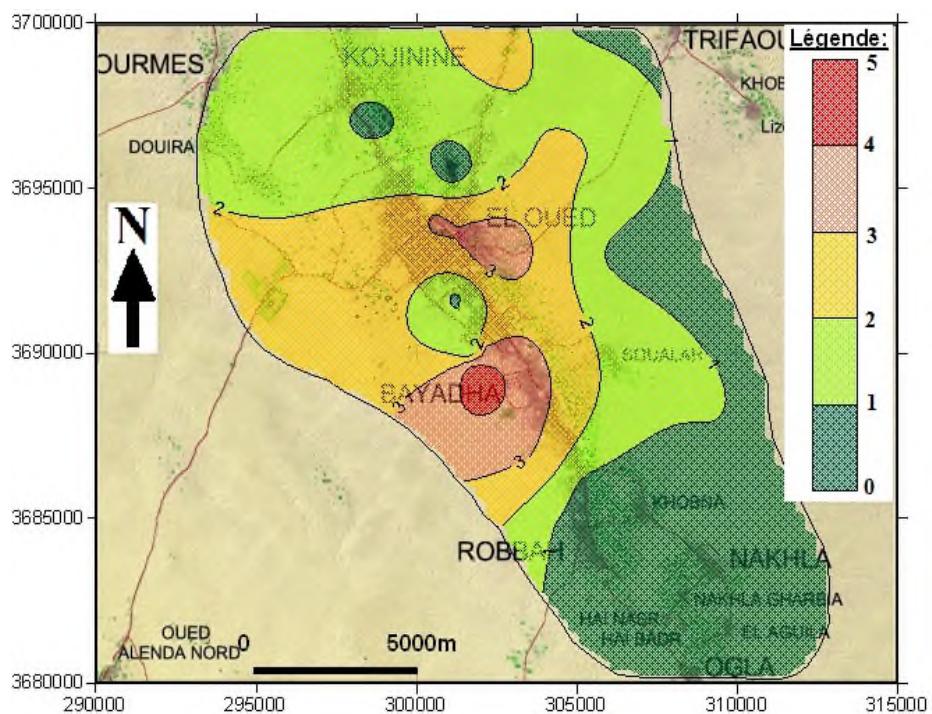


Figure 57: Carte des répartitions des sulfates dans la zone non saturée.

4.4.3. Les insolubles dans la zone non saturée.

La carte de répartition des insolubles (Fig.58) dans la zone non saturée montre que les valeurs fortes sont localisées dans les endroits de fortes altitudes (Oglia, Nakhla et les plantations de Mahri), les valeurs les plus faibles sont mesurées au niveau de dépressions de Chott, hôtel Louss et rejet de la ville d'El-Oued.

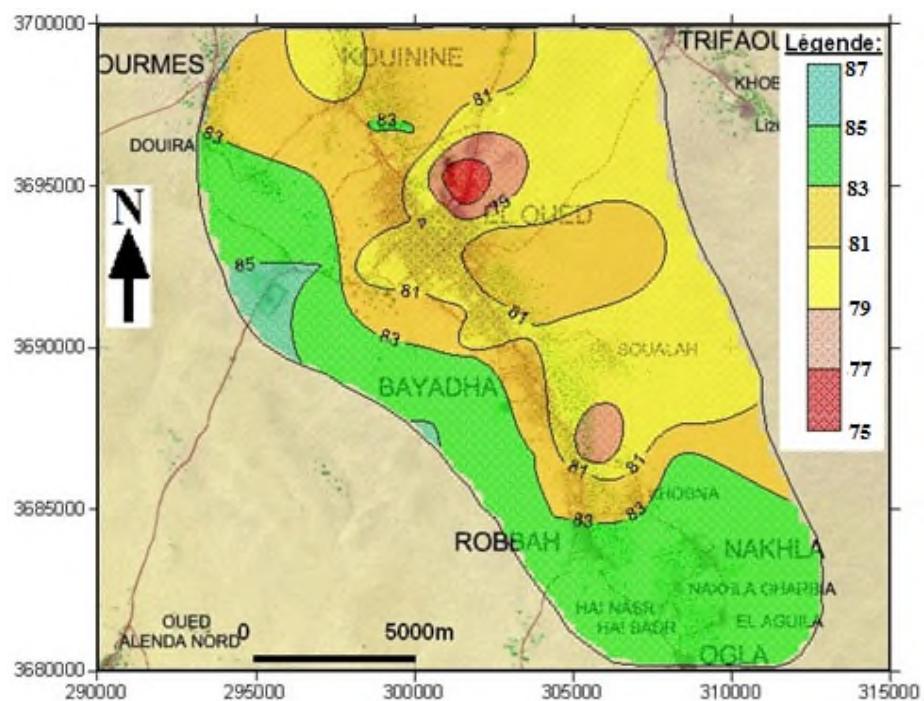


Figure 58: Carte des répartitions des insolubles dans la zone non saturée.

4.4.4. Le pourcentage de NaCl dans la zone non saturée.

L'Halite se trouve dans la zone non saturée, avec des concertations qui varient d'un endroit à l'autre (Fig.59), les valeurs fortes sont mesurées au rejet de la ville d'El-Oued et les faibles valeurs sont mesurées près de Sidi Abdalah, d'une manière générale le pourcentage de NaCl dans la région d'étude oscille entre 0.5% et 4%.

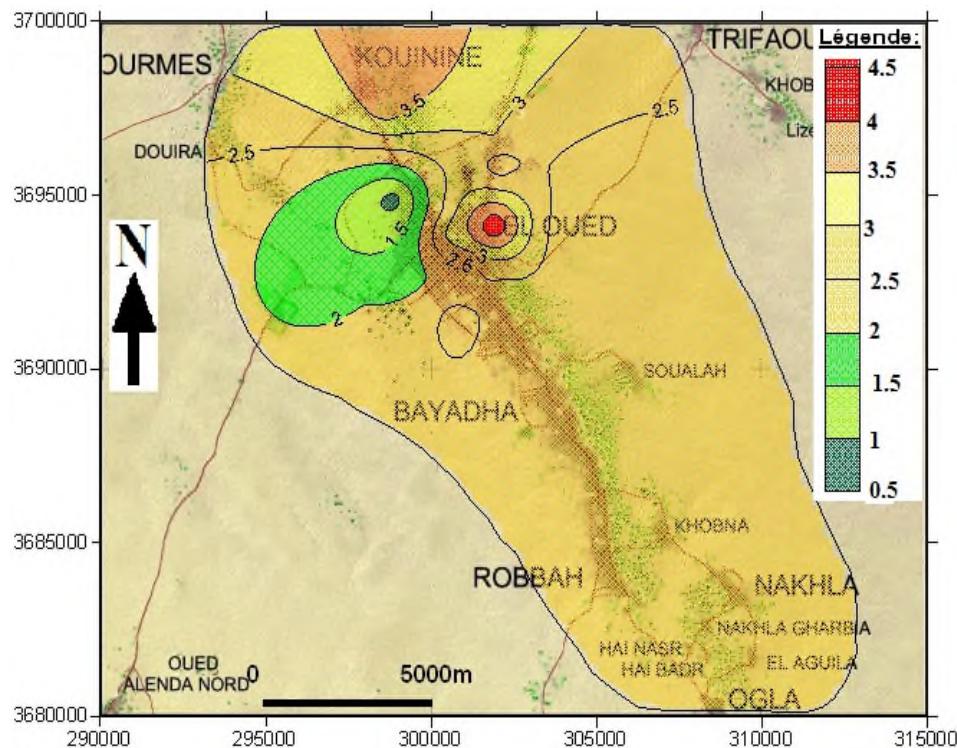


Figure 59: Carte des répartitions de NaCl dans la zone non saturée.

4.5. Essai de cisaillement rectiligne.

L'objectif de l'essai est la détermination de la résistance au cisaillement du sol de la zone non saturée. La boîte de Casagrande ou boîte de cisaillement est destinée aux essais de cisaillement rectiligne dans lesquels on cherche à obtenir la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé. L'idée première d'une boîte de cisaillement appartient au français Alexandre Collin (1846), mais c'est le professeur américain Casagrande A qui l'a mise au point et lui a donné la diffusion connue actuellement.

L'angle de frottement interne (Fig.60) varie entre 30° et 32° , avec une moyenne de 31.2° , cette valeur correspond aux sables éoliens situés dans un état de compacité moyen à assez élevé. La cohésion varie entre 0.010 et 0.25 bar, avec une moyenne de 0.19 bar.

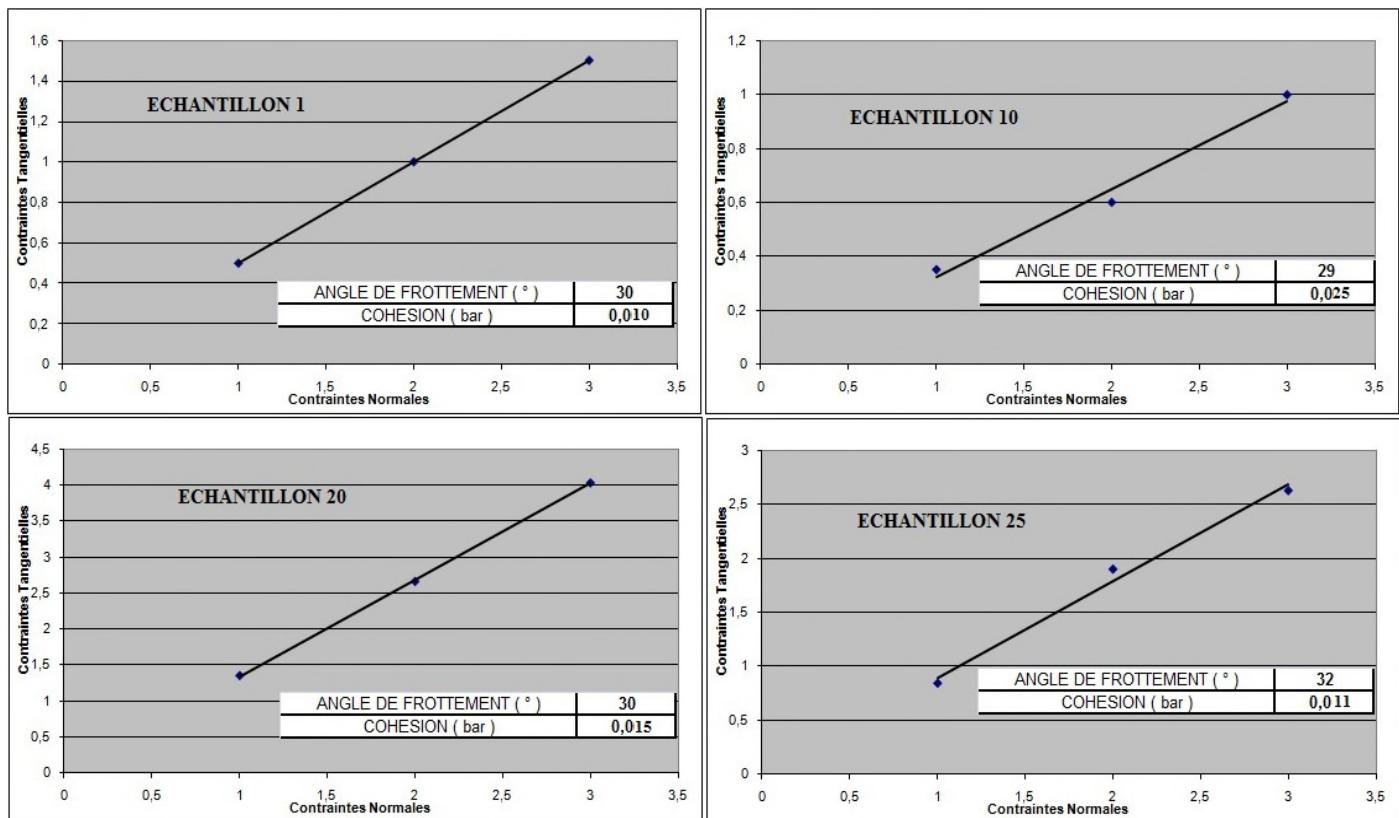


Figure 60: Courbes des essais de cisaillement rectiligne des sols de la zone non saturée.

5. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE LIBRE.

5.1. Mesure de perméabilité par la méthode de Muntz.

5.1.1. Principe de mesure.

La détermination du coefficient de perméabilité K a été effectuée par la méthode du double anneau ou méthode de Muntz. Elle a été réalisée sur 42 sites (dans 33 se trouvent dans la zone d'étude). Sur chaque site, ils ont effectué 3 essais dans un rayon d'une centaine de mètres afin d'obtenir un K moyen et apprécier sa variabilité.

Le coefficient de perméabilité mesuré par la méthode de Muntz qui a été utilisée correspond au coefficient de Darcy (Fig.61). Il a les dimensions d'une vitesse de filtration (m/s).

Pour mémoire, rappelons que H. Darcy a étudié expérimentalement en 1856 l'écoulement de l'eau à travers une colonne de sable. Il a utilisé des cylindres verticaux de 2,5 m de haut et 0,35 m de diamètre intérieur, remplis de sable sur une épaisseur et sous une charge d'eau H.

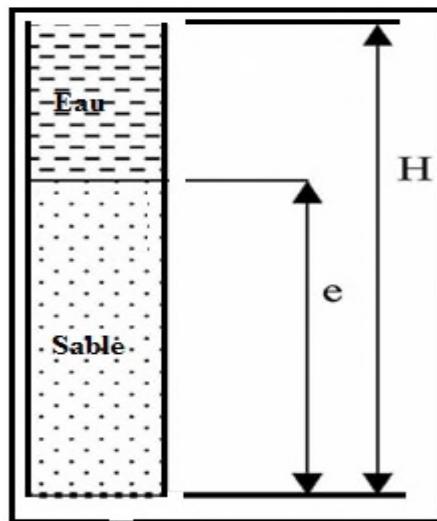


Figure 61 : Dispositif de H. Darcy.

L'écoulement est régi par la formule suivante : $Q = KSH/e$

- Q ; étant le débit écoulé en m^3/s ;
- H ; la hauteur de charge d'eau en mètres ;
- S ; la surface de la section en m^2 ;
- E ; la hauteur de la colonne de sable en mètres
- H/e ; la perte unitaire ou le gradient hydraulique i
- Le coefficient K est le coefficient de perméabilité de Darcy ou coefficient de filtration.

Pratiquement, on mesure le volume d'eau infiltrée en fonction du temps sur une surface déterminée de sol, l'infiltromètre étant conçu pour que l'infiltration se fasse dans un cylindre de sol de section égale à la surface d'infiltration. Ceci n'implique que les lignes de courant soient sensiblement verticales. Pour que cette condition soit remplie, l'appareil dispose d'un anneau de garde autour du cylindre d'infiltration (Fig.62) empêchant l'eau du cylindre central de s'écouler latéralement.



Figure 62 : Infiltromètre Muntz pour une mesure de coefficient de perméabilité K .

La mesure de débit est effectuée sur l'anneau intérieur, l'anneau de garde, deuxième cylindre placé autour de l'anneau intérieur, force les lignes de courant à avoir une direction verticale. Noter les 4 tuyaux arrivant dans l'infiltromètre. 2 tuyaux (jaunes) arrivent dans l'anneau central et 2 autres (rouges) arrivent dans l'anneau extérieur. Chaque paire de tuyaux conduit à un réservoir étanche d'alimentation en eau. L'un des deux tuyaux d'une paire amène l'eau du réservoir à l'infiltromètre, l'autre règle l'entrée d'air dans le réservoir et détermine ainsi le débit d'eau.

La présence de l'anneau de garde est importante pour des mesures fiables. Colombani et Col. ont montré que lorsqu'il n'y avait plus d'eau dans l'anneau de garde, les valeurs obtenues étaient fortement exagérées, passant pratiquement du simple au double dans un sol sableux.

L'appareil utilisé est du même type que celui décrit par Colombani et Col. L'infiltromètre est composé de deux anneaux concentriques en tôle d'acier de 200 mm de hauteur. Le diamètre intérieur de l'anneau central est de 200 mm (section : $31,42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$), le diamètre intérieur de l'anneau de garde est de 490 mm. Ces deux anneaux sont rendus solidaires par des entretoises. Ils sont munis à leur base de couteaux permettant de les enfoncer dans le sol sur 10 cm. Le dispositif comporte deux réservoirs de 50 litres. Un réservoir alimente l'anneau intérieur. Il possède une échelle graduée pour relever les quantités infiltrées. Le deuxième réservoir alimente l'anneau de garde. Lorsque l'appareil est mis en marche, le sol commence par se saturer en eau et le débit est instable. Quand le sol est saturé et le débit stable, on mesure le volume infiltré cumulé en fonction du temps.

Dans ces conditions, la profondeur du sol soumis à infiltration étant grande par rapport aux 50 mm de lame d'eau, la charge d'infiltration est très voisine de 1 (à quelques pour cent près).

Le niveau d'eau est réglé par l'affleurement d'un tube fixé à l'appareil et qui alimente en air le réservoir d'eau. L'eau est amenée par un deuxième tuyau et débouche dans l'anneau par un tube dont l'orifice est à quelques millimètres au-dessous de l'orifice d'entrée d'air.

La pente de la droite des volumes infiltrés cumulés en fonction du temps donne le débit d'infiltration. Les mesures sont effectuées au fond d'une fosse de 0.5 m de profondeur pour s'affranchir des perturbations de surface du sol.

5.1.2. Carte de perméabilité de l'aquifère libre.

Les 93 mesures du coefficient de perméabilité K effectuées sur 33 sites, existant sur la zone d'étude montre que la perméabilité de l'aquifère superficiel d'El-Oued (Fig.63), oscille entre $1.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ à $2.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

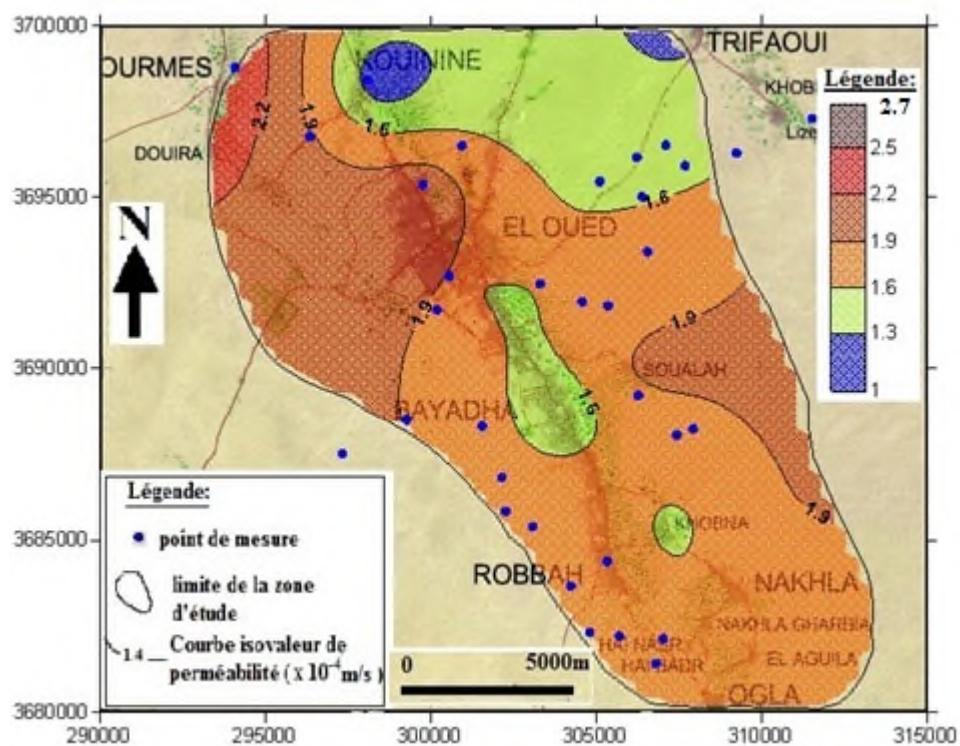


Figure 63: carte de perméabilité des sols de l'aquifère superficiel d'El-Oued

5.2. Essais de pompage dans l'aquifère libre d'El Oued.

Des essais de pompage par paliers et de longue durée ont été réalisés sur 6 sites répartis dans la vallée du Souf à Mih Ouensa, Nakhla, Ourmes, El-Oued, Kouinine et Foulia, du 24/02/2003 au 07/04/2003 (BG, 2003), parmi ces essais quatre entre eux se trouvent dans notre zone d'étude (Fig.64).

Chaque site d'essais est constitué d'un puits de pompage et trois piézomètres d'observation, situés à 5, 15 et 45 mètres du puits de pompage. Les puits de pompage sont des puits existants avec des caractéristiques différentes, alors que tous les piézomètres réalisés pour ces essais de pompage sont identiques. Les rejets des eaux de pompage sont situés plus loin des sites des essais de pompage. Les essais de pompage ont comporté, pour chaque site :

- Un essai par paliers enchaînés et composé de trois paliers de 6 heures chacun à débits constants mais différents, séparés par un intervalle d'au moins 12 heures.
- L'essai de longue durée a constitué en un pompage à débit constant de 72 heures suivi de 24 heures de remontée. L'interprétation est réalisée grâce à l'utilisation du logiciel Aquitest (WHI, release 2.5), la méthode Cooper & Jacob est utilisée pour l'interpréter les essais.

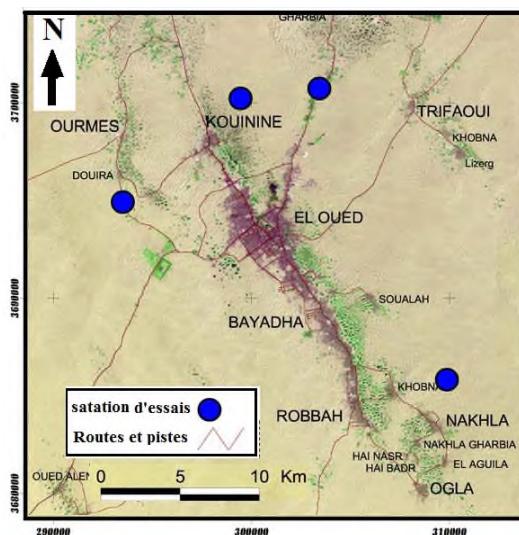


Figure 64: Carte de positionnement des sites des essais de pompage.

5.2.1. Essai de pompage à El-Oued.

Les mesures du rabattement du niveau piézométrique dans le puits de pompage des trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement. Les débits sont de 4 l/s, 8 l/s et 13 l/s. Le débit spécifique est déterminé à partir des droits débits - rabattement à un temps de 21600 secondes. Le rabattement à 4 l/s est de 1,71 m, celui à 8 l/s est de 3,64 m, et celui à 13 l/s est de 5,8 m. Le débit spécifique est de $2,15 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. (BG, 2003)

Interprétation d'essai de longue durée (Fig.65), (72 h, 17 min et 30 s) à débit constant de 15,4 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres. Les mesures dans le puits de pompage ainsi que dans les 3 piézomètres sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement.

La perméabilité déterminée par la méthode de Cooper-jacob est de : $K = 8,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

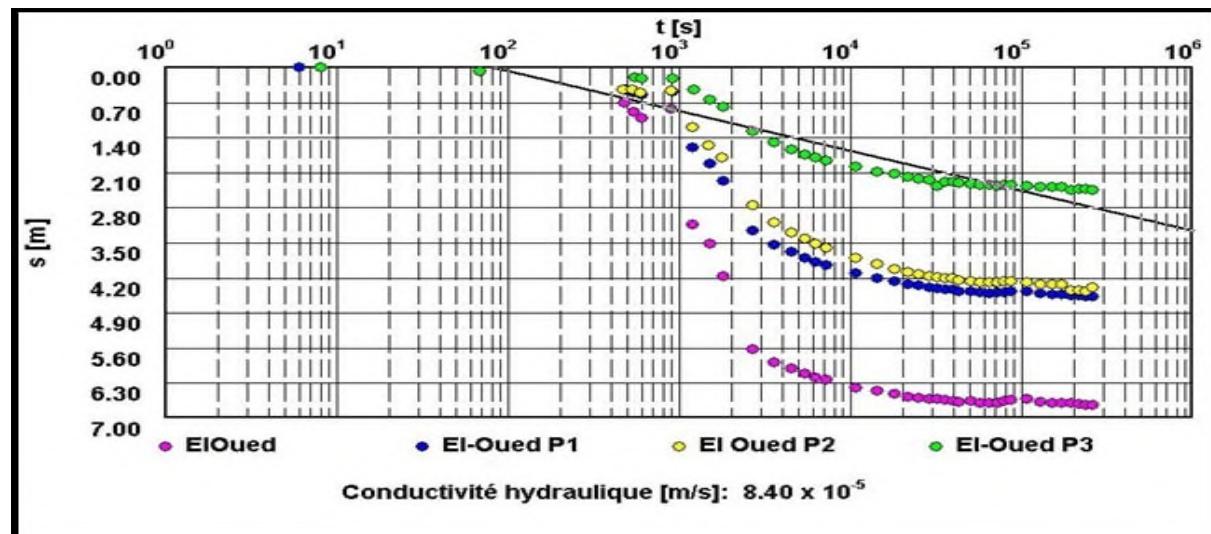


Figure 65: Essai de pompage de longue durée à El-Oued.

5.2.2. Essai de pompage à Kouinine.

Les mesures dans le puits de pompage des trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le même graphe (voir annexe), temps/rabattement. Les débits sont de 4 l/s, 8,2 l/s et 13 l/s. Le débit spécifique est déterminé à partir de droit débit - rabattement à un temps de 21600 secondes. Le rabattement à 4 l/s est de 6,53 m, celui à 8,2 l/s est de 12,81 m, et celui à 13 l/s est de 21 m. Le débit spécifique est de $6,29 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Interprétation d'essai de longue durée (Fig.66), (72 h, 21 min et 30 s) à débit constant de 10,9 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres. Les mesures dans le puits de pompage ainsi que dans les 3 piézomètres sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement.

La perméabilité déterminée par la méthode de Cooper-jacob est $K = 9,34 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

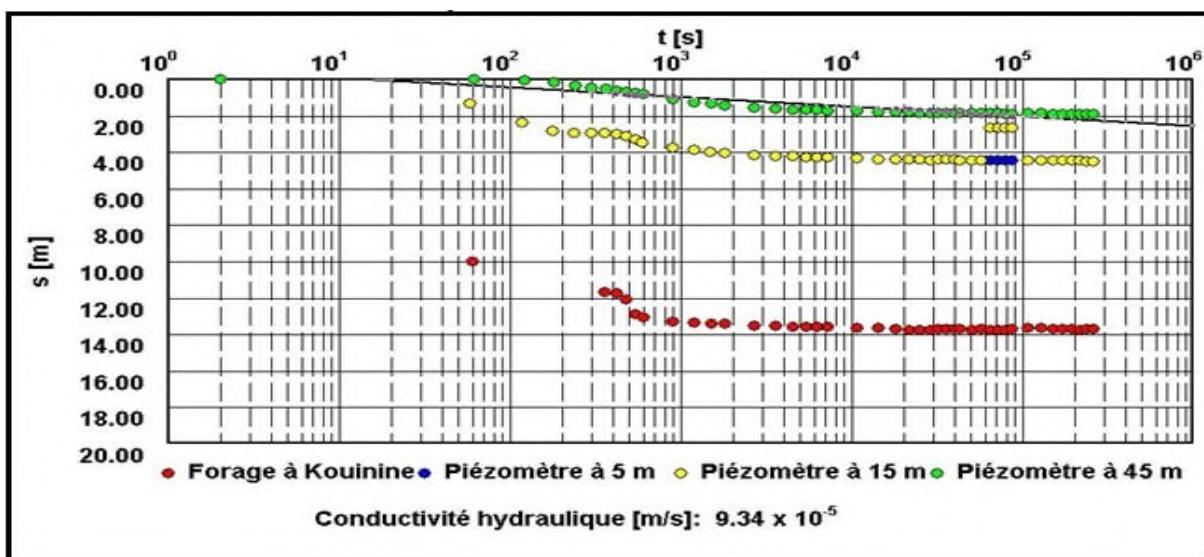


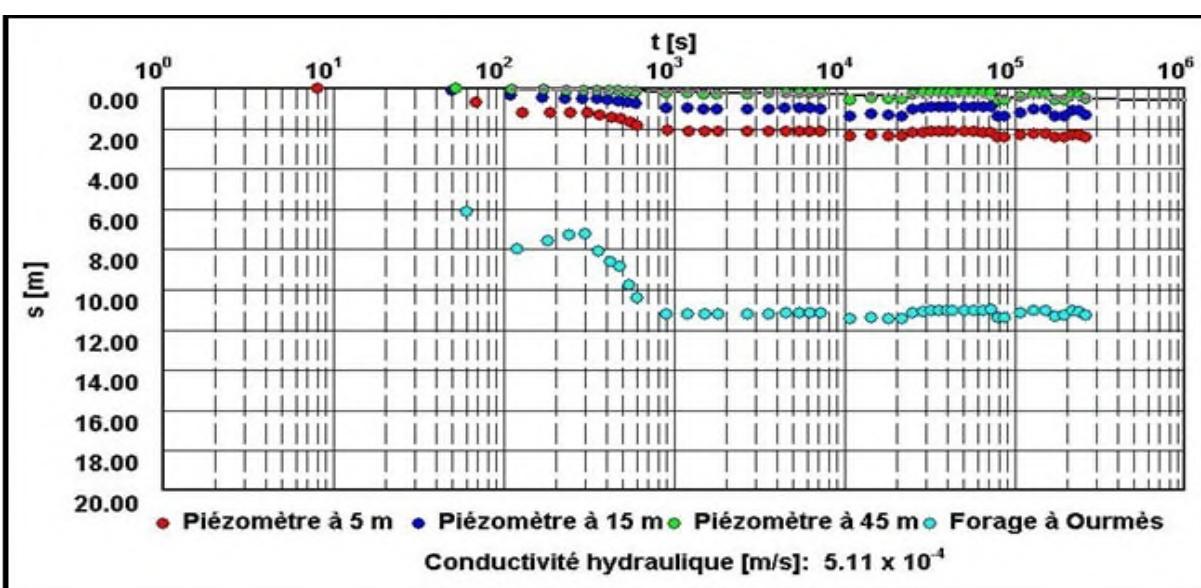
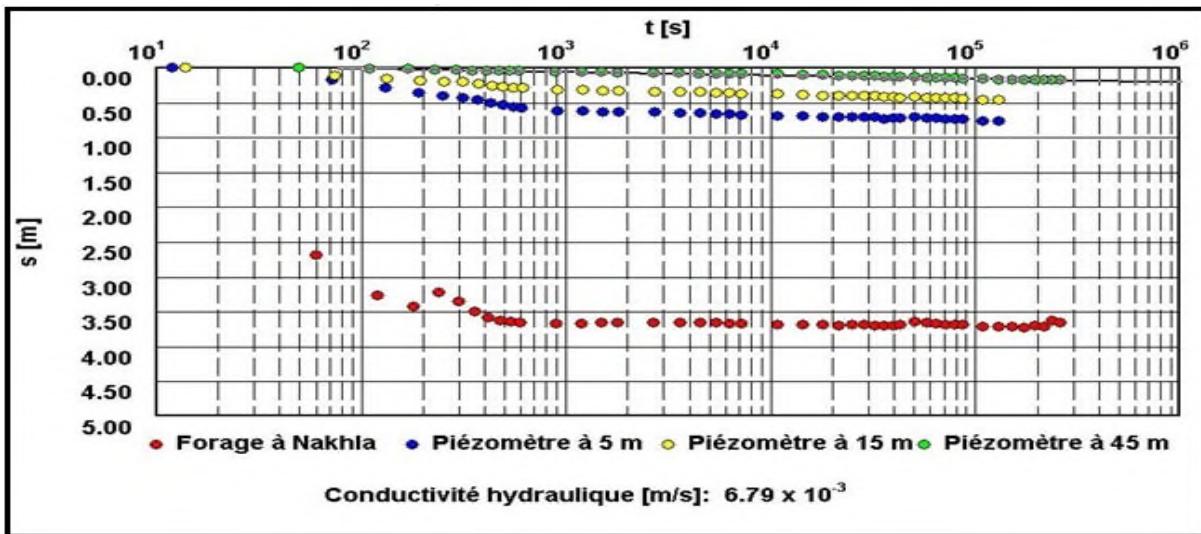
Figure 66: Essai de pompage de longue durée à Kouinine.

5.2.3. Essai de pompage à Nakhla.

Les mesures dans le puits de pompage des trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le même graphe (voir annexe), temps/rabattement. Les débits sont de 4 l/s, 8 l/s et 11.6 l/s. Le débit spécifique est déterminé à partir de droit débit - rabattement à un temps de 21600 secondes. Le rabattement à 4 l/s est de 2.36 m, celui à 8 l/s est de 5.5 m, et celui à 11.6 l/s est de 8 m. Le débit spécifique est de $1.83 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Interprétation d'essai de longue durée (Fig.67), (72 h et 30 s) à débit constant de 14.4 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres. Les mesures dans le puits de pompage ainsi que dans les 3 piézomètres sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement.

La perméabilité déterminée par la méthode de Cooper-jacob est de : $K = 6.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.



5.3. Comparaison des résultats de mesure de perméabilité.

Les valeurs de perméabilité obtenues par la méthode de Muntz sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par les essais de pompage quoiqu'un peu plus faibles que celles qui ont été déterminées par les essais de pompages sur des puits dans la zone d'étude, ce qui laisse supposer que la méthode d'interprétation de Cooper et Jacob utilisée par BG en 2003 n'est pas la bonne (On observe une stabilisation de rabattement après certain temps de l'essai dans le puits et les piézomètres, et les puits sont imparfaits). Pour cette raison nous avons adopté les résultats obtenus par la méthode de Muntz surtout quels sont très proches des résultats obtenus par d'autres auteurs (*Kherici et al, 1996*).

6. PIEZOMETRIE DE L'AQUIFERE LIBRE D'EL OUED.

6.1. Le réseau de surveillance d'Oued Souf.

Le réseau de surveillance de l'aquifère libre d'El Oued est mis en place en 1993 par l'ANRH, elle est composé originellement de 152 points : 112 puits (H) et 40 piézomètres répartis dans la région d'El-Oued dans une zone de 80 km Nord-Sud et sur 40 km Est-Ouest. En septembre 2001, 104 points demeurent opérationnels dont 83 des 112 puits et 21 des 40 piézomètres. Ce réseau donne une vue générale des caractéristiques de la nappe phréatique, mais ne permet pas de mettre en évidence le phénomène de la remontée de la nappe phréatique par le manque de points de mesures dans les zones affectées, en particulier au niveau des agglomérations. Pour y remédier, 107 nouveaux points (G) ont été implantés sur recommandation du bureau d'étude suisse (BG 2001 et BG 2002) en septembre 2001 (Annexe 5); 69 dans le couloir Oglagouanine, 9 dans les environs de Z'goum, 7 dans la zone du rejet et 22 répartis dans les autres agglomérations principales, dans des lieux qui avaient subi une montée de la nappe. Ce sont essentiellement des puits améliorés, implantés dans des lieux publics, principalement des écoles et lycées, plus rarement en puits privés et pour ces derniers, seulement lorsque la densité des puits « publics » était insuffisante.

En 2006, COCIDER propose un réseau de drainage vertical dans la ville d'El-Oued (Fig.69), pour évacuer le surplus d'eau et maintenir le niveau de la nappe phréatique à une cote admissible par pompage permanent à travers 58 forages (utilisés aussi comme piézomètres), répartis dans la ville, jusqu'à le 15 juin 2011 après quatre mois de fonctionnement, le réseau de drainage vertical a évacué 1360417 m³ vers chott El-Haloufa , avec une moyenne de 131 l/s. le drainage vertical au niveau de la ville d'El-Oued, rend l'établissement des cartes piézométriques impossibles à cause de l'incapacité de mesurer le niveau statique dans les piézomètres.

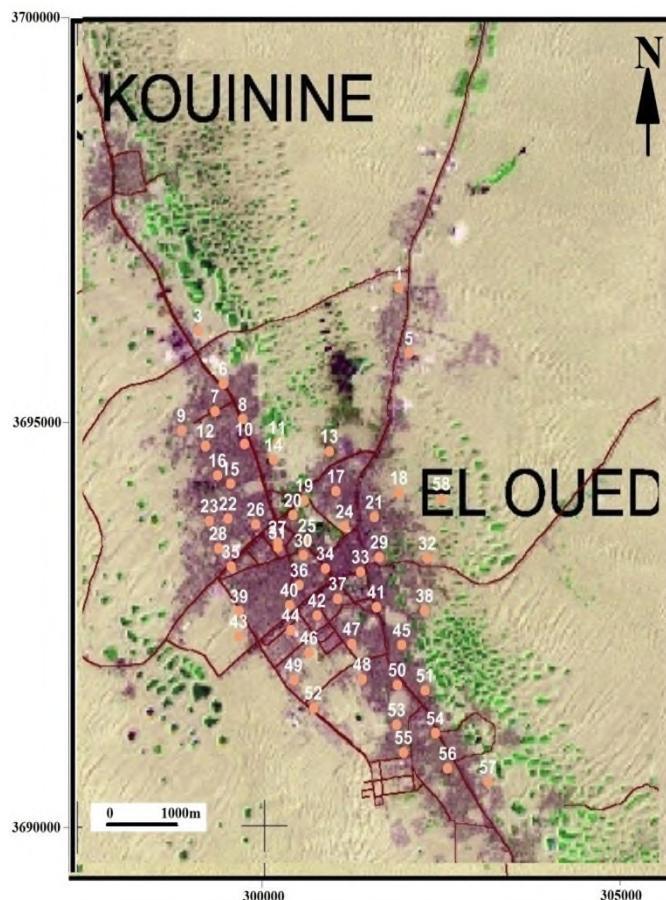


Figure 69: Inventaire des forages de drainage vertical de la ville d'El-Oued (ONA 2006).

6.2. Historique de la remontée des eaux dans la zone d'étude

Le phénomène de remontée de la nappe phréatique dans la région d'El-Oued est complexe et s'étend pratiquement sur un demi-siècle. Avant 1956, toute l'eau utilisée pour l'alimentation humaine, animale et l'agriculture provenait de la nappe phréatique. L'augmentation de la population et l'extension des cultures ont conduit à creuser en 1956 le premier forage au Complexe Terminal pour l'AEP d'El Oued, entre 1957 et 1969, environ un nouveau forage par an a été exécuté dans le Complexe Terminal, de 1970 à 1980, environ 2 forages par année ont été réalisés dans le CT, dès 1980, on observe les premiers ghouts ennoyés à El Oued et une montée progressive et persistante de la nappe phréatique aux portes d'El Oued, ce qui en 1985 alarme les Autorités. Entre 1980 et 1987 une centaine de nouveaux forages sont réalisés dans le CT et trois forages dans le Continental Intercalaire, ces derniers sont fortement artésiens, et à débits de 200 l/s, soit de 5 à 10 fois plus importantes que ceux de Complexe Terminal.

En 1993, la nappe avait ennoyé la palmeraie sur 25 km dans le couloir Kouinine –Robbah. La zone touchée par la remontée des eaux s'étend sur une superficie de 3 000 km². Sur laquelle habite 380 000 habitants, qui sont répartis sur 18 communes dont ; Bayadha, Robbah,

Kouinine, Guemmar, Taghzout, Hassani Abdelkrim, Debila, Sidi Aoun, Magrane, Hassi Khelifa, Reguiba, Mihouensa, Oued Alenda, Oglia, Nakhla, Ourmes et Trifaoui.

A partir de 1993 jusqu'au 2004, une série d'investigations à été entreprise pour connaître les caractéristiques géométriques et géologiques de l'aquifère, et recenser les forages existants. A la fin d'investigation une série de mesures telles que ; l'arrêt de nouveaux forages pour l'irrigation dans le CT et le CI, et remplacés par des puits dans la nappe phréatique, la réduction des allocations d'AEP à la population, la construction pour l'agriculture de nouveaux puits améliorés dans la nappe phréatique et la mise en valeur de nouveaux périmètres agricoles. La commune d'El Oued a lancé également un projet de réalisation du réseau de drainage horizontal, qui est devenu opérationnel en 2001, il est destiné essentiellement pour les zones touchées par l'inondation (cité Choot, El-coutar, Nazla et Sidi Mestour). Il présente 4050 m de longueur, les collecteurs sont des conduites d'amiantes ciments perforées des trous. La collecte est gravitaire et aboutit à une station de pompage située dans la même enceinte que la station de relèvement ST10 pour les eaux usées, à partir de laquelle les eaux de drainage sont évacuées vers l'extérieur de la ville via une canalisation de 400 mm parallèle à celle des eaux usées (Zine, 2009). Ses mesures ont eu un impact positif avec une stabilisation ou une baisse du niveau piézométrique dans certaines zones affectées, alors que dans la ville d'El Oued, la nappe continue à monter de 40 à 60 cm par année dans les quartiers les plus touchés de la ville.

Devant ce problème la solution adoptée est la réalisation d'un drainage vertical sur l'ensemble de l'Aire de l'étude. Ce procédé nécessite rien que pour la région d'El Oued, la mise en place d'un système de drainage et la réalisation d'une batterie de 51 forages équipés de pompes pour un débit d'exploitation global de 348 l/s et ainsi la mise en place d'un réseau de drainage de 34 km indépendant du réseau d'assainissement de la ville. L'ensemble des eaux drainées aboutit à la station de pompage qui à son tour refoulera plus loin vers le Chott Halloufa situé à 47 km au nord de la ville d'El Oued. Le réseau de drainage est opérationnel depuis 2011, en conséquence on note la stabilité du niveau d'eau à 1m de profondeur sous les zones les plus basse (ghouts).

Depuis la mise en service du projet d'El-Oued (4 ans), le volume d'eau excédentaire extrait de la nappe phréatique (dans le centre ville d'El-Oued seulement) par 51 forages du drainage vertical est de l'ordre de 15 millions de mètres cubes. A cela, il faut ajouter le volume d'eau épurées par les quatre stations d'épuration, qui est de l'ordre de 28 millions de mètres cubes. Le système d'évacuation des eaux usées a transféré ces eaux vers le rejet final de chott Halloufa. En dépit de ces mesures le problème de la remontée des eaux est encor non maîtrisé

jusqu'à nos jours (Fig. 70), car un arrêt de réseau de drainage d'un mois peut provoquer une augmentation de niveau de la nappe phréatique de plus d'un mètre.

Les causes de la remontée des eaux de la nappe phréatique sont multiples, on note, la véritable révolution agricole des dernières années qui a engendré le pompage intensif des nappes profondes (CT et CI), la croissance démographique des agglomérations d'El Oued a augmenté la demande sur l'eau potable. Ce phénomène est aggravé par l'absence quasi-totale d'infrastructures d'assainissement (le taux de couverture en réseaux d'assainissement est 10%) et de drainage des eaux d'irrigation dans la wilaya d'El-Oued et l'absence d'exutoire due à la faiblesse de la pente de relief.

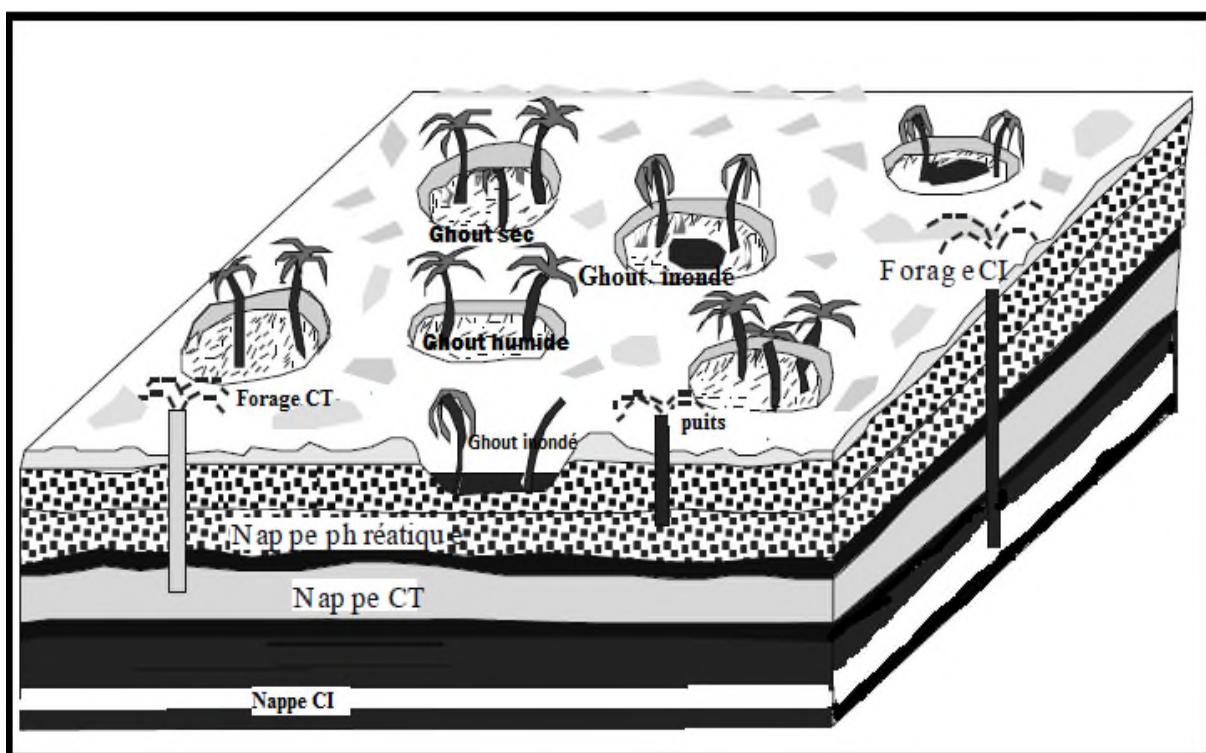


Figure 70: Etat des Ghouts d'El Oued en 2014 (Remini, 2006 modifié).

6.3. Compagnes de mesure réalisées par BG.

6.3.1. Piézométrie de la nappe libre en mars-avril 2001.

La partie haute de la nappe (Fig.71) est située au Sud avec une côte de près de 90m au piézomètre P39, implanté sur la route de Touggourt au Sud-Ouest de Mih Ouensa. La partie basse est située au Nord-Ouest, avec une cote d'une trentaine de mètres au puits H1 à Foulia et -6m au piézomètre P36 à la limite Nord-Ouest sur la route de Biskra. La pente de la nappe est faible au Sud d'El-Oued (un peu moins de 0.9%) par contre elle est plus prononcée au Nord avec 1.8% au puits H1. Elle augmente encore au-delà de H1 pour atteindre un maximum de 2.9% aux piézomètres P38 et P36. La carte des niveaux piézométriques présente :

- des dômes piézométriques correspondant à la palmeraie Mehri située près du P17, ainsi que près du rejet (H90) au Nord de l'hôpital d'El-Oued, aux alentours de Z'goum et du couloir de Kouinine-Robbah. Ces zones hautes correspondent à un surplus d'eau venant de l'infiltration des eaux d'irrigation et les eaux des rejets domestiques.
- des dépressions piézométriques au niveau des cultures de surface du triangle Reguiba-Hassi Khalifa-Taghzout qui correspondent à un déficit en eau à cause des pompages intenses dans la nappe libre pour l'irrigation des cultures.

6.3.2. Piézométrie de la nappe phréatique en septembre 2001.

La carte piézométrique (Fig.72) est établie après l'extension du réseau de mesure, en septembre 2001 (107 nouveaux points). Des détails apparaissent et les zones urbaines se distinguent des zones agricoles irriguées à partir de la nappe phréatique. On constate, du Sud vers le Nord :

- Une avancée haute de la nappe phréatique dans la région de Mih Ouensa, Oued El Alenda qui est relayée vers le Nord-Est au niveau d'El-Oued et du rejet des eaux de drainage et d'assainissement de cette ville.
- Une zone s'étendant d'El-Ogla à Bayada dans laquelle le niveau de la nappe phréatique est moins monté qu'à El Oued et qui paraît déprimée par rapport à cette dernière.
- Des points hauts dans les zones urbaines de Guemmar et de Trifaoui, plus bas à l'extérieur dans les zones agricoles.
- Une partie Nord plus régulière à Reguiba, Magrane, Hassi Khelifa où la densité des points est relativement faible.

6.3.3. Variations du niveau piézométrique entre septembre 2001 et mars-avril 2001.

La carte piézométrique (Fig.73) établie met en évidence les mouvements saisonniers de la nappe phréatique entre mars-avril 2001 et septembre 2001. Où l'on observe:

- Une remontée de la nappe libre au niveau du rejet de la ville d'El-Oued, des agglomérations d'Ouzitene, d'Ez Zeggoub et de Guemmar , et au niveau des plantations irriguées à partir de la nappe du complexe terminal, il s'agit du Domaine Daouia, et de la plantation de Foulia.
- Une baisse de la nappe phréatique dans les zones agricoles.

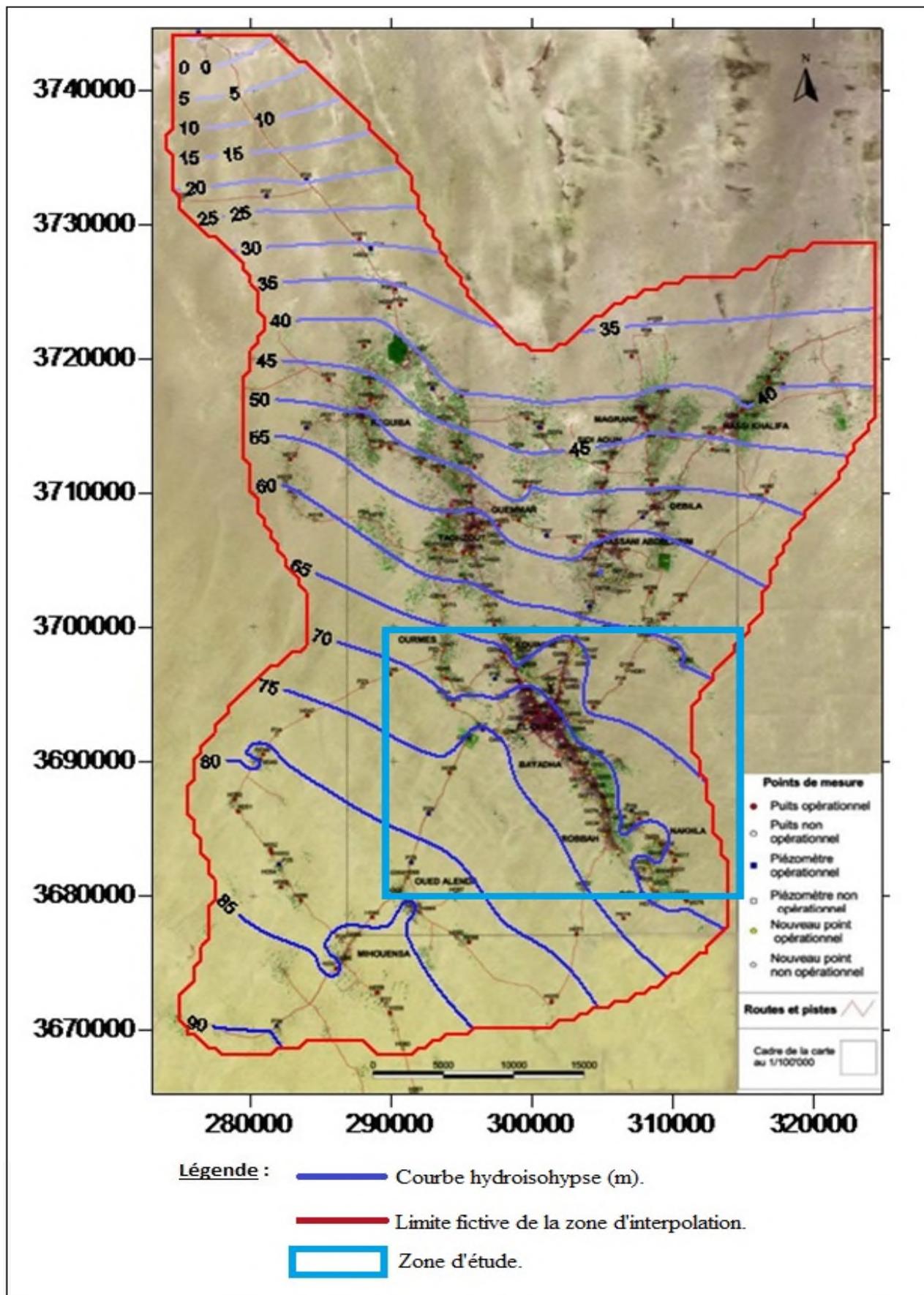


Figure 71: Carte piézométrique de la nappe phréatique en mars-avril 2001

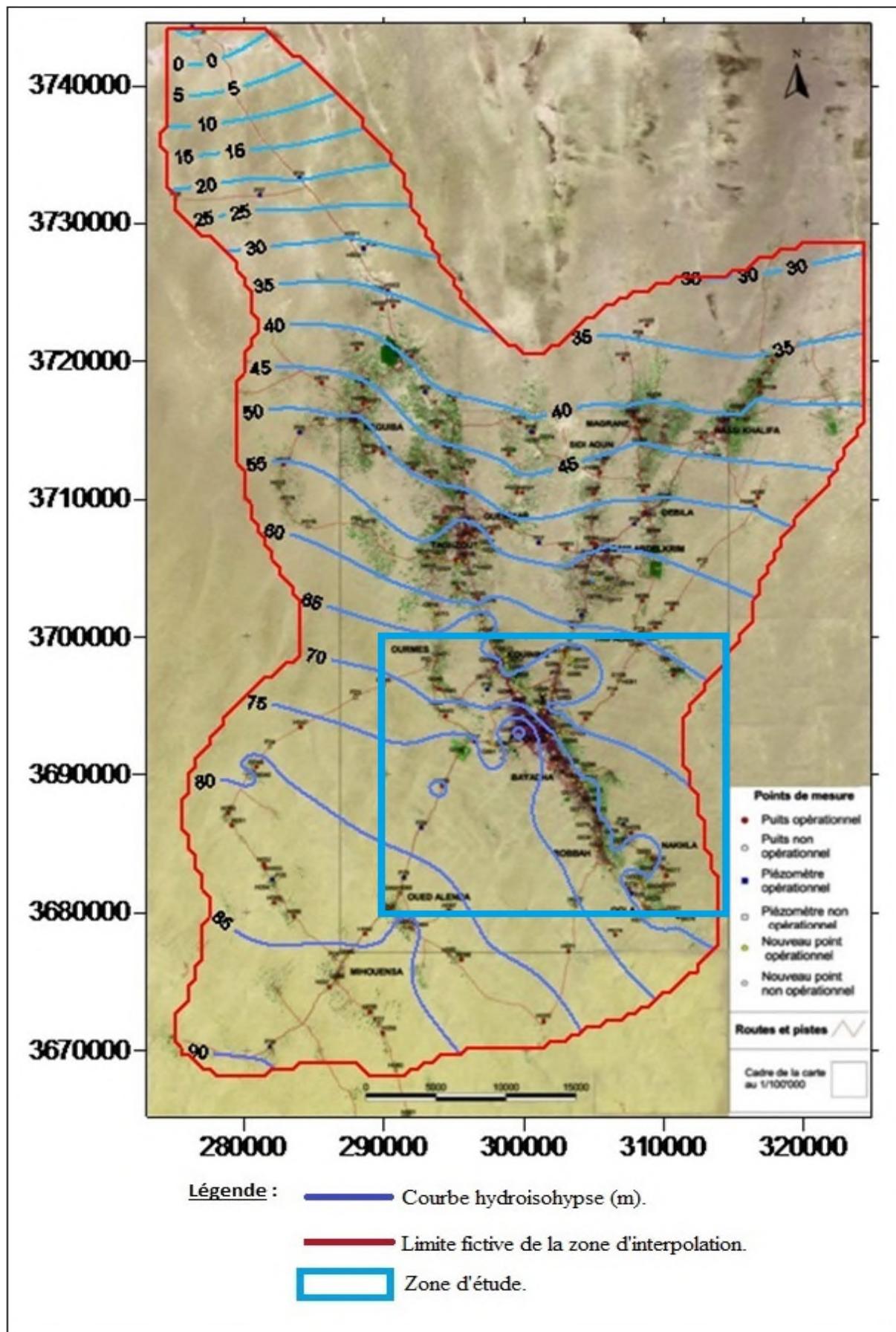


Figure 72: Carte piézométrique de la nappe phréatique en septembre 2001

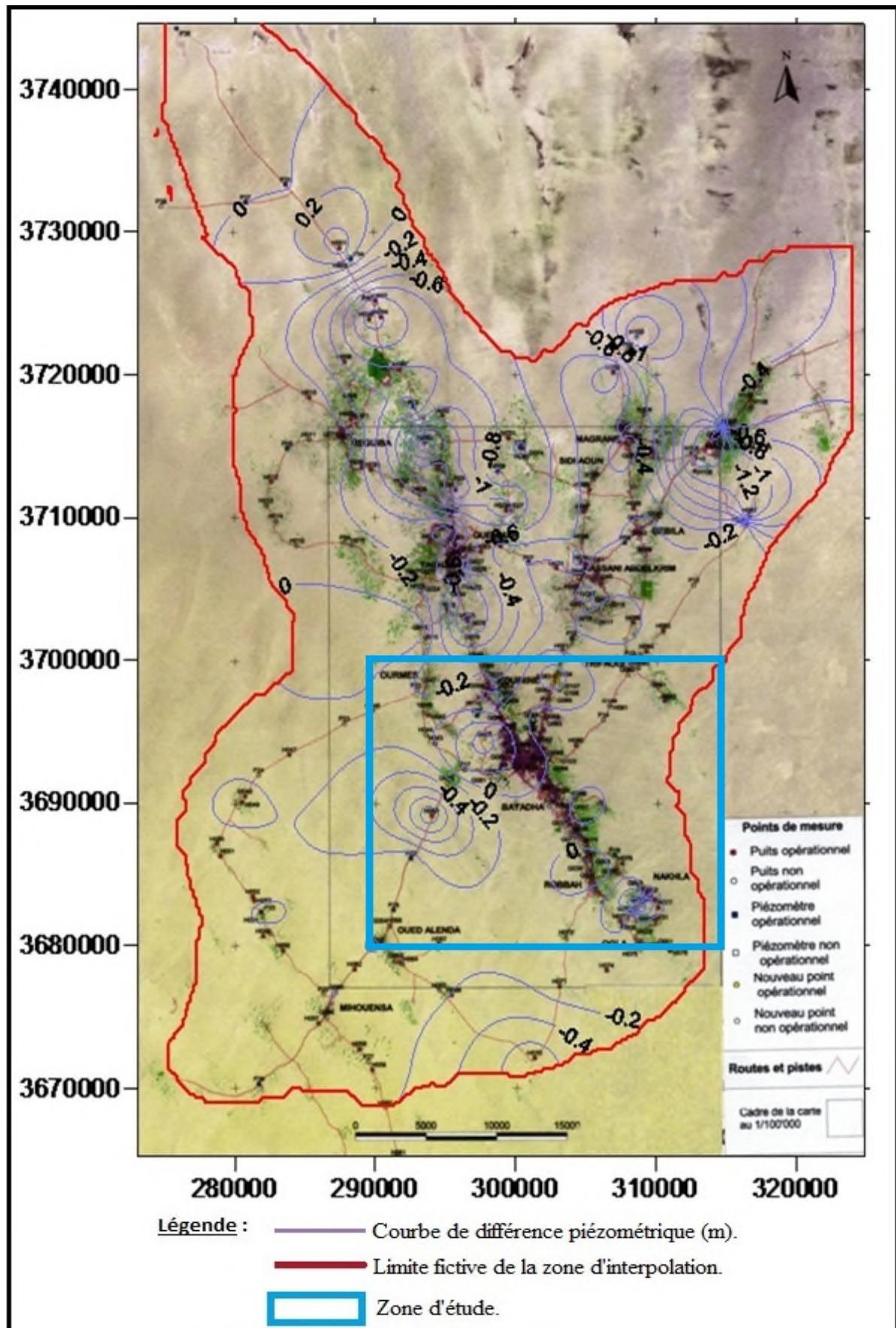


Figure 73: Carte des variations du niveau piézométrique entre septembre et mars-avril 2001.

6.3.4. Piézométrie de la nappe phréatique en avril 2002.

Des mesures sur 117 points du réseau de surveillance ont servi à la réalisation de la carte dont les courbes ont été déterminées par krigeage linéaire. La carte piézométrique (Fig.74), met en évidence des anomalies localisées, à faibles rayons de courbure dont on sait par ailleurs, d'après les cartes de variations des niveaux piézométriques notamment, qu'elles peuvent correspondre à des interventions humaines récentes telles que l'AEP et l'irrigation à partir des nappes profondes pour les anomalies hautes et l'irrigation à partir de pompages dans la nappe phréatique pour les anomalies basses.

- des dômes piézométriques sont constatés (BG, 2003):

- Au niveau de 12 chefs-lieux de communes, les anomalies sont de : El-Oued, Bayadha, Oued Alenda Sud et Oued Alenda Nord, Nakhla, Robbah, Kouinine, Guemmar, Trifaoui, Magrane, Reguiba, Debila, Hassi Abdelkrim et Zgoum.
- Les chefs-lieux de commune d'Ourmes, Sidi Aoun, Hassi Khalifa, Taghzout, Mihounsa et El-Ogla ne présentent pas des anomalies positives, probablement à cause d'une forte activité agricole dans les agglomérations et/ou à une restriction dans la dotation en eau à partir des forages profonds.
- Au niveau des zones agricoles irriguées par des forages au complexe terminal, les anomalies hautes sont de 5 m au domaine Daouia près d'El-Oued et 3 mètres à Foulia.
- Au niveau de la zone industrielle de Kouinine, l'anomalie est de l'ordre de 11 m
- Au niveau du rejet de la ville d'El-Oued, l'anomalie est de 7 m environ.
- L'anomalie haute entre Debila, Hassi Abdelkrim et Trifaoui où la plantation d'Akfadou est irriguée par des forages du complexe terminal
- L'anomalie au niveau d'Arfsi Nord est due à une irrigation de certaines plantations par le forage AEP

- des dépressions piézométriques ont été constatées :

- Au niveau des zones agricoles elles sont de l'ordre de 3 m aux environs d'Ogla-Aguila et 3 m entre Guemmar, Djedida Nord, Ghour Debaa et Dmitha
- Au niveau du village d'Oued Turk, elles sont de l'ordre de 2 m. A noter que ce village est approvisionné par des forages implantés dans la nappe phréatique pour l'AEP.

Toutes les anomalies sont le résultat d'un mauvais transfert hydraulique de la nappe phréatique, à cause de sa faible pente.

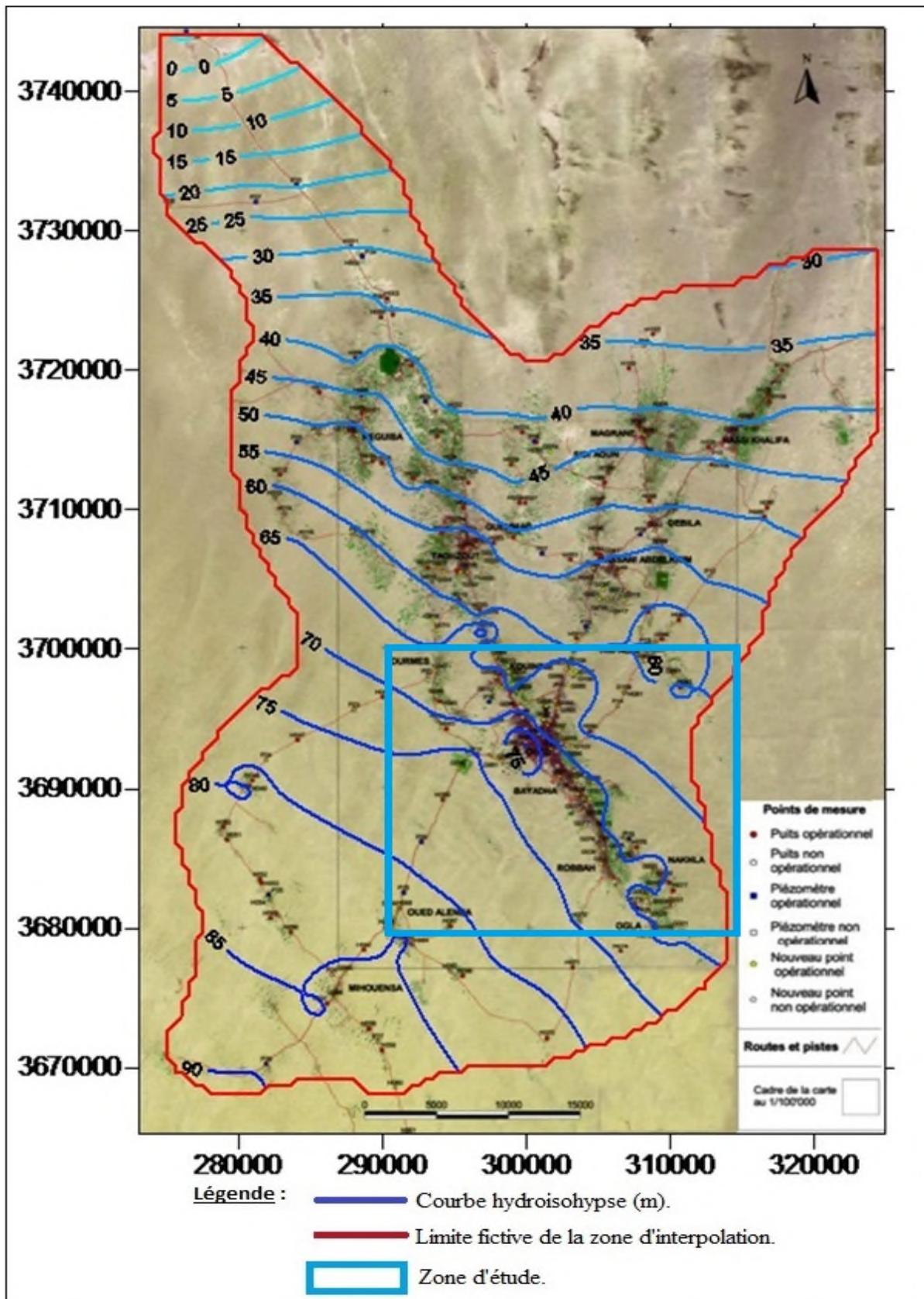


Figure 74: Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril 2002.

6.4. Piézométrie de juin 2010.

La carte piézométrique de juin 2010 (Fig.75), montre que la partie haute de la nappe, représentée en couleur grise foncée, est située au sud-ouest avec une cote de près de 82 m et une zone basse au Nord-est, représentée en bleu, avec une cote de 60m, l'écoulement de la nappe se fait en général de SO vers NE. Le gradient hydraulique oscille entre 0.66% et 0.08, comme titre d'exemple nous donnons les valeurs de gradient hydraulique dans quelques points sur la carte : (A =0.62%), (B = 0.09%) (C= 0.08%), (D = 0.66%) et (E=0.11%). Les centres urbains et les zones agricoles irriguée à partir des nappes profondes, apparaissent sur la carte piézométrique comme des zones de divergence ; c'est le cas des plantations de Mahri au NO, Teksebt au centre, Nakhla et Bayadha au sud.par contre les zones irriguées à partir des puits dans la nappe libre, apparaissent sur la carte comme des zones de convergences c'est le cas de ; Nakhla Gharbia et Hai Nasr au sud, Sidi Abdellah au nord est, et au Ouest de Bayadha, on ajoute à cette dernière les zones de dépressions de Chott, hôtel Louss et la zone de rejet d'El-Oued.

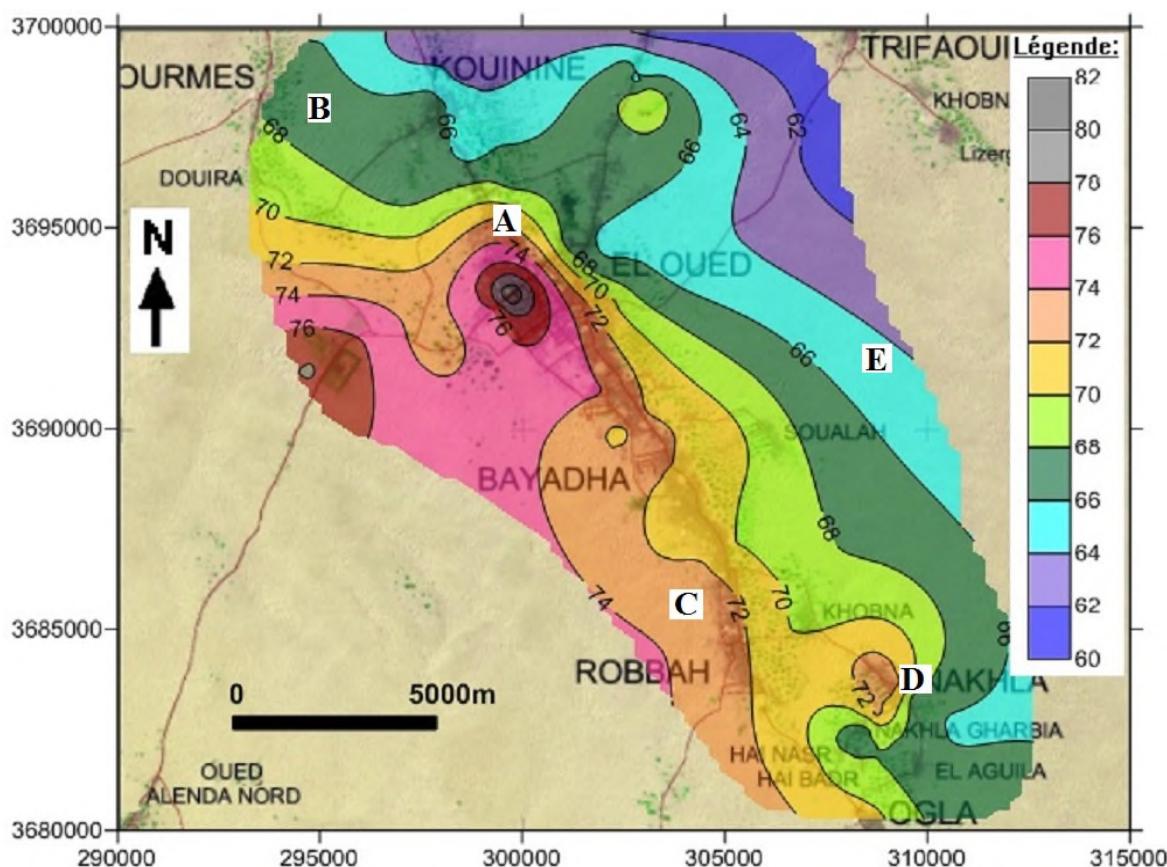


Figure 75: Carte piézométrique de la zone d'étude de juin 2010.

6.5. Piézométrie d'avril 2012.

La campagne de mesure piézométrique effectuée en avril 2012, par l'ANRH dans la zone de souf compte 108 points de mesure, dont 28 points seulement se trouvent dans la zone d'étude. La carte piézométrique (Fig.76) réalisée semble manquée de détail en comparaison avec celle de 2010, mais elles ont la même allure, le sens d'écoulement de la nappe est toujours orienté Sud-ouest vers Nord est. Cependant on remarque une diminution de niveau piézométrique d'ordre de 4 m, dans la partie nord-est, due à l'effet de pompage dans le réseau de drainage vertical de la ville d'El Oued où on constate que l'apport d'eau diminue vers le sens d'écoulement (Trifaoui). Dans la ville d'El Oued après la mise en marche du réseau de drainage vertical (51 forages équipés de pompes pour un débit d'exploitation global de 348 l/s), on peut plus perler d'une carte piézométrique qui reflète l'état naturel de la nappe car le niveau est toujours dynamique, il est maintenu à 1m de profondeur sous les zones les plus basses (ghouts). Il nous reste que de mesurer les volumes d'eau pompés pour garder le niveau piézométrique stable, mais ces quantités d'eau sont prélevées des nappes profondes ce qui signifient des pertes non renouvelables traduites par le baisse de l'artésienisme de CT et CI.

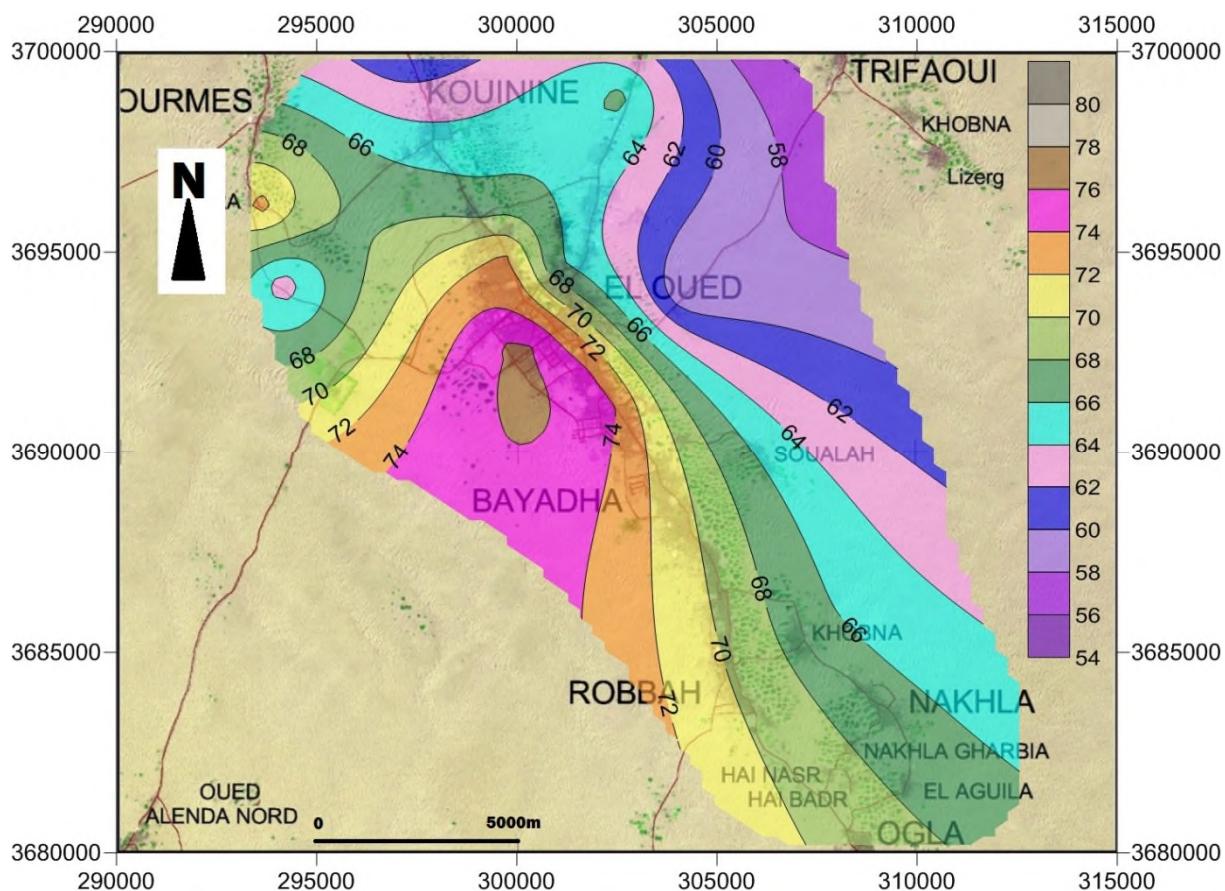


Figure 76: Carte piézométrique de la zone d'étude d'avril 2012.

7. CONCLUSION.

La zone d'étude fait partie du système aquifère du Sahara septentrional (SASS), ce dernier est constitué de trois aquifères, un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)).

L'étude géophysique réalisée par ENAGEO en 1993, basée sur la mesure de la résistivité des roches par des sondages électriques verticaux, couvre la région d'étude, et l'interprétation des coupes hydrogéologiques réalisées sur la base de logs de forages d'eau, montrent que l'aquifère libre d'El Oued est constitué de sables fins, de grés à ciment gypseux friable, des sables moyens et grossiers, et des argiles sableuses. Le substratum est argileux, sa profondeur oscille entre 40m et 70m. Les limites latérales de l'aquifère libre, n'ont pas été atteintes étant donné que cette dernière s'étend au-delà de la zone d'étude.

Deux études hydrodynamiques sont effectuées dans la zone d'étude, pour déterminer la perméabilité de l'aquifère; la première par la méthode de Muntz, et la seconde par des essais de pompage de longue durée. Les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur, mais ceux obtenus par la méthode de Muntz sont très proches des résultats obtenus par d'autres auteurs (Kherici et al, 1996). Ces résultats montrent que la perméabilité de l'aquifère superficielle d'El-Oued, oscille entre 1.1×10^{-4} m/s à 2.6×10^{-4} m/s.

L'examen des cartes piézométriques (de 2001, 2002, 2010 et 2012), montrent que la partie haute de la nappe est située au sud-ouest et la partie basse est située au nord-est, l'écoulement de la nappe se fait en général de sud-ouest vers nord-est. Le gradient hydraulique est faible (< 0.7 %). Les centres urbains et les zones agricoles irriguées à partir des nappes profondes de CT, présentent sur la carte des dômes piézométriques, à cause d'une alimentation forte de la nappe par les eaux d'infiltrations (les eaux domestiques et les eaux d'irrigations), ces zones étendues de Sud-Est à Nord-Ouest de la zone d'étude le long de l'axe Nakhla-Kouinine, on ajoute à ces dernières les zones de dépressions de Chot, hôtel Louss et la zone de rejet d'El-Oued. Par contre les zones irriguées à partir des puits dans la nappe phréatique, apparaissent sur la carte piézométrique comme des zones de dépressions piézométriques, c'est le cas de ; Nakhla Gharbia et Robah au sud, les plantations de Mehri au NO et au sud de Trifaoui.

La carte piézométrique de 2012, établie après la mise en marche de réseau de drainage vertical (51 forages équipés de pompes pour un débit d'exploitation global de 348 l/s), montre une diminution du niveau piézométrique d'ordre de 4 m, dans la partie nord-est, due à l'effet de pompage dans le réseau de drainage vertical de la ville d'El Oued où on constate que l'apport d'eau diminue vers le sens d'écoulement (Trifaoui). Alors que la forme générale de la carte piézométrique reste la même.

Partie 3 :

Etude hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued Souf.

1. QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE LIBRE.

1.1. Matériels et méthode.

Pour la réalisation de cette étude hydrochimique, nous avons effectué trois campagnes de prélèvement et de mesures hydrochimiques dans les puits et les forages de la nappe libre ; en juin 2010, en mai et juin 2012, et en mars 2015.

Les puits échantillonnés ont été référencés selon le système de projection GW 84. La majorité d'entre eux sont des puits destinés à l'irrigation. D'autres points d'échantillonnages sont des simples trous réalisés par moi-même par une pelle où le niveau statique est inférieur à 1 m sous le sol. En Juin 2010 nous avons échantillonné 86 puits pour mesurer le taux de nitrates dans la nappe libre, en mai et juin 2012 nous avons échantillonné 20 puits et 5 points d'eau exécutés par moi-même pour l'analyse en éléments majeurs et 82 puits pour mesurer le taux de nitrate, et en mars 2015 nous avons échantillonné 8 puits pour l'analyse des éléments majeurs en plus quelques métaux lourds (Pb, Fe, Mn, Cu et Zn). Nous avons également utilisé les résultats d'analyse des éléments majeurs de 20 puits effectuée par l'ADE d'El Oued en juin 2010.

Les paramètres physico-chimiques (pH, température et conductivité) ont été déterminés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon, grâce à un multiparamètres portatif. Les échantillons à analysés au laboratoire ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène après avoir été filtrés et acidifiés.

Les échantillons prélevés lors de la campagne de juin 2010 et celle de mai-juin 2012 ont été analysés au niveau de laboratoire de l'ANRH de Ouargla, et ceux de la campagne de mars 2015 ont été analysés au niveau de laboratoire de radio-analyses et environnement de l'école nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie). Les données de la qualité bactériologique des eaux sont recueillies à partir de l'ADE d'El-Oued.

1.2. Faciès chimiques des eaux de la nappe libre.

La composition chimique des eaux souterraines dépend essentiellement de la géologie ainsi que des processus géochimiques qui ont eu lieu au sein du système des eaux souterraines. Le diagramme Piper (1944) a été utilisé dans le but de caractériser l'eau de la nappe libre. En outre, ce diagramme de Piper permet également de représenter les compositions de cations et d'anions d'un grand nombre d'échantillons sur un seul graphique dans lequel les grands groupes ou les tendances dans les données peuvent être discernés visuellement. Il est aussi utilisé pour évaluer les faciès hydrogéochimiques.

1.2.1. Compagnie de juin 2010.

La représentation des éléments chimiques des différents échantillons (20) sur le diagramme de Piper (Fig.77 et Tab.13) montre que la majorité des échantillons se concentrent sur les pôles caractérisant par les faciès sulfaté calcique et sulfaté sodique.

La répartition des faciès chimiques pour les 20 échantillons de juin 2010, se fait comme suit :

- 55% échantillons ont un faciès chimique sulfaté calcique.
- 20% échantillons montrent un faciès chimique sulfaté sodique.
- 15% échantillons caractérisés par un faciès chimique chloruré calcique
- 10% échantillons présentent un faciès chimique sulfaté magnésique.

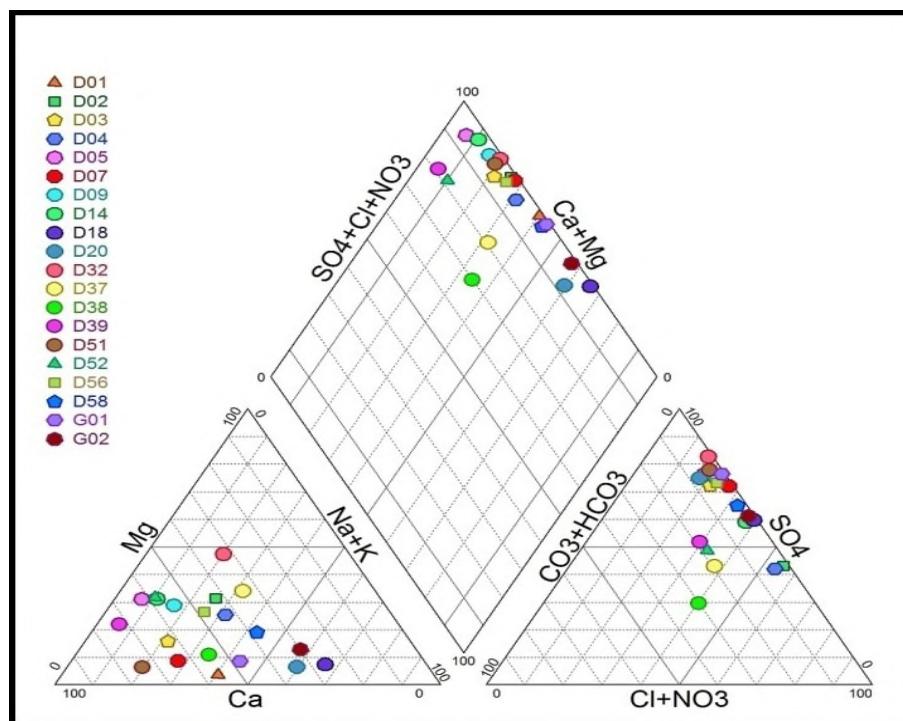


Figure 77: Diagramme de Piper des eaux de la nappe libre (juin 2010).

Tableau 13: Répartition des faciès chimiques de la compagnie de juin 2010.

Echantillon (puits)	Nombre de puits	Formules ioniques	Faciès chimique
G ₀₂ , D ₅₈ , D ₁₉ et D ₂₀ .	04	r(Na ⁺ + K ⁺) > rCa ⁺² > rMg ⁺² rSO ₄ ⁻² > rCl ⁻ > rHCO ₃ ⁻	Sulfaté sodique
D ₀₂ , D ₀₄ et D ₃₈ .	03	r rCa ⁺² > (Na ⁺ + K ⁺) > rMg ⁺² rCl ⁻ > rSO ₄ ⁻² > rHCO ₃ ⁻	Chloruré calcique
D ₃₂ et D ₃₇ .	02	rMg ⁺² > r(Na ⁺ + K ⁺) > rCa ⁺² rSO ₄ ⁻² > rCl ⁻ > rHCO ₃ ⁻	Sulfaté magnésique
D ₀₁ , D ₀₃ , D ₀₅ , D ₀₇ , D ₀₉ , D ₁₅ , D ₃₆ , D ₅₆ , D ₅₂ , G ₀₁ et D ₅₁ .	11	rCa ⁺² > r(Na ⁺ + K ⁺) > rMg ⁺² rSO ₄ ⁻² > rCl ⁻ > rHCO ₃ ⁻	Sulfaté calcique

1.2.2. Compagnie de mai-juin 2012.

La représentation des éléments chimiques des 25 échantillons sur le diagramme de Piper (Fig.78 et Tab.14) montre que la majorité des échantillons se coïncident sur les pôles caractérisant par les faciès sulfaté calcique et sulfaté sodique.

La répartition des faciès chimiques des 25 échantillons de la campagne de 2012, est comme suit :

- 36% échantillons ont un faciès chimique sulfaté sodique.
- 32% échantillons présentent un faciès chimique sulfaté calcique.
- 20% échantillons montrent un faciès chimique sulfaté magnésique.
- 8% échantillons caractérisent un faciès chimique chloruré sodique.
- 4% échantillons affichent un faciès chimique chloruré calcique.

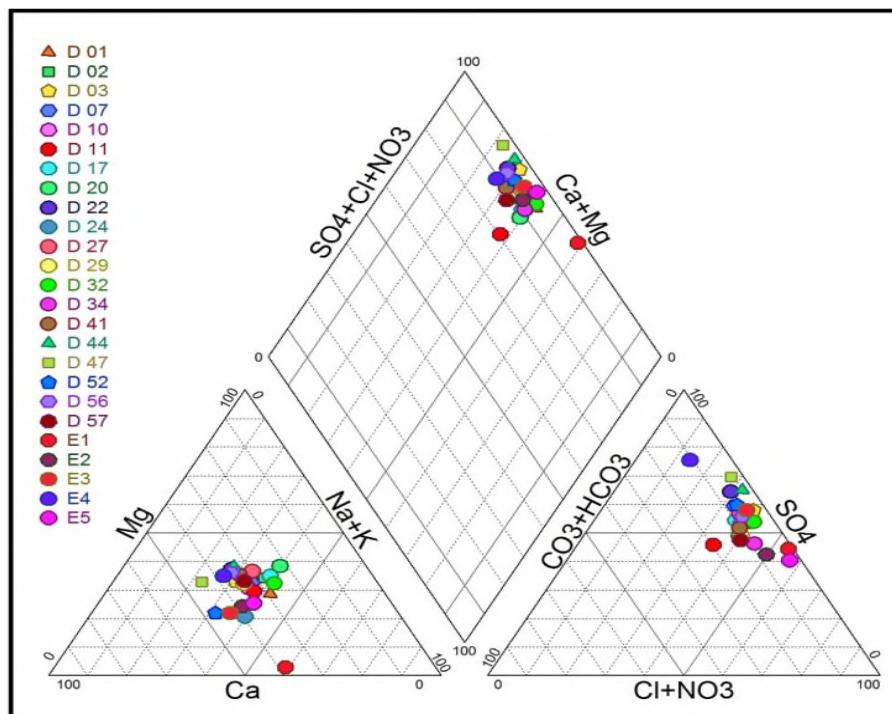


Figure 78: Diagramme de Piper des eaux de la nappe libre (mai-juin 2012).

Tableau 14: Répartition des faciès chimiques de la campagne de mai-juin 2012.

Echantillon (puits)	Nombre de puits	Formules ioniques	Faciès chimique
D ₀₂ , D ₀₇ , D ₁₇ , D ₂₀ et D ₃₂ .	05	$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{+2} > r\text{Ca}^{+2}$ $r\text{SO}_4^{-2} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$	Sulfaté sodique
D ₂₄ , D ₅₂ , D ₅₇ et E ₃ .	04	$r\text{Ca}^{+2} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{+2}$ $r\text{SO}_4^{-2} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$	Sulfaté calcique
D ₂₂ , D ₄₁ , D ₄₄ et D ₅₆ .	04	$r\text{Mg}^{+2} > r\text{Ca}^{+2} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ $r\text{SO}_4^{-2} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$	Sulfaté magnésique
E ₁ et E ₅ .	02	$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Ca}^{+2} > r\text{Mg}^{+2}$ $r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{-2} > r\text{HCO}_3^-$	Chloruré sodique
D ₀₁ , D ₁₀ , D ₁₁ et D ₃₄ .	04	$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Ca}^{+2} > r\text{Mg}^{+2}$ $r\text{SO}_4^{-2} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$	Sulfaté sodique
D ₀₃ , D ₂₉ , D ₄₇ et E ₄ .	04	$r\text{Ca}^{+2} > r\text{Mg}^{+2} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ $r\text{SO}_4^{-2} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$	Sulfaté calcique
E ₂	01	$r\text{Ca}^{+2} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{+2}$ $r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{-2} > r\text{HCO}_3^-$	Chloruré calcique
D ₂₇	01	$r\text{Mg}^{+2} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Ca}^{+2}$ $r\text{SO}_4^{-2} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$	Sulfaté magnésique

1.2.3. Compagnie de juin 2015.

La représentation des éléments chimiques de 8 échantillons d'eau de forage analysés en mars 2015 sur le diagramme de Piper (Fig.79) montre que tous les échantillons se projettent sur le pôle caractérisé par le faciès sulfaté calcique.

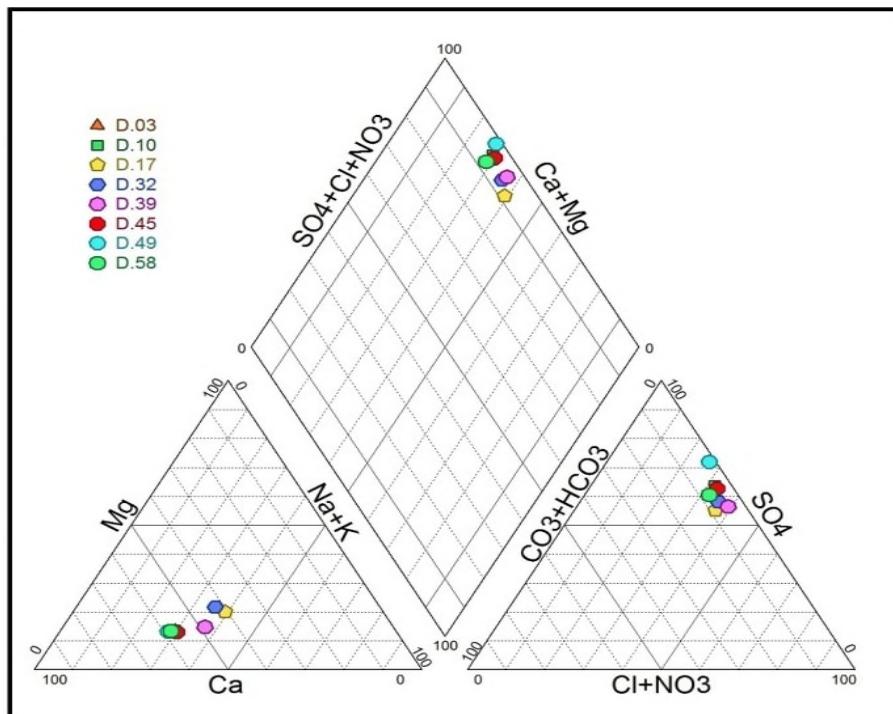


Figure 79: Diagramme de Piper des eaux de la nappe libre (mars 2015).

1.3. Les normes algériennes pour l'eau potable.

Pour être consommée, l'eau doit répondre à des critères de qualité très stricte fixée par les responsables de la santé. Les normes définissant une eau potable sont variables suivant la législation en vigueur et selon le degré de développement des pays, c'est pour cette raison que les normes des pays développés (les Etats unis, Canada, l'Union Européen etc.) sont plus sévère en comparaison avec les pays en voie de développement (Algérie, Egypte, Tunisie etc.), où les moyens techniques de traitement des eaux sont moins disponibles. L'OMS fixe des normes moins sévères que celles des pays développés. Il existe ainsi près de 63 critères pour une eau propre à la consommation : ces critères, décidés selon le principe de précaution maximale qui permet de protéger les personnes dont la santé est la plus fragile, portent sur plusieurs paramètres fixés avec l'aide de l'U.E. En Algérie, l'article 10 du 26 juillet 2000 fixe la norme algérienne pour l'eau potable (Tab.15).

Art.10. l'état assure une surveillance des différentes composantes de l'environnement. L'état doit définir les valeurs limites, les seuils d'alerte, et les objectifs de qualité, notamment pour l'air, l'eau, le sol et le sous-sol, ainsi que les objectifs de surveillance de ces milieux récepteurs et les mesures qui doivent être précisées par voie réglementaire. Sur cette base,

l'Algérie a établi des normes de potabilité pour l'eau de boisson définies par l'arrêté du 26 juillet 2000 (JO n°51/00) relatif aux spécifications des eaux de boisson préemballées et aux modalités de leur présentation émanant du ministère du commerce. Ces normes ont été adoptées par des différentes directions de l'hydraulique et qui concernent 41 paramètres de qualité classés en 4 catégories: les paramètres organoleptiques, les paramètres physico chimiques, les substances indésirables et les substances toxiques.

1.4. Paramètres physico-chimiques

1.4.1. Température de l'eau.

La température de l'eau varie en fonction de la température extérieure (l'air), de saison, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Le gradient de température géothermale est de 3°C par 1 kilomètre. Cela signifie que les eaux souterraines sont d'autant plus chaudes qu'elles sont profondes.

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz, donc sur la conductibilité. Elle est le facteur cinétique le plus important de toutes les réactions chimiques et biologiques dans les milieux aquatiques, c'est en premier lieu le cas pour l'oxygène dissous indispensable à la vie aquatique puisque sa teneur est fonction de la température. Une température supérieure à 15°C favorise le développement des microorganismes, intensifie la biodégradation et les mauvaises odeurs (Kaid Rassou 2008).

Les températures de l'eau de la nappe libre (Fig.80) sont fortement influencées par la profondeur de l'eau sous le sol. La valeur maximale est de l'ordre de 30.4 °C dans le point de mesure E₁, le niveau statique se trouve à 0.45 m de la surface de sol, alors que la valeur minimale est d'ordre de 19°C, mesurée dans le forage D₀₃. Seulement deux mesures dépassent la norme algérienne de l'eau potable (25°C).

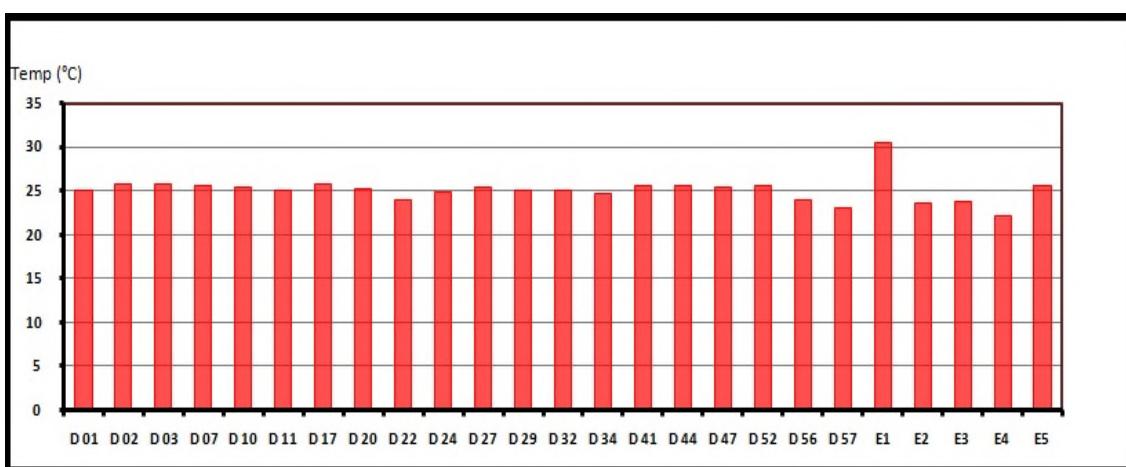


Figure 80: Histogramme de variation de la température des eaux de la nappe libre.

Tableau 15: Normes algériennes pour l'eau minérale naturelle et l'eau de source.

Arrêté du 26 juillet 2000 (JO n° 51/00).

Paramètres	Teneur	Unité
PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES		
Couleur	25	mg/1
Odeur	Doit être accessible	Taux de dilution
Turbidité	1 - 2	NTU
Saveur	Doit être accessible	Taux de dilution
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES		
Température	25	°C
pH	6.5 - 8.5	-
Conductivité électrique	2 800	µS.cm ⁻¹
Résidu sec (110 °C)	2 000	mg/1
Calcium	75 - 200	mg/1
Magnésium	150	mg/1
Sodium	200	mg/1
Potassium	20	mg/1
Chlorures	200 - 500	mg/1
Sulfates	200 - 400	mg/1
Carbonates - bicarbonates	-	-
SUBSTANCES INDESIRABLES		
Aluminium	0.2	mg/1
Nitrates	50	mg/1
Nitrites	0.1	mg/1
Ammonium	0.05 - 0.5	mg/1
Phosphates	0.5	mg/1
MO (permanganate)	3.5	mg/1
Bore	0.3	mg/1
Fer	0.3	mg/1
Cuivre	0.05 - 1.5	mg/1
Zinc	1 - 5	mg/1
Manganèse	0.5	mg/1
Baryum	0.7	mg/1
Phénols	-	-
Fluorures	0.8 - 2	mg/1
Argent	-	-
COT	-	-
Azote Kjeldahl	2	mg/1
SUBSTANCES TOXIQUES		
Arsenic	0.05	mg/1
Cadmium	0.01	mg/1
Cyanure	0.05	mg/1
Mercure	0.001	mg/1
Plomb	0.05	mg/1
Chrome	0.05	mg/1
Nickel	0.02	mg/1
Antimoine	0.005	mg/1
Sélénium	0.01	mg/1

1.4.2. Le potentiel d'hydrogène (pH).

Le pH ou le potentiel d'hydrogène est le logarithme décimal de l'inverse de sa concentration en ion d'hydrogène $[H_3O^+]$. Il détermine ainsi l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. La balance entre acide et base sur une échelle est de 0 à 14, alors que le pH de neutralité est 7. Il est inférieur ou supérieur à sept (07) suivant que l'eau est acide ou basique.

Pour les eaux de la nappe libre (Fig.81), le pH varie entre 6.68 et 8.83. Les points de mesure ne dépassent pas la norme algérienne de l'eau potable (6.5 à 8.5), sauf le point E₁ (pH=8.83).

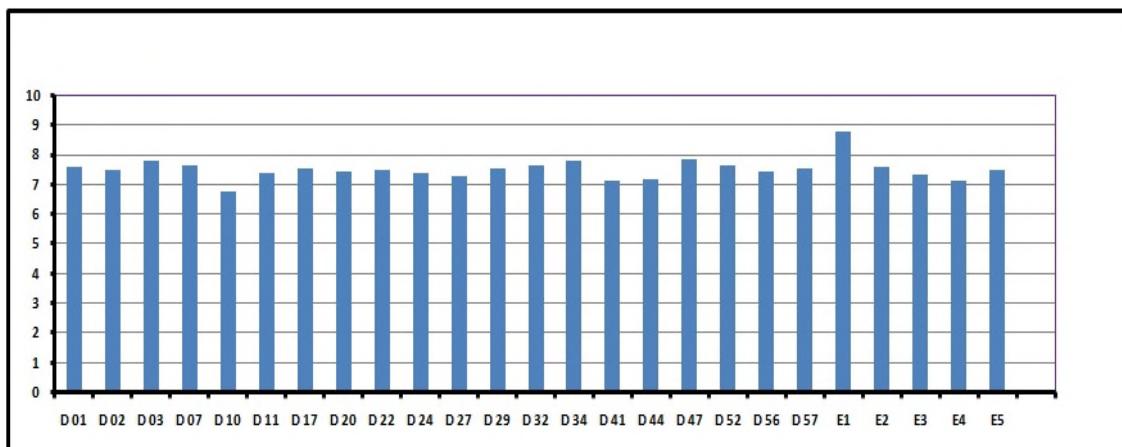


Figure 81: Histogramme de variation du pH des eaux de la nappe libre.

1.4.3. La conductivité électrique (CE).

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface, et séparé l'une de l'autre de 1 cm, exprimés en $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.

Les résultats doivent être présentés pour une conductivité équivalente à 25°C . La conductivité électrique exprime la salinité de l'eau, son élévation traduit une salinité élevée et inversement.

Les matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. Elle permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Elle est également plus importante lorsque la température de l'eau augmente (OMS, 1994). L'OMS recommande comme valeur limite $1000\text{ }\mu\text{S.Cm}^{-1}$.

Les eaux de la nappe libre (Fig.82) affichent des conductivités électriques très élevées dépassant la norme algérienne de l'eau potable ($2800\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$). La plage des conductivités rencontrées s'étale entre $3334\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$ et $47200\text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$.

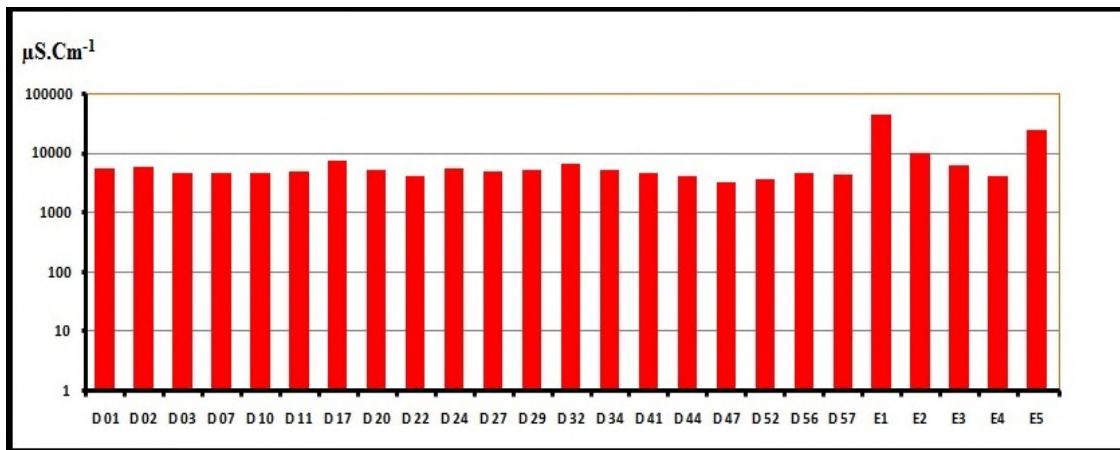


Figure 82: Histogramme de variation de la conductivité des eaux de la nappe libre.

1.4.4. Le résidu sec.

Le résidu sec correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau après évaporation à 110 °C. Elle donne une idée sur la minéralisation globale de l'eau.

Les eaux de la nappe libre (Fig.83) affichent des conductivités électriques très élevées dépassant la norme algérienne de l'eau potable (2000mg/l). La plage des conductivités rencontrées s'étale entre 3256 mg/l et 6024 mg/l.

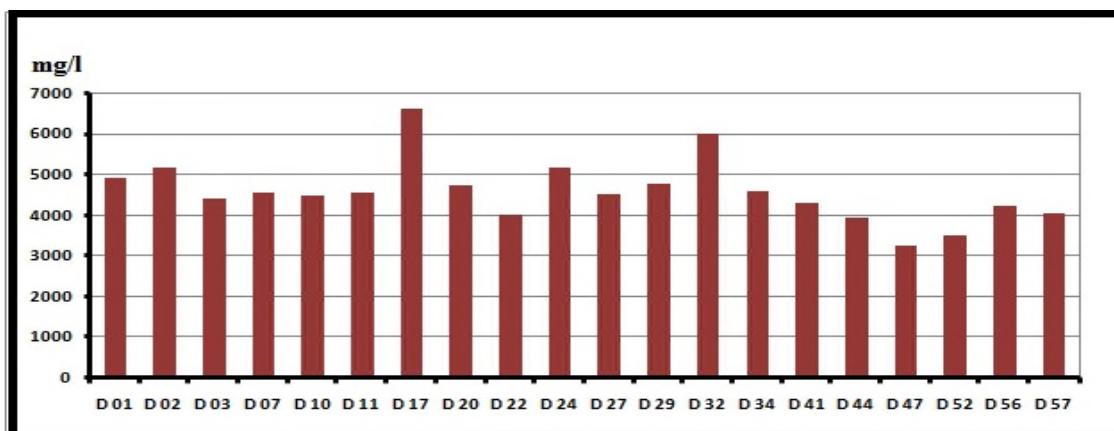


Figure 83: Histogramme de variation du résidu sec des eaux de la nappe libre.

1.4.5. La dureté.

La dureté ou titre hydrotimétrique (TH) correspond essentiellement à la présence de sels de calcium et de magnésium. Elle est directement liée à la nature des terrains traversés. Ils proviennent des roches calcaires ou dolomitiques. La présence du CO₂ favorise cette dissolution. On distingue :

- La dureté totale TH= [Ca²⁺] + [Mg²⁺]
- La dureté calcique TCa= [Ca²⁺]
- La dureté magnésienne TMg= [Mg²⁺]

Les valeurs de la dureté (TH) de la nappe libre (Fig.84) sont comprises entre 104.2 °F pour le puits D₄₇ et 1513.6 °F, pour le point E1, donc c'est une eau dure à très dure selon la classification de l'OMS (TH > 50°F), traduisant ainsi une forte minéralisation de nappe libre.

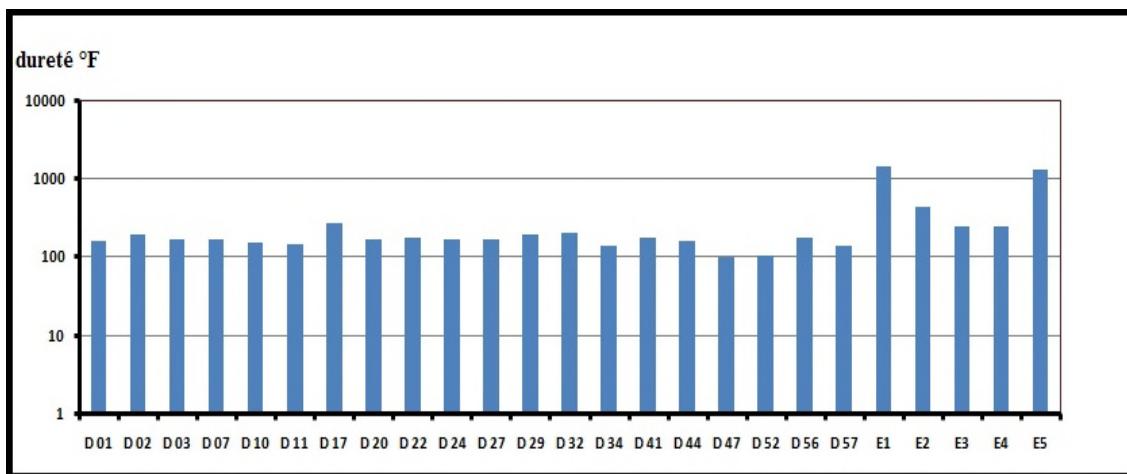


Figure 84: Histogramme de variation de la dureté des eaux de la nappe libre.

1.4.6. Le Calcium (Ca^{+2}).

Le calcium est un élément alcalino-terreux, il peut provenir des formations gypsifères ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la dissolution de calcaire (CaCO_3).

La teneur en calcium dans les eaux de la nappe libre (Fig.85) dépasse la norme algérienne de l'eau potable (200 mg/l), elle varie entre 200 mg/l et 3200.7 mg/l.

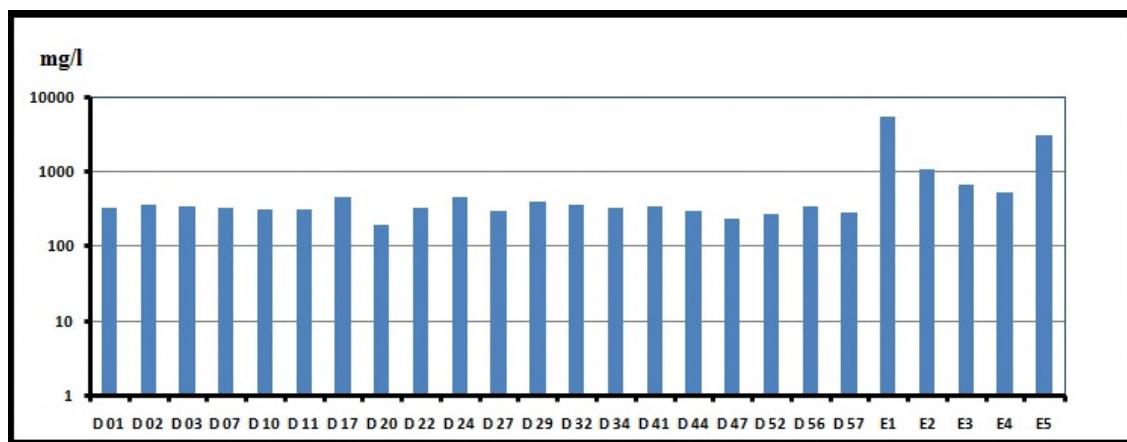


Figure 85: Histogramme de variation du calcium de la nappe libre.

1.4.7. Le Magnésium (Mg^{+2}).

Le magnésium est un métal alcalino-terreux, il provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des minéraux ferromagnésiens. C'est un élément qui a un rôle très important dans de nombreuses réactions enzymatiques intracellulaires. Il participe aussi à la transmission neuromusculaire de l'influx nerveux.

Les eaux de la nappe libre (Fig.86) renferment des concentrations élevées de Mg dépassant dans la majorité la norme algérienne de l'eau potable (150mg/l); la teneur maximale est de l'ordre de 1408 mg/l alors que la valeur minimale est de 81.9 mg/l.

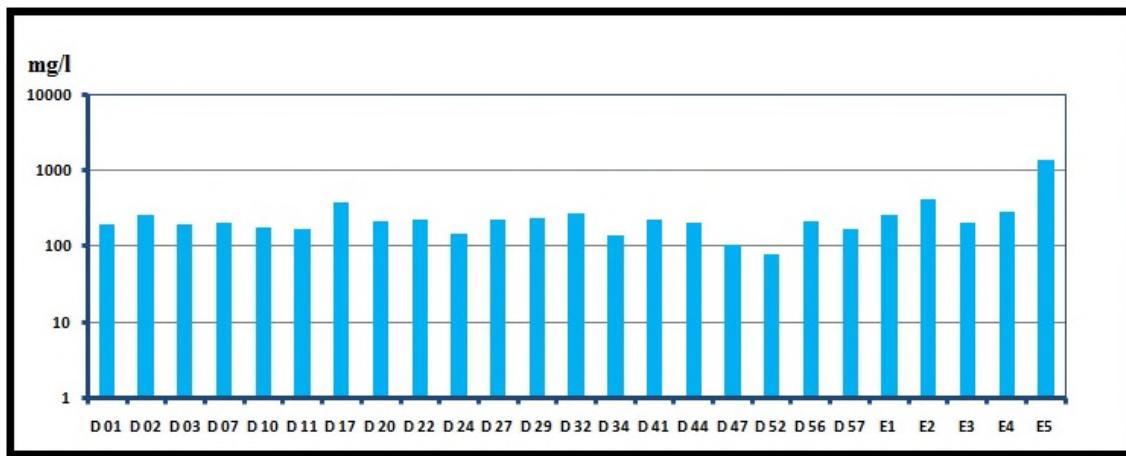


Figure 86: Histogramme de variation du magnésium de la nappe libre.

1.4.8. Le Sodium (Na^+).

Le sodium est le sixième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, il représente 2.83% sous toutes ses formes. Il provient essentiellement de la dissolution de l'Halite. Cet élément est nécessaire pour le fonctionnement des muscles et des nerfs, mais trop de sodium peut augmenter le risque d'hypertension artérielle. On note aussi que les eaux trop chargées en sodium deviennent saumâtres et prennent un goût désagréable (RODIER1984). Pour des considérations liées à des critères gustatifs, l'OMS recommande une valeur limite de 200 mg/l.

Les eaux de la nappe libre renferment des concentrations de sodium (Fig.87) très élevées dépassant la norme algérienne de l'eau potable (200mg/l) ; la teneur maximale est de l'ordre de 9562.5 mg/l mesurée au point E₁ alors que la valeur minimale est de 130 mg/l mesurée dans le puits D₄₇.

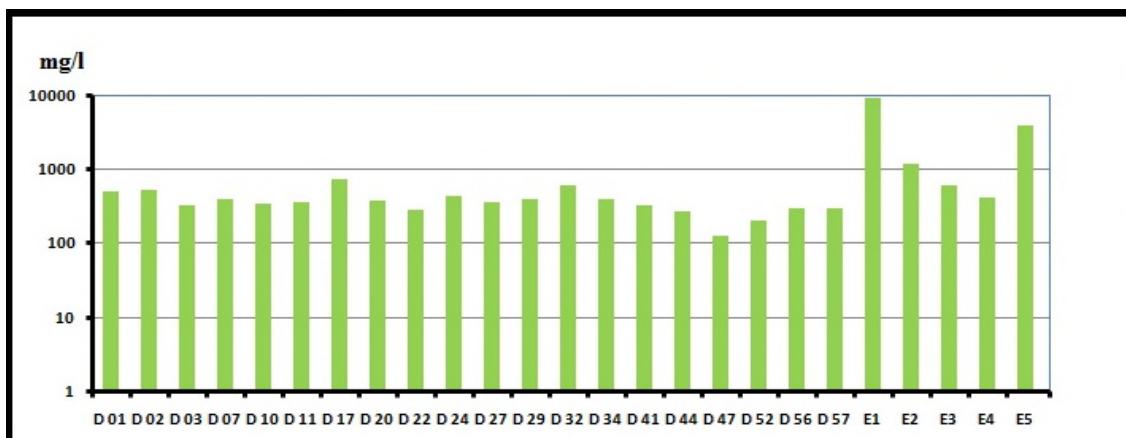


Figure 87: Histogramme de variation du sodium de la nappe libre.

1.4.9. Le Potassium (K^+)

Le potassium est un élément chimique, sa réaction avec l'eau est d'ailleurs bien plus forte que celle du sodium. Dans la zone d'étude on le retrouve dans les évaporites comme le Sylvite et les produits chimiques utilisés en agriculture (le sulfate de potassium).

A l'exception de puits D47, tous les puits (Fig.88) montrent des concentrations de potassium dépassant la norme algérienne de l'eau potable (20mg/l); la teneur maximale est de l'ordre de 1408 mg/l alors que la valeur minimale est de 81.9 mg/l.

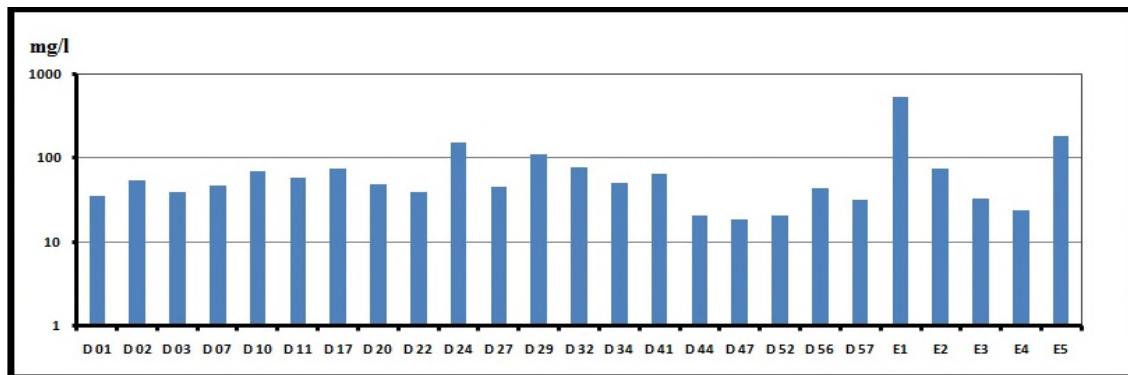


Figure 88: Histogramme de variation du potassium de la nappe libre.

1.4.10. Les Chlorures (Cl^-)

L'ion chlorure existe toujours dans les eaux naturelles à des concentrations très variable. C'est un traceur conservatif dans les environnements naturels, car il ne participe pas aux réactions d'oxydo-réduction et il ne forme pas de précipités insolubles. Son origine probable dans la zone d'étude est liée principalement à la dissolution des formations salifères (NaCl) et au lessivage des amendements agricoles riches en chlorures tels que les chlorures de potassium. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de la corrosion dans les canalisations et les réservoirs à partir de 50 mg/l.

La concentration de cet élément chimique (Fig.89) présente des teneurs variables et souvent très fortes qui varient entre 240mg/l dans le puits D₄₇ et 13650mg/l dans E₁. Excepté le puits D₄₇ tous les points de mesure dépassent la norme algérienne de l'eau potable qu'est 500 mg/l.

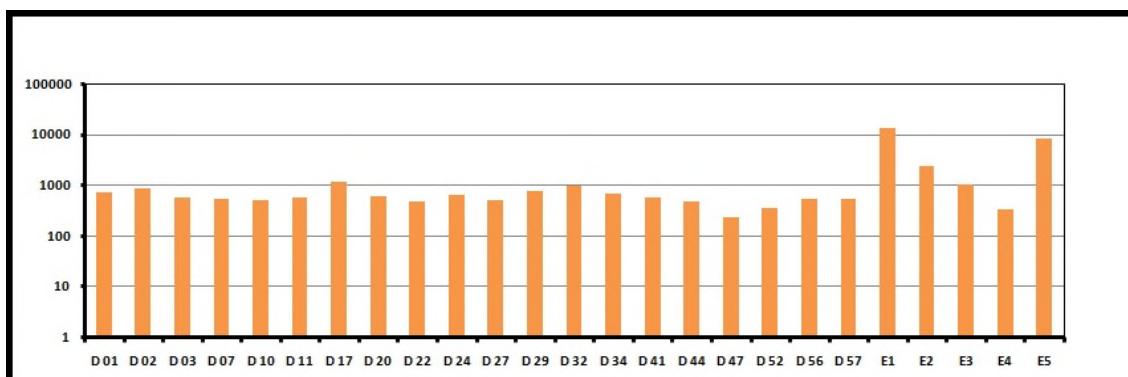


Figure 89: Histogramme de variation du chlorure de la nappe libre.

1.4.11. Les sulfates (SO_4^{2-}).

La concentration en sulfates des eaux naturelles des terrains à faibles teneurs en minéraux sulfatés est généralement inférieure à 50 mg/l (Rodier 1980). L'augmentation des sulfates peut provenir en grande partie de la dissolution des minéraux évaporitiques, de l'oxydation du soufre des roches sédimentaires et/ou de pollution urbaine, industrielle et agricole. Des concentrations importantes en sulfates peuvent être corrosives pour les tuyauteries en particulier celles en cuivre. Dans les endroits où on trouve des concentrations importantes en sulfates, il est commun d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion, comme des tuyaux en plastique.

L'histogramme de teneurs des sulfates (Fig.90), montre des valeurs très élevées variant de 15125 mg/l à 960 mg/l, ils peuvent être liés à la dissolution des évaporites montrée par l'étude géologique et hydrogéologique de la zone d'étude. Une deuxième origine serait attachée à l'activité anthropique liée à l'agriculture utilisant des produits chimiques à base de sulfates (le sulfate de potassium, le sulfate d'ammoniaque et le sulfo-phosphate d'ammoniaque).

Les valeurs de sulfate mesurées dans les eaux de la nappe libre dépassent largement la norme algérienne de l'eau potable qu'est 400 mg/l.

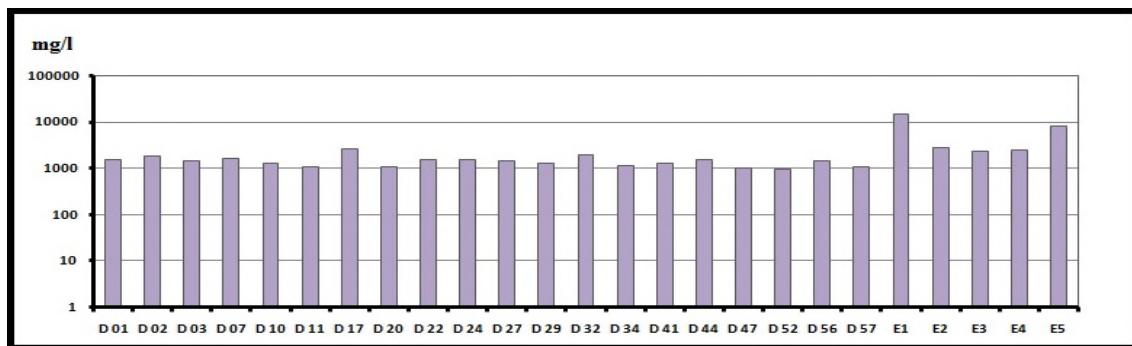


Figure 90: Histogramme de variations des sulfates dans la nappe libre.

1.4.12. Les bicarbonates (HCO_3^-) et de carbonate (CO_3^{2-}).

La présence de bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées telles que les calcaires et les dolomies. D'après l'étude géologique et hydrogéologique les carbonates sont présents dans l'aquifère libre sous plusieurs formes, ciment pour les grés, des minces couches de calcaire etc.

Les eaux de la nappe libre renferment les concentrations de bicarbonates qui varient largement (Fig.91) dans la zone d'étude. La teneur maximale est de l'ordre de 741.15 mg/l au point E₅, alors que la valeur minimale est d'ordre de 57.95 mg/l. Nous rappelons que la valeur guide de l'OMS pour l'eau de boisson est 300 mg/l. Le carbonate CO_3^{2-} est mesurable dans un seul point E₁ où le pH=8.83, la valeur mesurée est 75mg/l.

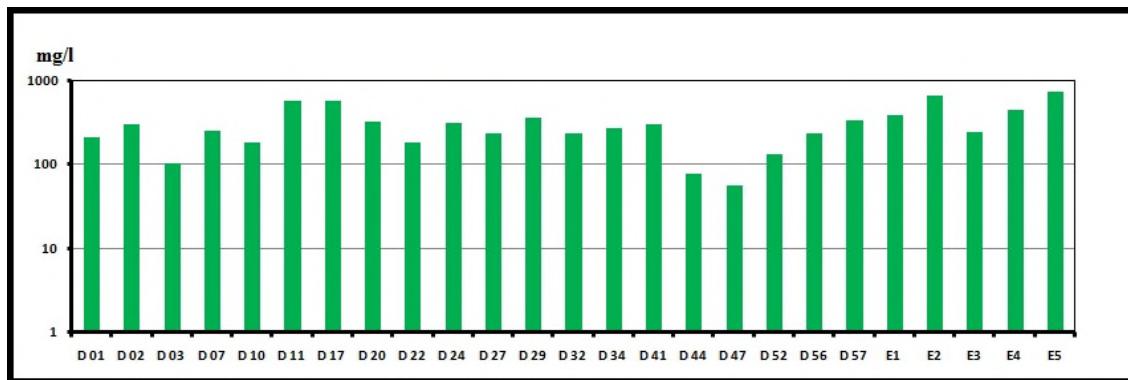


Figure 91: Histogramme de variations du bicarbonate dans la nappe libre.

1.5. Les substances indésirables

1.5.1. Les nitrates (NO_3^-).

Les nitrates sont les principales formes d'azote dans les eaux. Ils peuvent être utilisés comme indicateurs de pollution chimique des eaux. Plusieurs auteurs (Antonakos et Lambrakis, 2000) relient la présence des nitrates dans les eaux en plus du cycle normal de l'azote, à différentes sources à savoir : les engrains chimiques organiques et inorganiques, les pesticides et les herbicides, les installations d'élevages des animaux, les effluents domestiques et industriels (eaux usées). Dans la zone d'étude, les origines de nitrates sont les activités agricoles et les eaux usées domestiques (BG 2002).

Les mesures de nitrate disponibles sont de l'ordre de 82, 57 puits sont mesurés pour but de cartographier la répartition spatiale de nitrates dans la nappe et pour valider les cartes de vulnérabilité GOD et DRASTIC. Pour cette fois on n'utilise que les données de 25 échantillons analysés en 2012.

La plage de concentration rencontrée s'étale entre 0 mg/l (E₅) et 247 mg/l (D₂₇) (Fig.92). A l'exception de 4 puits, tous les autres puits mesurés présentent des concentrations en nitrates dépassant la norme algérienne de l'eau potable.

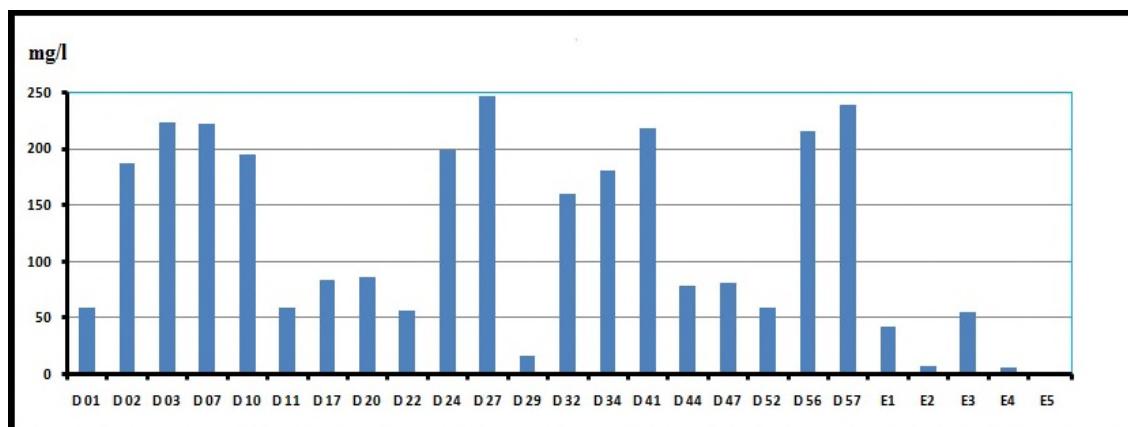


Figure 92 : Histogramme de variation des nitrates dans la nappe libre.

1.5.2. Le fluor (F⁻).

L'apport de fluor en faible quantité (2 à 2.5mg/jour) permet de prévenir ou de réduire la carie dentaire et le renforcement des os. Une trop forte ingestion de cet élément (>7.75 mg/jour) induit généralement le développement de pathologies telles que la fluorose dentaire ou osseuse. De très grandes quantités ayant pu même être mises en relation avec l'apparition de cancer (OMS, 2002). On ajoute à la consommation d'eau riche en fluor les apports alimentaires, comme le thé avec plus de 440 mg/l de fluor (Deshmukh et al 1999), ce dernier est très consommé dans la région du Souf.

L'OMS fixa en 1972 la valeur tolérée en fluor dans les eaux destinées à la consommation à 0.8 mg/l pour les pays chauds et 1.5 mg/l pour les pays à climat tempéré. Cette différence correspond au fait que de façon générale la consommation d'eau pour un individu donné augmente avec la température (Mazet P .2002).

La teneur en fluor dans les eaux de la nappe libre d'El Oued est supérieure à la norme de l'OMS (1.5mg/l) et à la norme algérienne de l'eau potable (2 mg/l), elle varie entre 2 et 6 mg/l, plus de 60% des forages montrent des teneurs en fluor comprises entre 3 et 4mg/l. la partie située à l'est de la vallée se distingue par une forte teneur de 4 à 6 mg/l. la faible teneur en fluor (2 mg/l), se localise à l'extrême nord de l'aire d'étude.

Plusieurs auteurs confirment l'excès de fluor dans les eaux de la nappe libre d'El Oued (Achour, S. 1990 ; Guendouz, A. 2006; Saibi, H. 2003 et Laouini, S E. 2009). A titre d'exemple les résultats publiés par Laouini, S E (2009) (Fig.93), montrent que les valeurs mesurées varient entre 2.21 mg/l et 3.61mg/l, elles dépassent la norme algérienne (2mg/l).

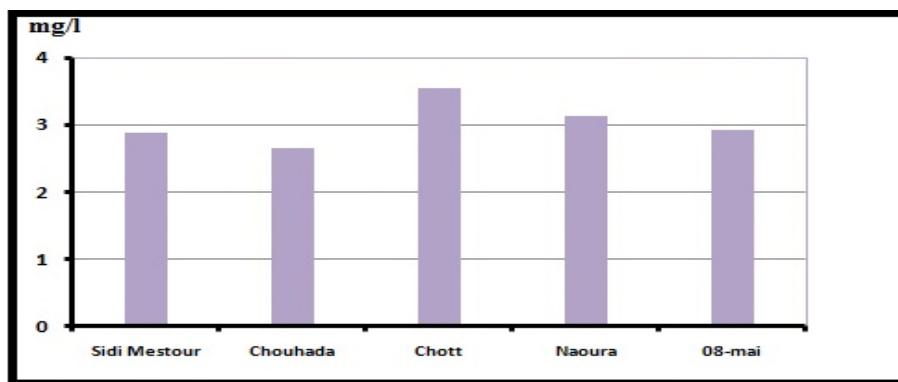


Figure 93: Histogramme de variations de fluor dans la nappe libre (Laouini, 2009).

1.5.3. Les métaux lourds.

Les métaux et les métalloïdes sont présents à l'état de traces dans la croûte terrestre. On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels dont la densité dépasse 5. La présence des métaux lourds dans les eaux naturelles, résulte des processus naturels (érosion et altération, émissions volcaniques, diffusion d'aérosols à partir des sols et de l'eau de mer) et

anthropique (industrielle, domestique ou agricole), elle est variable selon l'élément considéré et l'occupation des sols sur le bassin versant. (Rodier, 1996; Foufou,A. 2008 ; Khelfaoui, H. 2014).

Durant la campagne de mesure en mars 2015, nous avons analysé cinq (5) métaux lourds (Fe, Cu, Mn, Pb, et Zn). Les deux premiers éléments donnent des concentrations inférieures à la limite de détection de l'appareil utilisé (spectrophotomètre d'absorption atomique) qui est 20 μ g/l, par contre les autres éléments montrent des concentrations mesurables (Fig.92).

La teneur en manganèse dans les eaux de la nappe libre montre que les valeurs varient entre <20 μ g/l et 586 μ g/l. La figure 94 montre une grande variation de la teneur en manganèse. L'ensemble des teneurs dans les eaux de la nappe libre se trouvent inférieures à la limite fixée par OMS et la norme algérienne pour l'eau de consommation humaine qui est la valeur de 500 μ g/l, sauf pour les eaux de puits D₅₈.

La teneur en zinc dans les eaux de la nappe libre varie entre <20 μ g/l et 2778 μ g/l. La norme algérienne adopte comme valeur limite du zinc 5 mg/l de 3 mg/l et la norme de l'OMS est 3 mg/l, l'ensemble des teneurs en zinc sont inférieures à cette limite.

Les teneurs en plomb dans les eaux de la nappe libre varient entre 154 μ g/l et 309 μ g/l, elles sont très supérieures à la norme algérienne de l'eau potable (50 μ g/l).

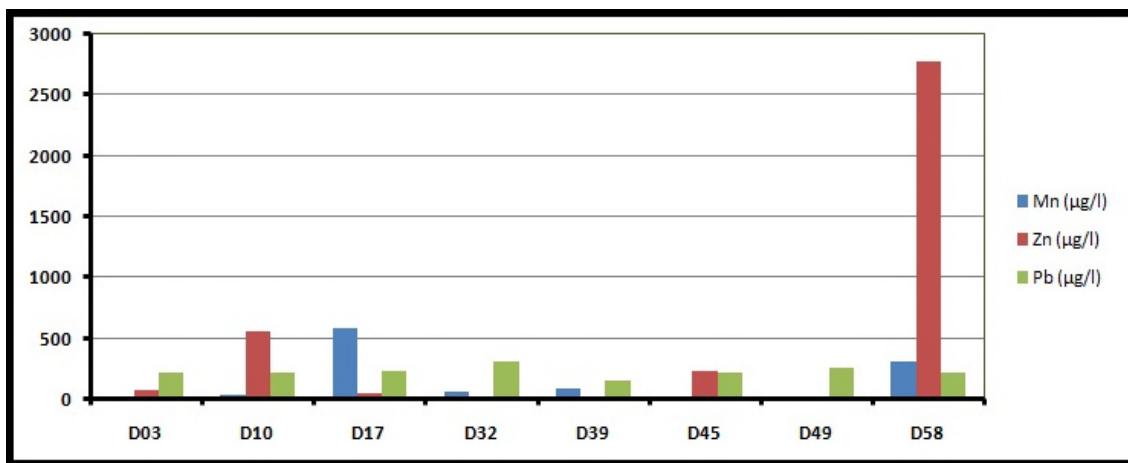


Figure 94: Histogramme de variation de Mn, Pb et Zn dans la nappe libre.

1.6. Qualité microbiologique de l'eau.

De nombreux microorganismes, virus, bactéries et protozoaires, voire des champignons et des algues sont présents dans l'eau, mais les conditions anaérobiques généralement rencontrées dans les eaux souterraines en limitent cependant la diversité. Les bactéries, les virus et les autres agents pathogènes rencontrés dans les eaux souterraines proviennent de fosses septiques, des décharges, des épandages d'eaux usées, de l'élevage, de matières fermentées, de cimetières, du rejet d'eaux superficielles. Ces pollutions peuvent être aussi dues à des fuites de canalisations et d'égouts ou à l'infiltration d'eaux superficielles.

La grande majorité de ces microorganismes nocifs, susceptibles d'engendrer des infections humaines redoutables, diffuse dans l'environnement hydrique par l'intermédiaire de souillures fécales humaines ou animales. Les pollutions microbiologiques se rencontrent surtout dans les aquifères à grande perméabilité (sable dunaire).

L'analyse microbiologique des eaux de la nappe libre d'El-Oued (Tab.16), revèle que la majorité des forages analysés, sont contaminés par les coliformes thermotolérants (*Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae*, *Salmonella*, *Yersinia enterocolitica*, etc.), les streptocoques fécaux (genres *Enterococcus* et *Streptococcus*) et les bactéries aérobies.

Suite à ces résultats et de point de vue microbiologiques les eaux des forages analysés sont inaptes à la consommation humaine à l'exception des forages D₄, G₁et G₂ se situent loin du centre ville.

Tableau16: les paramètres microbiologiques des eaux de la nappe libre (ADE, 2010).

Nom forage	Paramètres microbiologiques				
	GT 37°	CT	CD	SD	SR
D ₁	Abs (-)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Abs (-)
D ₂	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₃	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₄	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)
D ₅	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Abs (-)
D ₇	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Abs (-)
D ₉	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₁₄	Abs (-)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Abs (-)
D ₁₈	Abs (-)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₂₀	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₃₂	Abs (-)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₃₇	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Prés (+)
D ₃₈	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₃₉	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₅₁	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
D ₅₂	Abs (-)	Abs (-)	Prés (+)	Prés (+)	Abs (-)
D ₅₆	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)	Prés (+)
G ₁	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)
G ₂	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)	Abs (-)

1.7. Aptitude des eaux à l'irrigation.

Les sels minéraux contenus dans l'eau en quantités ont des effets néfastes sur le sol et les plantes. Ils peuvent perturber le développement des plantes, agissent sur le processus osmotique, en causant des réactions métaboliques, ils induisent également des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement de la plante (Person, 1978; Sedrati, 2011). Donc il est impératif dans ce cas d'étudier les paramètres définissant les eaux destinées à l'irrigation, tel que:

- la concentration totale du sel dissous dans l'eau.

- la concentration réelle de Na^+ par rapport aux autres cations.
- la concentration des éléments toxiques.
- dans certains cas la concentration de HCO_3^- par rapport au Ca^{+2} et Mg^{+2} .

1.7.1. Conductivité.

Les sels contenus dans les eaux d'irrigation, s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaissent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Pour éviter ce risque, on doit déterminer la valeur de la conductivité et la classer suivant les valeurs seuils suivantes :

- inférieure à $250 \mu\text{S.cm}^{-1}$ l'eau ne présente aucun risque.
- varie entre 250 et $750 \mu\text{S.cm}^{-1}$ l'eau ne peut être utilisée que s'il y a de drainage.
- supérieure à $2250 \mu\text{S.cm}^{-1}$ l'eau est considérée impropre à l'irrigation.

les eaux de la nappe libre dans les trois compagnes de mesures (Fig.95) affichent des conductivités supérieures à $2250 \mu\text{S.cm}^{-1}$, donc elles sont impropre à l'irrigation.

1.7.2. La méthode de Richards :

Le SAR : est un indice qui évalue le danger que présente l'existence d'une teneur donnée en

$$\text{Sodium; il est calculé par l'équation : } SAR = \frac{\text{Na}^+}{(\text{Mg}^{++} + \text{Ca}^{++})^{1/2}}$$

- SAR: Sodium Adsorption Ratio.
- Na^+ , Ca^{+2} , et Mg^{+2} représentent les concentrations en mg/l, les valeurs de SAR ont été calculées à partir des données des analyses chimiques.

La méthode de Richards (1954) est basée sur la combinaison des deux méthodes: du SAR et la conductivité électrique.

Les résultats de la classification de la qualité chimique des eaux de la nappe libre d'après le diagramme de Richards, montrent que ; 9 sur 20 puits de la compagnie de 2010, 6 sur 25 de compagnie de 2012 et 5 sur 8 puits de la compagnie de 2015 présentent une conductivité $\text{CE} > 5000 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (*extrêmement salés*) et/ou un $\text{SAR} > 30$ (*très fortement sodiques*). Cependant le reste de nos échantillons s'arrangent selon trois classes (Fig.95) :

- a. eaux médiocres (C_4S_1):** elles représentent les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés.
- b. eaux médiocres (C_4S_2):** les eaux faisant partie de cette classe sont fortement chargées en sels. Elles sont susceptibles de convenir à l'irrigation des plantes tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

c. **eaux mauvaises (C₄S₃)**: les eaux qui font partie de cette classe ne conviennent pas à l'irrigation, Leur utilisation pour l'irrigation doit être soumise certaines conditions: sols très perméables, bon lessivage, plantes très tolérantes au sel.

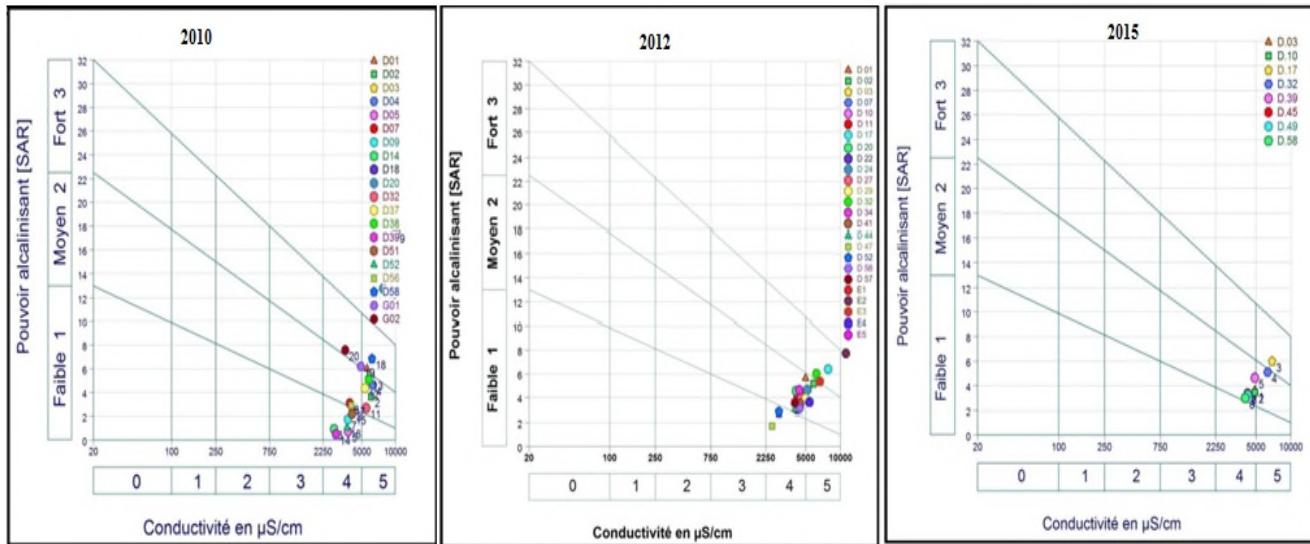


Figure 95: Le diagramme de Richards des eaux de la nappe libre de 2010, 2012 et 2015.

1.7.3. Classification de Wilcox.

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau qui est exprimée en pourcentage, est définie par la relation : $\%_{\text{Na}} = \frac{(Na + K)}{(Ca + Mg + Na + K)} * 100$

Cette classification définit cinq classes d'eau : excellente, bonne, admissible, médiocre, mauvaise (Derradji, 2004).

L'interprétation du diagramme de Wilcox (Fig.96) indique que les eaux de la nappe libre d'El Oued sont de mauvaise qualité, car elles se trouvent hors du diagramme de wilcox à cause de leurs conductivités qui dépassent 3500 µS.cm⁻¹.

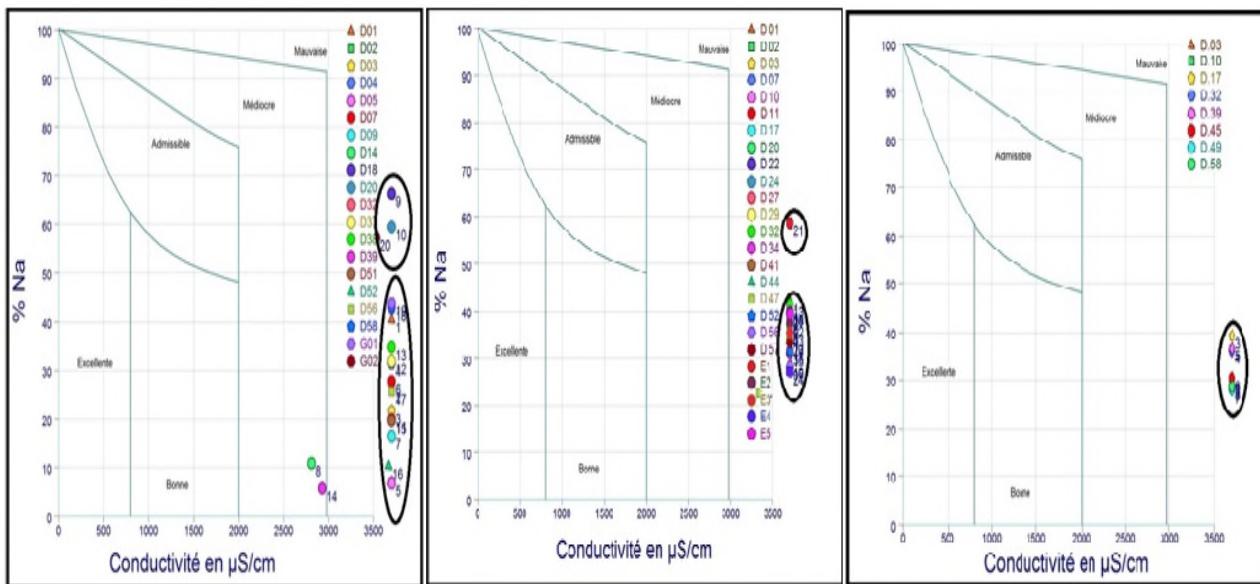


Figure 96: Le diagramme de Wilcox des eaux de la nappe libre d'El Oued (juin2010).

1.8. Qualité des eaux usées et sa possibilité d'utilisation en agriculture.

1.8.1. Gestion des eaux usées dans la zone d'étude.

Pour juguler la remontée de la nappe phréatique, en tout état de cause, et dans la perspective de remédier à ce phénomène, l'Etat a entrepris des mesures concrètes par un projet titanésque susceptible de réhabiliter l'équilibre écologique du Souf, avec un coût total de **31 milliards de dinars**. Le projet supervisé par l'Office national de l'assainissement (ONA) a été réceptionné, graduellement, dès la fin de l'été 2009 et totalement achevé et réceptionné en 2013. Quatre stations de pompage pour l'évacuation des eaux indésirables (eaux stagnantes et eaux usées) ont été installées grâce à un dispositif considérable de canalisations vers la dépression du Chott El-Haloufa. Entre autres, la rénovation des réseaux d'assainissement des eaux usées et des canalisations d'eau potable.

Le projet s'est déroulé en quatre phases, la première phase de projet consiste en l'assainissement actuellement dans 18 communes, dont 12 communes raccordées à un réseau d'assainissement de 750 km de long, jalonnés de 57 stations de relevage, les six autres communes bénéficiant d'un total de 542 puits individuels de traitement des eaux usées, dans la deuxième phase, le projet a comporté la réalisation de quatre stations de traitement des eaux usées (Fig.) des communes déjà raccordées au réseau d'assainissement collectif, implantées à Kouinine, Hassani Abdelkrim, Sidi Aoun et Reguiba. La troisième phase de l'opération a pris forme à travers l'évacuation horizontale et l'absorption de 22.000 m³/j des surplus d'eau en surface, nécessitant, sur un réseau de 34 km, le fonçage de 51 puits profonds avec une

capacité d'absorption de 348 l/s et en fin la quatrième phase assure le transfert des eaux d'assainissement sur 47 km vers l'exutoire de Chott El-Haloufa.

Le Schéma directeur d'assainissement des eaux usées et pluviales de la vallée de Souf (Fig. 97) fixe les orientations et les conditions de collecte, d'évacuation, de traitement et d'épuration des eaux usées afin de réduire l'impact de la remontée de la nappe sur les activités socio économiques, équilibrer le bilan d'eau au niveau de la ville, assurer une profondeur minimale de la nappe phréatique de 1m dans les quartiers inondés, stabiliser ou inverser le phénomène de remontée dans le reste de la ville, assécher les chotts pour éviter la contamination de la nappe phréatique et réduire les nuisances (odeurs, développement de moustiques et de rongeurs) causées aux riverains et sur le cadre de vie et améliorer les conditions sanitaires et environnementales de la zone(BG, 2004).

Le schéma directeur comporte trois composantes; la première est le réseau de collecte et de transfert à l'intérieur des agglomérations, des stations de relevage, d'un réseau de transfert vers les STEP et de la conduite de rejet des eaux traitées vers le nord de la zone, la seconde est un réseau de drainage pour évacué une quantité de 22 185 m³/jour.et la dernière est l'épuration des eaux usées (STEP).

Le lagunage aéré est retenu par BG comme solution technique d'épuration. Le lagunage est une technique adaptée aux conditions climatiques algériennes et pouvant atteindre un rendement épuratoire et une décontamination microbienne satisfaisants. Dans la zone d'étude il existe une station d'épuration (STEP1) au Kouinine qui collecte les eaux usées des agglomérations d'El Oued, Bayada, Kounine, Robbah, afin de les traités avant le rejet à chott El Haloufa. Pendant leur trajet, les eaux épurées peuvent être utilisées par les agriculteurs grâce à des dispositifs de picage d'eau.

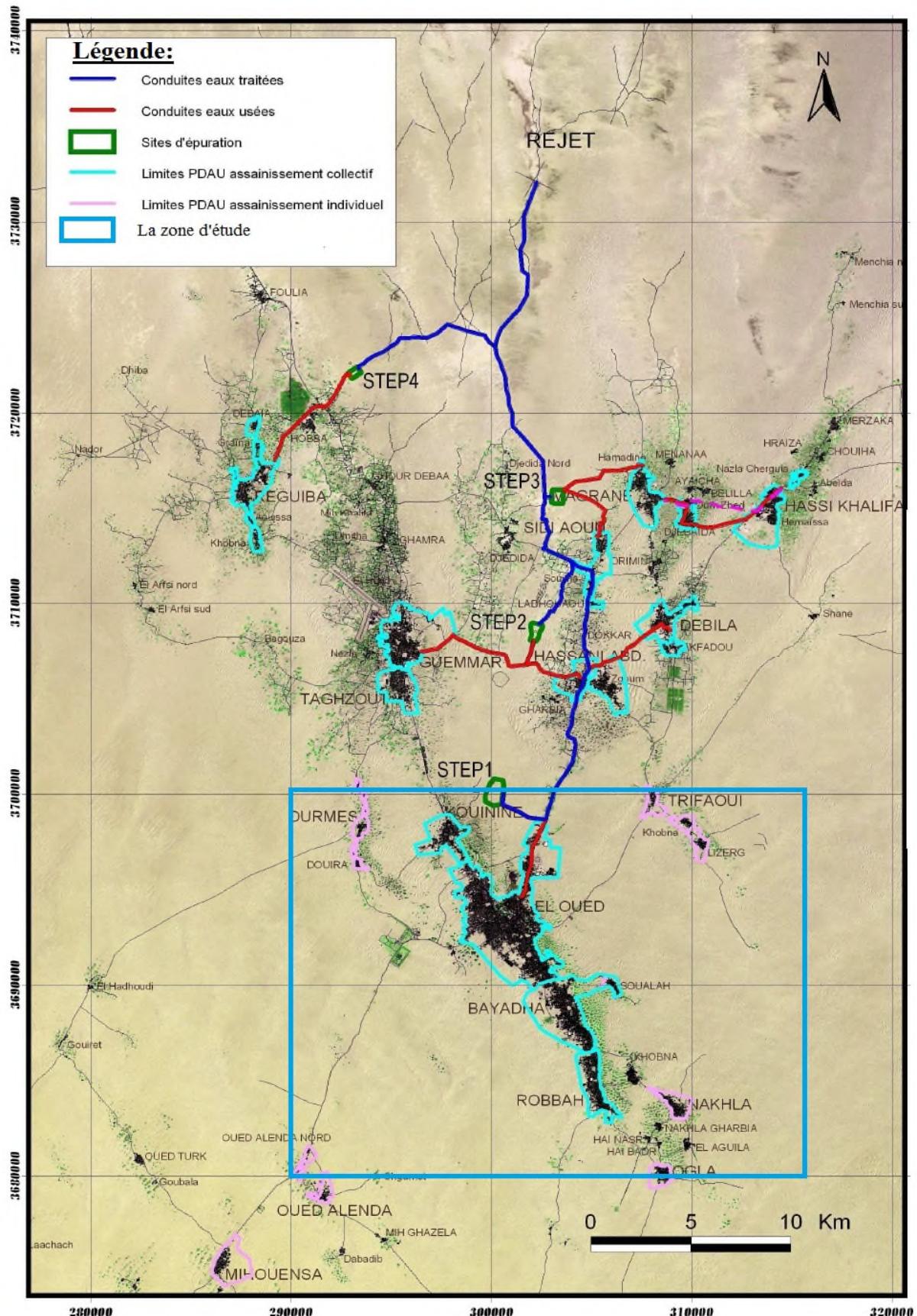


Figure 97 : Schéma directeur d'assainissement des eaux usées et pluviales de Souf

1.8.2. Présentation du lagunage aéré.

Le lagunage aéré est une technique d'épuration biologique par culture libre avec apport artificiel d'oxygène, elle est classée comme procédé extensif. Dans les étapes d'aération, les eaux usées sont dégradées par des microorganismes qui consomment et assimilent les nutriments. Le principe de base est le même que celui des boues activées avec une densité de bactérie faible et l'absence de recirculation d'oxygène est assurée par un aérateur de surface ou une insufflation d'air.

Dans la station de Kouinine (Annexe 12), les eaux usées à traiter arriveront à la station d'épuration par l'intermédiaire des conduites débouchent dans un regard de dégazage. Ce dernier assure une oxygénation naturelle des eaux brutes. Le prétraitement des eaux usées se fait par dégrillage et dessablage, en suite les eaux usées sont réparties vers les lagunes du premier étage.

Dans le premier étage du traitement les effluents sont répartis entre les quatre lagunes grâce à un répartiteur. Dans l'étage d'aération, l'oxygénation est assurée par un aérateur de surface. Cette aération mécanique favorise le développement des bactéries qui dégradent la matière organique et assimilent les nutriments.

Au deuxième étage, le nombre d'aérateurs et de bassins est inférieur au premier. Les eaux en cours de traitement transitent de façon gravitaire des lagunes aérées de 1er étage vers les lagunes aérées du deuxième étage.

Les eaux sortant des lagunes aérées du deuxième étage sont dirigées vers les deux lagunes de finition. C'est le lieu de séparation physique d'eau épurée et de la boue biologique. Cette dernière est formée après une lente agglomération des matières en suspensions

Un système consiste à sécher les boues décantées au fond des lagunes à l'air libre sur des lits de séchage.

1.8.3. Qualité des eaux usées épurées destinées à l'irrigation.

La réutilisation des eaux usées est non seulement fournir des quantités supplémentaires d'eau mais assurer la protection du milieu naturel. On peut dégager cinq classes de réutilisation des eaux épurées ; la production d'eau potable, la réutilisation industrielle, la réutilisation en zone urbaine (arrosage, lavage, réservoirs anti-incendies.etc.), la recharge des nappes et la réutilisation agricole.

Les caractéristiques de qualité chimique et physique sont identiques pour n'importe quelle eau d'irrigation. À cet égard, les directives générales présentées par le FAO et l'OMS peuvent être employées pour évaluer l'eau usée traitée, utilisée à des fins d'irrigation, en termes de constituants chimiques (Djeddi, 2007).

Nous avons effectué une série de mesure de 9 paramètres physico-chimiques des eaux usées à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration de Kouinine en février, mars et avril 2012, pour évaluer l'aptitude des eaux épurées à l'irrigation, les résultats de mesure sont représentés en histogramme dans la figure 98 .

1.8.3.1. Matières en suspension(MES).

Les matières en suspension, sont des matières insolubles, fines, minérales ou organiques, biodégradables ou non, leur principal effet est de troubler l'eau. Les valeurs de MES pour les eaux brutes, varient entre 275 mg/l et 239.1 mg/l, et pour les eaux traitées ils varient entre 34.2 mg/l et 39.98 mg/l. Cette dernière dépasse les normes de l'OMS appliquées en Algérie (30 mg/l) (*journal officiel de l'Algérie 1999*).

1.8.3.2. Demande biologique en oxygène (DBO₅).

La demande biologique en oxygène, mesure la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes après 5 jours, pour oxyder les matières organiques biodégradables. Les valeurs de DBO₅ pour les eaux brutes varient entre (230.9 et 275) mg/l et pour les eaux traitées varient entre (2 et 37.8) mg/l. la valeur moyenne mensuelle du mois d'avril dépasse les normes appliquées en Algérie (30 mg/l).

1.8.3.4. Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène, représente la quantité d'oxygène qui serait nécessaire pour oxyder les substances organiques dissoutes ou en suspension. Lorsque des matières organiques sont présentes dans l'eau, leur oxydation entraîne une chute de la quantité d'oxygène dissous, ce qui peut nuire en cas d'excès, à la survie de la faune et la flore.

Les valeurs de DCO pour les eaux brutes varient entre (484 et 609) mg/l et pour les eaux traitées varient entre (77 et 96) mg/l. les deux valeurs de février et mars passent au-dessous de les normes de l'OMS appliquées en Algérie (90 mg/l), mais la valeur moyenne d'avril dépasse les normes algériennes de l'eau usée traitée, utilisée à des fins d'irrigation.

1.8.3.5. L'oxygène dissous.

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'environnement aqueux puisqu'il est le facteur limitant de la principale voie de biodégradation anaérobie et la pollution organique. Sa concentration est très faible dans les eaux usées brutes (Thomas, 1995).

Les valeurs de l'oxygène dissous dans les eaux brutes varient entre 1.32 et 1.51 mg/l, pour les eaux épurées les valeurs varient entre 7.4 et 8.09 mg/l. ces valeurs dépassent les normes de rejet (5mg/l) établies par l'OMS (1999).

1.8.3.6. La conductivité électrique (CE).

La conductivité électrique des eaux brutes varie entre un minimum de 5050 µS /cm et un maximum de 5160 µS /cm, tandis que celle des eaux épurées varie entre un minimum de 5.32 mS/cm et maximum de 5.51 mS/cm. La conductivité des eaux usées épurées est très forte et dépasse les normes internationales des eaux d'irrigation de la FAO (<3000 µS /cm).

1.8.3.7. Le pH.

Les valeurs de pH mesurées soit pour les eaux brutes ou pour les eaux traitées sont comprises entre 8.06 et 8.46. Ces valeurs sont conformes aux normes des rejets algérienne (6.5<pH<8.5).

1.8.3.8. Les nitrates et les nitrites.

La concentration des nitrates dans les eaux brutes varie entre un minimum de 87 mg/l et un maximum de 120 mg/l, tandis que celle des eaux épurées varie entre un minimum de 40 mg/l et maximum de 65 mg/l. Ces valeurs sont supérieures aux normes internationales des eaux d'irrigation de la FAO (<30mg/l) (Ayes, 1985) et à la norme de l'OMS (50 mg/l) sauf pour le mois d'avril.

Les valeurs de nitrite mesurées soit pour les eaux brutes, soit pour les eaux traitées dépassent les normes internationales des eaux d'irrigation de la FAO et à la norme de l'OMS (<1 mg/l).

1.8.3.9. Les orthophosphates.

Les valeurs des orthophosphates mesurées soit pour les eaux brutes, soit pour les eaux traitées dépassent les normes internationales des eaux d'irrigation de la FAO (<0.94 mg/l) et à la norme de l'OMS (<2 mg/l).

Donc les eaux usées traitées dans la station d'épuration de Kouinine sont non convenables à l'irrigation des terres agricoles et les objectifs de traitement sont loin d'être réalisés surtout pour la conductivité.

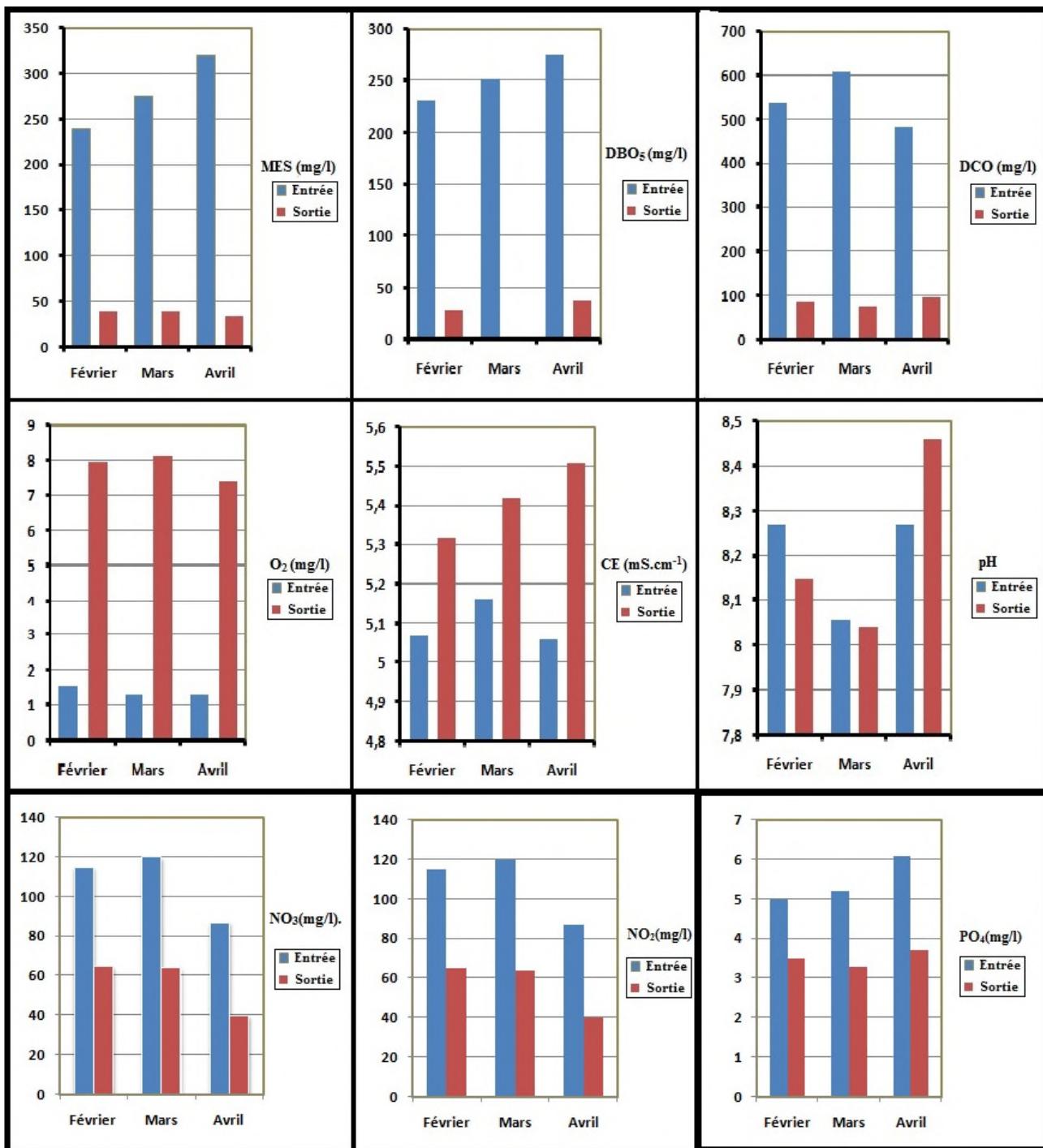


Figure 98 : Histogrammes de variation des paramètres physico-chimiques des eaux brutes et traitées dans la station de Kouinine (2012).

2. QUALITE DES EAUX DE COMPLEXE TERMINAL ET DE CONTINENTAL INTERCALAIRE.

Dans la région d'El-Oued (SE Algérie), la rareté des précipitations et l'augmentation de la demande sur l'eau, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et pour l'industrie, nécessite le recours des ressources en eau profondes, les prélevements des eaux à partir des aquifères captifs; de complexe terminal et de continentale intercalaire ne cessent pas à

augmenter chaque année (dans la région du SOUF: $70,34 \text{ Hm}^3$ en 1999 à $116,27 \text{ Hm}^3$ en 2013). Les eaux souterraines présentent l'unique ressource de l'eau existante de la région du Sahara septentrional, mais leur qualité reste toujours un sujet d'actualité nationale et un facteur conditionnant le développement démographique et économique des régions sud est de l'Algérie.

L'objectif de cette partie est d'évaluer la qualité physico-chimique de ces eaux aux normes de potabilité algérienne et de l'OMS, ainsi que la qualité des eaux des nappes profondes pour l'usage agricole. Les données hydrochimiques sont recueillies à partir de la société de distribution d'eau d'El Oued (ADE), en mai 2012.

2.1. Faciès chimiques des eaux de CT et de CI.

Les analyses chimiques effectuées sur les 14 forages captant le CT en 2012 montrent que ; 85% échantillons ont un faciès chimique sulfaté sodique et 15% échantillons présentent un faciès chimique chloruré sodique (Fig.99).

Les analyses chimiques effectuées sur les 3 forages captant le CI dans la zone d'étude en 2012 montrent que tous les forages présentent un faciès chimique sulfaté sodique (Fig.100).

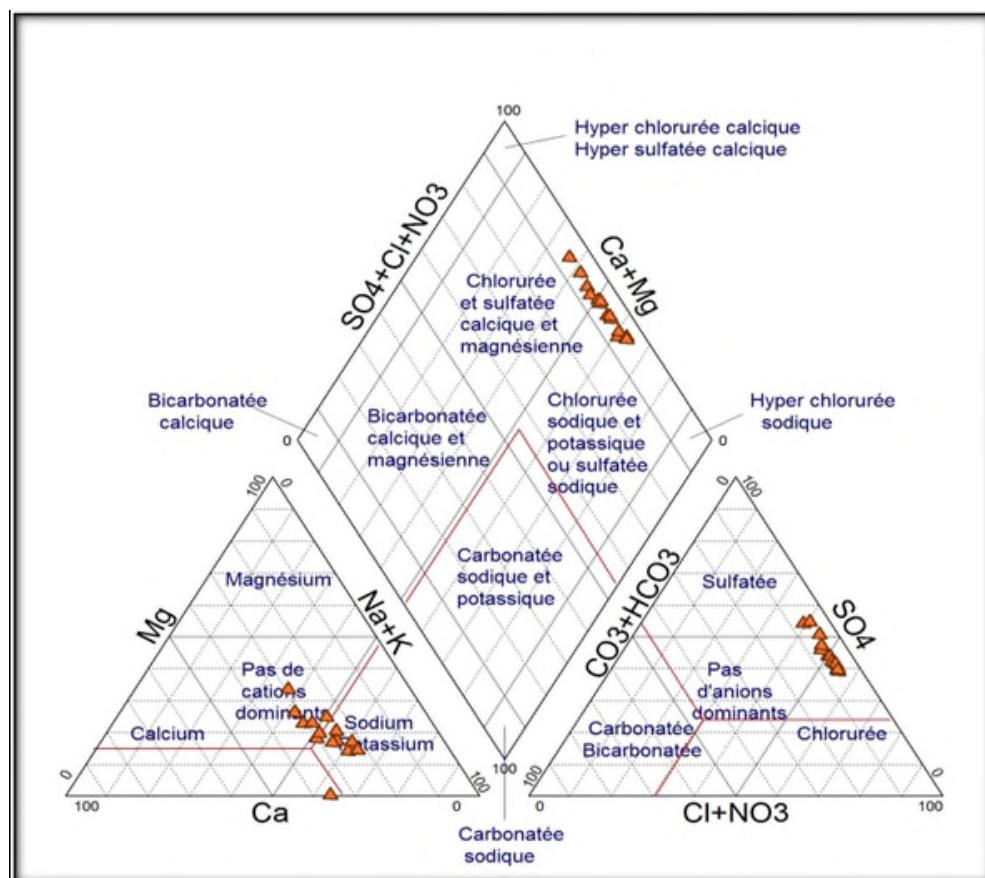


Figure 99: Le diagramme de Piper des eaux de la nappe CT(2012).

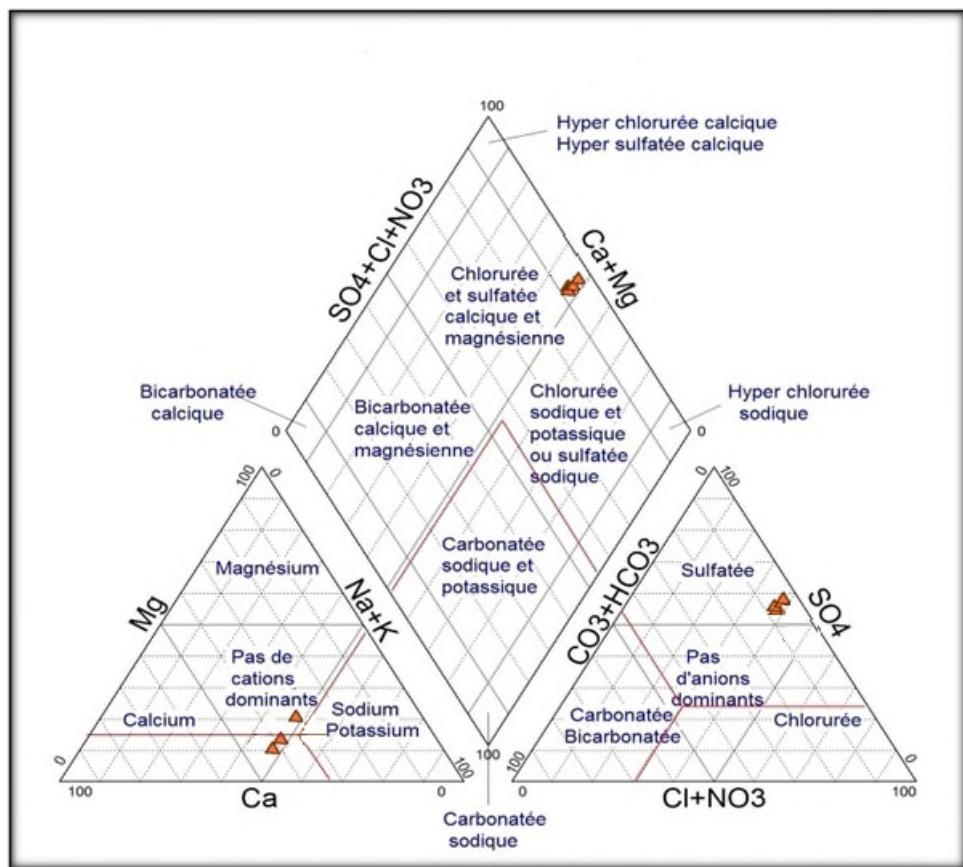


Figure 100: Le diagramme de Piper des eaux de la nappe CI(2012).

2.2. Étude de potabilité des eaux de CT et CI.

2.2.1 La Température.

La nappe du complexe terminale (CT) se trouve entre les profondeurs 120 m et 700m (nappe de calcaire qui se localise entre les profondeurs 250m et 700m, n'est pas exploitée à cause de la salinité élevée), Alors que le réservoir de la nappe continentale intercalaire (CI), se trouve entre la profondeur de 1580m et 1850m.

Les valeurs mesurées de la température des eaux de la nappe du complexe terminal(CT), varient entre 26.8°C et 32°C. Pour les eaux de la nappe du Continental Intercalaire (CI), les températures sont très élevées, elles sont en moyenne de 61.63°C, ce qu'il nécessite un refroidissement avant la distribution urbaine. Ces valeurs dépassant la norme algérienne d'eau potable qu'est 25°C et la norme de l'OMS (22°C à 25°C).

Tableau 17 : Variations des températures dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	T°C	
Moy	28.2	61.63
Min	26.8	61.1
Max	32	62

2.2.2. La Conductivité électrique.

Les valeurs mesurées de la conductivité dans les nappes du complexe terminal varient entre 2790 et 4480 $\mu\text{S.cm}^{-1}$, parmi les 14 forages, 13 forages dépassent la norme algérienne d'eau potable qu'est $2800 \mu\text{S.cm}^{-1}$. Pour les trois forages captant la nappe du continental intercalaire, nous avons un forage qu'est nettement supérieur à la norme avec une conductivité de $3150 \mu\text{S.cm}^{-1}$, et révèlent une minéralisation excessive.

Tableau18 : Variations de la CE dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	
Moy	3635	2810
Min	2790	2470
Max	4480	3150

2.2.3. Potentiel d'Hydrogène (pH).

Le pH des eaux du complexe terminal et du continental intercalaire est très peu variable compris entre 7.22 à 7.94, il est situé dans la norme algérienne d'eau potable (6.5 à 8.5).

Tableau19 : Variations du Ph dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	pH	
Moy	7.51	7.4
Min	7.45	7.2
Max	7.94	7.5

2.2.4. Calcium (Ca^{+2}).

La présence des ions Ca^{+2} dans les eaux des nappes est liée principalement à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) ainsi que les formations gypseuses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). L'étude géologique et hydrogéologique confirment cette hypothèse où on trouve de calcaire et de gypse dans le réservoir du complexe terminal (nappe de calcaire), et de calcaire dans le réservoir du continental intercalaire. Les eaux de l'aquifère du complexe terminal et du continental intercalaire (Tab. 20) présentent des teneurs en calcium supérieures à la norme de l'OMS (150 mg/l) et la norme algérienne d'eau potable qu'est 200 mg/l. On remarque que les eaux du complexe terminal sont plus riches par les ions de calcium par rapport les eaux du continental intercalaire.

Tableau 20 : Les teneurs de Calcium Ca^{2+} dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	$\text{Ca}^{2+}(\text{mg/l})$	
Moy	713.5	661.78
Min	455.1	496.34
Max	982.3	815.41

2.2.5. Magnésium (Mg^{+2}).

Le magnésium provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (dolomite). Les concentrations cet élément observées dans les eaux du continental intercalaire (Tab. 21), varient entre 41.31 mg/l et 68.05 mg/l, les eaux du complexe terminal sont en générale plus riches, avec des concentrations qui oscillent entre 38.88 mg/l et 136.1 mg/l. ces valeurs sont en majorité supérieures à la norme de l'OMS (50 mg/l) et acceptables en se référant à la norme algérienne d'eau potable (150mg/l).

Tableau 21: Les teneurs de Magnésium Mg^{+2} dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	$\text{Mg}^{+2}(\text{mg/l})$	
Moy	72.6	55.9
Min	38.88	41.31
Max	136.1	68.05

2.2.6. Le Sodium (Na^+).

Le sodium affiche des teneurs élevées et non homogènes dans les eaux du complexe terminal, avec des valeurs maximales de plus de 982 mg/l. Les eaux du continental intercalaire, présentant des teneurs moins élevées, mais elles sont toujours nettement supérieur à 200 mg/l (norme algérienne d'eau potable).

Tableau 22: Les teneurs de Sodium Na^+ dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	$\text{Na}^+(\text{mg/l})$	
Moy	629.2	344.5
Min	335.0	228.0
Max	923.6	461.1

2.2.7. Le Potassium (K^+).

Le Potassium provient essentiellement des évaporites comme la Sylvite (KCl), ou par suite d'altération des argiles potassiques dans les deux aquifères étudiés. Les teneurs en potassium mesurées dans les eaux des deux nappes (Tableau 5), sont généralement supérieures à la concentration maximale admissible par la norme algérienne d'eau potable (20 mg/l). La valeur maximale enregistrée dans les eaux du complexe terminal est 73 mg/l, et dans les eaux du continental intercalaire elle est 50 mg/l. Ces valeurs sont relativement élevées.

Tableau 23: Les teneurs de Potassium (K^+) dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	$K^+(mg/l)$	
Moy	41	36
Min	9	22
Max	73	50

2.2.8. Le Sulfate (SO_4^{2-})

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses. Pour l'eau destinée à la consommation humaine, en raison de problèmes particuliers susceptibles de s'introduire aux consommateurs (goût, corrosion), l'OMS recommande comme valeur limite 250 mg/l. Les concentrations des sulfates observées (Tab.24) sont très fortes. Les eaux du complexe terminal (CT), présentent des concentrations moyennes de (1495 mg/l), alors que les eaux du continental intercalaire (CI) présentent des concentrations moyennes de (930 mg/l). Ces concentrations sont très supérieures à la norme algérienne d'eau potable (400 mg/l).

Tableau 24 : Les teneurs de Sulfate SO_4^{2-} dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	$SO_4^{2-}(mg/l)$	
Moy	1495	930
Min	800	780
Max	2190	1080

2.2.9. Le Chlorure (Cl⁻).

La présence de chlorures est liée, essentiellement, à la dissolution de l'Halite. Une surcharge en chlorures dans l'eau peut être à l'origine d'une saveur désagréable, mais ils ne présentent pas de risque sur la santé, sauf pour les personnes qui suivent un régime hyposodé.

Cependant, les chlorures sont susceptibles d'amener une corrosion dans les canalisations et les réservoirs, en particulier les éléments en acier inoxydable pour lesquels le risque s'accroît à partir de 50 mg/l. La norme d'OMS recommande que la teneur en chlorures (Cl^-) des eaux ne dépasse pas 250mg/l.

Les teneurs de Chlorures dans les eaux soit dans la nappe du complexe terminal, soit dans la nappe du continental intercalaire, dépassent la norme algérienne d'eau potable (500 mg/l), sauf deux forages captant le CT et un forage captant le CI.

Tableau 25 : Les teneurs de Chlorure Cl^- dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	Cl^- (mg/l)	
Moy	713.5	661.78
Min	455.1	496.34
Max	982.3	815.41

2.2.10. Bicarbonates (HCO_3^-).

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomite.....etc.) par des eaux chargées en gaz carbonique. Les pH alcalins de l'eau inférieurs à 8.3, maintiennent l'eau dans le domaine de stabilité vis-à-vis des bicarbonates dans tout le système aquifère du CI et CT (Nezli.2008).

Les concentrations enregistrées dans les eaux du complexe terminal et du continental intercalaire révèlent des concentrations ne dépassant pas la valeur guide de l'OMS pour l'eau de boisson (300 mg/l). Nous signalons que la norme algérienne d'eau potable ne donne aucune limite pour les bicarbonates.

Tableau 26 : Les teneurs de bicarbonates HCO_3^- dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	HCO_3^- (mg/l)	
Moy	121.74	118
Min	40.2	114
Max	165.9	122

2.2.11. Le fluor (F^-) dans les eaux de CT et de CI.

Le fluor élément le plus électronégatif et par suite oxydant le plus puissant à la chimie. On considère qu'une faible teneur en fluor dans l'eau (0.4 à 1 mg/l) est favorable à la formation de l'email dentaire et protège les dents contre la carie, des doses supérieures à 1 mg/l risquent de faire apparaître des taches sur l'email dentaire (fluorose) qui s'aggravent par des décalcifications et des chutes des dents. (Bouziani 2000 ; Achour 2001 ; Bouchahm 2008).

Les concentrations du fluor enregistrées dans les eaux de la nappe du complexe terminal oscillent entre 1.24 et 3.79 mg/l, trois forages parmi les quatorze forages ne dépassant pas la norme algérienne d'eau potable qui est d'ordre de 2 mg/l. Les eaux de la nappe du continental intercalaire présentent une teneur en fluor acceptable, sauf un forage où la teneur en fluor se trouve sous la limite minimale de la norme algérienne d'eau potable (0.8 mg/l).

Tableau 27 : Les teneurs de fluor (F^-) dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	F^- (mg/l)	
Moy	2.51	0.68
Min	1.24	0.35
Max	3.79	1.02

2.2.12. Les nitrates dans les eaux de CT et de CI.

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, et c'est la forme la plus soluble de ce dernier. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) fixe la concentration maximale en nitrates dans l'eau potable à 50mg/l.

Les teneurs en nitrates observées (Tab.28), sont relativement moyennes à faibles dans les eaux de CT, et très faibles dans les eaux de CI. Elles sont inférieures à la norme algérienne d'eau potable (50 mg/l). Des concentrations de nitrate peuvent atteindre 48mg/l (forage de Chouhada) dans les eaux de complexe terminal indiquant une contamination par les eaux de la nappe phréatique, bien que le phénomène reste indéfini (drainance ou infiltration à travers les forages mal réalisés ou détériorés).

Tableau 28: Les teneurs de Nitrates (NO_3^-) dans les eaux de CT et de CI.

Nappe	CT	CI
Paramètre	NO_3^- (mg/l)	
Moy	12.51	1.77
Min	0.69	0.12
Max	48.7	5.17

2.3. L'aptitude des eaux de CT et de CI et l'irrigation.

L'utilisation des eaux pour l'irrigation requiert des qualités spécifiques. Pour aborder ce problème, on a utilisé la méthode de RICHARD (1954). Cette méthode combine la conductivité et le SAR. Ce dernier est défini par la formule : $SAR = \frac{Na^+}{(Mg^{+2} + Ca^{+2})}$.

Le Na^+ , Mg^{+2} et Ca^{+2} sont exprimés en mg/l et la conductivité électrique de l'eau par le $\mu S/cm$. La majorité des eaux du complexe terminal et du Continental Intercalaire, présentent des valeurs de SAR moyennes à fortes, ils sont d'une qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation. Ces eaux s'arrangent selon deux classes (Fig.101 et Fig.102) :

a. **eaux médiocres (C_4S_2)**: les eaux faisant partie de cette classe sont fortement chargées en sels. Elles sont susceptibles de convenir à l'irrigation des plantes tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

b. **eaux mauvaises (C_4S_3)**: les eaux qui font partie de cette classe ne conviennent pas à l'irrigation. Leur utilisation pour l'irrigation doit être soumise à certaines conditions: sols très perméables, bon lessivage, plantes très tolérantes au sel.

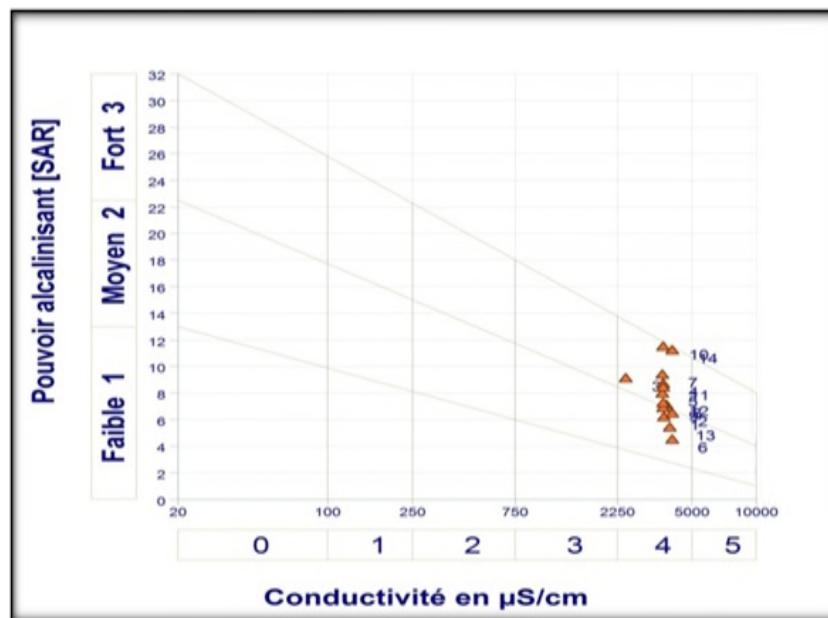


Figure 101: Le diagramme de Richards des eaux de la nappe CT.

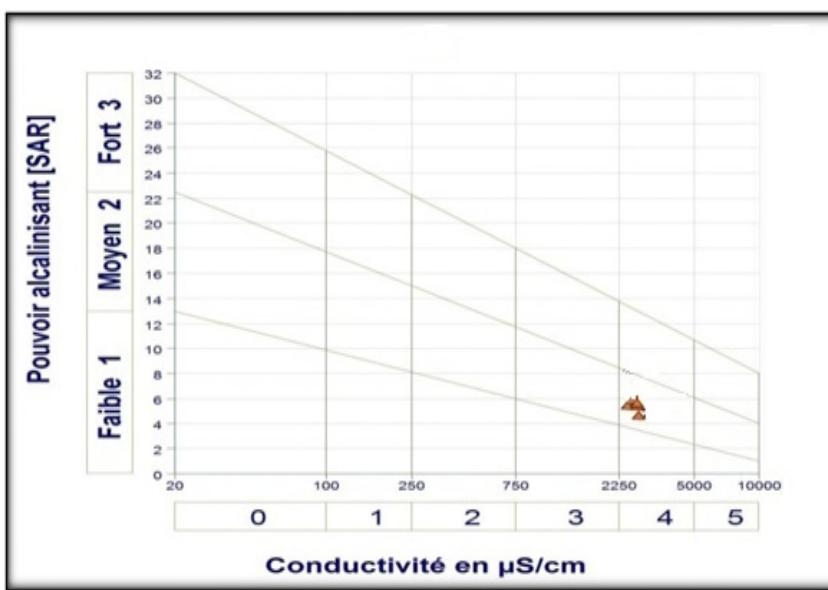


Figure 102: Le diagramme de Richards des eaux de la nappe CI.

3. ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX DE LA NAPPE LIBRE.

La concentration des ions dissous dans l'eau souterraine est généralement contrôlée par la lithologie (Schoeller, 1962), le taux d'écoulement des eaux souterraines, les réactions

géochimiques naturelles, les activités humaines et le mélange avec les eaux des nappes profondes (CT et CI).

3.1. Analyse en Composantes Principales (A.C.P).

Une étude statistique par l'analyse en composantes principales (A.C.P) a été effectuée sur un tableau de 12 variables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , T, pH, RS et CE) et de 25 observations de mai-juin 2012 (Tab.29). Le choix de la campagne de mai-juin 2012, est décidé parce que les 25 échantillons sont bien répartis dans la zone d'étude, à l'inverse des deux compagnies de 2010 et 2015 n'échantillonnant que la zone urbaine de la ville d'el oued.

Tableau 29: Corrélation facteurs–variables.

Variable	Fact.1	Fact.2
Ca^{2+}	0,326	-0,004
Mg^{2+}	0,162	0,524
Na^+	0,324	-0,086
K^+	0,309	-0,149
Cl^-	0,327	0,017
SO_4^{2-}	0,325	-0,015
HCO_3^-	0,143	0,538
NO_3^-	-0,124	-0,374
T	0,230	-0,378
pH	0,224	-0,315
RS	0,327	-0,024
CE	0,327	-0,046

Les données concernant la nappe libre d'El Oued. Cette analyse a été faite sur deux facteurs et 85.79% de la variance ont pu être exprimés. La projection des variables sur le plan I-II (Fig.103) montre trois pôles :

Le facteur I représente 71.23 % de la variance, il est déterminé par deux groupes. Le premier est formé par (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , RS, T, pH et CE) liés aux évaporites (NaCl , KCl , CaCl_2 , KCl , $\text{CaSO}_4\text{H}_2\text{O}$ et Na_2SO_4) (Ghebouli. M.S, 2010). Le seconde est formé par le Mg^{2+} et HCO_3^- , liés au mélange avec les eaux des nappes profondes (CT et CI où les réservoirs renferment de calcaire et de dolomie) ou au phénomène d'échange de base.

Le facteur II représente 14.56 % de la variance et il est déterminé par les nutriments (NO_3^-), c'est donc un facteur de la pollution azotée (Fehdi.C, 2009).

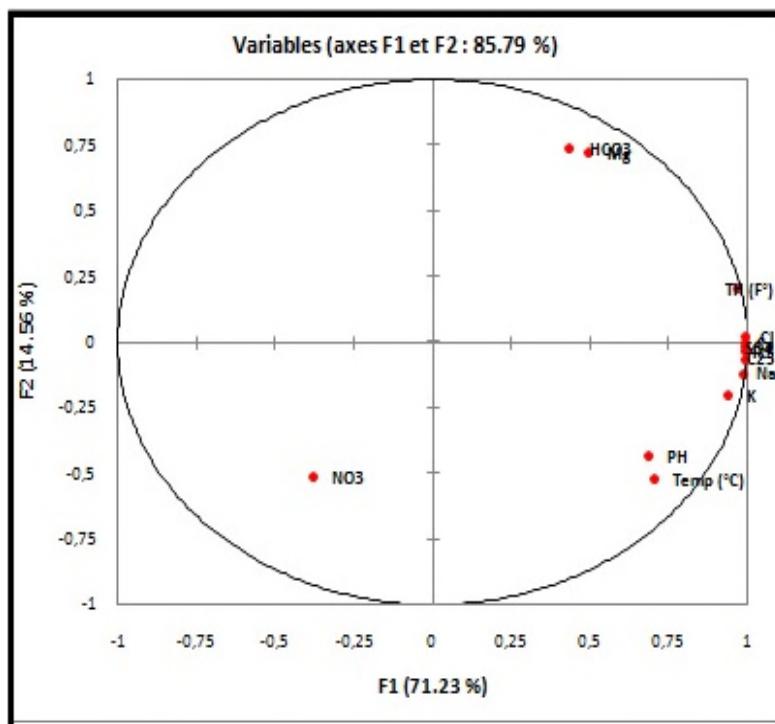


Figure 103. Projection des variables sur le plan factoriel 1-2.

3.2. La matrice de corrélation des éléments chimiques.

La matrice de corrélation des éléments chimiques (Tab.30) montre, une corrélation positive significative entre Ca^{2+} - SO_4^{2-} , Na^+ - Cl^- , K^+ - Cl^- , Ca^{2+} - Cl , K^+ - SO_4^{2-} et Na^+ - SO_4^{2-} , une autre corrélation positive moyennement significative a été observée entre Mg^{2+} - HCO_3^- . Ces liaisons témoignent de l'influence évaporitique sur le chimisme de l'eau de la nappe libre.

Tableau 30 : La matrice de corrélation des éléments chimiques.

Var	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	NO_3	T	PH	R.S	CE
Ca	1,00											
Mg	0,48	1,00										
Na	0,99	0,37	1,00									
K	0,93	0,26	0,96	1,00								
Cl	1,00	0,53	0,98	0,92	1,00							
SO_4	0,99	0,47	0,99	0,93	0,99	1,00						
HCO_3	0,40	0,65	0,34	0,32	0,42	0,39	1,00					
NO_3	-0,36	-0,36	-0,31	-0,22	-0,35	-0,36	-0,42	1,00				
T	0,66	0,05	0,73	0,75	0,68	0,67	-0,06	0,00	1,00			
PH	0,65	-0,01	0,70	0,67	0,65	0,65	0,04	-0,18	0,62	1,00		
R.S	1,00	0,45	0,99	0,94	0,99	0,99	0,40	-0,35	0,69	0,67	1,00	
CE	0,99	0,43	1,00	0,95	0,99	0,99	0,39	-0,33	0,71	0,68	1,00	1,00

3.3. Etude des rapports caractéristiques.

L'étude des rapports caractéristiques permet déterminer l'origine géologique des éléments chimiques à partir de la bonne corrélation qui existe entre eux.

3.3.1. Couple Na^+ - Cl^- .

Ces deux éléments chimiques sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution du sodium est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et peu influencé par l'intervention des bactéries. En plus son déplacement n'est pas retardé dans l'eau (Debieche, 2002). Le graphe (Fig.104) montre un alignement des points sur la droite de dissolution de l'halite, ce qu'il confirme que les eaux de la nappe résultent de la dissolution de l'halite. Cette relation confirme par l'existence du faciès chloruré sodique. Cependant quelques points présentent un excès de sodium, d'autres un excès des chlorures. Cela s'explique par l'existence d'une autre origine des ions de Na^+ et Cl^- (Maoui.2007).

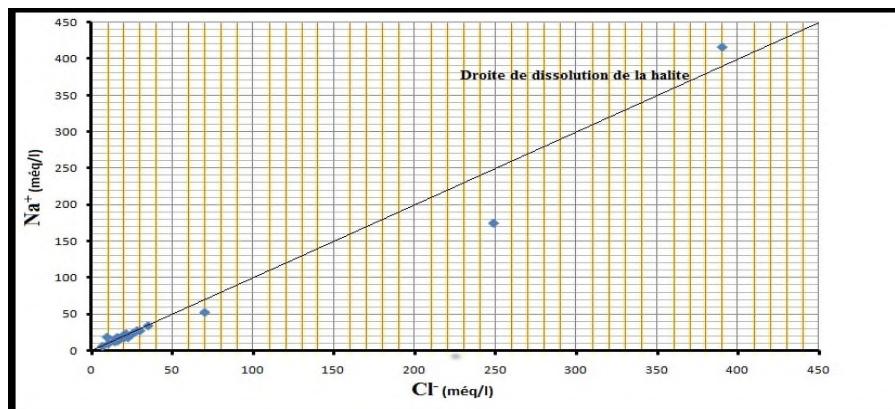


Figure 104: Relation Na^+ - Cl^-

3.3.2. Couple Ca^{+2} - SO_4^{2-} .

La variation de Ca^{+2} en fonction de SO_4^{2-} donne une bonne corrélation linéaire ($R^2 = 0,988$). L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des sulfates et du calcium (Fig. 105). Cette relation traduit la dissolution de gypse et anhydrite. Cependant quelques points présentent un excès de sulfate (provient d'une origine autre que le gypse et l'anhydrite). Cette relation est confirmée par l'existence du faciès sulfaté calcique.

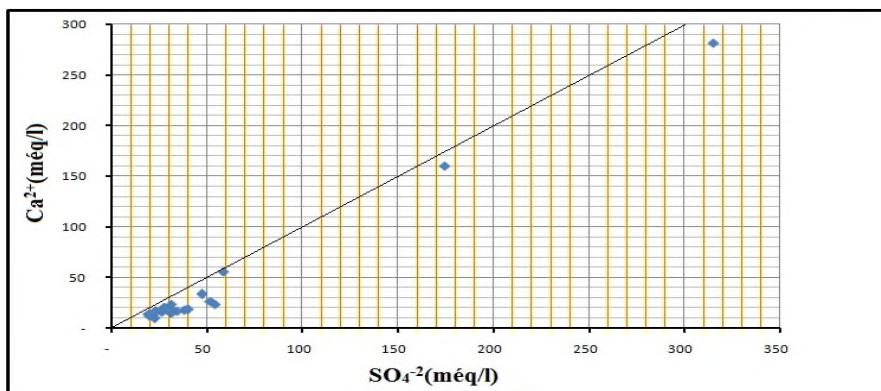


Figure 105: Relation Ca^{+2} - SO_4^{2-} .

3.3.3. Couple Na^+ - SO_4^{2-} .

L'examen de graphe (Fig.106) montre une évolution proportionnelle des sulfates et du sodium. Cette relation confirme également l'existence du faciès sulfaté sodique de 36% des eaux analysées de la nappe libre.

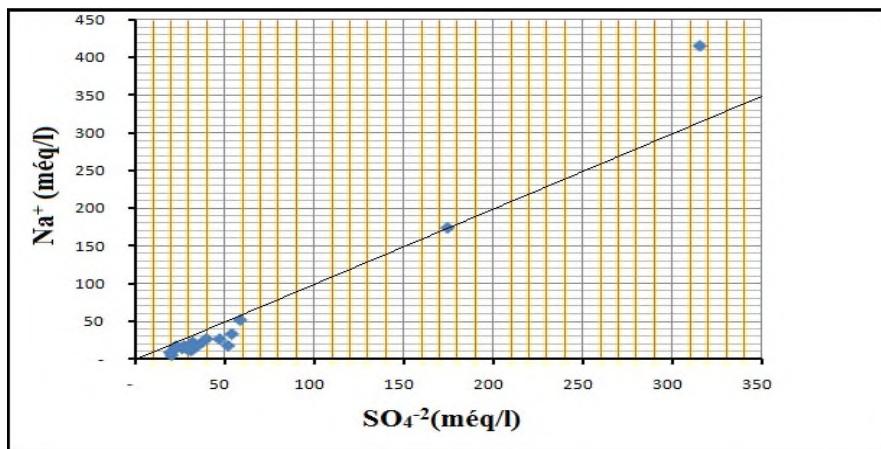


Figure 106: Relation Na^+ - SO_4^{2-} .

3.3.4. Couple Ca^{+2} - Cl^- .

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des chlorures et du calcium (Fig. 107). Cette relation confirme l'existence du faciès chloruré calcique. Notons que ce faciès ‘anormal’ est le résultat de mélange des eaux de l'aquifère libre avec les aquifères profonds (CT et CI).

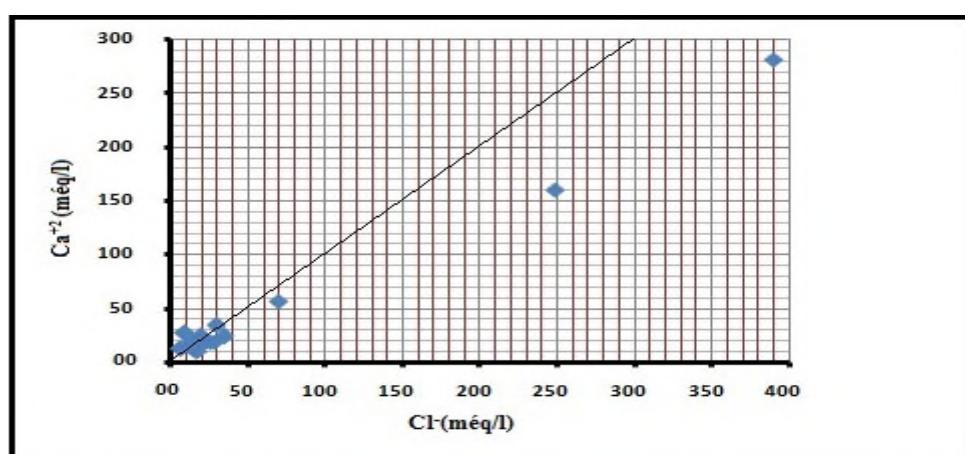


Figure 107: Relation Ca^{+2} - Cl^- .

3.3.5. Couple SO_4^{2-} - Cl^- .

Tenant compte de la dominance des faciès chloruré et sulfaté, il est important de vérifier la relation entre ces deux éléments. Le graphe (Fig.108) montre une dispersion des points indiquant une évolution proportionnelle des deux éléments ayant donc une origine salifère commune. De plus, le graphe montre que quelques points présentant un excès de sulfates et

d'autres un excès de chlorures (3points). Cela traduit la dominance du faciès de l'un sur l'autre.

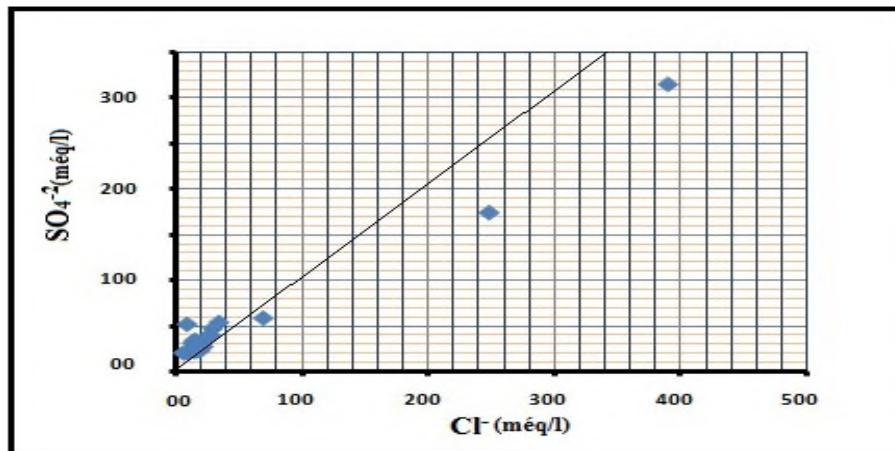


Figure 108: Relation SO_4^{2-} - Cl^- .

3.3.6. Couple Na^+ - Ca^{+2} .

L'examen de graphe (Fig.109) mis en évidence deux tendances :

- Evolution simultanée du sodium et calcium (dissolution des évaporites).
- Diminution du calcium alors que le sodium reste en évolution (échange de base entre sodium et calcium ou précipitation du gypse qu'est moins soluble que l'halite).

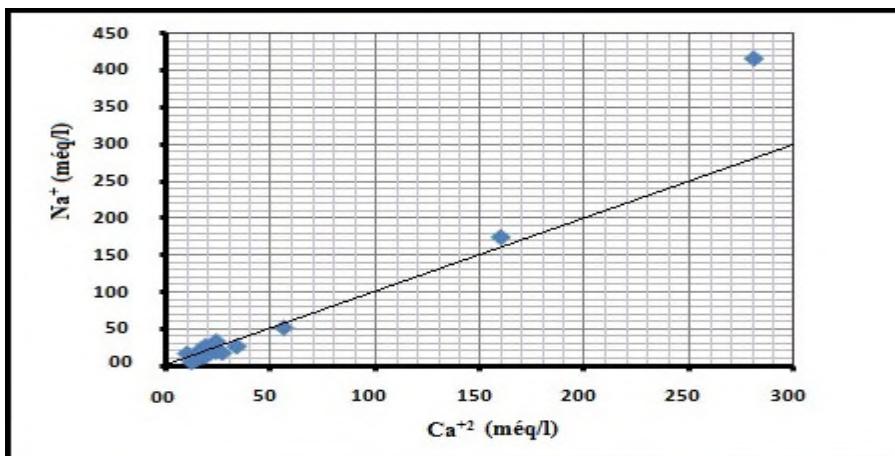


Figure 109: Relation Na^+ - Ca^{+2} .

3.3.7. Couple $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ - Conductivité.

Les ions de SO_4^{2-} et Cl^- sont issus de deux formations différentes, le premier provient du gypse et le second provient de la dissolution de l'halite. On a associé l'évolution de ces ions à la conductivité électrique pour mettre en évidence la façon selon laquelle ils évoluent et déterminer lequel entre eux est à l'origine de la salinité des eaux de la nappe.

L'interprétation du graphe (Fig.110) a révélé que la majorité des points d'eau présente un rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) supérieur à 1, indiquant une origine gypsifère, ce qui confirme la

dominance du faciès sulfaté calcique et sodique. Quelques points d'eau présentent des valeurs du rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) inférieures à 1, indiquant autres origines (halite).

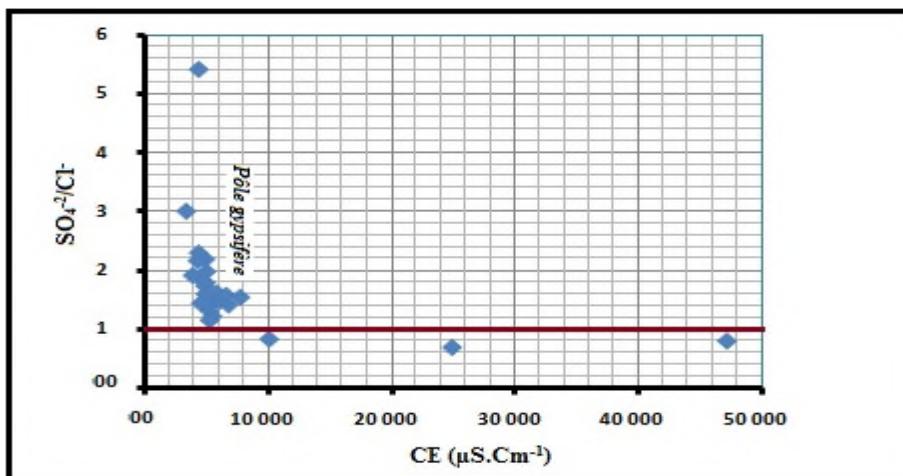


Figure 110: Relation $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ - Conductivité.

3.4. Etude de l'indice de saturation.

L'équilibre des eaux avec la matrice est souvent exprimé soit par le taux de saturation [$S = (\text{PAI}/K_s) * 100$], soit par l'indice de saturation [$Is = \log(K) - \log(PI)$] où PI est le produit d'activité des ions concernés et K le produit de solubilité du minéral considéré. L'indice de saturation est la forme la plus utilisée pour les eaux souterraines (Bouhlassa. S, 2008).

L'eau est en équilibre avec un minéral lorsque $Is = 0$, elle est sous-saturée lorsque $Is < 0$ et sursaturée lorsque $Is > 0$. Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, celui-ci aura tendance à se dissoudre.

Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, on a utilisé le programme WATEQ pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux (Fig.111). La campagne de mai-juin 2012 a fait l'objet de cette application. Les calculs ont montré que:

Les minéraux carbonatés présentent des degrés de saturation différents. En effet, celui de la calcite varie de - 0.09 à + 3.18, et celui de la dolomite varie de - 0.72 à - 4.91. À l'instar de ces résultats on peut dire que les deux minéraux ont atteint soit l'état de l'équilibre soit l'état de la sursaturation (Gouaidia. 2008).

Les minéraux évaporitiques montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés. Le gypse enregistre des indices qui varient de - 0.24 à +1.98 (où 24 % des points d'eau analysés n'ont pas atteint le degré de saturation), suivi de l'anhydrite dont l'indice varie de - 0.46 jusqu'à +1.76 (72% des puits sont sous-saturés) et enfin l'halite dont les indices varient de - 6.16 à - 2.73 (donc très sous saturés).

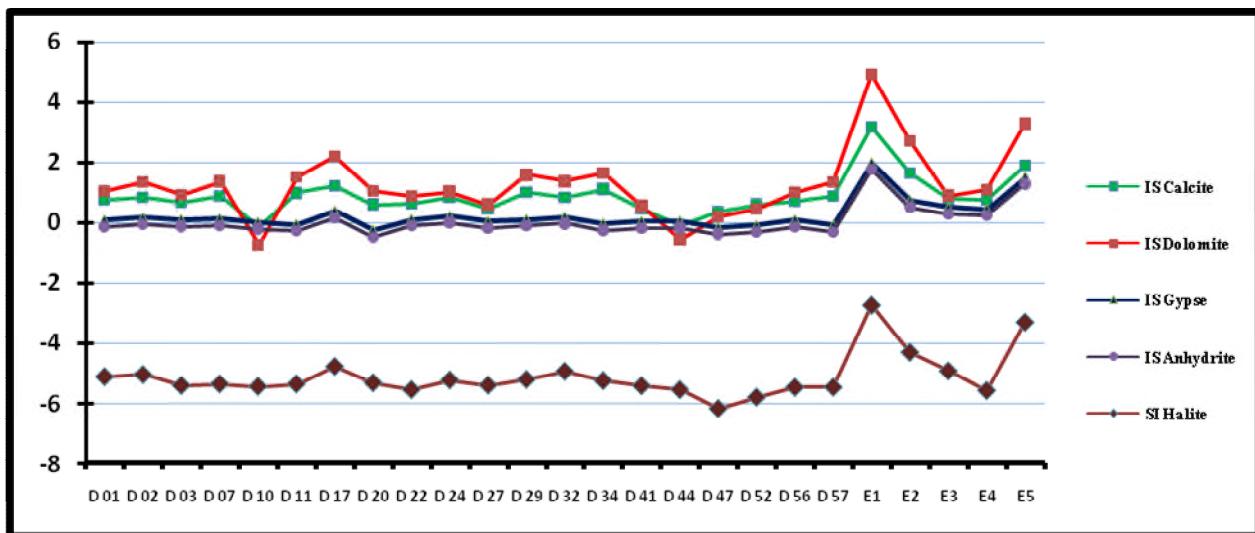


Figure 111: variation de l'indice de saturation des minéraux (mai-juin 2012).

3.5. Phénomène d'échange de base dans la nappe libre.

L'utilisation de l'indice d'échange de base (i.e.b.) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. Par définition, l'i.e.b est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante (Scholler, 1956): $i.e.b = [rCl - r(Na+K)] / rCl$

- Si l'i.e.b. est négatif les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. est positif alors les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. = 0 il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celles du terrain encaissant.

L'interprétation des données des i.e.b. (Tab. 31) calculés montre que 44% des points d'eau, ont des i.e.b. négatifs, les eaux échangent donc les ions (Ca^{2+} et Mg^{2+}) contre les ions Na^+ des argiles, contre 56% présentant des i.e.b. positifs, où les ions Na^+ des eaux sont échangés contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de la roche réservoir.

Tableau 31: indice d'échange de base dans la nappe libre (mai-juin 2012).

N° PUITS	D 01	D 02	D 03	D 07	D 10	D 11	D 17	D 20	D 22	D 24	D 27	D 29	D 32
i e b	- 0,11	0,03	0,06	- 0,19	- 0,11	- 0,09	- 0,02	- 0,05	0,01	- 0,23	- 0,15	0,09	- 0,03
N° PUITS	D 34	D 41	D 44	D 47	D 52	D 56	D 57	E1	E2	E3	E4	E5	
i e b	0,07	0,01	0,12	0,11	0,07	0,11	0,07	- 0,10	0,23	0,07	- 0,96	0,28	

4. CARTOGRAPHIE DE POLLUTION DE LA NAPPE LIBRE.

4.1. Conductivité électrique

4.1.1. Carte de conductivité électrique d'avril 2002.

La carte de Conductivité de la nappe en avril 2002 (BG, 2002) à été établie sur la base des données récoltées de 197 points de mesures du réseau de surveillance. La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage linéaire.

D'après la carte (Fig.112) nous observons que ; les valeurs augmentent du Sud vers le Nord, elles atteignent un maximum de $36000 \mu\text{S.Cm}^{-1}$ tout au Nord-Ouest, aux points les plus bas de la nappe. Une zone de forte conductivité correspond au rejet d'El-Oued (H90). Des valeurs de basses conductivités sont mesurées au Sud d'El-Oued ($4000 \mu\text{S.Cm}^{-1}$), dans la région d'Ogla, à Oued, El Alenda, Bayadha et au Nord-Est de Trifaoui.

La carte de conductivité permet de diviser la région d'El Oued Souf en trois grandes zones:

La zone 1: se trouve au Nord, avec une conductivité très élevée (supérieure à $12000 \mu\text{S.Cm}^{-1}$), à cause des sels entraînés du Sud vers le Nord par l'écoulement général de la nappe qui se charge de plus en plus en sels au cours de son déplacement, ainsi que la forte évaporation au niveau des chotts. Le recours aux nappes profondes est nécessaire pour l'irrigation afin d'obtenir une conductivité acceptable. C'est le cas des plantations de Foulia irriguées par des forages du complexe terminal.

La zone 2 : limitée par Foulia au Nord et El-Oued au Sud, avec une conductivité élevée (varie entre $4000 \mu\text{S.Cm}^{-1}$ et $12000 \mu\text{S.Cm}^{-1}$), dans cette zone on trouve : Le Chott d'El-Oued avec des conductivités de 24000 à $53000 \mu\text{S.Cm}^{-1}$, les ghouts ennoyés ou humides dans lesquels la conductivité augmente par évaporation comme les cas de Z'goum avec des conductivité de 9600 à $13500 \mu\text{S.Cm}^{-1}$, la zone de ghouts humides à l'Est de Guemmar avec des conductivités de 11600 à $15900 \mu\text{S.Cm}^{-1}$, à Est de Kouinine, dans les Ghouts inondés où la conductivité est de $17300 \mu\text{S.Cm}^{-1}$ et au Nord-Ouest et au Sud-est de Reguiba dans les plantations avec une conductivité de $9300 \mu\text{S.Cm}^{-1}$.

Par contre dans cette zone on trouve des endroits de faible conductivité, probablement à cause d'un apport de l'eau des forages destinés à l'AEP (Arfsi avec une conductivité de $3900 \mu\text{S.Cm}^{-1}$ et une localité entre Hassi Khalifa, Magrane et Debila avec des conductivités comprises entre 2040 et $5100 \mu\text{S.Cm}^{-1}$).

La zone 3: au Sud de la zone 2, c'est une zone de culture traditionnelle dans laquelle la conductivité est relativement faible, comprise généralement entre 1800 et $4500 \mu\text{S.Cm}^{-1}$, à l'exception de :

- La zone de Ghouts inondés entre El-Oued et Khobna avec des conductivités comprises entre 5000 et

8000 $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.

- La zone de Ghouts inondés au Sud-Ouest d'El-Oued avec une conductivité de 7100 $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.
- La zone de Ghouts humides à Oued Alenda avec une conductivité de 10500 $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.
- La zone de culture irriguée entre Mih Ouensa et Oued Alenda avec des conductivités comprises entre 6200 et 7200 $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.
- La zone de culture irriguée au Sud de Nakhla avec une conductivité de 7100 $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.
- La zone de culture irriguée au Nord de Oued Turk avec une conductivité de 5600 $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.
- La zone de culture irriguée autour d'Ourmes avec de conductivité varie entre 5600 et 6200 $\mu\text{S.Cm}^{-1}$.

La carte de conductivité d'avril 2002 met en évidence le problème de salinité de la nappe libre, causée par l'évaporation intense due à la faible profondeur de la nappe et la dissolution des formations évaporitiques.

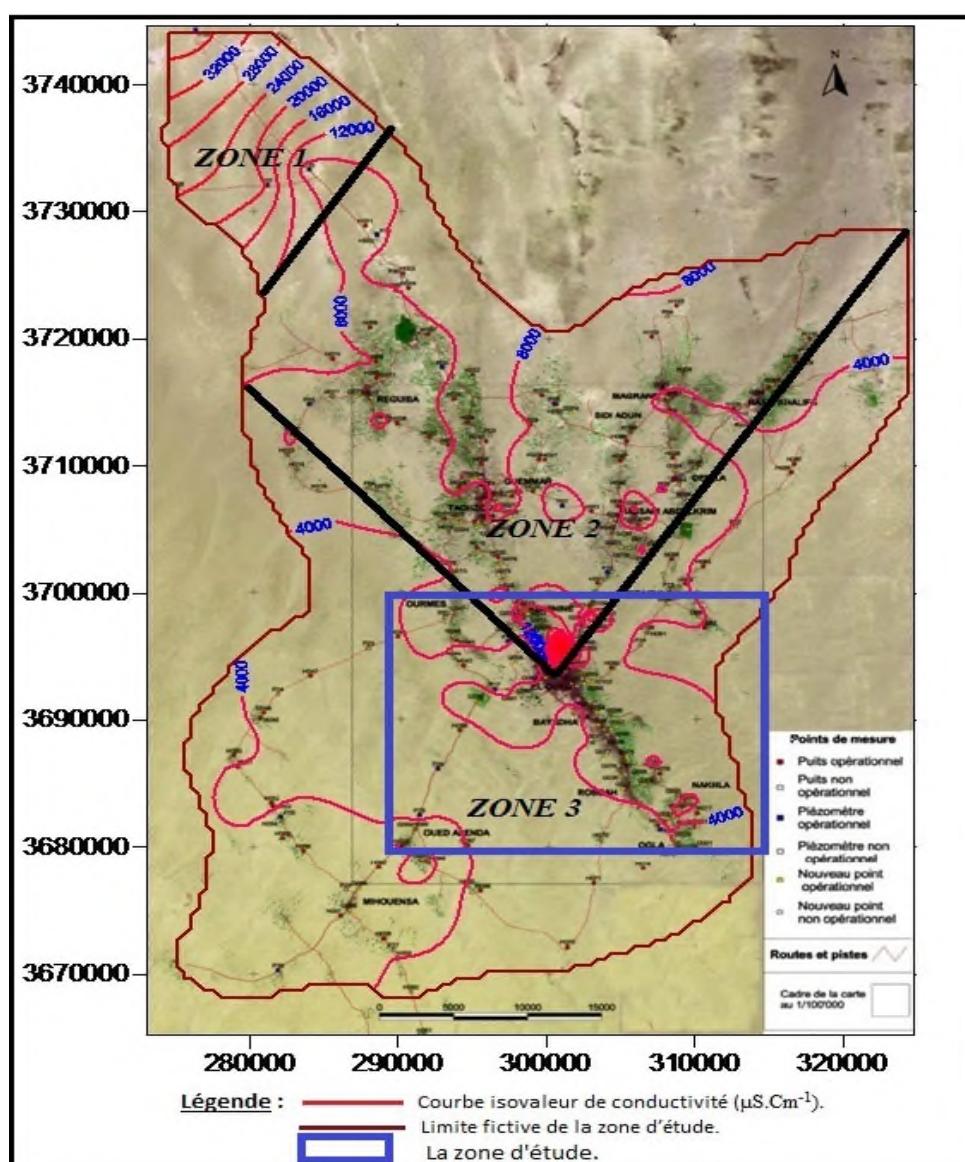


Figure 112: carte de conductivité électrique de la nappe libre (avril 2002) (BG, 2002).

4.1.2. Carte de conductivité électrique de juin 2010.

La conductivité des eaux de la nappe libre (Fig.113) oscille entre 2170 et 47150 µS/cm. Elle est supérieure à la norme recommandée par l'OMS (1000 µS/cm). La conductivité augmente avec le sens d'écoulement de la nappe, les valeurs les plus faibles se localisent dans les endroits isolés ou dans les zones agricoles irriguées à partir des forages profondes de CT (les puits mesurés près de la plantation de Mahri donnant des valeurs proches de 2200 µS/cm), à la suite de dilutions par les eaux de ces dernières (conductivité moyenne 2000 µS/cm). Les plus fortes valeurs se trouvent au Nord, dans les zones de dépression, au niveau de Chot et hôtel Louss à la suite de fortes évaporations des eaux qui se trouvent en faible profondeur et dans la zone de rejet de la ville d'El-Oued à la suite de déversement des eaux usées (47150 µS/cm),

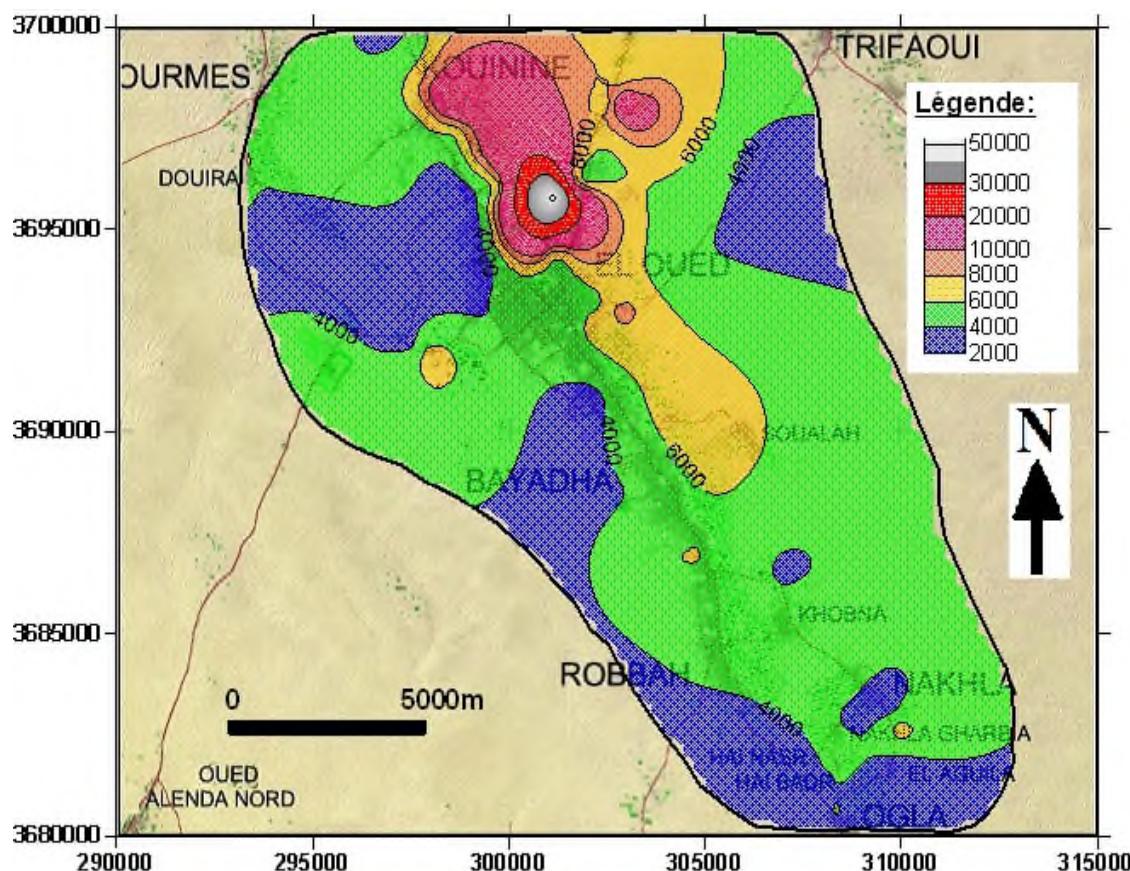


Figure 113: Carte de conductivité µS/cm de juin 2010.

4.1.3. Carte de conductivité électrique de mai-juin 2012.

La conductivité des eaux de la nappe libre (Fig.114) oscille entre 1930 et 47200 µS/cm. Les points de mesure se concentrent dans la ville d'El Oued et son entourage, on constate qu'en comparaison avec la carte de conductivité de juin 2010, on remarque :

Une diminution de conductivité au centre de la carte (la ville d'El Oued) cela est due au réseau de drainage vertical qui a évacué les eaux stagnantes au profit des eaux infiltrées récemment de réseau de distribution de l'eau potable, de réseau d'assainissement, et les eaux

d'irrigation et arrosage. Qui ont comme origines les nappes profondes et présentent une conductivité moins élevée.

Une diminution de conductivité dans la zone nord est due au baissement de niveau piézométrique ce qui limite le phénomène de l'évaporation de l'eau, l'apport des eaux moins conductrices du centre urbain d'El Oued et le développement des surfaces cultivées irriguées par des forages dans le complexe terminal.

La zone de rejet qui se trouve au nord de la ville d'El Oued, figure sur la carte comme un point noir avec une conductivité de 47200 µS/cm.

Augmentation de la conductivité au nord de Bayadha à la suite du développement des surfaces cultivées irriguées par des puits dans la nappe libre.

Dans la partie sud de la carte on ne dispose pas de nombre suffisant de points pour déceler les variations de conductivité entre 2010 et 2012.

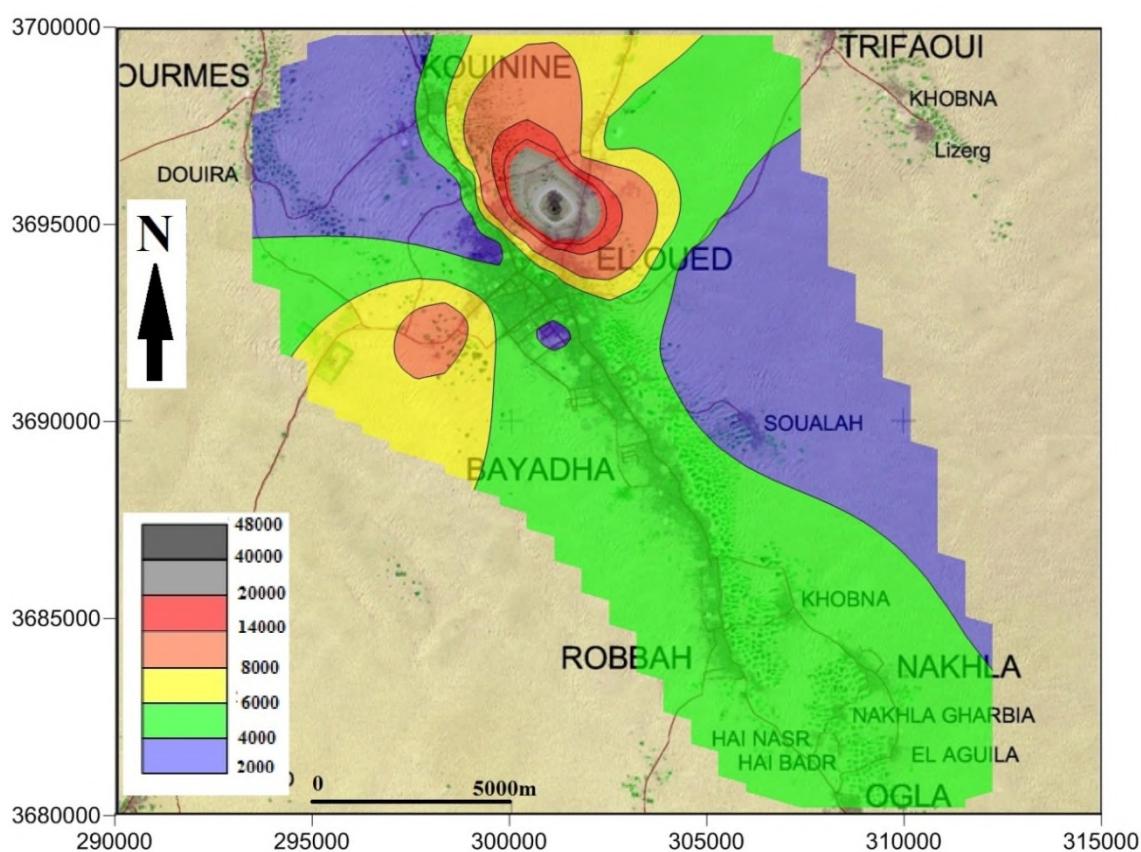


Figure 114: Carte de conductivité µS/cm de mai-juin 2012.

4.2. Le nitrate dans les eaux de la nappe libre.

4.2.1. Carte de nitrates d'avril 2002.

La carte de nitrates d'avril 2002 réalisée par BG (Fig. 115), met en évidence les fortes variations dans la répartition spatiale des teneurs en nitrates. Les plus fortes valeurs ne semblent pas dépendre de la densité de la population mais plutôt de l'activité agricole ou de la proximité immédiate (une vingtaine de mètres) de W.C .publics (école, mosquée, etc.).

On remarque une très forte variation d'un point à l'autre, sans qu'une tendance générale ne se

dégage vraiment : un puits en ville peut présenter une valeur supérieure à 120 mg/l et le puits voisin de 40 mg/l ou même inférieur à 5 mg/l (comme c'est le cas entre Bayada et Kouinine). Dans la plus grande partie de la zone, le taux de nitrates est au-dessus du taux acceptable pour l'eau de boisson (50 mg/l selon l'OMS), à l'exception des zones suivantes :

- Les plantations irriguées par des forages au CT au doumaine Daouia, à Foulia et à Hobba par dilution des nitrates par l'eau des nappes profondes.
- Dans les Ghouts ennoyés recouverts de roseaux.
- Dans les zones anaérobies où l'oxygène nécessaire à certaines réactions chimiques n'est plus apporté par l'oxygène mais par les nitrates.

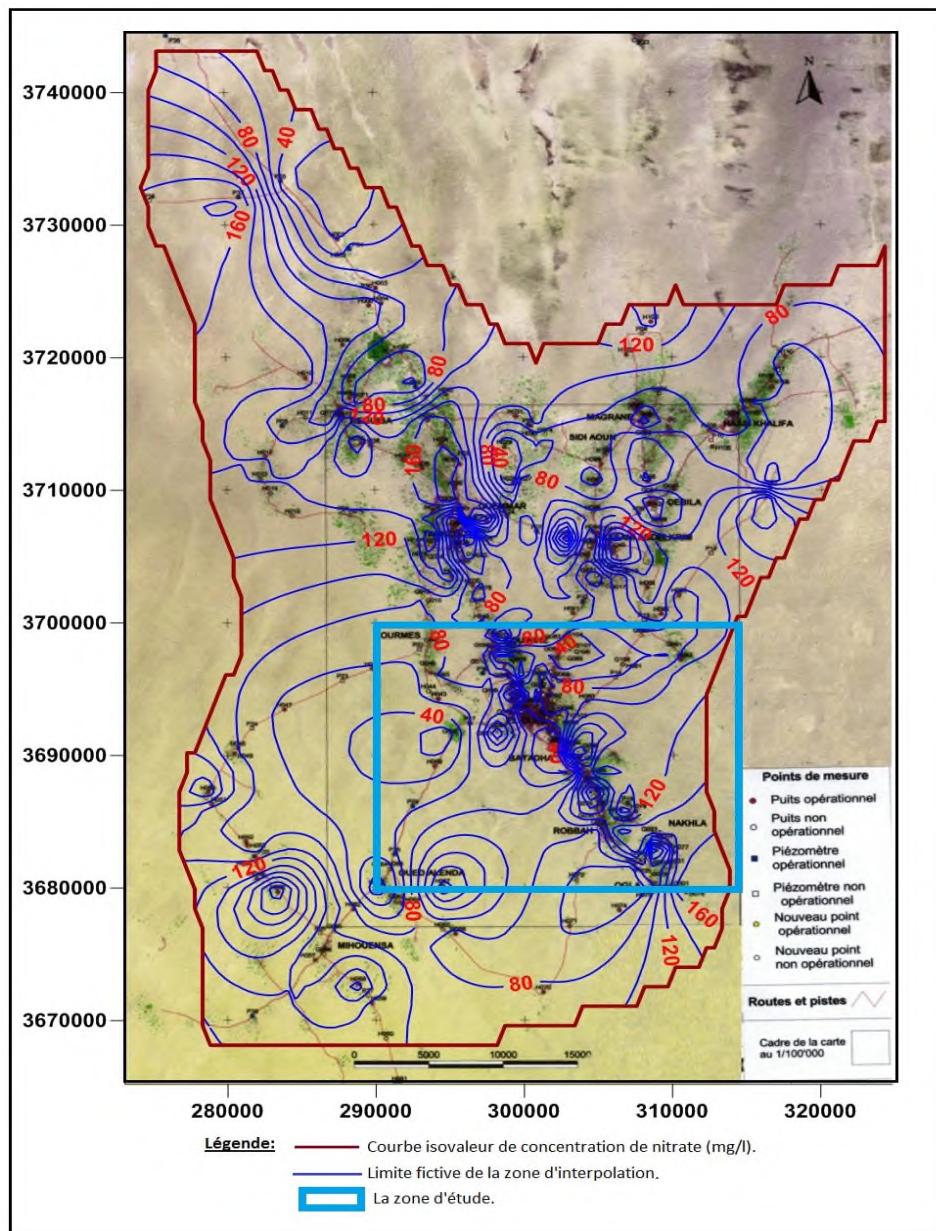


Figure 115: Carte des taux de nitrates dans la nappe libre en avril 2002.

4.2.2. Carte de nitrate dans la nappe libre en juin2010.

Le taux des Nitrates dans la nappe phréatique d'El-Oued (Fig.116), varie entre 1,5 et 220 mg/l, les valeurs les plus faibles sont mesurées dans les plantations de Mahri, à l'ouest de l'Ogla et Bayadha, à Sidi Abdalah et au sud de Kouinine, due à la dilution des eaux de la nappe phréatique par les apports des nappes profondes de CT et dans les ghouts ennoyés recouverts de roseaux à la suite de leur utilisation pour la croissance des roseaux et au niveau du rejet d'El-Oued, où l'oxygène nécessaire à la respiration des microorganismes est assuré par la dénitrification des nitrates.

Les valeurs de NO₃ dans la plupart des forages sont supérieures à la norme (50 mg/l). Ils proviennent essentiellement des eaux usées et des fosses perdues, dans les zones urbaines, surtout à la partie sud est comme ; l'est Bayadha, El-Oued et Robbah, et des activités agricoles dans d'autres régions comme les plantations de Oglia, Nakhla et Khobna.

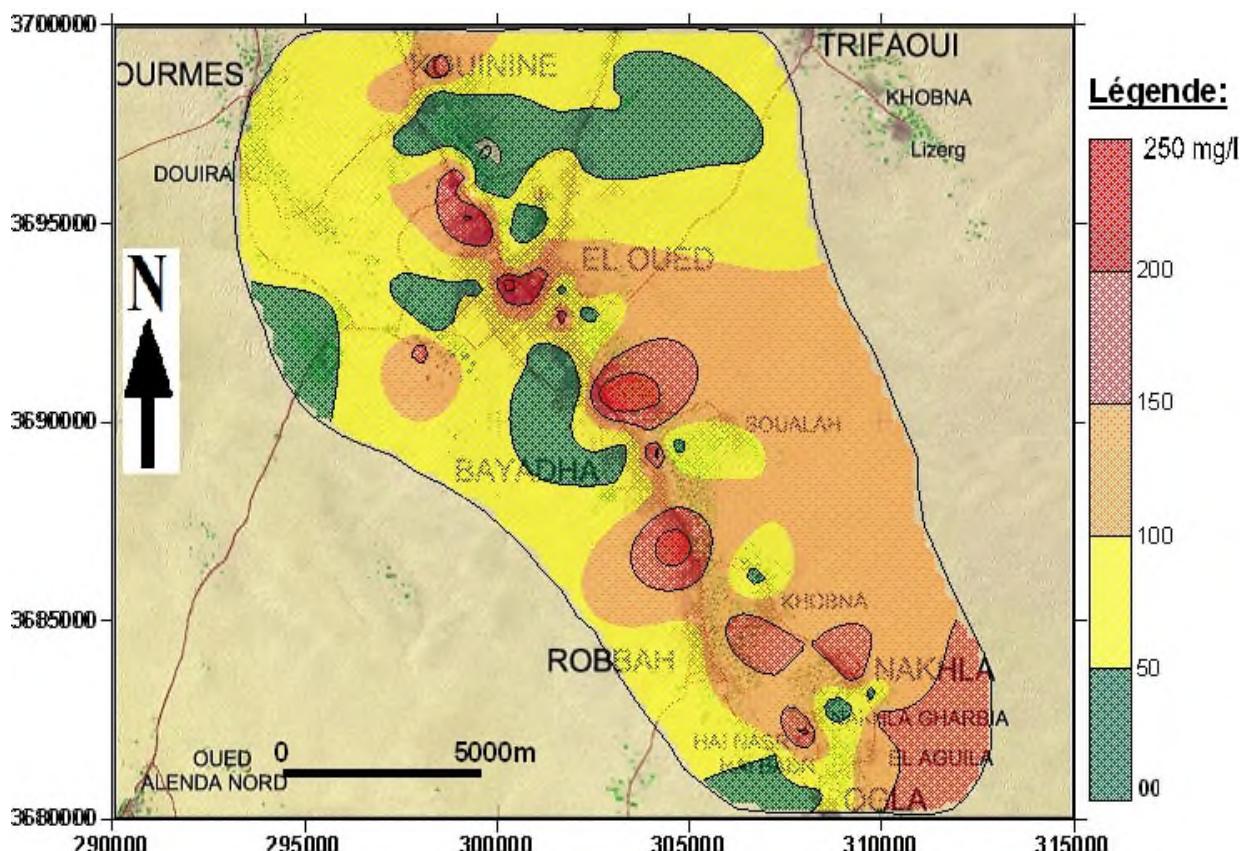


Figure 116: Carte des taux de nitrates dans la nappe libre en juin2010.

4.2.3. Carte de nitrates de mai 2012.

La carte des taux de nitrates de la campagne mai-juin 2012 (Fig.117) (Bouselsal et Kherici, 2014), montre une grande ressemblance avec la carte de nitrates de juin 2012. On remarque que le niveau de nitrates dans la nappe varie entre 1 et 250 mg/l. Parmi 82 forages et puits, qui ont fait l'objet d'analyses chimiques, 71.95% des points d'eau dépassent largement la limite

admissible de l'OMS (50mg/l) (WHO, 2006; WCCR, 1991). Les endroits où le taux de nitrates est inférieur à 50 mg/l sont ; les plantations Mahri, sud de Kouinine, Bayada, Soualah et au nord et à l'ouest d'Oglia, à la suite de dilution des eaux de nappe libre par l'eau des nappes profondes, dans les Ghouts inondés recouverts de roseaux (suite à leur utilisation par les plantes) et dans les zones anaérobies comme le rejet de la ville d'El-Oued (voir annexe 10), où l'oxygène nécessaire à certaines réactions chimiques n'est plus apporté par l'oxygène mais par la dénitrification des nitrates. Les valeurs les élevées sont mesurées aux forages de; Tekksabt, Chott, Sahenne et hôtel Louss, ils proviennent essentiellement des eaux usées et des fosses perdues, dans les zones urbaines (BG, 2002; Djidet, 2008), surtout au Sud est de la région; à l'est Bayadha, El-Oued et Robbah, et des activités agricoles dans d'autres régions comme les plantations de Oglia, Nakhla et Khobna.

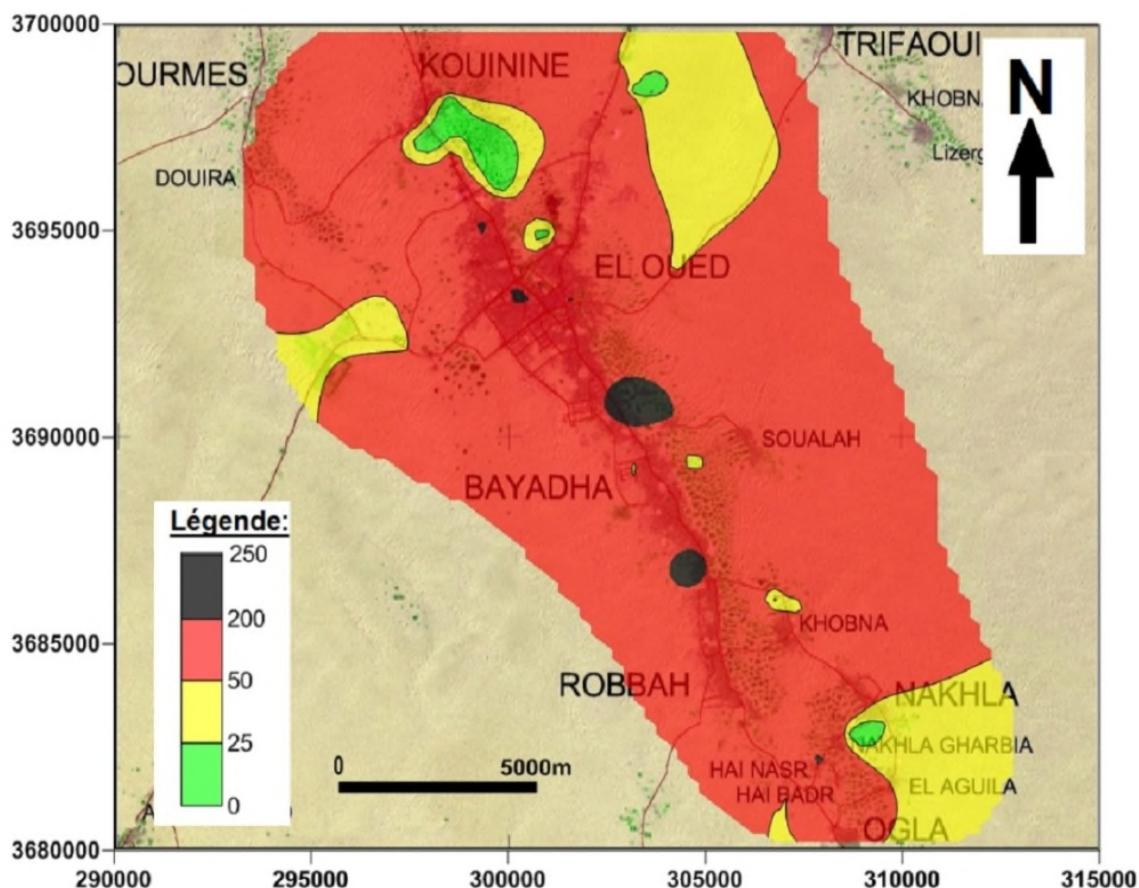


Figure 117: Carte des taux de nitrates dans la nappe libre en mai 2012.

5. CONCLUSION.

L'interprétation des analyses chimiques des eaux de la nappe libre montre la dominance des faciès évaporitiques (sulfaté calcique, sulfaté sodique, chloruré sodique et chloruré calcique). Les eaux de l'aquifère libre sont non potables, elles sont très minéralisées et présentent des teneurs en fluor, en nitrate et métaux lourds (Pb) dépassant les normes recommandées par l'OMS et les normes algérienne pour l'eau potable. En plus la majorité des forages analysés, sont contaminé par les germes microbiens pathogènes. Ces eaux sont de mauvaise qualité pour l'irrigation, car leurs représentation sur le diagramme de Richards, montre qu'elles s'arrangent selon trois classes; C₄S₁, C₄S₂ et C₄S₃. L'évaluation de l'aptitude des eaux épurées à l'irrigation montre que les eaux traitées sont non convenables à l'irrigation des terres agricoles en se référant aux normes internationales des eaux d'irrigation de la FAO et à la norme de l'OMS.

Les eaux des aquifères du complexe terminal et du Continental Intercalaire, sont très minéralisées, Malgré que la teneur en nitrates et en fluor sont faibles, elles sont de mauvaise qualité physico-chimique en référence aux normes de l'OMS et aux normes algériennes pour l'eau potable, elles nécessitent un traitement avant l'utilisation. Elles sont aussi de qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation, elles se trouvent dans les classes de C₄S₂ et de C₄S₃ dans le diagramme de Richards.

L'étude de l'origine de la minéralisation des eaux de la nappe libre montre qu'elle est liée à la dissolution des évaporites (gypse et halite en particulier), au mélange avec les eaux des nappes profondes (CT et CI), au phénomène d'échange de base et des apports anthropiques (pollution). On note aussi la forte évaporation qui a conduit également à la minéralisation excessive des eaux jusqu'à la saturation pour les minéraux carbonatés, le gypse et l'anhydrite. La conductivité des eaux est supérieure à la norme recommandée par l'OMS. Les valeurs les plus faibles se localisent dans les endroits isolés ou dans les zones agricoles irriguées à partir des forages profonds de CT, à la suite de dilutions par ses dernières. Les plus fortes valeurs trouvent au Nord, dans les zones de dépression ; au niveau de Chot, hôtel Louss et la zone de rejet de la ville d'El-Oued, à la suite de forts évaporation des eaux qui se trouvent en faible profondeur.

Le taux de nitrates dans la nappe libre est dans la plupart des cas supérieur à la norme recommandée par l'OMS. Les valeurs élevées se localisent dans les zones urbaines, et les zones agricoles irriguées à partir des puits dans la nappe libre. Les valeurs faibles se localisent dans les Ghouts inondés recouverts de roseaux, les régions isolées et le rejet de la ville d'El Oued.

Partie 4 :

Vulnérabilité des eaux de l'aquifère libre à la pollution.

1. CONCEPT DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES.

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines a été introduit par Margat à la fin des années 60 (Margat, 1968). Il se base sur le fait que les écosystèmes compris entre la surface terrestre et les aquifères protègent naturellement les eaux souterraines contre les pollutions d'origine humaine, animale ou naturelle. Partant de ce postulat, le terme de «vulnérabilité des eaux souterraines» est défini comme étant le contraire de «protection naturelle contre les pollutions». Cette protection est possible grâce à différents mécanismes d'atténuation des pollutions qui peuvent se produire durant le parcours de la substance polluante dans le système. Ces mécanismes sont entre autres la dispersion, la filtration, la sédimentation, la dilution, l'absorption/désorption, la biodégradation, la volatilisation et la dégradation chimique (Vrba and Zaporozec, 1994; Fetter, 1994; Ducommun, 2010 ; Kherici et al, 2010). Certaines spécifications sont apportées au terme de vulnérabilité des eaux souterraines. L'expression « vulnérabilité intrinsèque » est utilisée dans les cas où seules les caractéristiques naturelles des écosystèmes sont appréhendées, alors que le terme de « vulnérabilité spécifique » est utilisé lorsque la nature du polluant et son scénario d'entrée dans le système sont considérés.

NOMBREUSES méthodes pour l'estimation et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées. Ces publications se sont généralisées au monde entier dès la fin des années 80. Les plus répandues sont DRASTIC (Aller et al, 1987), SINTACS (Citivà, 1990, 1995 et 1997), EPIK (Doerfliger et al, 2009), PaPRIKa (Doerfliger et al, 2009), l'Approche Européenne (Daly et al, 2002) et ses méthodes dérivées COP (Vías et al, 2006), PI (Goldscheider et al, 2000). Mentionnons aussi quelques-unes des méthodes propres à un pays comme par exemple les méthodes suisses (Doerfliger et al, 1998), la méthode slovène (Ravbar, 2007), ou encore la méthode irlandaise (Shemes, 1999).

2. PRESENTATION DES METHODES DE VULNERABILITES DRASTIC ET GOD.

2.1. La méthode DRASTIC.

La méthode DRASTIC (Aller et al, 1987 ; Foster, 1987) est une méthode à paramètres et indices superposables. Elle a été développée par l'Agence de Protection de l'Environnement américaine (EPA) pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines aux Etats-Unis. Elle est applicable dans la majeure partie des situations géologiques et climatiques qui peuvent y être rencontrées. Cette méthode propose une adaptation du système de pondération des critères pour les pesticides ce qui permet une appréhension de la vulnérabilité spécifique à ce type de contamination uniquement.

Etant l'une des premières méthodes à avoir été mondialement utilisée, DRASTIC a fait l'objet de nombreuses adaptations en fonction de l'évolution des connaissances informatiques d'une part, et des particularités géographiques des régions étudiées, d'autre part. La méthode DRASTIC considère sept paramètres (Fig.118) pour l'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines (Thüler, L. 2014) :

- La profondeur du toit de la nappe (Depth to water) est subdivisée en dix classes de vulnérabilité. Plus la profondeur au toit de la nappe est importante, moins la zone est vulnérable.
- La recharge (net Recharge) est exprimée en hauteur d'eau infiltrée dans la nappe sur une année. Elle est divisée en 5 classes. Plus la recharge est élevée, plus la vulnérabilité l'est aussi. Car le taux d'infiltration d'eau guide le transport des contaminants dans le sol jusqu'à la zone saturée.
- La lithologie de la roche aquifère (Aquifer media) est établie selon neuf grands ensembles lithologiques comme les calcaires massifs, les calcaires karstifiés, les roches métamorphiques, les moraines, les grès. Etc. A chaque type de lithologie est attribué un degré de vulnérabilité variable qui est défini par l'expert en fonction de la réactivité de l'aquifère, de sa fracturation et des phénomènes de sorption qui peuvent s'y produire.
- Les propriétés du sol (Soil media) sont subdivisées en neuf classes en fonction de leur composition, de leur texture et de leur structure. Plus les sols sont perméables, plus ils sont considérés comme vulnérables car ils favorisent l'infiltration des pollutions.
- La topographie (Topography), ou plus précisément le pourcentage de pente, est subdivisé en sept classes. L'hypothèse faite ici est que plus la pente est faible, plus il y a d'infiltration et plus la zone est vulnérable.
- L'impact de la zone non saturée (Impact of the vadose zone media) est divisé en neuf classes d'après les lithologies qui la composent. Comme pour le critère « géologie de la roche aquifère », chaque lithologie a un degré de vulnérabilité variable qui doit être défini en fonction de connaissances du système. Généralement, une lithologie dans laquelle l'eau circule rapidement est considérée comme plus vulnérable qu'une lithologie dans laquelle l'eau circule lentement.
- La conductivité hydraulique de l'aquifère (hydrolic Conductivity of the aquifer) est divisée en six classes différentes. Plus elle est élevée, plus le milieu est considéré comme vulnérable car les mécanismes d'atténuation des pollutions ont moins de temps pour se produire. Ce critère est étroitement lié à la géologie de la roche aquifère.

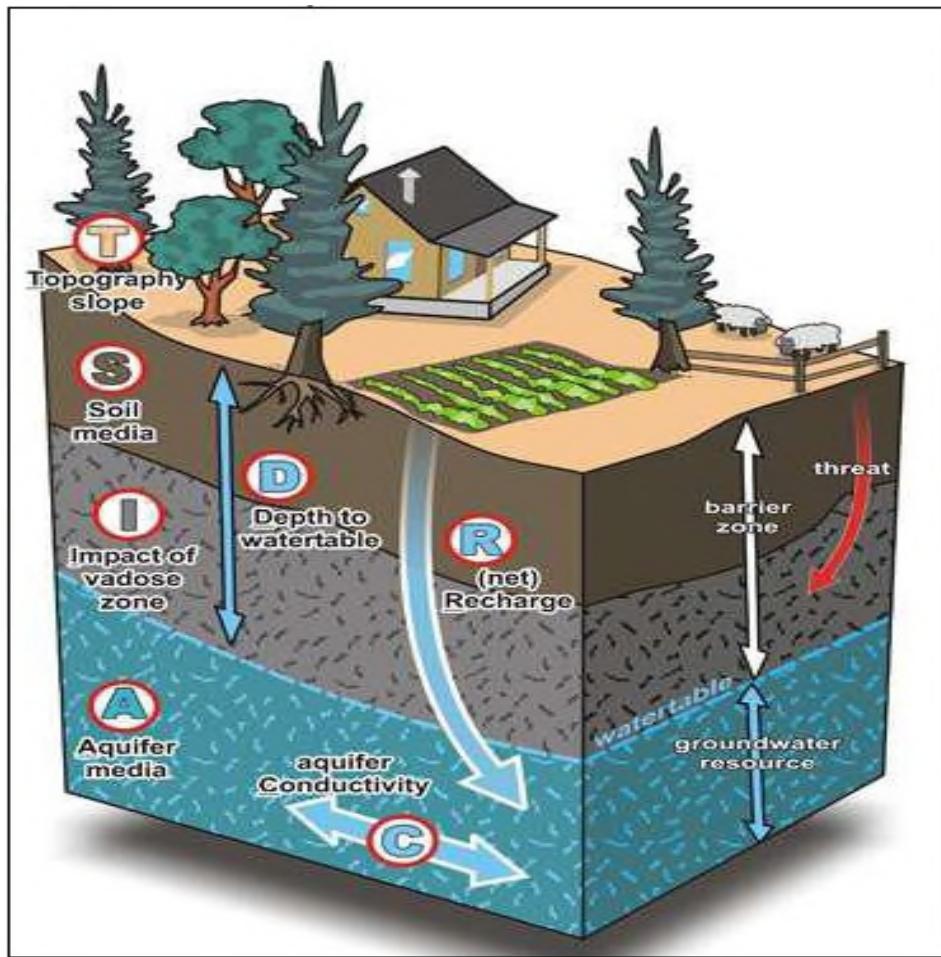


Figure 118 : Illustration des paramètres DRASTIC (Source: Richard Franklin and Robert Turner, GSC, 2009)

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon l'équation (1):

$$D_i = D_n D_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p \quad (1)$$

Où :

D, R, A, S, T, I, C, sont les paramètres cités dans le tableau 1.

n : notation accordée à chaque paramètre.

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le Tableau 32. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

Tableau 32: Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC et leurs pondération (Lallemand-Barrès, 1994).

Paramètre	Classe	Note	Pondérateur
D Profondeur de la surface de la nappe	Supérieure à 30 m	1	5
	30 à 22.5 m	2	
	22.5 à 15 m	3	
	9 à 15 m	5	
	4.5 à 9 m	7	
	3 à 4.5 m	8	
	1.5 à 3 m	9	
	Inférieure à 1.5 m	10	
R Recharge efficace	0 à 50 mm	1	4
	50 à 100 mm	3	
	100 à 175 mm	6	
	175 à 225 mm	8	
	Supérieure à 225 mm	9	
A Nature de la zone saturée	shale massif	2	3
	Roche métamorphiques	3	
	Roches métamorphiques altérées, grés	4	
	Shale en séquence	6	
	Grés massif	6	
	Calcaire massif	6	
	Sable et gravier	8	
	basalte	9	
S Nature de sol	Calcaire karstique	10	2
	Argile non agrégé et non fissuré	1	
	Limon argileux	3	
	Limon silteux	4	
	Limon	5	
	Limon sableux	6	
	Argile, agrégats ou pentes	7	
	Sable	9	
T Topographie (la pente)	Gravier	10	1
	Peu épais ou absent	10	
	Supérieure à 18 %	1	
	12 % à 18 %	3	
	10% à 12 %	5	
	8 % à 10 %	7	
I Nature de la zone non saturée	6 % à 8 %	8	5
	2 % à 6 %	9	
	0 % à 2 %	10	
	Silt et Argile	1	
	Shale	3	
	Calcaire	6	
	Grés	6	
	Calcaire lité, grés, shale	6	
C Conductivité hydraulique (perméabilité)	Sable et gravier avec silt et argile	6	3
	Sable et gravier	8	
	Basalte	9	
	Calcaire karstique	10	
	$4,7 \cdot 10^{-5}$ à $4,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	1	
	$4,7 \cdot 10^{-5}$ à $14,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	2	

Engel et al (1996) propose la classification simple des valeurs de l'indice de vulnérabilité en quatre classes (Tab.33) au lieu de huit classe de vulnérabilité dans la méthode standard de 1 à 8 allant de la valeur 23 jusqu'à la valeur 226 (Aller et al, 1987). Cet indice de vulnérabilité ainsi calculé, représente le degré de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache.

Tableau 33 : Classes de la vulnérabilité DRASTIC (Engel et al, 1996).

Classe de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	Inférieur à 101
Moyen	101 à 140
Fort	140 à 200
Très fort	Supérieur à 200

2.2. La méthodes de GOD.

La méthode GOD a été développée par Foster en 1987. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

La méthode GOD utilise une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant, et de la capacité d'atténuation que la couche sus-jacente présente à la zone saturée. L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres, à savoir ; le premier réside dans l'identification du type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (C_i) et le deuxième correspond à la profondeur de la nappe (C_p) et le troisième est défini par la lithologie de l'aquifère (C_a) (Ake, 2009 ; Murat, 2003). Les cotes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à "1"(tab.34).

L'Indice GOD (IG) qui permet d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution (Tab. 35) est obtenu par la multiplication de ces trois paramètres. La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des aquifères par la méthode GOD est faite par le calcul de l'Indice GOD (IG) selon l'équation (2) (Murat et al. 2003).

$$IG = C_a \times C_l \times C_d \quad (2)$$

Avec C_a : Type d'aquifère ; C_l : Lithologie de l'aquifère ; C_d : Profondeur de la nappe.

Tableau 34 : Côtes accordées aux paramètres de la méthode GOD (d'après Foster, 1987).

Paramètre	Classe	côte
G Type de nappe	Aucune	0
	Captive artésienne	0.1
	Captive	0.2
	Semi captive	0.4
	Semi libre	0.4 à 0.6
	Libre	0.7 à 1.0
O Facteurs géologiques	Argile	0.3
	Sol résiduel	0.4
	Silts alluvions	0.5
	Sable éolien tuf	0.6
	Sable et graviers	0.7
	Graviers	0.8
	Calcaire	0.9
	Calcaire fracturé ou	1
D Profondeur de la nappe	Supérieure à 100 m	0.4
	50 à 100 m	0.5
	20 à 50 m	0.6
	10 à 20 m	0.7
	5 à 10 m	0.8
	2 à 5 m	0.9
	Inférieure à 2 m	1

Tableau 35: Classes de la vulnérabilité GOD (d'après Foster, 1987)

classe	intervalle
nulle	0
négligeable	0 à 0.1
faible	0.1 à 0.3
modérée	0.3 à 0.5
forte	0.5 à 0.7
Très forte	0.7 à 1

2.3. Mesures et préparation des données.

L'élaboration de la carte de vulnérabilité, demande un certain nombre de données (Rouabchia et al, 2004 ; Kachi et al, 2007):

2.3.1. La profondeur d'eau de la nappe.

Une campagne de mesures piézométriques a été réalisée dans la zone d'étude en juin 2010, pour déterminer la profondeur de la surface de la nappe libre d'El-Oued.

2.3.2. La recharge de la nappe.

Pour quantifier la recharge de la nappe nous avons analysé les données météorologiques de la station de Guemmar, les données d'irrigation recueillies à partir de la direction de l'agriculture d'El-Oued et les données de l'assainissement fournies par l'Office National d'Assainissement.

2.3.3. La lithologie de l'aquifère.

La campagne géophysique exécutée dans la région par ENAGEO en 1993 (Senoussi et al, 1992) et l'interprétation de 60 logs de forages d'eau, recueillis à partir de l'Agence National des Ressources Hydrique (ANRH) ont permis d'élaborer des coupes lithologiques de l'aquifère libre d'El-Oued.

2.3.4. La topographie d'El-Oued.

Une amélioration a été apportée sur l'ancienne carte topographique d'El-Oued au 1/50000 par l'addition de 2500 points de mesure pour la rendre plus précise et mieux visualiser le relief.

2.3.5. La nature de la zone non saturée.

Une étude géotechnique a été exécutée dans la région; 30 échantillons de terrain extraits à des profondeurs oscillant entre 50cm et 3m sont amenés au laboratoire pour effectuer des analyses granulométriques et géochimiques, a fin de déterminer la nature de la zone non saturée.

2.3.6. La conductivité hydraulique de l'aquifère.

La détermination du coefficient de perméabilité K a été effectuée par la méthode du double anneau ou méthode de Muntz. Elle a été réalisée sur 42 sites (dans 33 se trouvent dans la zone d'étude) (Bonnard et Gardell, 2003). L'interprétation des résultats a permis de déterminer la variation des paramètres hydrodynamiques dans l'aquifère libre d'El-Oued.

2.4. Cartographie des paramètres de vulnérabilité et comparaison des cartes.

Le traitement des données s'est effectué à l'aide de logiciels SURFER10 qui a permis de construire la base de données physique de la zone d'étude. La réalisation des cartes en courbes d'isovaleurs ont été déterminées par krigeage linéaire.

Le krigeage est une interpolation qui estime les valeurs aux points non échantillonés par une combinaison de données. La pondération des points est réalisée par une fonction de structure issue des données. Il est donc tenu compte des distances, des valeurs et des corrélations. C'est une technique de calcul de moyennes mobiles utilisant les paramètres d'un variogramme pour obtenir une bonne estimation de la relation entre les points de données. Le variogramme correspond à l'évolution de la semi-variance en fonction du décalage entre les points. L'indice de vulnérabilité générale est calculé pour chaque maille selon l'équation 1. En plus le nombre

de mailles obtenu par classe constitue l'élément de base de comparaison et d'analyse statistique des surfaces pour la carte de vulnérabilité.

Afin de pouvoir valider la carte de vulnérabilité, nous avons comparé la carte de la vulnérabilité à la pollution avec la carte du taux des nitrates dans les eaux souterraines ; nous avons représenté les points de mesures de taux des nitrates sur la carte de vulnérabilité, en raison de la bonne répartition des point (82 points de mesures) sur la surface de la carte, il suffit de déterminer le nombre des point de mesures (avec leurs plage de concentration) dans chaque classe de vulnérabilité.

3. DETERMINATION DES COTES DES PARAMETRES DRASTIC ET GOD.

3.1. Détermination de côtes des paramètres des méthodes DRASTIC.

3.1.1. Profondeur de la surface de la nappe.

La profondeur de la nappe dans la zone d'étude (Fig.119) oscille entre 0.65m et 17,4 m (Bouselsal et Kherici, 2014). Dans les chefs-lieux d'El-Oued et Kouinine la profondeur de la nappe est inférieure à 1,5m. La profondeur d'eau dans les autres zones urbaines oscille entre 1,5m et 9m. Les plus grandes profondeurs sont localisées à Nakhla, Oglia, les plantations de Mehri et la zone agricole entre El-Oued, Trifaoui et Robbah avec des valeurs oscillant entre 9m et 17,4 m. Les côtes de profondeur de la nappe, varient de 10 à 3.

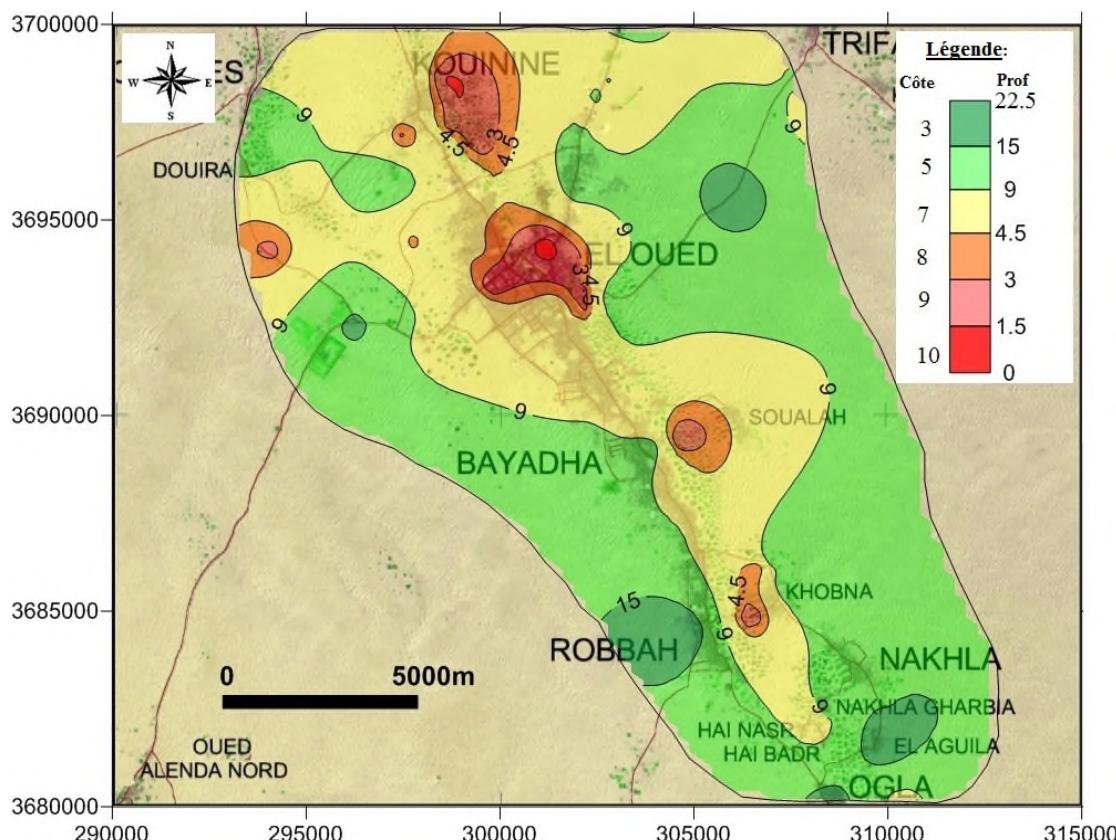


Figure 119: Carte des côtes de profondeur du plan d'eau suivant la méthode DRASTIC.

3.1.2. Recharge de la nappe.

La recharge d'un aquifère peut avoir plusieurs origines. Chacune d'entre elles doit être appréhendée séparément pour estimer la recharge (Thomas et al, 2006). Ces origines sont, l'apport direct par les précipitations (pluie efficace), la ré-infiltration due à l'irrigation et la recharge urbaine.

Le bilan hydrique de la région d'El-Oued montre que la réserve facilement utilisable est nulle durant les onze mois de l'année, conséquence d'une faible précipitation et d'une forte évapotranspiration. On peut donc négliger la recharge par la pluie efficace.

L'examen de la carte piézométrique de juin 2010 (Fig.74), montre que les centres urbains et les zones agricoles irriguée à partir des nappes profondes, apparaissent sur la carte piézométrique comme des zones de divergence, a l'inverse les zones irriguée à partir des puits dans la nappe phréatique, les zones de dépressions de Chott, hôtel Louss et la zone de rejet d'El-Oued, apparaissent sur la carte comme des zones de convergences.

La carte piézométrique de juin 2010 montre aussi que les centres urbains et les zones agricoles sont les lieux de recharge de la nappe, suite à l'infiltration des eaux d'assainissement et des eaux d'irrigation vers la nappe libre.

Les zones de recharge ont été définies à partir de l'interprétation de l'image satellite et de la carte d'occupation de sol (BG, 2004 ; Khechana, 2014). Le calcul de la recharge de la nappe par les eaux usées urbaines, repose sur la consommation de l'eau par la population dans les zones urbaines multiplié par 0,8, pour trouver le volume d'eau d'assainissement, selon l'équation 3.

$$R = 1000 \frac{Q_m \times 0.8}{S} \quad (3)$$

Où : Qm : Débit des forages destinés à alimentation en eau potable (m^3/an).

R : la recharge (mm/an).

S : la surface urbanisée de la zone d'étude (m^2)

La recharge de l'irrigation a été estimée à partir des données fournies par la direction de l'agriculture (DA) d'El-Oued.

La carte de recharge (Fig.120), montre que la recharge de la nappe varie entre 0mm et 1304mm. Les zones urbaines de Bayadha, Robbah, Nakhla et Kouinine présentent une recharge dépassent 1m, à cause de l'absence de réseau d'assainissement, les zones agricoles présentent une recharge moyenne de l'ordre de 1m par an, la ville d'El-Oued est dotée d'un réseau d'assainissement partiel (dans les anciens quartiers) qui a réduit la recharge de la

nappe à 720mm, et enfin les zones désertiques occupées par les dunes de sables où la recharge de la nappe est nulle.

D'après la carte de recharge, on constate que ce paramètre dépasse les 225 mm/an ou est égal 0 mm/an sans valeurs intermédiaires, ce qui nous donne deux cotes de vulnérabilité 1 et 9.

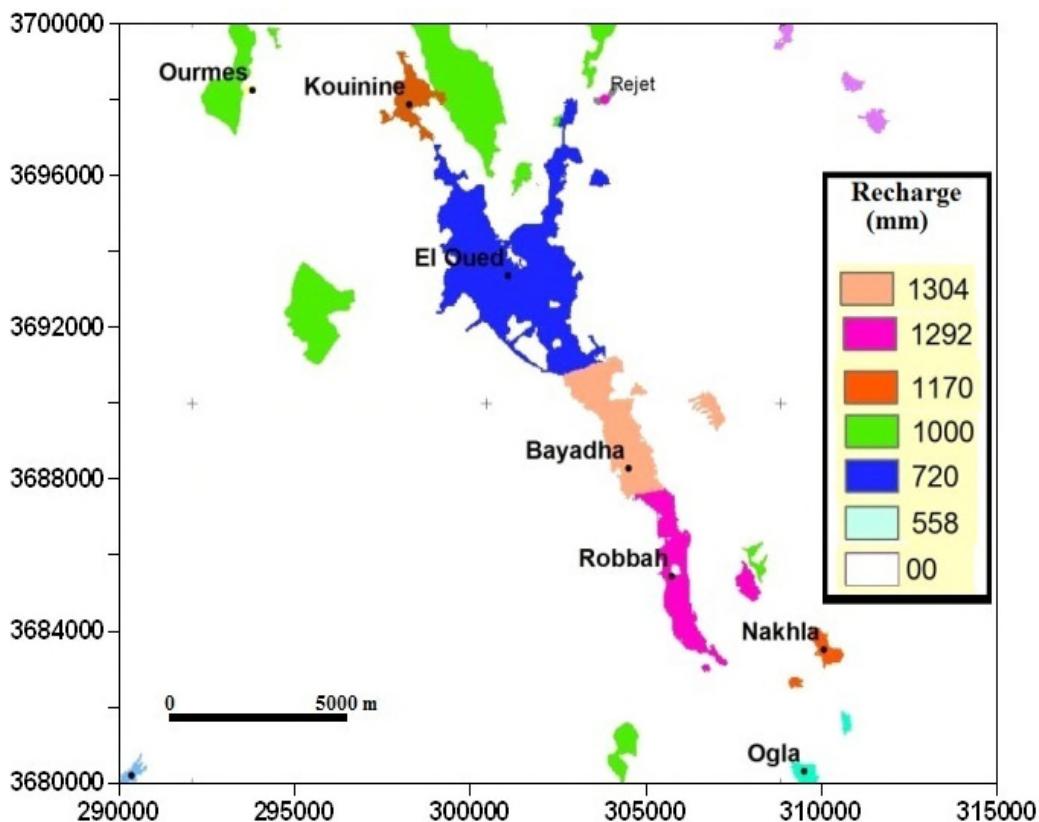


Figure 120: Carte de la recharge de la nappe libre d'El-Oued (BG, 2004).

3.1.3. Nature de la zone saturée.

Une étude géophysique réalisée par ENAGEO en 1993 basée sur la mesure de la résistivité des roches par des sondages électriques verticaux, couvre la région d'étude. Trois terrains ont été différenciés : un premier terrain composé de sables et grès à forte résistivité, un deuxième composé d'argiles sableuses et de sables argileux avec une résistivité moins forte et un troisième, avec un substratum argileux de faible résistivité.

Les cinq coupes réalisées dans la zone d'étude sur la base de logs de forages (Fig.44, 45, 46, 47 et 48), montre que la zone saturée est représentée par des sables fins, de grés à ciment gypseux friable, des sables moyens et grossiers, et des argiles sableuses. La profondeur du substratum argileux oscille entre 40m et 70m.

Nous avons attribué une valeur de côte de 8 pour la nature de la zone saturée qui correspond aux sables et graviers.

3.1.4. Nature du sol.

La couche de sol dans la région d'El-Oued n'existe pas, l'agriculture exercée dans la région se fait sur des dunes de sables aménagées et avec un ajout de fumiers de poulaillers apportés des régions de Nord (Batna et Biskra) (voir annexe 10) et des engrais. Les terres agricoles sont très pauvres en nutriments, après quelques années d'exploitation. Les agriculteurs se déplacent alors vers d'autres terres (d'autre dunes) et recommencent à travailler de nouveau. Les terres abandonnées présentent un taux de matière organique faible, du à la minéralisation de cette dernière sous un climat aride. La côte attribuée à la nature du sol est 10 correspondants au sol absent ou de très faible épaisseur.

3.1.5. Topographie d'El-Oued.

La zone d'étude située au bas Sahara est caractérisée par un relief plan (Fig.3). Les pentes calculées sur la carte donnent des valeurs très faibles allant de 0.2% à 1.5%. A titre d'exemple nous donnerons les valeurs de pente dans quelques points sur la carte :(A =0.8%), (B = 0.2%) (C= 0.75%), (D = 1.5%) et (E=0.3%).

La côte qui corresponde aux paramètres de topographie est 10.

3.1.6. Nature de la zone non saturée.

Les études géotechniques effectuées dans la zone d'étude montre que la zone non saturée est constituée de plus de 90% sables et graviers, la fraction fine (silt et argile) représente un pourcentage inférieur à 10% (Fig.52). La côte attribuée à ce paramètre est 8.

3.1.7. Conductivité hydraulique de l'aquifère libre d'El-Oued.

Les mesures du coefficient de perméabilité K effectués dans la zone d'étude (Kherici et al, 1996 ; BG, 2003), permettent de tracer la carte de perméabilité (Fig.121) de l'aquifère libre, les valeurs de perméabilité oscillent entre 1.1×10^{-4} m/s et 2.6×10^{-4} m/s.

Les valeurs de perméabilité mesurées correspondent à une valeur de côte égale à 6.

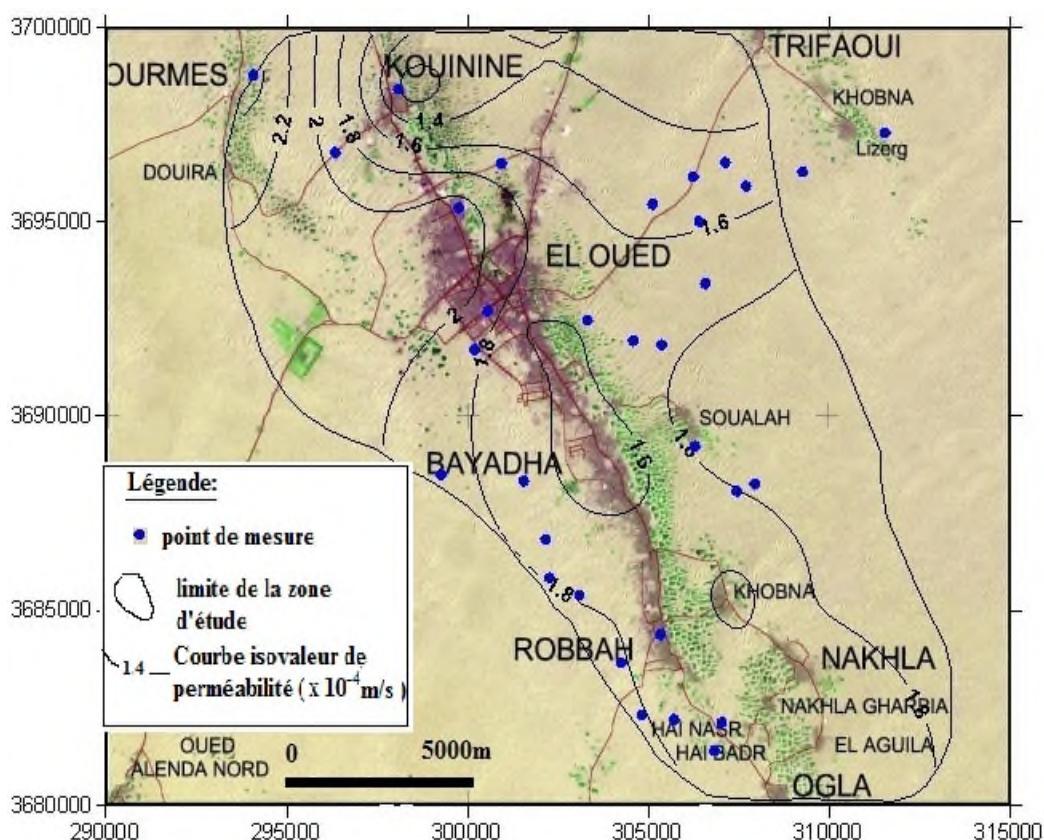


Figure 121: Carte des perméabilités de l'aquifère libre d'El-Oued

3.1. Détermination de cote des paramètres des méthodes GOD.

Nous avons attribué la côte 1 pour le type de l'aquifère qui correspond à un aquifère libre et la côte 0.7 pour le facteur géologique qui correspond aux sable et gravier. Les côtes de profondeur de la surface de la nappe allant de 0.7 à 1.

La profondeur de la nappe dans la zone d'étude (Fig. 122) oscille entre 0.65m et 20m, dont les chefs-lieux d'El-Oued et Kouinine où la profondeur de la nappe est inférieure à 1m, alors que dans la plupart de la zone d'étude la profondeur de la nappe oscille entre 5m à 10m. Les plus grandes profondeurs sont localisées à Nakhla, Oglia, les plantations de Mehri et la zone agricole entre El-Oued, Trifaoui et Robah avec des valeurs oscillant entre 10m et 17m.

Le tableau (36), résume les résultats tirés de l'étude des paramètres de vulnérabilité GOD et DRASTIC. Dans les deux méthodes on constate que la profondeur de la nappe est le seul paramètre qui influe sur le degré de vulnérabilité d'un point donné dans la zone d'étude à cause de l'homogénéité observé dans la zone d'étude.

Tableau 36. Les côtes des paramètres de vulnérabilité de GOD de la nappe libre d'El-Oued.

Paramètre	Classe	côte
G	Libre	1
O	Sable et graviers	0.7
D	10 à 20 m	0.7
	5 à 10 m	0.8
	2 à 5 m	0.9
	Inférieure à 2 m	1

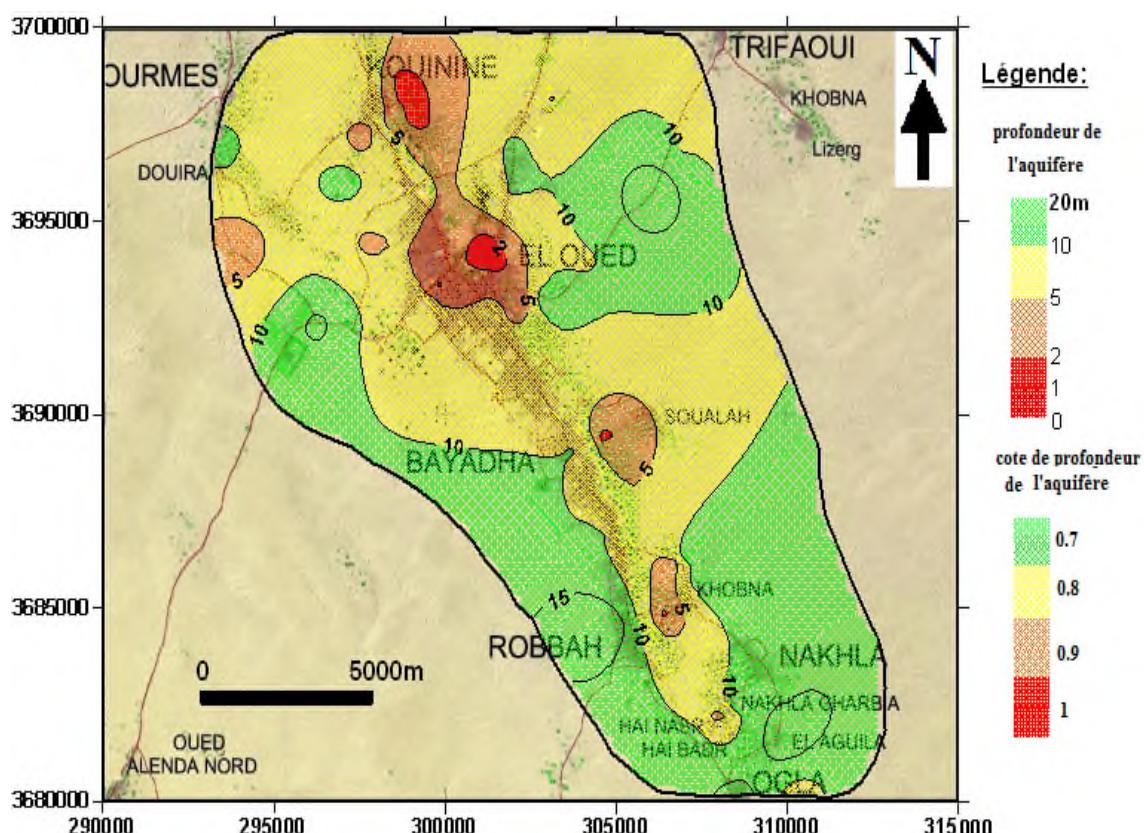


Figure 122 : Carte de profondeur de l'aquifère libre suivant la méthode GOD.

4. CARTES DE VULNERABILITE DRASTIC ET GOD DE L'AQUIFERE LIBRE.

4.1. Cartes de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère libre d'El-Oued.

Les indices évaluées par la méthode DRASTIC (Engel et al 1996) oscillent entre 110 et 195 et représentent ainsi deux classes qui constituent la présente carte (Fig.123). Ces dernières sont reparties comme suit :

La classe « moyenne » avec un indice de vulnérabilité oscillant entre 110 et 140, se rencontre dans la majeure partie à l'est de la zone d'étude, donne lieu à une pollution moins sévère et représente 21.34 % de la superficie de la zone d'étude. Le degré de vulnérabilité moyen est engendré par la combinaison de profondeurs importantes de la nappe supérieure à 9 m et la

recharge nulle de la nappe dans les endroits isolés influencés seulement par les conditions climatiques extrêmes, sous un climat aride.

La classe « forte » avec un indice de vulnérabilité oscillant entre 140 et 195, s'étend du Nord au Sud ouest, en occupant la proportion la plus importante (78.66 %) de la zone d'étude. Le fort degré de vulnérabilité est expliquée par l'association des profondeurs de la surface piézométrique qui sont faibles, voire nulles, et la recharge très importante de la nappe sous les principaux centres urbains d'El-Oued (El-Oued, Kouinine, Teksebt, université d'El-Oued, Bayadha, Robbah et Oglia) et dans les zones agricoles fortement irriguées par des forages captant les nappes profondes, comme le cas de Soualah, Nakhla Gharbia, Khobna et Douira.

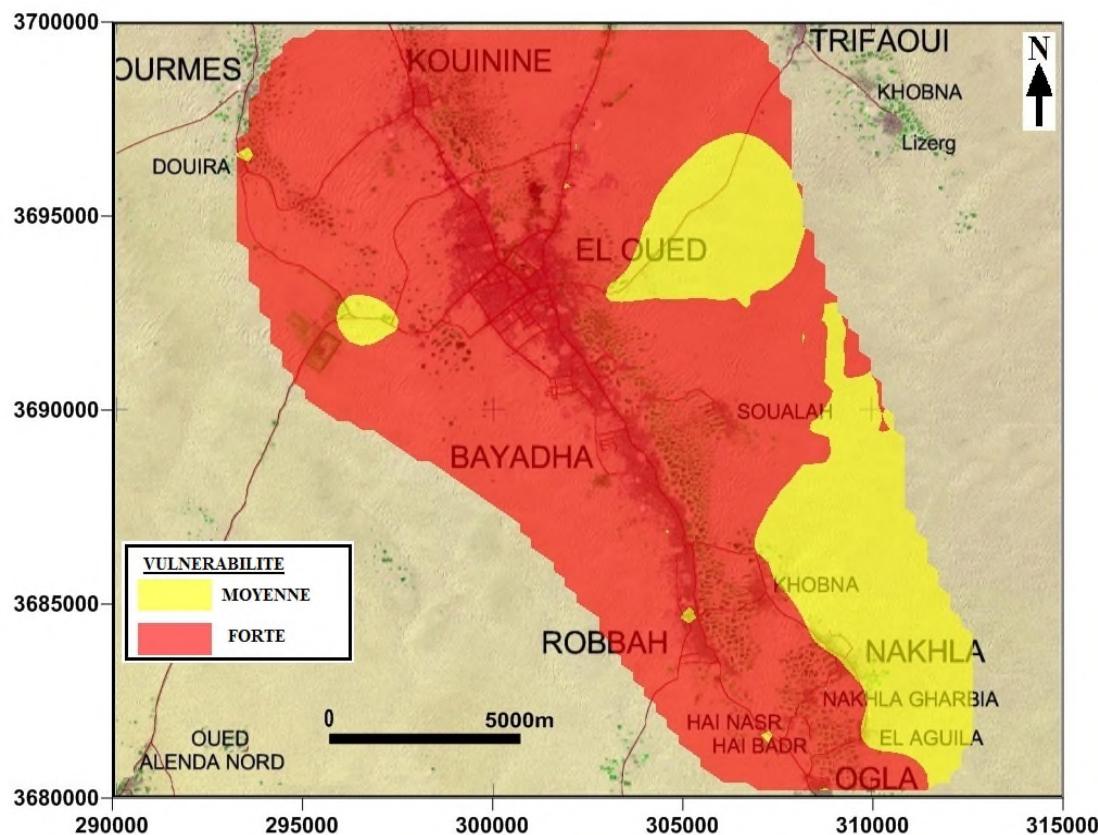


Figure 123: carte de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère libre d'El-Oued.

4.2. Cartes de vulnérabilité GOD de l'aquifère libre d'El-Oued.

Les calculs des indices globaux de vulnérabilité, montrent que les valeurs des indices obtenus oscillent entre 0.49 et 0.70. La carte de vulnérabilité des eaux de l'aquifère libre dues à la pollution (Fig. 124) montre deux zones de vulnérabilité ; la première une vulnérabilité forte où l'indice global est de 0.5 à 0.7, représente 88% la superficie totale, ce sont surtout des zones urbaines et des zones agricoles touchées par la remontée où la nappe phréatique se trouve à une faible profondeur et la deuxième zone présente une vulnérabilité modérée avec des indices globaux de vulnérabilité inférieure à 0.5 se localisant dans les territoires isolés où

la nappe n'est pas touchée par le phénomène de la remontée, elle représente 12% de la superficie totale.

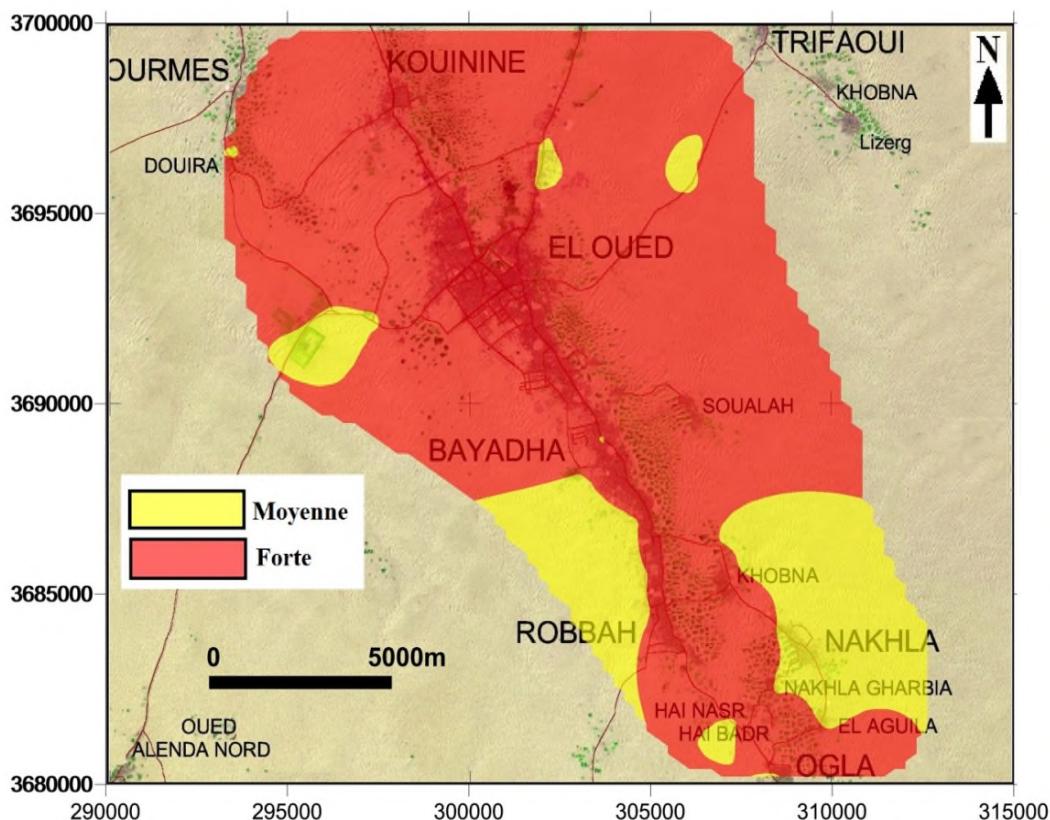


Figure 124 : Carte de vulnérabilité GOD des eaux de l'aquifère libre d'El-Oued à la pollution.

5. VALIDATION ET COMPARAISON DES METHODES VULNERABILITES DRASTIC ET GOD.

La validité de la méthode de vulnérabilité DRASTIC, a été testée dans la nappe, en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de la nappe et la distribution des classes de vulnérabilité (Ake et al, 2009; Hamza et al, 2007 et 2008 ; Mohamed, 2001; Alwathaf,et al, 2011; Gouaidia et al, 2011).

Les mesures des nitrates (NO_3^-) disponibles dans la nappe libre d'El-Oued sont au nombre de 82, mesurés pendant la campagne de mai 2012. Parmi 82 forages et puits, qui ont fait l'objet d'analyses chimiques, 71.95% des points d'eau dépassent largement la limite admissible de l'OMS (50mg/l) (WHO, 2006; WCCR, 1991).

La carte des taux de nitrates de mai 2012 (Fig.125) (Bouselsal et Kherici, 2014), montre que le niveau de nitrates dans la nappe varie entre 1 et 250 mg/l. Les endroits où le taux de nitrates est inférieur à 50 mg/l sont ; les plantations Mahri, sud de Kouinine, Bayada, Soualah et au nord et à l'ouest d'Obla et dans les zones anaérobies comme le rejet de la ville d'El-Oued.

Les valeurs les élevés sont mesurés aux forages de; Teksabt, Chott, Sahenne et hôtel Louss, ils proviennent essentiellement des eaux usées et des fosses perdus, dans les zones urbains (BG, 2002 ; Djidel, 2008), surtout au Sud est de la région à l'est Bayadha, El-Oued et Robbah, et des activités agricoles dans d'autres régions comme la plantation de Oglia, Nakhla et Khobna.

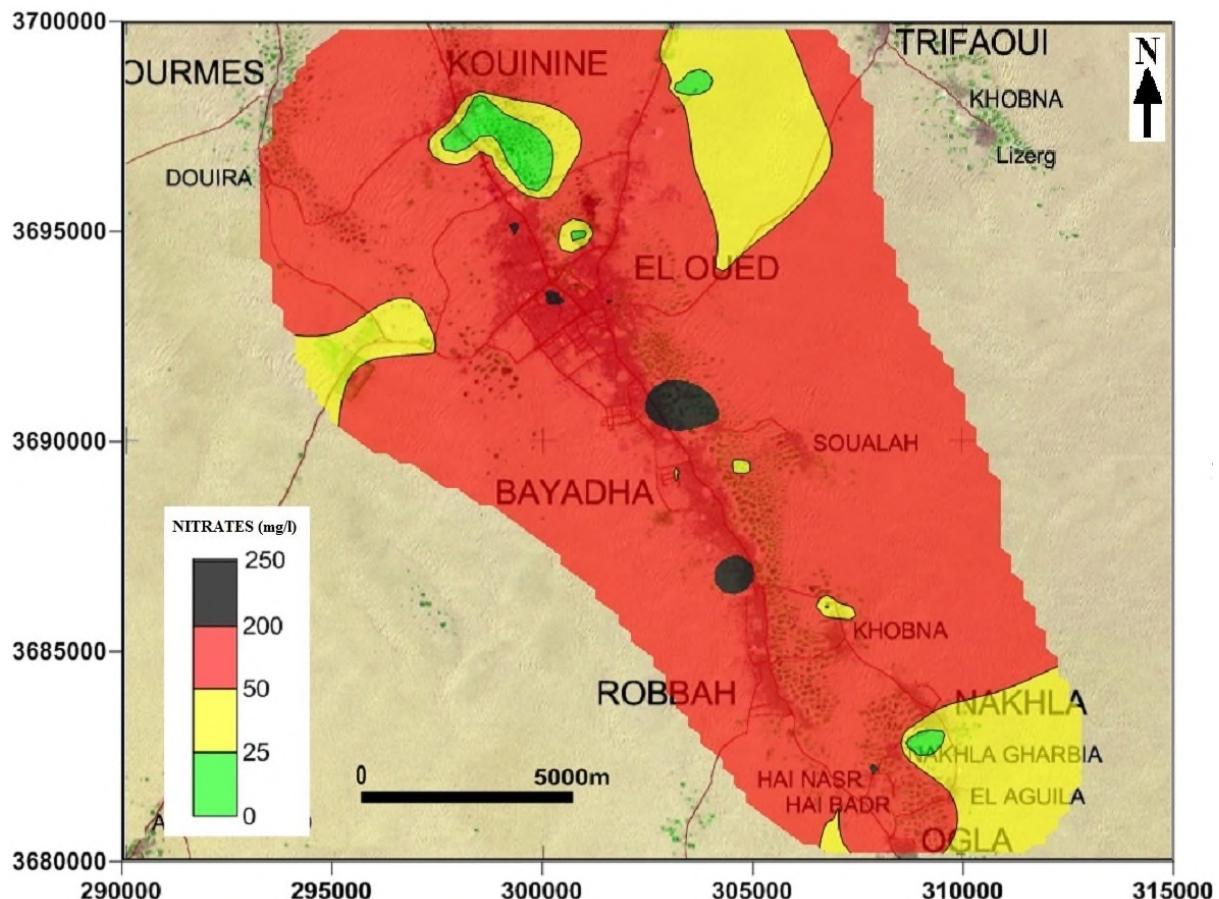


Figure 125: Carte des taux de nitrate dans la nappe phréatique en mai 2012.

Pour valider la carte de vulnérabilité, nous avons définir les concentrations faibles en nitrates comme étant celles inférieures 25 mg/l, les concentrations moyennes comme étant celles comprises entre 25 et 50 mg/l, les concentrations fortes comme étant comprises entre 50 et 200 mg/l et concentrations très fortes comme celles supérieures à 200 mg/l (WCCR, 1991).

Nous pouvons déduire à partir des données du tableau 37 que les valeurs des concentrations en nitrates se répartissent comme suit :

5.1. La carte de vulnérabilité DRASTIC.

Parmi les 70 valeurs répartis sur la surface de la carte marquée par une vulnérabilité forte, 8 valeurs (soit 11.43% de ces valeurs) sont supérieures 200 mg/l, 50 valeurs (soit 71.43% de ces valeurs) sont comprises entre 50-200mg/l, 1 valeur (soit 1.43% de ces valeurs) comprise entre 25-50 mg/l et 11 valeurs (soit 15.71% de ces valeurs) inférieures à 25 mg/l. Parmi les 12

valeurs répartis sur la surface de la carte marquée par une vulnérabilité moyenne, 11(soit 91.66% de ces valeurs) comprises entre 25-50 mg/l et 1 (soit 8.34 % de ces valeurs) sont comprises entre 50-200mg/l. le pourcentage de coïncidence entre carte de nitrates et la carte de vulnérabilité DRASTIC est 74.39%.

5.2. La carte de vulnérabilité GOD.

Parmi les 66 valeurs répartis sur la surface de la carte marquée par une vulnérabilité forte, 7 valeurs (soit 10.60% de ces valeurs) sont supérieures 200 mg/l, 46 valeurs (soit 69.70% de ces valeurs) sont comprises entre 50-200mg/l, 3 valeurs (soit 4.54% de ces valeurs) comprise entre 25-50 mg/l et 10 valeurs (soit 15.16% de ces valeurs) inférieures à 25 mg/l. Parmi les 16 valeurs répartis sur la surface de la carte marquée par une vulnérabilité moyenne, une valeur est supérieure 200 mg/l, 5 valeurs (soit 31.25% de ces valeurs) sont comprises entre 50-200 mg/l, 9 valeurs (soit 56.25% de ces valeurs) comprise entre 25-50 mg/l et une valeur (soit 6.25% de ces valeurs) inférieures à 25 mg/l. le pourcentage de coïncidence entre carte de nitrates et la carte de vulnérabilité GOD est 67.07%.

Le résultat de validation des méthodes de vulnérabilité GOD et DRASTIC donnent des pourcentages de coïncidence très proche, ce qu'il prouve que le paramètre qu'influe le plus sur la vulnérabilité de l'aquifère est la profondeur de la nappe.

6. CONCLUSION.

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère libre d'El-Oued, réalisée par les méthodes GOD et DRASTIC révèle une tendance de vulnérabilité à la pollution moyenne à forte. La classe la plus dominante est la classe forte (88% %) pour la méthode GOD et aussi la classe forte (78.66% %) pour la méthode DRASTIC.

La validité de l'application de ces méthodes à l'étude de la pollution de l'aquifère en question a été testée par une compagnie de mesure de nitrates, Cela a montré que la méthode la plus valide est la méthode DRASTIC, où on remarque un fort pourcentage de coïncidence entre carte de nitrates et la carte de vulnérabilité DRASTIC.

Tableau 37: Coïncidence entre les concentrations en nitrates et les différentes classes de vulnérabilité de la méthode DRASTIC.

Méthode de vulnérabilité	classe de vulnérabilité	Nombre de puits où [NO ₃] sont inférieure à 25mg/l	Nombre de puits où [NO ₃] comprise entre 25 et 50 mg/l	Nombre de puits où [NO ₃] comprise entre 50 et 200 mg/l	Nombre de puits valeur de [NO ₃] supérieure à 250mg/l	Total
DRASTIC	Vulnérabilité moyenne	0	11	1	0	12
	Coïncidence entre les [NO ₃] et la classes de vulnérabilité moyenne	0%	91.66%	8.34 %	0%	100%
	Vulnérabilité forte	11	1	50	8	70
	Coïncidence entre les [NO ₃] et la classes de vulnérabilité forte	15.71%	1.43%	71.43%	11.43%	100%
	Total	11	12	51	8	82
GOD	Vulnérabilité moyenne	1	9	5	1	16
	Coïncidence entre les [NO ₃] et la classes de vulnérabilité moyenne	6.25%	56.25%	31.25 %	6.25%	100%
	Vulnérabilité forte	10	3	46	7	66
	Coïncidence entre les [NO ₃] et la classes de vulnérabilité forte	15.16%	4.54%	69.70%	10.60%	100%
	Total	11	12	51	8	82

Conclusion générale et recommandations

CONCLUSION GENERALE

La zone d'étude fait partie de la wilaya El-Oued, étendue sur neuf communes et occupe une superficie d'environ 500Km². Elle fait partie du grand Erg oriental, qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable d'altitudes varie entre 64m et 100m. La surface de la zone d'étude est occupée par les massifs dunaires, les Ergs, les zones urbaines, les Ghouts, les zones agricoles irriguées et les zones d'eau libre. Le climat de la région est saharien avec un hiver chaud, le bilan hydrique montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable.

De point de vu géologique la zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, à sa base, on trouve des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par des formations continentales de Secondaire et de Tertiaire épaisses de quelques milliers de mètres et en fin le Quaternaire y succède.

La zone d'étude fait partie au système aquifère du Sahara septentrional (SASS), ce dernier est constitué de trois aquifères, un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)). L'interprétation des coupes hydrogéologiques réalisées sur la base de logs de forages d'eau, montre que l'aquifère libre d'El Oued est constitué de sables, de grés à ciment gypseux friable et des argiles sableuses. Le substratum est argileux, sa profondeur oscille entre 40m et 70m. Les limites latérales de l'aquifère libre, n'ont pas été atteintes étant donné que cette dernière s'étend au-delà de la zone d'étude.

L'examen des cartes piézométriques, montre que l'écoulement de la nappe se fait en général de sud-ouest vers nord-est. Les centres urbains et les zones agricoles irriguées à partir des nappes profondes de CT et CI, présentent sur la carte comme des dômes piézométriques, a cause d'une alimentation forte de la nappe par les eaux d'infiltrations, on ajoute aussi les zones de dépressions et la zone de rejet d'El-Oued. Par contre les zones irriguées à partir des puits dans la nappe libre, apparaissent sur la carte piézométrique comme des zones de dépressions piézométriques. La carte piézométriques de 2012, montre une diminution de niveau piézométrique d'ordre de 4 m, dans la partie nord-est, due à l'effet de pompage dans le réseau de drainage vertical de la ville d'El Oued où on constate que l'apport d'eau est diminué vers le sens d'écoulement (Trifaoui). Alors que la forme générale de la carte piézométrique reste la même.

Les eaux de l'aquifère libre sont non potable et de qualité médiocre à mauvaises pour l'irrigation, elles sont fortement minéralisées, très dures et présentent des teneurs en fluor, en

nitrates et en métaux lourds (Pb) dépassant les normes algériennes pour l'eau potable. En plus la majorité des forages analysés, sont contaminés par les germes microbiens pathogènes. L'évaluation de l'aptitude des eaux épurées à l'irrigation montre que les eaux traitées sont non convenable à l'irrigation des terres agricoles en réfèrent aux normes internationale des eaux d'irrigation de la FAO et à la norme de l'OMS.

La minéralisation des eaux de la nappe libre est liée à la dissolution des évaporites (gypse et halite en particulier), au mélange avec les eaux des nappes profondes (CT et CI), au phénomène d'échange de base et des apports anthropiques (pollution). On note aussi la forte évaporation qui à conduite également à la minéralisation excessive des eaux jusqu'à la saturation pour les minéraux carbonatés, le gypse et l'anhydrite.

La conductivité des eaux est supérieure aux normes recommandées par l'OMS. Les valeurs les plus faibles se localisent dans les endroits isolés ou dans les zones agricoles irriguées à partir des forages profonds de CT, à la suite de la dilution par ces derniers. Les plus fortes valeurs localisent au Nord, dans les zones de dépressions et la zone de rejet de la ville d'El-Oued, à la suite de fortes évaporations des eaux qui se trouvent en une faible profondeur.

Le taux de nitrates dans la nappe libre est dans la plupart des cas supérieur aux normes recommandés par l'OMS. Les valeurs élevées se localisent dans les zones urbaines et les zones agricoles irriguées à partir des puits dans la nappe libre. Les valeurs faibles se localisent dans les Ghouts inondés recouverts de roseaux, les régions isolées et le rejet de la ville d'El Oued.

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère libre d'El-Oued, révèle une tendance de vulnérabilité à la pollution moyenne à forte. La classe la plus dominante est la classe forte (88%) pour la méthode GOD et aussi la classe forte (78.66% %) pour la méthode DRASTIC. Le teste de validation montre un fort pourcentage de coïncidence entre la carte de nitrates et la carte de vulnérabilité DRASTIC.

RECOMMANDATIONS.

Plusieurs recommandations et plans de gestion sont déjà proposées pour résoudre le problème de la remontée des eaux de l'aquifère superficiel dans la région d'El Oued Souf (BG, 2002 et 2004 ; ANRH, 1993 ; Remini, 2000 ; Miloudi, 2008 ; Khechana, 2014), mai sans grands efficacités. Cet échec est dû à l'absence de culture de développement durable chez les citoyens et responsables et l'infaisabilité de quelques recommandations proposées.

Les principales recommandations que je propose, d'après mon travail, pour résoudre le problème de la remontée des eaux de la nappe libre sont:

- La sensibilisation de la population sur la préservation de ressources hydriques captives non renouvelables pour les futures générations par optimisation de consommation de l'eau.
- Limitation des apports d'eau vers la nappe libre par réduction des fuites dans réseau de l'AEP et d'assainissement, optimisation de la consommation d'eau par pose de compteurs, interdiction d'arrosage des espaces verts à partir des forages de l'AEP et optimisation de pompage des eaux à partir des nappes profondes (CT et CI).
- Limitation des apports d'eau destinée à l'irrigation par utilisation des techniques modernes d'irrigation.
- Optimisation de la consommation d'eau dans les établissements publics où on remarque un grand gaspillage d'eau.
- L'utilisation d'eau de la nappe libre en irrigation de certaines cultures tolérant en sel et l'irrigation des espaces verts à partir de la nappe libre.
- La réutilisation des eaux épurées est une nécessité dans la région, mais il faut séparer les eaux usées domestiques qui présentent une conductivité moyenne, des eaux de drainage (vertical et horizontal) présentent une conductivité forte. En plus pour augmenté le rendement du traitement des eaux, il faut utiliser le système d'épuration à plante macrophytes (les roseaux).
- La gestion des ressources hydriques dans la région du Souf nécessite : un recensement des forages publiques et privés captant tous les nappes (libre, CT et CI), des compagnes de mesure piézométriques et hydrochimiques périodiques au moins chaque 6 mois pour suivre la qualité des eaux, une suivie de l'état des forages captant les nappes de CT et CI et l'application de réglementations sur l'exécution des forages dans les nappes profondes.

Bibliographie.

BIBLIOGRAPHIE

Achour, S. 1990. La qualité des eaux du Sahara Septentrional en Algérie. Etude de l'excès en fluor. Tribune de l'eau, Cebedeau, 42 (542), 53-57.

Achour. S., Youcef. L. 2001. Excès des fluorures dans les eaux du Sahara septentrional oriental et possibilité de traitement. E.I.N. International, N°6, pp 47-54.

Ake, G. E., Dongo, K., Kouadio, B. H., Dibi, B., Saley, M. B. et Biemi, J. 2009. Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à L'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud- Est de la Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, ISSN 1450- 216X, Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. et Hack, G. 1987. A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035).

ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). 1993. Etude hydrogéologique de la région d'El-Oued: contribution au problème de la remontée des eaux de la nappe phréatique. RepTech. ANRH, Ouargla, 47 pp.

ANRH .1999. Inventaire de forages et enquête sur les débits extraits de la wilaya d'El Oued. Agence nationale des ressources hydrauliques, Direction régionale Sud-est, Ouargla.

Antonakos, N. et Lambrakis, A. 2000. The hydrogeochemistry of the lake Wako drainage basin, Texas. Environmental Geology, Vol. 45 (1): 106-114.

Bel. F., et Demargne F. 1966 : Etude géologique du Continental Terminal ; DEC, ANRH, Alger, Algérie, 24 planches, 22p.

Besbes, M. et Jarraya, H.F. 2007. Définition d'un réseau de surveillance piézométrique du système aquifère du Sahara septentrional. Sécheresse 2007 ; 18 (1) : 13-22

Boubir, H. M. N. et Abdallah, F. 2009. Le rôle des services et des investissements dans l'hypertrophie de la ville d'El Oued au bas Sahara algérien. Environnement Urbain/Urban Environment, vol. 3, p. c-1-c-18.

BG (Bureau d'étude Bonard et Gardel). 2002. Vallée du Souf : Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation, Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission II. (2002). 111p.

BG (Bureau d'étude Bonnard et Gardel). 2003. Rapport sur les essais de pompages dans la nappe phréatique du souf. 96p

BG (Bureau d'étude Bonnard et Gardel). 2004. Vallée du Souf. Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation - Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe Phréatique.

Bouchahm. N., Achour.S. 2008. Hydrochimie des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien – Identification d'un risque de fluorose endémique. La houille blanche, N° 02, pp76-82.

Bouhlassa, Saidati., Alechcheikh, Charifa. et Kabiri, Lahcen. 2008. Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). Sécheresse. Volume 19, Numéro 1, 67-75, janvier-février-mars 2008.

Bouselsal, B. et Kherici, N. 2014. Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérie). Afrique Science, Vol.10, N°3, 1 septembre 2014.

Bouziane, MT. et Labadi, A. 2009. Les eaux profondes de la région de Biskra (Algérie). European Journal of Scientific Research. Vol.25, N°04, pp.526-537

BUSSON, G. 1967. Le Mésozoïque saharien. 1ère partie : L'Extrême Sud-tunisien. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 8, 194 p. Ed. C.N.R.S.

Busson, G. 1970 : Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 11, 811p. Ed. C.N.R.S.

Busson, G. 1971. Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Edit., Paris, 464p.

CASTANY, G. 1982. Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334p.

Chapellier, D.2000. Cours de géophysique. Résistivités électriques. Univ Lausanne. Suisse. 102p.

Civita, M. 1990. La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento [Assessment of aquifer vulnerability to contamination]. Proc. 1 st Conv. Naz. « Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Techologie e Obiettivi », Marano sul Parano, v. 3, p. 39-86.

Civita, M.V. 1995. A methodology for delineation and design of spring protection area system. Publ. No. 159 de GNDI-CNR, Task unit 4.1.

Civita, M.V. et De Maio, M. 1997. Assessing groundwater contamination risk using ARC/INFO via GRID function._32 p.

Collison, E.J., Riutta, T. et Slade, E.M. 2013. Macrofauna assemblage composition and soil moisture interact to affect soil ecosystem functions. Acta Oecologica 47, 30-36.

Cornet, A. 1964. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géographie Physique et Géologie Dynamique. Vol.VI. 1964. fascl,pp.5-72.

Cote, M. 1993. Une région saharienne malade de trop d'eau. Le Souf. Rapport, 17p.

Cote, M. 2001. Souf 2001 : l'Agriculture peut-elle résoudre le problème de la remontée de la nappe ? BG. Lausanne

Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S. et Goldscheider. 2002. Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal 10, 340-345.

Debieche, Taha-Hocine. 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse doctorat. Univ Franche-Comté (France). 235p.

Derradji, F., Kherici, N., Romeo, M. et Caruba, R. 2004. Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien). Sécheresse 2004 ; 15 (4) : 353-60.

Deshmukh, A.N., Wadaskar, P.M., Malpe, D.B. 1995. "Fluorine In Environment: A Review." Gondwana Geol. Mag, vo1.9: pp. 1-20.

Djidel, M. 2008. Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d’Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Th. Doctorat, Univ. d’Annaba, 208 p.

Doerfliger, N., Plagnes, V., Kavouri, K. et Gouin, J. 2009. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France. 105.

Ducommun, R. 2010. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain. UNINE, Neuchâtel, Suisse. 310.

Emberger, L. 1955. Une classification biogéographique des climats. Trav. Inst. Bot. Montpellier, 7, 3-43.

ENAGEO. 1993. Rapport d’étude géophysique dans la vallée du souf. 16p.

Engel, B.A., K.C.S. Navulur, B.S. cooper, L. et Hahn. 1996. Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. Int. Assoc. Hydrol. Sci., 235. 521-526.

Fabre, J. 1976. Introduction à la géologie du Sahara d’Algérie et des régions voisines. SNED, Alger, 421p.

Fehdi Chemseddine, Boudoukha Abderrahmane, Rouabchia Abdelkader et Salameh Elias.2009. Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien). Afrique SCIENCE 05(2) (2009) 217 – 231.

Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. & Van Waegeningh , H.(eds) Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, 69–86.

Foufou, Atif. 2008. Influence de la décharge de Berka Zerga sur la qualité des eaux de la plaine de l’Oued Zied, (Annaba). Mémoire de magistère. Univ Annaba. 146P

Futter, M.N., Ring, E., Högbom, L., Entenmann, S. et Bishop, K.H. 2010. Consequences of nitrate leaching following stem-only harvesting of Swedish forests are dependent on spatial scale. Environmental Pollution 158, 3552-3559.

Ghebouli, M.S. 2010. Utilisation des A.C.P et des rapports caractéristiques dans l'explication du chimisme des eaux souterraine cas de la plaine de Bir Haddada (Sud de Setif). Sciences & Technologie D – N°32 Décembre (2010), pp. 51-59.

Goldscheider, N. and Klute, M.S.H. 2000. The PI Method - a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Zeitschrift für angewandte Geologie 46,3, 157 - 166.

Gouaidia, Layachi. 2008. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana (NE Algérie). Thèse doctorat. Univ Annaba. 199p.

Guendouz A, Moulla A.S, Remini, B, Michelot J.L. 2006. Hydrochemical and isotopic behaviour of a Saharan phreatic aquifer suffering severe natural and anthropic constraints (case of Oued- Souf region, Algeria). Hydrogeol J 14:955–968.

Hamza, M.H., Added.A., Frances. A., Rodriguez. R. AJMI, M. et Saâdi, A. 2008. Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Metline-Ras Jebel- Raf Raf (N-E tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. Revue des sciences de l'eau /Journal of Water Science, vol.21, n°1, pp.75-86.

Hamza, M.H., Added.A., Frances. A. and Rodriguez. R. 2007. Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf . CR Geoscince 339:493–505, 2007.

Kachi, S., Kherici, N. et Kachi, N. 2007. Vulnerability and Pollution Risks in the Alluvial Aquifer of Tebessa-Morsott ; American Journal of Environmental Sciences 3 (4): pp 218-223

Kaid, Rassou.K. 2008. Étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia. Thèse doctorat. Univ CADI AYYAD MARRAKECH- MAROC. 214P

Khechana, S. 2014. Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien). Th. Doctorat, Univ.de Annaba, 148 p.

Khelfaoui, Hakim. 2014. Modélisation des écoulements et de transport de masse dans une région industrielle : Exemple dela nappe de Berrahal, Nord-Est Algérien. Thèse doctorat. Univ Annaba. 210P

Kherici, N., Zouini, D. et Kherici, H. 1996. Origine de la remontée des eaux de la nappe superficielle de Souf (Nord-Est du Sahara Septentrional Algérien). Association Espanola de Hidrologia Subterranea. Hidrogeologia 12:49–59.

Kherici, N. et al. 2010. A new graphic for the determination of the vulnerability and risk groundwater pollution Geographia Technica, n°1,2010, 17-24

KILIAN. C. 1931. Les principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. Géol. Fr. Paris.

Lallemand-Barres, A. 1994. Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions ; étude documentaire préliminaire. Rapport BRGM/ R37928.

Laouini SE, Lajdel S et Ouahrani M. 2009. Physico-chemical characteristics and quality of feed water of the El-Oued city study of case (fluorine and arsenic). Journal of fundamental and applied science.2009, 1(2), 13-22p.

Layachi, G. et al. 2011. Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées : cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). S_echeresse 2011 ; 22 : 35–42

Lorianne, Thüler. 2014 : Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. Th. Doctorat, (2014), Université de Neuchâtel 2014 / 183p.

Maoui, Ammar. 2007. Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise .Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Th. Doctorat, Univ. d'Annaba, 298 p.

Margat, j. 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (Groundwater vulnerability to contamination) (in French). Base de la cartographie. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Orléans, France.

Mazet, Pierre .2002. Les eaux souterraines riches en fluor dans le monde. UNIV de Montpellier II. Rapport de stage. 45P

Meziani, A. et al. 2011. The Aquifer System of the Souf Valley Algerian Northern Sahara. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.65 No.3, pp. 416-423.

Michel, Chouteau. et Bernard, Giroux. 2006. Géophysique appliquée II. Méthodes électriques. Notes de cours. Univ lavel. Canada. 81p.

Miloudi, Abdel-Monem. 2008. Mécanismes et remèdes de phénomène de la remontée des eaux dans la région d'Oued Souf. Mémoire magistère en hydraulique. Univ Ouargla.116p.

Mohamed, R.M. 2001. Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'el madher, nord-est algérien, selon la méthode drastic. Sciences et changement planétaires / sécheresse, 12(2): 95-101.

Nezli Imed Eddine. 2009. Approche hydrogéochimique a l'étude des aquifères de la basse vallée de l'oued m'ya (Ouargla). th. Doctorat, univ.de Biskra, 143 p.

OMS. 2002. "Fluoride in drinking water." Environmental health information section, WHO Headquarters OffIce in Geneva, 20 Avenue Appia, 12 1 1 Geneva 27, Switzerland.

OSS (Observatoire Sahara et Sahel). 2003. Système aquifère du Sahara septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie.

Person. 1978. Physico-chemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds. Water Science and Technology 1978; 19 (12):145-152.

Piper, A.M. 1994. Graphical interpretation of water analysis, Transactions of the American Geophysical Union. 25:914 -928.

Ravbar, N. 2007. The Protection of Karst Waters: A Comprehensive Slovene Approach to Vulnerability and Contamination Risk Mapping. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU.

Reemtsma, T., Alder, L., Banasiak, U. 2013. Emerging pesticide metabolites in groundwater and surface water as determined by the application of a multimethod for 150 pesticide metabolites. Water Research 47, 5535-5545.

B. REMINI, B. 2006. La disparition des ghouts dans la région D'EL OUED (Algérie). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05, Juin 2006, pp.49-62.

Richard L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural handbook 60. Washington, DC: USDA, 160p.

Rodier, J. 1980. Analyse de l'eau 6^{ème} Ed. Dunod. P 218-228.

RODIER. J. 1984. L'analyse de l'eau, 7^{ème} édition DUNOD, 1353p.

Rodier J. 1996. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^{ème} édition Dunod, Paris.

Rouabchia, A., Baali, F., Kherici, N. et Djabri, L .2004. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). Sécheresse; 15 (4) : 347-52

Saibi, H. 2003. Analyse qualitative des ressources en eau de la vallée de l'oued Souf et impact sur l'environnement, région aride à semiaride d'El-Oued (Qualitative evaluation of Oued-Souf valleywater resources and their impact on the environment). Thesis, Houari Boumediène University, Algiers, Algeria, 200 pp

Saibi, H., Semmar, A., Mesbah, M. and Ehara, S. 2009. Variographic analysis of water table data from the Oued-Souf phreatic aquifer, northeastern part of the Algerian Sahara. Arabian Journal of Geosciences (2009) 2 :83-93.

Scholler, H. 1956. Géochimie des eaux souterraines : Application aux eaux de gisement de pétrole. Paris, 213p.

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

Sedrati, Nassima. (2011). origines et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de Biskra-sud est algérien. Thèse doctorat. Univ Annaba. 252p.

Shemes, G.P. 1999. Depratment of the Environment and Local Government, E.P.A.a.G.S.o.I. Dublin. Ireland. 24.

Senoussi, M. et Aouat, M.A. 1992. Etude géophysique par sondages électriques de la région de Souf. Rapport ENAGEO. 40P.

Thomas, A. and Tellam, J. H. 2006. Modelling of recharge and pollutant fluxes to urban groundwaters. Sc Tot Env, 360: 158-179.

UNESCO. 1972. Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional. (7 vols. et annexes). UNESCO, Paris, France.

Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., and Jiménez, P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Hydrogeology Journal 14, 912 - 925.

Vrba, J. et Zaporozec, A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, Hannover, Netherlands.

WCCR (Water Contamination Control Regulations), 1991. Official Paper. Ankara, No. 19919.

Wilcox, L.V. 1948. "The quality of water for irrigation use". Technical Bulletin 962. Washington, U.S. Department of Agriculture, 40p.

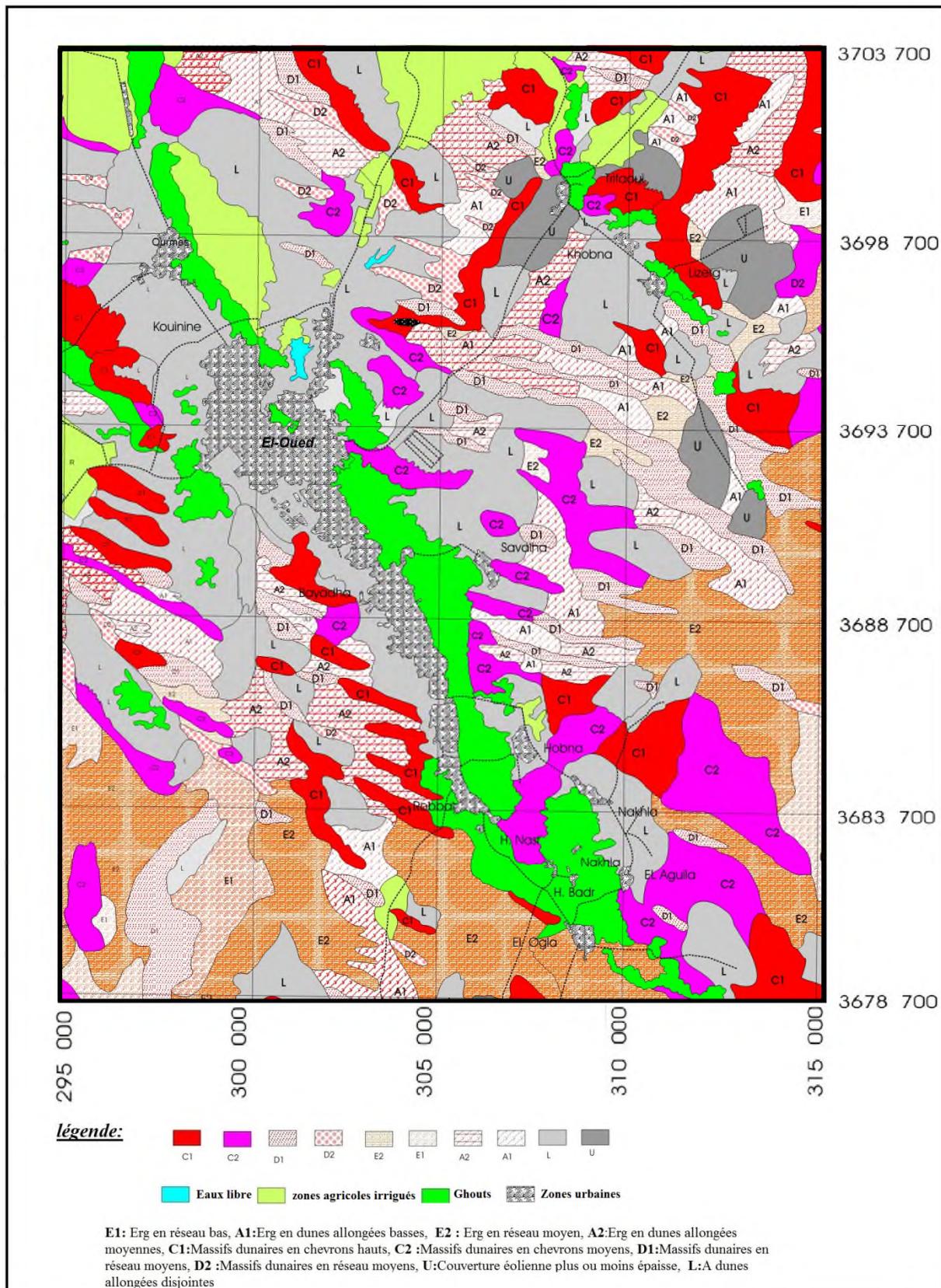
World Health Organisation (WHO). 2006. Guidelines for Drinking-water Quality. Recommendations, 3rd edition, vol. 1. WHO, ISBN 92 4 154696 4, 595 pp.

Yahia, Alwathaf. and al. 2011. Assessment of Aquifer Vulnerability Based on GIS and ARCGIS Methods: A Case Study of the Sana'a Basin (Yemen). Journal of Water Resource and Protection, 2011, 3, 845-855.

ZINE, Brahim. 2009. La remontée des eaux souterraines en surface: mécanisme et l'impact sur l'environnement (Cas de Oued Souf). Mémoire magistère en hydraulique. Univ Batna. 145p.

Annexe

Annexe 1: carte d'occupation du sol de la zone d'étude (OSS 2010)



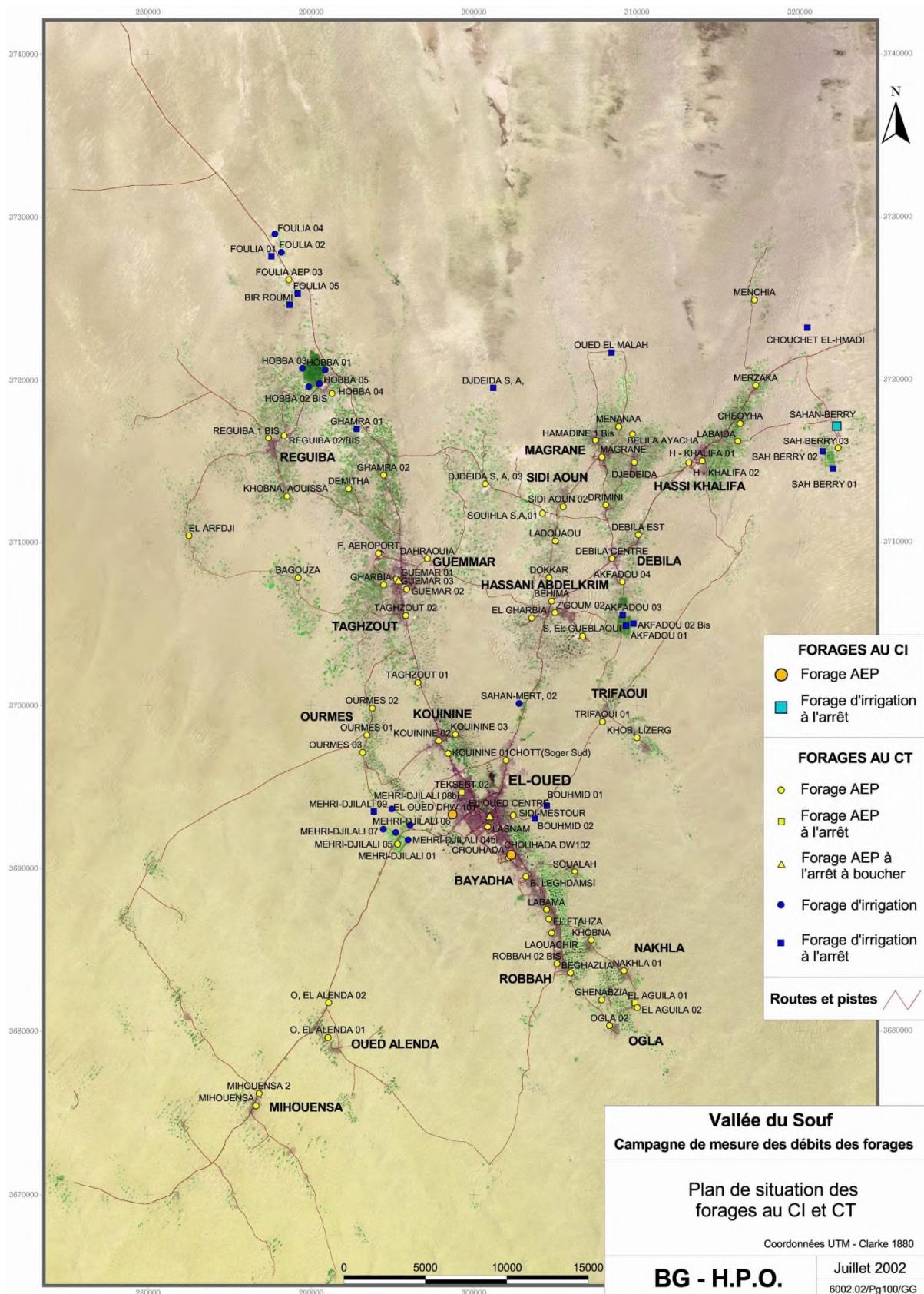
Annexe 2 : Répartition de la superficie et nombre d'habitant et la densité apparente par commune de la Wilaya d'El-Oued (2010).

N°	Commune	Population (hab)	Superficie (km ²)	Densité hab/km ²	N°	Commune	Population (hab)	Superficie (km ²)	Densité hab/km ²
1	El Oued	140625	77	1826,299	16	Bayadha	34185	139	245,9353
2	Kouinine	10590	116	91,2931	17	Oued el Alenda	7020	712	9,859551
3	Réguiba	42420	1966	21,57681	18	Mih Ouansa	17045	1111	15,34203
4	Guemar	41225	1264	32,61472	19	Hamraia	5420	2443.82	
5	Taghzout	14485	539	26,87384	20	Taleb Larbi	7965	1110	7,175676
6	Ourmés	6060	443	13,67946	21	Ben Guecha	2930	2642.18	
7	Débila	26160	78	335,3846	22	Douar El Maa	6000	17852.5	
8	Hassani Abdelkrim	23890	58	411,8966	23	El Meghaier	51680	1532	33,73368
9	Hassi Khalifa	33115	1112	29,77968	24	Sidi Khalil	6740	840.33	
10	Trifaoui	8640	474	18,22785	25	Still	5280	904.8	
11	Magrane	25450	618	41,18123	26	Oum Tiour	11320	2116.37	
12	Sidi Aoun	12670	480	26,39583	27	Djamaa	53045	780	68,00641
13	Robbah	22910	499	45,91182	28	Sidi Amrane	22350	552	40,48913
14	Nakhla	13300	700	19	29	Mrara	8410	1131.66	
15	El Oglia	6380	1352	4,718935	30	Tendla	9410	977.9	
						Total	676720	44586	15.17

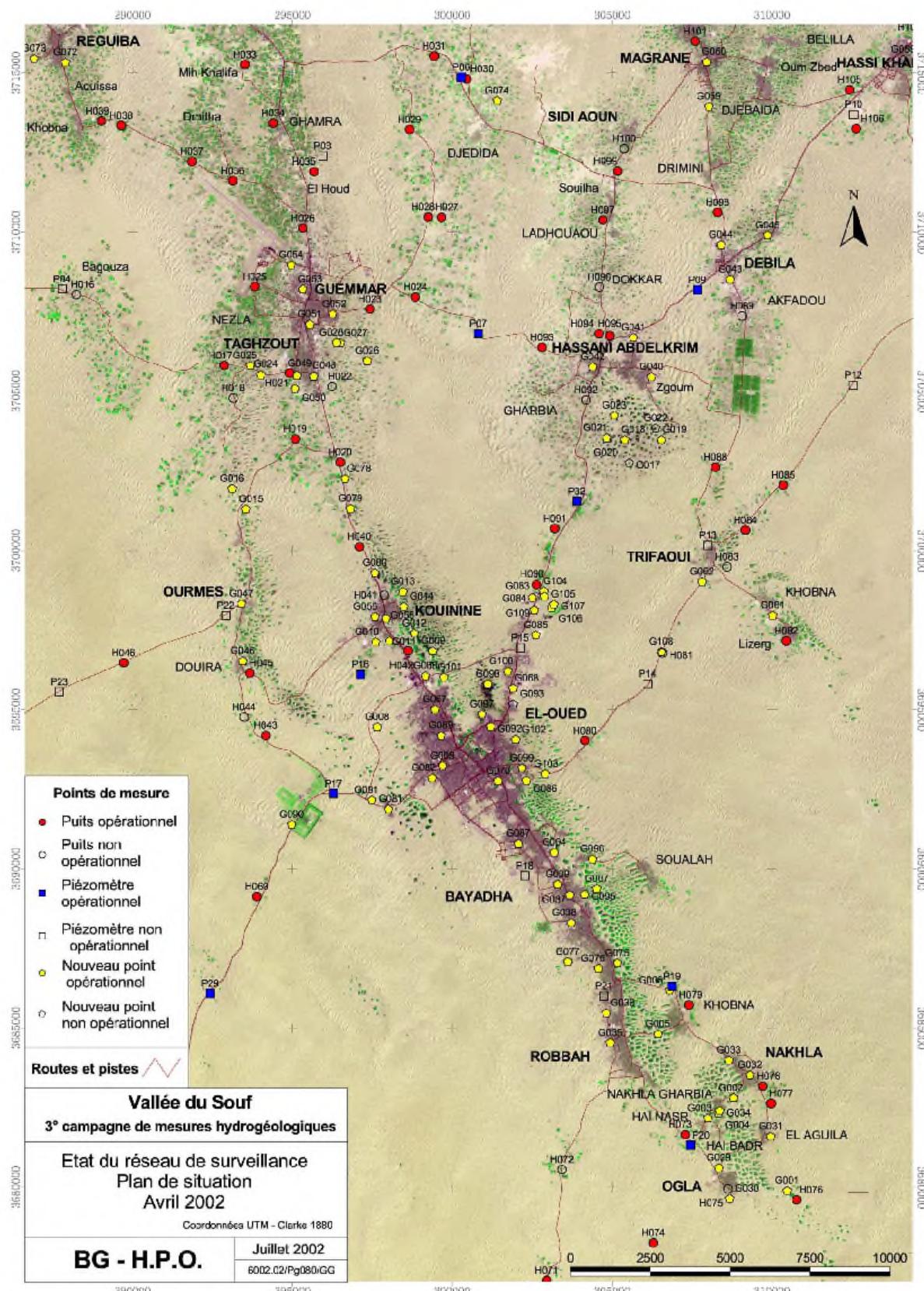
Annexe 3: Profondeur de substratum argileux de l'aquifère libre (1^{ère} compagnie géophysique de l'ENAGEO 1993).

N° SEV	X	Y	Prof de substratum (m)
32	881,781861	324,48629	60
33	879,270517	321,665857	65
34	879,502333	322,709031	72
35	880,236419	323,249936	70
36	881,20232	323,674932	70
37	882,013678	323,59766	60
38	882,438675	322,245398	65
39	882,359167	321,295781	58
40	882,901988	320,305931	62
41	883,444809	319,411873	67
42	883,891838	318,070786	63
43	884,753965	316,857422	50
44	885,424509	316,218809	37
45	885,99926	315,005445	43
48	887,583393	315,292053	82
50	887,750178	316,959907	63
51	888,146294	317,96062	68
52	888,062901	318,87794	70
53	888,438168	319,920349	52
54	888,84165	320,963958	70
55	889,300636	321,740703	64
56	889,759621	322,764594	62
57	889,724314	323,823791	52
58	888,912263	323,929711	67
96	892,231082	305,46437	55
95	891,913322	306,347034	60
99	891,807403	307,265005	52
100	891,383724	308,182976	53
101	891,242497	308,853801	58
102	890,677592	309,454013	56
103	890,324526	310,124838	56
90	886,334883	313,937949	64
91	885,558138	313,373043	55
92	885,063846	312,808138	62
93	884,71078	312,102007	62
94	884,110568	311,537101	64
117	892,795987	324,882988	75
118	893,466812	324,14155	68
119	893,431505	323,047046	68
120	893,749265	321,917236	60
124	892,97252	319,516388	58
125	892,584147	318,633724	54
126	892,019242	317,856979	56
127	891,383724	316,974314	63
128	890,924738	316,021037	57
129	890,253913	315,032453	55
130	889,583088	314,291014	67
140	879,520713	319,728228	55
141	879,202954	317,821672	70
142	880,438684	316,409409	40
143	881,568495	314,820613	60
144	882,733612	313,796722	35
145	883,934035	312,525686	40
146	883,227904	309,877692	53
147	881,92156	307,865217	58
148	880,242536	306,551028	50
149	879,026421	304,746469	60

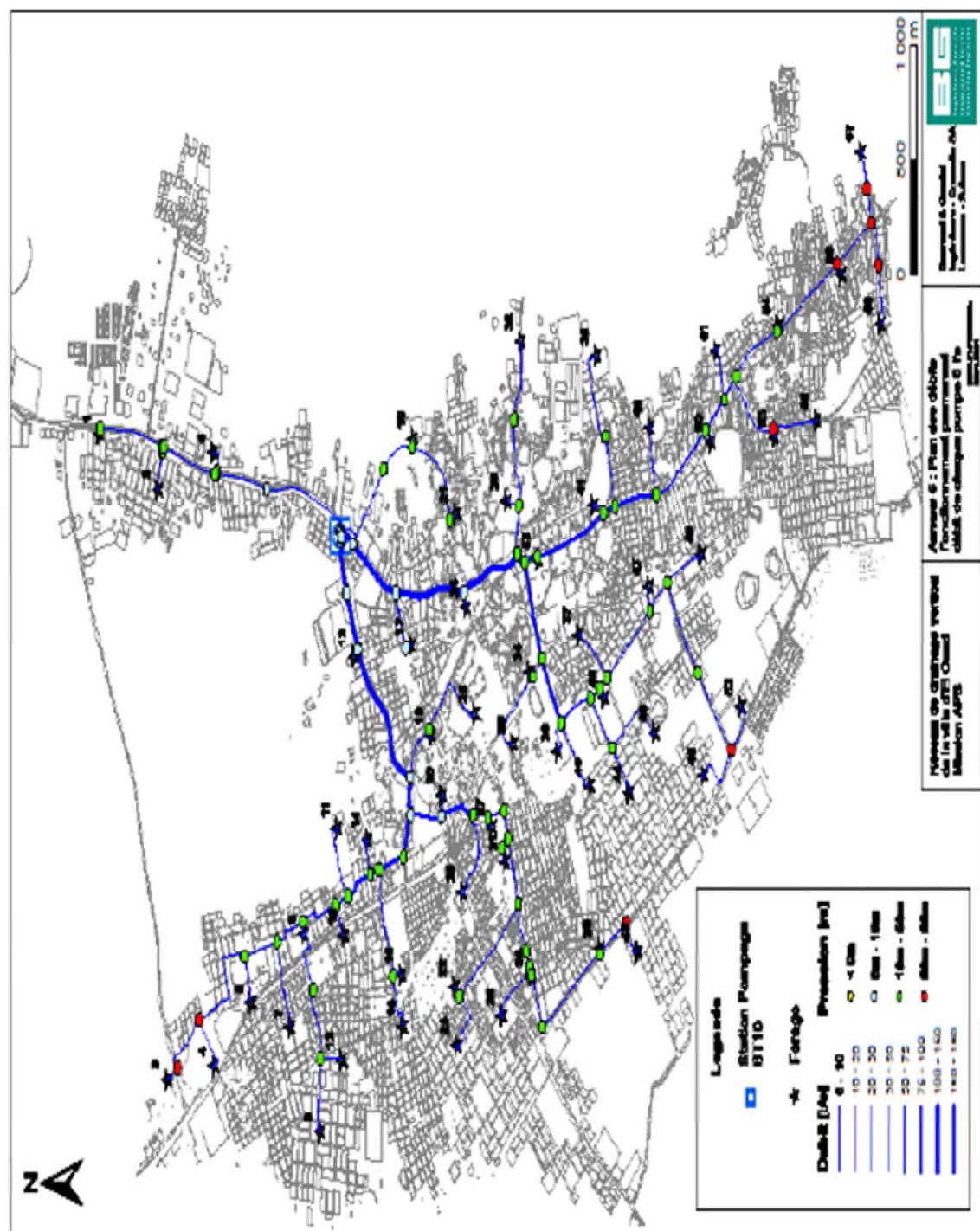
Annexe 4: Inventaire des forages de continental intercalaire et de complexe terminal d'El Oued Souf (BG 2002).



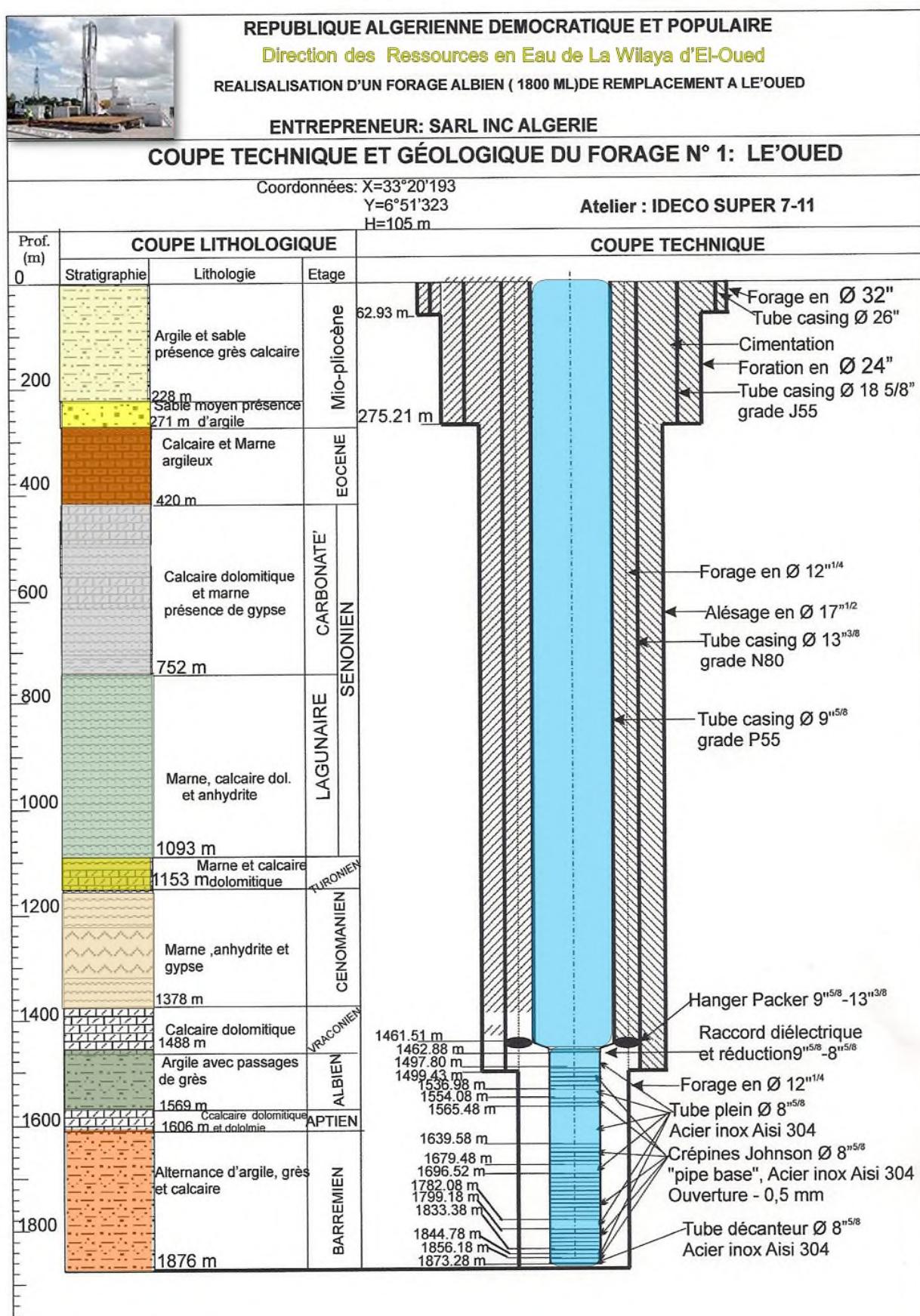
Annexe 5 : Inventaire de réseau de surveillance d'El Oued Souf en avril 2002 (BG 2002)



Annexe 6 : réseau de drainage vertical d'El Oued.



Annexe 7 : Coupe lithostratigraphique et technique de forage de CI (DW 102) d'El Oued.



Annexe 8:les valeurs de perméabilité obtenue par la méthode de Muntz (BG 2003)

Lieu	X	Y	K (10^{-4} m/s)
Hassani Abdelkrim	301904	3707166	3,52217
Ghamra	296983	3715673	2,05814
Lizerg	311464	3698276	2,69467
Hassi Khalifa	310957	3714446	2,63102
Ourmes	289512	3696739	2,05814
Mih Ouensa	285532	3677602	2,15362
Oued Alenda	291544	3680725	2,54615
Ogla	308003	3678963	1,86718
Nakhla	309574	3685345	1,85657
Reguiba	282794	3720478	0,79567
Foulia	287164	3728350	0,78506
Hassi Khalifa	318920	3717337	0,5623
El-Oued	299719	3693188	2,04753
El-Oued	301426	3692239	1,58073
El-Oued	299494	3695283	2,12179
Bayadha	303828	3688596	1,45343
Debila	308635	3709160	1,28368
Guemmar	296185	3707663	0,93359
Hassani Abdelkrim	304506	3706063	0,73202
Hassi Khalifa	314191	3715221	1,01846
Kouinine	298252	3698445	1,0662
Magrane	307944	3714964	1,01846
Mih Ouensa	286277	3675574	1,31551
Nakhla	309152	3683831	1,67621
Ogla	308601	3680636	1,63378
Oued Alenda Nord	290307	3680524	1,43221
Oued Alenda Sud	291335	3679096	2,44006
Ourmes	293532	3698807	2,58858
Reguiba	287475	3716264	1,37916
Robbah	304989	3685758	1,80352
Sidi Aoun	305616	3713466	1,54891
Taghzout	295441	3705582	2,19605
Trifaoui	308037	3700322	1,27307
Drimini	308281	3712528	1,40038
Foulia	288630	3726476	1,27307
Ghamra	294542	3713273	1,32612
Hobba	291083	3719704	1,08211
Khobna	306848	3685507	1,52769
Lizerg	310442	3697896	1,55952
Oum Zbed	309767	3715720	0,8275
Soualah	306078	3690120	1,97327
Z'Goum	306138	3705820	1,66561

Annexe 9 : Crépine à double paroi utilisée pour capter la nappe de continental intercalaire.



Annexe 10 : photos présentent la zone d'étude.



Les formations gypseuses de Kouinine



zone agricole à l'Est de Bayadha



Ghout inondé recouvert de roseaux dans la ville d'El Oued (2014)



Zone de rejet de la ville d'El-Oued



Point d'échantillonnage pour l'étude géotechnique et hydrochimique (2012)

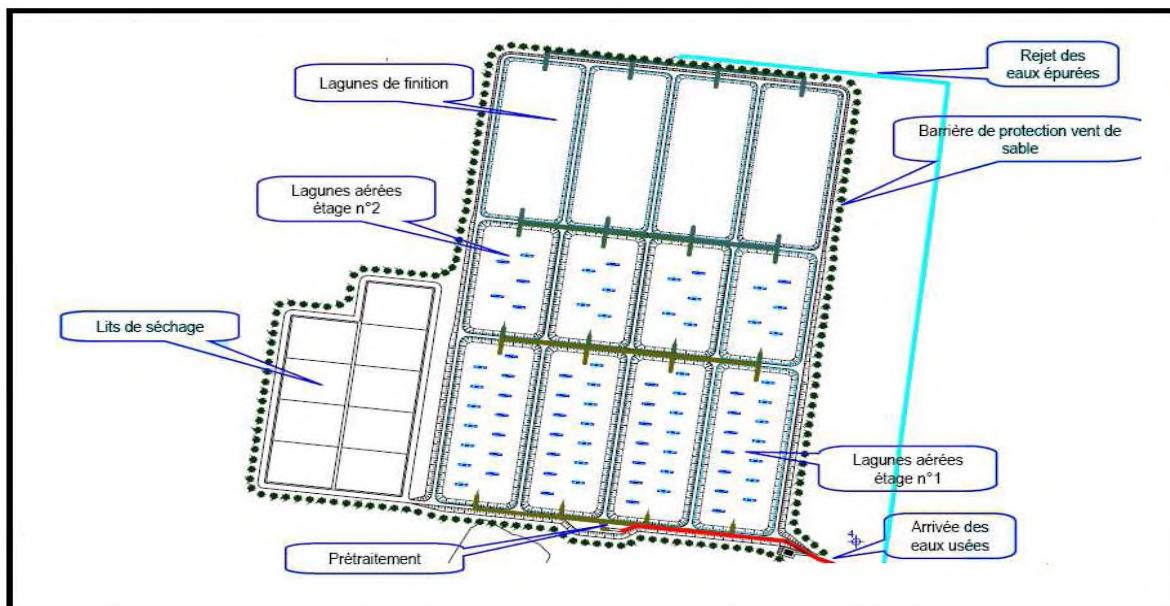


Fumiers de poulaillers apportés par des camions des régions de Nord (Batna et Biskra)

Annexe 11: Photos prises en 1993 présentent un Ghout inondé au centre ville d'El Oued.



Annexe 12 : présentation de STEP de Kouinine.



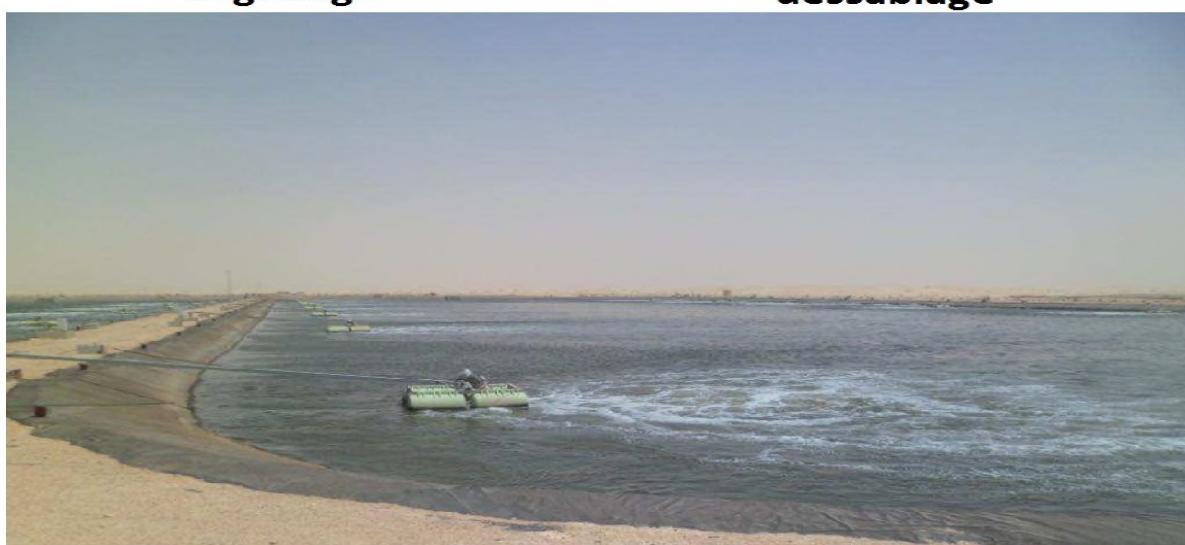
Plan générale de la station d'épuration de Kouinine.



dégrillage



déssablage



Lagune aérée