

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2008

Faculté des Sciences de la Terre
Département de géologie

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option: Géosciences

THEME

**Impact des eaux du rejet sur la qualité des eaux de la
nappe libre d'Oued Souf**

Présenté par : DROUICHE Abdelmalek

Directeur de mémoire: Mr CHAAB Salah

Mc. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

DEVANT LE JURY:

Président: Mr OUNISSI Makhlouf

Pr. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Examineurs: Mr SAADIA Bachir

Mc. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Mr KHANCHOULE Kamel

Mc. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

ملخص :

تعاني منطقة سوف من ظاهرة صعود المياه الجوفية التي تسببت في مشاكل عويصة. شبكة الصرف الصحي لا تغطي إلا جزء من مدينة الوادي تجعل الوضعية أكثر مأساوية. حاليا تقوم مصالح الولاية بإنجاز شبكة صرف صحي تغطي المدينة ومختلف البلديات التي ستصبح عملياتية في السنوات القادمة. في الوقت الحالي توجد منطقة تقع شمال شرق الوادي هيئت حتى يتم صرف مياه التجفيف (نظام لخفض مستوى الماء) والمياه القذرة في هذه الأخيرة دون أي معالجة مسبقة.

في هذا المنحى, تعالج الدراسة المقدمة المظهر الهيدروجيولوجي للجيب المائي السطحي بوادي سوف وبالأخص خطر التلوث بهذه المنطقة وتأثيرها على المياه الجوفية.

خلال سنة 2007 قمنا بثلاثة خرجات ميدانية للقيام بتحليل كيميائية لمياه المنطقة بهدف معرفة تأثير تلوث منطقة التفريغ على الجيب المائي السطحي وذلك من خلال إنجاز خريطة لمؤشرات التلوث العضوي, هذه الأخيرة بينت بأن الطبقة الرملية ذات قوة تصفية ذاتية عالية مما يقلل نوعا ما من تأطير الملوث العضوي. إن قياس معاملات التصفية الذاتية للرمل في المنطقة أعطت قيمة منخفضة لمعامل التصفية الأفقي مما يؤكد هذا المسعى. نعتبر أن تراكيز بعض العناصر الطبيعية عالية مما يطرح مشكل حقيقي حول صلاحية هذه المياه خاصة للشرب .

الكلمات المفتاحية : جيب مائي سطحي, وادي سوف, التلوث العضوي, منطقة التفريغ و

صعود المياه.

Abstract

The Wilaya Oued Souf suffers from a huge problem "the rise of underground water ", which caused a total degradation of its quality, Suite mixture of the latter with the cesspits in the absence of a sewerage network overall. This problem affected especially the center of El Oued what prompted the authorities of the wilaya to achieve a sewerage system for collecting local urban discharges from the center of El Oued, and the evacuation to the West (Chott region) in the open air outside any protective measures.

This study deals with the risk of pollution in the discharge area in the west of the center of El Oued (SE Algerian), notice that entropic and natural have caused this pollution which have been multiplied in the region.

Three companions measuring hydrochemical were made at the end of developing a card index of organic pollution; the latter showed that the silt autoépuratoire high power prevents organic pollutants reaching the aquifer with high concentration. These results were confirmed by determination of the parameters on two samples taken in the region and gained from low values of dispersivity longitudinal. However geological contamination was marked by high levels of natural elements (Na^+ , Ca^{++} , SO_4^- , Cl^-), which asks a problem concerning the ability of these waters to different uses. Key words: aquifer; Organic pollution, Oued Souf; Discharge; Settings hydrodispersifs,

Résumé :

La région de l'Oued Souf souffre du phénomène de la remontée des eaux de la nappe libre, qui cause de graves problèmes. Le réseau d'assainissement qui ne couvre qu'une partie de la ville d'El-Oued rend la situation plus dramatique. Les autorités de la wilaya sont entrain de réaliser un réseau d'assainissement couvrant la ville et ses différentes communes et qui sera probablement opérationnel dans les années à venir. A l'heure actuelle une zone, située au Nord-Est de la ville d'El-Oued, a été aménagée pour que les eaux de drainage (système pour rabattre la nappe) et les eaux usées soient déversées directement sans aucun traitement préalable.

Dans cet esprit la présente étude traite de l'aspect hydrogéologique de la nappe libre de l'Oued Souf et plus particulièrement des risques de pollutions de cette zone et de son influence sur les eaux souterraines de la nappe libre.

Trois campagnes de mesures hydrochimiques ont été faites durant l'année 2007 dont l'objectif serait de définir l'influence de la pollution de la zone de rejet sur la nappe libre par l'établissement d'une carte de l'indice de pollution organique. Cette dernière a montré que le terrain a un pouvoir autoépuratoire élevé ce réduit considérablement les effets de la pollution d'origine organique. La détermination des paramètres hydrodispersifs au niveau de la zone de rejet dont les valeurs de la dispersivité longitudinale α_L sont faibles ce qui confirme cette tendance. Nous constatons que les teneurs de certains éléments majeurs naturels (Na^+ , Ca^{++} , SO_4^{--} , Cl^-) sont élevées ce qui pose un sérieux problème pour l'aptitude de ces eaux surtout pour l'AEP.

Mots clés : nappe aquifère, Oued Souf, pollution organique, rejet et remonté des eaux.

Remerciement

Au moment où je termine mon mémoire, je ne manque d'adresser mes sincères remerciements à notre Dieu le grand créateur qui m'a guidé dans mes pas pour arriver à ce niveau..

Nombreuses sont les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail, aux quelles je dois avec plaisir, présenter mes remerciements:

-J'ai l'honneur d'avoir comme encadreur monsieur CHAAB Saleh, qui n'a pas hésité à me faire confiance, et d'avoir me partager son énorme expérience, je tiens également à le remercier pour ses conseils et son soutien. Ainsi qu'au Professeur OUNISSI Makhlouf qui m'a introduit dans le laboratoire de Biologie marine et pour sa précieuse aide lors des analyses chimiques des eaux,

J'adresse également mes vifs remerciements aux membres de jury SAADIA B, KHANCHOUK K pour avoir bien voulu lire, commenter et débattre mon travail.

Je tiens a remercier spécialement Mr MOULATI Abdazize du groupe de BG pour son aide dans la collecte des données.

Je tiens aussi à remercier tous les gens de la D.H.W d'El-Oued pour leur aide.

Je tiens a remercier aussi DRIDI Abdelkader pour son aide en matière de réactifs

Mes remerciements sont dressées à Mrs SALIM Khachana, BEN RABAA Kamel, SAKTA Hocine et SAKAR Imade Pour leur aide sur le terrain.

Mes vifs remerciements pour ZAHY F, MEDJANI F, KHAMARH et HAID N qui ont m'aidé aux analyses dans le laboratoire je leur dis un grand merci pour leur soutien durant tous les moment difficiles.

J'aime remercier BOUAKAZ A, Youcef et DROUICHE F et ZAIR N qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Je remercie toute personne, qui de près ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de ce travail.

-Si par mégarde, j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié pour tous.

Abdelmalek

Table des matières

Titre	Page
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : Situation géographique</i>	
1. Situation géographique.....	3
2. Le relief de la région.....	3
3. Climat et végétation.....	3
4. Aperçu socioéconomique.....	4
<i>Chapitre II : Etude géologique</i>	
1. Géologie régionale.....	7
2. Géologie locale.....	7
3. Stratigraphie.....	8
3.1. Le secondaire.....	8
3.2. Le Tertiaire.....	10
3.3. Quaternaire.....	10
4. Interprétation des coupes géologiques.....	12
<i>Chapitre III : Etude Géophysique</i>	
1. Introduction.....	14
2. Mesure de la résistivité du sous-sol.....	15
3. Sondage électrique.....	17
4. Exécutions des mesures.....	19
5. Théorie d'interprétation des sondages électriques.....	20
5.1. La méthode de superposition à l'aide des abaques.....	20
5.2. La méthode de HUMMEL dite aussi de réduction (Partial Curve Matching).....	20
5.3. La méthode comparative à l'ordinateur.....	21
6. Représentation des résultats.....	22
6.1. Carte de résistivité apparente pour différents AB.....	22
6.2. Carte du toit du substratum.....	22
6.3. Coupes géoélectriques.....	22
7. L'objectif de l'étude.....	23
8. L'exécution des mesures.....	23
9. Présentation et analyse des résultats.....	25
9.1. Echelle des résistivités.....	25
9.2. Les coupes géoélectriques.....	32
9.3. Commentaire de la carte du substratum argileux.....	40
10. Conclusion.....	40
<i>Chapitre IV : Etude climatique</i>	
1. Introduction.....	42
2. Les précipitations.....	42
2.1. Répartition interannuelle des précipitations.....	42
2.2. Répartition moyenne mensuelle.....	43
2.3. Répartitions saisonnières des précipitations.....	43
3. La température.....	44
4. Le climat de la région.....	45
4.1. Indice de De. Martonne.....	45
4.2. Le climat – gramme de L. Emberger.....	46
5. Méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls.....	47
6. Méthode d'Euverte.....	48

7. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement.....	48
8. L'humidité relative de l'air.....	50
9. La durée d'insolation.....	50
10. Le vent.....	51
11. Conclusion.....	52

Chapitre V : Etude hydrogéologique

1. Introduction.....	53
2. Cadre hydrogéologique.....	53
2.1. Le Continental Intercalaire (BARREMO-ALBIEN).....	54
2.3. Nappe Phréatique.....	54
2.2. Complexe Terminal (PONTIEN).....	54
3. Aperçu historique.....	55
4. Etablissement et interprétation des cartes piézométriques.....	56
4.1. Interprétation des cartes piézométriques.....	56
4.2. Variation du niveau piézométrique entre Février 1993 et Avril 2002...	61
4.3. Variation du niveau piézométrique entre Avril 2001 et Avril 2002.....	62
5. Interprétation de la carte de perméabilité.....	63
6. Profils de variation de la surface piézométrique.....	63
7. Essais de pompage.....	67
7.1. Débits Spécifiques.....	69
7.2. Essais de pompage de longues durées.....	71
7.2.1. Essai de pompage à El-Oued.....	71
7.2.2. Essai de pompage à Foulia.....	72
7.2.3. Essai de pompage à Kouinine.....	73
7.2.4. Essai de pompage à Mihouensa.....	74
7.2.5. Essai de pompage à Nakhla.....	75
7.2.6. Essai de pompage à Ourmes.....	76
8. Conclusion.....	79

Chapitre VI : Détermination des paramètres hydrodispersifs

1. Introduction.....	80
2. Analyse théorique.....	80
2.1. Notion concernant le milieu poreux.....	80
2.2. Physique des transferts.....	81
2.2.1. La convection.....	81
2.2.2. La loi de Darcy.....	81
2.2.3. Porosité cinématique.....	81
2.2.4. Vitesse effective.....	81
2.2.5. Dispersion.....	81
2.2.6. Dispersion longitudinale.....	82
2.2.7. Dispersion transversale.....	82
2.3. Echanges.....	82
2.3.1. Adsorption Désorption.....	82
2.3.2. Echanges eau libre-eau liée.....	83
3. Manipulation.....	83
4. Détermination graphique des paramètres hydrodispersifs.....	83
5. Conclusion.....	90

Chapitre VII : Etude hydrochimique de la vallée du Souf

1. Introduction.....	91
2.1. Formule caractéristique de STABLER.....	91
2. Les faciès chimiques.....	91
2.2. Diagramme de Piper (Campagne 1995).....	92
2.3. Diagramme de Piper (Campagne 1998).....	92
3. Cartographie hydrochimique.....	93

3.1. Carte du calcium.....	93
3.2. Carte du magnésium.....	93
3.3. Carte du chlorure.....	93
3.4. Carte du sulfate.....	94
3.5. Carte de sodium.....	94
4. Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants.....	94
4.1. Origine des éléments Na^+ et Cl^-	94
4.2. Origine du calcium.....	94
4.3. Le rapport $r \text{Ca}^{++} / r \text{Mg}^{++}$	101
5. Indice d'échange de base (i.e.b).....	101
6. Carte de résidu sec.....	102
7. Cartes des taux des Nitrates (Mars 1993, Mars 1998, Mars 2000 et Avril (2002)).....	104
7.1. Carte de Mars 1993.....	104
7.2. Carte de Mars 1998.....	104
7.3. Carte de Mars 2000.....	104
7.4. Carte de Avril 2002.....	104
8. Cartes de conductivité.....	107
8.1. Carte de Avril 1993.....	107
8.2. Carte de Avril 2002.....	107
9. Variation du taux de nitrates entre Mars 1993 et Avril 2002.....	110
10. Relation entre la conductivité et le résidu sec.....	110
11. Variation de la conductivité entre Avril 2002 et Mars 1993.....	110
12. Le pH.....	110
13. La température.....	112
14. Analyse en composantes principales (A.C.P).....	113
14.1. Principe.....	113
14.2. Résultats et interprétations.....	113
14.3. Application de l'A.C.P aux données chimique des eaux de la nappe libre de Oued Souf.....	114
14.4.1. Projection sur le plan I-II.....	115
14.4.2. Projection sur le plan III-IV.....	115
15. Qualité chimique des eaux.....	115
15.1. Potabilité des eaux.....	115
16. Aptitudes des eaux à l'irrigation.....	118
16.1. La salinité.....	118
16.2. Eaux peu salées.....	118
16.3. Eaux à forte teneur en sodium.....	118

Chapitre VIII : Etude de la pollution dans la zone du rejet

1. Introduction.....	121
2. Méthodes et stratégie de travail.....	121
2.1. Stratégie.....	121
2.2. Prélèvements.....	122
2.3. Mesures in situ.....	122
2.4. Analyse des éléments chimiques.....	122
2.5. Les paramètres de potabilité ou de pollution organique.....	123
3. Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ).....	123
3.1. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	123
3.2. Conductivité électrique.....	124
3.3. La salinité.....	124
4. Les éléments de la pollution.....	125
4.1. Les éléments majeurs.....	125
4.1.1. Calcium (Ca^{++}).....	125
4.1.2. Magnésium (Mg^{++}).....	126

4.1.3. Chlorure (Cl^-) et Sodium (Na^+).....	126
4.1.4. Potassium (K^+).....	128
4.1.5. Sulfates (SO_4^{2-}).....	128
4.1.6. Bicarbonates (HCO_3^-).....	129
4.2. Cycle de l'azote.....	129
4.2.1. Ammonium NH_4^+	130
4.2.2. Nitrites NO_2^-	131
4.2.3. Nitrates NO_3^-	132
4.3. Les éléments mineurs naturels.....	132
4.3.1. Phosphate PO_4^{3-}	132
4.4. Les paramètres de pollution organique.....	133
4.4.1. Les matières en suspensions (MES).....	133
4.4.2. La demande biochimique en oxygène (DBO_5).....	134
5. Etablissement de la carte de l'indice de la pollution organique (IPO).....	134
5.1. La composition chimique globale.....	135
5.2. Les indicateurs géologiques.....	135
5.3. Les indicateurs de pollution organique.....	135
6. Les indicateurs géologiques.....	136
7. Discussion.....	143
8. L'indice de pollution organique (IPO).....	144
9. Interprétation des diagrammes des indicateurs géologiques.....	146
10. Interprétation des cartes de l'indice de la pollution organique.....	146
11. Les indicateurs d'eutrophisation.....	146
12. Conclusion.....	146
Conclusion générale.....	147
Annexe	

Liste des Tableaux

Tableau	Page
Tableau N°01 : Tableau récapitulatif du volume des travaux de terrain.....	25
Tableau N°02 : Echelle des résistivités adoptées.....	32
Tableau N°03 : Précipitations interannuelles (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf....	42
Tableau N°04 : Précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	43
Tableau N°05 : Précipitations saisonnières (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	43
Tableau N°06 : Moyenne des températures mensuelles (1976 – 2006).....	44
Tableau N°07 : Les différents paramètres du climat – gramme de L. Emberger...	46
Tableau N°08 : Les valeurs de P/T déterminées par la Méthode d'Euverte.....	48
Tableau N°09 : Bilan hydrique de la station de Guemmar sur une période de 30 ans (1976-2006).....	49
Tableau N°10 : Humidité relative moyenne mensuelle (1975 – 2006).....	50
Tableau N°11 : La durée d'insolation moyenne mensuelle (1997 – 2006).....	50
Tableau N°12 : La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2006).....	51
Tableau N°13 : Valeurs des débits spécifiques.....	71
Tableau N°14 : Valeurs des Transmissivités et des perméabilités.....	77
Tableau N°15 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon I).....	85
Tableau N°16 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon II).....	88
Tableau N°17 : Classification hydrochimique des eaux souterraines des deux campagnes selon STABLER.....	92
Tableau N°18 : Coefficient de corrélation des paramètres physiques (Conductivité – Résidu sec).....	110
Tableau N°19 : Matrice de corrélation des paramètres chimiques.....	114
Tableau N°20 : Pourcentage de variance exprimée.....	115
Tableau N°21 : Normes de potabilité de l'O.M.S.....	117
Tableau N°22 : Dureté des eaux en °F (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969).....	118
Tableau N°23 : Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.....	119
Tableau N°24 : paramètres et classes de l'IPO.....	135
Tableau N°25 : Tableau récapitulatif des IPO et des indicateurs d'eutrophisation	144

Liste des Figures

Figure	Page
Figure. 01 : Carte de situation de la wilaya d'El-Oued.....	5
Figure. 02 : Carte situation des communes de la wilaya d'El-Oued.....	6
Figure. 03 : Les grandes unités géologiques au Sahara.....	8
Figure. 04 : Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gouskov).....	9
Figure. 05 : Forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH 1993).....	11
Figure. 06 : Coupe Géologique N°01.....	12
Figure. 07 : Coupe géologique N°02.....	13
Figure. 08 : Coupe géologique N°03.....	13
Figure. 09 : Quadripôle de Schlumberger.....	16
Figure. 10 : Equipotentiels de courant dans un sol homogène.....	16
Figure. 11 : Le courant dans le premier terrain de faible résistivité.....	18
Figure. 12 : Utilisation de l'abaque pour deux terrains.....	20
Figure. 13 : Interprétation d'un sondage électrique par ordinateur.....	21
Figure. 14 : Carte des positionnements des SEV (Oued Souf).....	24
Figure. 15 : Forage P56 et Sondage électrique vertical 15.....	27
Figure. 16 : Forage P51 et le Sondage électrique vertical 131.....	27
Figure. 17 : Forage P43 et le Sondage électrique vertical 76.....	30
Figure. 18 : Forage p44 et le Sondage électrique vertical 104.....	30
Figure. 19 : Forage P46 et le sondage électrique 30.....	32
Figure. 20 : La coupe géoélectrique à travers le profil A	33
Figure. 21 : La coupe géoélectrique à travers le profil B.....	34
Figure. 22 : La coupe géoélectrique à travers le profil C	35
Figure. 23 : La coupe géoélectrique à travers le profil D.....	36
Figure. 24 : La coupe géoélectrique à travers le profil E	37
Figure. 25 : La coupe géoélectrique à travers le profil F	38
Figure. 26 : La coupe géoélectrique à travers le profil G	38
Figure. 27 : La coupe géoélectrique à travers le profil H	39
Figure. 28 : La coupe géoélectrique à travers le profil I.....	39
Figure. 29 : Carte isobathe des valeurs du substratum argileux De la nappe libre de Oued Souf.....	41
Figure. 30 : Variation interannuelle des précipitations (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	42
Figure. 31 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	43
Figure. 32 : Histogramme de répartitions saisonnières de précipitations (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	44
Figure. 33 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	45
Figure. 34 : Abaque de l'indice d'Aridité de De. MARTONNE de la vallée du Souf.....	46
Figure. 35 : Clima-gramme de L. EMBERGER de la vallée du Souf.....	47
Figure. 36 : Diagramme Ombrothermique de la vallée du Souf.....	48
Figure. 37 : Histogramme d'humidité relative moyenne mensuelle (1975 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	50
Figure. 38 : Histogramme de La durée d'insolation moyenne mensuelle (1997 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	51
Figure. 39 : Histogramme de La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2006) ONM d'Oued Souf.....	51
Figure. 40 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).....	54
Figure. 41 : Coupe hydrogéologique du Souf.....	55
Figure. 42 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Février 1993)....	57
Figure. 43 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Avril 1993).....	57
Figure. 44 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Juillet 1994).....	58
Figure. 45 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Juillet 1995).....	58

Figure. 46 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Mars 1998).....	59
Figure. 47 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Mars 2000).....	59
Figure. 48 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Avril 2001).....	60
Figure. 49 : Carte piézométrique de la nappe libre d'Oued Souf (Avril 2002).....	60
Figure. 50 : Carte de différence du niveau piézométrique entre Février 1993 et Avril 2002	61
Figure. 51 : Carte de différence du niveau piézométrique entre Avril 2001 et Avril 2002.....	62
Figure. 52 : Carte d'iso valeurs de perméabilité $\cdot 10^{-3}$	63
Figure. 53 : Carte de situation des profils de la nappe phréatique.....	64
Figure. 54 : Profil nord-sud de la nappe phréatique dans l'axe Foulia – El Oued – Ogla.....	64
Figure. 55 : Profil Est-ouest de la nappe phréatique passant pas Magrane.....	65
Figure. 56 : Profil est-ouest de la nappe phréatique par Taghzout.....	65
Figure. 57 : Profil est-ouest de la nappe phréatique par El Oued.....	66
Figure. 58 : Profil est-ouest de la nappe phréatique par Ogla.....	66
Figure. 59 : Carte de situation des sites des essais de pompages (d'après BG et HPO).....	67
Figure. 60 : Essais par paliers à Kouinine Observation dans les puits de pompage aux débits de 4 ; 8.2 et 9.9 l/s (d'après BG).....	68
Figure. 61 : Essai de pompage de longue durée à El-Oued interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	72
Figure. 62 : Essai de pompage de longue durée à Foulia interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	73
Figure. 63 : Essai de pompage de longue durée à Kouinine interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	74
Figure. 64 : Essai de pompage de longue durée à Mihouensa interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	75
Figure. 65 : Essai de pompage de longue durée à Nakhla interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	76
Figure. 66 : Essai de pompage de longue durée à Ourmes interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	77
Figure. 67 : Remontée à Kouinine interprétée par la méthode de Theis (BG et HPO).....	78
Figure. 68 : Essai de pompage de longue durée à Kouinine Interprété par la méthode de Moench.....	78
Figure. 69 : Le perméamètre de mesure.....	83
Figure. 70 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps.....	86
Figure. 71 : graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en fonction de N_p	86
Figure. 72 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps.....	89
Figure. 73 : graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en fonction de N_p	89
Figure.74, A : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mai 1995).....	92
Figure.74, B : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mars 1998).....	93
Figure. 75 : Carte de concentration en calcium pour la période de Mai 1995.....	95
Figure. 76 : Carte de concentration en calcium pour la période de Mars 1998.....	95
Figure. 77 : Carte de concentration en magnésium pour la période de Mai 1995.....	96
Figure. 78 : Carte de concentration en magnésium pour la période de Mars 1998.....	96
Figure. 79 : Carte de concentration en chlore pour la période de Mai 1995.....	97
Figure. 80 : Carte de concentration en chlore pour la période de Mars 1998.....	97
Figure. 81 : Carte de concentration en sulfate pour la période de Mai 1995.....	98
Figure. 82 : Carte de concentration en sulfate pour la période de Mars 1998.....	98
Figure. 83 : Carte de concentration en sodium pour la période de Mai 1995.....	99
Figure. 84 : Carte de concentration en sodium pour la période de Mars 1998.....	99

Figure. 85 : Le couple Na^+ , Cl^- (Mai 1995).....	100
Figure. 86 : Le couple Na^+ , Cl^- (Mars 1998).....	100
Figure. 87 : Le couple Ca^{++} , SO_4^{--} (Mai 1995).....	100
Figure. 88 : Le couple Ca^{++} , SO_4^{--} (Mars 1998).....	100
Figure. 89 : Le couple Ca^{++} , HCO_3^- (Mai 1995).....	100
Figure. 90 : Le couple Ca^{++} , HCO_3^- (Mars 1998).....	100
Figure. 91 : Le couple Ca^{++} , Mg^{++} (Mars 1998).....	100
Figure. 92 : Le couple Ca^{++} , Mg^{++} (Mai 1995).....	100
Figure. 93 : Echange de base.....	102
Figure. 94 : Carte de résidu sec pour la période d'Avril 1993.....	103
Figure. 95 : Carte de résidu sec pour la période d'Avril 1998.....	103
Figure. 96 : Carte de concentration en nitrates pour la période de Mars 1993.....	105
Figure. 97 : Carte de concentration en nitrates pour la période de Mars 1998.....	105
Figure. 98 : Carte de concentration en nitrates pour la période de Mars 2001.....	106
Figure. 99 : Carte de concentration en nitrates pour la période de Mars 2002.....	106
Figure. 100 : Carte des conductivités pour la période de Mars 1993.....	109
Figure. 101 : Carte des conductivités pour la période d'Avril 2002.....	109
Figure. 102 : Carte des différences de concentration en nitrates entre Mars 1993 et Avril 2002.....	111
Figure. 103 : Carte des différences de conductivité entre Mars1993 et Avril2002	111
Figure. 104 : Répartition des mesures de pH en Avril 2002.....	112
Figure. 105 : ACP des analyses chimiques de la nappe phréatique d'Oued Souf...	116
Figure. 106 : Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R.....	120
Figure. 107 : Carte de situation des points des prélèvements.....	122
Figure. 108 : Diagramme de la variation de pH pour les trois compagnes (Oued Souf).....	123
Figure. 109 : Diagramme de la variation de la conductivité électrique pour les trois compagnes (Oued Souf).....	124
Figure. 110 : Diagramme de la variation de la salinité pour les trois compagnes (Oued Souf).....	125
Figure. 111 : Diagramme de la variation des concentrations de calcium pour les trois compagnes (Oued Souf).....	125
Figure. 112 : Diagramme de la variation des concentrations de magnésium pour les trois compagnes (Oued Souf).....	126
Figure. 113 : Diagramme de la variation des concentrations de sodium pour les trois compagnes (Oued Souf).....	127
Figure. 114 : Diagramme de la variation des concentrations des chlorures pour les trois compagnes (Oued Souf).....	127
Figure. 115 : Diagramme de la variation des concentrations de potassium pour les trois compagnes (Oued Souf).....	128
Figure. 116 : Diagramme de la variation des concentrations de sulfates pour les trois compagnes (Oued Souf).....	128
Figure. 117 : Diagramme de la variation des concentrations de bicarbonates pour les trois compagnes (Oued Souf).....	129
Figure. 118 : Cycle de l'azote.....	130
Figure. 119 : Diagramme de la variation des concentrations de l'ammonium pour les trois compagnes (Oued Souf).....	130
Figure. 120 : Diagramme de la variation des concentrations de nitrite pour les trois compagnes (Oued Souf).....	131
Figure. 121 : Diagramme de la variation des concentrations de nitrate pour les trois compagnes (Oued Souf).....	132
Figure. 122 : Diagramme de la variation des concentrations de phosphate pour les trois compagnes (Oued Souf).....	133

Figure. 123 : Diagramme de la variation des matières en suspensions pour les trois compagnes (Oued Souf).....	133
Figure. 124 : Diagramme de la variation de la demande biochimique en oxygène pour les trois compagnes (Oued Souf).....	134
Figure. 125 : Carte de l'indice de la pollution organique (IPO) des eaux souterraines et des eaux de rejet (Oued Souf) compagne 01.....	158
Figure. 126 : Carte de l'indice de la pollution organique (IPO) des eaux souterraines et des eaux de rejet (Oued Souf) compagne 02.....	158
Figure. 127 : Carte de l'indice de la pollution organique (IPO) des eaux souterraines et des eaux de rejet (Oued Souf) compagne 03.....	158

Introduction générale :

Pendant longtemps, **l'eau** a été considérée comme un bien naturel, un « **don du ciel** » gratuit, d'exploitation facile, bon marché et, pour ainsi dire sans valeur.

Pour être considérables, les ressources en eau ne sont malheureusement pas sans limites et l'Algérie qui l'on peut considérer comme un exemple d'un pays où l'eau manque, a connus, depuis que, la consommation augmentant, en relation avec le développement démographique et industrielle énormes problèmes, ce qui nécessite de prendre conscience du problème de l'eau et adopter une politique qui permette de lui trouver une solution.

Le problème de l'eau est inquiétant en réalité, non seulement si on le considère du point de vue quantité, mais encore, et davantage peut-être, sous **l'aspect de la qualité**.

Il ne semble pas, en effet, qu'il soit possible d'accroître sensiblement les ressources en eau naturelle : sources, puits et forages ; pratiquement tout ce qui était intéressant a été capté.

Force est donc de recourir, tant pour l'eau potable que pour l'eau industrielle, aux eaux de surface eaux de rivières et de lac. Ces dernières, encore relativement propres a un temps pas très loin, sont malheureusement exposées de plus en plus à la pollution, sous la forme de rejets d'effluents industriels ou **domestiques**, et deviennent progressivement impropres à tout usage, sans un traitement préalable pouvant être compliqué et souvent onéreux.

Les nappes aquifères n'échappent pas, en outre, à cette contamination générale. On voit donc qu'un cercle vicieux s'amorce dans lequel le besoin et l'usage de l'eau croissent, tandis que, par effet de « boomerang », la pollution des eaux encore disponible s'aggrave dangereusement.

Assurer une bonne alimentation en eau ne suffit donc plus : il faut éviter aussi que l'eau après usage, dite **eau usée**, contamine l'eau naturelle des nappes souterraines, des rivières et des lacs, la rendant ainsi impropre à la consommation et à l'utilisation industrielle.

Il s'avère donc de plus en plus nécessaire de contribuer à la réalisation d'un double programme, consistant à **conserver** et à **protéger** l'eau et, pour cela, une meilleure connaissance sur le plan analytique de la pollution des rejets industriels et urbains est indispensable.

La wilaya d'**Oued Souf** est un vais exemple de l'existence de l'eau, mais malheureusement impropre, a cause de la mauvaise gestion de ces ressources, et l'absence d'un programme d'assainissement pour évacuer les eaux usées et protéger les ressources souterraines contre la pollution, surtout que Oued Souf est une région saharienne, et est dépourvue d'un vrai exutoire naturel.

Oued Souf a connue un phénomène très dangereux sur les plans environnemental et sanitaire c'est le phénomène de la remontée des eaux de la nappe phréatique.

Les premières apparitions de ce phénomène remontent à l'année 1969 et ont pris de l'ampleur dans les années quatre vingt, ceci s'explique par une forte expansion démographique et un développement urbain très rapide et anarchique venant perturber l'équilibre naturel qui existe auparavant, Aussi les prélèvement d'importante quantités d'eau des nappes profondes 430 millions de m³ mobilisé en 2004 (ANRHS 2005).

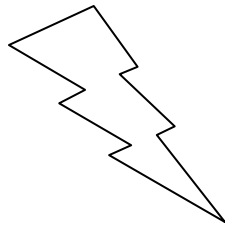
L'utilisation accrue et incontrôlée de la ressource particulièrement dans le secteur agricole surtout par l'irrigation traditionnelle (sbmerssion, raie, etc...) dépassant de loin les normes de l'apport d'eau par hectare pour les palmeraies. Ce qui a entraîné l'apparition de ce phénomène dans plusieurs zones de la wilaya. Le gaspillage de la ressource est également remarqué par la dotation journalière par habitant qui est très élevée et qui dépasse largement les normes de consommation.

La réunion de tout ces causes est le résultat de plusieurs conséquences sur l'environnement, la santé publique (maladies à transmission hydriques), et sur l'aspect économique (des milliards de dinairs sont investis pour trouver une solution adéquate).

Dans cette optique ce travail a été axé principalement sur l'aspect qualitatif de ces eaux par la détermination des origines probables de la pollution surtout dans la zone de rejet à El-Oued. En mettant sur pied le plan de travail suivant :

- La première partie est consacrée à l'identification naturelle de la zone d'étude, en définissant la région, et en présentant les caractéristiques géologiques et géophysiques et hydroclimatologiques.
- La deuxième partie traite de l'hydrogéologie de la nappe libre d'Oued Souf, en définissant sa géométrie ses paramètres hydrodynamiques par l'interprétation des essais de pompages, sa piézométrie et les paramètres hydrodisperssifs des échantillons de sables pris dans la zone du rejet au laboratoire.
- La troisième partie concerne les études hydrochimiques des eaux de la nappe de l'Oued Souf et de la pollution dans la zone du rejet.

Partie 1



Comporte quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** à pour but la présentation de la zone d'étude, leur situation géographique, leur reliefs et végétations et en fin un aperçu socioéconomique.
- **Le deuxième chapitre** dans le quel nous présentons les caractéristiques géologiques de la région du Souf, nous parlons de la géologie régionale et locale et de la stratigraphie on basant sur les logs lithostratigraphiques des forages réalisés à l'Albien, et en fin l'interprétation de trois coupes géologiques.
- **Le troisième chapitre** consacré à l'interprétation de 362 sondages électriques afin de réaliser 9 coupes géoélectriques pour objectif la détermination de la profondeur de substratum argileux qui nous a conduit de réaliser une carte du toit de substratum.
- **Le quatrième chapitre** c'est l'étude climatique pour objectif le calcul du bilan hydrique qu'est déficitaire sur toute l'année.

CHAPITRE I

Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique :

La région du Souf est située au Nord Est du Sahara algérien elle fait partie du Sahara septentrional. Elle est occupée par un chaos de dunes. La zone d'étude couvre une superficie de 3000 Km².

Elle est limitée :

- Au Nord par les chotts (Melghigh et Merouanne).
- Au Sud par le grand Erg Oriental.
- A l'Ouest par l'oued Righ.
- A l'Est par la frontière Tunisienne.

Cette zone se trouve entre les coordonnées géographiques suivant :

$$X_1 = 06^{\circ} 32' 03'' \text{ E et } X_2 = 07^{\circ} 03' 13'' \text{ E, } Y_1 = 33^{\circ} 08' 48'' \text{ N et } Y_2 = 33^{\circ} 52' 39'' \text{ N.}$$

La topographie de la région est plutôt en forme est caractérisée des dunes de direction Nord –Sud. La cote au Sud st de 130m et au Nord elle peut être regardé.

2. Le relief de la région :

Les reliefs de la région sont formés essentiellement par trois formes principales :

- Une zone sableuse qui se présente sous un double aspects l'Erg et le Sahara.
- Une forme de plateau rocheux qui s'étend vers le Sud avec une alternance de dunes et crêtes rocheuses.
- Une zone de dépression caractérisée par la présence de chotts qui plonge vers l'Est.

La région de Souf se trouve dans la partie Nord de grand Erg oriental qui se caractérise par un ensemble des dunes de sable d'origine continentale et d'âge quaternaire ces dunes sont déposées longitudinalement portant le dénomination du (SIF ou SABRE) dépassent parfois 60m de hauteur entre les cordons dunaires se forment les plateaux déprimés souvent assez étendus et parfois caillouteux ou recouverts par les vieilles formations d'encroûtements gypseux du Quaternaire.

3. Climat et végétation :

La région d'étude est caractérisée par un climat Saharien avec un été chaud et sec et un hiver doux, les précipitations sont très faible, par contre la température est élevée et qui dépasse parfois les 45°C. Ce qui conduit à une évaporation intense et une humidité relative plus importante en hiver qu'en été.

Notons que les principales contraintes climatiques restent la fréquence régulière des vents et de leur violence. Toutes ces conditions climatiques vont influencer énormément la végétation qui est quasi inexistante sauf quelques plantes qui s'adaptent au climat Saharien tel que Halfa, Harra et surtout les palmiers dattiers.

4. Aperçu socioéconomique :

Le palmier dattier est la principale culture dans la région. Elle occupe 47% des travailleurs de ce fait l'existence et l'exploitation des nappes est non seulement importante mais vitale pour la région. L'élevage est limité à quelques Chèvres alimenter par la datte sèche de qualité non marchande.

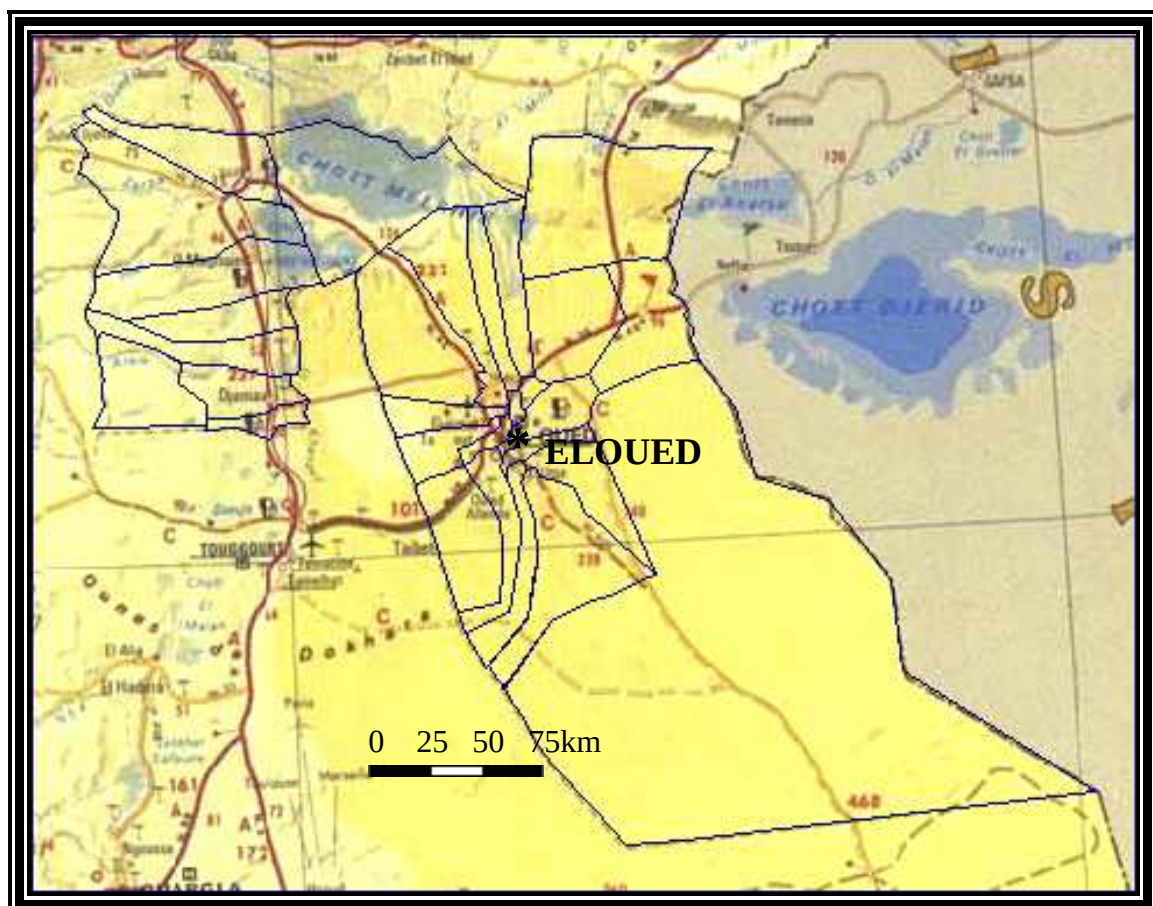
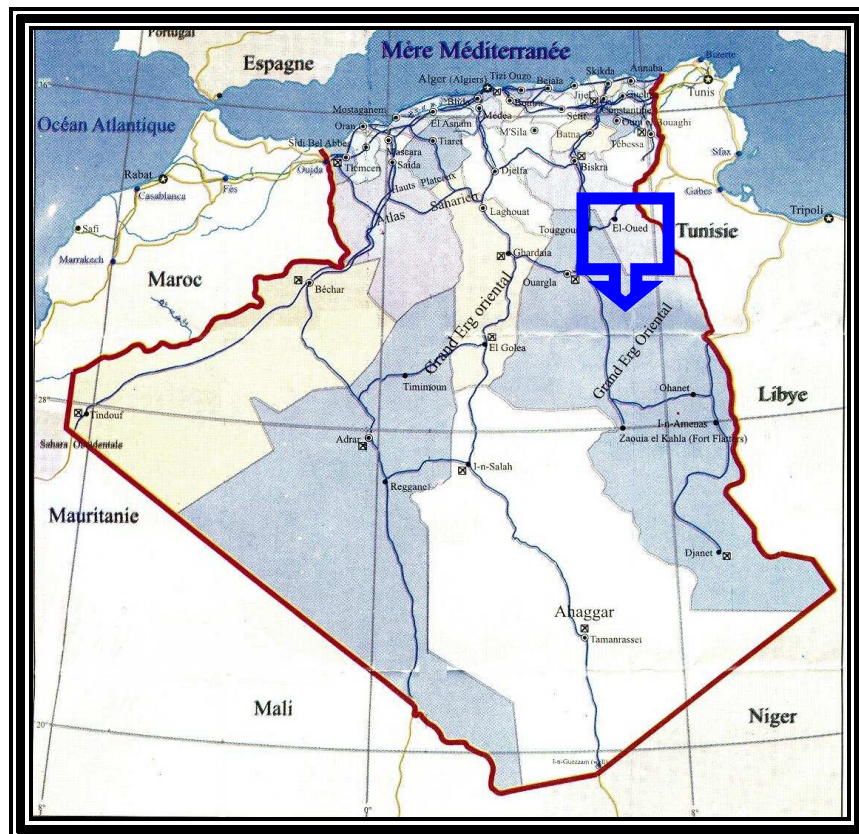


Figure.01 : Carte de situation de la wilaya d'El-Oued

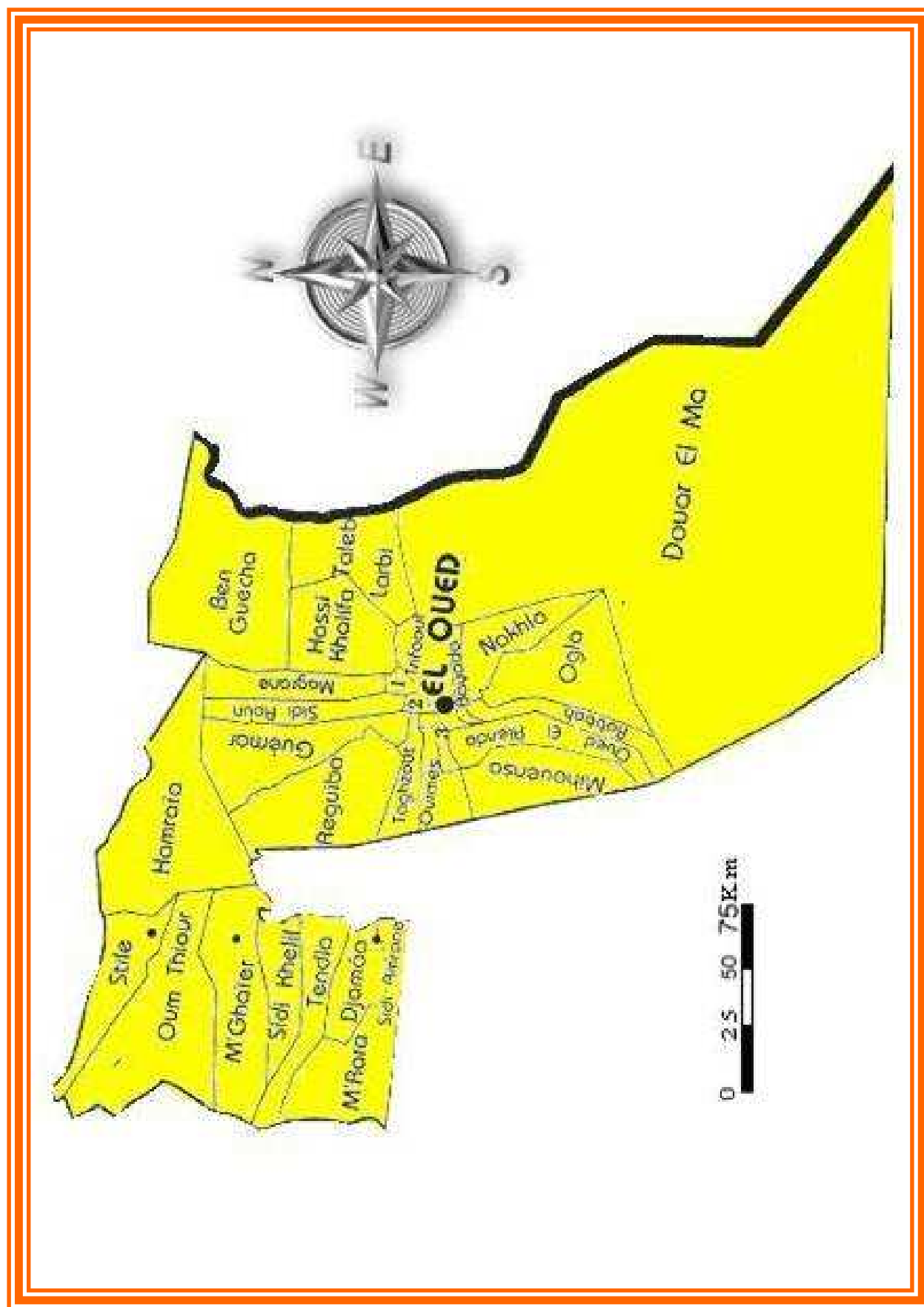


Figure. 02 : Carte situation des communes de la wilaya d'El-Oued

CAPITRE II

Caractéristiques géologiques de la région

1. Géologie régionale :

La région d'étude fait partie du bassin du Sahara septentrional de l'Algérie ou plus précisément du bassin oriental.

Le bassin oriental limité à l'Ouest par la dorsale du M'Zab au Sud par les Hamadas du Tademaït et de Tinghert se prolonge en Libye à l'Est par les plateaux du Dahar Tunisien, au Nord par les monts des Aurès et des Nememcha.

La région se présente comme une vaste cuvette ouverte vers le Nord. Ses bordures de hauteur modeste s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée matérialisée par l'axe SSW-NNE des oueds Mya et Righ, vers le Nord au contraire dressé au dessus d'une dépression longitudinale occupée par des Chotts et dont le fond est inférieur au niveau de la mer.

Dans sa moitié Sud, ce synclinal est traversé par un grand axe anticlinal Nord – Sud, siège de plusieurs gisement pétroliers, c'est le haut fond d'Amguid-El Biod. Cet axe n'est plus apparent dans les formations du Miopliocène se superposent à l'ancien haut fond. Dans le bassin du Sahara oriental une seconde zone haute a existé du Cénomanién au Miopliocène entre Hassi Messaoud et la frontière Tunisienne. Cette structure est orientée Est-Ouest elle sépare la fosse des Chotts au Nord du reste du bassin. Il semble que cet axe joue un rôle important dans l'hydrogéologie de la région.

Le long du versant Sud de l'Atlas existe une immense fosse de subsidence dans la quelle l'épaisseur maximum des sables et Argiles de l'Oligocène et du Miopliocène serait d'environ 2000 mètres, l'épaisseur maximum des séries post Albiennes serait d'environ 3000 mètres. Divers indices (conglomérats pliocènes) redressés à la verticale terrasse Quaternaire ancien à 20 mètres au-dessus du lit actuel des oueds dans la région de Negrine et Ferkane. Indiquent que cette région est toujours tectoniquement active.

2. Géologie locale :

Les formations des dunes éoliennes, atteignant des dizaines de mètres de hauteur, couvrent la zone d'étude. Au dessous se trouvent des formations continentales du Quaternaire représentées par une croûte constituée d'un mélange d'évaporites, sables et argiles, formant une couche plus ou moins tendre, et qui est utilisée par les habitants dans la construction des maisons et l'aménagement de pistes.

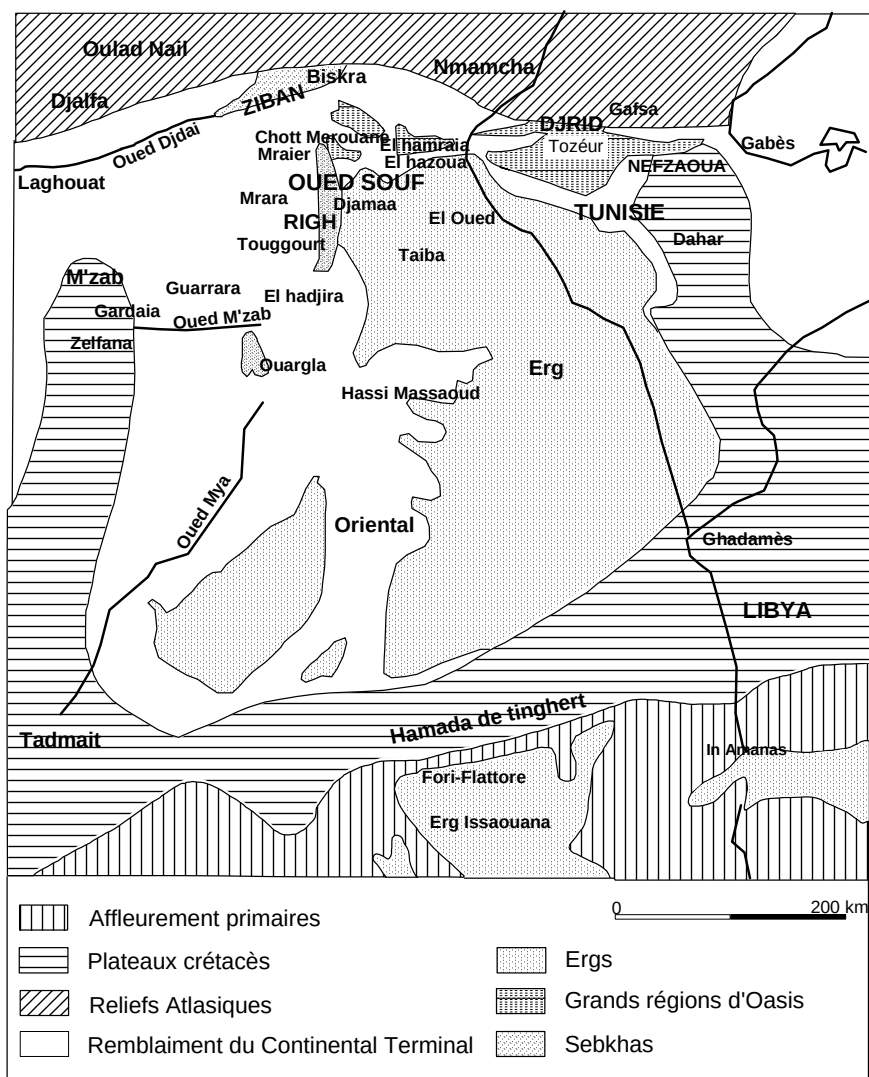


Figure. 03 : Les grandes unités géologiques au Sahara

3. Stratigraphie :

D'après les logs litho stratigraphiques des différents forages réalisés sur la région on ; on constate que les profondeurs des étages varient d'une région à l'autre. De bas en haut on distingue les formations suivantes :

3.1. Le secondaire :

3.1.1. Le Barrémien capté à partir de 1619m (coupe de sondage F1), présente une alternance de grès et d'argiles avec des intercalations de calcaires dolomitiques et de sables avec du silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 231m.

3.1.2. L'Aptien constitué des formations dolomitique marneuses et marnocalcaires d'après la coupe géologique de forage F1 on remarque que l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30m.

3.1.3. L'Albien constitué de marnes, de grès, de calcaires avec quelques passages d'argile et de silex. Son épaisseur est de l'ordre de 90m.

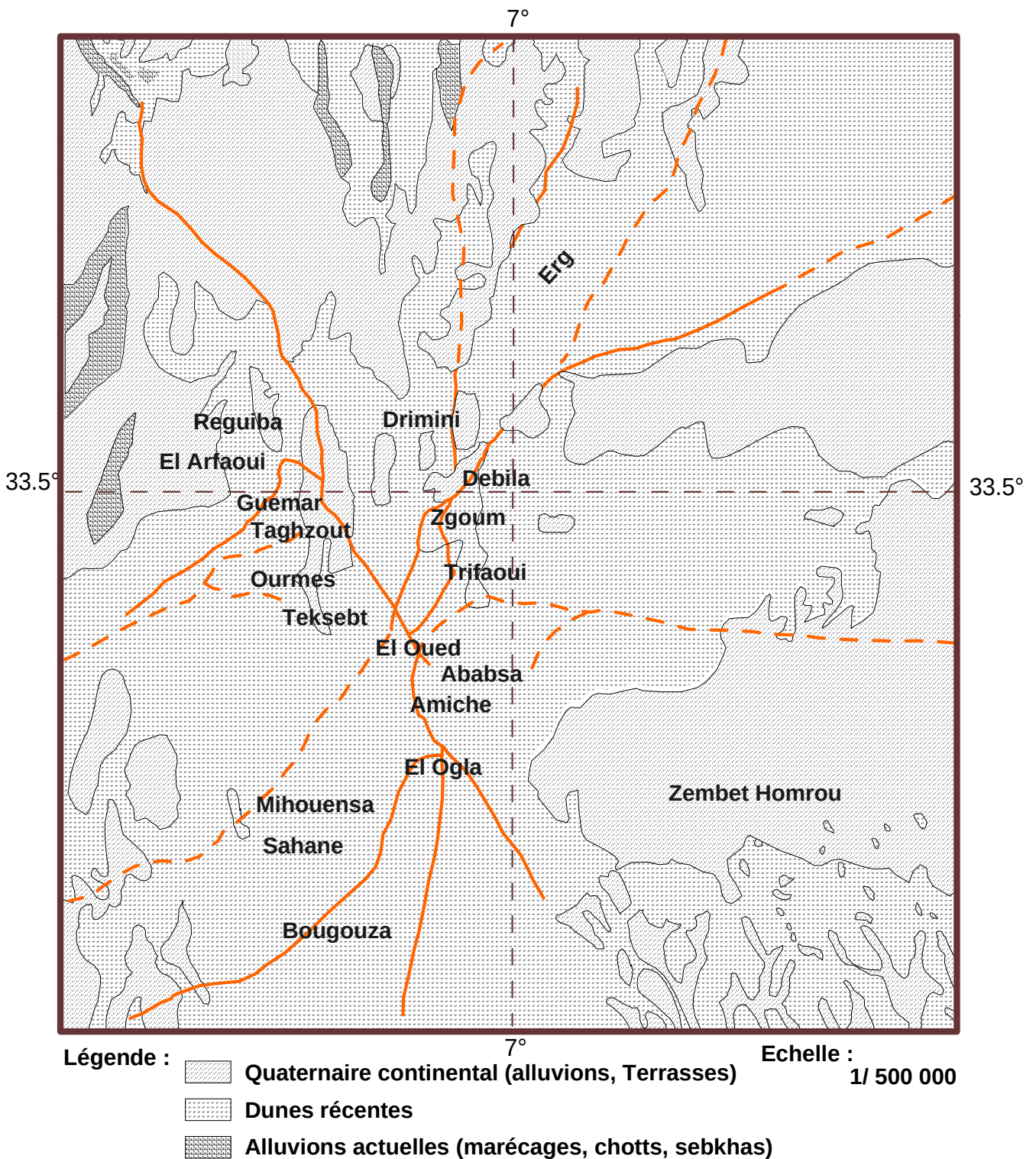


Figure. 04 : Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gouskov)

3.1.4. Le Vraconien c'est en fait un étage de transition entre l'Albien et le Cénomanién argilo- carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance de calcaires et de calcaires argileux. On rencontre aussi quelques passages de dolomies compactes microcristallines avec des intercalations d'argiles.

3.1.5. Le Cénomanién d'après les logs des forages, est formé d'anhydrites à passage de calcaires et marnes, et d'intercalation d'argiles, constitue la limite inférieure des calcaires, des

marnes, des Dolomies et d'argiles. Le Cénomanien joue le rôle d'un écran imperméable car il sépare le CT du CI.

La limite supérieure est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaire correspondant à la limite inférieure du Turonien.

3.1.6. Le Turonien est également carbonaté et il est constitué par des dolomies micro cristalline compactes avec des intercalations de calcaires légèrement dolomitique. Son épaisseur varie d'un endroit à l'autre et dépasse parfois les 650m.

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 du point de vue facies, l'un correspond au Sénonien lagunaire situé à la base, l'autre au Sénonien carbonaté qui représente la partie supérieure.

Sénonien lagunaire : Le passage du Turonien au Sénonien lagunaire est caractérisé par l'apparition d'un faciès évaporitique avec des argiles qui totalement différent de celles du Turonien. Il est représenté par les anhydrites blanches massives et dures avec quelques passages de dolomies gris clair et des intercalations de calcaire. Son épaisseur est d'environ 270m.

Sénonien carbonaté : La limite inférieure est caractérisée par une alternance de dolomies, d'anhydrite et de calcaire argileux, qui correspondent au toit du Sénonien lagunaire. La limite supérieure est marquée par une alternance de marnes et de calcaires compacts. Son épaisseur dépasse parfois les 300m.

3.2. Le Tertiaire :

Les forages qui ont été réalisés captent la quasi-totalité des séries tertiaires.

3.2.1. L'Eocène il existe une continuité du point de vue lithologique entre l'Eocène et le Sénonien carbonaté surtout pour la limite inférieure qui coïncide avec le toit du Sénonien. Sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaire. D'après les logs des forages réalisés dans la région on observe une alternance de calcaires fissurés et marne. On note aussi l'existence de calcaires jaunes compacts. Selon l'analyse du forage F9 (région d'Amiche) l'épaisseur varie entre 150 et 200m.

3.2.2. Le Mio-pliocène repose en discordance sur la dernière couche éocène. D'après la colonne lithostratigraphique le Mio-pliocène est caractérisé par un empilement de niveaux sableux à la base et des sables argileux avec des intercalations gypseuses, marneuses et de passage de grès à son sommet.

3.3. Quaternaire :

Il est représenté sous forme de dunes récentes et mélange de grès beiges ou blanchâtres, de sable fins à moyens de couleur beige et de paillettes de gypse. Son épaisseur varie de 39 à 67m.

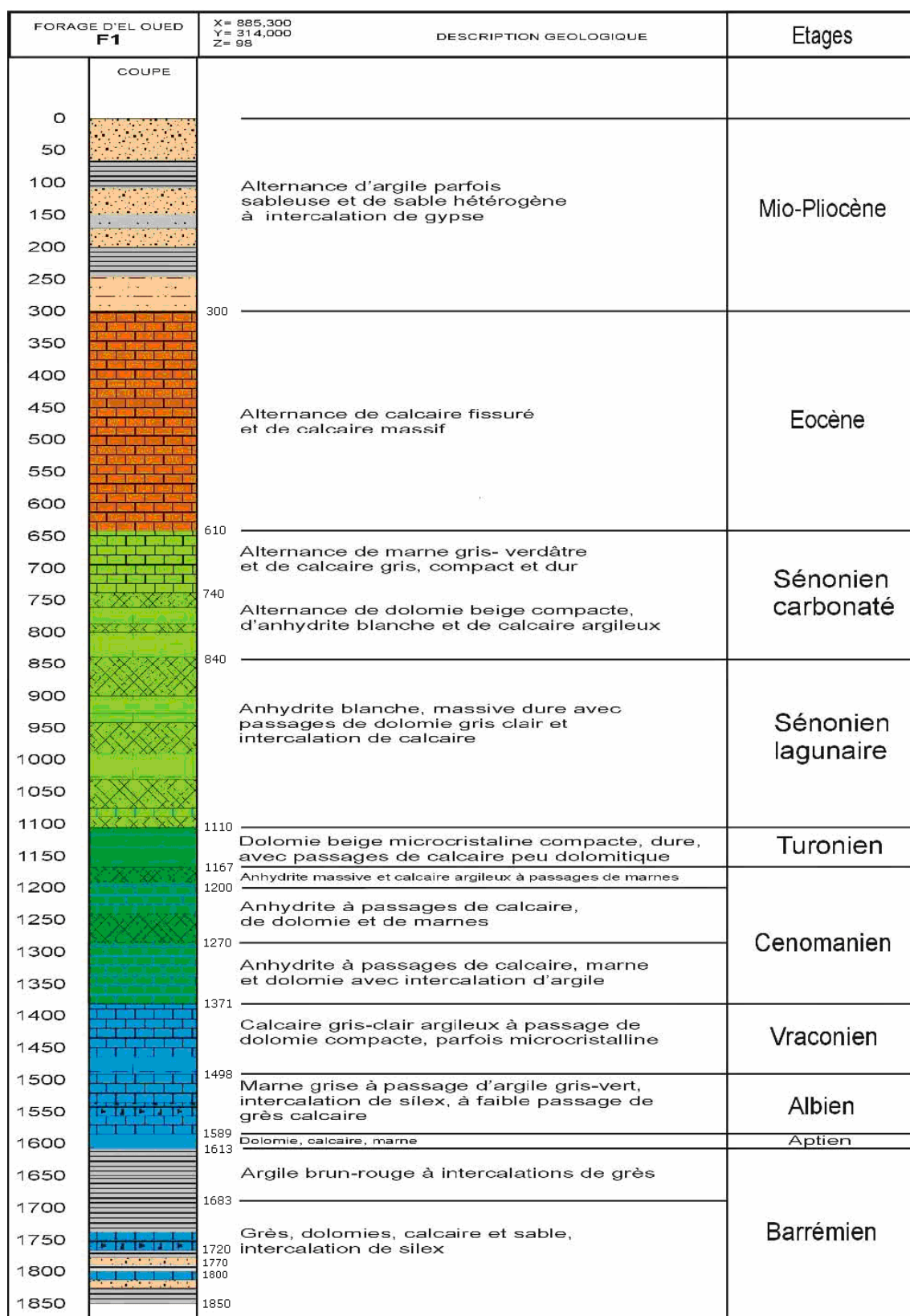


Figure. 05 : Forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH 1993)

4. Interprétation des coupes géologiques :

Ces coupes orientées Nord –Sud (Figure 4), Nord –Est, Sud –Ouest (Figure 5), Nord – Ouest, Sud –Est (Figure 6) ; ont pour objectif, d'une part d'établir une corrélation lithologique du sous –sol, d'autre part d'identifier l'extension géographique ainsi que l'épaisseur utile de la nappe phréatique de la région.

4.1. Coupe N°01 (Figure 4) : D'après cette coupe orientée Nord –Sud, faite sur la base des coupes des forages, on remarque que l'épaisseur de formation Miopliocène (constituée par des argiles sableuses, de sable et de calcaire), diminue du Nord vers le Sud. Quant au quaternaire, il correspond à des formations sableuses qui sont parfaitement absentes au Nord puis elles s'épaississent vers le Sud ; ce manque ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne, (voir H12.32 et H12.23). L'Eocène inférieur n'apparaît qu'au nord vu sa grande profondeur.

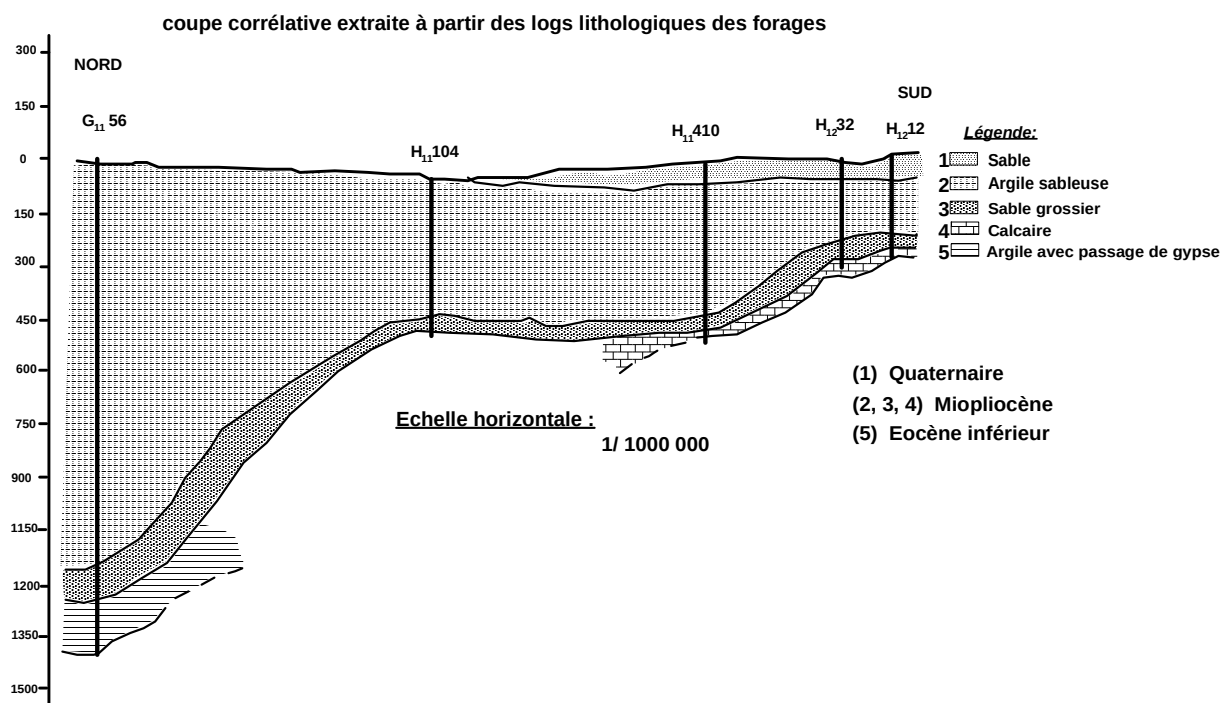


Figure. 06 : Coupe Géologique N°01

4.2. Coupe N°02 (Figure 5) : En allant de la région dite Merzaka de la coupe vers Ourmes, on remarque au niveau du forage (H12.52), l'absence du quaternaire, Ceci ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne, de plus, son épaisseur change d'une région à l'autre (par exemple, au niveau du forage H12.540, l'épaisseur présente presque la moitié de celle de H12.84) tandis que les formations Miopliocène sont caractérisées par une épaisseur considérable (plus de 200m). Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région.

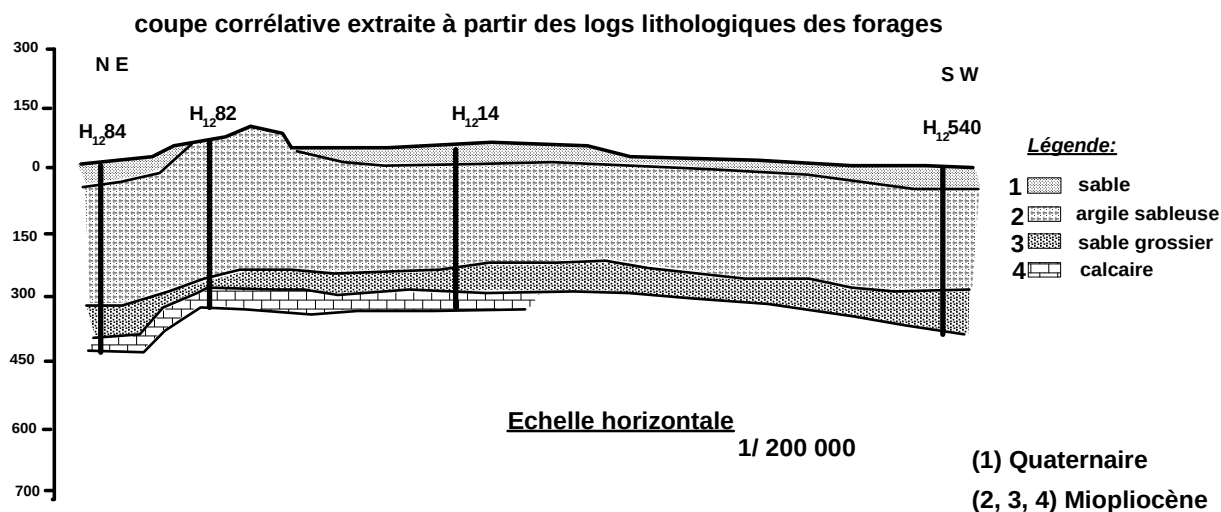


Figure. 07 : Coupe géologique N°02

4.3. Coupe N°03 (Figure 6) : La coupe N°03 est différente des autres surtout du point de vue « biseautages » résultant d'un évènement paléogéographique. Cette situation est bien visible dans les quatre premiers forages. Quant aux formations quaternaires, on constate que leur épaisseur est plus importante au Nord -Ouest qu'au Sud -Est (voir H11.583 et H12.63).

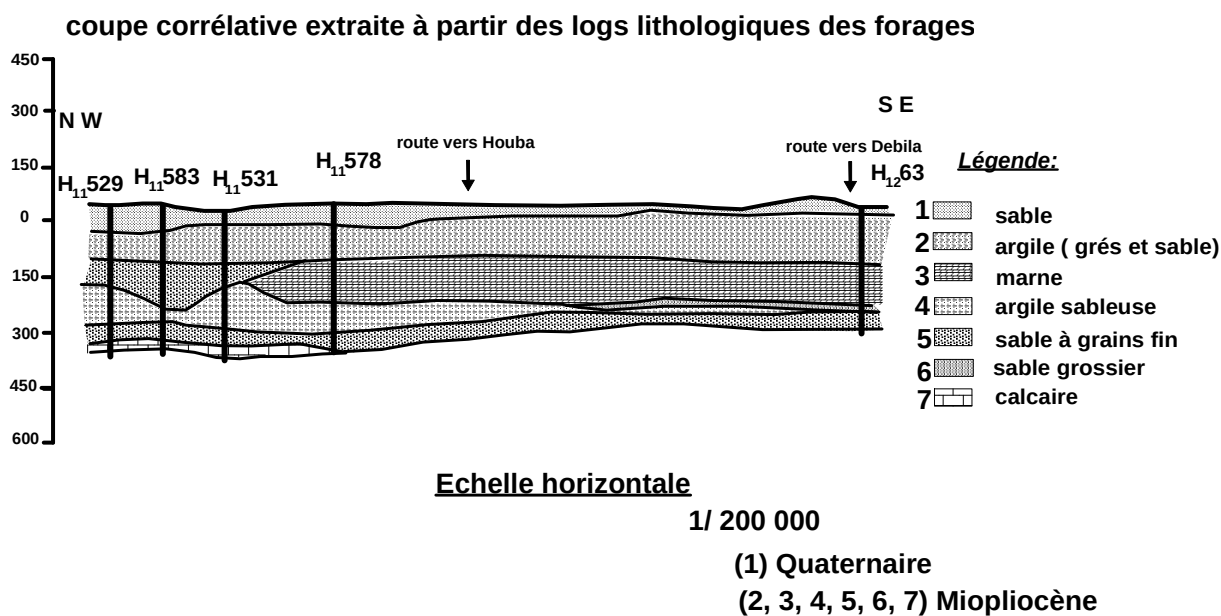


Figure. 08 : Coupe géologique N°03

CHAPITRE III

Etude géophysique par l'interprétation des sondages électriques

1. Introduction :

La prospection électrique s'intéresse à l'identification des structures et des caractéristiques des terrains à partir de mesures de leur paramètre physique: la résistivité électrique.

La résistivité électrique dépend de la nature pétrographique, de la structure des roches et de leur teneur en eau plus ou moins saline. En fait, ce dernier facteur joue le rôle le plus important dans la conductibilité du sous-sol. La résistivité électrique d'une roche sera ainsi fonction de la porosité, du degré de cimentation de la roche, du degré de saturation en eau des pores et de la résistivité de l'eau d'imbibition. Cette relation est exprimée par la loi d'Archie (1942):

$$\rho_r = a\rho_w\phi^{-m}S_w^{-2} \quad (1)$$

Où ρ_r = résistivité électrique de la roche, en ohm-m

ρ_w = résistivité électrique de l'eau d'imbibition, en ohm-m

ϕ = porosité en %

S_w = degré de saturation des pores, en %

m = facteur de cimentation ; il dépend de la forme de pores, des liaisons entre pores et varie entre 1.3 et 2.2.

a = facteur caractérisant la lithologie et varie entre 0.6 et 2.

Si la formation est complètement saturée en eau, c'est à dire $S_w = 1$, alors on aura plus simplement

$$\rho_r = a\rho_w\phi^{-m} \quad (2)$$

On a l'habitude de regrouper sous le terme de facteur de formation : $F = a\phi^{-m}$ ce qui donne :

$$\rho_r = F\rho_w \quad (3)$$

Dans la pratique on admet pour les formations meubles la formule d'Humble

$$\rho_r = 0.62\phi^{-2.15}\rho_w \quad (4)$$

Et pour les roches bien cimentées :

$$\rho_r = \phi^{-2} \rho_w \quad (5)$$

Il faut noter que pour les formations argileuses la formule d'Archie est peu fiable et ne peut être utilisée telle qu'elle. D'autre part la formule d'Archie est suffisante pour une première orientation.

Lorsque le facteur de formation F est inférieur à 2,5, la présence d'argile est quasi-certaine.

Les mesures de résistivité permettent donc de repérer facilement les formations les plus poreuses. Pour que celles-ci constituent des réservoirs utilisables, encore faut-il qu'elles présentent une bonne perméabilité.

D'autres facteurs interviennent dans la résistivité d'une roche dont il faudra souvent tenir compte, tels que la température, la répartition géométrique des pores et leur mode de communication.

2. Mesure de la résistivité du sous-sol :

La méthode employée pour la mesure de la résistivité électrique utilise divers dispositifs. Nous avons adopté pour nos mesures le quadripôle Schlumberger. Le principe de la méthode (Figure.09), consiste à injecter dans le sol un courant électrique continu ou alternatif d'intensité I créé par un générateur, entre deux électrodes d'injection A et B et à mesurer une différence de potentiel ΔV provoquée par le passage du courant, entre deux électrodes de réception M et N. La résistivité est obtenue grâce à la formule :

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

Déduite de la loi d'Ohm, où K est un coefficient qui dépend de la géométrie du dispositif. Pour le dispositif Schlumberger:

$$K = \pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (7)$$

La profondeur d'investigation d'un tel dispositif est fonction de l'écartement des électrodes d'émission A-B, ainsi que des épaisseurs et des résistivités des terrains rencontrés.

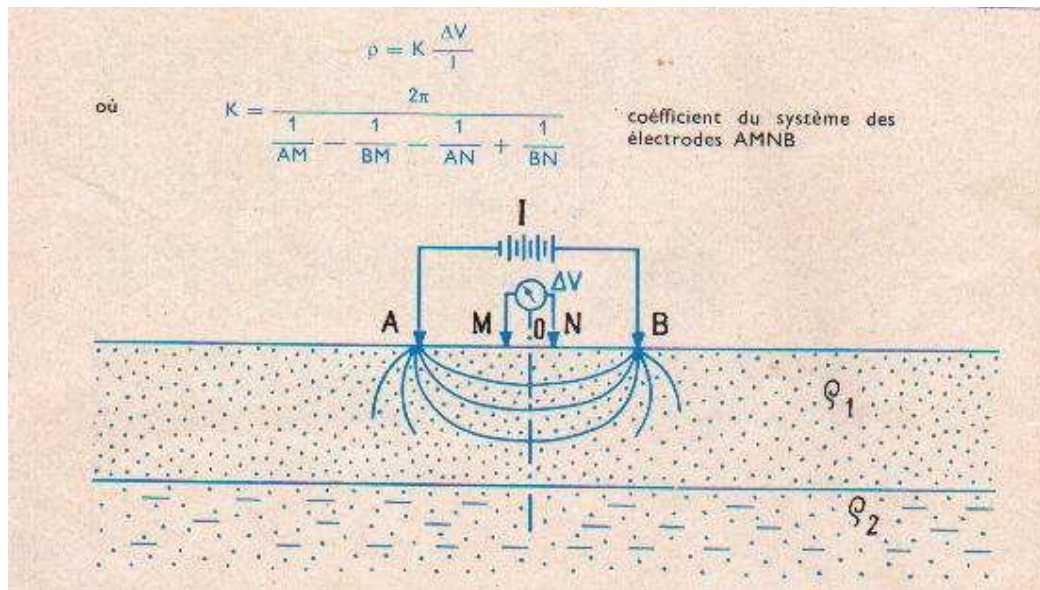


Figure. 09 : quadripôle de Schlumberger

Lorsque les filets de courant circulent entièrement dans un même niveau homogène, la résistivité mesurée correspond à la résistivité vraie de ce terrain (Figure. 10). C'est le cas notamment des mesures tests ou paramétriques (cf. échelle des résistivités) effectuées sur des formations sub-affleurantes d'épaisseurs et d'extensions suffisamment importantes par rapport à l'écartement de la ligne d'émission.

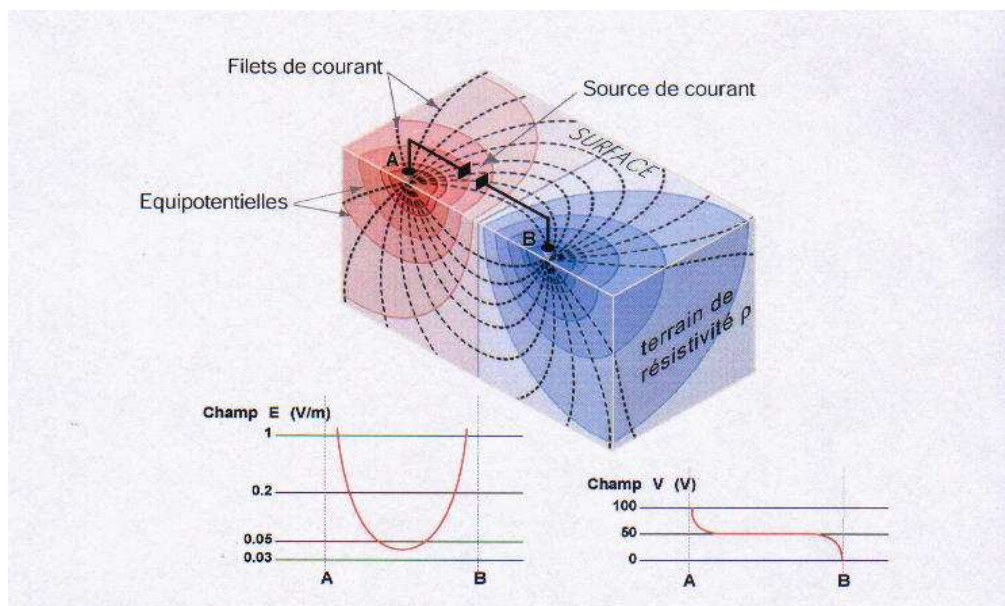


Figure. 10 : Equipotentiels de courant dans un sol homogène.

Mais généralement, les filets de courant traversent plusieurs horizons différents; dans ce cas, la résistivité est fonction des résistivités spécifiques des différents terrains et de leurs épaisseurs. Les résistivités mesurées sont dites résistivités apparentes et c'est

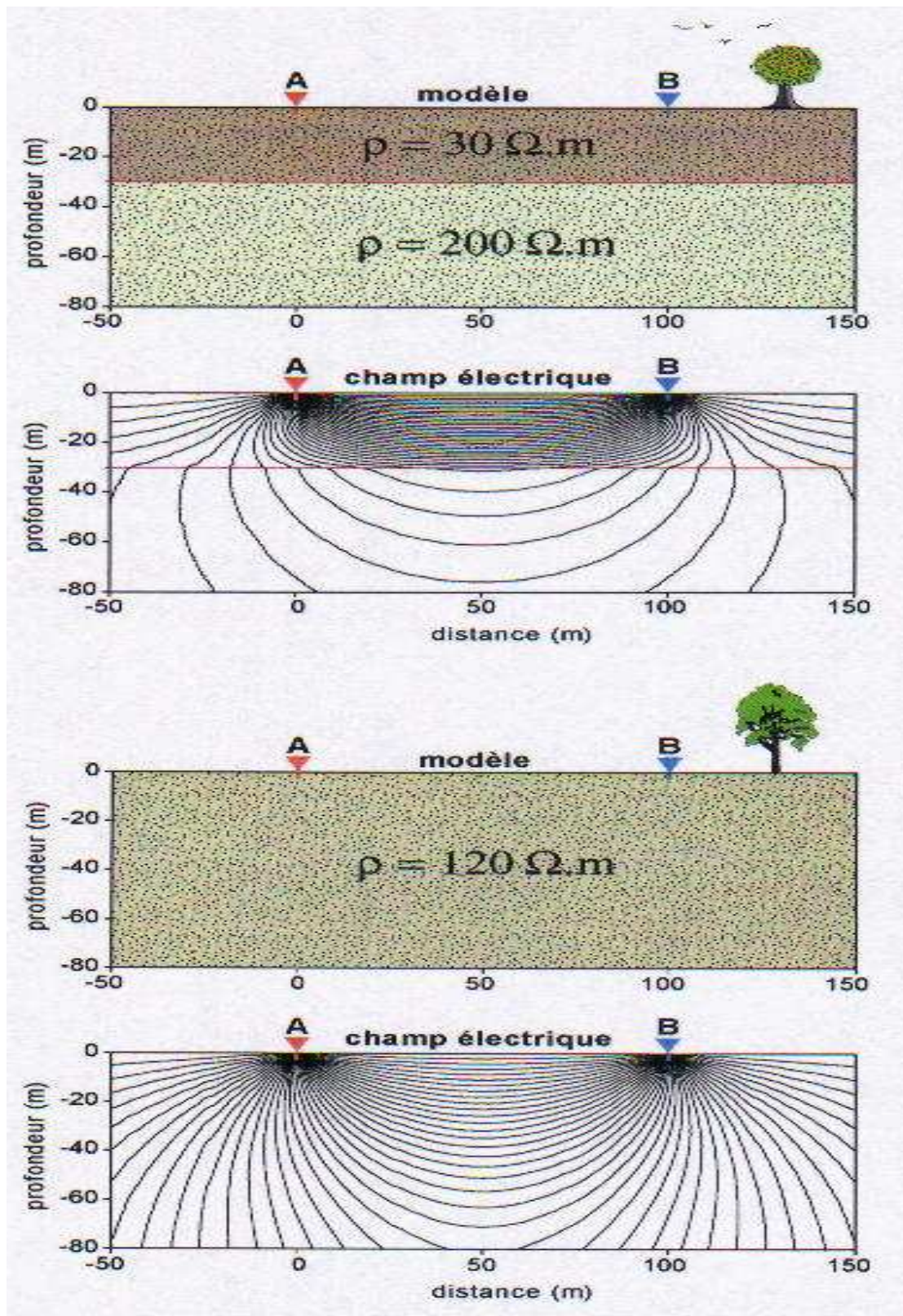
à partir de ces valeurs que nous essayons de déterminer les résistivités vraies ρ_i et les épaisseurs h_i caractérisant chaque niveau. (Figure.11).

3. Sondage électrique :

- Principe du sondage électrique vertical (SEV):

Pour réaliser un SEV, on effectue à partir d'un même point une série de mesures de la résistivité apparente en augmentant progressivement les dimensions du dispositif de mesure, le centre et la direction restant constants. En supposant que la résistivité spécifique et l'épaisseur du terrain superficiel (dans lequel se trouvent généralement les électrodes) ne varient pas de façon considérable d'une mesure à l'autre, les variations de la résistivité apparente sont dues essentiellement aux changements verticaux de la résistivité spécifique. On voit donc que la profondeur d'investigation augmente en fonction de l'espacement AB. Dans la pratique cette profondeur d'investigation est proportionnelle à la longueur du dispositif dans le rapport approximatif et empirique de 1/4 à 1/10. Généralement, On continue les mesures jusqu'à ce que la formation géologique recherchée soit atteinte.

Pour cette raison, le champ d'application idéal des SEV consiste en l'étude des formations géologiques stratifiées subhorizontales (angle entre les couches ne dépasse guère les 15°) qui s'étendent sur une certaine distance et dont les caractéristiques géologiques ne varient pas latéralement trop brusquement (latéralement homogènes).



Figu

re. 11 : le courant dans le premier terrain de faible résistivité.

Lors de l'exécution des sondages avec un dispositif Schlumberger, le principal problème consiste à conserver un ΔV suffisamment grand pour être mesuré. Or au fur et à mesure que A et B s'éloignent ΔV diminue. On peut alors résoudre ce problème soit:

- En augmentant la tension à la source de façon à augmenter I et ΔV .
- En multipliant le nombre d'électrodes en A et B
- En arrosant les électrodes A et B, si nécessaire avec de l'eau salée, de façon à accroître I et ΔV .
- En augmentant MN afin d'augmenter ΔV mesuré.

Les résultats de mesure sont représentés sur un papier bilogarithmique où l'on reporte, en abscisses, les longueurs AB/2 en mètres et en ordonnées les valeurs des résistivités apparentes correspondantes exprimées en ohms-m, on obtient la courbe de SEV qui correspond à une succession déterminée de couches de résistivité.

4. Exécutions des mesures :

- Technique utilisée :

La technique utilisée est exclusivement celle du sondage électrique de type Schlumberger. Pour ces mesures, dont les principes généraux ont été exposés dans la partie précédente de ce travail, les longueurs de lignes d'émission (distance entre les électrodes d'envoi de courant A et B) étaient variables de AB = 2000 m. Pour ces distances, les courbes de résistivités apparentes étaient établies par 20 points de mesure. De manière à s'approcher le plus possible des conditions théoriques du sondage électrique Schlumberger le rapport (AB / MN) était de 5 à 30 avec deux débrayages. Pour les mesures de différences de potentiels, on a utilisé un résistivimètre. Totalement automatique avec une sensibilité de l'ordre du μvolt . L'envoi du courant dans le sol est réalisé grâce à un convertisseur externe 1200W AC/CC alimenté par un groupe électrogène standard 220V – 50Hz. La mesure est faite entièrement automatiquement à travers le contrôle du microprocesseur: correction automatique de la Polarisation Spontanée (PS), accumulation automatique de mesures pour l'amélioration du rapport signal / bruit, affichage de messages d'erreur en cas de problèmes de mesure. Tous les paramètres tels que l'intensité, la tension, les paramètres géométriques, les paramètres de localisation, etc....sont stockés dans la mémoire. Une liaison série permet de transférer les données vers une imprimante ou PC pour l'impression et l'interprétation des résultats.

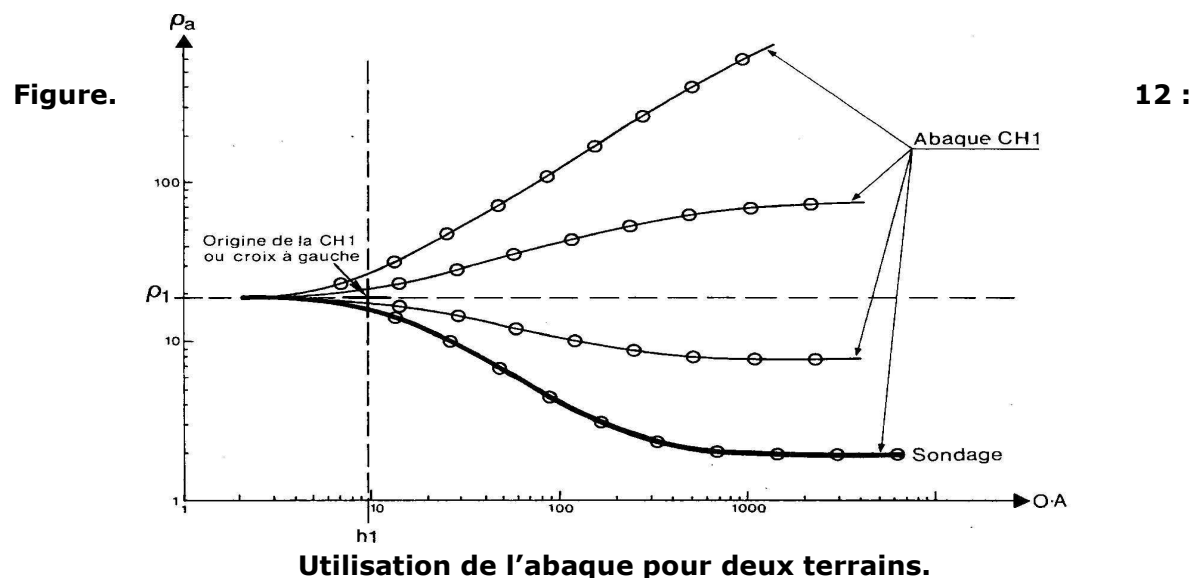
5. Théorie d'interprétation des sondages électriques :

L'interprétation des sondages électriques verticaux consiste à essayer de déterminer les résistivités vraies (ρ_i) et les épaisseurs (h_i) des couches composant la coupe géologique.

Plusieurs méthodes d'interprétation des SEV ont été élaborées par les géophysiciens prospecteurs, parmi elles on peut citer : les trois méthodes les plus importantes

5.1. La méthode de superposition à l'aide des abaques (Figure. 12)

Dans cette méthode, on choisit dans l'ensemble des abaques publiés la courbe s'ajustant au mieux avec le sondage électrique. La superposition est rarement parfaite, surtout pour les sondages à plus de trois terrains.



5.2. La méthode de HUMMEL dite aussi de réduction (Partial Curve Matching) :

Cette méthode consiste à appliquer l'abaque à deux terrains et les abaques auxiliaires (A, H, K, Q) pour interpréter un sondage, quelque soit le nombre de couches. La méthode permet d'épargner l'utilisation de plusieurs nombres d'abaques pré calculés lorsque le sondage est composé de plus de deux terrains. Pour ce faire, on fait coïncider le début de sondage à l'une des courbes de l'abaque à deux terrains cette coïncidence fournit immédiatement l'épaisseur et la résistivité du premier terrain et le rapport des résistivités ($\mu = \rho_1/\rho_2$). En utilisant les abaques auxiliaires on réduit alors les deux premières couches en une couche équivalente (principe de réduction). On utilise à

nouveau l'abaque à deux terrains pour coïncider les autres branches de la courbe en utilisant toujours le principe de réduction jusqu'à la fin de la courbe.

5.3. La méthode comparative à l'ordinateur :

Elle consiste à affiner l'interprétation des courbes de SEV ainsi trouvée, grâce aux méthodes citées ci-dessus, à l'aide d'un programme informatique d'interprétation permettant d'ajuster au mieux le modèle expérimental avec le modèle calculé. On fait calculer par l'ordinateur la courbe que donnerait un sondage électrique effectué sur les terrains tels qu'ils ont été admis lors de l'interprétation préliminaire. On compare ensuite le graphe calculé et la courbe mesurée (Figure.13). On modifie l'interprétation jusqu'à ce que les deux courbes s'ajustent parfaitement ou presque. Cette méthode "comparative" est donc complémentaire des autres méthodes. Elle peut apporter d'utiles améliorations au modèle préliminaire, mais reste limitée, comme toutes les autres méthodes, par les principes d'équivalence et de suppression.

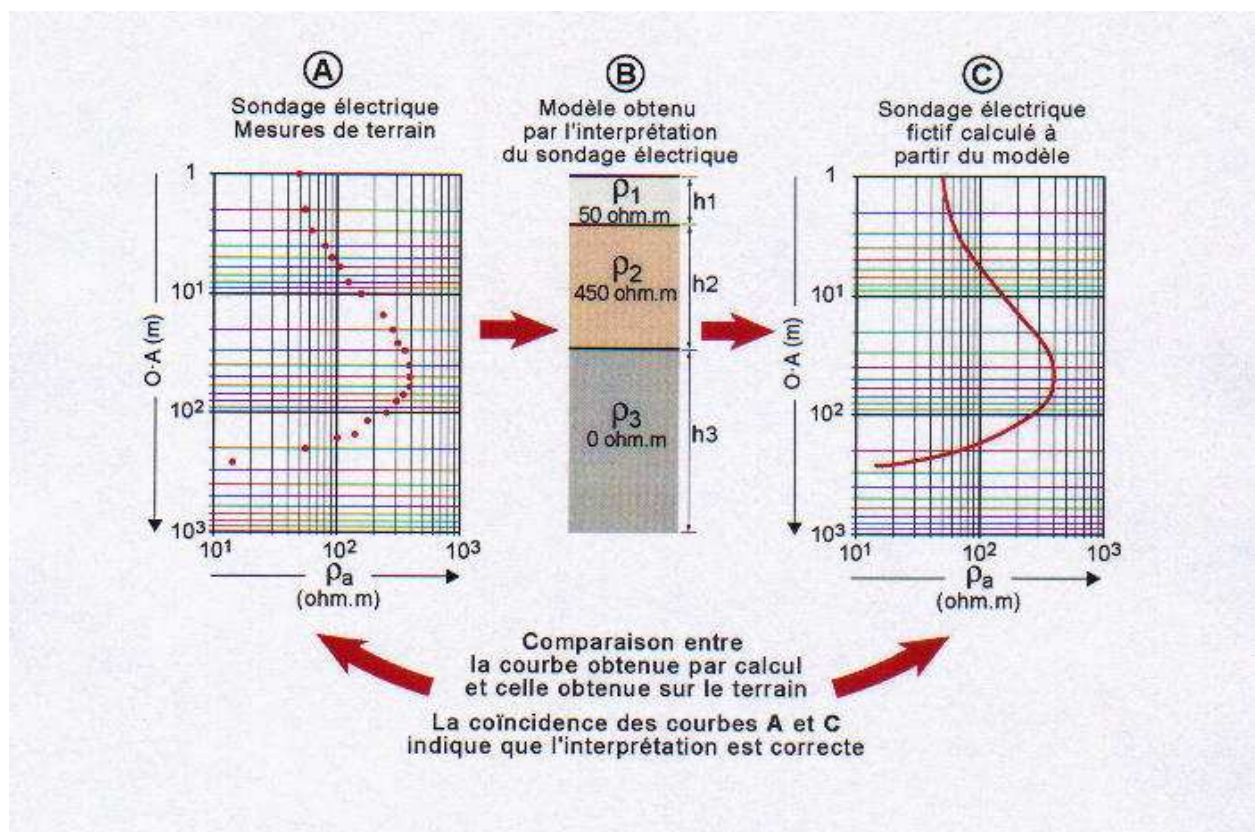


Figure. 13 : Interprétation d'un sondage électrique par ordinateur

6. Représentation des résultats :

Les mesures de SEV effectuées sur le terrain sont représentées sous forme de diagrammes où l'on porte à une échelle logarithmique en abscisse la demi-longueur AB (soit $OA = AB/2$) et en ordonnées la valeur de la résistivité apparente correspondante. Ce sont ces courbes bilogarithmiques que l'on devra analyser.

C'est à partir des données acquises sur le terrain que l'on peut établir les documents suivants :

6.1. Carte de résistivité apparente pour différents AB :

Si nous voulons un aperçu qualitatif sur l'ensemble de l'étude, nous pouvons sélectionner une longueur de ligne AB et de reporter pour chaque sondage électrique la valeur de résistivité apparente correspondante. Il sera alors possible de construire à une échelle appropriée une carte isorésistivité pour la longueur d'émission AB sélectionnée en interpolant linéairement entre les valeurs.

6.2. Carte du toit du substratum:

La carte du toit du substratum est établie par interpolation linéaire à une échelle appropriée en reportant à chaque sondage la valeur de la profondeur du toit.

6.3. Coupes géoélectriques :

Les coupes géoélectriques sont établies de la manière suivante : on porte en abscisses les stations, à l'échelle de l'étude et en ordonnées, à une échelle linéaire appropriée, les épaisseurs (h_i) des terrains trouvés de chaque sondage, tout en mentionnant la résistivité vraie de chaque horizon. On essaye ensuite de corréliser entre les différents terrains selon leur résistivité. Pour faire ce travail on utilise aussi les coupes verticales (ρ_a) et les profils des résistivités pour différents AB.

7. L'objectif de l'étude :

L'étude géophysique menée par l'équipe de la recherche de l'Entreprise Nationale de Géophysique (**ENAGEO**) avait pour but de :

- Déterminer les paramètres physiques (résistivités et épaisseurs) des formations géologiques et leur extension latérale ;
- Définir et préciser les particularités géologiques et structurales de la région ;
- Déterminer la morphologie du substratum argileux de la nappe libre ;

8. L'exécution des mesures :

Les travaux de prospection électrique réalisés par la méthode des sondages électriques (SEV) ont comportés 362 sondages électriques verticaux répartis sur 9 profils notés alphabétiquement de A à I (Figure.14), répartis sur les axes routiers et pistes. L'interprétation de ces sondages électriques par l'ENAGEO a permis d'établir une carte isobathe du substratum argileux et 09 coupes géoélectriques suivant les 09 profils comme suit :

- ♦ **PROFIL A :** A une orientation Sud-Ouest, Nord-Est (SEV 48 – SEV 86)
- ♦ **PROFIL B :** A une orientation Sud –Est, Nord –Ouest (SEV 45 – SEV 14)
- ♦ **PROFIL C :** Orienté du Nord au Sud (PqI 72 à Pqf 75)
- ♦ **PROFIL D :** Orienté Sud au Nord (PqI 130 à Pqf 116)
- ♦ **PROFIL E :** Orienté Sud au Nord (PqI 104 à Pqf 96)
- ♦ **PROFIL F :** Orienté Sud -Ouest au Nord -Est (PqI 149 à Pqf 90)
- ♦ **PROFIL G :** Orienté Sud au Nord (PqI 94 à Pqf 36)
- ♦ **PROFIL H :** Orienté Ouest à Est (PqI 131 à Pqf 139)
- ♦ **PROFIL I :** Orienté Nord -Ouest à Sud -Est (PqI 5 à Pqf 112)

Les sondages électriques verticaux sont interprétés à l'aide du logiciel (IPI2 Win). Le dispositif utilisé est le dispositif de Schlumberger, **le tableau N°01** ci- dessous résume le volume des travaux réalisés sur le terrain :

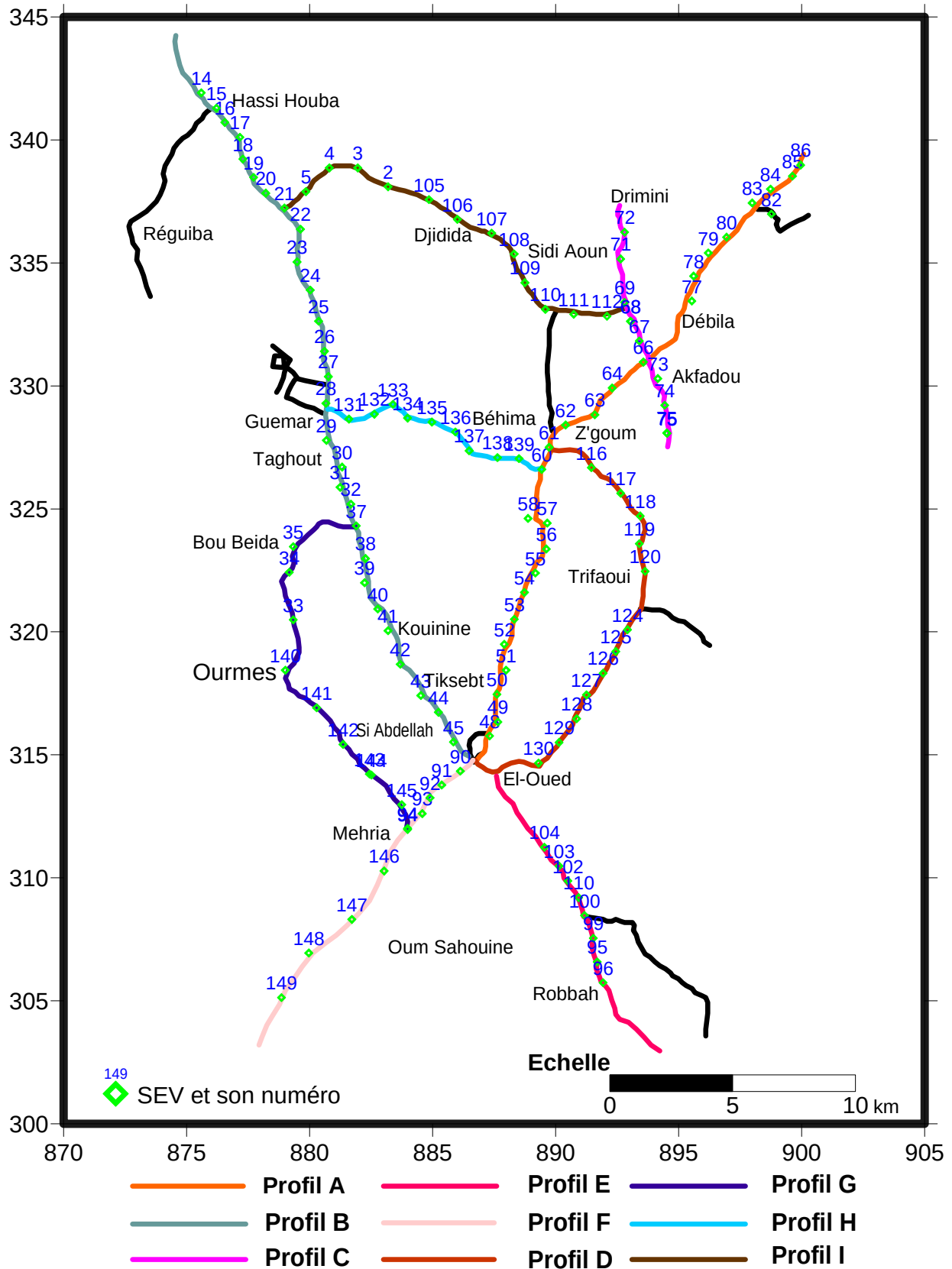


Figure. 14 : Carte du positionnements des SEV (Oued Souf)

Tableau N°01 : Tableau récapitulatif du volume des travaux de terrain

Profils	Orientation	Longueur (km)	Nombre de SEV	Coordonnées		
				piquet	X (km)	Y (km)
A	SW-NE	32	29	PqI 48	888.15	315.80
				Pqf 86	900.00	339.10
B	SE-NW	32	28	PqI 45	886.00	315.70
				Pqf 14	875.50	341.90
C	N-S	11	9	PqI 72	893.10	326.20
				Pqf 75	895.00	327.20
D	S-N	16.5	12	PqI 130	891.80	326.65
				Pqf 116	889.65	314.50
E	S-N	7	8	PqI 104	892.40	305.55
				Pqf 96	889.85	311.10
F	SW-NE	12.5	9	PqI 149	886.65	314.25
				Pqf 90	878.90	305.10
G	S-N	18	10	PqI 94	881.15	324.40
				Pqf 36	884.00	313.00
H	W-E	11	9	PqI 131	882.00	328.70
				Pqf 139	889.00	326.90
I	NW-SE	15.5	12	PqI 5	879.60	337.80
				Pqf 112	892.40	332.80

Avec PqI : Piquet initial du profil et Pqf : Piquet final du profil

9. Présentation et analyse des résultats :

9.1. Echelle des résistivités : pour une meilleure corrélation entre la résistivité et la lithologie des formations, parmi les 126 forages effectués dans la zone d'étude nous avons choisi les forages P56, P51, P43, P46 et P44 qui se localisent respectivement à l'emplacement des SEV 15, 131, 76, 30 et 104.

9.1.1. Le sondage électrique vertical 15 et le forage P56:(figure.15)

La colonne stratigraphique du forage 15 montre les formations suivantes :

Profondeur en m		Lithologie
Mio- pliocène	0 - 2	Sable fin
	2 - 24	Alternance de grés à grains fins à moyen et sables fins
	24 - 30	Argiles sableuses
	30 - 50	Grés siliceux fins rosâtres et blanchâtres avec présence de passages de sables fins et d'argiles
	50 - 52	sables argileux rougeâtres

Le diagramme du SEV 15 fait apparaître un premier horizon très résistant dont la résistance transversale ($RT = h_1 \zeta_1 = 16100 \Omega.m^2$)

suivi d'un niveau moins conducteur ($RT = h_2 \zeta_2 = 120 \Omega.m^2$) suivi d'un terrain plus conducteur que le précédent dont la résistance transversale ($RT = h_3 \zeta_3 = 493 \Omega.m^2$); suivi d'un substratum conducteur de résistivité ($\zeta_4 = 9 \Omega.m^2$)

La comparaison et le recoupement des résultats des forages nous permettent alors d'attribuer les valeurs aux formations suivantes :

Moi- pliocène	Sable.....	88.43 Ωm
	Argile sableuse.....	11.08 Ωm
	Sable argileux.....	22.3 Ωm
	Argile.....	8.68 Ωm

9.1.2. Le sondage électrique vertical 131 et le forage P51 (figure. 16) :

La colonne stratigraphique du forage 15 montre les formations présentées dans le tableau.

La courbe des résistivités du SEV 131 fait apparaître deux terrains. Le premier terrain est résistant avec une résistance transversale. $RT = \rho_1 h_1 = 9400 \Omega.m^2$. Le deuxième terrain correspond au substratum très conducteur de résistivité ($\rho_3 = 3 \Omega.m$.)

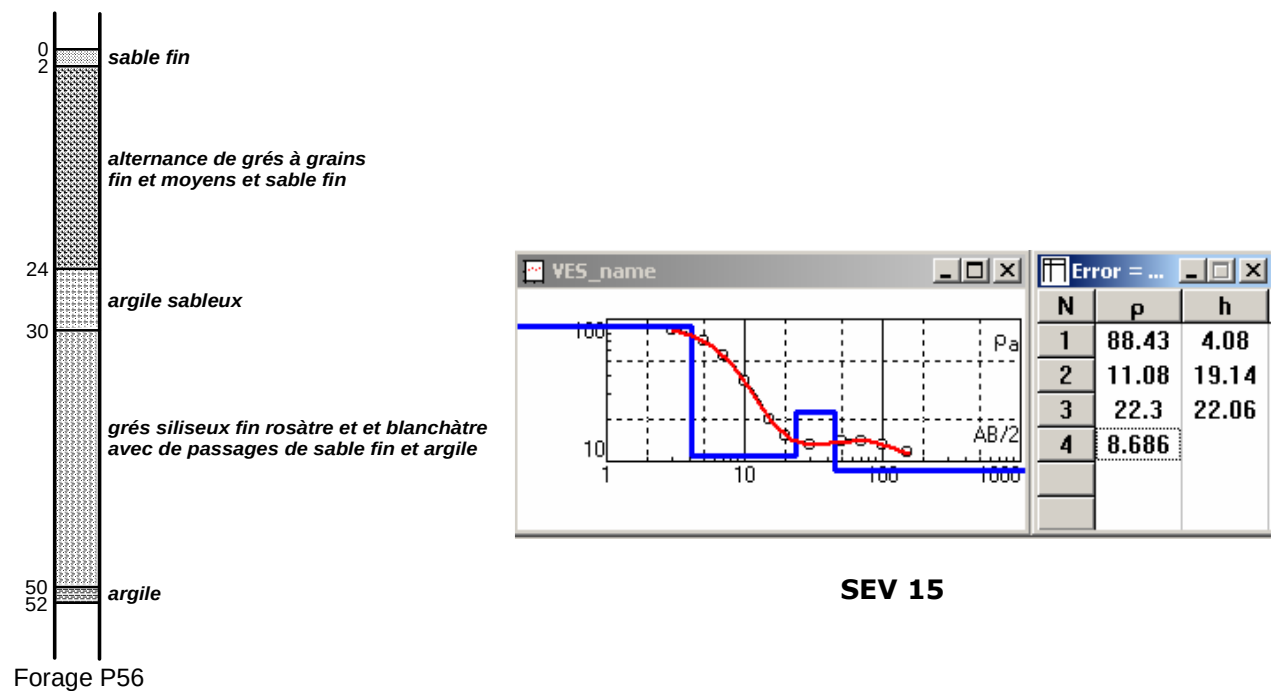


Figure. 15 : forage P56 et Sondage électrique vertical 15.

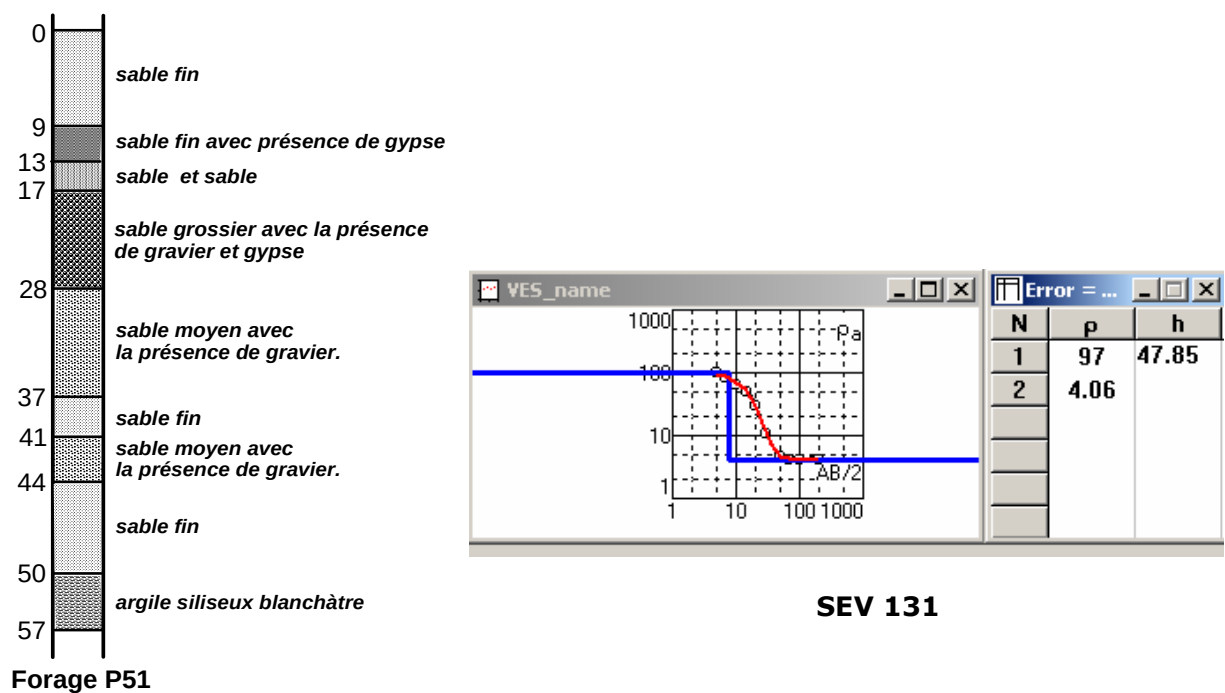


Figure. 16 : forage P51 et le Sondage électrique vertical 131.

Profondeur en m		Lithologie
Mio- pliocène	0 - 9	Sable fin
	9 - 13	Sable fin avec la présence de gypse
	13 - 17	Gypse et sable
	17 - 28	Sable fin avec la présence de gypse
	28 - 37	Sable grossier avec la présence du gravier
	37 - 41	Sable fin
	41 - 44	Sable moyen avec la présence du gravier
	44 - 50	Sable fin
	50 - 57	Argile sableuse blanchâtre

Après ces résultats on constate :

Miopliocène	Sable97 Ω .m
	Argile.....4.06 Ω .m

REMARQUE :

On remarque que le forage mécanique a bien différencié les formations par contre le forage électrique prend l'épaisseur allant de 0 à 50 m comme étant un seul terrain résistant.

9.1.3. Le sondage électrique vertical 76 et le forage P43 (figure. 17):

La colonne stratigraphique du forage 76 montre les formations suivantes :

Profondeur en m		Lithologie
Mio-pliocène	0 - 16	Sable éolien très fin de couleur marron
	16 - 55	Grès faiblement consolidé avec la présence des graviers et galets gréseux et des argiles
	55 - 57	Argile rougeâtre

Le diagramme du SEV N° 76 montre les résistivités suivantes :

- Un terrain très résistant de $RT = \rho_1.h_1 = 5100 \Omega \text{ m}^2$.
- Un deuxième terrain peu conducteur de $RT = \rho_2.h_2 = 3200 \Omega \text{ m}^2$
- Le substratum conducteur a une résistivité $\rho = 7 \Omega \text{ m}$.

Après la comparaison des deux forages on obtient les résultats suivants :

Mio-Pliocène	Sable	199 $\Omega \text{ m}$
	Sable Argileux.....	16.7 $\Omega \text{ m}$
	Argile.....	9.94 $\Omega \text{ m}$

Donc il y'a une bonne corrélation entre le sondage mécanique P43 et le SEV N° 76.

9.1.4. Le sondage électrique vertical 104 et le forage p44 (figure. 18) :

Le forage P44 découvre les formations suivantes :

Profondeur en m		Lithologie
Mio-pliocène	0 – 14	Sable éolien très fin de couleur marron
	16 – 55	Sable argileux
	55 – 57	Argile rougeâtre

Le sondage électrique 104 montre :

- Un premier terrain résistant ou la résistivité transversal est $RT = \rho_1.h_1 = 1300 \Omega \text{ m}^2$;
- Le second peu résistant et de résistivité transversale $RT = \rho_2.h_2 = 2340 \Omega \text{ m}^2$;
- Le substratum conducteur de résistivité égale à $15 \Omega \text{ m}$;

La comparaison et le recouplement des résultats des forages nous permettent alors d'attribuer les résistivités suivantes aux différentes formations :

Mio – Pliocène	Sable	165.1 $\Omega \text{ m}$
	Sable Argileux.....	24.01 $\Omega \text{ m}$
	Argile	7.14 $\Omega \text{ m}$

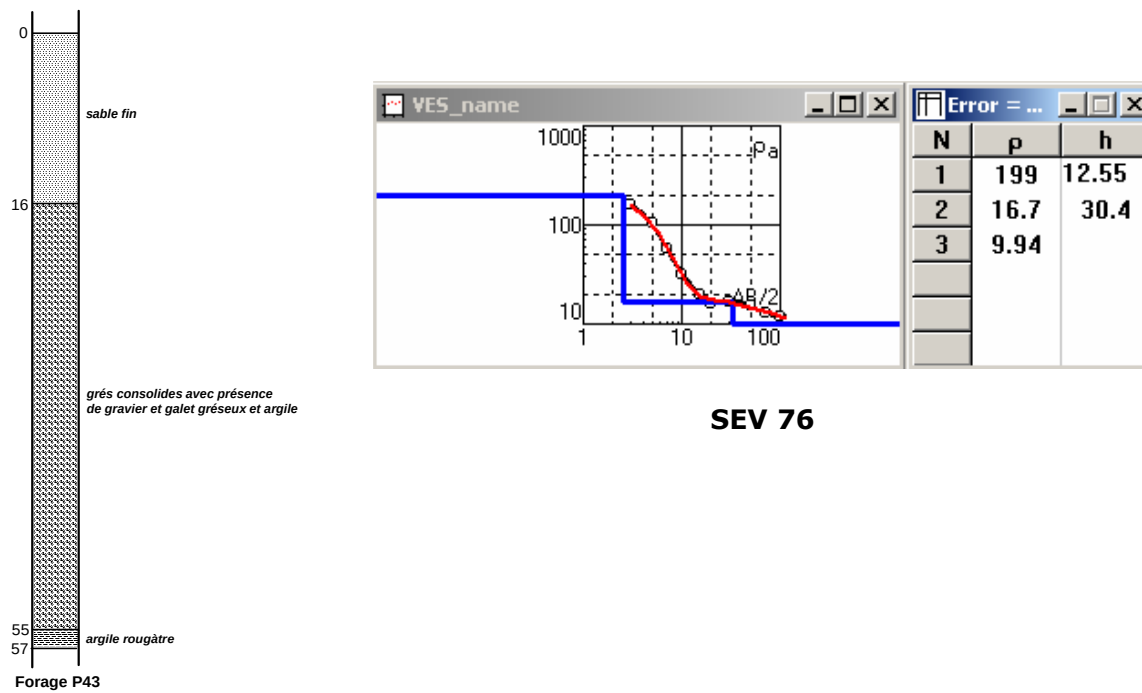


Figure. 17 : forage P43 et le Sondage électrique vertical 76.

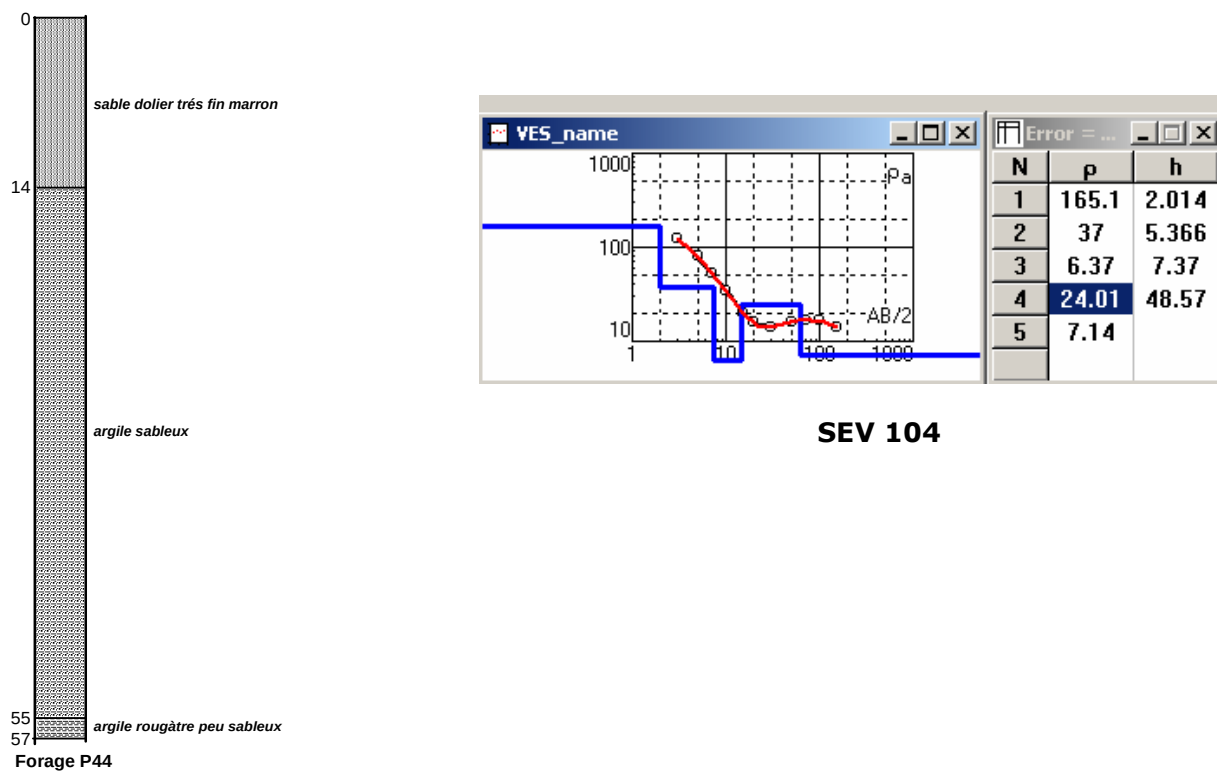


Figure. 18 : forage p44 et le Sondage électrique vertical 104.

9.1.5. Le forage P46 et le sondage électrique 30 (Figure. 19) :

La colonne stratigraphique de forage P47 montre la présence des terrains suivants :

Profondeur en m		Lithologie
Mio- pliocène	0 - 2	Sable fin
	2 - 24	Alternance de grès a grain fin à moyen et sable fin
	24 - 30	Argiles sableuses
	30 - 45	Gré siliceux fin rosâtre et blanchâtre avec présence d'argile
	45 - 48	sable argileux rougeâtre
	48 - 67	Argile

Le sondage électrique 30 montre la présence de 4 terrains :

- Le premier terrain très résistant de résistivité $RT = \rho_1.h_1 = 2500 \Omega.m^2$;
- Le deuxième terrain peu conducteur de résistivité $RT = \rho_2.h_2 = 136 \Omega.m^2$;
- Le troisième terrain peu résistant de résistivité de l'ordre de $RT = \rho_2.h_2 = 1330 \Omega.m^2$;
- En fin un substratum très conducteur de résistivité égal $7 \Omega.m$;

La comparaison des résultats du forage et ceux du sondage électrique nous permettent d'attribuer les résistivités suivantes aux différents horizons :

Mio-Pliocène	Sable fin.....	124.8 $\Omega.m$
	Sable Argileux.....	19.54 $\Omega.m$
	Argile sableuse.....	15.86 $\Omega.m$
	Argiles.....	8.65 $\Omega.m$

9.1.6. Conclusion :

Après la comparaison entre les sondages électriques et mécaniques nous pouvons par conséquent tenter de dresser une échelle de résistivité pour l'ensemble de l'étude. Cette échelle se présente comme suit :

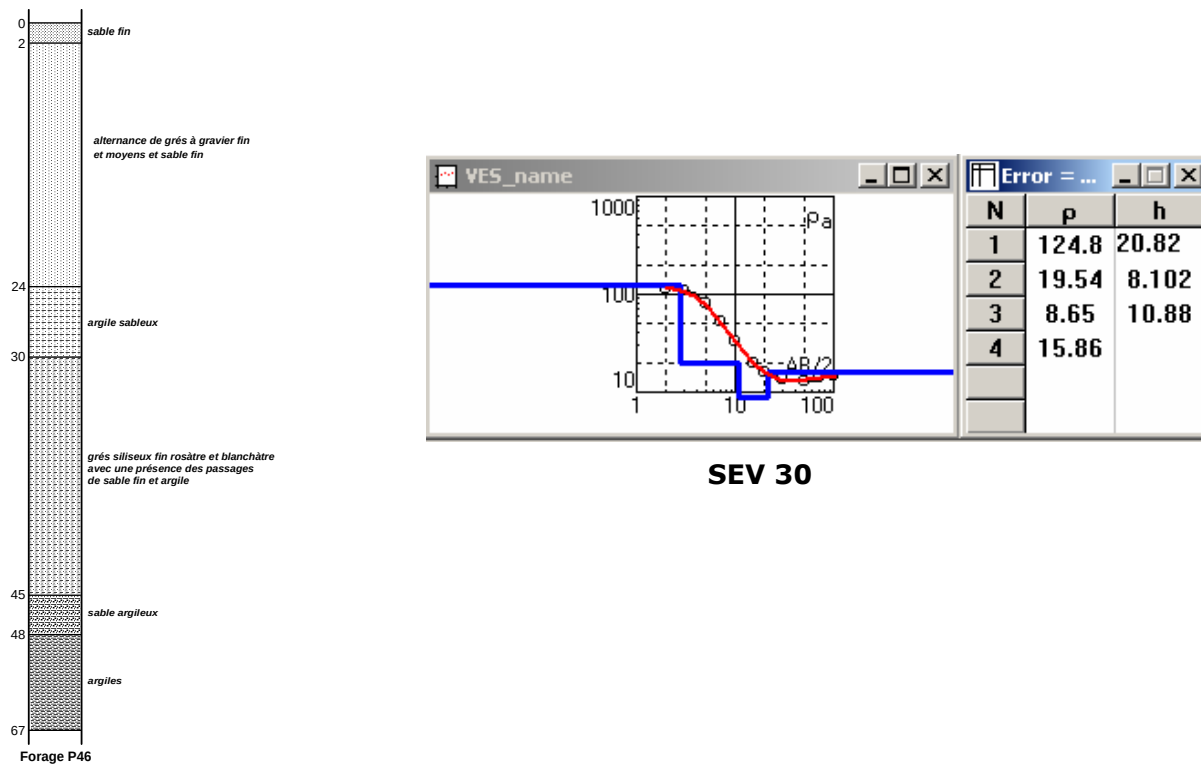


Figure. 19 : forage P46 et le sondage électrique 30

Tableau N°02 : Echelle des résistivités adoptées

Formation	Résistivité (ohm m)
Sable	Supérieure à 100
Sables argileux	20 à 100
Argiles sableuses	10 à 20
Argile	Inférieure à 10

9.2. Les coupes géoélectriques :

Les coupes géoélectriques ont été établies à partir des résultats de l'interprétation quantitative des SEV aux échelles horizontale et verticale respectivement de 1/100000 et 1/2000.

9.2.1. Coupe géoélectrique à travers le profil A : (Figure. 20)

Cette coupe établie suivant le profil A à partir de 28 SEV. Elle est orientée Sud – Ouest, Nord –Est.

Cette coupe montre la succession des terrains suivants :

- Une couche superficielle résistante d'épaisseur allant de 5 à 20 m, caractérisée par une résistivité élevée atteint jusqu'à 750 ohms.m. Cette formation correspond à des sables non consolidés (sable dunaire).
- Une deuxième couche moins résistante (13 à 70 ohms.m) d'épaisseur variable de 5 à 35m. Cette variation de résistivité montre que cette formation n'est pas homogène latéralement, elle passe du sable argileux à des argiles sableuses. Du SEV 52 jusqu'à le SEV 61 cette formation disparaît complètement au profit d'un autre terrain plus conducteur avec l'apparition de lentilles d'argiles localisées entre les sondages 61 et 86.
- Plus bas on a une couche généralement plus conductrice que la précédente (10 à 19 ohms.m) mais épaisse 50m au SEV 54. D'après sa résistivité on la rattache aux argiles sableuses ;
- En fin une quatrième couche conductrice de résistivité inférieure à 10 ohms.m et qui correspond au substratum argileux ;

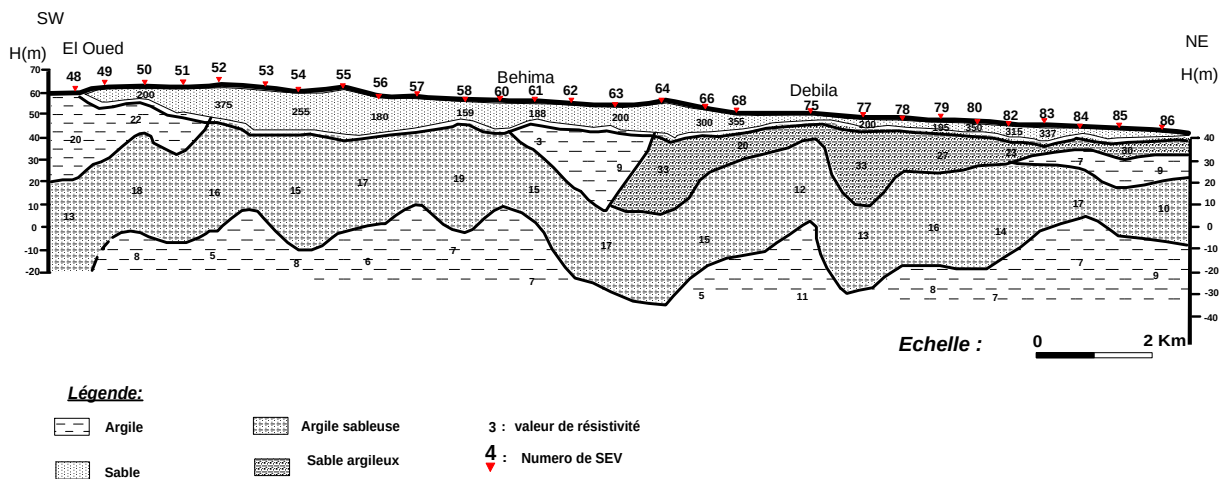


Figure. 20 : La coupe géoélectrique à travers le profil A

9.2.2. Coupe géoélectrique à travers le profil B : (Figure. 21)

Cette coupe est d'orientation Sud –Est, Nord –Ouest commence du SEV 45 à la sortie Nord –Ouest de la ville d'El-Oued et poursuit jusqu'au SEV 14 à Hassi Houba en passant par Kouinine, Guemmar et Sidi Touhami. Cette coupe géoélectrique met en évidence la série suivante :

- Une couverture sableuse résistante de résistivité varie de 125 à 550 ohm.m
- Au Nord –Ouest (SEV 24 au SEV 14)
 - o Un deuxième terrain moins résistant (20 à 50 ohms.m) et de faible épaisseur ce terrain peut être attribué à des sables argileux ;
 - o A partir du SEV 20 et sous le premier terrain apparaît une lentille argileuse de faible épaisseur ;
- Au Sud –Est (SEV 45 au SEV 40), les sables dunaires reposent sur une lentille argilo-sableuse très épaisse pouvant atteindre 50m ;
- Un troisième terrain de résistivité sensiblement constante et d'épaisseur importante de l'ordre de 70m par endroit elle correspond à des argiles sableuses avec l'apparition dans la partie centrale de deux lentilles de sable et de sable légèrement argileux ;
- Un quatrième et dernier terrain très conducteur de résistivité ne dépasse pas 10 ohms.m que l'on rattache au substratum argileux ;

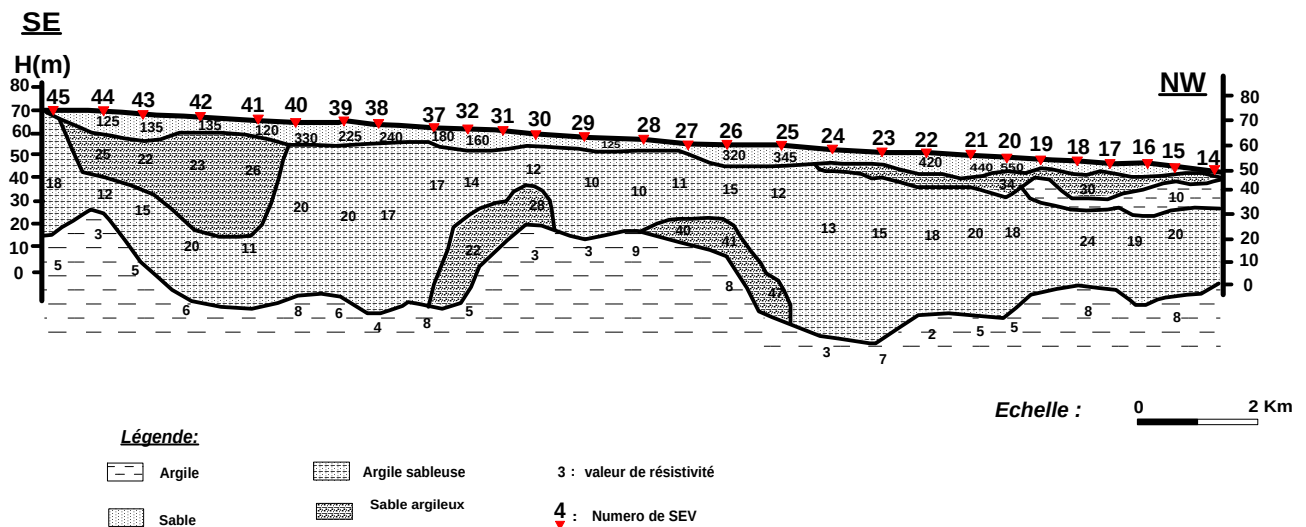


Figure. 21 : La coupe géoélectrique à travers le profil B

9.2.3. Coupe géoélectrique à travers le profil C : (Figure. 22)

D'orientation Nord –Sud, cette coupe passe par les sondages réalisés le long de l'axe Drimini – Akfadou. Cette coupe à une allure simple, elle met en évidence les formations suivantes :

- A la surface on observe une couche très résistante de 400 à 800 ohms.m et d'épaisseur faible n'excédant pas 10m correspond toujours au sable dunaire ;
- Sous les sables dunaires apparaît les sables argileux avec des résistivités de 20 à 40 ohms m et d'épaisseur variant de 5 à 15m
- Un troisième terrain plus conducteur avec des résistivités de 11 à 15 ohms.m, cette couche à une épaisseur très importante atteignant par endroit 90m ;
- En fin un substratum très conducteur (<10 ohms.m) que l'on attribue aux argiles ;

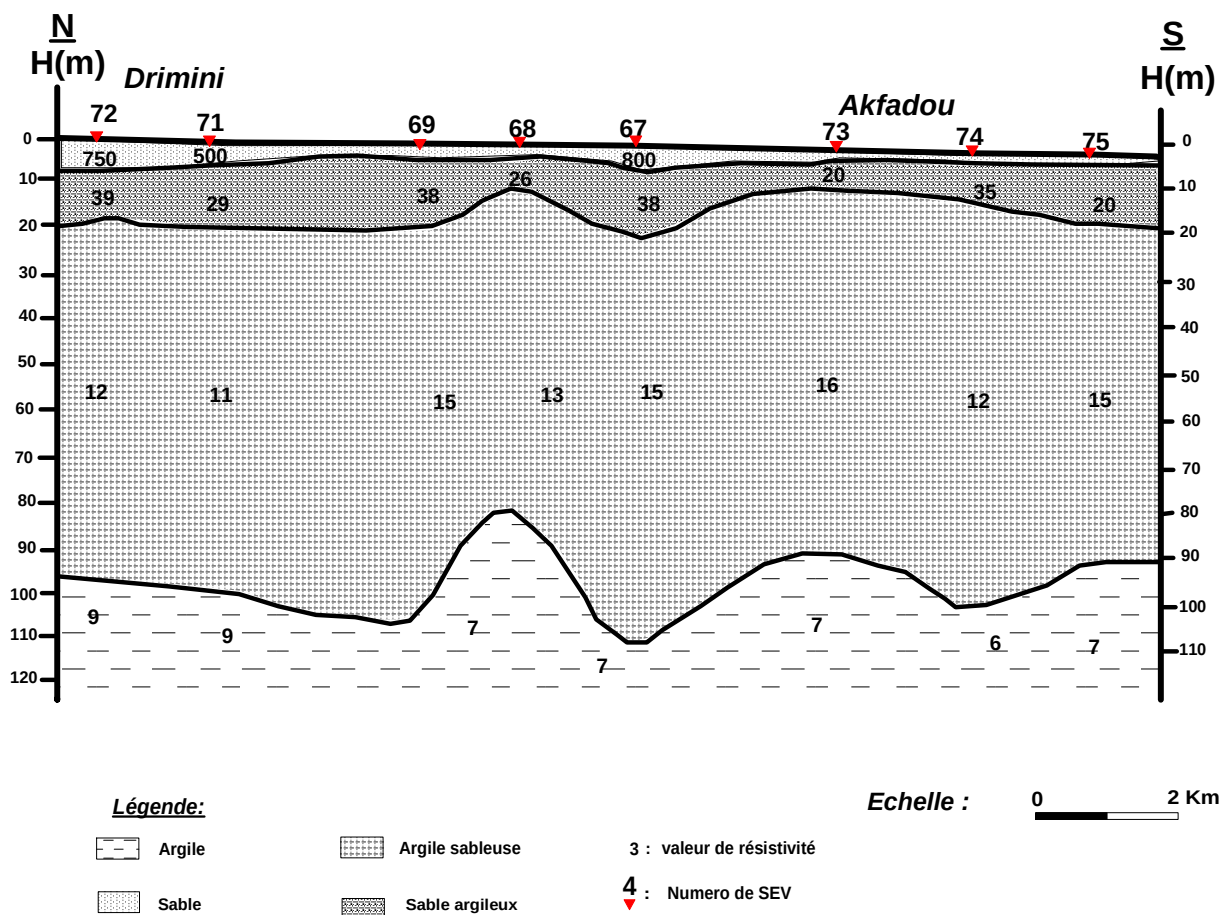


Figure. 22 : La coupe géoélectrique à travers le profil C

9.2.4. Coupe géoélectrique à travers le profil D : (Figure. 23)

Cette coupe à une orientation Sud –Nord, elle est dessinée par les SEV réalisés le long de la route qui relie Z’goum à El-Oued en passant par Trifaoui.

Elle donne la succession suivante :

- Un terrain résistant à très résistant qui correspond aux sables dunaires d’épaisseur pouvant atteindre une vingtaine de mètres ;
- Un deuxième terrain conducteur de résistivité comprise entre 10 et 20 ohms.m et d’épaisseur pouvant atteindre 80m, ce terrain correspond à une formation argilo- sableuse ;
- Le substratum argileux très conducteur de résistivité inférieure à 10 ohms.m ;

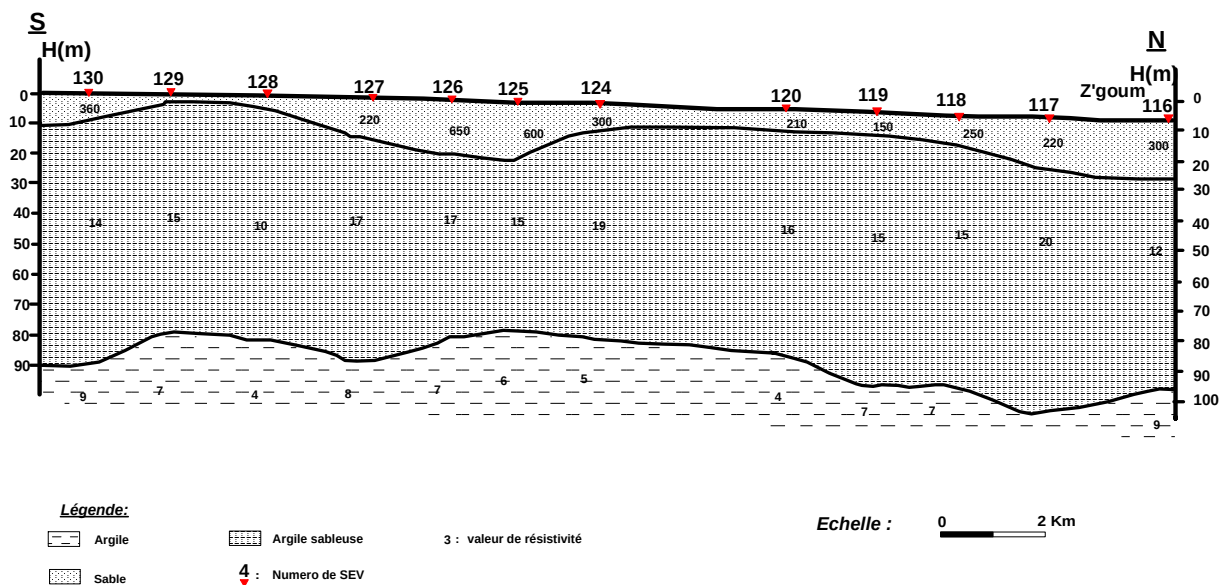


Figure. 23 : La coupe géoélectrique à travers le profil D

9.2.5. Coupe géoélectrique à travers le profil E : (Figure. 24)

Cette coupe est orientée Sud, Nord relie les sondages situés le long de la route El-Ababsa Robah.

- A la surface affleurant au SEV (96, 95 et 99) vers le Nord et les SEV (103 et 104) Vers le Sud un niveau résistant (> 100 ohms.m) que l’on associe au sable dunaire d’une épaisseur d’environ 5m ;
- Plus bas dans la coupe on observe un horizon d’épaisseur moyenne de 15m et qui domine au SEV 100, 101 et 102, cet horizon à des résistivités qui varient de 30 à 65 ohm.m correspondent au sable argileux ;

- Encore plus bas un troisième terrain qui apparaît avec de résistivités variant entre 12 et 16 ohms.m et une épaisseur très importante 50m en moyenne que l'on rattache aux argiles sableuses ;
- A la base sous les argiles sableuses on rencontre un substratum très conducteur correspondant aux argiles ;

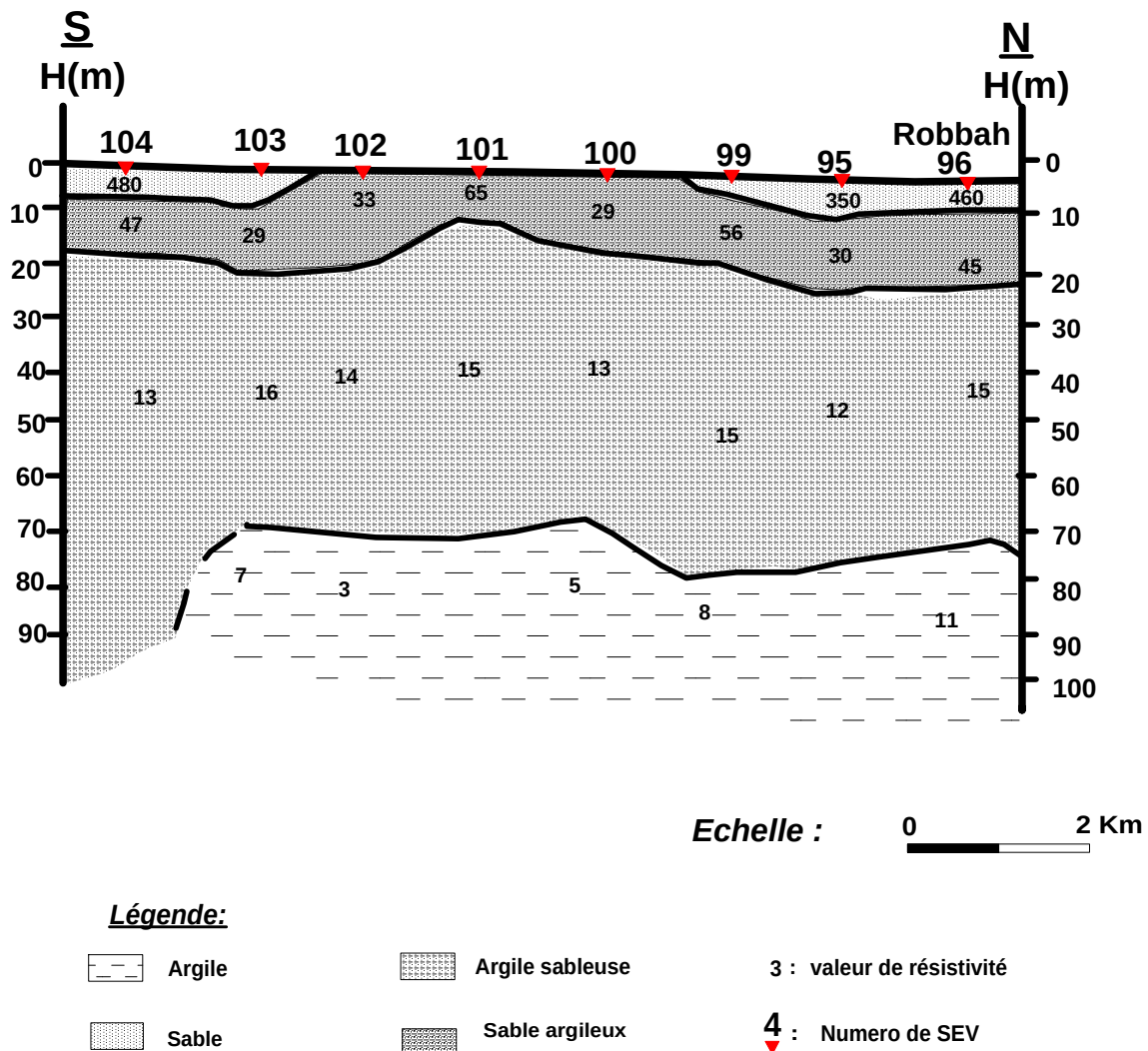


Figure. 24 : La coupe géoélectrique à travers le profil E

9.2.6. Coupe géoélectrique à travers le profil F : (Figure. 25)

D'orientation Sud -Ouest, Nord -Est, cette coupe relie les sondages 149 à 90 de Oued-Alanda vers El-Oued. Elle met en évidence la succession des terrains suivants :

- Un terrain superficiel résistant (> 100 ohms.m) ayant une épaisseur variable de 0 à 12m que l'on associe au sable dunaire ;
- Un deuxième terrain conducteur (10 à 20 ohms.m) très épaisse (environ 80m), constitué probablement par d'argiles sableuses;
- Un substratum très conducteur correspondant toujours aux argiles ;

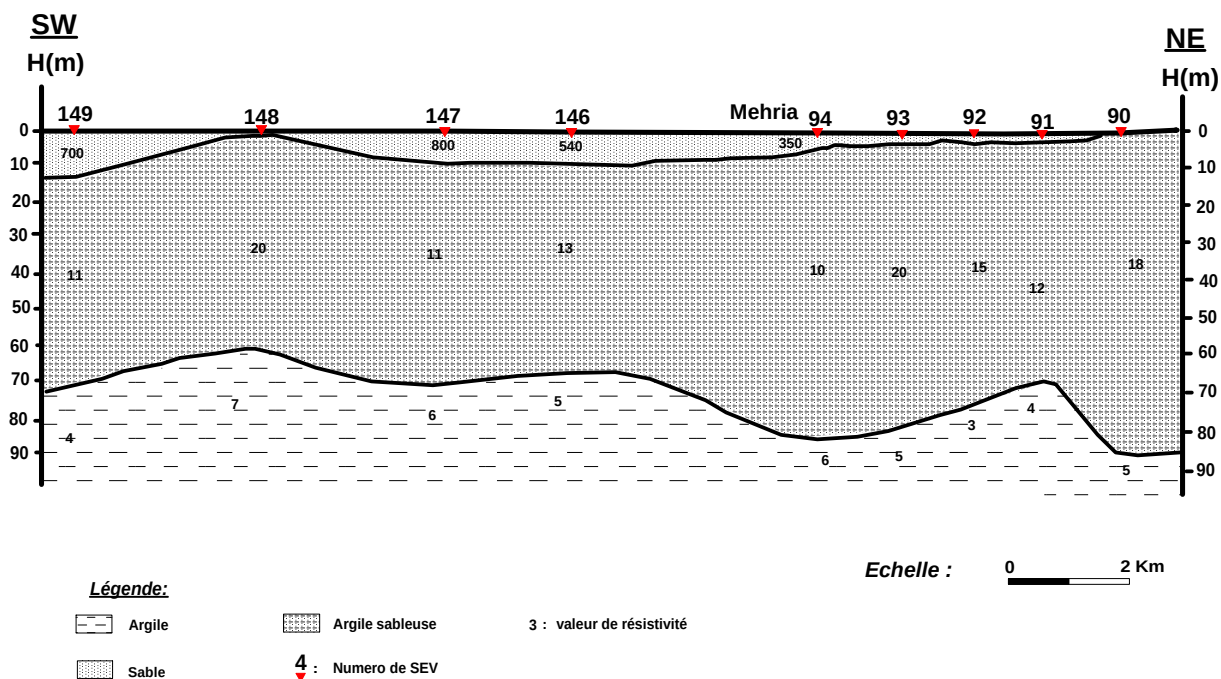


Figure. 25 : La coupe géoélectrique à travers le profil F

9.2.7. Coupe géoélectrique à travers le profil G : (Figure. 26)

Cette coupe allant de Mehria au Sud à Bou Beida au Nord en passant par Ourmes, met en évidence trois terrains :

- un premier terrain résistant de résistivité variant de 135 à 575 ohms.m, correspond aux sables plus au moins humides ;
- Un deuxième terrain conducteur présentant des valeurs de résistivité comprises entre 10 et 20 ohms.m correspondant aux sables riches en argiles ;
- En fin le substratum argileux dont la résistivité ne dépasse pas les 10 ohms.m ;

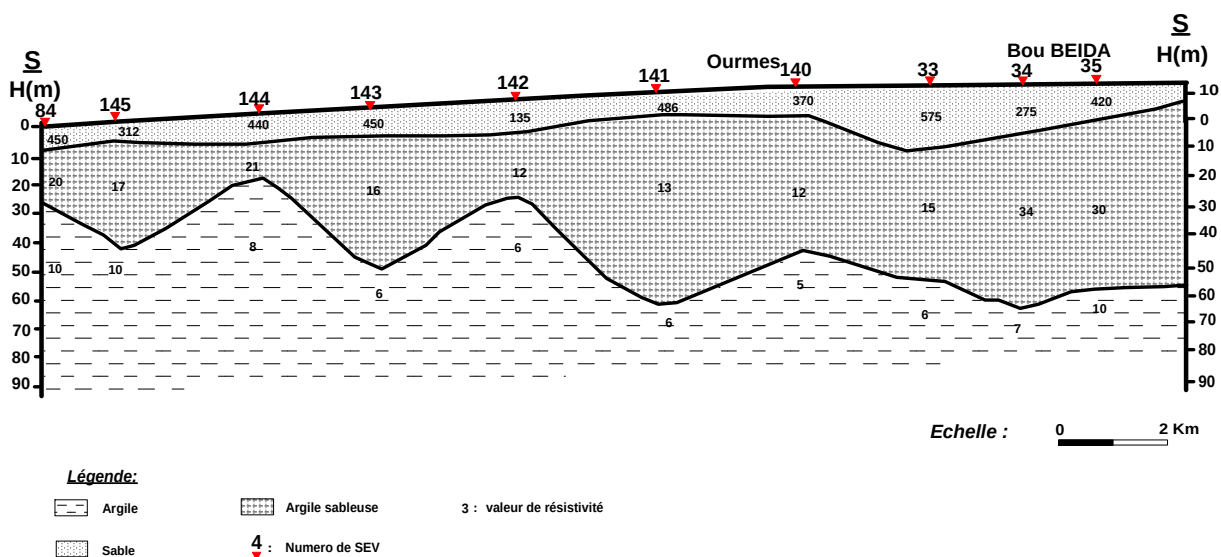
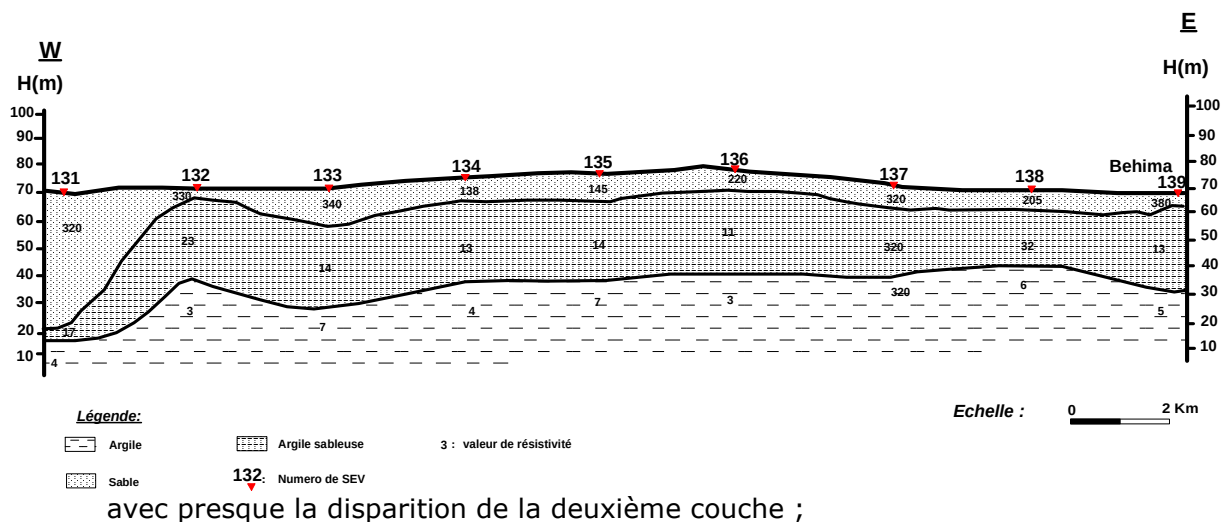


Figure. 26 : La coupe géoélectrique à travers le profil G

9.2.8. Coupe géoélectrique à travers le profil H : (Figure. 27)

D'orientation Ouest –Est, cette coupe passe par les sondages situés sur l'axe Bihima – Guemmar. Cette coupe présente les mêmes terrains et la même succession que la coupe précédente avec cependant deux particularités :

- L'épaisseur des couches n'est pas aussi importante que celle de la coupe G ;
- Au niveau du SEV 131 L'épaisseur de la première couche est importante (50m)



avec presque la disparition de la deuxième couche ;

Figure. 27 : La coupe géoélectrique à travers le profil H

9.2.9. Coupe géoélectrique à travers le profil I : (Figure. 28)

Cette coupe reliant les sondages 5 à 112 avec une orientation Nord –ouest, Sud –Est. Elle met en évidence trois terrains :

- Un premier terrain résistant de faible épaisseur correspondant aux sables plus ou moins humides ;
- Un deuxième terrain conducteur de résistivité comprise entre 10 et 26 ohms.m et d'épaisseur variable, les faibles valeurs sont visibles aux extrémités du profil ;
- Un substratum argileux conducteur ;

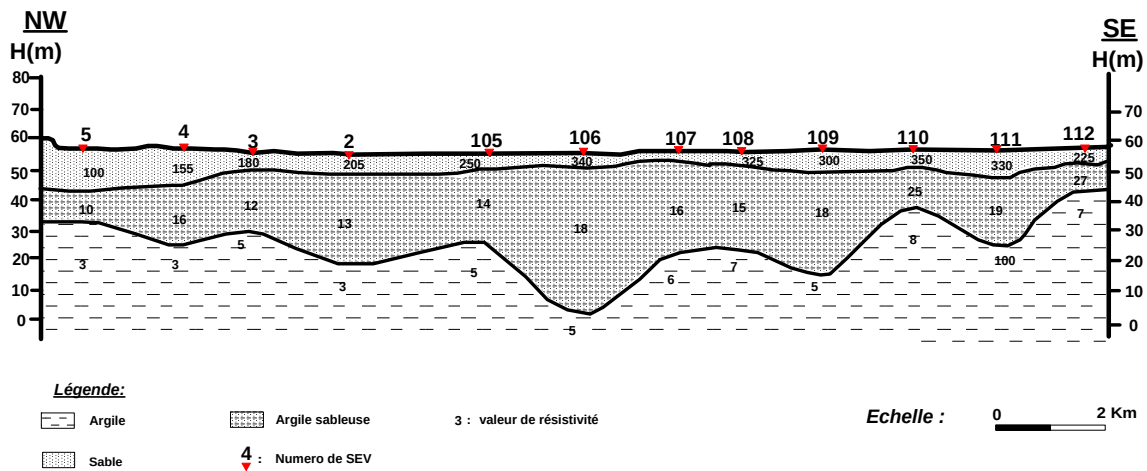
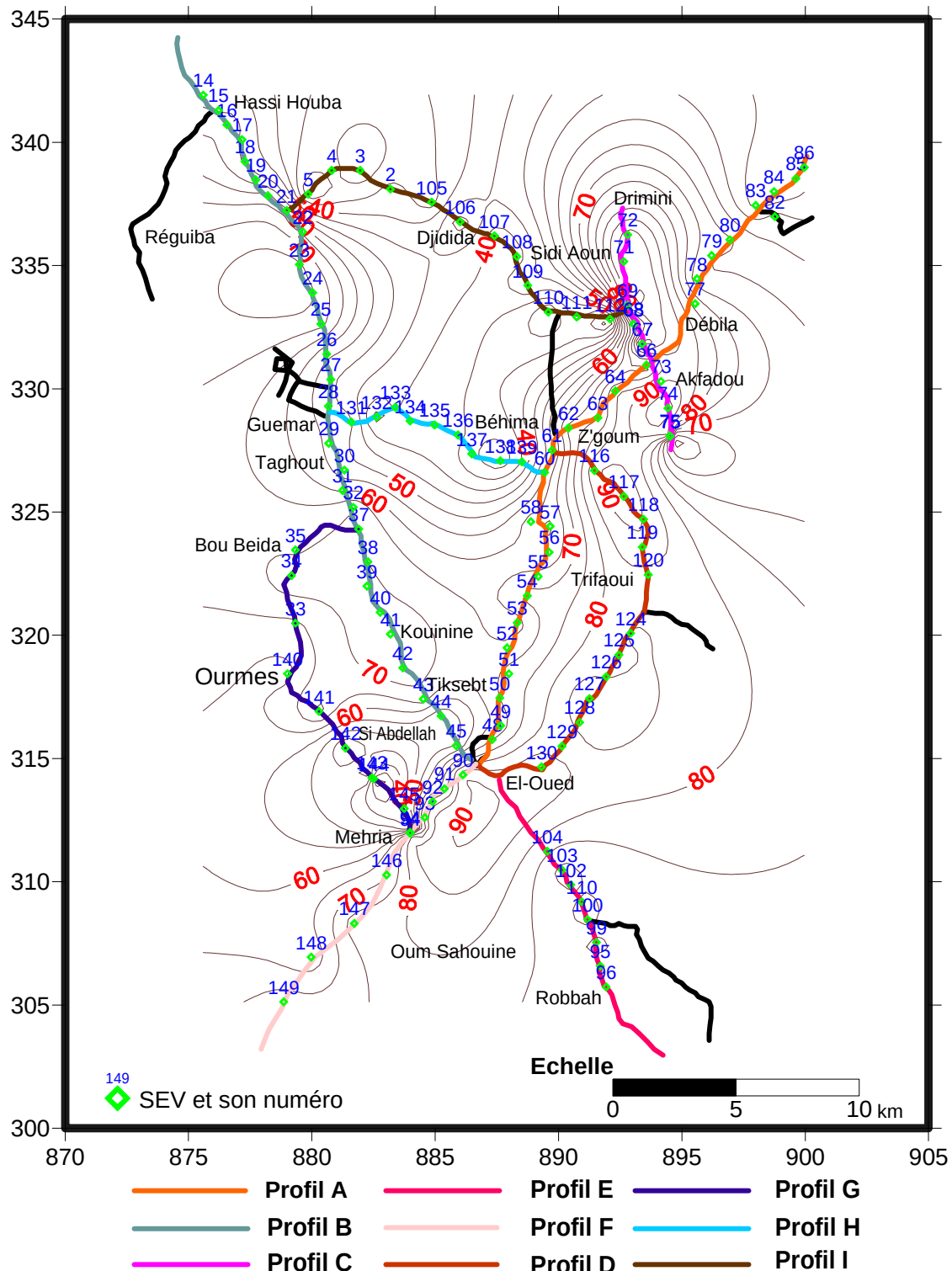


Figure. 28 : La coupe géoélectrique à travers le profil I

9.3. Commentaire de la carte du substratum argileux : (Figure 29)

L'interprétation de cette carte indique que les plus grandes profondeurs se situent dans la partie centrale de la zone d'étude, c'est-à-dire dans la région délimitée par El-Oued au Sud, Djidida au Nord et Hassi Houba au Nord -Est. Dans cette région la profondeur du substratum dépasse parfois une centaine de mètres. Dans la partie centrale de la région d'étude où le substratum argileux est profond, le reste de la région caractérisée par une remonté du substratum pouvant atteindre des profondeurs d'environ 18m.

D'une manière générale le substratum argileux présente une suite de structure tantôt positive, tantôt négative, traduisant une allure ondulée formant une succession de bombements et de dépressions.



**Figure. 29 : Carte isobathe des valeurs du substratum argileux
De la nappe libre de Oued Souf**

CHAPITRE IV

Caractéristiques climatiques de la région

1. Introduction :

La climatologie constitue un facteur important pour la connaissance du devenir des précipitations. Elle repose sur l'interprétation des données des paramètres climatiques mesurés durant une période bien définie, permettant ainsi d'estimer les différentes composantes du bilan hydrique qui influent d'une façon directe et, ou à long terme sur les variations des nappes.

2. Les précipitations :

L'étude de la pluviométrie aura pour but d'évaluer la lame d'eau tombée sur l'ensemble du bassin versant et son influence sur l'alimentation des nappes ainsi que son rôle dans le changement du comportement hydrodynamique et hydrochimique des eaux souterraine.

2.1. Répartition interannuelle des précipitations :

La variation interannuelle des précipitations pour la période de 1976 à 2006 est sur le graphe et dans le tableau N°03. Pour la station de mesure on remarque que la hauteur annuelle des précipitations pour la période considérée varie de 1.4 mm en 1983 à 17.7 mm en 1990 tan disque le module pluviométrique interannuel est égale à 73.78mm.

Tableau N°03 : Précipitations interannuelles (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.

Année	P _i (mm)	Année	P _i (mm)	Année	P _i (mm)	Année	P _i (mm)	Année	P _i (mm)
1976	9.4	1982	7.3	1988	6.4	1994	4.5	2000	3.1
1977	7.2	1983	1.4	1989	1.5	1995	4.8	2001	5.2
1978	6.1	1984	5	1990	17.7	1996	9	2002	2.6
1979	7.4	1985	3.3	1991	3.8	1997	5.9	2003	8.1
1980	8.8	1986	7.4	1992	5.3	1998	6.1	2004	11.1
1981	2.4	1987	3.3	1993	3.8	1999	12	2005	2.9
								2006	8.8

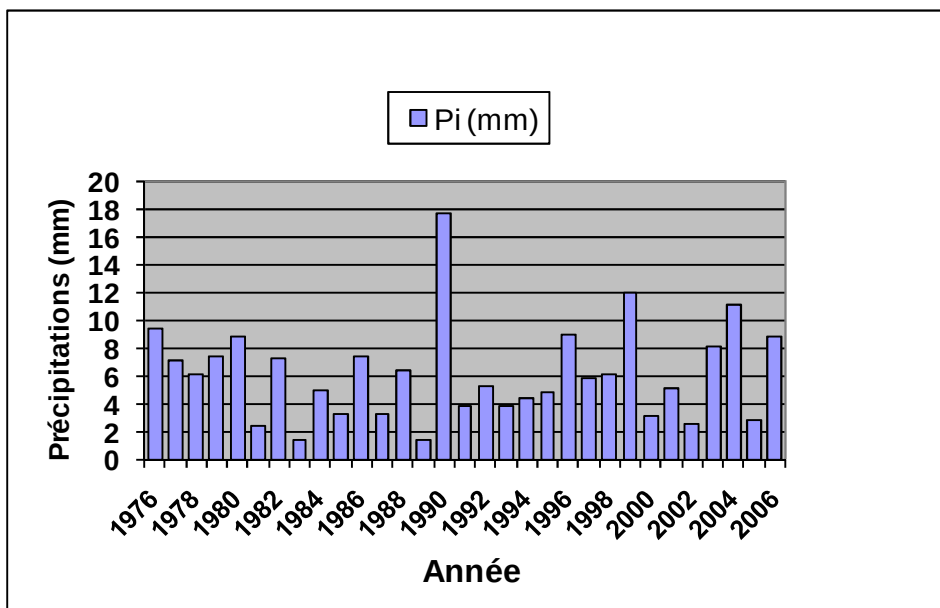


Figure. 30 : Variation interannuelle des précipitations (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.

2.2. Répartition moyenne mensuelle :

Pour toutes les stations météorologiques la pluviométrie mensuelle est très variable et n'offre pas de courbes régulièrement croissantes.

Tableau N°04 : Précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2006)

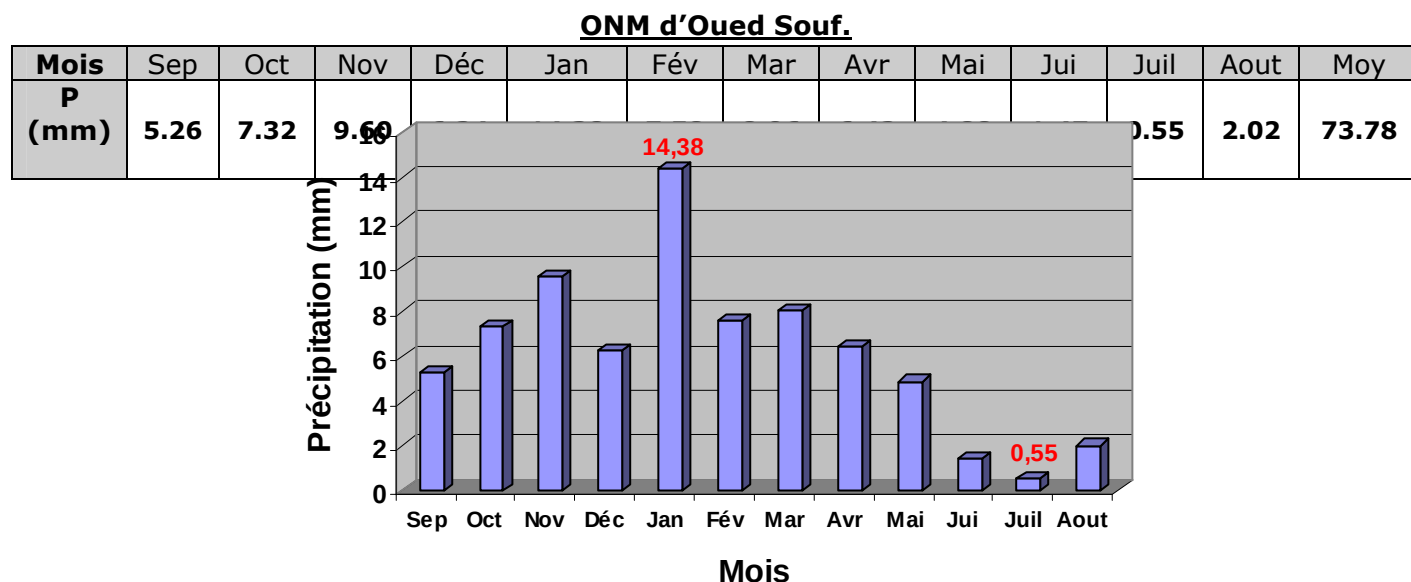


Figure. 31 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf

D'après l'histogramme on observe que le mois le plus pluvieux est le mois de Janvier avec une valeur de 14.38 mm tandis que le mois le plus sèche est celle de Juillet de 0.55 mm.

2.3. Répartitions saisonnières des précipitations :

Pour distinguer les pluies saisonnières survenant dans des conditions de températures différentes. Nous avons calculé le pourcentage des précipitations de chaque saison par rapport au total annuel (Figure. 32)

Tableau N°05 : Précipitations saisonnières (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf.

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	22.18			28.2			19.36			4.02		
P (%)	30.06			38.22			26.24			5.44		

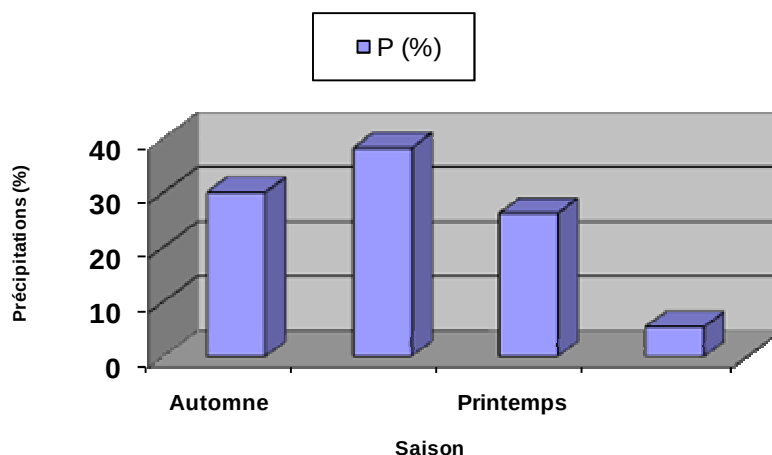


Figure. 32 : Histogramme de répartitions saisonnières de précipitations (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf

La représentation saisonnière montre une variation normale des précipitations entre les quatre saisons où la saison la plus pluvieuse est l'Hiver et la saison la plus sèche est l'été.

3. La température :

Les températures moyenne mensuelle et annuelle régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (précipitations, insolation, l'hygrométrie....etc.), le phénomène d'évaporation et par la même, le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. La température est donc l'un des éléments majeurs influençant le climat d'une région. C'est aussi cet effet caractéristique du régime thermique qui nous intéresse spécialement d'autant plus que l'évapotranspiration atteint des valeurs importantes dans notre région. Les données des températures sont elles observées à la station de Guemmar, elles figurent sur le tableau suivant.

Tableau N°06 : Moyennes des températures mensuelles (1976 – 2006)

Mois	Température		
	T °C (Min)	T °C (Moy)	T °C (Max)
Septembre	26.2	28.65	31.8
Octobre	18.8	22.74	26.9
Novembre	12.4	15.9	17.6
Décembre	8.7	11.46	14
Janvier	8.4	10.46	13.7
Février	10.7	12.96	15.6
Mars	13.1	16.71	21
Avril	10.3	20.64	29.9
Mai	22	25.70	29.3
Juin	20.3	30.26	34
Juillet	31.2	33.42	36
Août	30.8	33.27	36.1
Moyenne	17.72	21.84	25.49

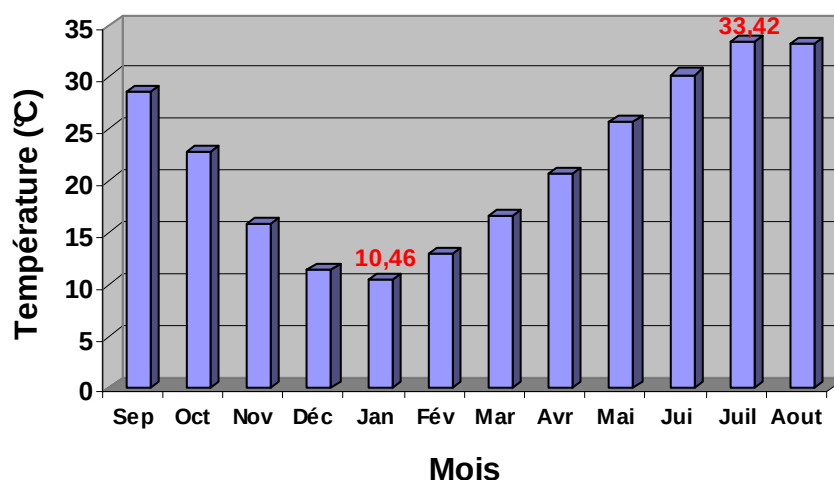


Figure. 33 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (1976 – 2006) ONM d'Oued Souf

Les données observées pendant une période de 30 ans à la station de Guemmar font ressortir que les températures moyenne enregistrées prennent en générale des valeurs élevées avec un maximum enregistré au mois de Juillet (33.42 °C) et un minimum pendant le mois de Janvier (10.46 °C).

4. Le climat de la région :

A fin de préciser les conditions climatiques de la région d'étude nous avons utilisé plusieurs méthodes : l'indice d'aridité de De. Martonne, le diagramme der L. Emberger, la méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls et la méthode de G Euverte.

4.1. Indice de De. Martonne :

En appliquant la formule de De. Martonne 1923

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

D'où :

I : Indice d'aridité ;

P : Précipitations moyennes annuelles en mm ;

T : Température moyenne annuelle en °C ;

Suivant les valeurs de I obtenues De. Martonne a établie la classification suivante :

I < 5: climat Saharien (hyperaride);

5 < I < 7.5: climat desertique;

7.5 < I < 10: climat steppique;

10 < I < 20 : climat semi aride ;

20 < I < 30 : climat tempéré ;

La région du Souf présente une valeur (I=2.32) ce qui correspond a un climat Saharien (confirmé par l'abaque de l'indice d'aridité).

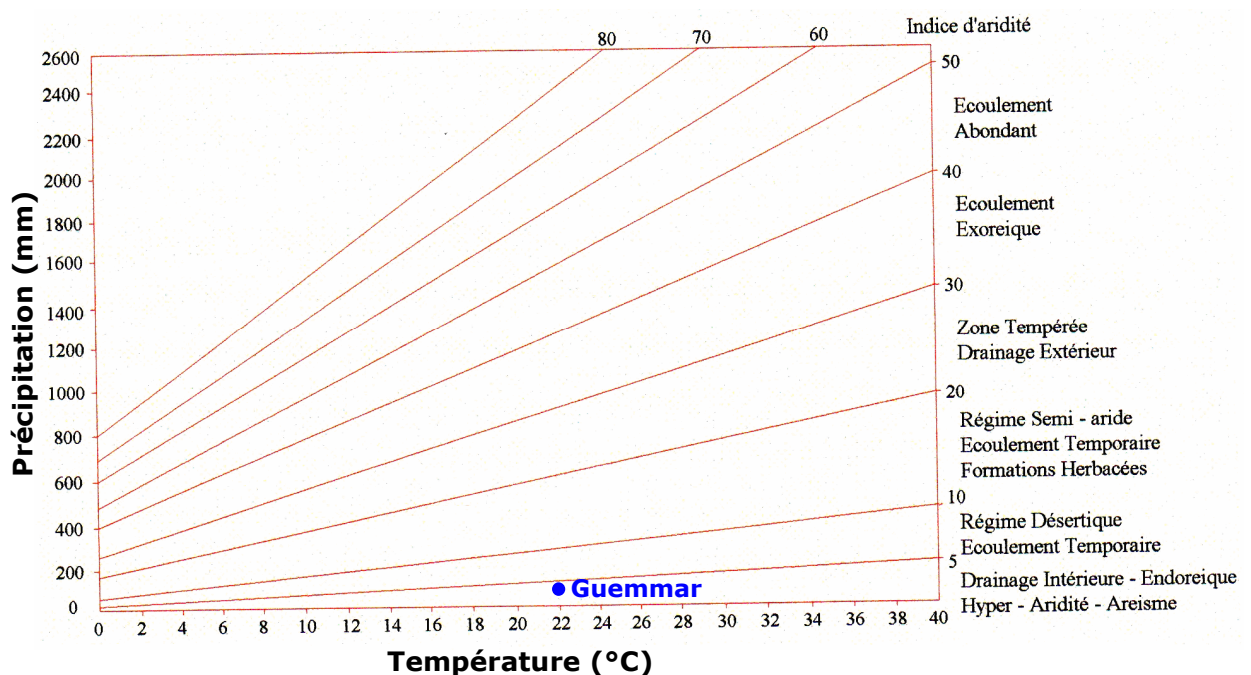


Figure. 34 : Abaque de l'indice d'Aridité de De. MARTONNE de la vallée du Souf**4.2. Le climat – gramme de L. Emberger :**

Pour préciser le climat de la région nous employons le "climat gramme" de L. Emberger (figure. 35) sur lequel nous avons reporté les données relatives a la station de Guemmar avec en abscisse la moyenne des minima de la saison froide en (°C) et en ordonnée Q_2 donné par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

Avec :

P : Précipitations annuelles en mm ;

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimée en degré absolu (°K) ;

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid exprimée en degré absolu (°K) ; ($T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273.2$).

Les valeurs des différents paramètres et les résultats sont reportées dans le tableau N°07.

Selon le clima-gramme de L. Emberger nous constatons que la station se situe dans la zone Saharien avec Hiver chaud.

Tableau N°07 : Les différents paramètres du climat – gramme de L. Emberger

Station	P (mm)	M		m		Q_2
		°C	°K	°C	°K	
Guemmar	73.78	36.1	309.3	8.4	281.6	9.01

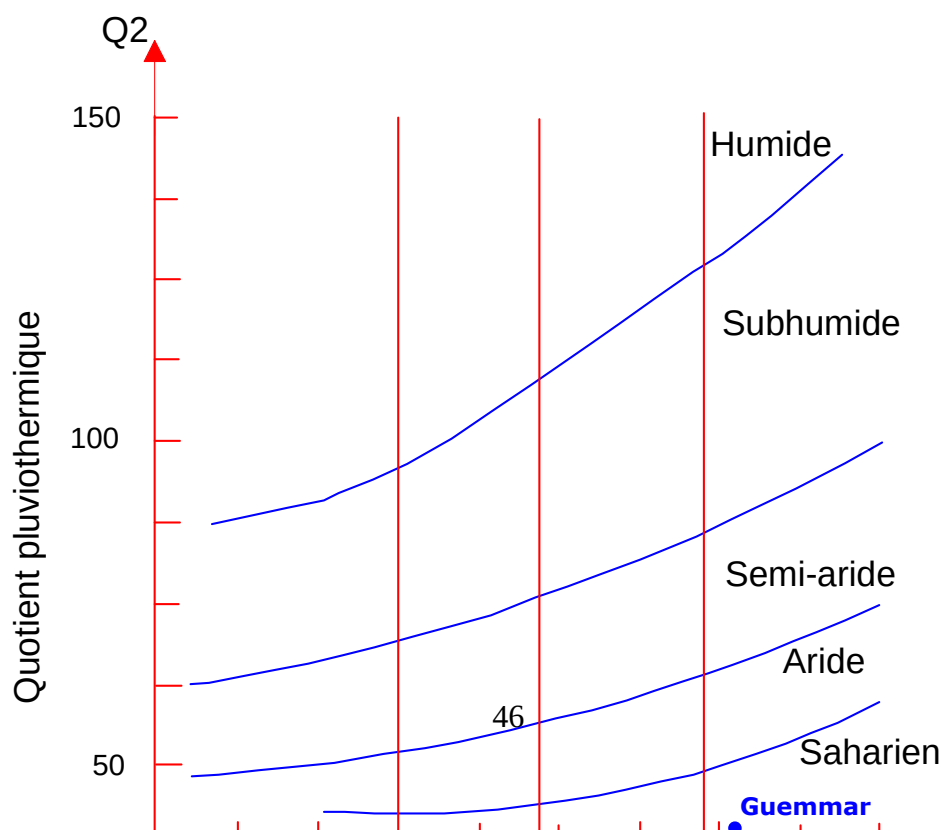
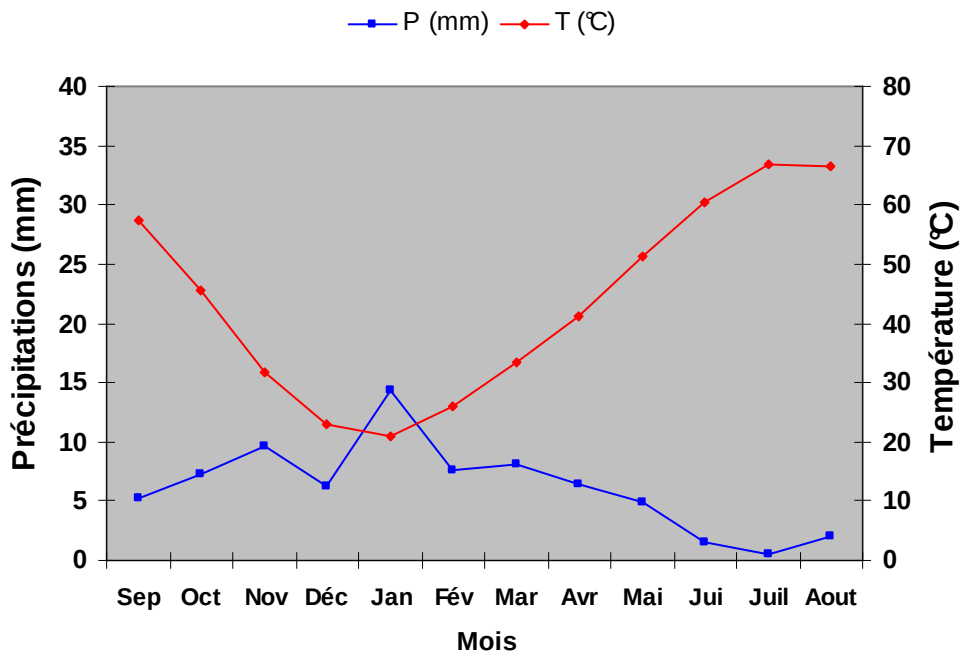


Figure. 35 : Clima-gramme de L. EMBERGER de la vallée du Souf**5. Méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls :**

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls est la combinaison de deux paramètres climatiques principaux qui sont la température et les précipitations (figure. 36). Pour ces deux auteurs un mois sec est celui où le total moyen des précipitations exprimé en mm est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P \leq 2T^{\circ}\text{C}$). Cette relation permet d'établir un graphique ombrothermique sur lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations. D'après la figure nous remarquons que la station de Guemmar présente une seule période sèche qui s'étale sur toute l'année sauf le mois de Janvier où les précipitations dépassent le double de température ($P > 2T$).

**Figure. 36 : Diagramme Ombrothermique de la vallée du Souf****6. Méthode d'Euverte :**

Le rapport P/T établi mensuellement permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol, il permet également de définir trois types de régimes.

- Un régime sec où $1 < P/T < 2$;
- Un régime sub- humide où $2 < P/T < 3$;
- Un régime humide où $P/T > 3$;

Tableau N°08 : Les valeurs de P/T déterminées par la Méthode d'Euverte

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
P (mm)	5.26	7.32	9.6	6.24	14.38	7.58	8.06	6.42	4.88	1.47	0.55	2.02
T (°C)	28.65	22.74	15.9	11.46	10.46	12.96	16.71	20.64	25.7	30.26	33.42	33.27
P/T	0.18	0.32	0.60	0.54	1.37	0.58	0.48	0.31	0.19	0.05	0.02	0.06

D'après les résultats du tableau on constate que la région du Souf est soumise à un régime sec.

7. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement :

La connaissance du bilan d'eau d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations entre l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration est définie comme étant une restitution de l'eau sous forme de vapeur de surface terrestre à l'atmosphère. Cette notion englobe aussi bien la lame d'eau évaporée à partir du sol que celle transpirée par les plantes. Elle est donc un élément important pour l'établissement du bilan hydrique et dépend de plusieurs paramètres : la température, les précipitations, l'humidité de l'air et le couvert végétal.

Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

Il existe plusieurs formules empiriques qui permettent de calculer l'évapotranspiration potentielle mais leur application sont sujettes à des conditions et doivent subir certaines corrections locales.

Calcul de l'ETP suivant la formule de CW. Thornthwaite : La formule de calcul de l'évapotranspiration potentielle selon C.W. Thornthwaite tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

La formule de l'ETP est comme suit :

$$ETP = 16 \left[\frac{10T}{I} \right]^a \cdot K \quad \text{En (mm)}$$

Où :

ETP : Evapotranspiration mensuelle ;

T : Température moyenne mensuelle en (°C) ;

I : Indice thermique annuel : $I = \sum_{i=1}^{12} i$;

i : indice thermique mensuel déterminé par l'expression : $i = (T/5)^{2.5}$;

a : coefficient calculé par la formule $a = 1.6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0.5$;

K : coefficient de correction qui dépend du temps et de la latitude ;

Les résultats de calcul de l'ETP par la méthode C.W. Thornthwaite sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau N°09 : Bilan hydrique de la station de Guemmar sur une période de 30 ans (1976-2006)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Annuel
Paramèt													
P (mm)	5.26	7.32	9.60	6.24	14.38	7.58	8.06	6.42	4.88	1.47	0.55	2.02	73.78
T (°C)	28.65	22.74	15.9	11.46	10.46	12.96	16.71	20.64	25.7	30.26	33.42	33.27	21.84
K	1.03	0.98	0.89	0.88	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.2	1.14	
ETP (mm)	139.02	77.03	30.28	13.91	11.49	18.34	39.37	67.67	123.51	181	232.24	218.32	1152.18
ETR (mm)	5.26	7.32	9.60	6.24	11.49	10.47	8.06	6.42	4.88	1.47	0.55	2.02	73.78
RFU (mm)	0	0	0	0	2.89	0	0	0	0	0	0	0	2.89
EX (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DA (mm)	133.76	69.71	20.68	7.67	0	7.87	31.31	61.25	118.63	179.53	231.69	216.3	1078.4

Le tableau du bilan hydraulique montre que la RFU n'apparaît pas sauf au mois de Janvier où les précipitations dépassent légèrement l'ETR donnant une valeur de RFU de l'ordre de 3 mm, le ruissellement n'existe plus (climat Saharien) pendant toute la période. Le déficit agricole est constaté durant toute l'année sauf pour le mois de janvier avec une moyenne annuelle de l'ordre de 1080 mm ce qui nécessite une irrigation presque sur toute l'année.

8. L'humidité relative de l'air :

Elle est conditionnée par la température et l'existence de l'eau, selon les données fournies par l'ONM on peut dire que la variation de l'humidité est homogène avec des moyennes mensuelles variant entre 32.70% et 66.25% et une moyenne annuelle de l'ordre de 49.1%.

Tableau N°10 : Humidité relative moyenne mensuelle (1975 – 2006)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Humidité %	46.83	53.43	61.81	66.25	65.43	57.50	49.68	44.01	40.01	35.92	32.70	35.69

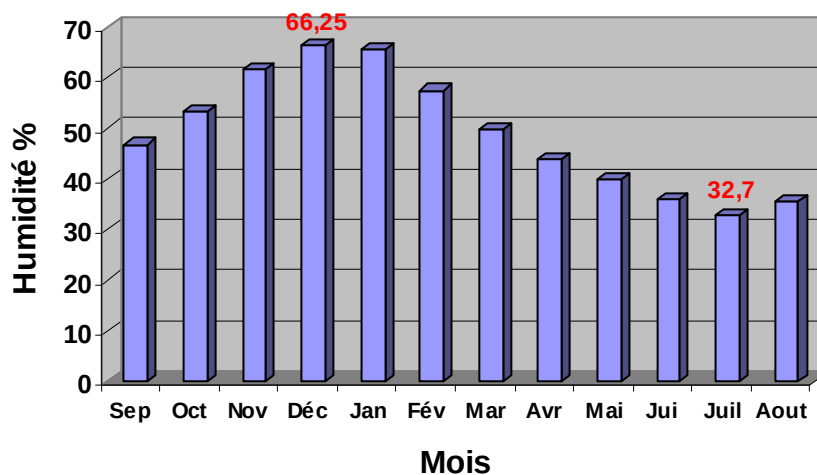


Figure. 37 : Histogramme d'humidité relative moyenne mensuelle (1975 – 2006) ONM d'Oued Souf

9. La durée d'insolation :

La vallée du Souf reçoit une quantité de lumière solaire relativement très forte (Tableau N°11) le maximum est atteint au mois de Juillet avec une durée d'insolation de 351.36 heures et le minimum enregistré au mois de Décembre avec une durée de 176.9 heures.

Tableau N°11 : La durée d'insolation moyenne mensuelle (1997 – 2006)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Insolation (heure)	275.8	259.35	232.37	228.98	239.06	249.81	276.9	192.19	309.78	345.91	351.36	332.22

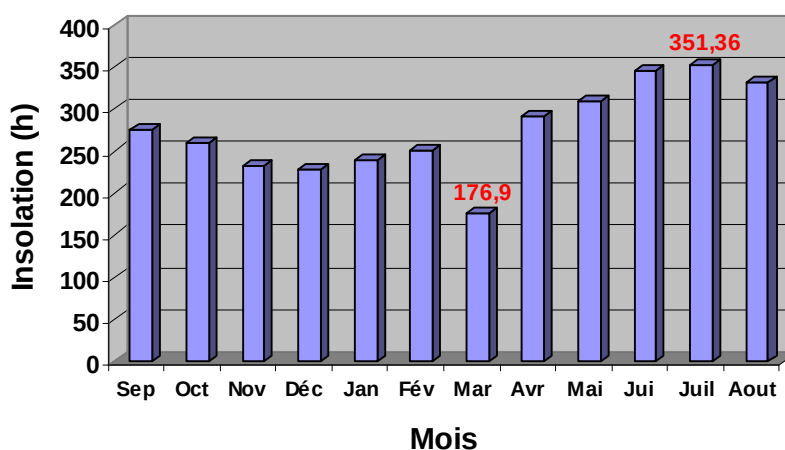


Figure. 38 : Histogramme de La durée d'insolation moyenne mensuelle (1997 – 2006) ONM d'Oued Souf

10. Le vent :

D'après les observations notées au niveau de la station d'ONM d'El Oued les vents ont une direction Est, Nord -Est, dites BAHRI, prédominant ; puis à degrés moindre ceux de direction Ouest et Sud -Ouest caractérisée par une température élevée (SIROCCO). Généralement c'est au printemps que les vent sont les plus forts (coïncidence avec la période de pollinisation des palmeraies) pouvant durer jusqu'à trois jours successifs avec une vitesse allant de 40 à 50 Km/h.

D'après le tableau le maximum est enregistré au mois de Mai avec une vitesse de 3.34 m/s et le minimum en Janvier de 2.33 m/s.

Tableau N°12 : La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2006)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Le vent m/s	3.25	2.4	2.45	2.61	2.33	2.68	3.37	4.12	4.34	3.78	3.63	3.2

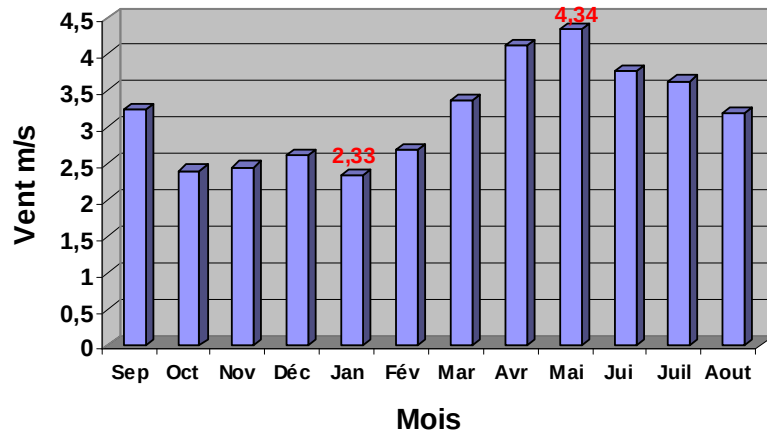


Figure. 39 : Histogramme de La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2006) ONM d'Oued Souf

11. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé l'aspect climatique de la région d'Oued Souf, caractérisée par un climat désertique ou hyperaride.

Les précipitations sont faibles et irrégulières, de l'ordre de **73.78mm**, et ne jouent généralement aucun rôle dans la recharge directe des nappes.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne **1152.18mm**.

Pour la période (1976-2006), l'évapotranspiration réelle est de **73.78mm** pour la même période. Pratiquement toute l'eau précipitée retourne vers l'atmosphère.

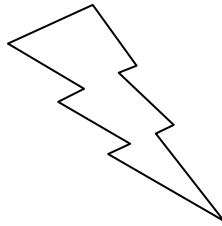
Les températures sont élevées, **21.84°C** en moyenne annuelle et **33.42°C** au mois le plus chaud, ce qui explique la forte évaporation. L'humidité relative moyenne annuelle est de **49.1%**.

Généralement le taux d'évaporation est haut, elle reprend pratiquement toute l'eau précipitée.

Le vent est le paramètre le plus régulier dans la zone d'étude.

D'après l'interprétation du bilan hydrique, on conclue que tous les mois sont déficitaires.

Partie 2



Comporte deux chapitres :

- **Le premier chapitre** traite de l'hydrogéologie de la nappe libre d'Oued Souf, en définissant sa géométrie ses paramètres hydrodynamiques par l'interprétation des essais de pompages et sa piézométrie
- **Le deuxième chapitre** la détermination des paramètres hydrodispersifs des échantillons de sables pris dans la zone du rejet au laboratoire par la méthode de traçage à fin de calculer la dispersivité longitudinale α_L

CHAPITRE V

Caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques

1. Introduction :

L'étude hydrogéologique a pour objectif de déterminer le rôle des matériaux constituant le sous-sol et de définir la structure et la géométrie de la nappe, les caractéristiques des gisements, les modalités de l'écoulement et des conditions aux limites (entrées et sorties d'eau), et la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (tels que : la Transmissivité, Coefficient d'emmagasinement, la Perméabilité, ...etc.).

La structure hydrogéologique du système aquifère de la région d'Oued Souf pourrait être schématisée de la façon suivante :

- 1- Une nappe libre exploitée par un grand nombre de puits composée essentiellement de sables.
- 2- Deux nappes profondes reconnues par les forages profonds (le continental intercalaire et le complexe terminal).

2. Cadre hydrogéologique :

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780'000 km².

Ce bassin, vaste zone d'épandage, constitue 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 subverticaux.

Les pendages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au Nord-Est du bassin (Figure. 40). 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 certain. Allant du Crétacé au Quaternaire, elle constitue une alternance de grès, sables, sables argileux et d'argiles, de calcaires, dolomies et de marnes, ainsi que d'évaporites. Cette série comporte trois grands ensembles perméables auxquels correspondent trois grands systèmes aquifères: la nappe du Continental Intercalaire, la nappe du Complexe Terminal et la nappe phréatique.

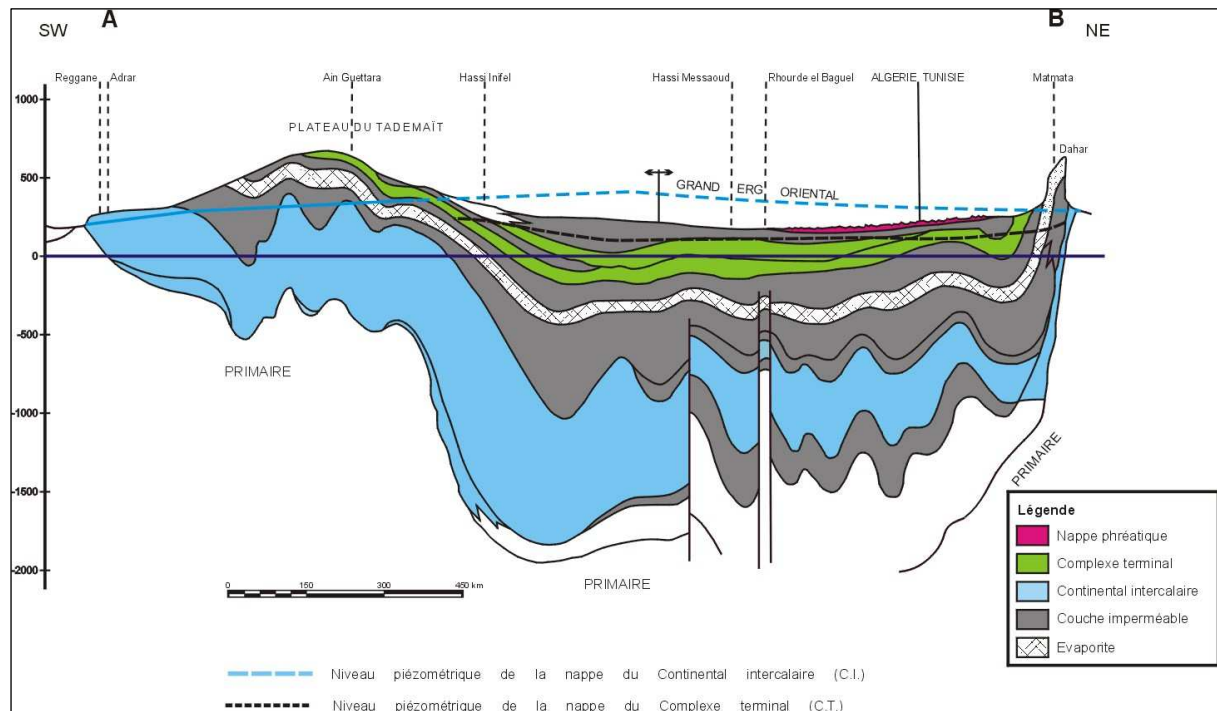


Figure. 40 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)

2.1. Le Continental Intercalaire (BARREMO-ALBIEN) : Est caractérisé par des sables gréseux argileux, capté par trois forages profonds, d'une profondeur de (1800 à 2100m), donnant un débit total de 680 l/s dont deux forages pour l'A.E.P de la ville d'El Oued (430 l/s) et un forage pour l'irrigation a SAHAN BERRY d'un débit de 250 l/s (FERME), l'épaisseur du réservoir est importante varie de 200 à 400m, sa température atteint 60°C, la pression en tête de puits ferme est de 25 à 27 Bars.

2.2. Complexe Terminal (PONTIEN) : La formation est sableuse légèrement argileuse, et est captée par 103 forages moyens, donnant un débit total de 3122 l/s ; dont 32 forages sont destinés à l'irrigation avec un débit de 995 l/s et 71 forages destinés à l'A.E.P avec un débit de 2128 l/s. L'épaisseur moyenne de l'aquifère est de 60m. La profondeur est de 300 à 500m, la température de l'eau est de 20 à 26°C.

2.3. Nappe Phréatique : Est contenue dans des sables fins intercalés par des tufs ou des lentilles d'argiles sableuses et gypseuses. Ce type de lithologie active le phénomène d'infiltration et le processus de la remontée capillaire. Cette nappe repose sur une bonne assise argileuse compacte ou plastique imperméable d'une épaisseur de 20m. Elle est captée par 10000 puits d'une profondeur variant de 5 à 80m. Vu la lithologie très perméable et d'autres facteurs, permettant la remontée rapide de son niveau et l'accélération de sa propagation.

3. Aperçu historique :

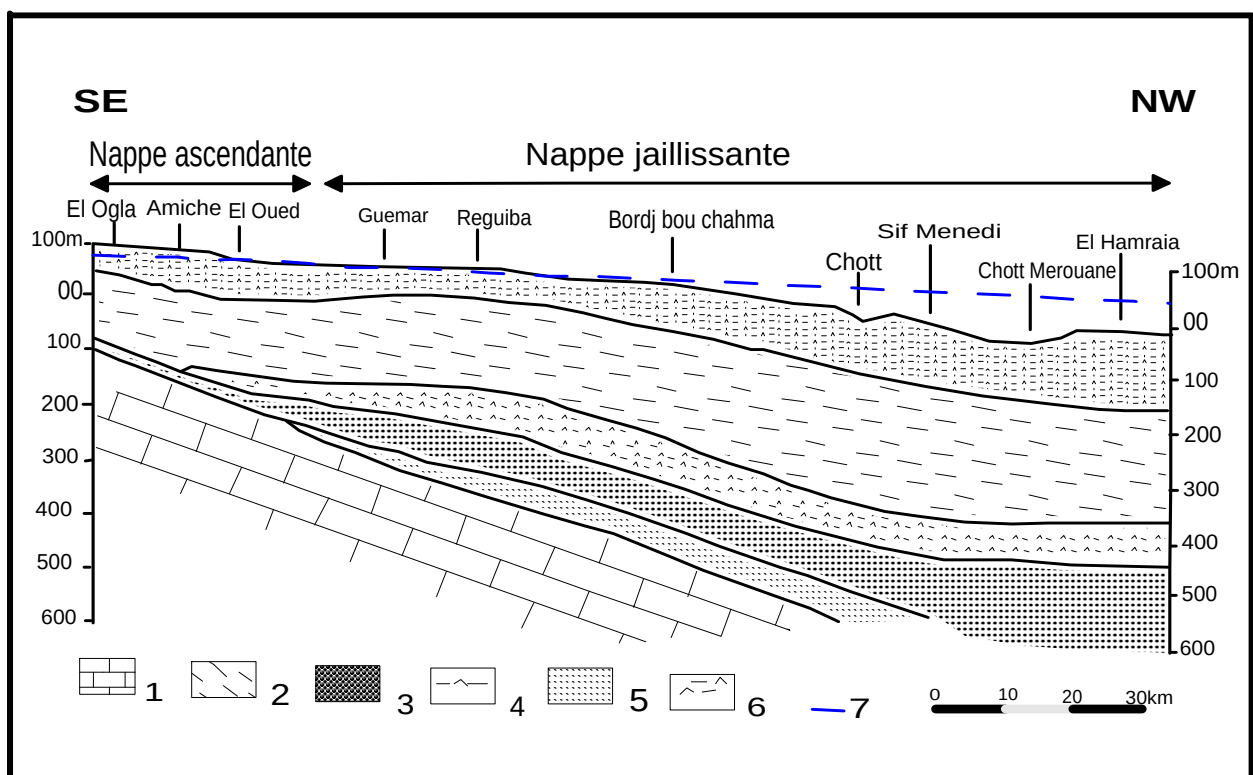
La géomorphologie de la région du Souf se présente par des reliefs très accidentés, avec l'existence de plusieurs fosses (GHITANES) inondées abritant en général les palmeraies dépériées.

Avant la réalisation du premier forage en 1956 la nappe ne susciter pas d'inquiétudes, car elle était presque l'unique ressource exploitée, soit pour l'A.E.P ou pour l'irrigation.

Autre fois dans le Souf la palmeraie était plantée dans le GHOUT à environ 1m du toit de la nappe phréatique ce qui lui permet de puiser l'eau directement de l'aquifère.

Mais avec la croissance démographique et le développement urbain et agricole de la région créant ainsi une demande importante et incessante des besoins en eau pour l'A.E.P et l'irrigation, provoquant ainsi la multiplication des forages à travers la région du Souf.

En présence de toute cette mobilisation en eau totalisant un débit de $119.92 \text{ Hm}^3/\text{an}$ et en présence d'un sol favorable au phénomène de la remontée capillaire et en l'absence de réseau d'assainissement et de drainage et d'un exutoire naturel. Toutes ces conditions accélèrent l'apparition de ce phénomène de la remontée.



1- calcaire de l'Eocène inférieur marin et de l'Eocène moyen évaporitique. 2- Argiles sableuses et marnes de la base du continental terminal. 3- Sable grossiers à graviers du Pontien inférieur. 4- Argiles et gypse dominants. 5- Argiles et sable dominants. 6- Argile sable et gypse (les trois derniers étages appartiennent au Mio-Pliocène supérieur). 7- Niveau hydrostatique de la nappe du Pontien inférieur.

Figure. 41 : Coupe hydrogéologique du Souf

4. Etablissement et interprétation des cartes piézométriques :

Depuis 1950, aucune carte piézométrique de la nappe libre du Souf n'a été établie ; ce ci est dû soit à un manque de moyens, soit à l'absence d'un réseau de surveillance piézométrique.

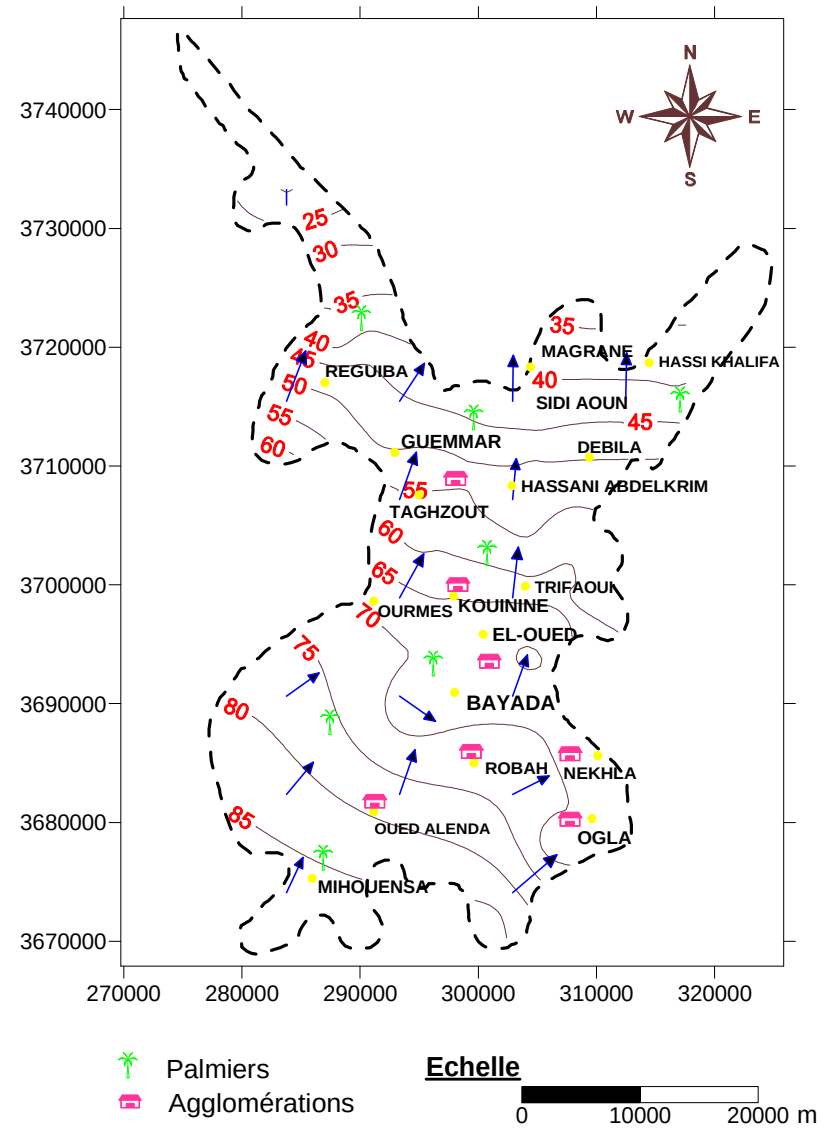
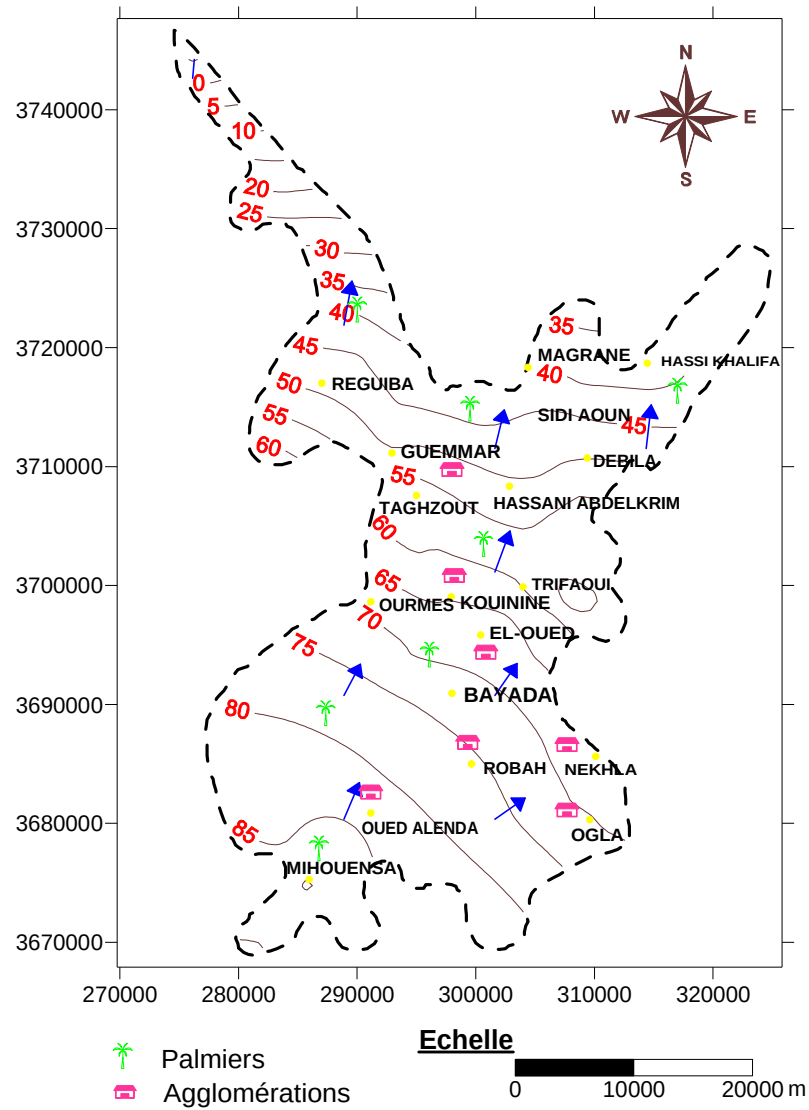
A partir du mois du Février 1993 plusieurs campagnes de mesures piézométriques ont été effectuées par les services de l'ANRH sur un réseau de surveillance préalablement choisi.

4.1. Interprétation des cartes piézométriques :

D'après les cartes piézométriques de Février 1993, Avril 1993, Juillet (1994, 1995), Mars (1998, 2000), et Avril (2001, 2002) nous remarquons que la partie haute de la nappe est située au Sud- Ouest avec une côte près de 90m (MIHOUENSA ET OUED ALENDIA) et la partie la plus basse est située à la partie Nord- Ouest avec une côte qui atteint les 5m (ROUTE DE BISKRA).

D'une façon générale le gradient hydraulique de la nappe est très faible dont les valeurs les plus faibles se localisent dans la partie Sud- Ouest (MIHOUENSA) jusqu'à El Oued où les courbes sont un peu espacées donnant des valeurs qui varient entre 0.5‰ (carte piézométrique Février 1993) et 0.9‰ (carte piézométrique juillet 1994). Dans la partie Nord- Ouest les courbes sont plus serrées avec un gradient de l'ordre 6‰.

Donc généralement l'écoulement de la nappe se fait du Sud vers le Nord.



— Courbe hydroisohypse. —> Sens de l'écoulement. - - - Limite du domaine d'observation.

Figure. 44 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Juillet 1994). Figure. 45 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Juillet 1995).

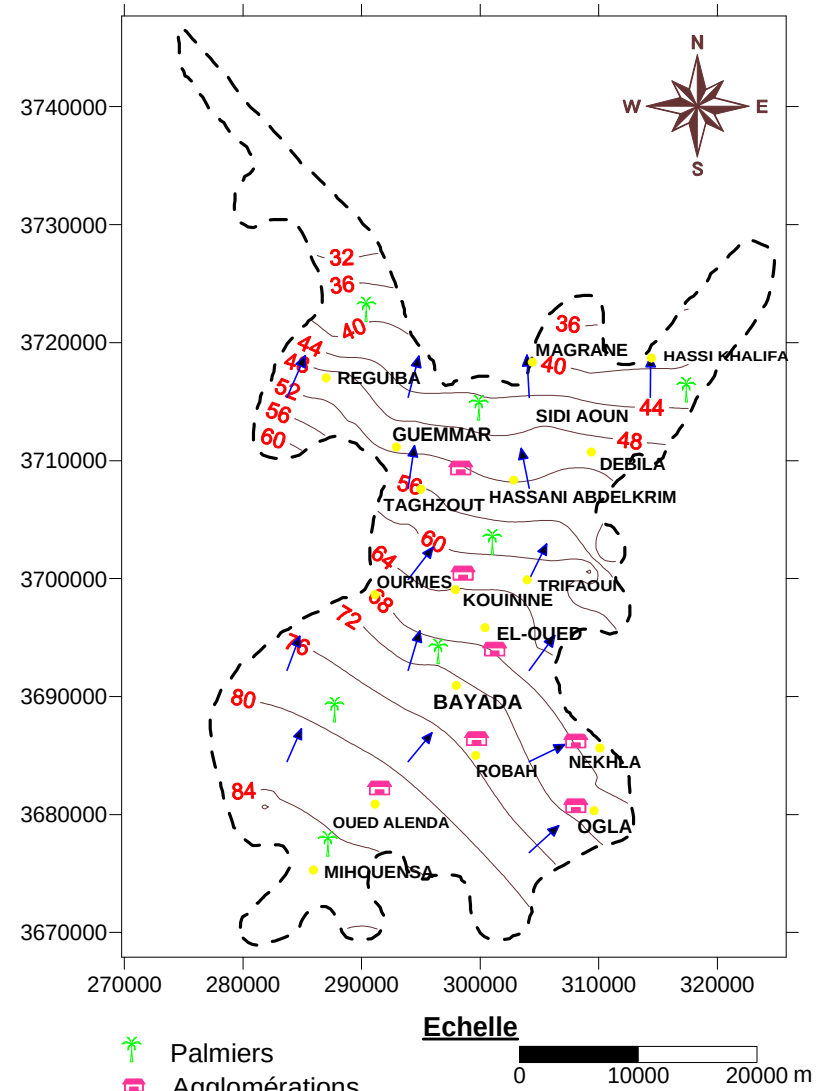
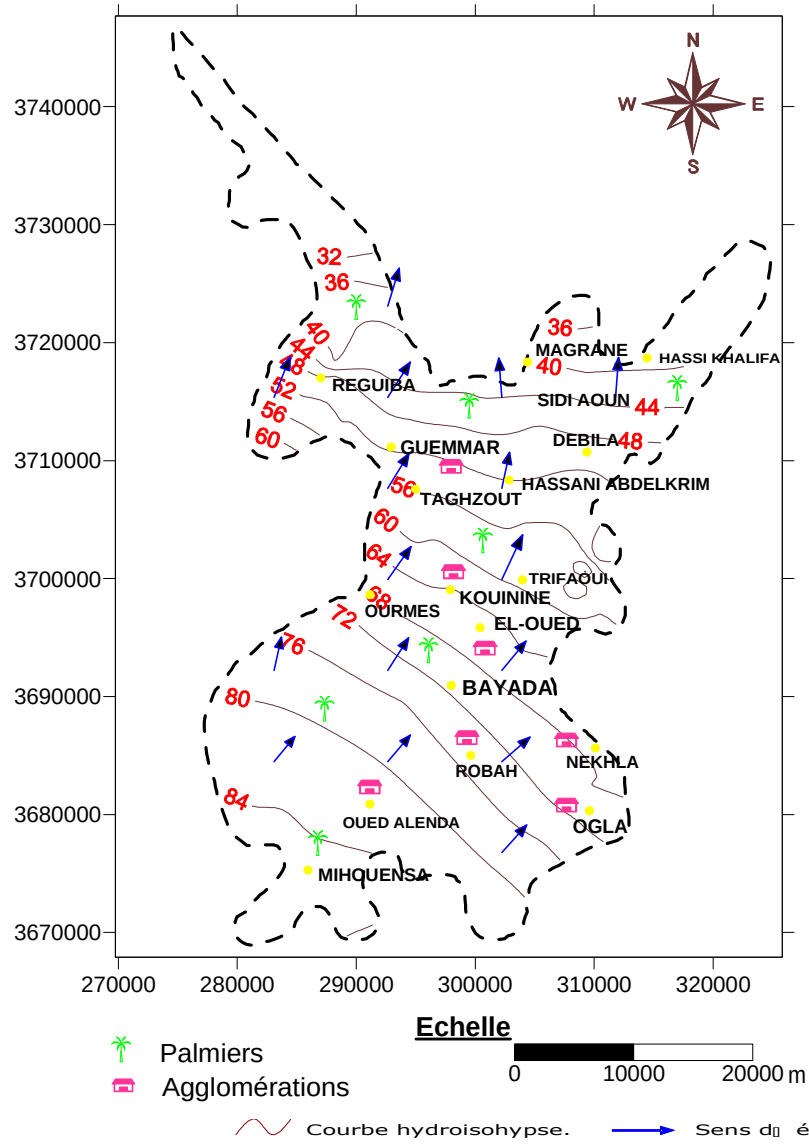


Figure. 42 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Février 1993). Figure. 43 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Avril 1993).

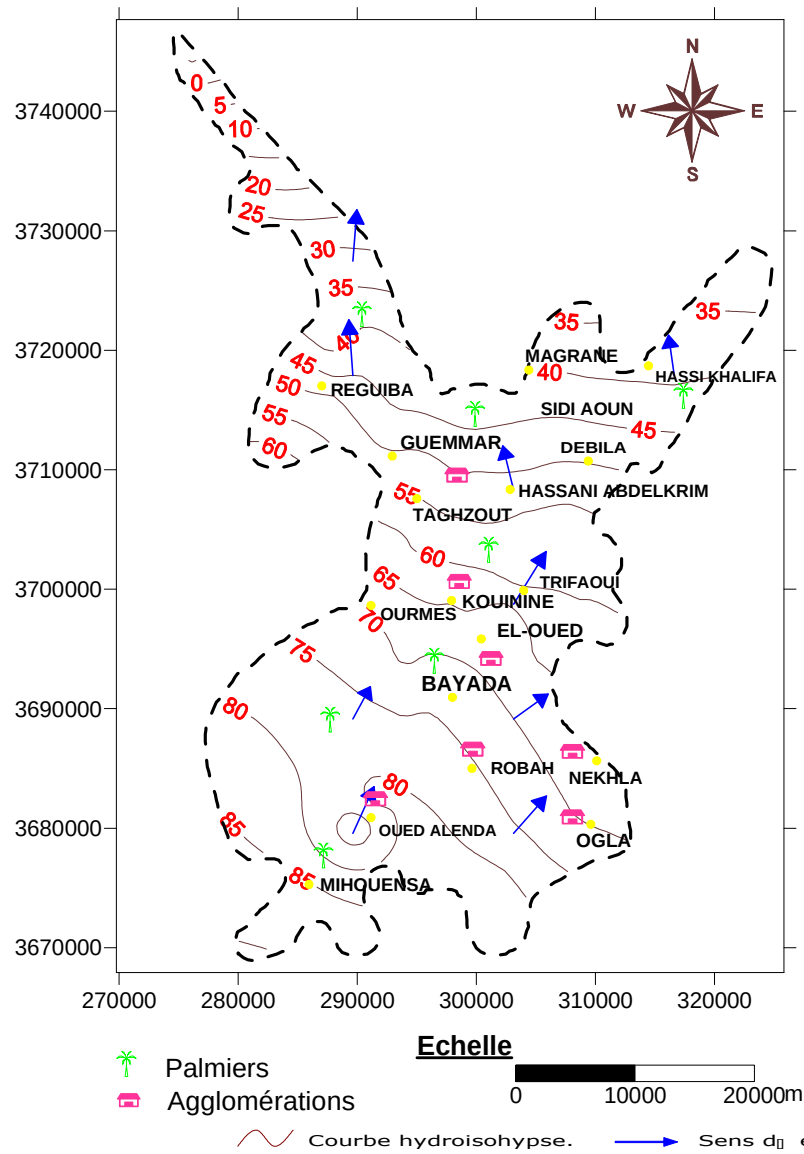


Figure. 46 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Mars 1998).

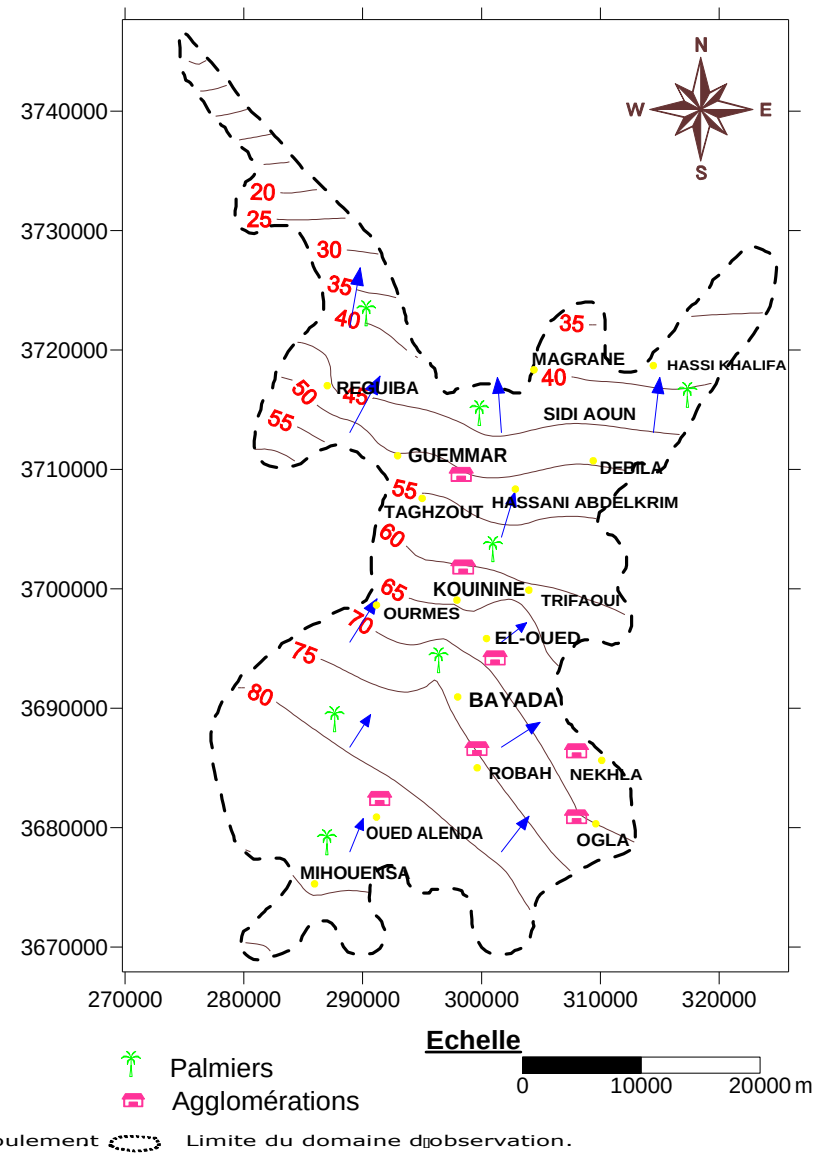


Figure. 47 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Mars 2000).

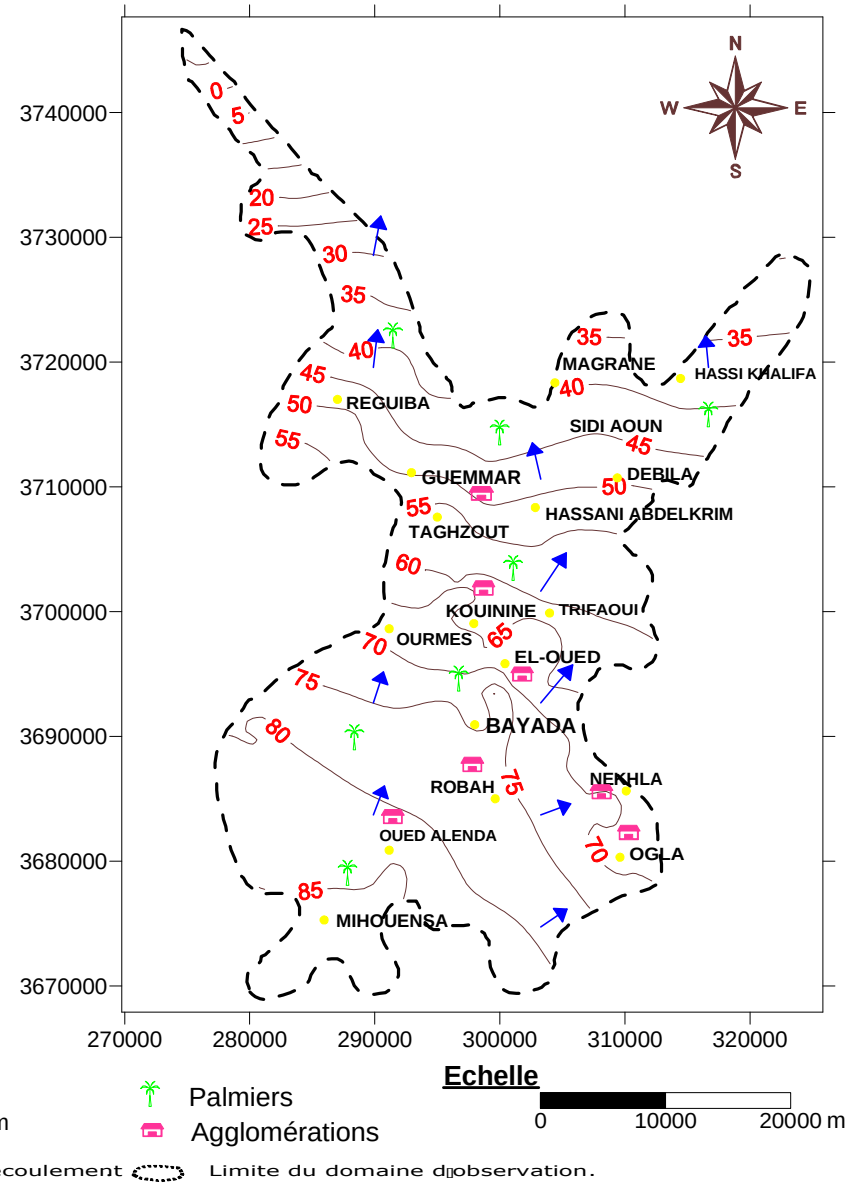
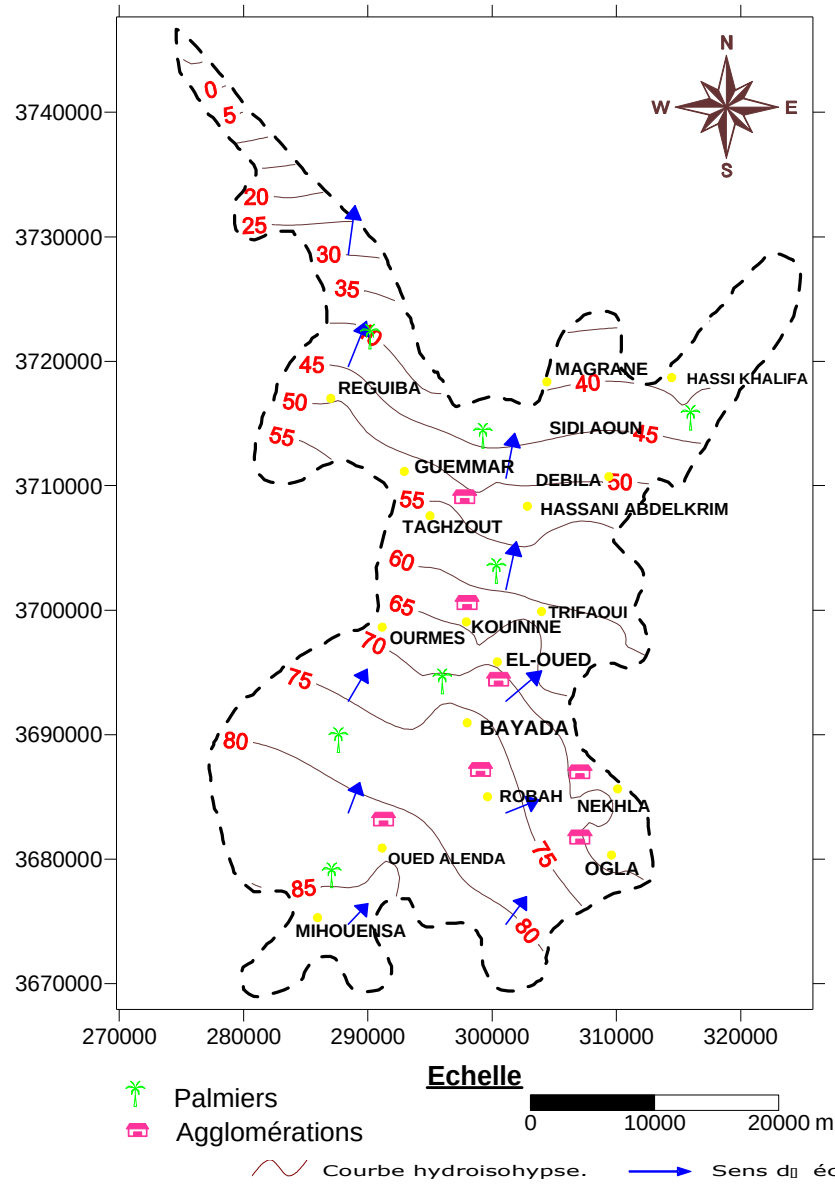


Figure. 48 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Avril 2001).

Figure. 49 : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf (Avril 2002).

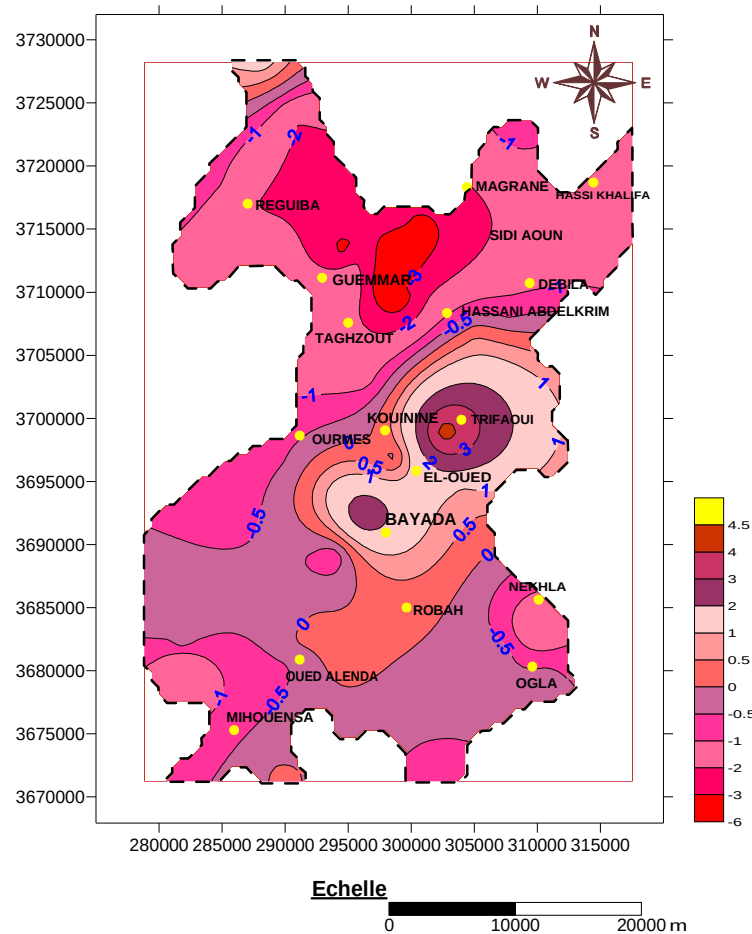


Figure. 50 : Carte de différence du niveau piézométrique entre Février 1993 et Avril 2002

4.2. Variation du niveau piézométrique entre Février 1993 et Avril 2002 :

Cette carte est élaborée pour voir la variation du niveau piézométrique entre la première campagne réalisée en Février 1993 et la dernière campagne en Avril 2002. D'après la carte on constate :

Une montée du niveau piézométrique de la nappe phréatique a été constatée :

- Aux plantations irriguées par les forages du CT de foulia (de 1.4m).
- Près du rejet de la ville d'El Oued avec une montée qui atteint les 4.5m.
- De 0.5 mètre à Robah et Kouinine.
- De 2 mètre à El Oued et Bayada.

Un rabattement dans la quasi-totalité du reste de la zone d'étude atteint les 6m au Nord-Est de Guemmar , 1.8m dans la région de Riguiba et Hassi Khalifa, 1m entre Nekhla et Ogla et de 0.7m à Mihouensa.

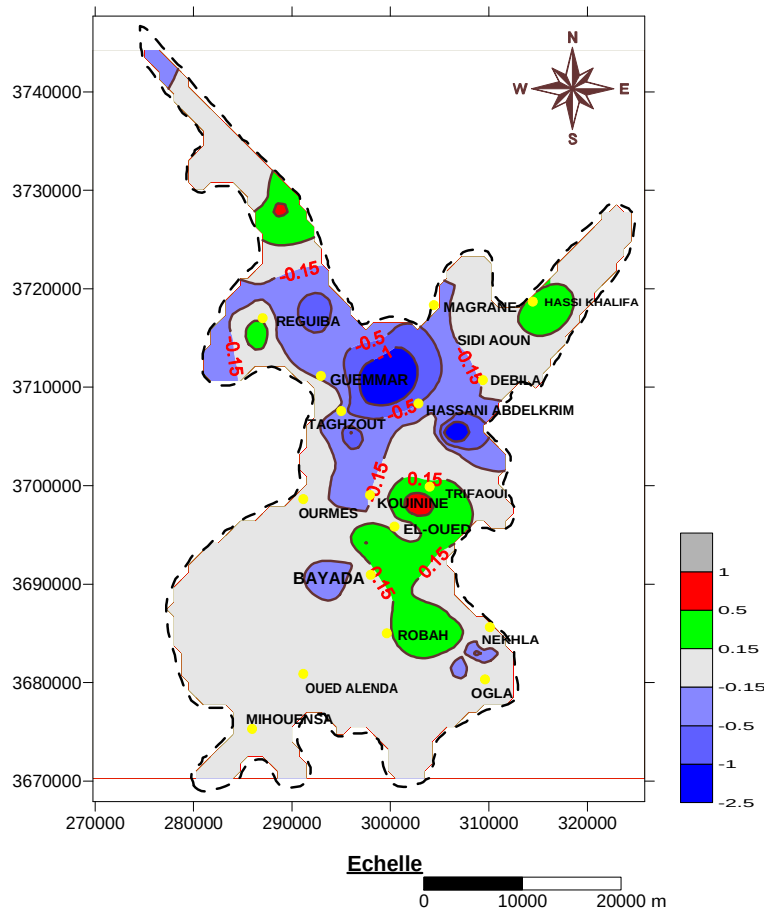


Figure. 51 : Carte de différence du niveau piézométrique entre Avril 2001 et Avril 2002

4.3. Variation du niveau piézométrique entre Avril 2001 et Avril 2002 :

Entre Avril 2002 et Avril 2001 une montée (en vert) du niveau de la nappe phréatique a été constatée :

- Sous les centre urbains
 - 0.4m à Robbah.
 - 0.5m à Ruigiba.
 - 0.5m à El Oued et Hassi Khalifa.
 - 0.15m à Nekhla, Oglâ, Oued Alenda, Mihouensa et Ourmes.
- Au rejet de la ville d'El Oued et vers le Nord Ouest avec une montée de 1m.

Un rabattement (en bleu) de la nappe phréatique a été constatée dans les zones agricoles au Nord d'El Oued avec une descente de 2.4m à l'Est de Guemmar, Au Sud- Est de Hassi Abdelkarim et de 1m à 0.5m autour de ceux-ci et aux alentours de Nekhla et à l'Ouest de Bayada.

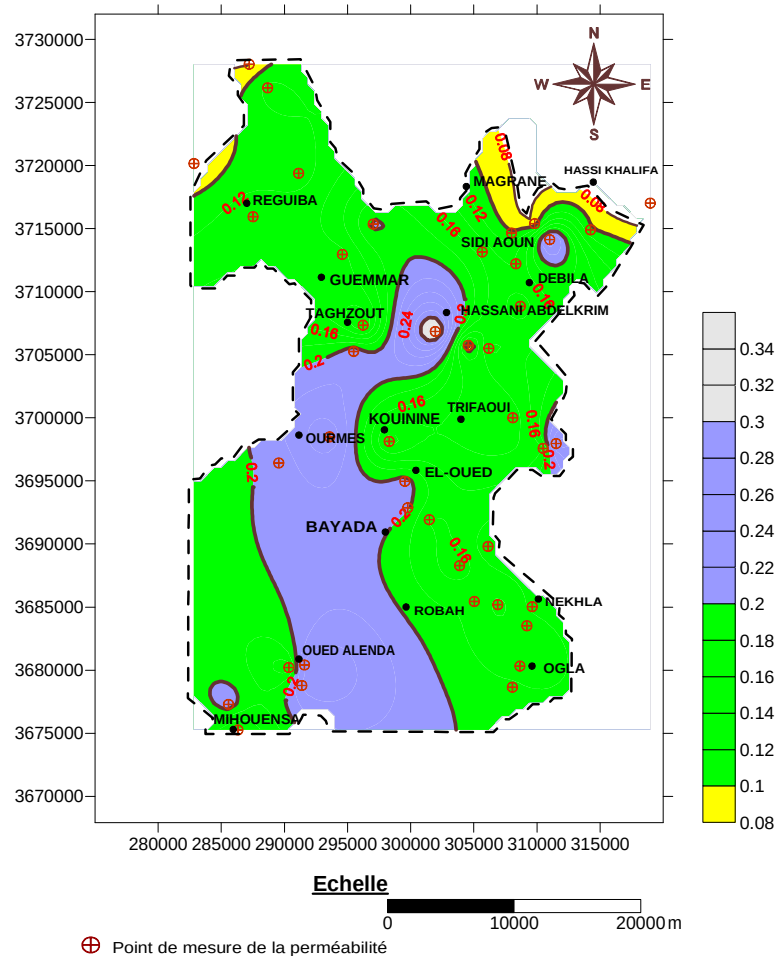


Figure. 52 : Carte d'iso valeurs de perméabilité .10⁻³

5. Interprétation de la carte de perméabilité

La plupart de la zone d'étude a des valeurs de perméabilité qui varient entre $0.1 \cdot 10^{-3}$ et $0.2 \cdot 10^{-3}$. Le couloir Oued Alenda, Bayada, Ourmes présente des valeurs de perméabilité qui oscillent entre $0.2 \cdot 10^{-3}$ et $0.3 \cdot 10^{-3}$. Dans le Nord- Est et le Nord- Ouest on note des valeurs de perméabilité faibles de l'ordre de $0.8 \cdot 10^{-3}$ (couleur jaune)

6. Profils de variation de la surface piézométrique :

Cinq profils ont été réalisés sur toute la zone d'étude pour visualiser les irrégularités de la surface piézométrique. A partir de ces profils on note des points dans les zones d'alimentation représentées par les agglomérations et les plantations irriguées à partir des nappes profondes et des points bas dans les zones de prélèvement par évaporation des surfaces d'eau libre (Chott, ghouts inondés) et évaporation de la végétation (cultures traditionnelles en ghouts, cultures irriguées par des puits traditionnels ou améliorés dans la nappe phréatique)

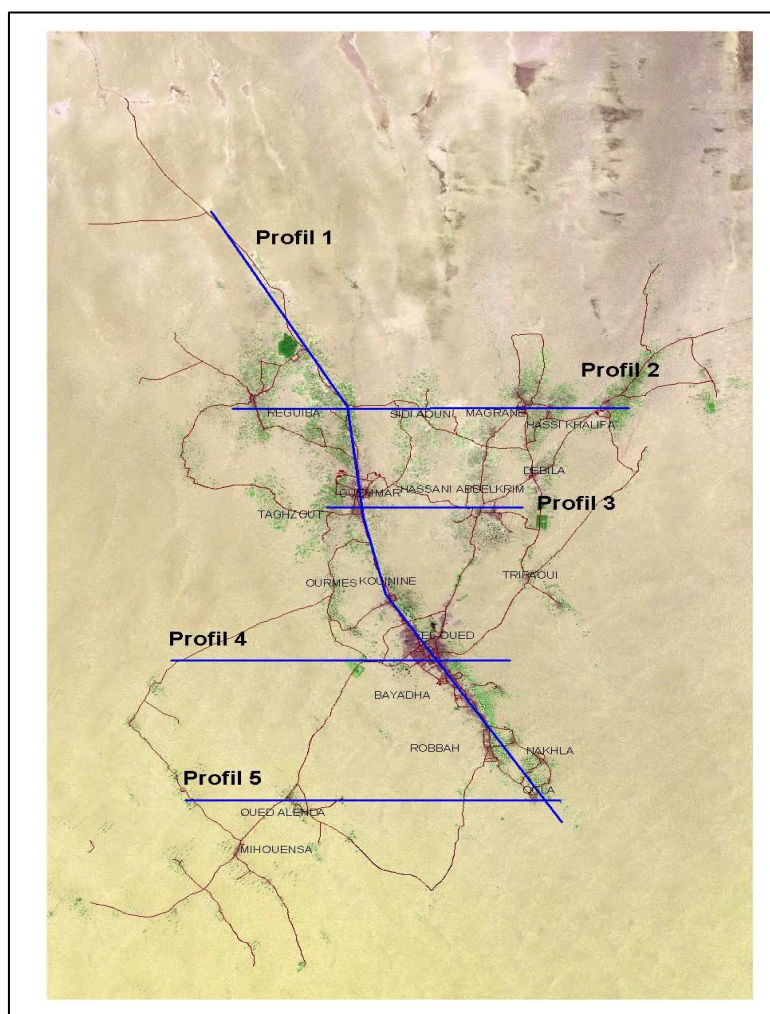
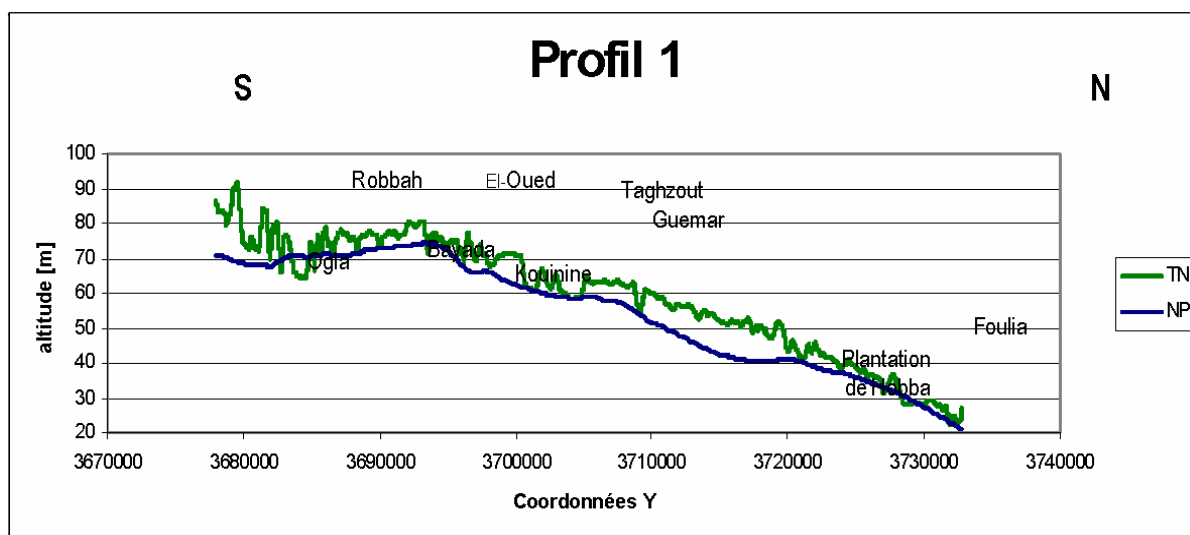


Figure. 53 : Carte de situation des profils de la nappe phréatique



TN Terrain naturel (surface topographique) - **NP** Niveau piézométrique

Figure. 54 : Profil nord-sud de la nappe phréatique dans l'axe Foulia - El Oued - Oglia

Le profil 1 passe par les principales agglomérations. La nappe ennoie les ghouts près de celles-ci. Au Nord, elle s'approche de la surface du sol.

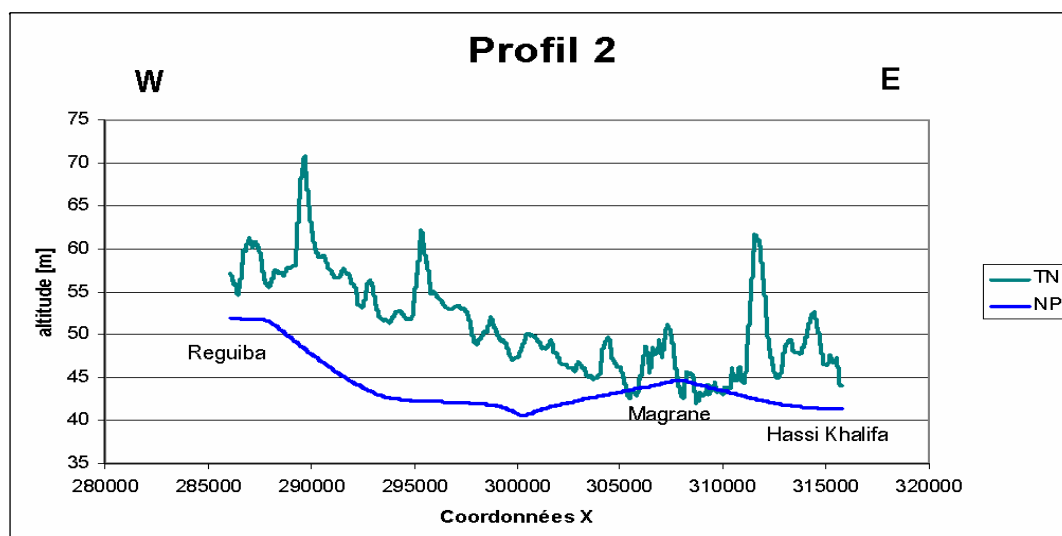


Figure. 55 : Profil Est-ouest de la nappe phréatique passant pas Magrane

La nappe est profonde à l'ouest et au centre, très proche de la surface du sol près de Magrane. Elle est déprimée sous les zones de cultures.

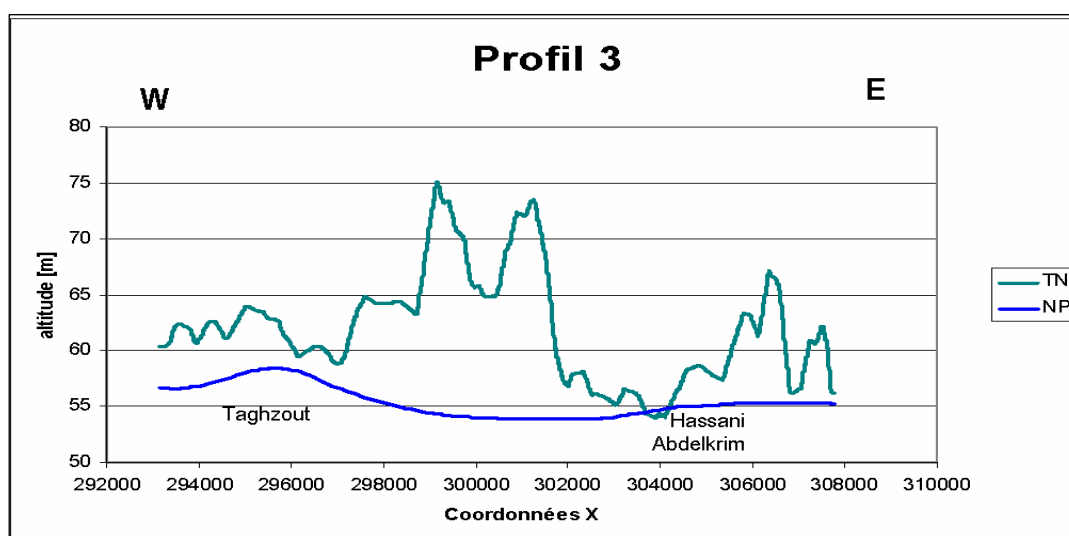


Figure. 56 : Profil est-ouest de la nappe phréatique par Taghzout

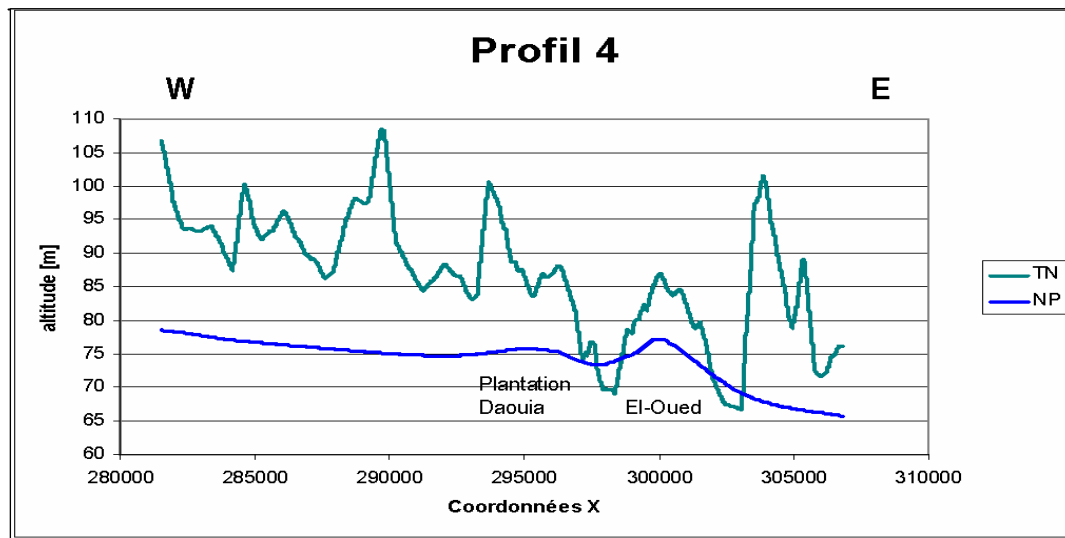


Figure. 57 : Profil est-ouest de la nappe phréatique par El Oued

Ce profil met en évidence la remontée sous les zones d'alimentation que sont la plantation Daouia (irriguée à partir du CT) et l'agglomération d'El Oued.

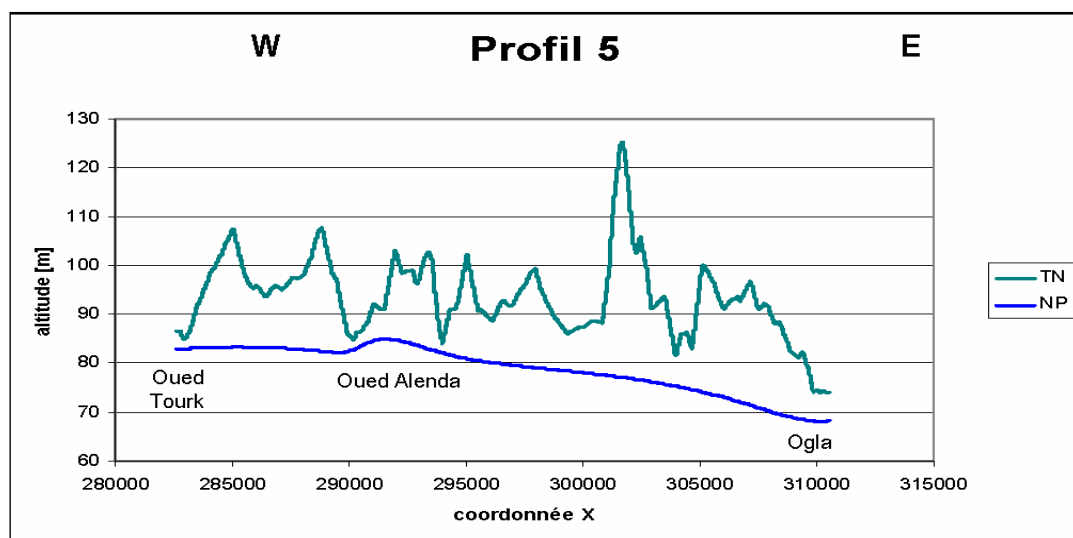


Figure. 58 : Profil est-ouest de la nappe phréatique par Ogla

Ce profil, situé le plus au sud, présente la nappe à son état quasi naturel, mis à part l'AEP d'Oued Alenda qui fait monter la nappe localement.

7. Essais de pompage

Des essais de pompage par paliers et de longue durée ont été réalisés sur 6 sites répartis dans la zone d'étude de la vallée du Souf, à Mihouensa, Nakhla, Ourmes, El-Oued, Kouinine et Foulia, du 24/02/2003 au 7/04/2003.

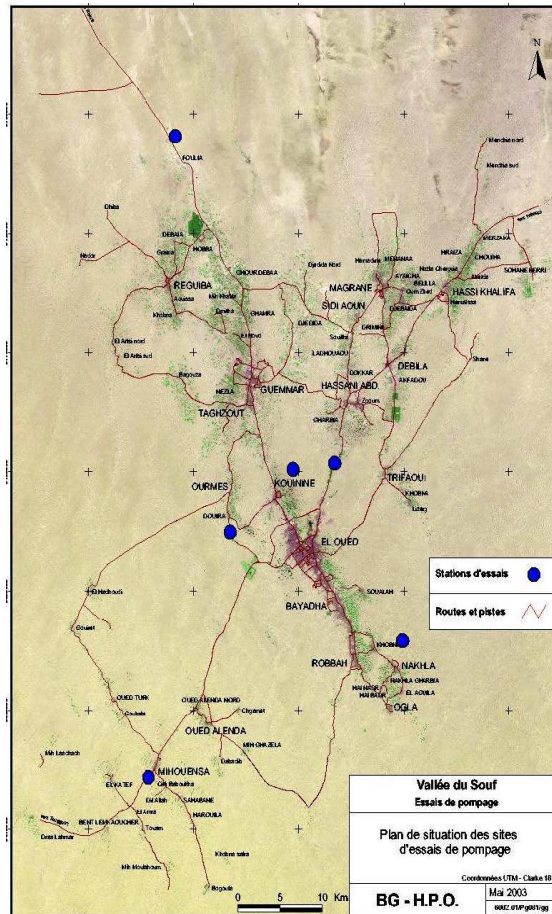


Figure. 59 : Carte de situation des sites des essais de pompes (d'après BG et HPO).

Chaque site d'essais est constitué par un puits de pompage et 3 piézomètres complets, situés à 5, 15 et 45 m 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.

Le rejet des eaux de pompage est situé à plus de 98 m pour les sites de Mihouensa, Nakhla, Ourmes, El-Oued, Kouinine alors qu'à Foulia l'eau de pompage a été utilisée pour l'irrigation de la palmeraie et d'un pivot de 0.75 ha.

Quatre limnigraphes ont été utilisés pour enregistrer les niveaux à intervalle de 30 secondes pendant toute la durée de l'essai. Ceux-ci ont comporté, pour chaque site, un essai par paliers non enchaînés et un essai de longue durée à débit constant.

L'essai par paliers est composé de trois paliers de 6 heures chacun à débit constant, séparés par un intervalle d'au moins 12 heures. L'essai de longue durée a consisté en un pompage à débit constant de 72 heures suivi de 24 heures de remontée. Son interprétation a permis de calculer la transmissivité (T), le coefficient de perméabilité (K), le coefficient de perméabilité verticale (Kv) et la porosité efficace (Sy).

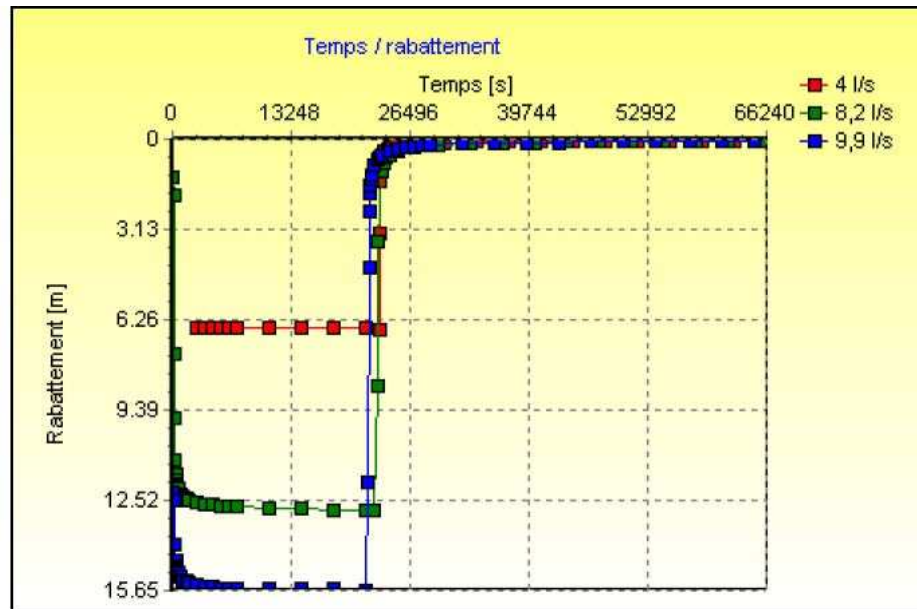


Figure. 60 : Essais par paliers à Kouinine Observation dans les puits de pompage aux débits de 4 ; 8.2 et 9.9 l/s (d'après BG).

Les méthodes d'interprétation suivantes ont été utilisées, en fonctions des sites :

- Méthode de Cooper – Jacob distance – rabattement (pour des temps relativement élevés).
- Méthode de Moench (extension de la méthode de Neuman (1972) itérative pour des nappes libres ou confinées, avec un puits de pompage partiel ou complet et plusieurs puits d'observations).
- Méthode de Hantush – Jacob (Walton) (pour les nappes semi-captives, sans débit retardé).

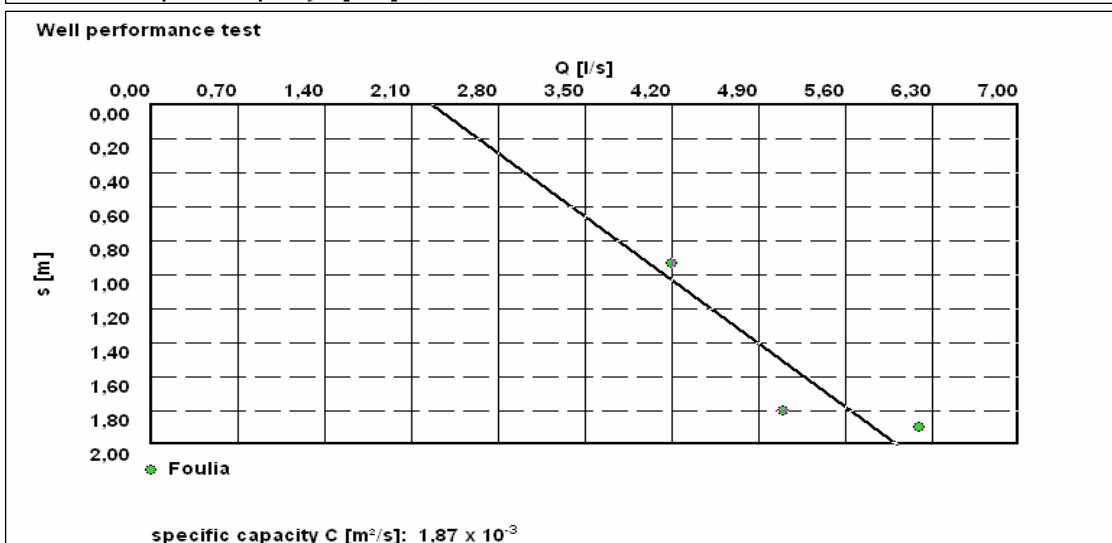
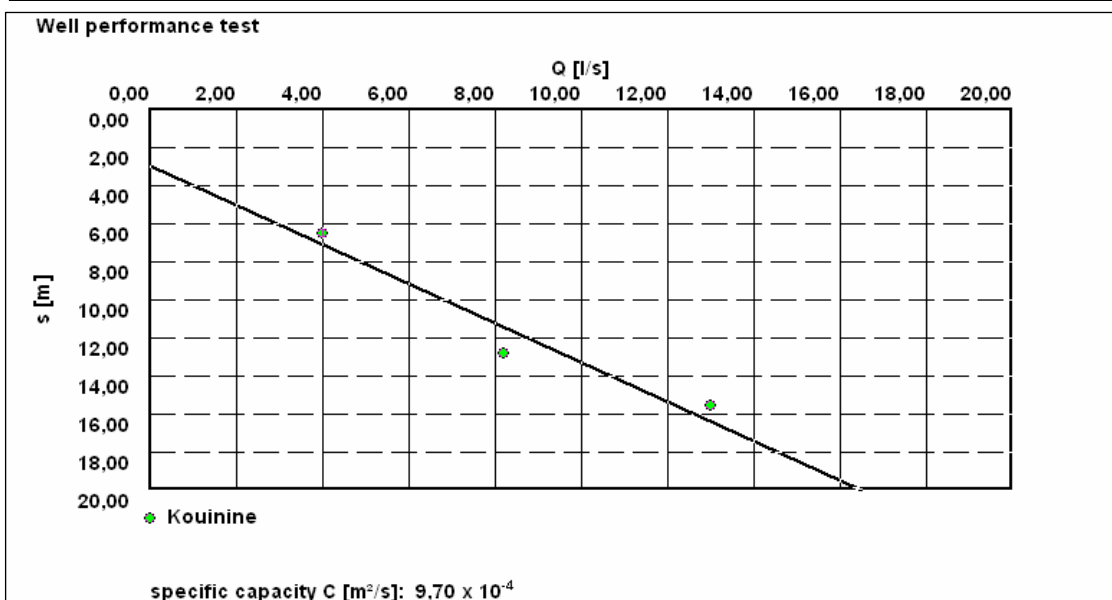
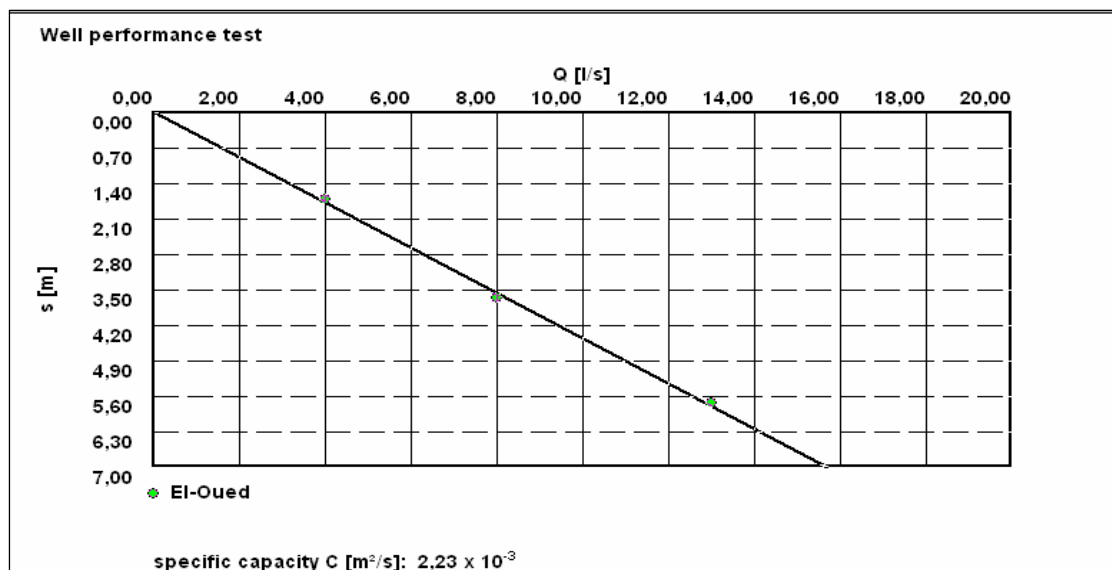
La valeur de la transmissivité a été contrôlée pour chaque site par la méthode de la remontée selon Theis.

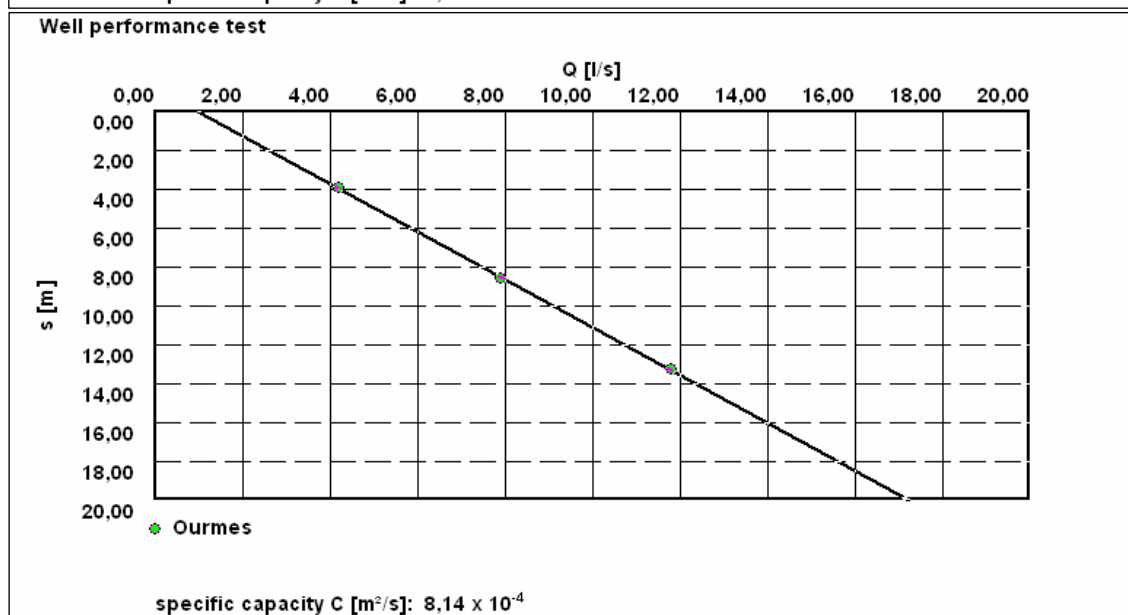
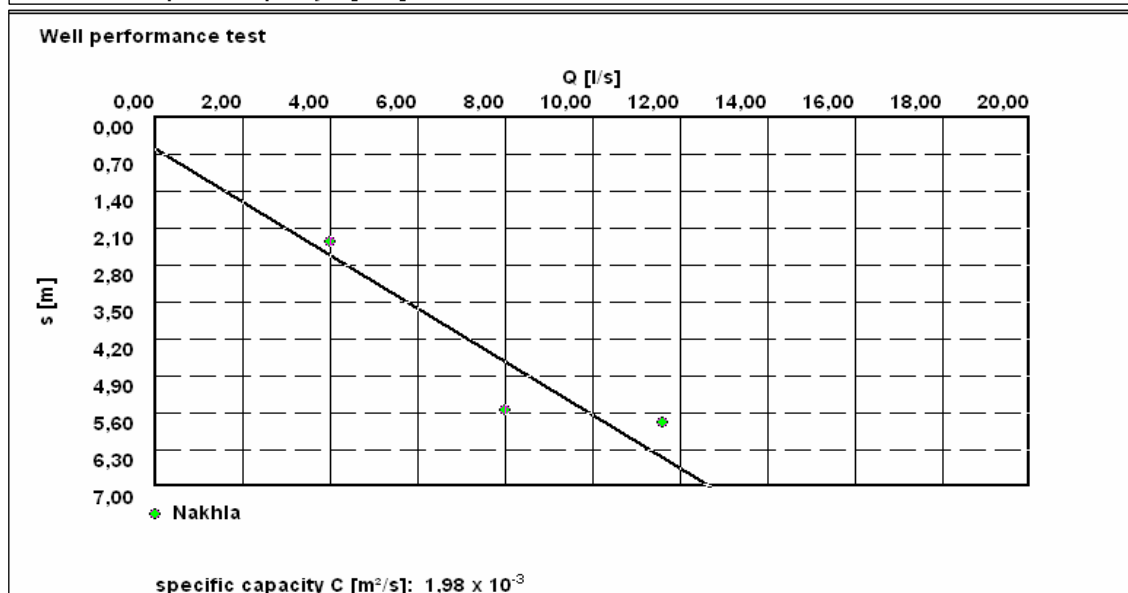
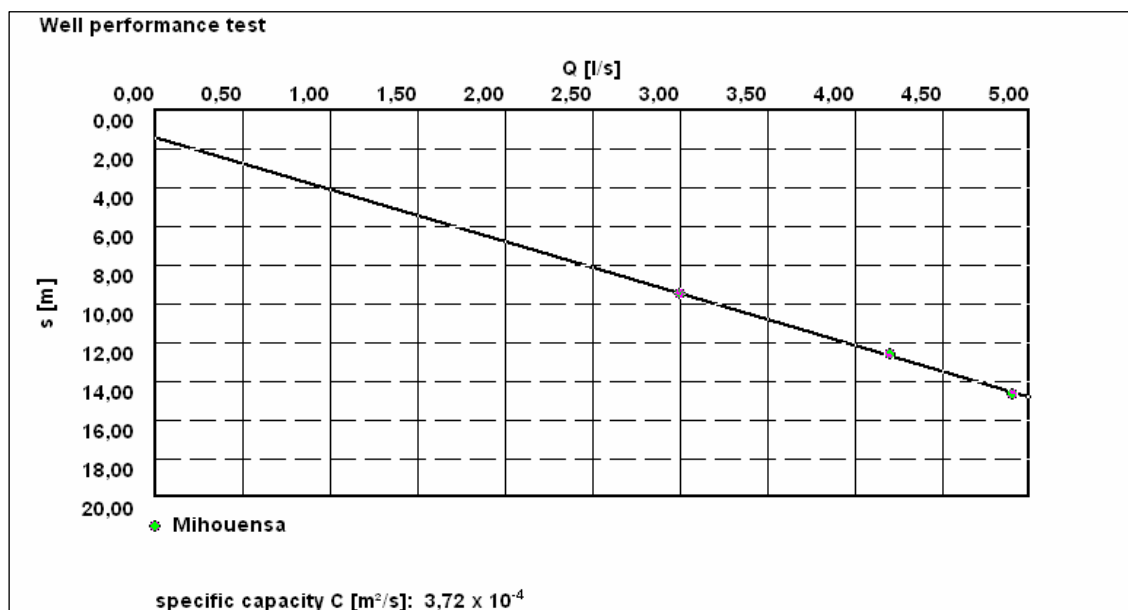
Lors de la réalisation des piézomètres, des échantillons (cuttings) ont été prélevés tous les mètres. Ils ont été analysés et les logs dessinés.

Les échantillons étudiés sont tous à prédominance sableuse et graveleuse, c'est à dire que plus de la moitié des grains de chaque échantillon à un diamètre supérieur à 0.06 mm (visible à l'œil nu).

De plus du gypse, sous forme de sable gypseux ou croûtes gypseuses, peut être présent dans ces échantillons en plus ou moins grande proportion

7.1. Débits Spécifiques :





Le débit spécifique est moyen à El-Oued, Nakhla et Foulia, alors qu'il faible à Kouinine, Ourmes et Mihouensa. Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des débits spécifiques pour chaque site.

Tableau N°13 : Valeurs des débits spécifiques

Essai	Débit spécifique
El-Oued	$2.23 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Foulia	$1.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Kouinine	$9.70 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Mihouensa	$3.72 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Nakhla	$1.98 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Ourmes	$8.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

7.2. Essais de pompage de longues durées :

7.2.1. Essai de pompage à El-Oued

Quatre essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 03/03/2003 et le 10/03/2003 sur un puits amélioré, non exploité, dans la commune d'El-Oued, sur la route en direction de Hassani Abdelkarim (coordonnées UTM Clarke 1880 X = 303415, Y = 3700685).

Trois piézomètres ont été mis en place à des distances de 5 mètres, 10 mètres et 15 mètres du centre du puits de pompage.

Cet aquifère est séparé par des niveaux moins perméables, constitués du sable fin, plus ou moins induré, comprenant une forte proportion de gypse.

Interprétation de l'essai de longue durée

La durée exacte de l'essai est 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 résultats des mesures sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement, on utilisant la méthode de Cooper-jacob. Ces graphes nous ont permis de déterminer la transmissivité et la perméabilité.

La transmissivité T déterminée par la méthode de Cooper-jacob est de :

T =

$3,53 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité K = $8,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ pour une épaisseur effective de 42 m

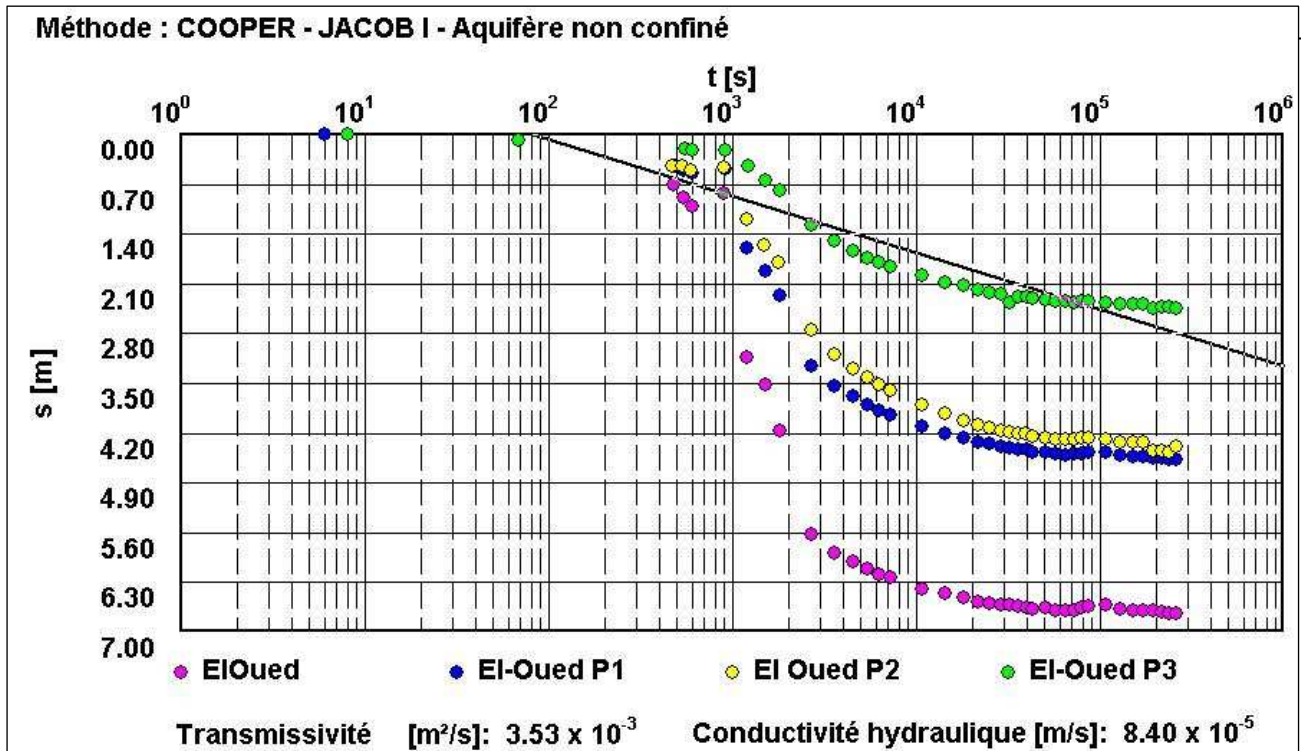


Figure. 61 : Essai de pompage long durée à El-Oued interprété par la méthode de Cooper & Jacob

7.2.2. Essai de pompage à Foulia

Quatre essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 02/04/2003 et le 09/04/2003 sur un piézomètre exploité du réseau de surveillance ANRH, au-delà de la localité de Foulia, en direction de Biskra (coordonnées UTM Clarke 1880 X = 288292, Y = 3728108).

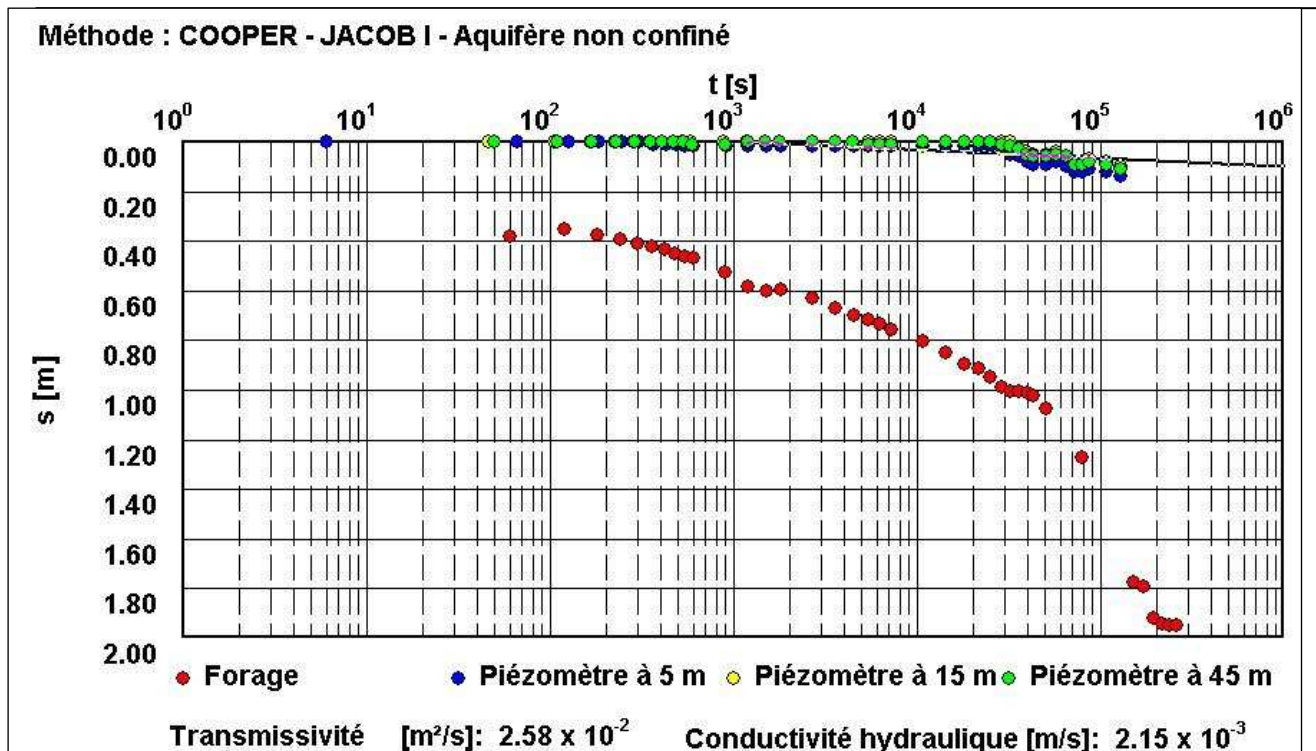
Trois piézomètres ont été mis en place à des distances de 5 mètres, 10 mètre et 15 mètres du centre du puits de pompage.

Cet aquifère est séparé par des niveaux moins perméables, constitués de sable limoneux gypseux peu argileux et de sable fin, plus ou moins enduré, comprenant une forte proportion de gypse.

Interprétation de l'essai de longue durée

L'essai de pompage est duré, 72 h, 9 min et 2 s à débit constant de 4,8 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Les rabattements ont été mesurés dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres.

Les mesures des rabattements dans le puits de pompage et les trois piézomètres sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement. Le calcul et l'interprétation des graphes ont donné les valeurs suivantes de la transmissivité et de la perméabilité :



**Figure. 62 : Essai de pompage long durée à Foulia
interprété par la méthode de Cooper &-Jacob**

La transmissivité T déterminée par la méthode de Cooper & Jacob est de :

$T =$

$2,58 \times 10^{-2} m^2/s$

La perméabilité $K = 2,15 \times 10^{-3} m/s$ pour une épaisseur effective de 12 m

7.2.3. Essai de pompage à Kouinine

Quatre essais de pompage, trois de 6 heures suivi de 12 heures de remontée en minimum entre chaque deux essais de pompage et un essai de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 10/03/2003 et le 17/03/2003 sur un puits amélioré, non exploité, dans un périmètre agricole abandonné de la commune de Kouinine (coordonnées UTM Clarke 1880 X = 299433, Y = 3700173).

Trois piézomètres ont été mis en place à des distances de 5 mètre, 10 mètre et 15 mètre du centre du puits de pompage.

Interprétation de l'essai de longue durée

A Kouinine la durée exacte de l'essai de longue durée, est de 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.

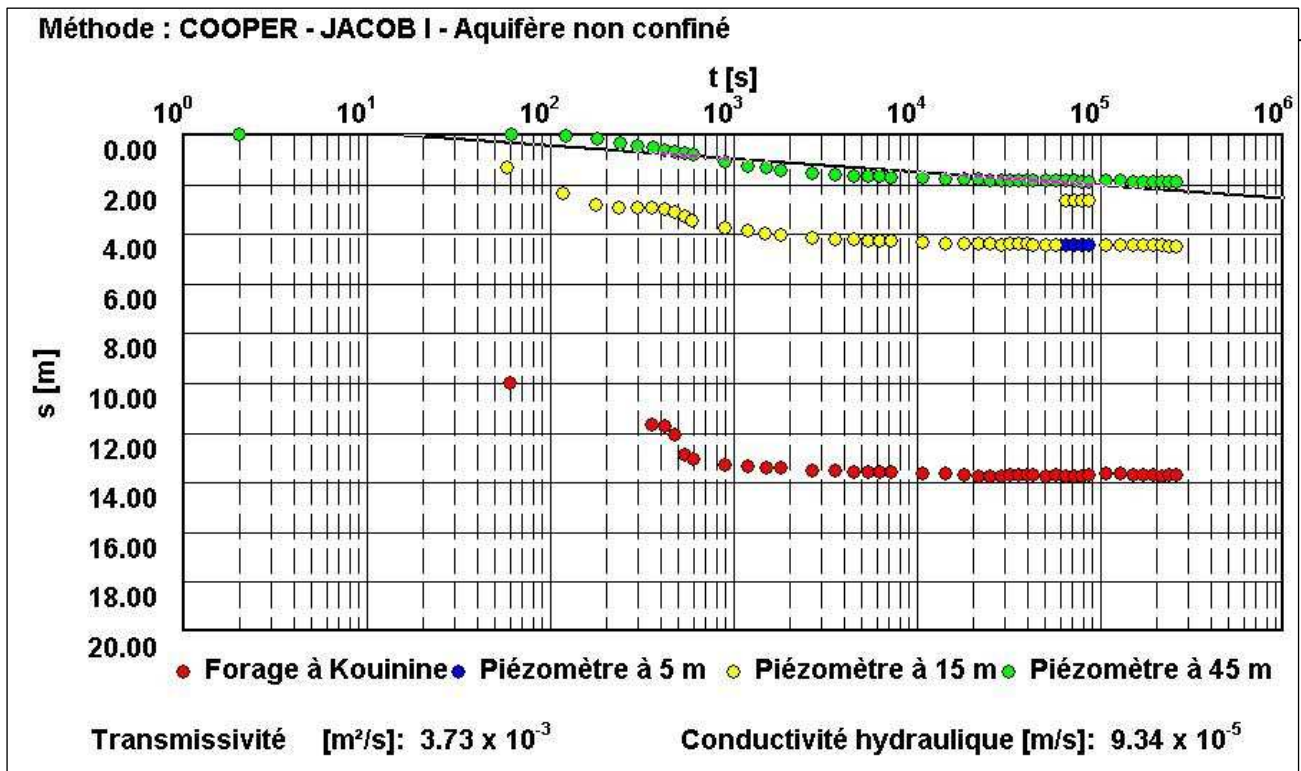


Figure. 63 : Essai de pompage long durée à Kouinine interprété par la méthode de Cooper & Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Jacob & Cooper est de : $3,73 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

T=

La perméabilité $K = 9,34 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ avec une épaisseur effective de 40 m.

7.2.4. Essai de pompage à Mihouensa

Quatre essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée en minimum entre chaque deux essais et un essai de 72 heures de pompage suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 27/03/2003 et le 01/04/2003 sur un puits amélioré, non exploité, dans un périmètre agricole exploité de la commune de Mihouensa (coordonnées UTM Clarke 1880 X = 285729, Y = 3674357).

Trois piézomètres ont été mis en place à des distances de 5 mètre, 10 mètre et 15 mètre du centre du puits de pompage.

Cet aquifère est séparé par des niveaux moins perméables, constitué par du sable limoneux gypseux peu argileux.

Interprétation de l'essai de long durée

Cet essai de long durée, (72 h, 15 min et 30 s) à débit constant de 4,7 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe, nous a permis de mesurer le rabattement dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres.

Les rabattements mesurés dans le puits de pompage et les trois piézomètres sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement on utilisant la méthode de Cooper-jacob.

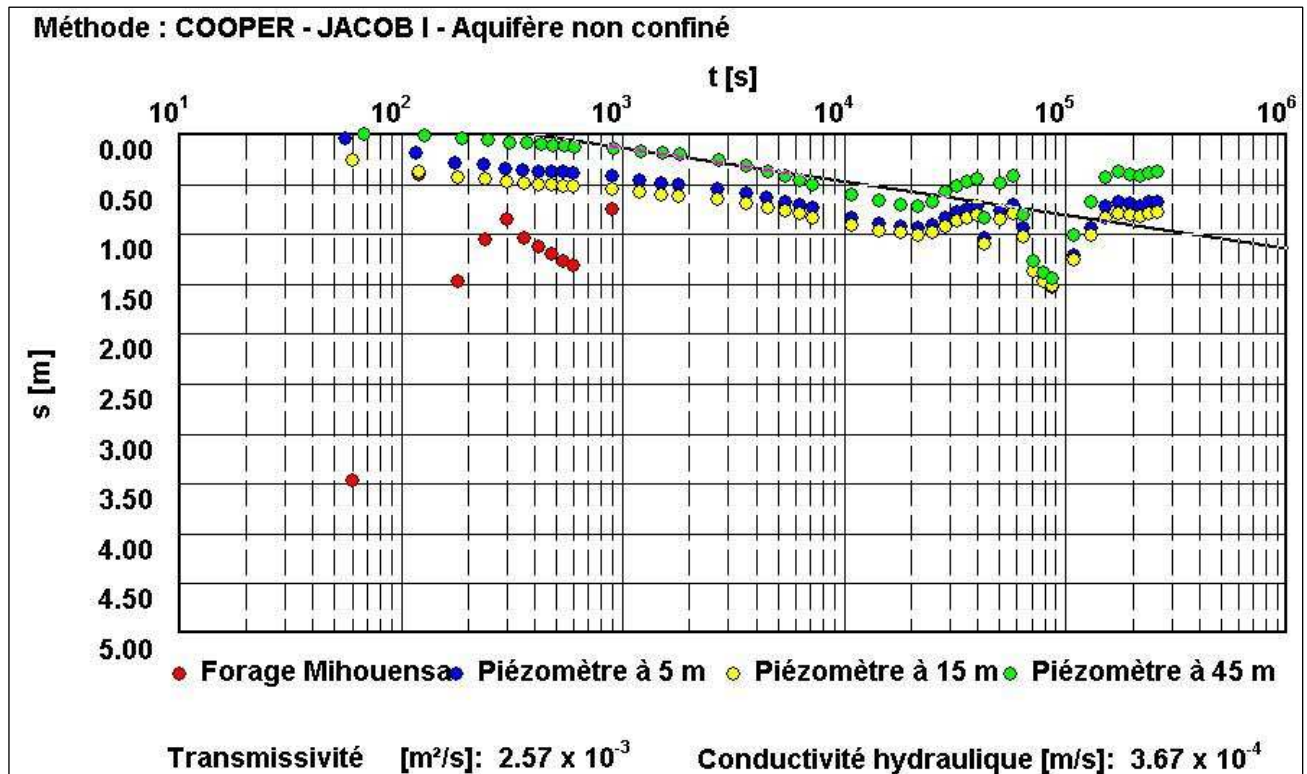


Figure. 64 : Essai de pompage longue durée à Mihouensa interprété par la méthode de Cooper & Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Jacob & Cooper est de :

T=

$2,57 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité $K = 3,67 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ avec une épaisseur effective de 7 m.

7.2.5. Essai de pompage à Nakhla

Quatre essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 25/02/2003 et le 03/03/2003 sur un puits amélioré, dans un périmètre agricole pas encore exploité de la commune de Nakhla (coordonnées UTM Clarke 1880 X = 309854, Y = 3685801).

Trois piézomètres ont été mis en place à des distances de 5 mètres, 10 mètres et 15 mètres du centre du puits de pompage.

Interprétation de l'essai de longue durée

L'essai de longue durée, (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 dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres a été mesuré.

Les rabattements mesurés dans le puits de pompage et les trois piézomètres sont représentées sur le même graphe, temps/rabattement en utilisant la méthode de Cooper-jacob.

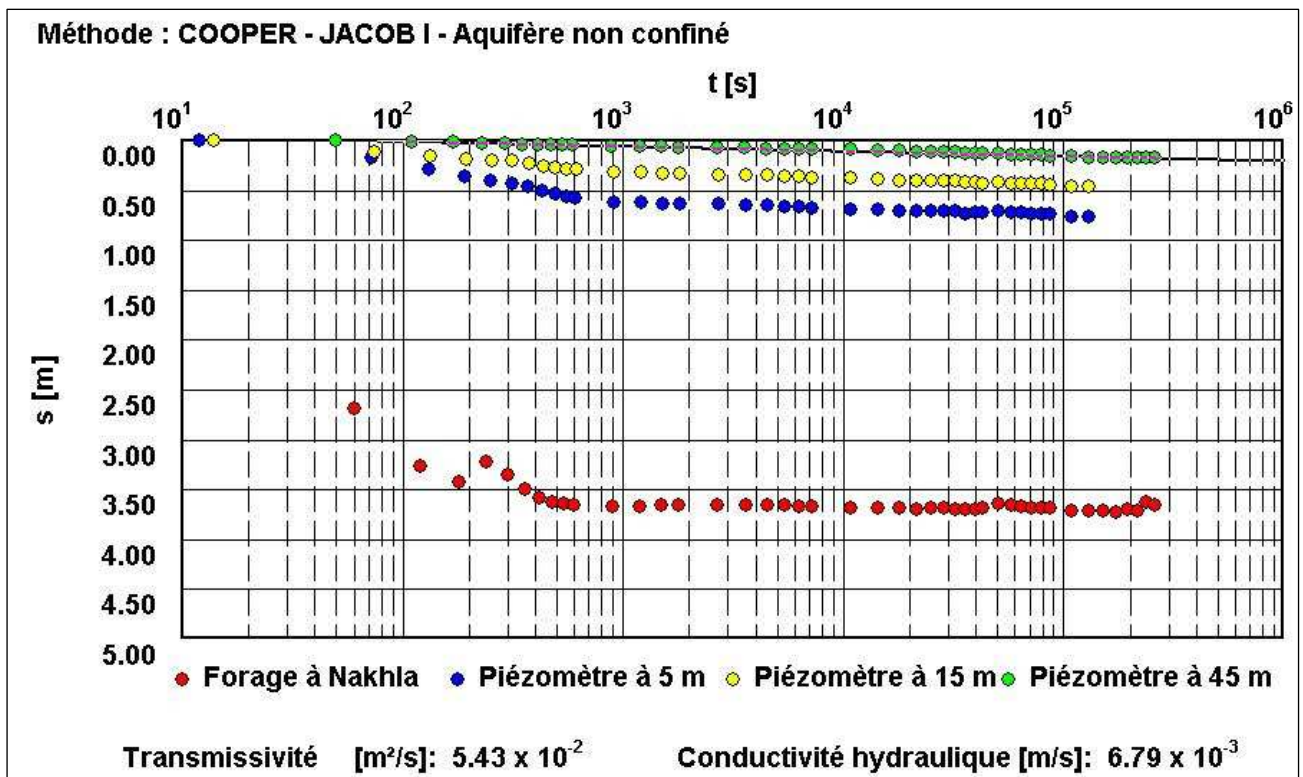


Figure. 65 : Essai de pompage longue durée à Nakhla interprété par la méthode de Cooper & Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Jacob & Cooper est de :

T=

$5,43 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité K = $6,7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ avec une épaisseur effective de 8 m.

7.2.6. Essai de pompage à Ourmes

Quatre essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 17/03/2003 et le 24/03/2003 sur un puits amélioré exploité, dans la commune de Ourmes (coordonnées UTM Clarke 1880 X = 293505, Y = 3694899).

Trois piézomètres ont été mis en place à des distances de 5 mètres, 10 mètres et 15 mètres du centre du puits de pompage.

Interprétation de l'essai de longue durée

L'interprétation de l'essai de longue durée, (72 h, 05 min et 30 s) à débit constant de 13,3 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe par la méthode de Cooper-jacob après qu'on est mesuré les rabattements et représentées sur le même graphe, temps/ rabattement a donné les valeurs de transmissivité et perméabilité suivant :

La transmissivité T déterminée par la méthode de Jacob & Cooper est de :

$$T = 1,63 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

La perméabilité $K = 5,1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ avec une épaisseur effective de 32 m.

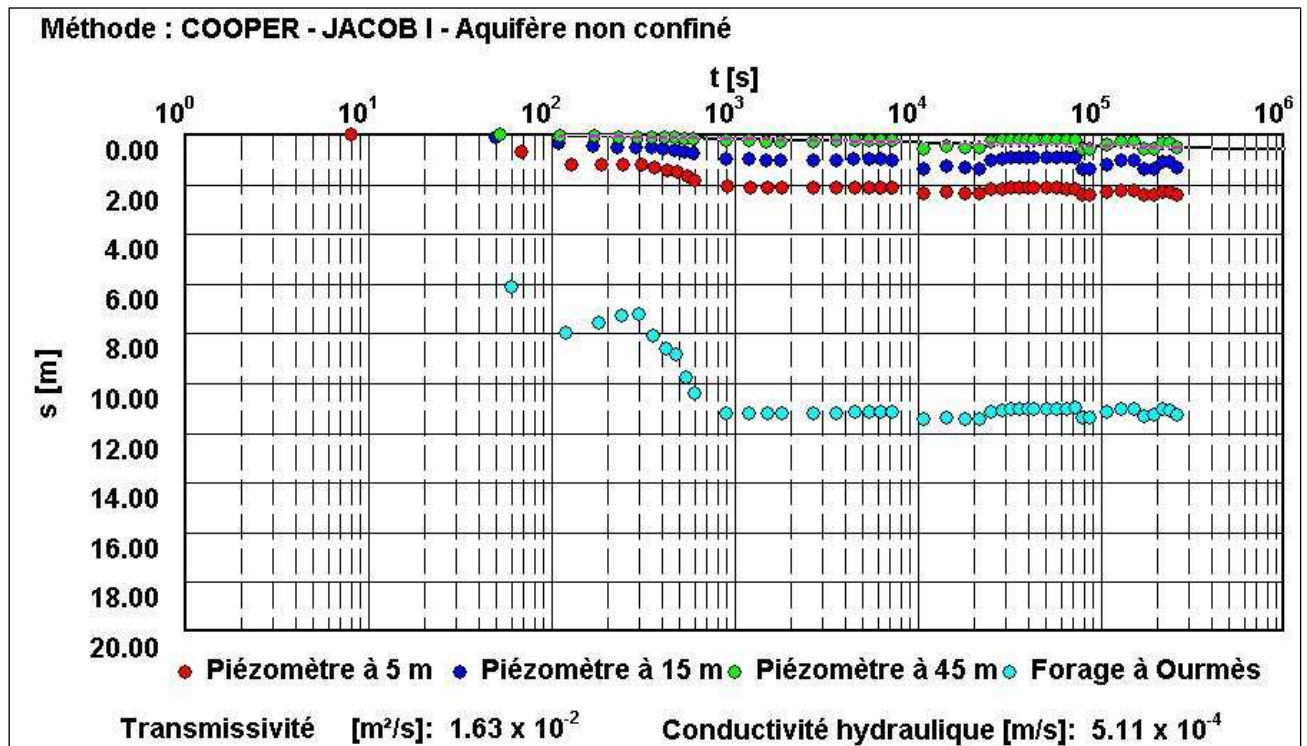


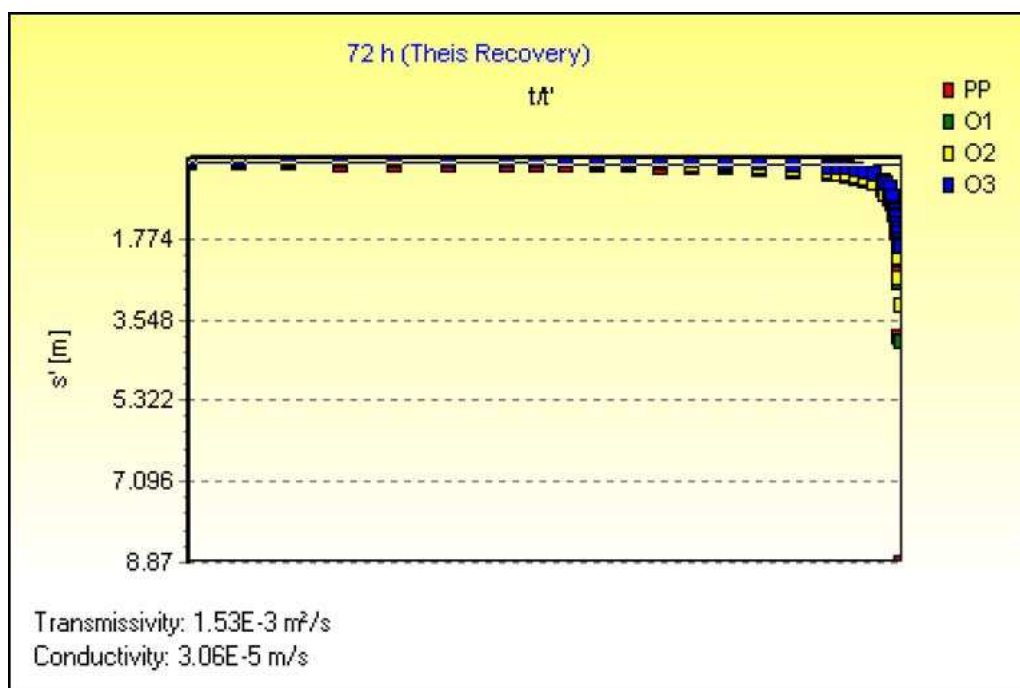
Figure. 66 : Essai de pompage longue durée à Ourmes interprété par la méthode de Cooper & Jacob

Si les essais par paliers ont permis de déterminer les débits spécifiques, interprétation réalisée par le HPO et Bonnard et Gardell en Mai 2003, Ces valeurs montrent que la réalisation techniques des forages a été bien menée. Nous avons repris les essais de longue durée de 72 heures et les résultats de l'interprétation de la descente et de la remontée sont presque équivalents avec une faible marge d'erreur sur les transmissivités. Nous avons jugés utile de ne représenter que les graphes de la descente. Les valeurs de la perméabilité ont été déduites grâce aux valeurs de l'épaisseur effective de l'aquifère au niveau de chaque site et correspondent bien à la lithologie de la nappe.

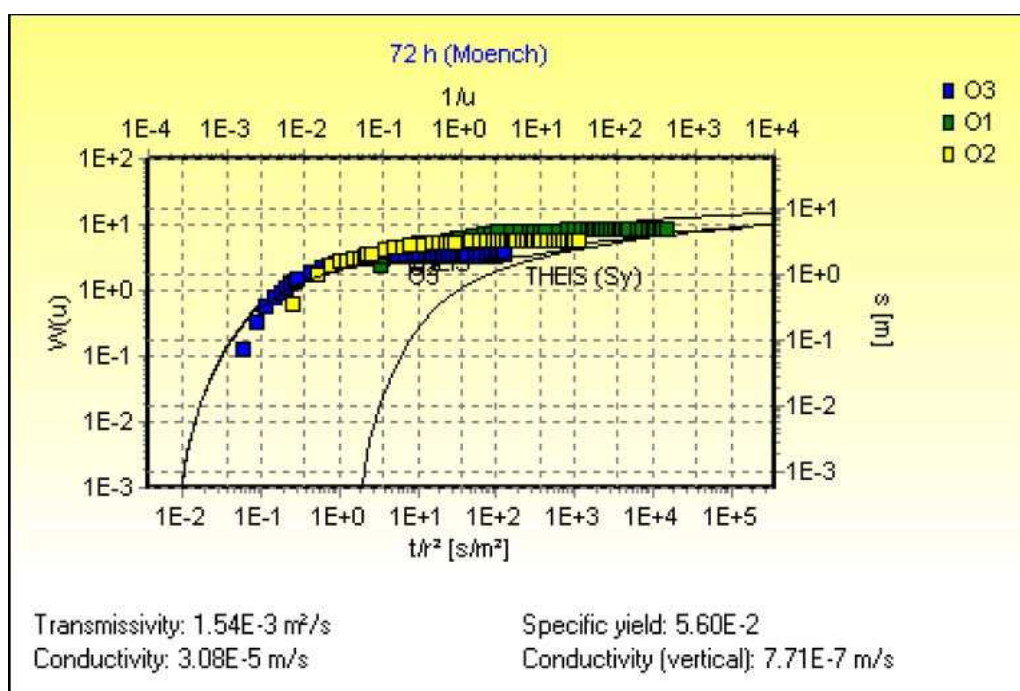
Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des transmissivités et des perméabilités.

Tableau N°14 : Valeurs des Transmissivités et des perméabilités

Essai	T (Cooper-jacob)	K (Cooper-jacob)
El-Oued	$3.35 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$8.40 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Foulia	$2.58 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$2.15 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
Kouinine	$3.73 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$9.34 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Mihouensa	$2.57 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$3.67 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
Nakhla	$5.43 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$6.79 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
Ourmes	$1.36 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$5.11 \times 10^{-4} \text{ m/s}$



**Figure. 67 : Remontée à Kouinine
interprétée par la méthode de Theis (BG et HPO).**



**Figure. 68 : Essai de pompage de longue durée à Kouinine
Interprété par la méthode de Moench**

8. Conclusion :

L'évolution de la piézométrie (1993 – 2002) et l'interprétation des essais de pompage réalisé par Le BG et HPO du 24/ 02/ 2003 au 7/ 04/ 2003. Nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

La remontée de la nappe phréatique se poursuit au rythme de 50 à 60 cm par an dans les quartiers les plus touchés de l'agglomération d'El Oued.

Les variations de niveau piézométrique dans le temps indiquent que le phénomène n'est pas stable et que la tendance est à la hausse dans les anomalies hautes et à la baisse dans les zones déprimées. Il est prévisible qu'il s'accroîtra avec l'augmentation de la population dans les villes (et celle corrélative de l'AEP) et des surfaces agricoles.

L'écoulement de l'eau se fait mal à cause de la faible pente (gradient faible). Il ne peut avoir lieu que localement, à proximité des villes par exemple, là où l'alimentation importante crée une remontée de plusieurs mètres et augmente la pente.

La variation dans la transmissivité d'une station à l'autre est peu importante, avec des valeurs situées entre $2.57 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Mihouensa) et $5.43 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (Nakhla). La transmissivité moyenne est de $1.725 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Les valeurs de la perméabilité sont situées dans l'intervalle de la perméabilité des sables dunaires.

CHAPITRE VI

Paramètres hydrodispersives

1. Introduction :

Les eaux souterraines constituent une ressource de qualité généralement supérieure à celle des eaux de surfaces grâce à la protection naturelle des couches de sol sus-jacentes et aux propriétés filtrantes des terrains. Cependant l'accroissement des causes de pollution (rejets d'usines, excès d'engrais ou de pesticides, dépôts d'ordure, stockage souterrain des déchets, ... etc.) est tel que l'enfouissement de l'eau dans le sous-sol n'est plus un gage suffisant de pureté.

Après une période où l'hydrogéologie était orientée vers l'évaluation quantitative des ressources en eau vient donc une époque où l'hydrogéologie doit faire face aux problèmes qualitatifs.

Le mouvement de l'eau dans milieu poreux (transfert ou déplacement de l'eau) est régi par des phénomènes de convection et de dispersion, indépendamment de tout transport de matière par l'eau (par exemple migration de solutés), traditionnellement désigné dans la littérature anglo-saxonne par la dénomination transfert de masse. La convection est due au déplacement de l'eau à l'échelle macroscopique, la dispersion résulte du déplacement à l'échelle microscopique parmi les tortuosités des pores. Convection et dispersion de l'eau entraînent la migration et dispersion des matières transportées.

La connaissance de la vitesse effective de l'eau et de la dispersivité du milieu sur l'eau est le préalable nécessaire à l'évaluation de sa porosité effective et de sa dispersivité (qui pourraient éventuellement différer alors quelque peu) sur des substances transportées.

L'analyse des résultats d'expériences employant un traceur supposé parfait a pour but de parvenir à évaluer les paramètres décrivant le déplacement convectif de l'eau et l'hydrodispersivité du milieu.

2. Analyse théorique :

L'objectif de cette analyse est de rappeler les bases théoriques de l'écoulement d'eau et du transport de solutés dans les milieux poreux.

2.1. Notion concernant le milieu poreux :

Le milieu poreux est l'ensemble de grains solides ou d'agrégats autour desquels existent des espaces vides appelés pores, qui peuvent être interconnectés ou non.

2.2. Physique des transferts :

2.2.1. La convection :

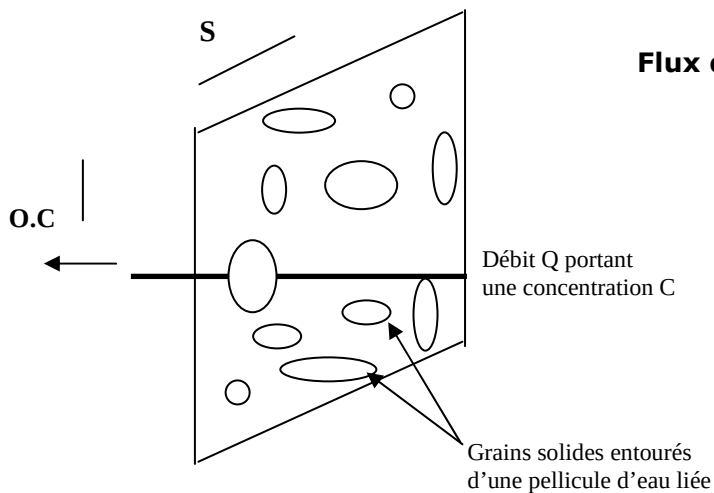
La convection représente l'entraînement des éléments en solution dans le mouvement du fluide qui déplace. Le soluté est transporté par le mouvement général de l'eau, à la vitesse définie par la loi de Darcy.

2.2.2. La loi de Darcy :

La loi de Darcy indique que l'écoulement d'un liquide (débit) à travers un milieu poreux se fait dans la direction de la force motrice : le gradient de charge hydraulique agissant sur le liquide. Le débit dépend aussi d'une caractéristique fondamentale du sol : la conductivité hydraulique.

2.2.3. Porosité cinématique :

La section réelle S_r au travers de laquelle le flux d'éléments dissous passe est inférieure à la section géométrique S car il faut tenir compte de l'existence des grains solides et d'une fraction d'eau dite « immobile » qui ne participe pas à l'écoulement. On définit donc une porosité dite cinématique qui correspond à la fraction d'eau mobile dans le milieu poreux, et qui est bien sûr inférieure à la porosité totale ; c'est le rapport de la section réelle d'écoulement à la section totale.



Flux de convection en kg/unité de temps

$$\Phi_{\text{conv}} = Q.C = (\omega_c.S) u.C$$

Φ : le flux d'eau traversant la section
(en $\text{m}^3/\text{unité de temps}$).

C : la concentration (en kg/m^3).

ω_c : la porosité cinématique.

u : la vitesse de l'eau (en m/s).

2.2.4. Vitesse effective :

La vitesse moyenne u du fluide participant à l'écoulement (moyenne effectuée sur la portion $\omega \Delta s$ de la section totale Δs) est appelée vitesse effective ou encore vitesse moyenne de pore.

Elle diffère fondamentalement de la vitesse apparente de Darcy qui est une vitesse fictive ramenée à la section totale Δs , et conduisant au même débit.

Entre ces deux vitesses, existe la relation :

$$u \cdot (\omega \Delta s) = q = v \Delta s$$

Ou :

q : le débit transitant par le tube de courant, d'où :

$$u = v / \omega$$

v : vitesse de Darcy.

ω : porosité cinématique.

u : vitesse effective.

2.2.5. Dispersion :

La notion de dispersion a été introduite par Bear (1972). La dispersion hydrodynamique est un phénomène par lequel une substance migre dans le sol. En se déplaçant, l'espèce chimique se dilue (effet de mélange) et s'étale pour occuper un volume plus grand avec une concentration corrélativement décroissante (effet de dilution).

Cette propagation est provoquée, d'une part, par le déplacement des molécules et, d'autre part par la dispersion cinématique.

La dispersion hydrodynamique est en fonction de la nature du sol et des caractéristiques du transport du soluté.

2.2.6. Dispersion longitudinale :

L'étalement du pic au sein du tube de courant est causé par la dispersion longitudinale.

2.2.7. Dispersion transversale :

Les échanges latéraux entre filets liquides voisins sont dûs à la dispersion transversale (plus particulièrement sous l'effet de la tortuosité, et quelquefois, en cas de faible vitesse, de la diffusion moléculaire).

La diffusion moléculaire contribue à la mise en œuvre de la dispersion cinématique par échange de particules entre filets de courant voisins, dont les trajectoires et vitesses sont différents.

2.3. Echanges :

2.3.1. Adsorption Désorption :

Des échanges de soluté peuvent s'effectuer entre le liquide et les grains solides sous l'effet de différences de concentration.

Une solution à forte concentration va prendre une partie de son soluté qui sera fixé par les grains solides (adsorption). En contrepartie, si ultérieurement la concentration du fluide diminue, l'eau plus pure qui arrivera au contact des grains risque de récupérer une partie de traceur (désorption).

2.3.2. Echanges eau libre-eau liée :

A cette adsorption-désorption classiquement envisagée peut se superposer un phénomène de même type et dont l'ampleur dans bien des cas peut prendre le pas sur la fixation par les grains. La diffusion moléculaire est la cause d'échanges de soluté entre mobile, vecteur du polluant ou de la substance traçante, et l'eau plus ou moins immobile au voisinage des grains.

3. Manipulation :

Les essais de traçage sont effectués au laboratoire de génie civil à l'aide de perméamétrie comme la montre la figure ci-dessous.

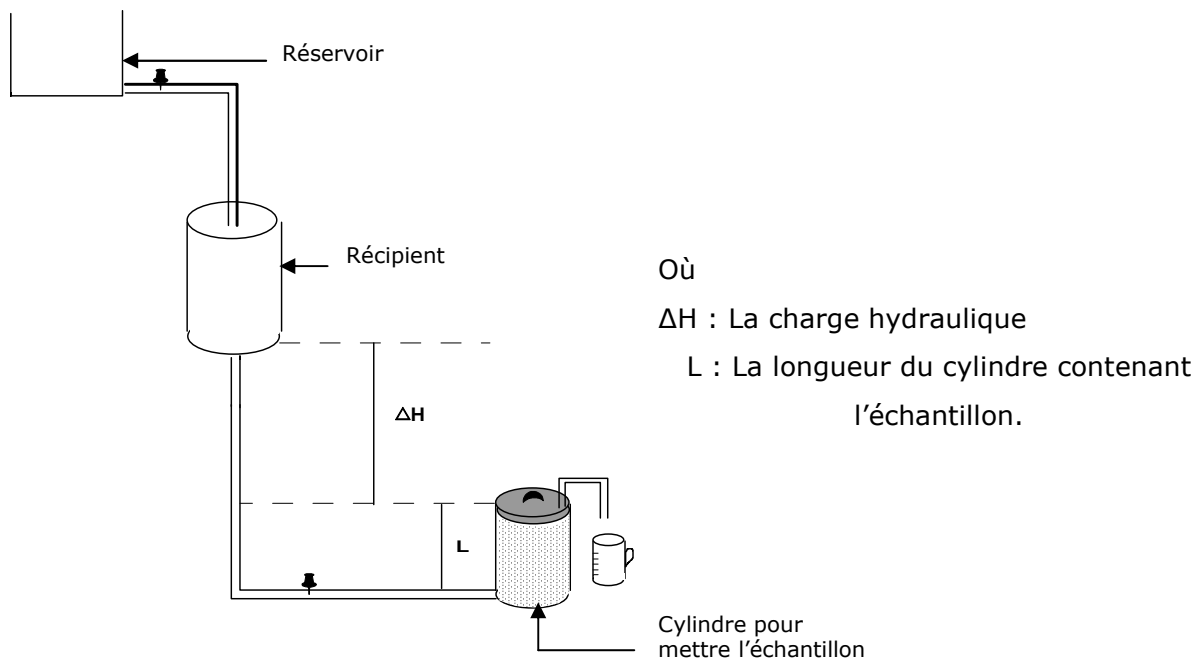


Figure. 69 : Le perméamètre de mesure

Au début le dispositif est complètement saturé avec de l'eau claire, c'est-à-dire, sans fluorescéine. Au moment où la fluorescéine est versé et qui correspond au temps $t = 0$, nous prélevons des échantillons à différents pas du temps et ceci jusqu'à ce qu'il y ait disparition de la coloration de la fluorescéine dans l'eau.

4. Détermination graphique des paramètres hydrodispersifs

Pour l'interprétation des résultats des tests de traçage à la fluorescéine nous avons utilisé la relation suivante :

$$\bar{C} = \frac{C - C_0}{C^0 - C_0} = 0.5(1 - \text{erf}(\xi))$$

$\bar{C}$: concentration relative sans dimension ;

C : concentration au temps $t > 0$ g/l ;

C^0 : concentration initiale d'injection $t = 0$ g/l ;

C_0 : concentration de l'échantillon sans le traceur g/l ;

Erf : fonction erreur de Gauss

Avec
$$\xi = \frac{n_e \cdot l - v \cdot t}{2\sqrt{n_e \cdot D \cdot t}}$$

Où n_e : porosité effective

l : la longueur du cylindre

v : vitesse effective de Darcy

t : temps

D : paramètre de la dispersion $D = \alpha_L \cdot v$;

Cette relation représente la solution approchée de l'équation différentielle de la dispersion :

$$n_e \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

En posant $N_p = \frac{t}{\Delta t}$ où N_p représente le numéro de l'échantillon et Δt le pas de temps. La deuxième équation devient :

$$\xi = \frac{n_e \cdot l - \frac{4V}{\pi d^2} \cdot N_p}{2\sqrt{n_e \cdot D \cdot \Delta t \cdot N_p}} \quad \text{car la vitesse} \quad v = \frac{4V_e}{\pi d^2 \Delta t}$$

Où V_e : volume recueilli en cm^3

d : diamètre du cylindre

Δt : pas de temps

Le traitement des données d'analyse au fluorimètre a permis de dresser le tableau ci-après et de tracer deux graphes : Le premier représente la concentration cumulée en fonction du temps $C \text{ (g/l)} = f(t)$ et le deuxième $\zeta = \xi \cdot S N_p$

Ainsi :

$$\zeta = \xi \sqrt{N_p} = \text{inverf}(1 - 2\bar{C}) \cdot \sqrt{N_p} = \zeta^0 \left(1 - \frac{N_p}{N_p^0} \right).$$

Avec
$$\zeta^0 = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{n_e}{D \cdot \Delta t}} \quad \text{et} \quad N_p^0 = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot n_e}{4 \cdot V_e}$$

Tableau N°15: Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre
(Echantillon I)

Temps	Dt	C (g/l)	C g/l (cumulé)	C - C ₀ (g/l)	$\underline{C}$	1 - 2 $\underline{C}$	$x=\text{erfinv}(1-2\underline{C})$	sqrt Np	Np	$z=x * \text{sqrt Np}$
120	120	0,0002	0,0002	0,0002	0,002	0,996	2	1	1	2,000
240	120	0,0004	0,0006	0,0006	0,006	0,988	1,78	1,414	2	2,517
360	120	0,0015	0,0021	0,0021	0,021	0,958	1,44	1,732	3	2,494
480	120	0,0081	0,0102	0,0102	0,102	0,796	0,9	2,000	4	1,800
600	120	0,0074	0,0176	0,0176	0,176	0,648	0,66	2,236	5	1,476
720	120	0,0071	0,0247	0,0247	0,247	0,506	0,485	2,449	6	1,188
840	120	0,0066	0,0313	0,0313	0,313	0,374	0,345	2,646	7	0,913
960	120	0,006	0,0373	0,0373	0,373	0,254	0,23	2,828	8	0,651
1080	120	0,005	0,0423	0,0423	0,423	0,154	0,14	3,000	9	0,420
1200	120	0,0045	0,0468	0,0468	0,468	0,064	0,055	3,162	10	0,174
1320	120	0,0041	0,0509	0,0509	0,509	-0,018	-0,015	3,317	11	-0,050
1440	120	0,004	0,0549	0,0549	0,549	-0,098	-0,085	3,464	12	-0,294
1560	120	0,0039	0,0588	0,0588	0,588	-0,176	-0,155	3,606	13	-0,559
1680	120	0,0036	0,0624	0,0624	0,624	-0,248	-0,255	3,742	14	-0,954
1800	120	0,0035	0,0659	0,0659	0,659	-0,318	-0,29	3,873	15	-1,123
1920	120	0,0033	0,0692	0,0692	0,692	-0,384	-0,355	4,000	16	-1,420
2040	120	0,0031	0,0723	0,0723	0,723	-0,446	-0,425	4,123	17	-1,752
2160	120	0,003	0,0753	0,0753	0,753	-0,506	-0,485	4,243	18	-2,058
2280	120	0,0027	0,078	0,078	0,78	-0,56	-0,545	4,359	19	-2,376
2400	120	0,0025	0,0805	0,0805	0,805	-0,61	-0,61	4,472	20	-2,728
2520	120	0,0023	0,0828	0,0828	0,828	-0,656	-0,665	4,583	21	-3,047
2640	120	0,0022	0,085	0,085	0,85	-0,7	-0,73	4,690	22	-3,424
2760	120	0,0021	0,0871	0,0871	0,871	-0,742	-0,8	4,796	23	-3,837
2880	120	0,002	0,0891	0,0891	0,891	-0,782	-0,87	4,899	24	-4,262
3000	120	0,0015	0,0906	0,0906	0,906	-0,812	-0,93	5,000	25	-4,650
3120	120	0,0013	0,0919	0,0919	0,919	-0,838	-0,99	5,099	26	-5,048
3240	120	0,0012	0,0931	0,0931	0,931	-0,862	-1,05	5,196	27	-5,456
3360	120	0,0011	0,0942	0,0942	0,942	-0,884	-1,11	5,292	28	-5,874
3480	120	0,001	0,0952	0,0952	0,952	-0,904	-1,18	5,385	29	-6,354
3600	120	0,0009	0,0961	0,0961	0,961	-0,922	-1,245	5,477	30	-6,819
3720	120	0,0008	0,0969	0,0969	0,969	-0,938	-1,32	5,568	31	-7,349
3840	120	0,0007	0,0976	0,0976	0,976	-0,952	-1,4	5,657	32	-7,920
3960	120	0,0006	0,0982	0,0982	0,982	-0,964	-1,485	5,745	33	-8,531
4080	120	0,0005	0,0987	0,0987	0,987	-0,974	-1,575	5,831	34	-9,184
4200	120	0,0004	0,0991	0,0991	0,991	-0,982	-1,675	5,916	35	-9,909
4320	120	0,0003	0,0994	0,0994	0,994	-0,988	-1,785	6,000	36	-10,710
4440	120	0,0002	0,0996	0,0996	0,996	-0,992	-1,88	6,083	37	-11,436
4560	120	0,0001	0,0997	0,0997	0,997	-0,994	-1,945	6,164	38	-11,990

Avec $C^0 = 0.1 \text{ g/l}$ et $C_0=0$

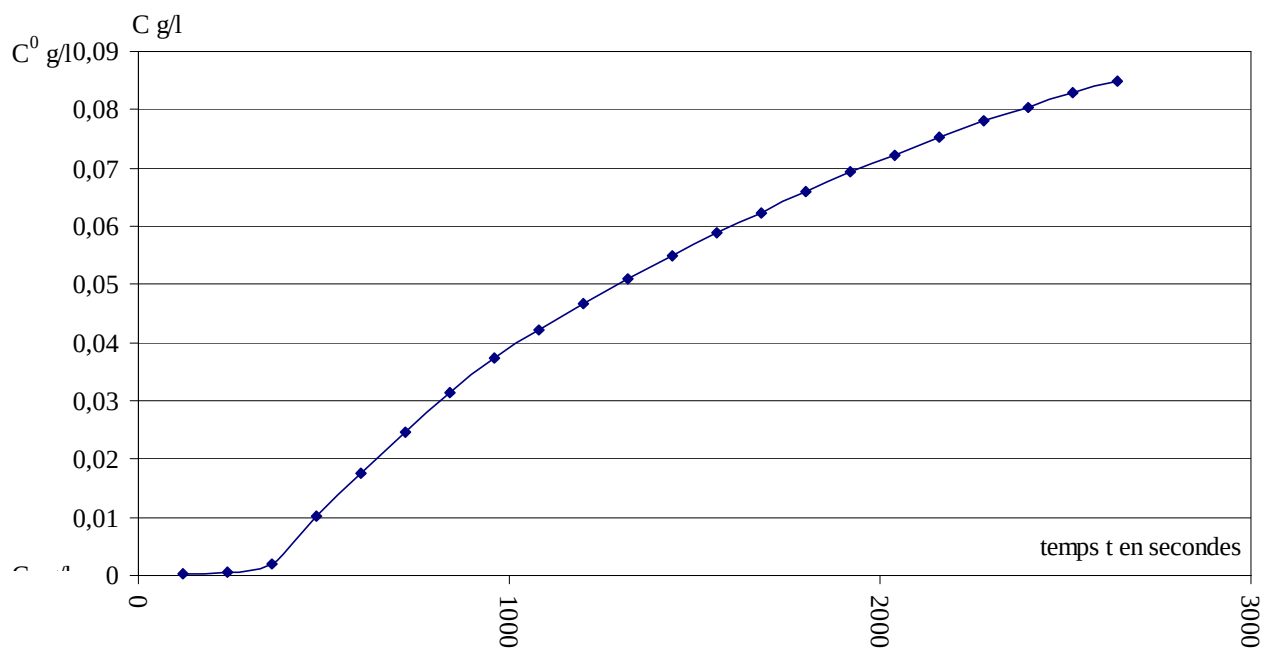


Figure. 70 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps de l'échantillon I.

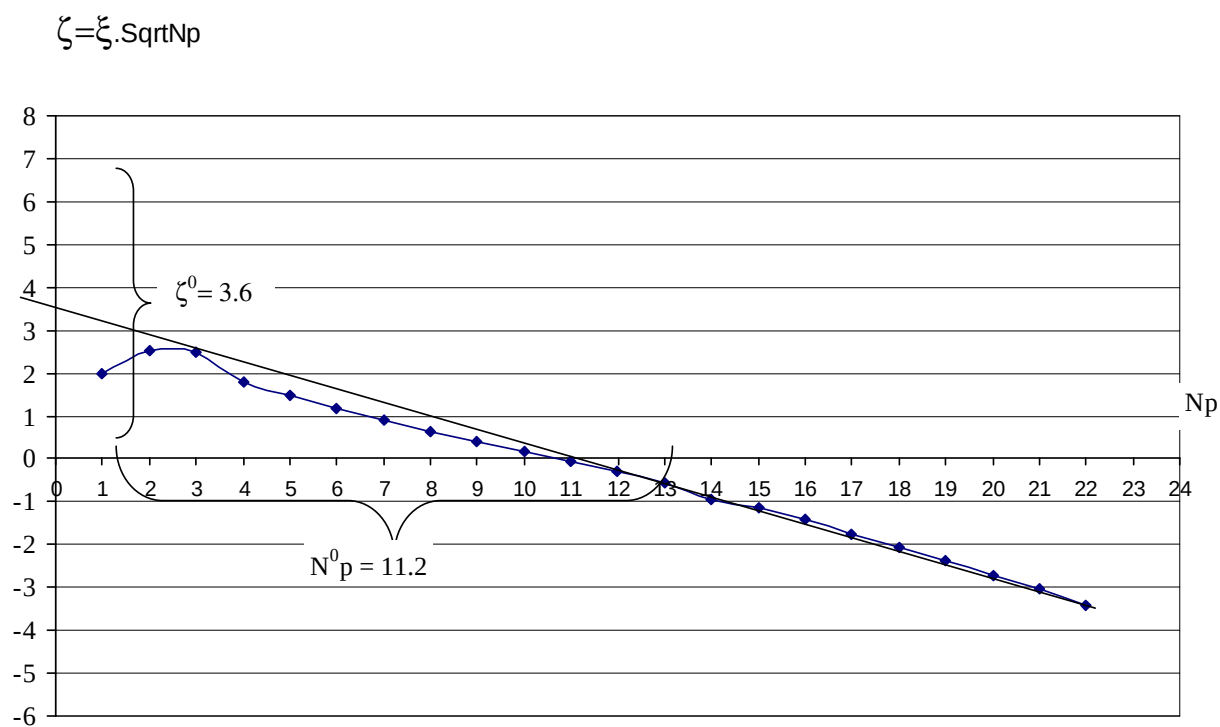


Figure. 71 : graphe de $\xi \sqrt{N_p}$ en fonction de N_p de l'échantillon I

Donc
$$D = \frac{V_e}{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot \Delta t} \times \frac{N_p^0}{(\zeta^0)^2} \quad \text{et} \quad n_e = \frac{4 \cdot V_e}{\pi \cdot d^2 \cdot l} \times N_p^0.$$

L'application numérique donne :

Pour l'échantillon n° 01.

$$n_e = \frac{4 \times 3 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 0.11} \times 11.2 = 0.35 \quad \text{ou } 35 \%$$

$$v = \frac{4 \times 3 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 120} = 2.89 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$D = \frac{3 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 0.11 \times 120} \times \frac{11.2}{3.6^2} = 5.67 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Sachant que la paramètre de la dispersion est égale au produit de la vitesse de Darcy v et de la dispersivité longitudinale α_l :

$$D = v \cdot \alpha_l \quad \text{donc} \quad \alpha_l = \frac{D}{v} = \frac{5.67 \times 10^{-5}}{2.89 \times 10^{-5}} = 1.96 \text{ m} \quad \text{pour l'échantillon n° 01}$$

**Tableau N°16: Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre
(Echantillon II)**

Temps	Dt	C(g/l)	C g/l (cumulé)	C - C ₀ g/l	C	1 - 2C	x=erfinv(1-2C)	sqrt Np	Np	z=x * sqrt Np
120	120	0,0004	0,0004	0,0004	0,004	0,992	1,875	1	1	1,875
240	120	0,0008	0,0012	0,0012	0,012	0,976	1,595	1,414	2	2,256
360	120	0,0042	0,0054	0,0054	0,054	0,892	1,135	1,732	3	1,966
480	120	0,0071	0,0125	0,0125	0,125	0,75	0,815	2,000	4	1,630
600	120	0,0066	0,0191	0,0191	0,191	0,618	0,62	2,236	5	1,386
720	120	0,0062	0,0253	0,0253	0,253	0,494	0,47	2,449	6	1,151
840	120	0,006	0,0313	0,0313	0,313	0,374	0,345	2,646	7	0,913
960	120	0,005	0,0363	0,0363	0,363	0,274	0,25	2,828	8	0,707
1080	120	0,0044	0,0407	0,0407	0,407	0,186	0,165	3,000	9	0,495
1200	120	0,0042	0,0449	0,0449	0,449	0,102	0,09	3,162	10	0,285
1320	120	0,0041	0,049	0,049	0,49	0,02	0,02	3,317	11	0,066
1440	120	0,004	0,053	0,053	0,53	-0,06	-0,055	3,464	12	-0,191
1560	120	0,0037	0,0567	0,0567	0,567	-0,134	-0,12	3,606	13	-0,433
1680	120	0,0036	0,0603	0,0603	0,603	-0,206	-0,185	3,742	14	-0,692
1800	120	0,0035	0,0638	0,0638	0,638	-0,276	-0,25	3,873	15	-0,968
1920	120	0,0034	0,0672	0,0672	0,672	-0,344	-0,315	4,000	16	-1,260
2040	120	0,0033	0,0705	0,0705	0,705	-0,41	-0,38	4,123	17	-1,567
2160	120	0,003	0,0735	0,0735	0,735	-0,47	-0,445	4,243	18	-1,888
2280	120	0,0028	0,0763	0,0763	0,763	-0,526	-0,505	4,359	19	-2,201
2400	120	0,0026	0,0789	0,0789	0,789	-0,578	-0,57	4,472	20	-2,549
2520	120	0,0024	0,0813	0,0813	0,813	-0,626	-0,63	4,583	21	-2,887
2640	120	0,0022	0,0835	0,0835	0,835	-0,67	-0,69	4,690	22	-3,236
2760	120	0,0019	0,0854	0,0854	0,854	-0,708	-0,745	4,796	23	-3,573
2880	120	0,0018	0,0872	0,0872	0,872	-0,744	-0,805	4,899	24	-3,944
3000	120	0,0017	0,0889	0,0889	0,889	-0,778	-0,865	5,000	25	-4,325
3120	120	0,0016	0,0905	0,0905	0,905	-0,81	-0,925	5,099	26	-4,717
3240	120	0,0015	0,092	0,092	0,92	-0,84	-0,995	5,196	27	-5,170
3360	120	0,0013	0,0933	0,0933	0,933	-0,866	-1,06	5,292	28	-5,609
3480	120	0,0012	0,0945	0,0945	0,945	-0,89	-1,135	5,385	29	-6,112
3600	120	0,0011	0,0956	0,0956	0,956	-0,912	-1,21	5,477	30	-6,627
3720	120	0,0009	0,0965	0,0965	0,965	-0,93	-1,285	5,568	31	-7,155
3840	120	0,0007	0,0972	0,0972	0,972	-0,944	-1,355	5,657	32	-7,665
3960	120	0,0006	0,0978	0,0978	0,978	-0,956	-1,425	5,745	33	-8,186
4080	120	0,0005	0,0983	0,0983	0,983	-0,966	-1,5	5,831	34	-8,746
4200	120	0,0004	0,0987	0,0987	0,987	-0,974	-1,575	5,916	35	-9,318
4320	120	0,0003	0,099	0,099	0,99	-0,98	-1,645	6,000	36	-9,870
4440	120	0,0002	0,0992	0,0992	0,992	-0,984	-1,705	6,083	37	-10,371
4560	120	0,0003	0,0995	0,0995	0,995	-0,99	-1,82	6,164	38	-11,219
4680	120	0,0002	0,0997	0,0997	0,997	-0,994	-1,945	6,245	39	-12,147
4800	120	0,0001	0,0998	0,0998	0,998	-0,996	-2	6,325	40	-12,649

Avec $C^0 = 0.1 \text{ g/l}$ et $C_0=0$

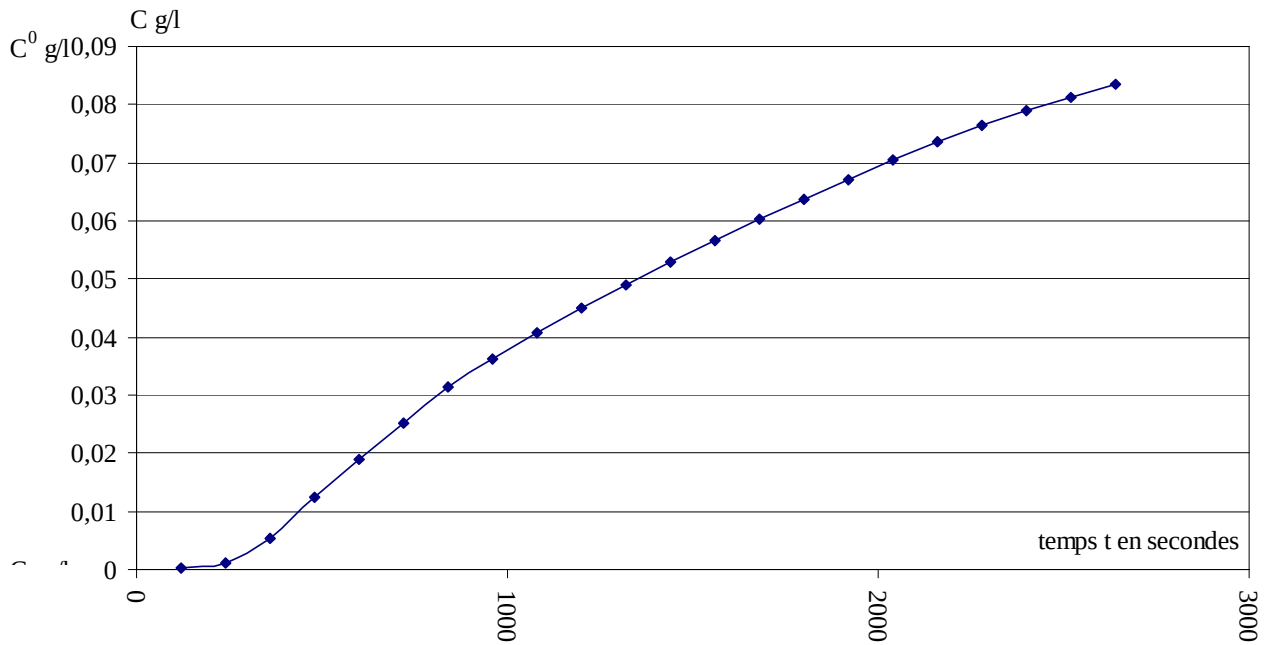


Figure. 72 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps de l'échantillon II.

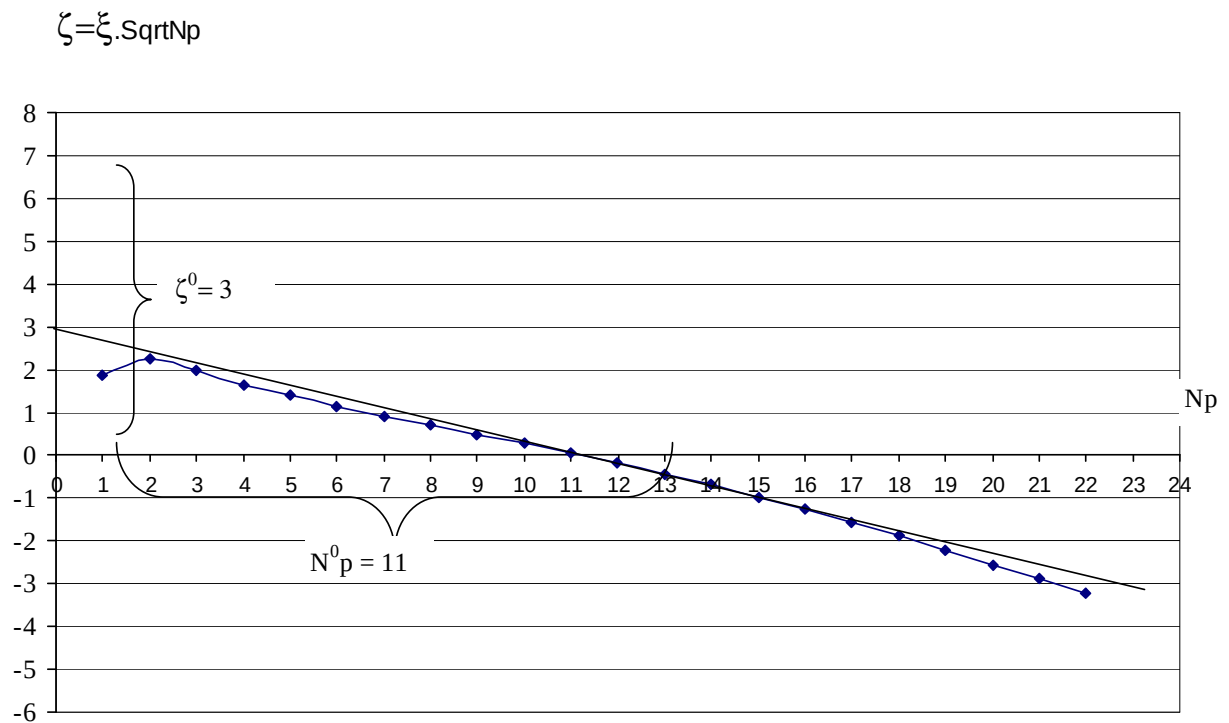


Figure. 73 : graphe de $\xi \sqrt{N_p}$ en fonction de N_p de l'échantillon II

Donc
$$D = \frac{V_e}{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot \Delta t} \times \frac{N_p^0}{(\zeta^0)^2} \quad \text{et} \quad n_e = \frac{4 \cdot V_e}{\pi \cdot d^2 \cdot l} \times N_p^0.$$

L'application numérique donne :

Pou l'échantillon n° 02.

$$n_e = \frac{4 \times 2.5 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 0.11} \times 11 = 0.29 \text{ ou } 29 \%$$

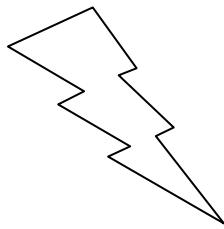
$$v = \frac{4 \times 2.5 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 120} = 2.41 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$D = \frac{2.5 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 0.11 \times 120} \times \frac{11}{3^2} = 6.69 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Sachant que la paramètre de la dispersion est égale au produit de la vitesse de Darcy v et de la dispersivité longitudinale α_l :

$$D = v \cdot \alpha_l \quad \text{donc} \quad \alpha_l = \frac{D}{v} = \frac{6.69 \times 10^{-5}}{2.41 \times 10^{-5}} = 2.78 \text{ m pour l'échantillon n° 02}$$

Partie 3



Comporte deux chapitres :

- **Le premier chapitre** études hydrochimiques des eaux de la nappe de l'Oued Souf on déterminant leurs faciès chimique, la répartition spatiale des concentrations des différents éléments ainsi que leur évolution dans le temps et en fin l'aptitude de ces eaux à l'irrigation.
- **Le deuxième chapitre** la pollution dans la zone du rejet on interprète les analyses chimiques des trois campagnes réalisées sur les eaux de la zone à fin de dresser une carte de l'indice de pollution organique.

CHAPITRE VII

Etude hydrochimique de la vallée du Souf

1. Introduction :

La composition chimique d'une eau est importante dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...Etc.).

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques d'échantillons d'eau que nous avons prélevés au niveau de la nappe libre du Souf autour de la zone des rejets où nous avons sélectionné 14 points d'eau pour les campagnes d'Avril, Juin et Septembre 2007. Ce choix a été justifié par leur répartition spatiale et les résultats d'analyses chimiques effectuées sur les échantillons d'eau de la nappe libre prélevés lors des campagnes de mesure sur le terrain durant le mois de Mai 1995 sur 65 échantillons et Mars 1998 sur 34 échantillons, ils sont répartis sur toute la zone du Souf.

Les analyses des trois campagnes de 2007 ont été réalisées au laboratoire du département des sciences de la mer d'Annaba, le laboratoire centrale de SONATRACH et le laboratoire d'analyses médicales, tandis que les analyses des deux campagnes de Mai 1995 et Mars 1998 ont été effectuées au laboratoire de chimie de L'ANRH d'Ouargla.

Les éléments dosés ont porté essentiellement sur les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{--} et HCO_3^-) et les sels nutritifs (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- et PO_4^{--}).

Le but de ce chapitre est de définir les faciès chimiques des eaux souterraines ; de les comparer et de suivre l'évolution dans l'espace et dans le temps de ces faciès. Il sera également apprécié la qualité des eaux souterraines par les éléments nutritifs (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- et PO_4^{--}) est également abordé. Pour cela un certain nombre de cartes et de diagrammes ont été élaborés et serviront de base à l'interprétation générale des résultats d'analyses chimiques.

2. Les faciès chimiques :

2.1. Formule caractéristique de STABLER :

La formule caractéristique selon STABLER consiste à calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale

$$r \% = (100 / c) * r$$

Avec r : quantité en réaction de l'ion considéré en meq/l ;

c : la concentration totale ;

On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant (Annexe) les résultats obtenus permettent de distinguer les faciès qui figurent dans le tableau (N°17). L'examen de ce tableau montre que :

- Les eaux de la campagne Mai 1995 présentent la famille des eaux Sulfatées avec 89.23% ;
- Les eaux de la campagne Mars 1998 présentent la famille des eaux Sulfatées avec 82.35% ;

Tableau N°17 : Classification hydrochimique des eaux souterraines des deux campagnes selon STABLER

Compagne chimique	Famille des eaux	Faciès chimique	Pourcentage	
Mai 1995	Chlorurées	Chloruré calcique	1.54	10.77
		Chloruré sodique	9.23	
	Sulfatées	Sulfaté calcique	66.15	89.23
		Sulfaté sodique	23.08	
Mars 1998	Chlorurées	Chloruré sodique	17.65	17.65
	Sulfatées	Sulfaté magnésien	47.06	82.35
		Sulfaté sodique	35.29	

2.2. Diagramme de Piper (Campagne 1995) :

Le report de 65 puits et piézomètres sur le diagramme de Piper (Figure.74,A) montre deux ensembles de points : l'un regroupe la majorité des points caractérisé par des eaux de type sulfaté calcique à chloruré calcique, ce faciès indique une dissolution évaporitique riche surtout en gypse et avec un degré moindre en sels. Par contre l'autre caractérisé par un faciès sulfaté sodique à chloruré sodique indique toujours un dissolution évaporitique riche en sels et en gypse.

2.3. Diagramme de Piper (Campagne 1998) :

Le report de 34 points sur le diagramme de piper (Figure.74,B) montre deux ensembles comme la campagne de 1995 mais avec une différence marquée par la dominance du magnésium par rapport au calcium.

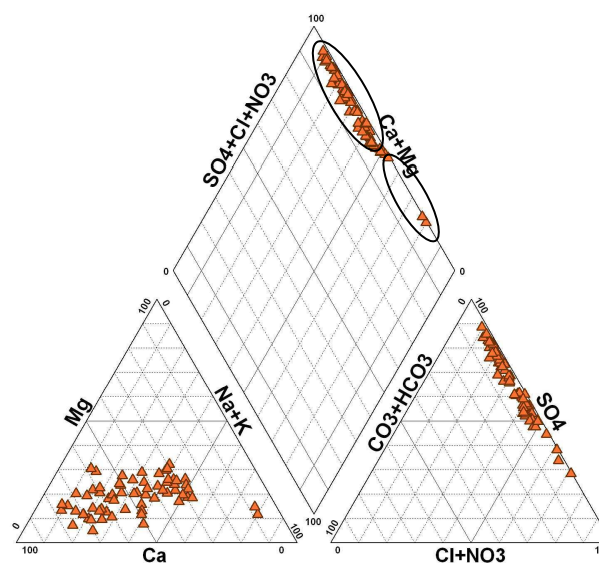


Figure.74, A : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mai 1995).

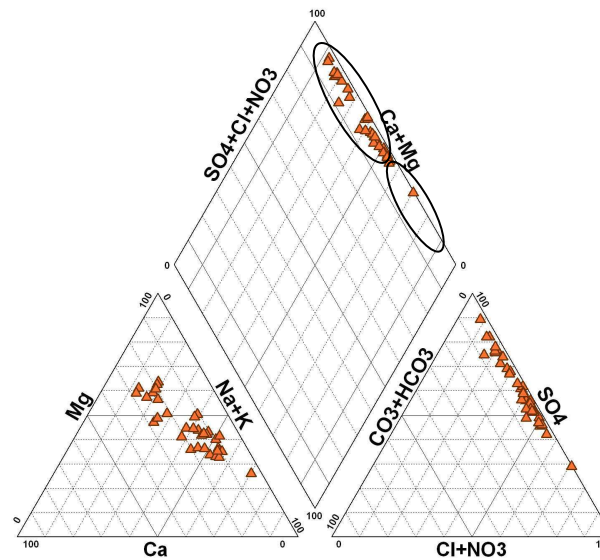


Figure.74, B : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mars 1998).

3. Cartographie hydrochimique :

3.1. Carte du calcium :

L'examen de la carte (Figures.75 et 76) montre que la teneur de calcium varie entre 92 mg/l (puits H78) à 780 mg/l (puits H50), où les faibles teneurs sont observées dans la partie Sud variant entre 320 à 480 mg/l (Mai 1995), et 80 à 240 mg/l (Mars 1998). Dans la partie Nord -Ouest les valeurs dépassent les 640 mg/l (Mai 1995), et 360 mg/l (Mars 1998). Pour le secteur central (El-Oued, Kouinine, Ourmes, et Trifaoui), les teneurs varient entre 560 et 640 mg/l (Mai 1995) et entre 160 à 240 mg/l (Mars 1998).

3.2. Carte du magnésium :

La carte du magnésium (Figure. 77,78) montre que les valeurs faibles s'observent au Sud (Mihouensa, Bayada, Oued Alanda, Nekhla et Ogl), alors que les valeurs du secteur central oscillent entre 50 à 200 mg/l (Mai 1995) et 300 à 400 mg/l (Mars 1998). Dans la partie Nord -Ouest la concentration en Mg dépasse les 500 mg/l (Mai 1995) et 600 mg/l (Mars 1998).

3.3. Carte des chlorures :

La lecture des deux cartes (figure. 79,80) fait ressortir trois zones bien distinctes :

- ❖ Dans la zone Sud les concentrations sont relativement faibles 160 à 500 mg/l (Mai 1995) et 100 à 500 mg/l (Mars 1998).
- ❖ Dans la zone centrale les valeurs sont inférieures à 1000 mg/l.
- ❖ Dans la zone Nord -Ouest, les concentrations sont élevées en liaison directe avec le sens d'écoulement.

3.4. Carte du sulfate :

Les résultats des analyses chimiques, donnent des valeurs variant de 570 à 6960 mg/l.

D'après les cartes de répartition de cet élément (figure. 81, 82) nous distinguons trois zones pour chacune des cartes :

1) La carte de Mai 1995 :

La zone Sud caractérisée par des valeurs inférieures à 1200 mg/l.

La zone centrale caractérisée par des valeurs variant entre 1200 et 2000 mg/l.

La zone Nord -Ouest où on observe de fortes teneurs pouvant atteindre 6960 mg/l.

2) La carte de Mars 1998 :

La zone Sud et centrale avec des valeurs variant de 1400 à 1800 mg/l.

Une zone entre les deux caractérisée par des valeurs oscillent entre 600 et 1400 mg/l.

La zone Nord -Ouest, on observe les concentrations les plus élevées 6625 mg/l.

3.5. Carte de sodium :

D'après les cartes (figure.83,84) les concentrations en sodium varient comme celles des sulfates. Elles augmentent du Sud 60 mg/l (Mai 1995) et 80 mg/l (Mars 1998) au Nord -Ouest où on enregistre les fortes concentrations 8000 mg/l (Mai 1995) et 7620 (Mars 1998).

4. Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants :

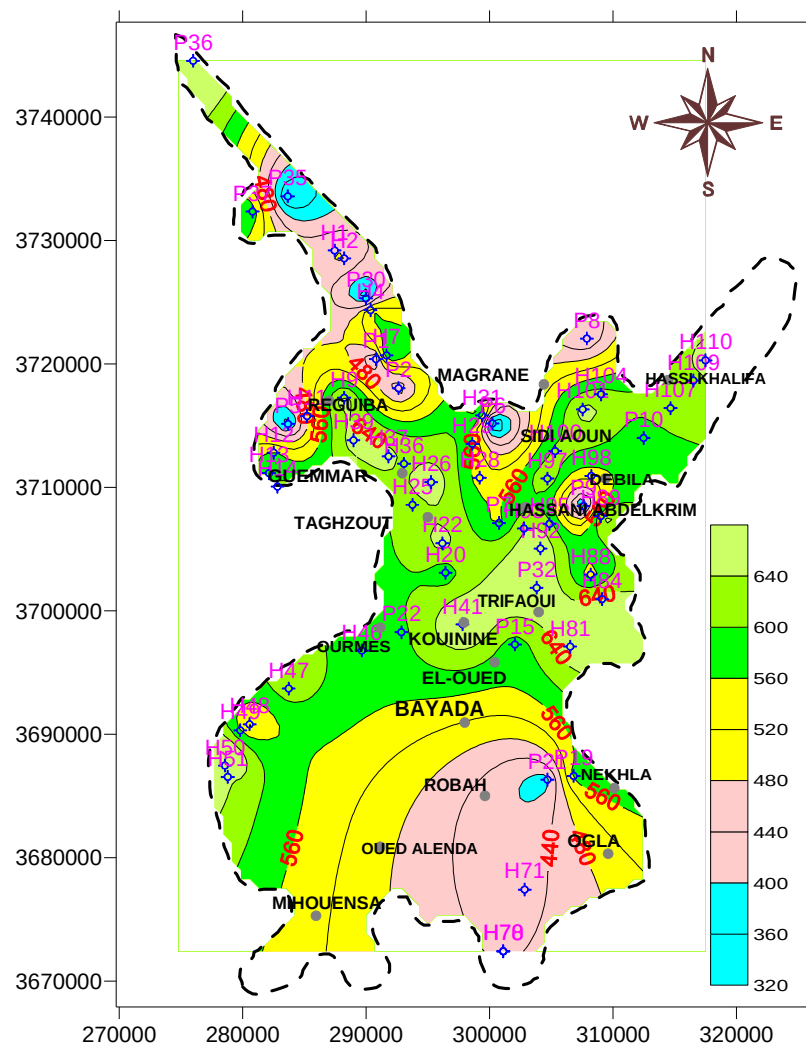
4.1. Origine des éléments Na^+ et Cl^- :

Pour avoir une idée sur les éléments dominants, nous avons fait une représentation graphique sur une échelle logarithmique, avec en abscisse la teneur exprimée en milliéquivalents des chlorures, et en ordonnée celle du sodium.

L'examen des figures 85 et 86 permet de remarquer que la majorité des points d'eau (les deux campagnes) se trouve au-dessous de la droite d'une pente égale à 1. Dans ce cas c'est les chlorures qui l'emportent sur le sodium à cause d'un excès de dissolution de cet élément.

4.2. Origine du calcium :

Le faciès calcique a été étudié à l'aide de deux diagrammes, à cause de sa double origine (carbonatée et évaporitique). Les figures 87,88,89,90 Montrent que l'ensemble des points se trouvent dans le domaine évaporitique pour les deux campagnes ce qui vérifie que l'élément Ca^{++} provient de la dissolution des formations évaporitiques.



Légende :

Echelle :

0 10000 20000 m

— Courbe d'isovaleurs de Ca en (mg/l). — — — Domaine d'observation. ♦ Points de mesure de Cl. ● Localité.

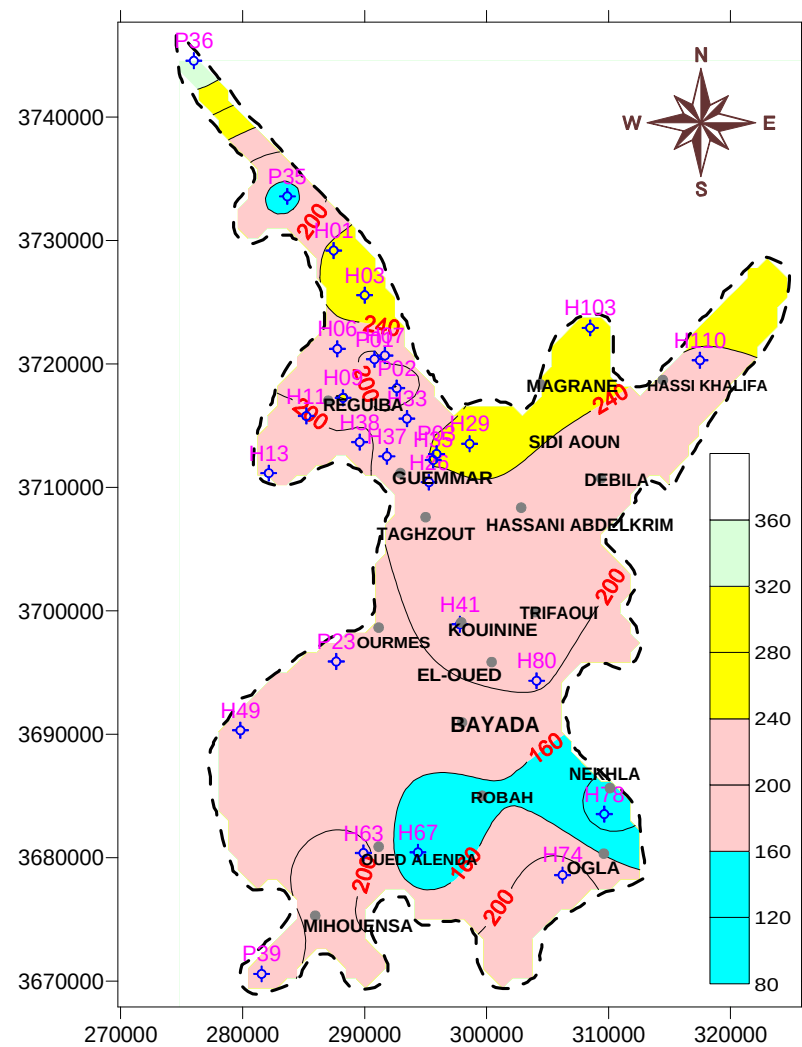
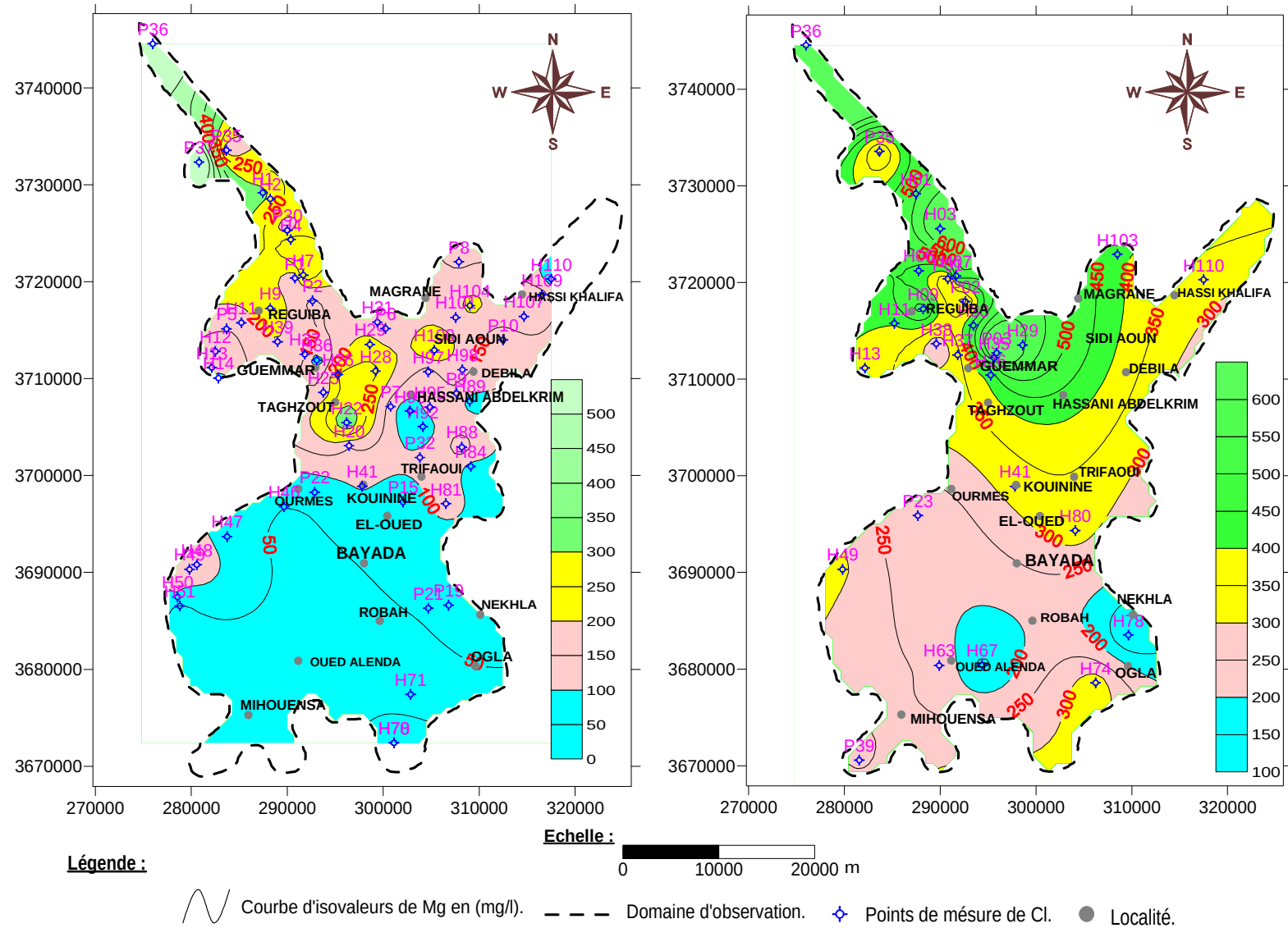
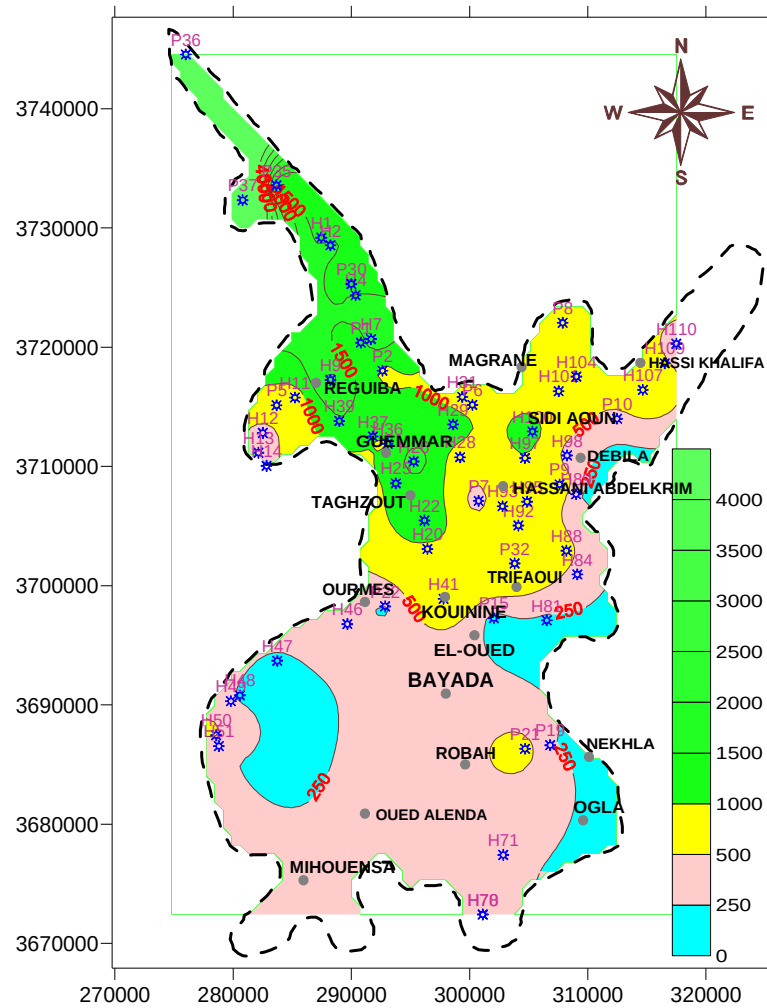


Figure. 75 : Carte des concentration de calcium pour la période de Mai 1995. Figure. 76 : Carte des concentrations de calcium pour la période de Mars 1998.





Légende :



Courbe d'isovaleurs de Cl en (mg/l).



Domaine d'observation.



Points de mesure de Cl.



Localité.

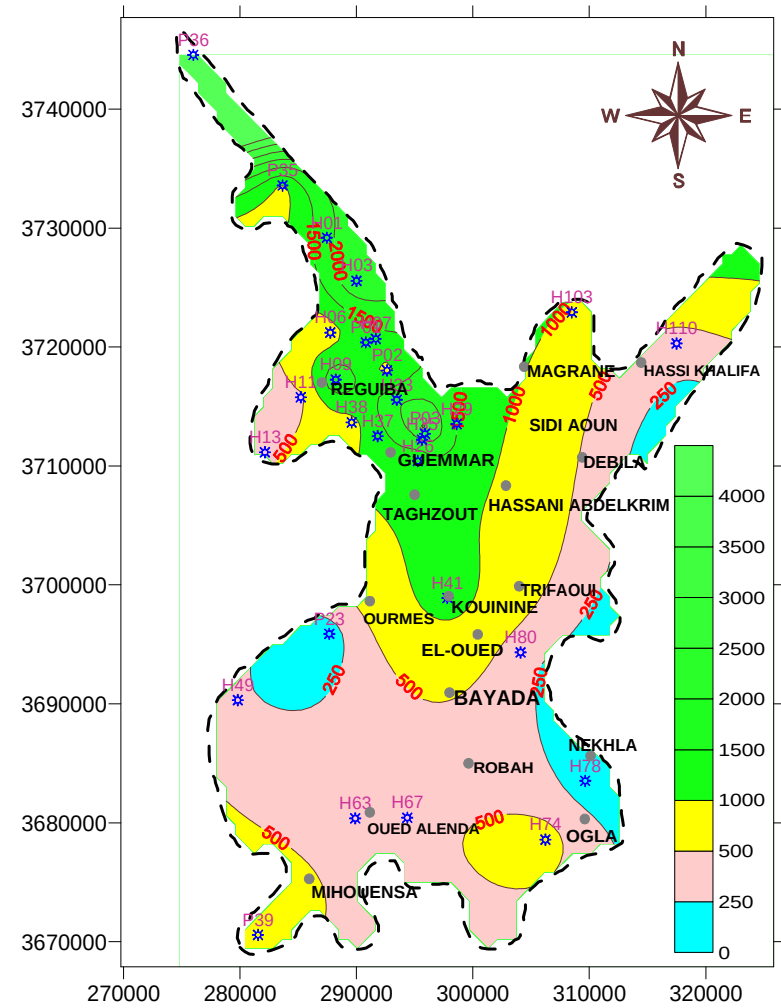
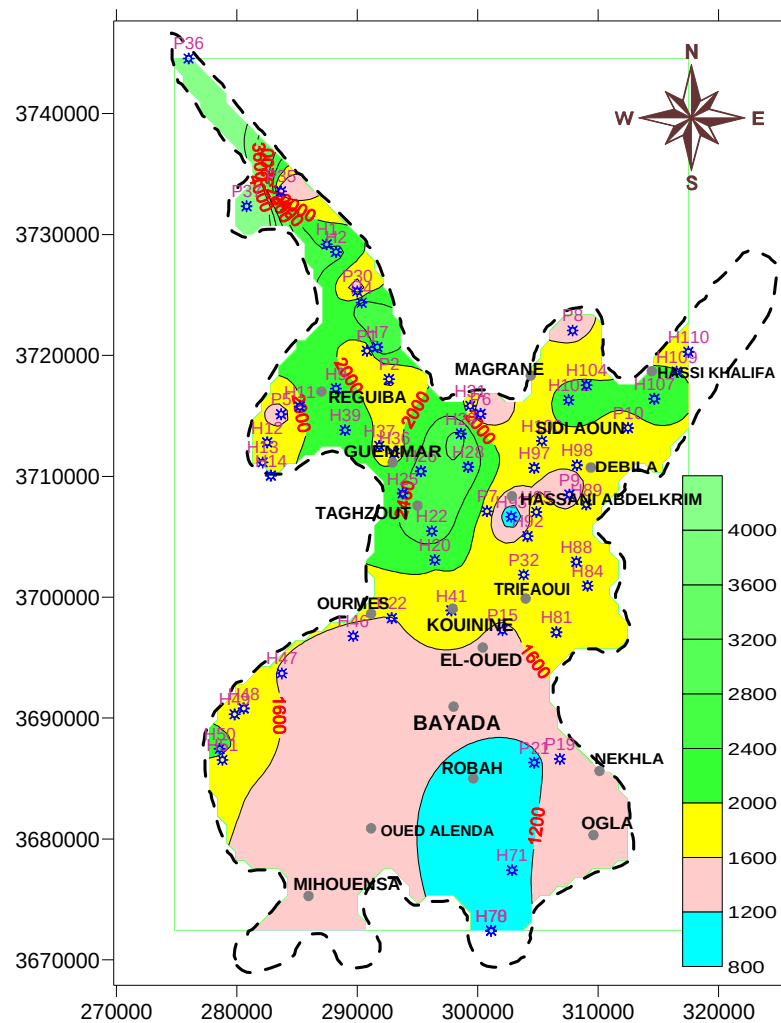


Figure. 79 : Carte des concentration des chlorures pour la période de Mai 1995. Figure. 80 : Carte des concentrations des chlorures pour la période de Mars 1998.



Légende :

Echelle :



Courbe d'isovaleurs de SO₄ en (mg/l).



Domaine d'observation.

Points de mesure de Cl.

Localité.

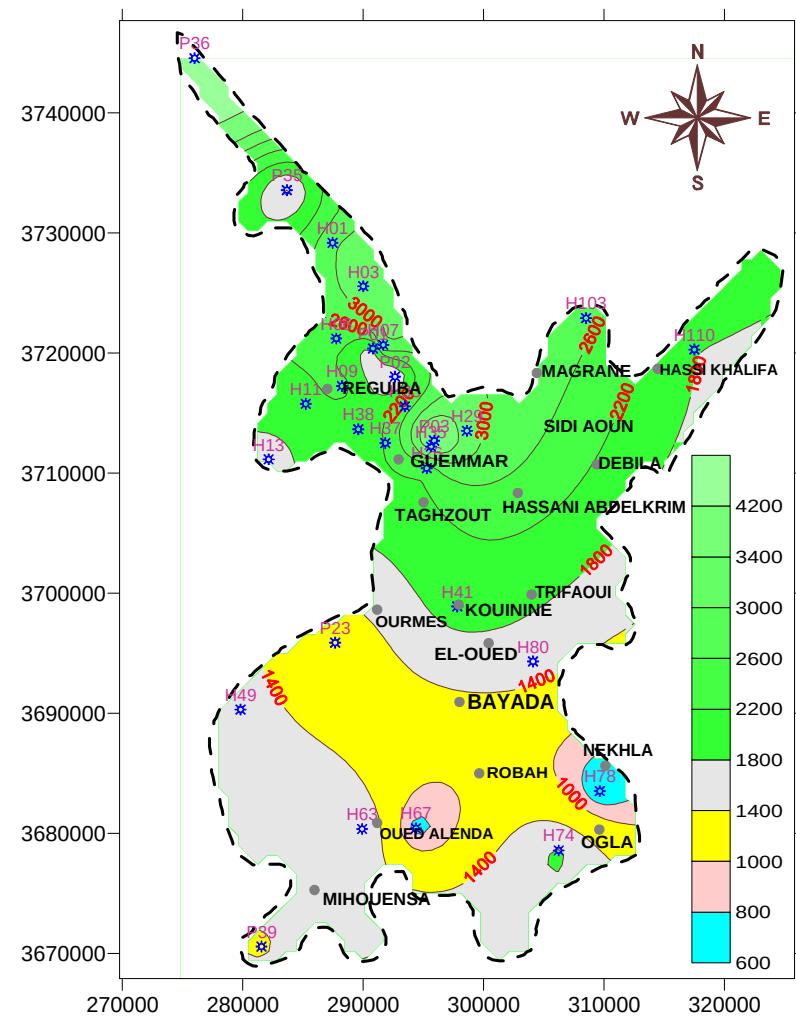
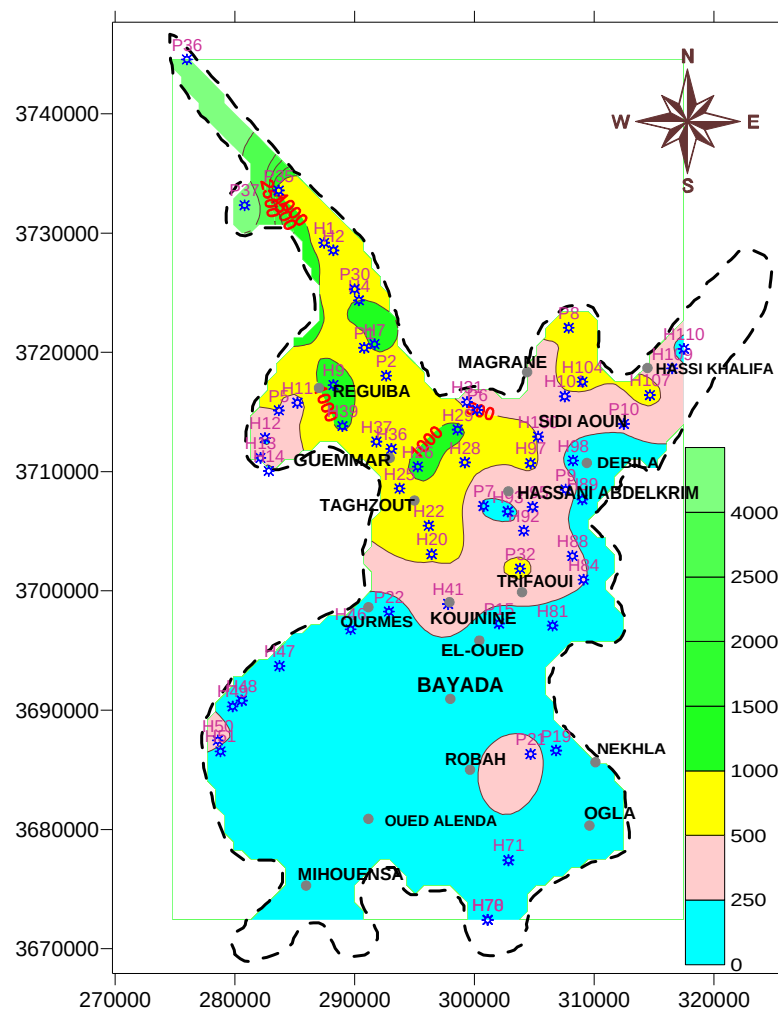


Figure. 81 : Carte des concentrations des sulfates pour la période de Mai 1995.

Figure. 82 : Carte des concentrations des sulfates pour la période de Mars 1998.

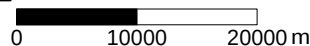


Légende :



Courbe d'isovaleurs de Na en (mg/l).

Echelle :



--- Domaine d'observation.

◆ Points de mesure de Cl.

● Localité.

Figure. 83 : Carte des concentrations de sodium pour la période de Mai 1995.

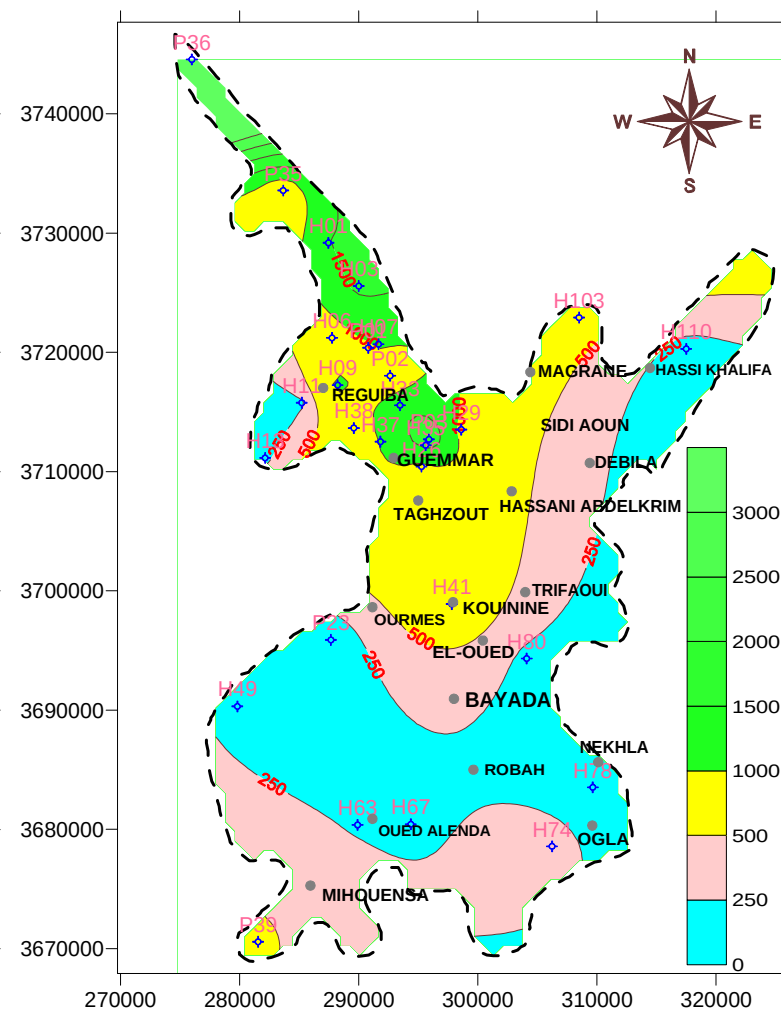
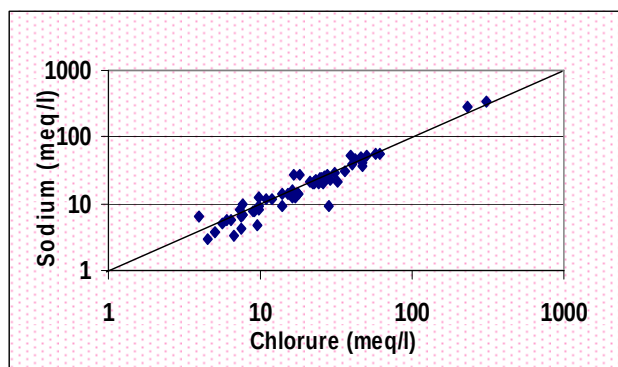
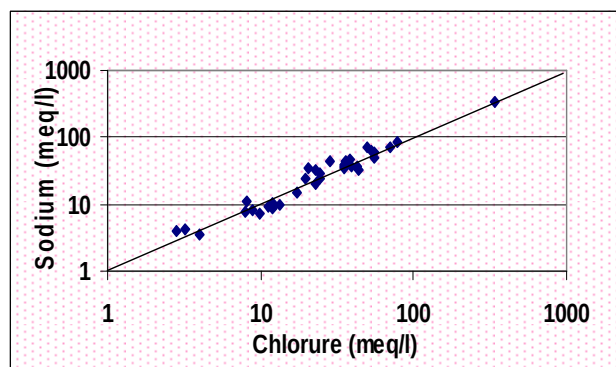
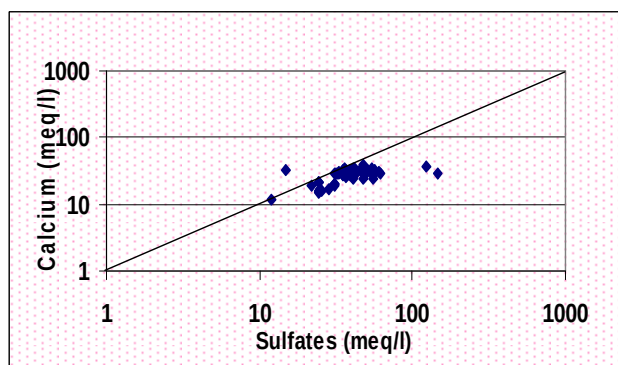
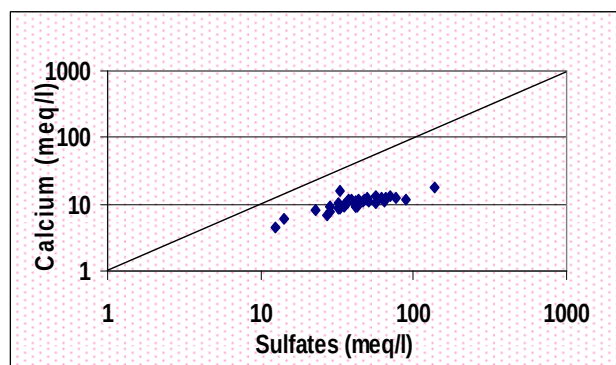
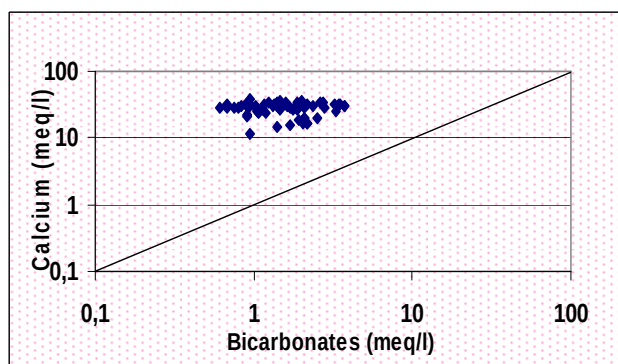
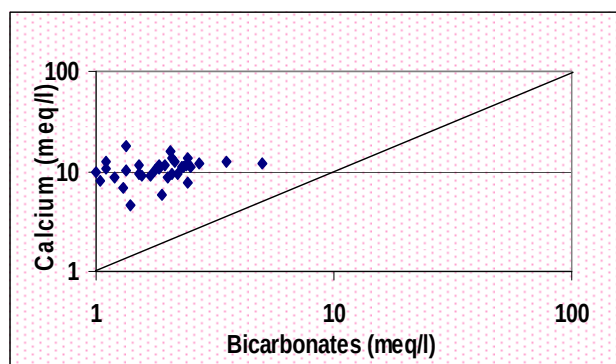
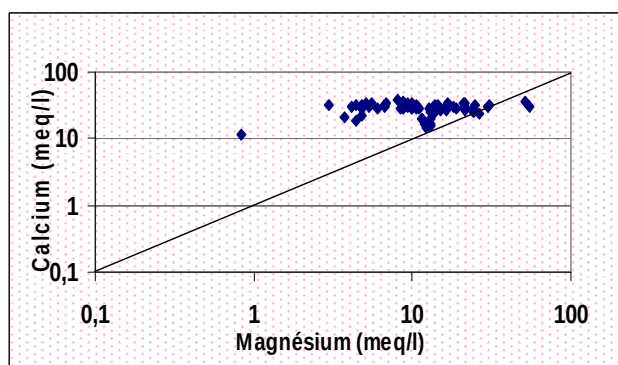
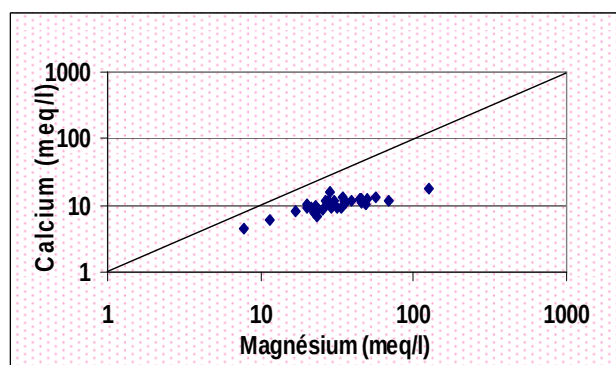


Figure. 84 : Carte des concentrations de sodium pour la période de Mars 1998.

Figure. 85 : Le couple Na^+ , Cl^- (Mai 1995)Figure. 86 : Le couple Na^+ , Cl^- (Mars 1998)Figure. 87 : Le couple Ca^{++} , SO_4^{--} (Mai 1995)Figure. 88 : Le couple Ca^{++} , SO_4^{--} (Mars 1998)Figure. 89 : Le couple Ca^{++} , HCO_3^- (Mai 1995)Figure. 90 : Le couple Ca^{++} , HCO_3^- (Mars 1998)Figure. 91 : Le couple Ca^{++} , Mg^{++} (Mai 1995)Figure. 92 : Le couple Ca^{++} , Mg^{++} (Mars 1998)

4.3. Le rapport $r \text{Ca}^{++} / r \text{Mg}^{++}$:

Les figures N°91 et 92 montre l'existence de deux cas :

- Lorsque le rapport est supérieur à 1, le calcium prédomine, c'est le cas de la campagne de Mai 1995 cela est dû probablement à la forte dissolution des formations gypseuses.
- Si ce rapport est inférieur à 1 le magnésium prédomine, il concerne tous les échantillons analysés dans la campagne de Mars 1998. Le faciès magnésien peut être lié à la présence d'argiles ou de dolomies riche en magnésium.

5. Indice d'échange de base (i.e.b) :

L'indice d'échange de base défini par SCHOELLER en 1934 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 :

$$\text{i.e.b} = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{Cl}^-}$$

Si l'i.e.b est négatif, les ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes. Par contre si l'i.e.b est positif, les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes. Dans le cas où l'i.e.b est négatif c'est-à-dire lorsqu'il y a échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins des permutolites, il est préférable de calculer l'i.e.b par la formule suivante :

$$\text{i.e.b} = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{SO}_4^{--} + r\text{HCO}_3^- + r\text{NO}_3^-}$$

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. L'interprétation des données des i.e.b calculés (Annexe) a montré que la majorité des eaux souterraines de la nappe libre de l'Oued Souf (campagne de Mai 1995) ont un i.e.b positif ce qui vérifie la prédominance de faciès calcique. Par contre pour la campagne de Mars 1998 plus de 50% des eaux ont un i.e.b négatif traduit la prédominance du faciès sodique.

La figure.93 montre que la majorité des points d'eaux (> 50%) restent à l'état nature, ils n'ont pas subi un échange de base puisque peut être le temps de contact sol-eau n'est pas suffisant.

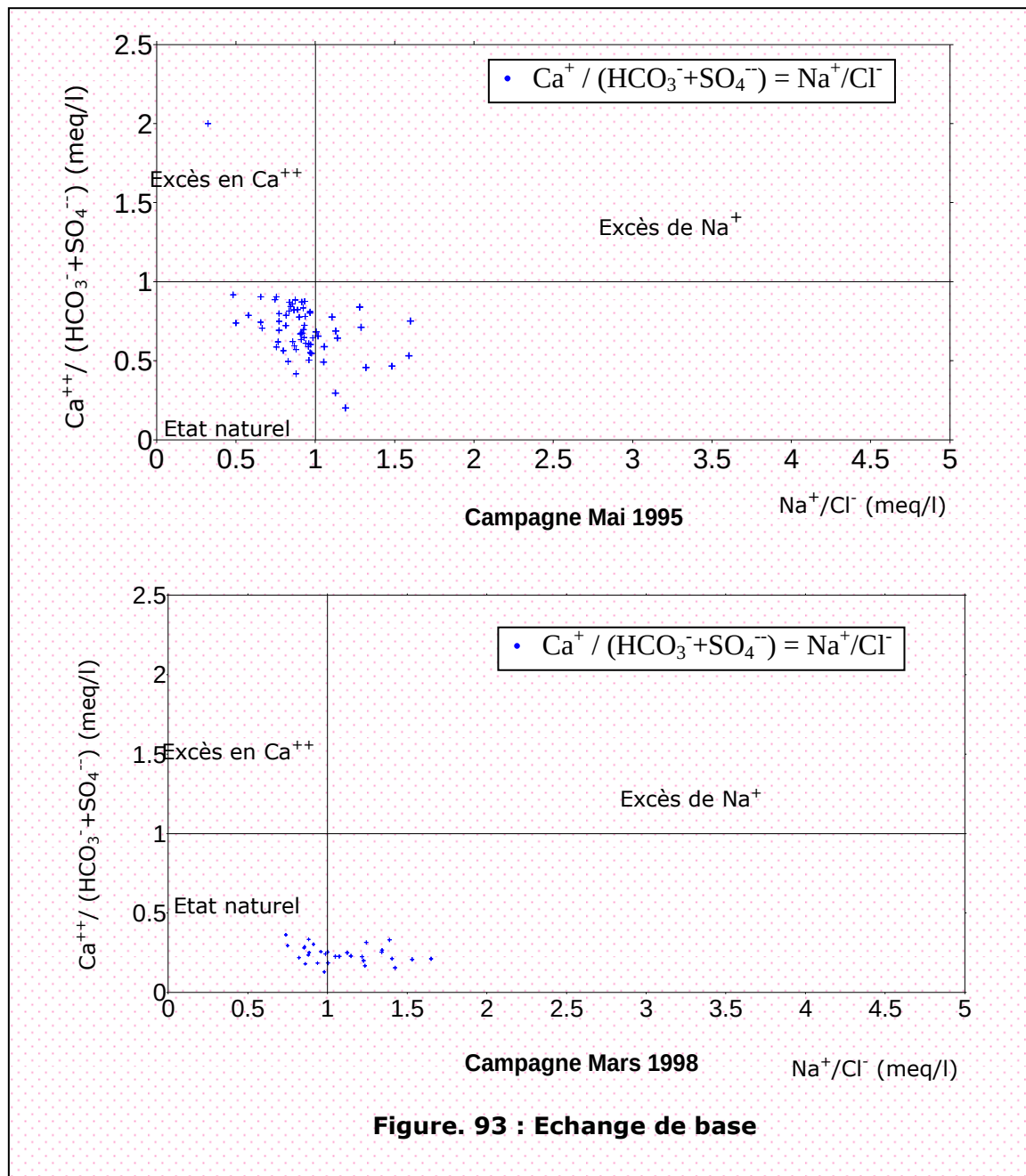


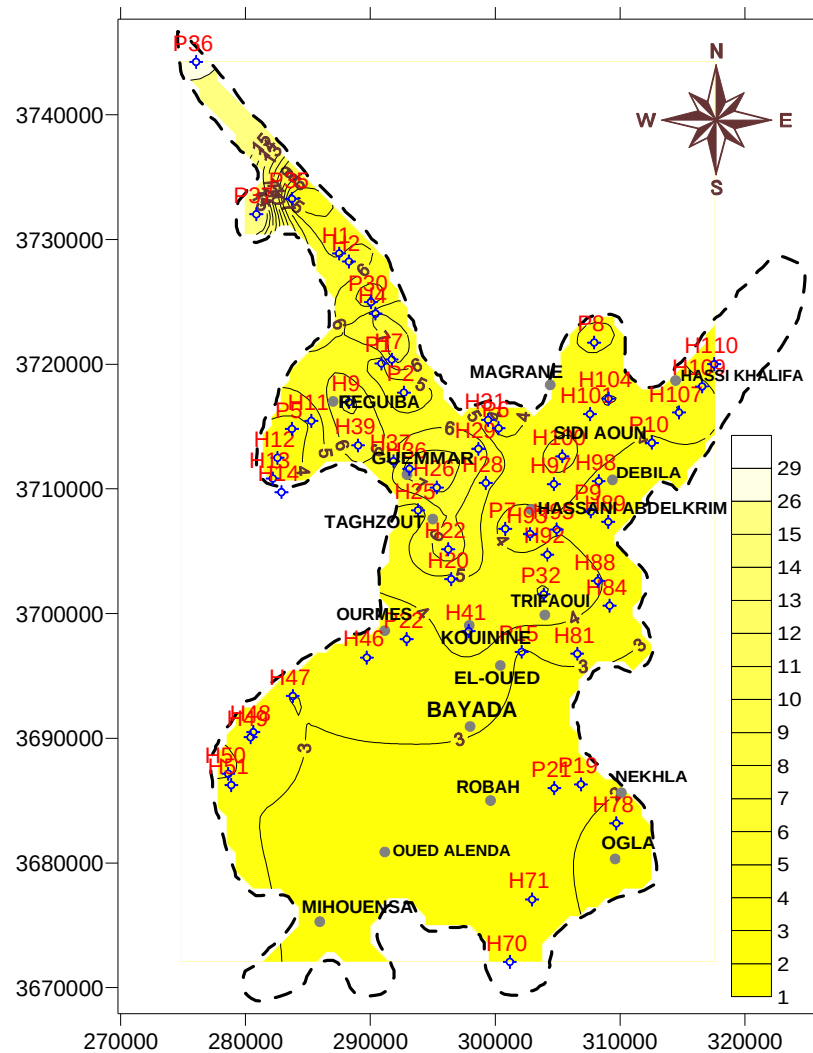
Figure. 93 : Echange de base

6. Carte de résidu sec :

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

D'après les cartes de variation de résidu sec (figure.94,95), les valeurs du résidu sec croissent du Sud vers le Nord à des valeurs élevées qui varient de 2 g/l (Nekhla et Ogla) à 6 g/l (Réguiba).

- Dans la partie Sud les valeurs varient de 2 à 3 g/l ;
- Dans la partie centrale (El Oued et Kouinine) les valeurs varient de 3 à 4 g/l ;
- La partie Nord -Ouest de la carte regroupe les valeurs les plus élevées qui atteignent les 30 g/l dans le piézomètre P36.



Légende :



Courbe d'isovaleurs de R.S en (g/l).



Domaine d'observation.



Points de mesure de Cl.



Localité.

Figure. 94 : Carte de Residu sec pour la période de Avril 1993.

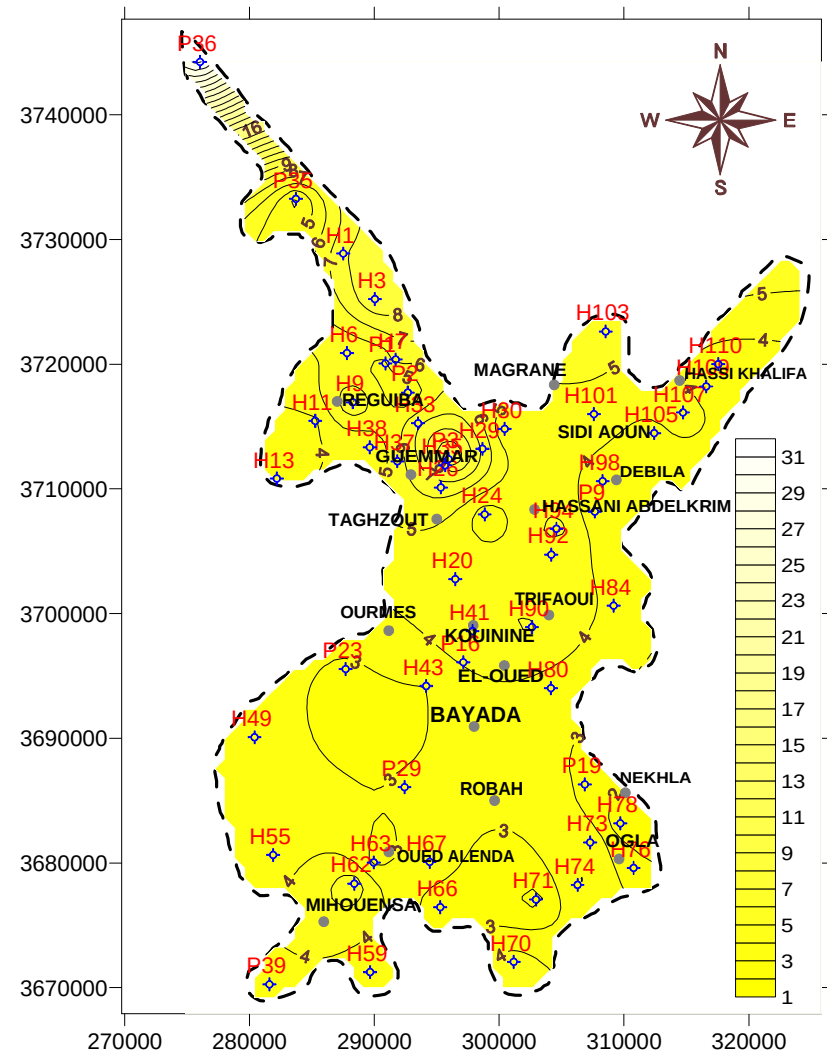


Figure. 95 : Carte de Residu sec pour la période de Mars 1998.

7. Cartes des concentrations des Nitrates (Mars 1993, Mars 1998, Mars 2000 et Avril 2002) :

D'après les cartes des Nitrates (Figure.96,97,98,99) on remarque que la concentration des nitrates dépasse les normes admissibles par l'OMS (45 mg/l). Elle dépasse par endroit 200 mg/l.

7.1. Carte de Mars 1993 : les valeurs les plus faibles sont enregistrées au Nord de Réguiba (H3) puis elles augmentent vers le centre de Réguiba, avec un maximum de 110 au puits H39. D'après la carte on voit bien trois vecteurs de croissance de nitrates :

Le premier on en a déjà parlé H3 – H39 ;

Le deuxième commence à l'Est de Trifaoui (H83) vers le Nord –Ouest (H93) ;

Le troisième commence à l'Ouest d'El Oued et poursuit jusqu'à l'extrême Sud de la zone d'étude (H60).

7.2. Carte de Mars 1998 : caractérisée par des valeurs qui dépassent les normes dans la plus grande partie sauf quelques endroits où on enregistre des valeurs inférieures aux normes et sont observés dans les localités suivantes :

Au Sud –Ouest de Magranne ;

Au Nord –Est de Réguiba ;

A l'extrême Sud de la zone d'étude ;

En général, les valeurs élevées de nitrates sont enregistrées dans les zones agricoles actives (Les Ghouts), et où se concentrent les agglomérations (El Oued, Kouinine, Réguiba, Trifaoui.....).

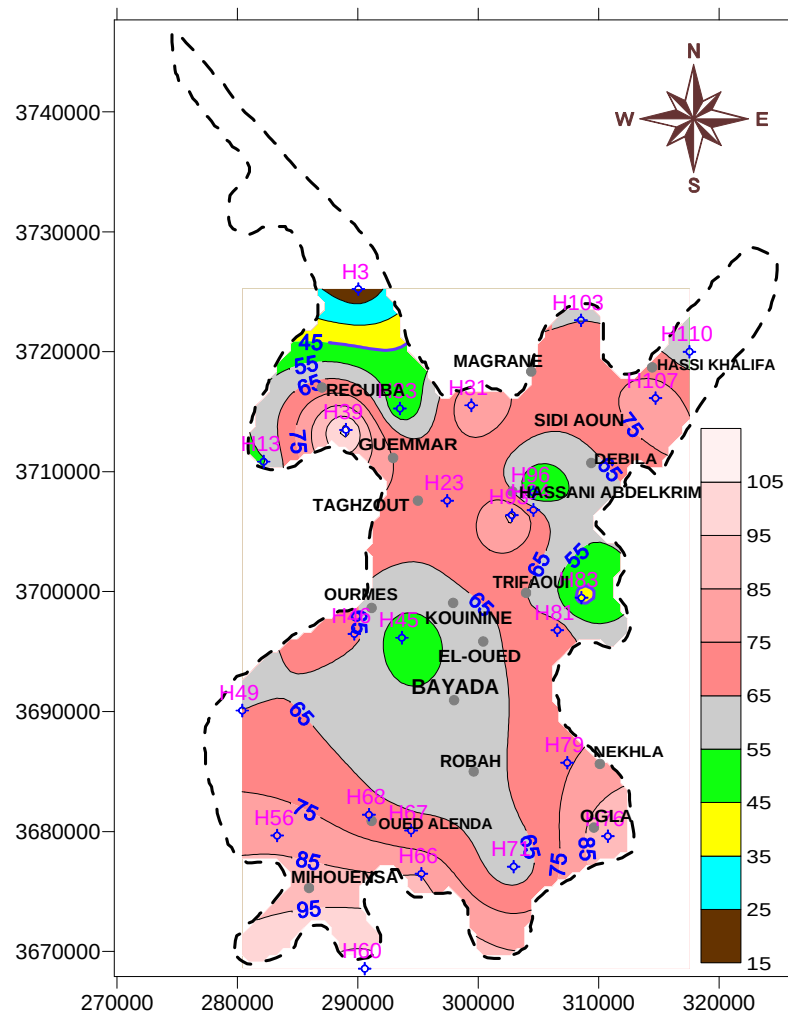
7.3. Carte de Mars 2000 : caractérisée par des valeurs supérieures aux normes sauf dans quelques endroits très limités (Sud –Ouest de Magranne, Nord –Est de Hassi Khalifa, Nord –Est de Réguiba et au Sud –Ouest de Mihouensa). On peut dire que les valeurs de Nitrates varient comme celles de Mars 1998.

7.4. Carte de Avril 2002 : Dans la plus grande partie de la zone, la concentration des nitrates est au-dessus de celle acceptable pour l'eau de boisson (45 mg/l selon l'OMS).

Les rares endroits où le taux de nitrates est inférieur à 45 mg/l sont :

- Les plantations irriguées par des forages au CT au domaine Daouia, à Foulia et à Hobba par dilution des nitrates par l'eau des nappes profondes,
- Quelques points localisés où la dénitrification a pu s'effectuer correctement.

Donc on peut dire que sauf en des rares points, l'eau de la nappe n'est pas potable. L'eau pour la consommation humaine devrait être puisée dans les nappes profondes.



Légende :

Echelle :



Courbe d'isovaleurs de NO₃ en (mg/l).

--- Domaine d'observation.

◆ Points de mesure de Cl.

● Localité.

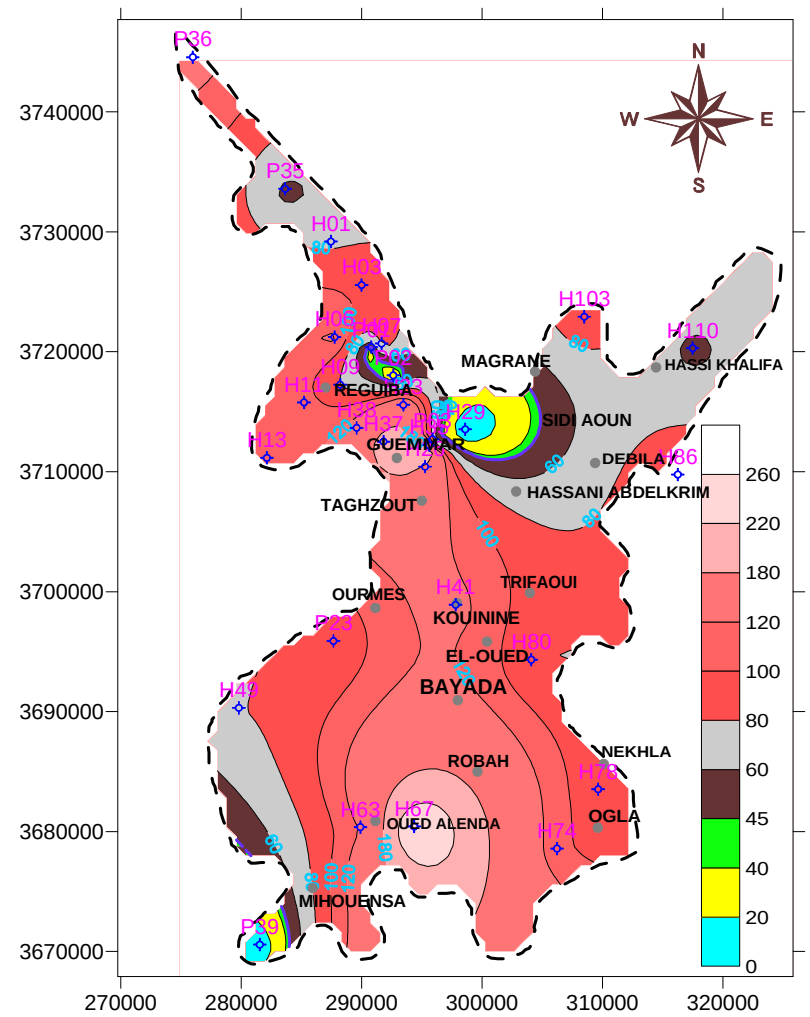


Figure. 96 : Carte des concentration des nitrates pour la période de Mars 1993.

Figure. 97 : Carte des concentrations des nitrates pour la période de Mars 1998.

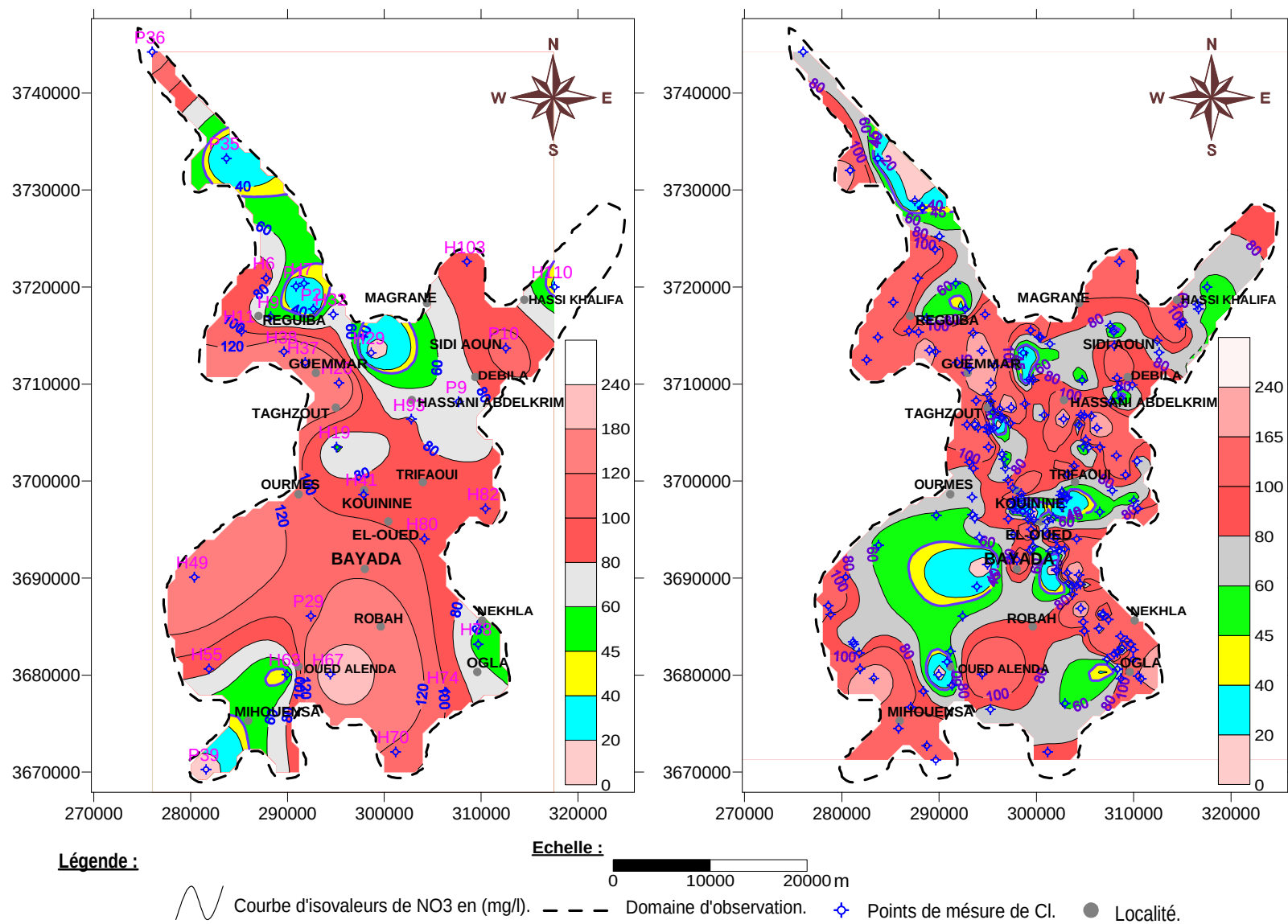


Figure. 98 : Carte des concentrations des nitrates pour la période de Mars 2000. Figure. 99 : Carte des concentrations des nitrates pour la période de Avril 2002.

8. Cartes de conductivité :

La conductivité d'une eau est fonction de la concentration des différents sels dissous dans cette eau. Pratiquement, La mesure de la conductivité permet de connaître l'aptitude de l'eau à l'irrigation. Plus la conductivité est basse plus l'eau est apte à l'irrigation.

8.1. Carte d'Avril 1993(Figure.100) :

Trois zones peuvent être distinguées :

La zone I caractérise le carré Mihouensa, Ourmes, Trifaoui, Ogla et qui apparaît aussi vers Le Nord -Est à Hassi Khalifa, avec des valeurs comprises entre 2500 à 5000 $\mu\text{S/cm}$.

La zone II comporte le carré Taghsout, Debila, Magrane Réguiaba caractérisée par des valeurs élevées variant de 5000 à 7500 $\mu\text{S/cm}$.

La Zone III toute au Nord à des valeurs très élevées dépassent les 7500 $\mu\text{S/cm}$.

8.2. Carte de Avril 2002(Figure.101) :

Trois grandes zones peuvent être définies :

- zone I tout au Nord de la zone d'étude, de conductivité très élevée
- zone II s'ouvrant en V vers le Nord depuis le chott d'El-Oued, de conductivité élevée
- zone III au Sud de la zone II, de conductivité relativement faible

La zone I présente une conductivité très élevée. Le recours aux nappes profondes et ultérieurement aux eaux de rejet assainies est nécessaire pour l'irrigation afin d'obtenir une conductivité acceptable. C'est le cas des plantations de Foulia irriguées par des forages au Complexe terminal.

Un système de drainage et/ou une irrigation partielle à partir de la nappe phréatique, dont la conductivité par dilution est localement plus faible, sont nécessaires pour éviter une remontée importante de la nappe phréatique.

La zone II, comprise entre Foulia au Nord et le chott d'El-Oued au Sud : La conductivité est relativement élevée dans la majeure partie de la zone, à cause :

- Du Chott d'El-Oued avec des conductivités de 24000 et 53000 microSiemens/cm. En septembre lorsque l'évaporation est maximum, la conductivité est de plus de 100000 microSiemens/cm. L'apport d'eau d'AEP et la faible évaporation durant l'hiver diluent l'eau et font baisser la conductivité. Les sels se déplacent vers le Nord-Est et Nord-Ouest selon le sens d'écoulement de la nappe phréatique, contaminant la nappe jusqu'à la région de Kouinine
- Des zones de ghouts ennoyées ou humides dans lesquelles la conductivité augmente par évaporation. Autour de Zgoum avec des conductivités de 9600 et 13500 microSiemens/cm.
- Dans la zone de ghouts humides à l'Est de Guemmar avec des conductivités de 11600 et 15900 microSiemens/cm
- A l'Est de Kouinine dans les Ghoutes inondés avec une conductivité de 17300 microSiemens/cm.

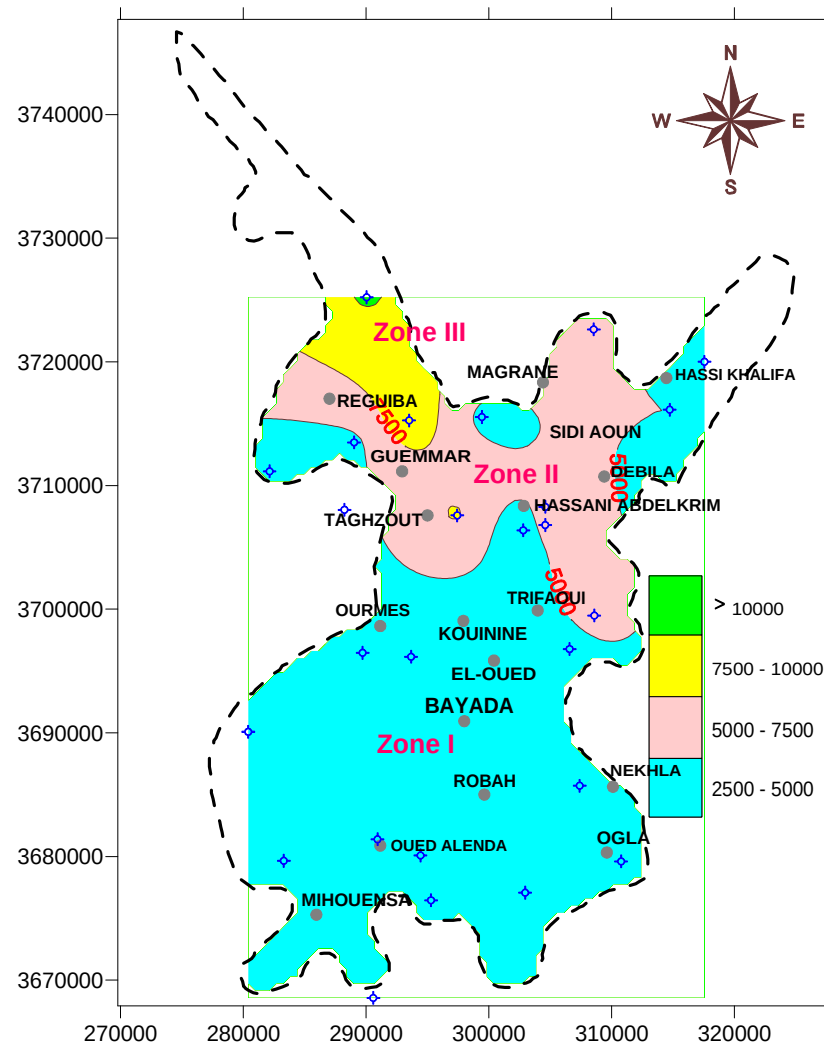
- Zone au Nord de Guemmar où les conductivités varient entre 9100 et 11000 microSiemens/cm.
- Au Nord –Ouest de Réguiba au niveau de la plantation où la conductivité est de 9300 microSiemens/cm
- Au Sud –Est de Réguiba dans une plantation avec une conductivité de 9000 microSiemens/cm.

Certaines zones ont une conductivité anormalement faible, probablement à cause d'un apport de l'eau des forages d'AEP :

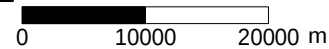
- Zone d'Arfsi avec une conductivité de 3900 microSiemens/cm
- Zone entre Hassi Khalifa, Magrane et Debila avec des conductivités comprises entre 2040 et 5100 microSiemens/cm.

La zone III, au sud de la zone II, est une zone de cultures traditionnelles dans laquelle la conductivité est relativement faible, comprise généralement entre 1800 et 4500 microSiemens/cm, à l'exception de :

- Zone de ghouts inondés entre El-Oued et Khobna avec des conductivités entre 5000 et 8000 microSiemens/cm
- Ghouts humides à Oued Alenda avec une conductivité de 10500 microSiemens/cm
- Ghouts inondés au Sud-Ouest d'El-Oued avec une conductivité de 7100 microSiemens/cm
- Zones de cultures irriguées au Sud de Nakhla avec une conductivité de 7100 microSiemens/cm
- Zone de cultures irriguées entre Mihouensa et Oued Alenda avec des conductivités comprises entre 6200 et 7200 microSiemens/cm
- Zone de cultures irriguées au Nord de Oued Turk avec des conductivités de 5600 microSiemens/cm
- Zones de cultures irriguées autour d'Ourmes avec des conductivités de 5600 et 6200 microSiemens/cm.

**Légende :**

Courbe d'isovaleurs de Conductivité en (mic S/cm).

Echelle :

--- Domaine d'observation. ♦ Points de mesure de conductivité. ● Localité.

Figure. 100 : Carte des conductivités pour la période de Mars 1993.

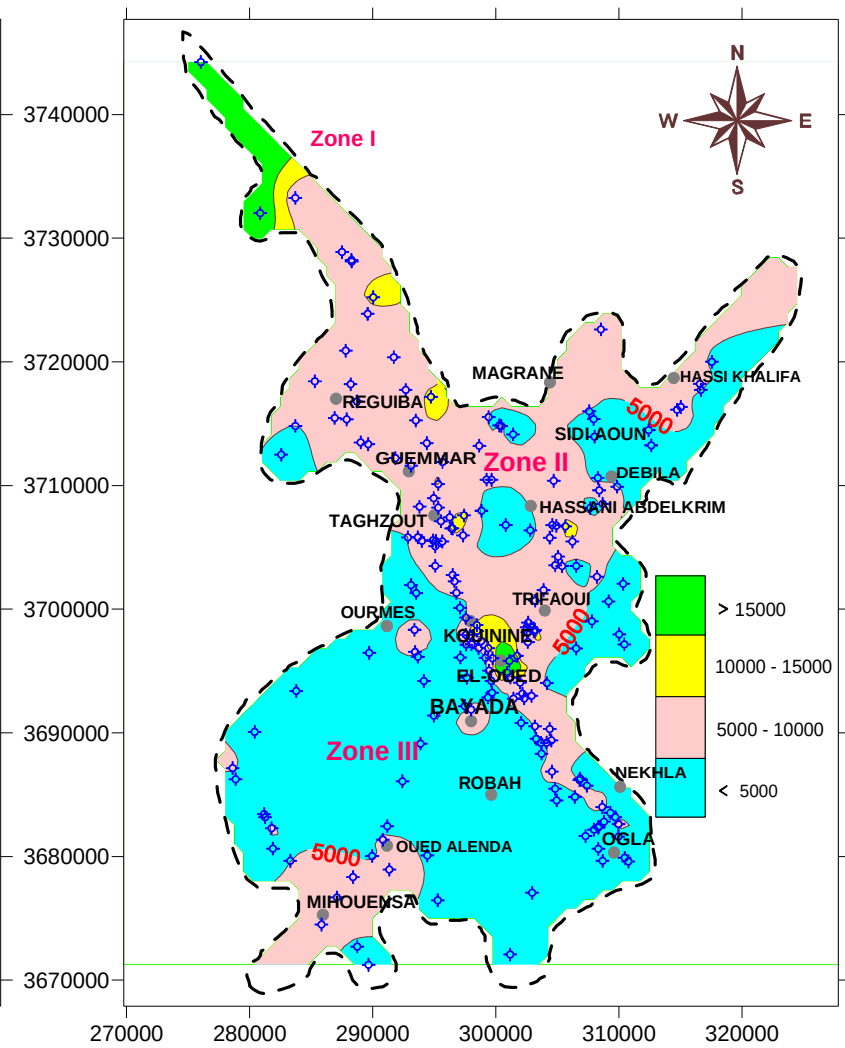


Figure. 101 : Carte des conductivités pour la période de Avril 2002.

9. Variation des concentrations des nitrates entre Mars 1993 et Avril 2002 :

Des mesures de concentration des nitrates sur 20 points du réseau de surveillance, ont été réalisées en Mars 1993 et en Avril 2002 ont servi à la réalisation de la carte des différences du taux de nitrates entre Mars 1993 et Avril 2002 (Figure.102).

Aucune diminution de plus de 20 mg/l n'a été relevée sur les 20 puits.

Le taux des nitrates a augmenté dans toutes les zones agricoles actives atteignant jusqu'à près de 160 mg/l à l'Ouest de Hassi Abdelkarim, à cause de l'utilisation d'engrais chimiques.

10. Relation entre la conductivité et le résidu sec :

Le tableau N°18 montre qu'il existe une bonne corrélation entre la conductivité et le résidu sec.

**Tableau N°18 : Coefficient de corrélation des paramètres physiques
(Conductivité – Résidu sec).**

Compagne chimique	Coefficient de corrélation (CE – RS)
Mai 1995	0.975
Mars 1998	0.998

11. Variation de la conductivité entre Mars 1993 et Avril 2002 :

L'établissement de la carte des différences de conductivité entre mars 1993 et avril 2002 est basée sur les 20 points ayant des mesures de conductivité en 1993 et 2002. Elle représente son évolution sur une période de 9 ans (Figure.103).

Au sud, dans les zones agricoles traditionnelles, la conductivité est stable, alors qu'au nord d'El Oued, l'augmentation de la conductivité est due à l'irrigation. Cette augmentation de conductivité est préoccupante car à moyen terme elle risque de limiter l'exploitation de la nappe phréatique. Le recours à des eaux de faible conductivité, pour abaisser la salinité, sera alors nécessaire que ce soit des eaux d'assainissement traitées ou des eaux de nappes profondes.

12. Le pH :

Les valeurs des pH sont généralement comprises entre 7 et 7.7.

Des valeurs élevées, entre 7,5 et 8,5 ont été mesurées dans des puits traités à la chaux, destinés à la consommation humaine, principalement dans la région sud, mais aussi dans des endroits isolés de la région Nord.

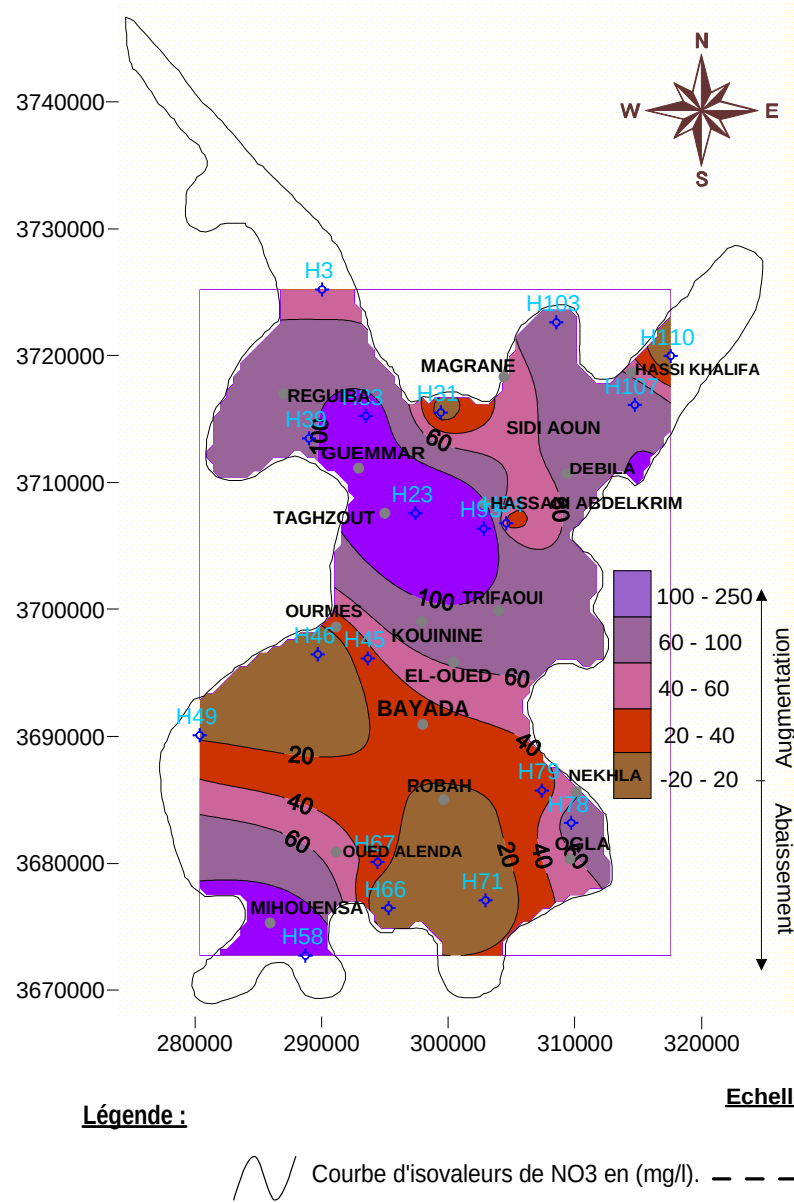


Figure. 102 : Carte des différences des concentrations des nitrates entre mars 1993 et avril 2002 .

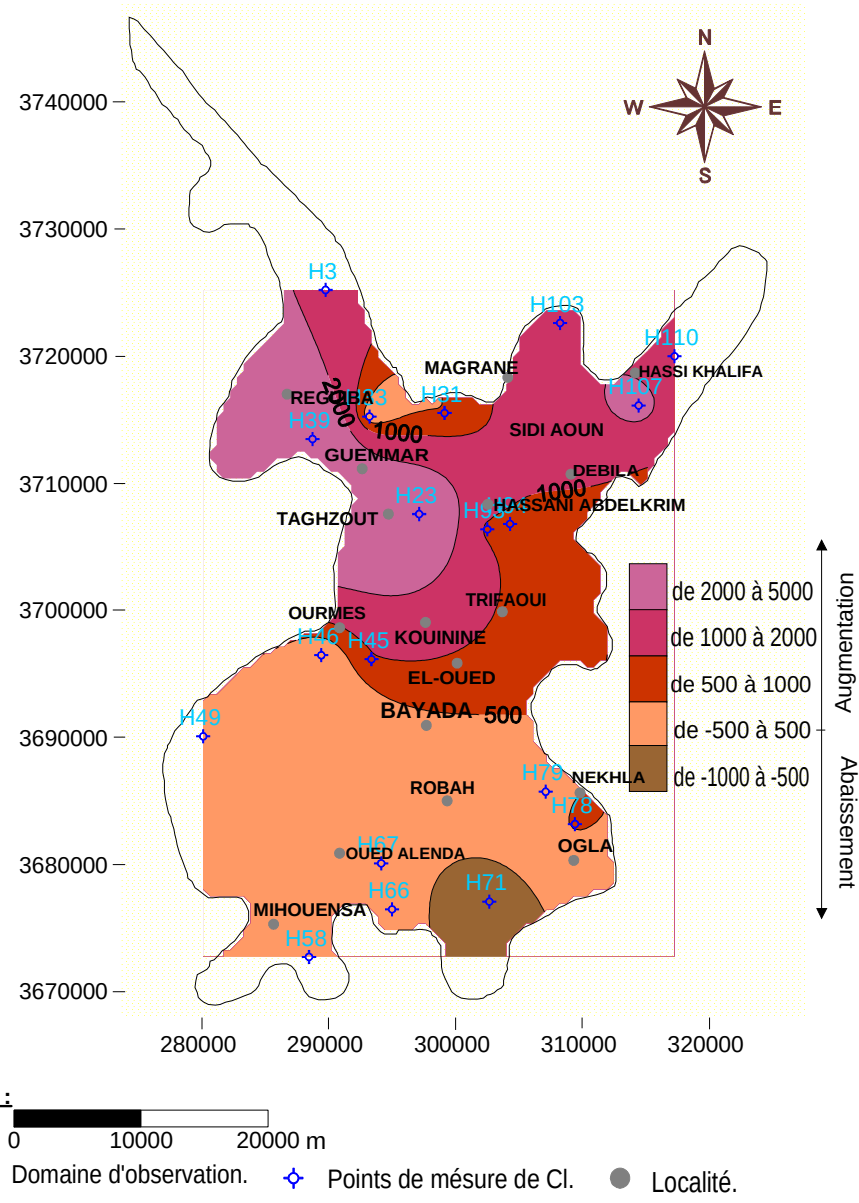


Figure. 103 : Carte des différences de la conductivité entre mars 1993 et avril 2002 .

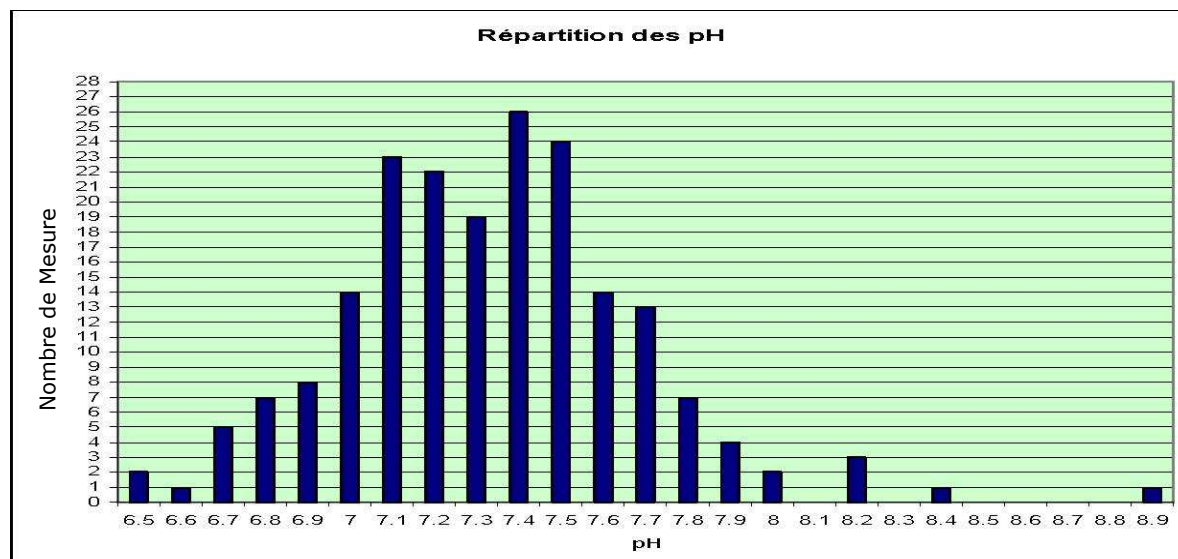


Figure.104 : Répartition des mesures de pH en Avril 2002

13. La température :

La température de l'eau est voisine de 20°C tantôt plus basse tantôt plus élevée sans que des tendances se dessinent en suivant, par exemple, une ligne d'écoulement de la nappe ou qu'elle puisse être liée à l'activité humaine. Ainsi dans le couloir habité Ogla – Kouinine, on s'attendait à mesurer des valeurs plus élevées que dans le voisinage agricole à cause notamment de l'AEP avec l'eau de l'Albien chaude, alors que les températures ont tendance à y être basses.

Après révision de toutes les mesures, il s'avère que les valeurs mesurées dépendent essentiellement de l'heure de la mesure, de la saison et de l'ensoleillement lorsque la nappe est peu profonde et qu'elle est dans la zone d'hétérothermie journalière. Au-delà, et jusque vers 30 -40 m de profondeur, des variations apparaissent encore, selon le mois de l'année ou la saison.

Les points de prélèvement, puits et piézométriques du réseau de surveillance, sont à des profondeurs variables, pouvant s'échelonner entre un et une cinquantaine de mètres. Les températures y dépendent de facteurs climatiques. Pour être comparables, il faudrait que les mesures puissent être faites à la même heure, à la même profondeur et le même jour, ce qui n'est pas réaliste.

14. Analyse en composantes principales (A.C.P) :

L'A.C.P est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en ligne par des « individus » (Puits, sources, lacs, ...) sur les quels sont mesurées des « variables quantitatives » (CE , teneurs en Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--} et NO_3^-) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières.

14.1. Principe :

Dans un tableau comportant (p) variable quantitatives, les individus peuvent être représentés dans un « espace à P dimensions ». Pour des raisons de visualisation, les espaces retenus sont à une dimension (droite) ou et ce sera le cas le plus fréquent, à deux dimensions (plans). Les droites et les issus d'une A.C.P, ne sont pas réalisées avec les variables initiales mais avec des « indices synthétiques » obtenus par combinaisons linéaires de ces variables initiales. Parmi tous les indices possibles, l'A.C.P recherche d'abord celui qui permet de voir au mieux les individus c'est-à-dire pour lequel la variance des individus est maximale. Cet indice est appelé première composante principale, ou encore premier axe principal. Une certaine proportion de la variation totale des individus est expliquée par cette composante principale. Ensuite une deuxième composante est recherchée, cette deuxième composante principale fournit la plus grande information possible complémentaire de la première. Le processus se déroule jusqu'à l'obtention de la dernière composante principale. Si la variable ou un individu joue un rôle particulier, on l'introduit dans l'A.C.P « variable à expliquer » ou « variable supplémentaire » (ne participe pas à la construction des axes).

14.2. Résultats et interprétations :

Pour observer les individus, on construit les plans à partir des composantes principales les plus importantes et c'est le plan engendré par les axes 1 et 2, car par définition c'est le plan sur le quel le maximum d'information est visible. On examinera d'autres plans, selon la part d'information prise en compte par ces derniers. Les résultats de l'A.C.P sont influencés par l'ordre de grandeur des variables. Ainsi pour y remédier à cet inconvénient, il est recommandé de donner le même poids aux différentes variables en les réduisant. On réalise ainsi l'A.C.P soit sur des données centrées (variable de même nature) à partir de la « matrice des variances – covariances » entre variables, soit sur des données centrées réduites c'est-à-dire des variables de différentes natures « matrice de corrélation ».

Après l'élaboration des matrices des corrélations et de variances – covariance, il s'ensuit une diagonalisation basée sur :

- ❖ Une matrice de « vecteurs propres » qui contiennent des combinaisons linéaires des (P) variables initiales actives ;

- ❖ Une matrice de « valeurs propres » qui représentent les variances des individus sur les axes principaux correspondants.

Pour un axe donné, les variables qui ont les plus forts coefficients (en valeurs absolues) sont celles qui contribuent le plus à la formation de cet axe. Une variable est d'autant mieux représentée sur le plan qu'elle est proche du cercle. Le choix du nombre de composantes est exprimé en fonction des « valeurs propres » ou « les pourcentages de variation expliqués par chaque composante principale ».

Sur chaque plan retenu, on regarde :

- ❖ La structure des variables à partir de leurs corrélations avec les axes principaux, représentés par des « cercles de corrélations » ;
- ❖ La répartition des individus, à partir de leurs coordonnées sur les axes principaux et d'indices ;

14.3. Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux de la nappe libre de Oued Souf :

L'analyse effectuée est une A.C.P centrée réduite qui a été réalisée sur un tableau de données à 9 variables (Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- , CE et PH) et à 72 échantillons prélevé aux niveau de trois compagnes (Mai 1995, Mars 1998 et Juin 2007). L'interprétation de l'analyse se fera selon l'ordre des informations données par le logiciel STATISTICA. Les résultats de cette A.C.P sont représentés en annexe....

14.3.1. Matrice de corrélation :

Le tableau N°19 présent les différentes corrélations entre les variables deux à deux.

$\text{Na}^+ - \text{Mg}^{++}$: $r = 0.862$, $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$: $r = 0.985$, $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{--}$: $r = 0.809$,
 $\text{Mg}^{++} - \text{Cl}^-$: $r = 0.853$, $\text{Mg}^{++} - \text{SO}_4^{--}$: $r = 0.749$, $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{--}$: $r = 0.750$.

Tableau N°19 : Matrice de corrélation des paramètres chimiques.

	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}	K^+	Cl^-	SO_4^{--}	HCO_3^-	NO_3^-	CE	PH
Na^+	1.000									
Mg^{++}	0,862	1,000								
Ca^{++}	-0,097	-0,405	1,000							
K^+	0,875	0,748	-0,139	1,000						
Cl^-	0,985	0,853	-0,087	0,878	1,000					
SO_4^{--}	0,809	0,749	0,175	0,632	0,750	1,000				
HCO_3^-	-0,025	0,158	-0,562	0,156	0,011	-0,287	1,000			
NO_3^-	0,204	0,309	-0,174	0,071	0,212	0,220	-0,149	1,000		
CE	-0,063	-0,102	0,114	-0,079	-0,065	-0,038	-0,084	-0,026	1,000	
PH	0,044	0,041	0,311	-0,182	0,024	0,248	-0,539	0,094	0,043	1,000

14.3.2. Etude des variables et des individus :

Le traitement a été poussé jusqu'à 4 facteurs. A ce stade 85.92 % de la variance ont été exprimés. Les résultats sont résumés dans le tableau N°20 :

Tableau N°20 : Pourcentage de variance exprimée.

Facteur	Valeurs Propres	% Total Variance	Cumul Val Propres	Cumul % variance
1	4,3634	43,63	4,36	43,6337
2	2,1465	21,46	6,51	65,0986
3	1,1123	11,12	7,62	76,2219
4	0,97	9,70	8,59	85,9221

La projection des variables et des individus a été effectuée sur 4 axes.

14.4.1. Projection sur le plan I–II : montre l'existence de deux groupes (Figure.105 A, B) :

- Le premier se développe sur l'axe I (43.63 % de la variance) il représente le pôle des évaporites avec une relation positive entre les Cl^- , Na^+ , Mg^{++} , K^+ , SO_4^{--} . La projection des individus montre que cet axe explique surtout les puits et les piézomètres (P36, P3 et H03).
- Le deuxième se positionne sur l'axe II (21.46 % de la variance) il représente les valeurs élevées de PH (milieu basique), et la relation inverse entre les bicarbonates et le calcium. Cette relation apparaît au niveau de piézomètre P22.

14.4.2. Projection sur le plan III-IV : montre l'existence de deux groupes (Figure.105 C, D) :

- Le premier groupe se présente sur l'axe III (11.12 % de la variance) il indique la variation des nitrates. La projection des individus montre cette tendance vers le puits H63.
- Le deuxième groupe apparaît sur l'axe IV (9.7 % de la variance) il montre les fortes valeurs de la conductivité qui concerne le piézomètre P22 en relation avec le sens d'écoulement.

15. Qualité chimique des eaux :

La qualité chimique des eaux a été déterminée en utilisant d'une part les normes fixées par l'organisation mondiale de la santé (O.M.S) et d'autre part par le degré hydrométrique.

15.1. Potabilité des eaux :

Afin de définir la potabilité des eaux souterraines, nous allons nous baser sur deux types de normes. Ceux de l'O.M.S et ceux basé sur le D.H.T.

15.1.1. Selon l'O.M.S :

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales (Tableau N°21) qui traduisent les limites de potabilité. On distingue :

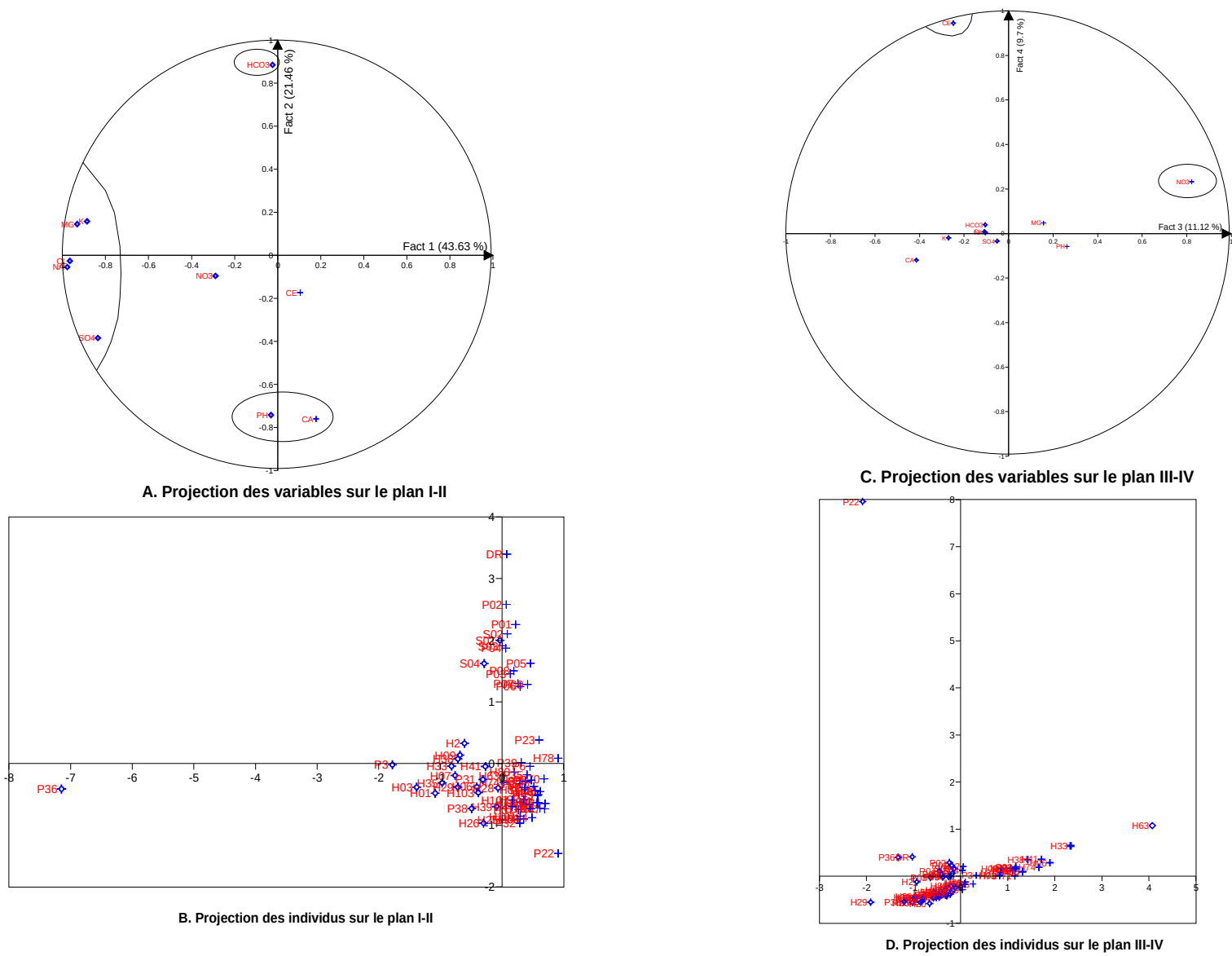


Figure. 105 : ACP des analyses chimiques de la nappe phréatique de Oued Souf

- Une concentration maximale acceptable à partir de la quelle une eau provoque une certaine réticence chez le consommateur ;
- Une concentration maximale admissible qui correspond à la quantité maximale de substance à tolérer et dont la teneur supérieure peut être dangereuse à la santé.

Tableau N°21 : Normes de potabilité de l'O.M.S

Eléments chimiques	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration maximale admissible (mg/l)	Pourcentage des échantillons ayant une concentration inférieure à la concentration maximale admissible	
			Mai 1995	Mars 1998
Calcium	75	200	00	38.23
Magnésium	50	150	53.85	5.88
Sodium	150	250	30.77	29.41
Sulfates	200	500	00	00
Chlorures	200	400	30.77	23.53
Nitrates	50	100	100	52.94

L'examen du tableau N°21 montre que tous les échantillons ont des teneurs en SO_4^{2-} (Mai 1995 – Mars 1998) et Ca^{++} (Mai 1995) supérieures aux normes maximales admissibles. Pour les chlorures et le sodium, 23% à 30% des eaux ont des teneurs inférieures aux normes avec presque le même pourcentage de ces éléments pour chaque campagne. La concentration maximale admissible pour le magnésium est dépassée de 46.15% des eaux analysées (Mai 1995) et 94.12% (Mars 1998). Les nitrates ont dépassées les normes avec un pourcentage de 47.06 (Mars 1998) cependant, pour la campagne de Mai 1995 elles restent tous inférieures aux normes maximales admissibles.

15.1.2. Normes selon le degré hydrométrique total (D.H.T) :

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

$$\text{DHT} = r \text{ Ca}^{++} + r \text{ Mg}^{++} \text{ (en méq/l)}.$$

$$\text{DHT} = (r \text{ Ca}^{++} + r \text{ Mg}^{++}) * 5 \text{ (en degré Français } ^\circ\text{F)}.$$

Tableau N°22 : Dureté des eaux en °F (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)

D.H.T (en °F)		0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Qualification de l'eau		Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
Pourcentage des points	Mai 1995	0	0	0	0	100
	Mars 1998	0	0	0	0	100

Le tableau N°22 montre que la totalité des eaux analysées (100%) sont très dures, dont le D.T.H est supérieur à 54 °F. Cette dureté a des conséquences plus ou moins néfastes telle que la consommation excessive du savon et la mauvaise cuisson des légumes secs et le goût inacceptable, ce qui oblige les citoyens à acheter l'eau à des propriétaires. Nous pouvons dire sans doute que les eaux souterraines de la nappe libre de l'Oued Souf sont de qualité chimique médiocre à mauvaise et donc impropre à la consommation.

16. Aptitudes des eaux à l'irrigation :

Par sa qualité bactériologique l'eau souterraine doit être destinée prioritairement à l'AEP malheureusement ce n'est pas le cas pour la nappe libre de l'Oued Souf à cause de sa qualité impropre. Les gens de la région exploitent la nappe anarchiquement pour l'irrigation des ghouts. Afin d'estimer l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Pour cela nous utilisons plusieurs méthodes à fin de les classer.

16.1. La salinité :

Selon R. S. AYERS et D. W. WESTCOT (1988) quant les eaux d'irrigation sont chargées en sel, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture, mais pour l'Oued Souf le terrain est sableux caractérisé par une forte infiltration ce qui ne donne pas le temps aux sels de s'épaissir.

16.2. Eaux peu salées :

Les eaux peu salées dont la conductivité électrique est inférieure à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ont une forte tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol ce qui entraîne la dispersion des particules plus (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988) et l'obturation des espaces poreux.

La valeur minimale de la conductivité des eaux de la nappe est supérieure à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, donc ce problème ne se pose pas.

16.3. Eaux à forte teneur en sodium :

L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et une destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins

trois fois supérieure à celle du calcium (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988) dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R) pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le S.A.R est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaisons avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l}$$

- Classification de Richards :

Le tableau N°23 Récapitule les résultats obtenus après interprétation de diagramme de Richards (Figure.106).

Tableau N°23 : Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.

Classes		% des points d'eau	
		Mai 1995	Mars 1998
Admissible	S ₁ C ₃	2.04	2.94
	S ₂ C ₃	00	2.94
Médiocre	S ₁ C ₄	32.65	26.47
	S ₂ C ₄	10.20	14.70
Hors classes	-	55.11	52.95

Pour les deux campagnes Mai 1995 et Mars 1998 deux classes apparaissent (admissible et médiocre), chaque classe présente ses propres caractéristiques.

- **Admissible (S₁ C₃, S₂ C₃)** : en général, l'eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
- **Médiocre (S₁ C₄, S₂ C₄)** : en général, l'eau est fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces (concombre, ...) bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

D'après le diagramme de Richards pour les deux campagnes (Mai 1995 et Mars 1998), le pourcentage des points d'eau hors classes est supérieur à ceux dans les classes ainsi le pourcentage dans la classe médiocre est beaucoup plus important par rapport à la classe admissible. Ces résultats nous ont permis de dire que les eaux de la nappe libre de Oued Souf sont salées.

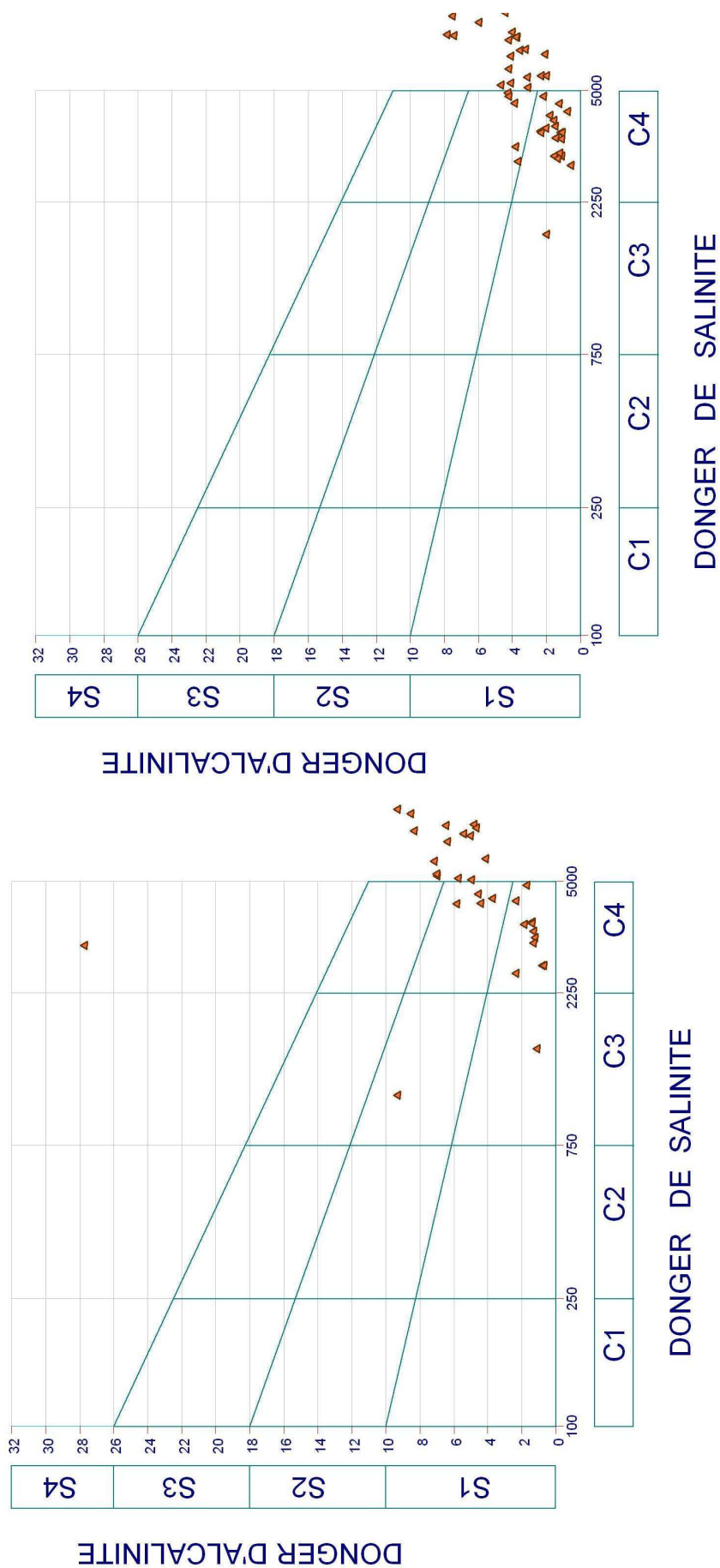


Figure. 106 : Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R

CHAPITRE VIII

Etude de la pollution dans la zone du rejet

1. Introduction :

Les rejets d'eaux usées urbaines sont liés aux rejets des agglomérations par les réseaux d'assainissements, ces apports sont caractérisés par de fortes teneurs en ammonium, en phosphates, et autres. Des analyses chimiques ont été réalisées sur les rejets qui se déversent directement dans le sol sableux.

Les résultats obtenus montrent que les eaux sont riches en éléments organiques tel que NH_4^+ , PO_4^- et la DBO_5 , ceci est dû à l'utilisation des produits détergents, aux déchets humains (urines).

Ces rejets détériorent la qualité des eaux souterraine par leur infiltration.

2. Méthodes et stratégie de travail :**2.1. Stratégie :**

Les études doivent obéir à des objectifs précis. C'est là la seule manière d'obtenir des résultats univoques. Une étude de la pollution d'un cours d'eau ou d'une nappe souterraine n'est bien adaptée, au niveau du choix des stations, de la période et de la méthode, que si les paramètres à mesurer et les exigences à remplir sont connus par avance.

Ce principe vaut pour tous les types de recherche et pas seulement pour les analyses physico-chimiques.

Il faut s'appuyer sur les questions concrètes pour mettre au point une stratégie permettant d'améliorer l'état des cours d'eau ou des nappes :

1. Y a-t-il un problème ?
2. De quelle nature ? (dommages et effets écologiques)
3. Comment le cerner ?
4. Quelle approche utiliser ?

Pour répondre à des telles questions, fournir des résultats reproductibles et mettre en évidence les besoins d'assainissement, les études doivent comprendre les étapes suivantes :

1. Délimitation de régions ou de systèmes d'étude définis ;
2. Choix des paramètres à mesurer, pour mettre en évidence les modifications induites par les activités humaines ;
3. Définition des méthodes d'études, normalisation des méthodes d'analyses ;
4. Elaboration des critères d'appréciation, pour interpréter les données recueillies et pour mettre les déficits en évidence ;
5. Analyse des déficits pour les reconnaître, en déterminer les causes et apprécier l'efficacité des mesures possibles ;
6. Information simple et connaissante des décideurs et du public, pour faire avancer la cause de la protection des eaux au sens large du terme ;

2.2. Prélèvements

Ils sont effectués selon une répartition spatio-temporelle de telle sorte à entourer le rejet et mettre en évidence le sens et l'arrivée de la pollution

Les échantillons sont collectés quatre points réparties tout le long de la zone du rejet (Figure.107) .

Les eaux de la nappe libre sont échantillonnées dans neuf puits, deux puits vers le Sud, un vers l'Est et six vers le Nord.

Les eaux de drainages sont échantillonnées à la sortie du réseau avant qu'elles ne soient mélangées avec les eaux usées.

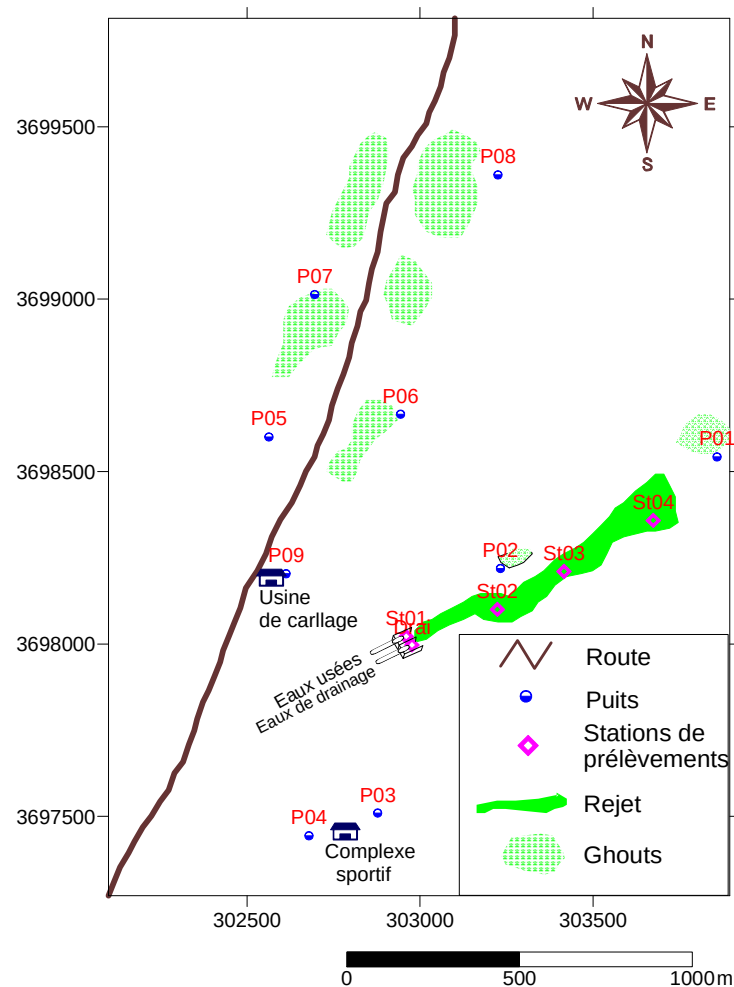


Figure. 107 : Carte de situation des points des prélèvements

2.3. Mesures in situ :

Trois paramètres physico-chimiques (pH, Salinité et conductivité) sont mesurés in situ immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un appareil multiparamètre.

2.4. Analyse des éléments chimiques :

Une analyse des éléments chimiques a été effectuée pour cette étude. Les éléments majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} et HCO_3^-) et les sels nutritifs (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , et PO_4^{--}).

2.5. Les paramètres de potabilité ou de pollution organique :

La demande biochimique en oxygène (DBO₅) et la matière en suspension (MES).

3. Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ) :

Il s'agit des paramètres facilement mesurables et utiles pour la détermination de l'état chimique des polluants dans l'eau.

3.1. Le potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Plusieurs paramètres peuvent influencer le pH tels que la température et les phénomènes biologiques (photosynthèse et dégradation de la matière organique). La solubilité du CO₂ diminue lorsque la température augmente de sorte que le pH s'élève dans le même temps.

A l'inverse la solubilité du CO₂ augmente lorsque la température diminue, ce qui conduit à une baisse du pH. Les déversements des eaux usées se traduisent le plus souvent par une baisse de pH, puisque la matière organique présente favorise l'activité microbienne et augmente la production du CO₂. La nitrification de l'ammonium agit dans le même sens.

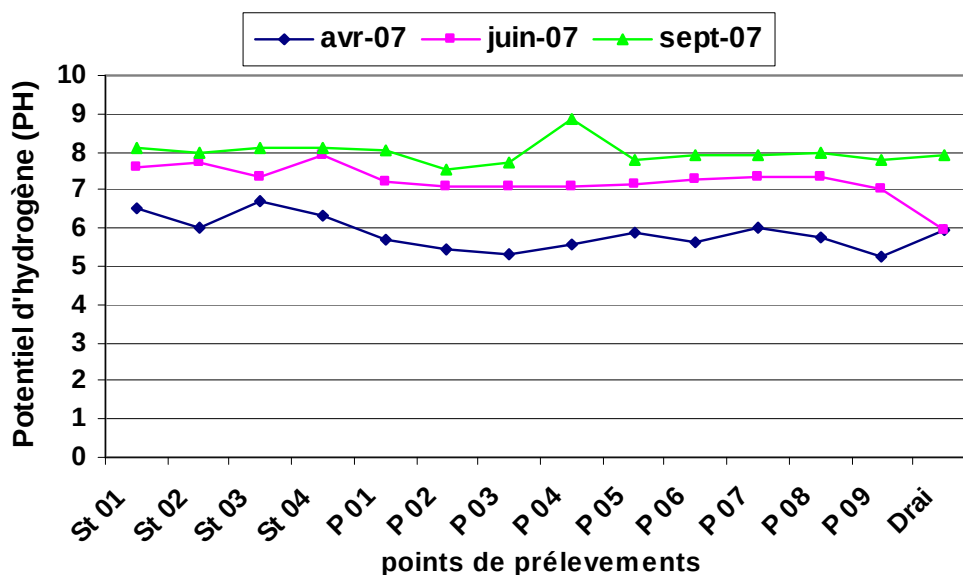


Figure. 108 : Diagramme de la variation de pH pour les trois campagnes (Oued Souf).

D'après le diagramme de variation du pH (Figure.108) on remarque une grande variabilité dans les valeurs de pH (5.5 à 9) indiquant une forte pollution de ces eaux par les rejets. Le diagramme montre clairement une augmentation du pH d'une campagne à l'autre, cela est dû à l'augmentation de la température qui diminue la solubilité du CO₂. Les eaux usées présentent toujours les valeurs les plus élevées dû au contact direct avec l'air et aux fortes concentrations en ammonium. Les eaux des puits et de drainage présentent le plus souvent les valeurs les plus faibles à cause de la couverture sableuse qui isole de l'air.

3.2. Conductivité électrique :

Bon indicateur pour la teneur en sels dissous, la conductivité électrique est facile à mesurer. Elle dépend avant tout de la nature géochimique des formations aquifère en particulier les substances rendues solubles par l'altération des roches. La conductivité électrique est fonction pour l'essentiel, de la dureté de l'eau (Calcium, Magnésium et Bicarbonates). Parmi les sels libérés dans les eaux par l'activité humaines. Il faut retenir d'abord des nutriments, comme les nitrates, les nitrites, l'ammonium et les phosphates et de l'utilisation de précipitants dans les stations d'épurations (Sodium, chlorures).

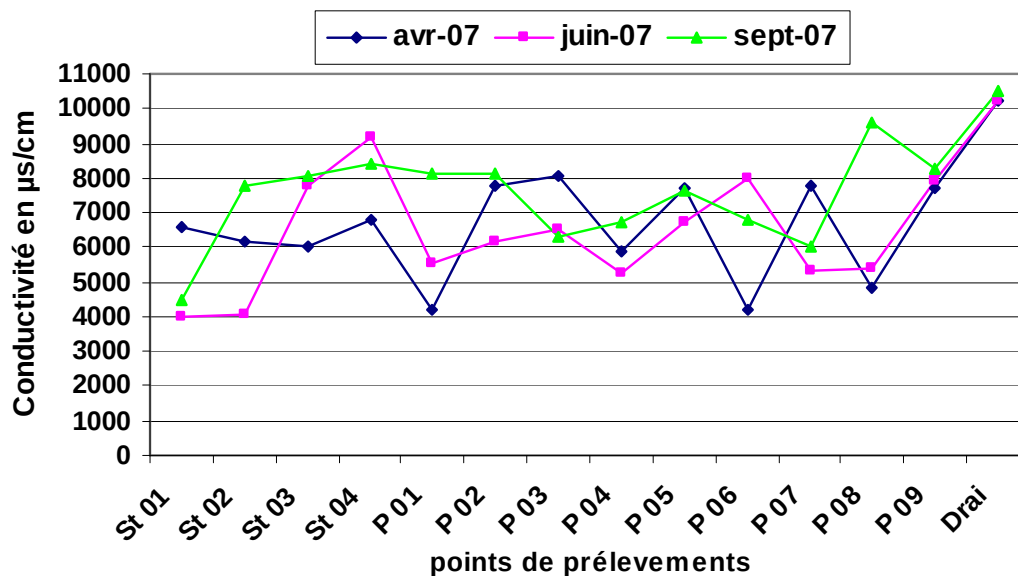


Figure. 109 : Diagramme de la variation de la conductivité électrique pour les trois campagnes (Oued Souf)

Le diagramme montre une grande hétérogénéité d'une campagne à l'autre, et pour la même campagne avec des valeurs élevées (4000 à 10530 $\mu\text{S/cm}$) dues pour les eaux usées aux fortes concentrations de sels nutritifs (ammonium, phosphates et nitrites), au mélange avec les eaux de drainage qui ont des conductivités très élevées dues à la présence de passages gypseux et la relation de ces eaux avec les nappes profondes (CT et CI) suite aux pompages des eaux de ces deux nappes (forages) pour l'alimentation en eau potable, et qui se rejettent directement dans la nappe libre à cause de l'absence d'un réseau d'assainissement. Pour les puits (eaux souterraines), les fortes valeurs dues à la présence des formations gypseuses, à la dureté de l'eau, à la forte évaporation et à la relation qui peut exister entre le rejet et les puits avoisinant.

3.3. La salinité :

La salinité est proportionnelle à la conductivité c'est pour cette raison le diagramme de la variation de la salinité présente la même allure que celle de la conductivité.

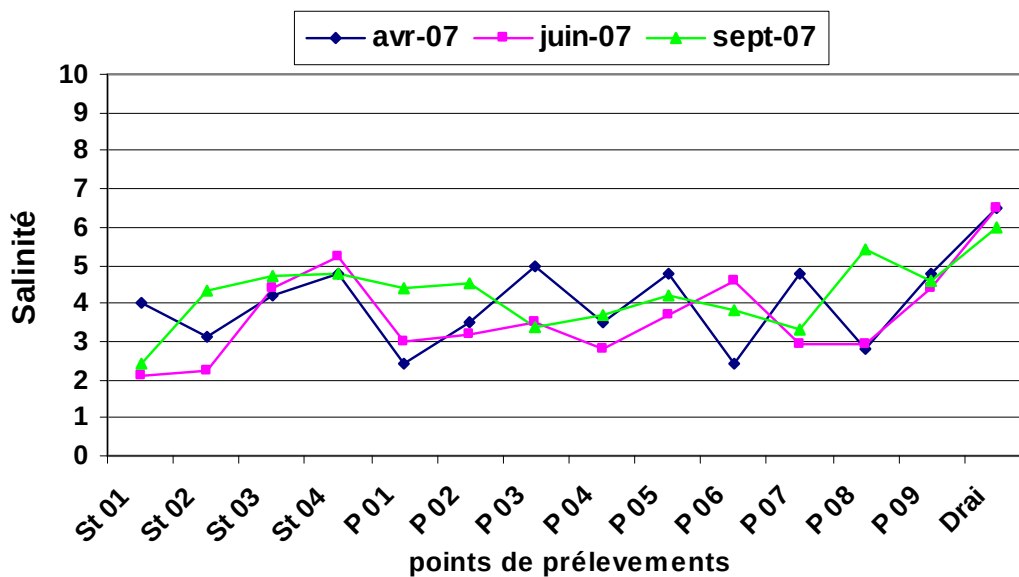


Figure. 110 : Diagramme de la variation de la salinité pour les trois campagnes (Oued Souf)

4. Les éléments de la pollution :

4.1. Les éléments majeurs :

4.1.1. Calcium (Ca^{++}) : la présence des ions Ca^{++} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : Soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4).

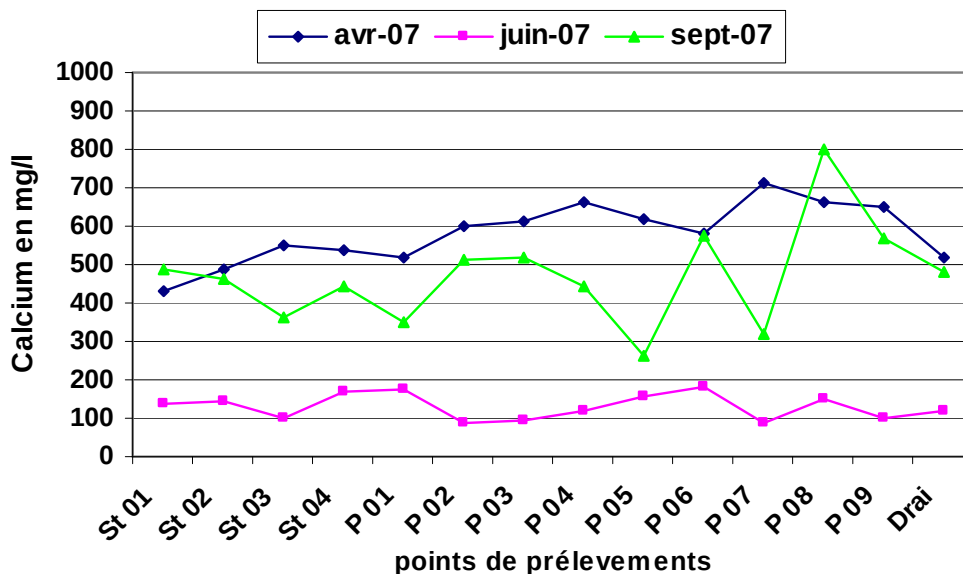
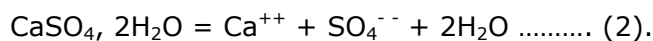
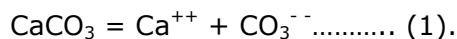


Figure. 111 : Diagramme de la variation de la concentration du calcium pour les trois périodes (Oued Souf).

Le diagramme montre que tous les points de prélèvements présentent des concentrations supérieures à la norme de potabilité des eaux sauf les puits P02, P03 et P07

pour la campagne de Juin 2007. Il montre aussi que la campagne d'Avril 2007 présente les fortes concentrations dues à la présence de gypses dans l'aquifère. Les fortes concentrations dans les eaux usées sont liées au mélange des eaux de drainage avec les eaux usées.

4.1.2. Magnésium (Mg^{++}) : Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).

Magnésite : $MgCO_3 = Mg^{++} + CO_3^{--}$ (3).

Dolomite : $CaMg(CO_3)_2 = Ca^{++} + Mg^{++} + 2CO_3^{--}$ (4).

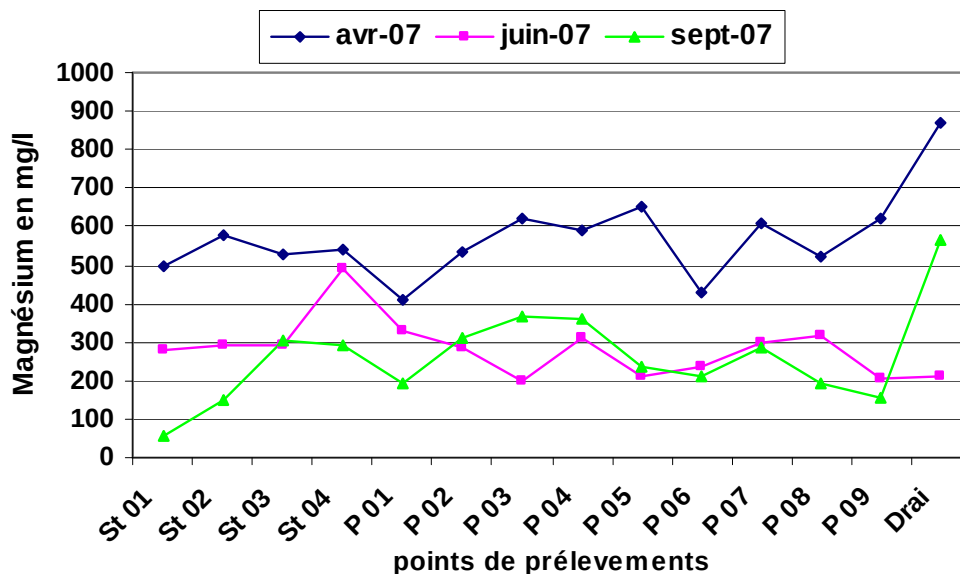


Figure. 112 : Diagramme de la variation de la concentration du magnésium pour les trois campagnes (Oued Souf).

L'évolution des teneurs est identique à celle du calcium dont l'origine provient des formations évaporitiques. Tous les points de prélèvements présentent des concentrations en Mg^{++} supérieures aux normes de potabilité.

4.1.3. Chlorure (Cl^-) et Sodium (Na^+) : L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



La présence de ces deux éléments dans les eaux usées est liée à des activités humaines (utilisation de précipitants dans les stations d'épuration), et aux eaux de drainage déversées dans le rejet. Au niveau de la nappe l'existence de ces deux éléments est liée à la dissolution des formations évaporitiques ou à l'influence du rejet qui peut contaminer la nappe.

Les teneurs naturelles en chlorures présentent des valeurs importantes à celle du sodium, à cause des caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes

de précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui est très mobile. Le diagramme montre une grande variabilité dans les teneurs des chlorures soit d'une campagne à l'autre, soit dans la même campagne.

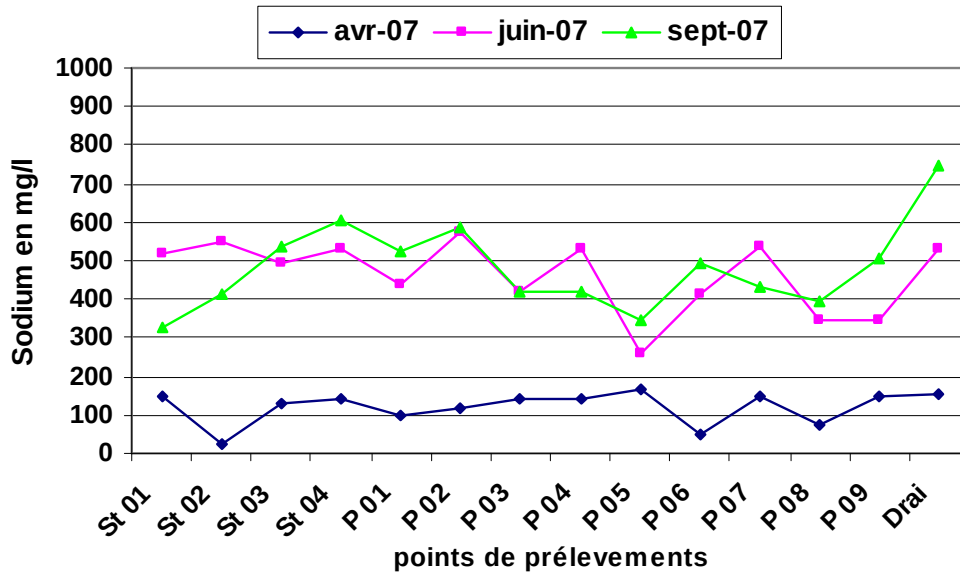


Figure. 113 : Diagramme de la variation de la concentration du sodium pour les trois campagnes (Oued Souf).

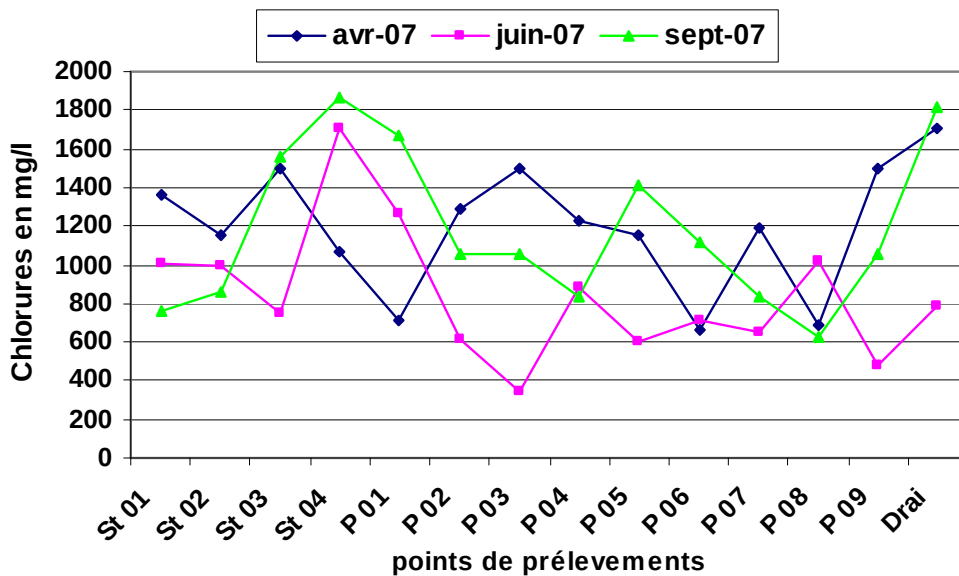


Figure. 114 : Diagramme de la variation des concentrations des chlorures pour les trois campagnes (Oued Souf).

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

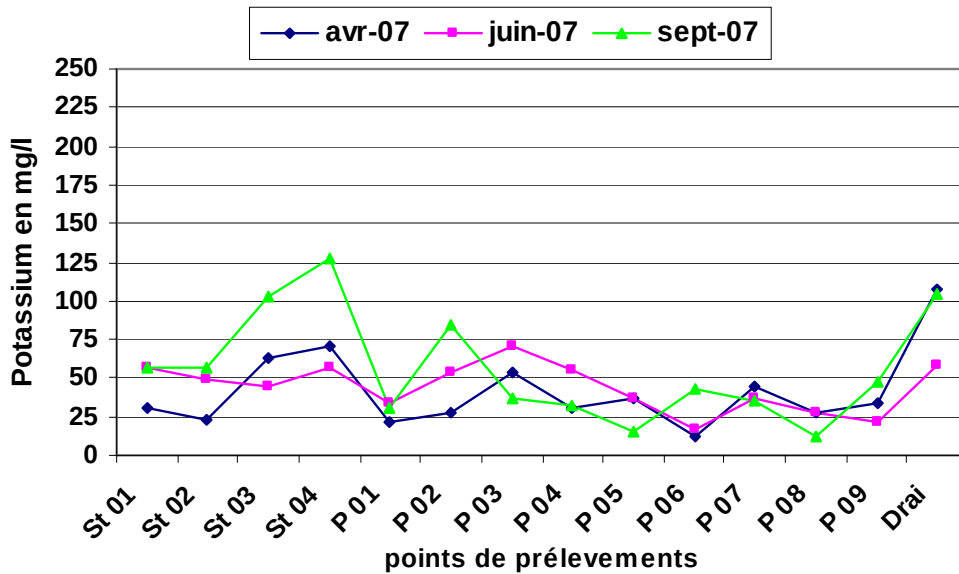


Figure. 115 : Diagramme de la variation de la concentration de potassium pour les trois campagnes (Oued Souf).

Le diagramme présente des valeurs importantes en K^+ en générale variées entre 25 et 75 mg/l, donc la majorité des points de prélèvements ont des teneurs supérieures aux normes. La présence de cet élément dans les eaux usées est naturelle, mais dans les eaux de la nappe leur présence est liée soit à la présence des argiles potassiques, soit à l'utilisation des engrais NPK, soit à l'influence du rejet.

4.1.5. Sulfates (SO_4^{--}) : La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses selon la relation (2).

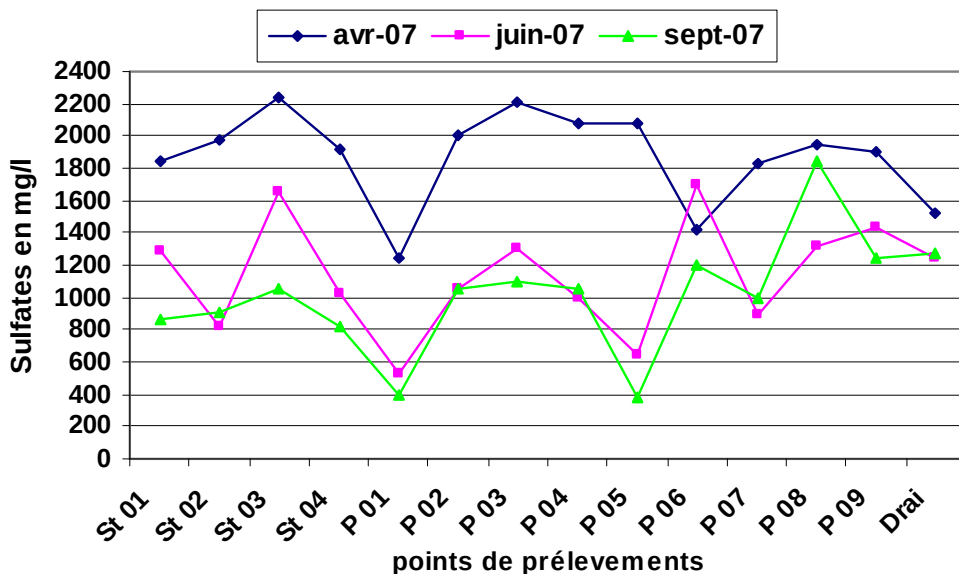


Figure. 116 : Diagramme de la variation des concentrations des sulfates pour les trois campagnes (Oued Souf).

Les sulfates présentent des fortes concentrations atteignant les 2210 mg/l. Ces fortes teneurs liées aux fortes dissolutions des formations évaporitiques soit dans la nappe libre, soit dans la nappe du complexe terminal.

4.1.6. Bicarbonates (HCO_3^-) : La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaze carbonique. La somme des équations de dissolution est donnée comme suit :

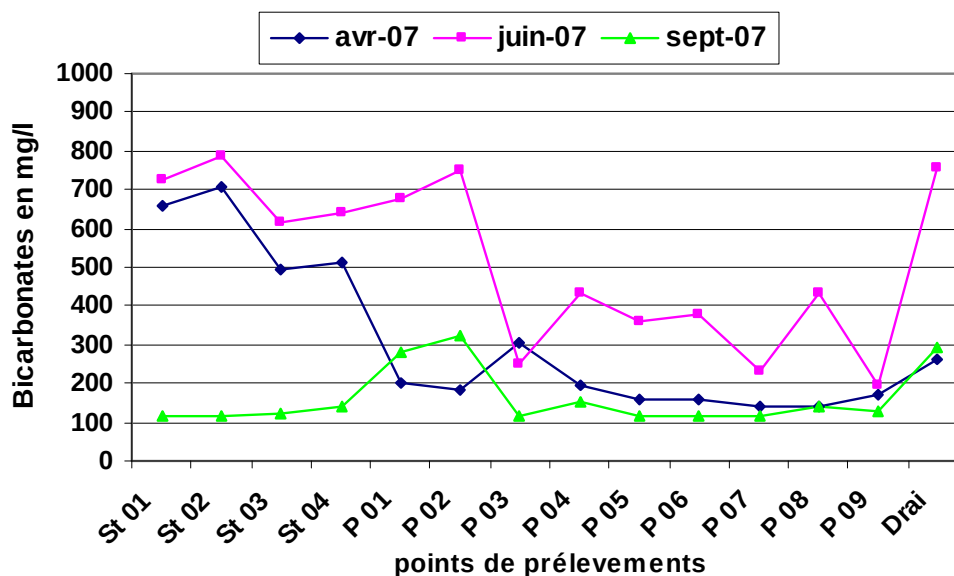
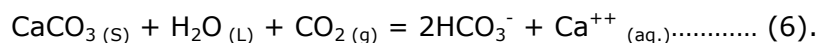


Figure. 117 : Diagramme de la variation des concentrations des bicarbonates pour les trois campagnes (Oued Souf).

Les valeurs des bicarbonates sont en générale dans les normes, sauf dans les eaux usées et les eaux de drainage. Les fortes concentrations viennent des deux nappes profondes (CT et CI) suite au pompage des eaux de ces dernières pour l'AEP et l'irrigation. Ces eaux sont chargées en bicarbonates à cause de la forte dissolution des formations carbonatées qui forment le réservoir du continental intercalaire. Ces eaux par la suite se déversent dans la nappe phréatique.

4.2. Cycle de l'azote: L'azote est présent au niveau de la zone des rejets sous trois formes chimiques (nitrates, nitrite et ammonium).

Le cycle de l'azote est caractérisé par trois réservoirs : azote organique (acides aminés, protéines...), azote minéral (NO_3^- ...) et composés gazeux (N_2 , NH_3 , N_2O ...) et est régi par des processus chimiques et biologiques permettant le passage d'une forme azotée à l'autre (Figure.118). Le transfère de la forme ammonium vers les nitrites et les nitrates se fait par oxydation, cette réaction est rapide en présence de l'oxygène. La forte teneur en CO_2 et la faible teneur en oxygène accroissent la concentration en ammonium dans l'eau.

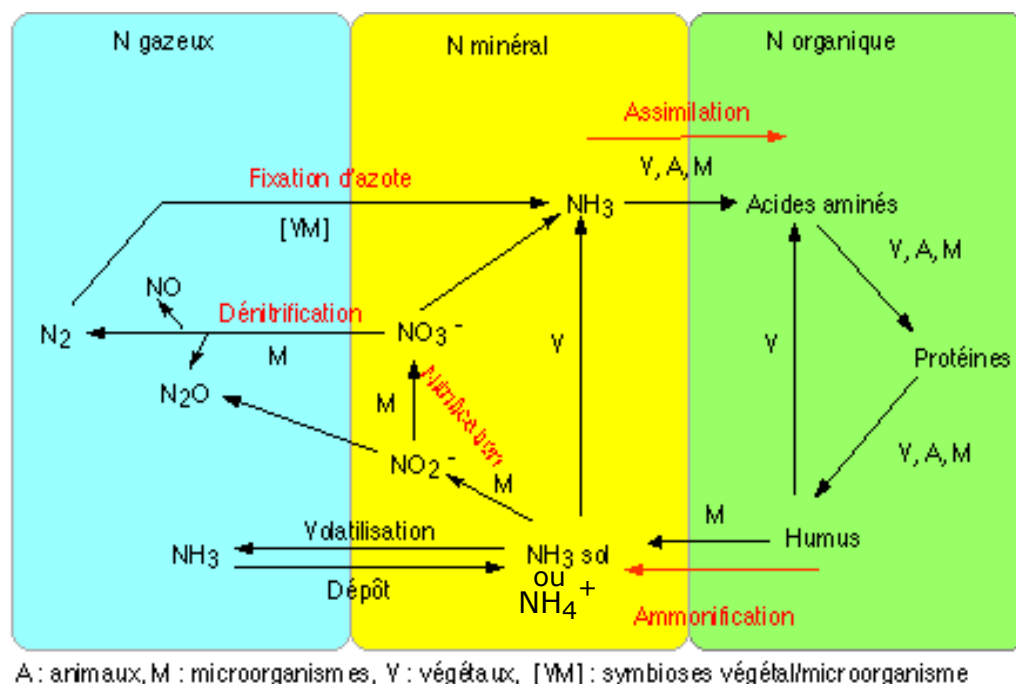


Figure. 118 : Cycle de l'azote

4.2.1. Ammonium NH_4^+ :

Les concentrations en ammonium fournissent des informations sur la pollution des eaux suite au déversement des eaux usées ménagères ou à l'érosion et au lessivage des sols agricoles.

L'ammonium n'est pas très stable au plan chimique entre le prélèvement et l'analyse en laboratoire, il faut compter avec une importante dégradation biologique durant le transport ; cette transformation est particulièrement sensible pour de faibles concentrations. Il faut alors garantir une réfrigération appropriée de l'échantillon lors du prélèvement et du transport.

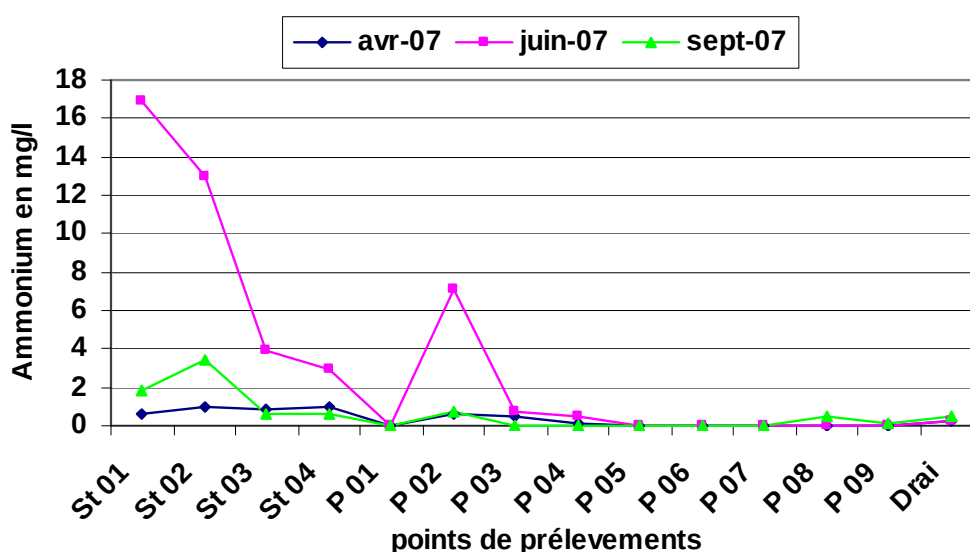


Figure. 119 : Diagramme de la variation de la concentration de l'ammonium pour les trois campagnes (Oued Souf).

L'allure des courbes de variation de l'ammonium montre que les valeurs les plus élevées sont marquées dans le rejet avec des valeurs qui atteignent 16.9 mg/l à la station 1 (juin 2007). Le puits P02 présente des concentrations supérieures aux normes atteignent les 7 mg/l (Juin 2007) à cause de sa position proche du rejet. Les puits P03 et P04 localisés au Sud du rejet présentent des concentrations parfois supérieures aux normes ceci s'explique soit par la réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) ou par contamination par les eaux rejet. Ce phénomène de réduction est observé au niveau de puits P08 avec une concentration de 0.5 mg/l. Les eaux de drainage présentent des concentrations inférieures aux normes.

4.2.2. Nitrites NO_2^- :

Les nitrites sont instables au plan biochimique. Entre le remplissage des flacons et l'analyse au laboratoire, il faut compter avec une importante dégradation biologique durant le transport. En présence de fortes concentrations en ammonium dans l'échantillons, les nitrites peuvent également apparaître par nitrification, c'est la raison pour la quelle les échantillons devrait être réfrigérés ($< 4^\circ\text{C}$) et analysés rapidement après prélèvement. Les nitrites sont très toxiques pour la faune. Des concentrations élevées en nitrites peuvent être observées par suite de la transformation biologique de l'ammonium en nitrates ou, en condition anaérobies lors de la dénitrification des nitrates en NO_2^- ou N_2 gazeux.

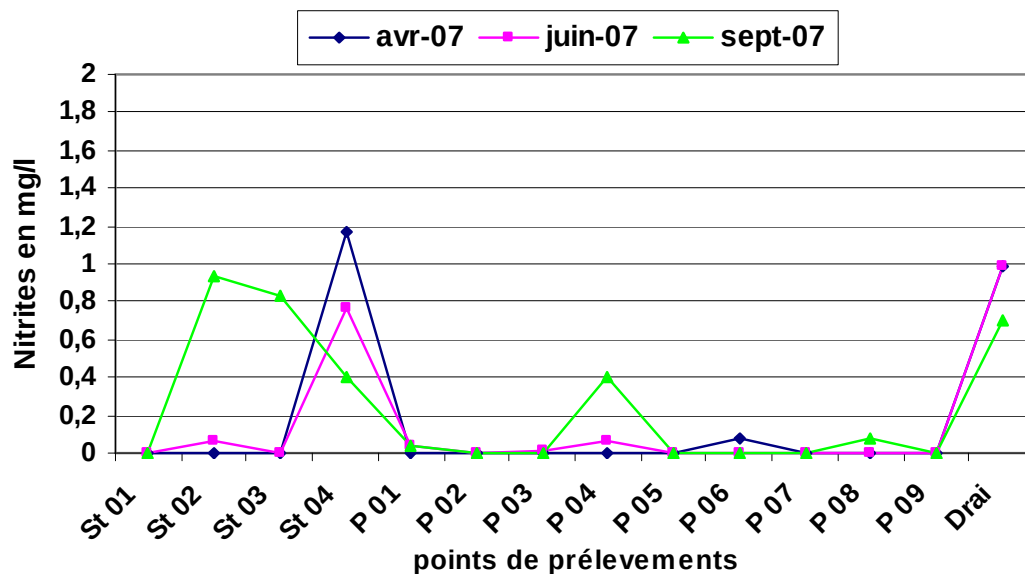


Figure. 120 : Diagramme de la variation des concentrations des nitrites pour les trois campagnes (Oued Souf)

Le diagramme montre que les valeurs les plus élevées et qui sont supérieures aux normes enregistrées dans le rejet. Elles sont dues à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium. Par contre au niveau des eaux de drainage et au puits P04, les fortes valeurs sont liée à la réduction de la forme nitrate.

4.2.3. Nitrates NO_3^- :

Représente la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Pour le cas où l'oxygène vient à manquer, les nitrates agissent néanmoins comme des accepteurs d'électrons (oxydants) et forment des composés réduits d'azotes qui eux sont toxiques : nitrites et ammonium.

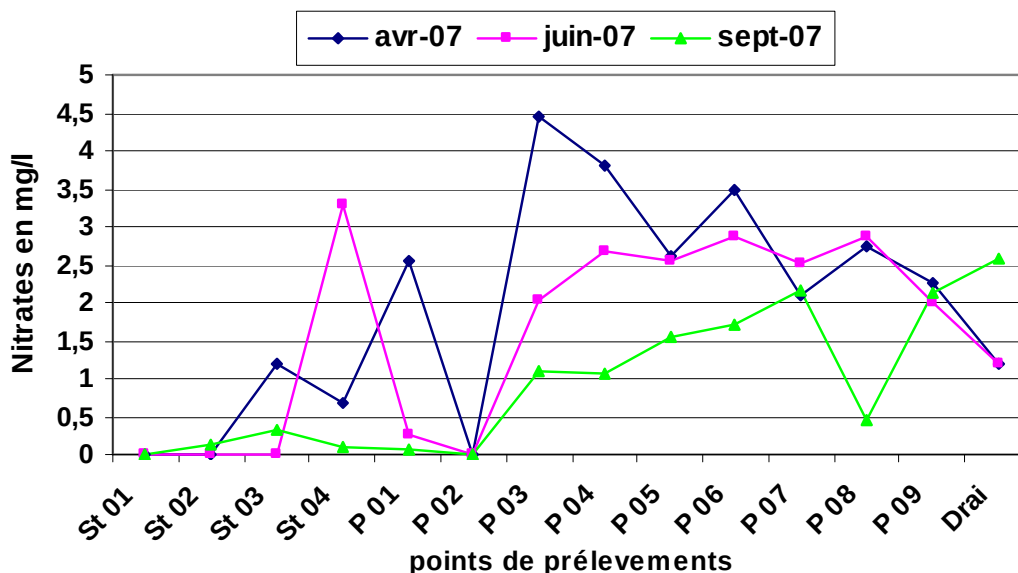


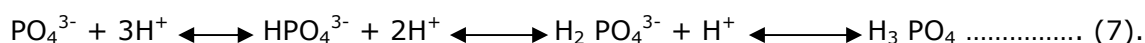
Figure. 121 : Diagramme de la variation des concentrations des nitrates pour les trois campagnes (Oued Souf)

La présence des nitrates dans les eaux de la nappe est liée à l'utilisation des engrais chimiques pour l'agriculture. La teneur maximale est enregistrée dans le puits P03 avec une valeur de l'ordre de 4.45 mg/l due à la transformation de l'ammonium en nitrates par nitrification. Cependant au niveau des eaux de rejet les concentrations sont très faibles sauf à la station 4 pour la campagne de Juin 2007 avec une concentration de 3.3 mg/l, due à la transformation de l'ammonium en nitrate en présence de l'oxygène. En générale les teneurs de nitrates sont faibles et inférieures aux normes (50 mg/l).

4.3. Les éléments mineurs naturels :

4.3.1. Phosphates PO_4^{3-} :

Les phosphates peuvent se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO_3 , pyro $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ et ortho H_3PO_4 , en milieu aqueux, les formes méta et pyro tendant vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphates sont données par :



Le diagramme montre que seul les eaux de rejet présentent des concentrations en phosphates. La présence des phosphates dans les eaux est liée à l'effet des rejets urbains et à l'effet des eaux stagnantes.

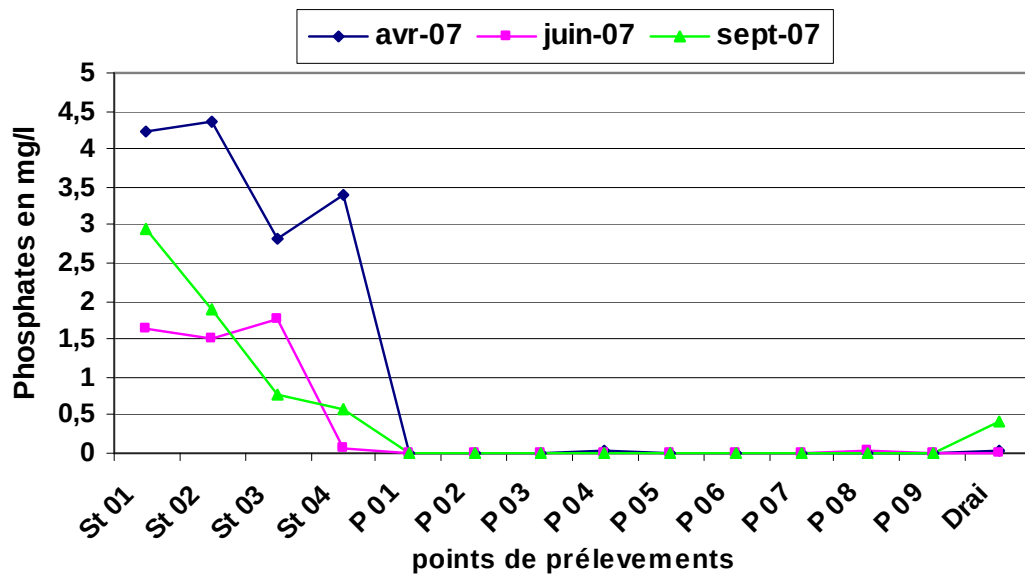


Figure. 122 : Diagramme de la variation des concentrations des phosphates pour les trois campagnes (Oued Souf)

4.4. Les paramètres de pollution organique :

4.4.1. Les matières en suspensions (MES) :

Elles représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenus par un filtre.

Les MES qui comportent des matières organiques et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution.

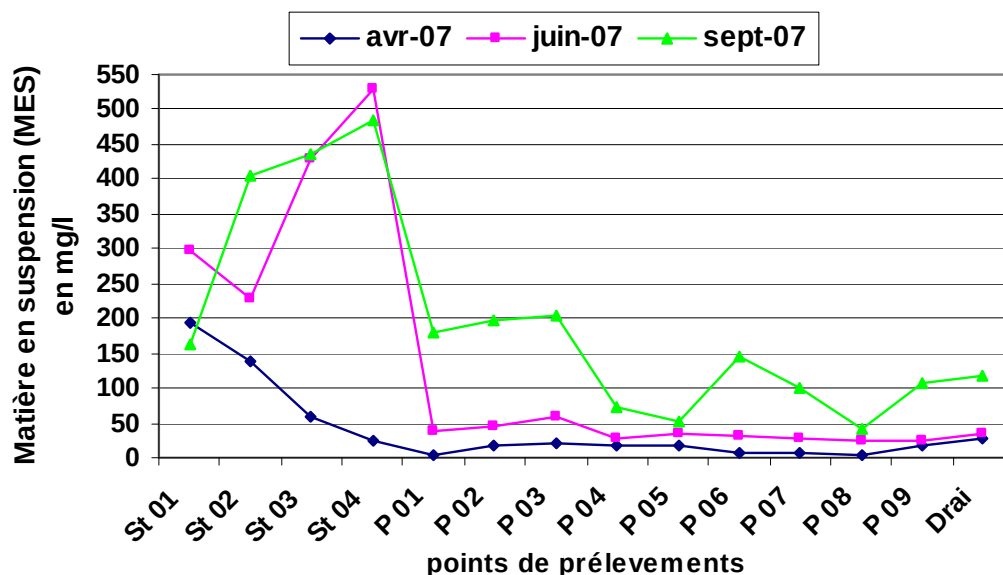


Figure. 123 : Diagramme de la variation des matières en suspensions pour les trois campagnes (Oued Souf)

D'après le diagramme on remarque que les quatre stations du rejet présentent des valeurs en MES plus importantes dues à la présence de la matière organique dans les rejets

urbains. Par contre les puits ont des valeurs faibles (< 100 mg/l) sauf les puits P01, P02, P03 et P05 qui présentent pour la campagne de Septembre 2007 des valeurs supérieures à 100 mg/l dues à la présence des matières minérale résultant de l'excès de pompages.

4.4.2. La demande biochimique en oxygène (DBO₅) :

La demande biochimique en oxygène mesure la consommation d'oxygène par les phénomènes de dégradation biologique durant une période donnée, par exemple 5 jours (DBO₅). Les substances consommant de l'oxygène comprennent en particulier : carbone organique, ammoniacale, nitrites, hydrogène sulfuré et d'autres composés réduits, soit avant tout des substances facilement dégradables.

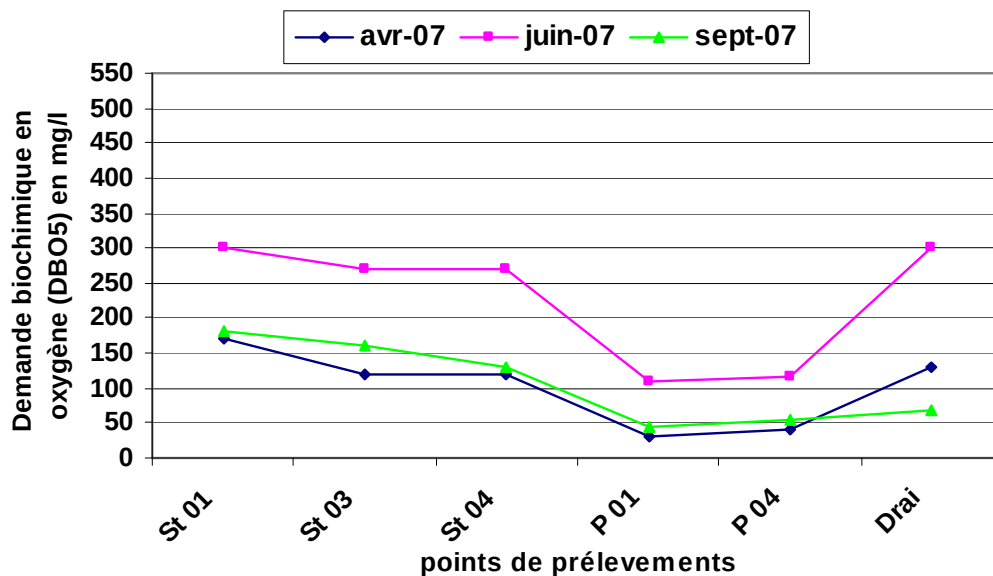


Figure. 124 : Diagramme de la variation de la demande biochimique en oxygène pour les trois campagnes (Oued Souf)

Le diagramme montre que les fortes valeurs du DBO₅ sont enregistrées dans les eaux usées avec des valeurs qui atteignent les 300 mg/l (station 01) à cause de la présence de l'oxygène et de la matière organique. Les eaux souterraines présentent des valeurs faibles dues au manque de l'oxygène et les substances consommant de l'oxygène.

5. Etablissement de la carte de l'indice de la pollution organique (IPO) :

L'établissement de la carte de pollution organique des eaux naturelles de la région de Oued Souf (la zone de rejet) nous renseigne sur la qualité et l'impact des rejets urbains sur les eaux de la nappe.

A l'aide du logiciel **Aquakit**, deux petits programmes Aquexmono et Aquexmulti établis à partir d'un tableur Excel permettent d'extraire les données d'Aquakit et de les présenter en graphiques pour faciliter les interprétations.

Les principales mesures physico-chimiques de chaque station sont reprises sur la feuille de synthèse. Elles peuvent être interprétées dans 3 groupes principaux.

5.1. La composition chimique globale.

Un graphique en secteurs reprend les concentrations des principaux ions exprimées en milliéquivalents/litre. Cette présentation permet de vérifier l'égalité entre la charge électrique totale des ions positifs et celle des ions négatifs.

5.2. Les indicateurs géologiques.

Les indicateurs géologiques sont des ions qui peuvent être libérés par les roches du sol ou du sous-sol et dont la présence est normale dans une eau de nappe. Ces ions sont repris dans un graphique de type " radar " qui permet de relier l'eau de la nappe à un profil caractéristique de la région où elle coule.

Il n'est cependant pas exclu que des quantités importantes de ces ions soient introduits dans l'eau de la nappe, par une pollution.

5.3. Les indicateurs de pollution organique.

Les indicateurs de pollution regroupent les phosphates et les ions dérivés de l'azote qui provoquent des pollutions organiques.

Un indice de pollution organique IPO, calculé à partir des concentrations de ces ions, permet de classer l'eau analysée sur une échelle à 5 niveaux de pollution. L'indice le plus élevé correspond à une pollution nulle ou très faible, représentée conventionnellement par une couleur bleue.

On inclut habituellement dans le calcul de l'IPO, la demande biologique en O₂ à 5 jours (DBO₅).

Toutefois, la mesure de ce paramètre n'est pas souvent effectuée à cause de la non disponibilité des appareils ou s'il y a un seul appareil elle ne se fait que pour six échantillons, et la feuille récapitulative ne l'utilise pas pour le graphique qui illustre le niveau de pollution. Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres et les classes pour la détermination de l'IPO.

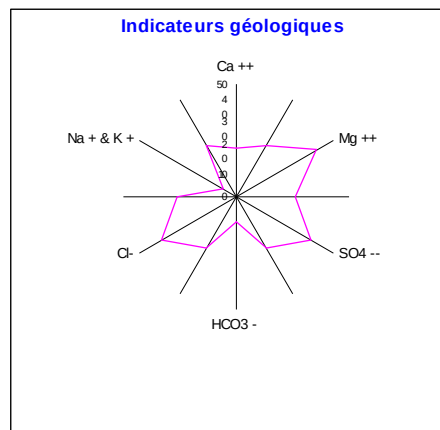
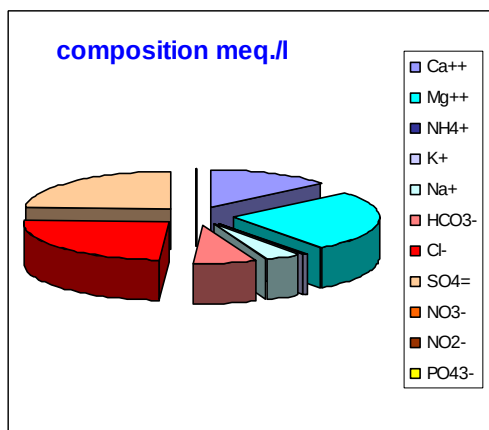
Tableau N°24 : paramètres et classes de l'IPO

Classe	NH ₄ ⁺ (mg N/l)	NO ₂ ⁻ (µg N/l)	PO ₄ ³⁻ (µg P/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	Couleur	IPO	Pollution organique
Classe 5	< 0.1	< 6	< 16	< 2		5 – 4.6	Nulle
Classe 4	0.1 – 0.9	6 – 10	16 – 75	2 – 5		4.5 – 4.0	Faible
Classe 3	1.0 – 2.4	11 – 50	76 – 250	5.1 – 10		3.9 – 3.0	Modérée
Classe 2	2.5 – 6.0	51 – 150	251 – 900	10.1 – 15		2.9 – 2.0	Forte
Classe 1	> 6	> 150	> 900	> 15		1.9 – 1.0	Très forte

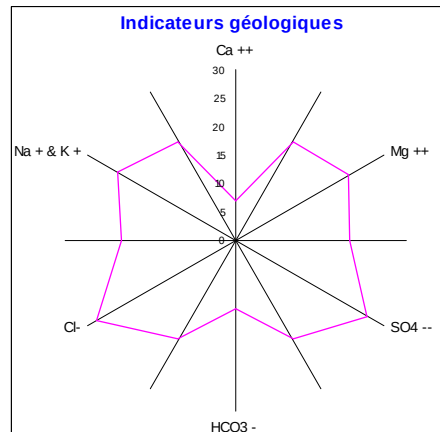
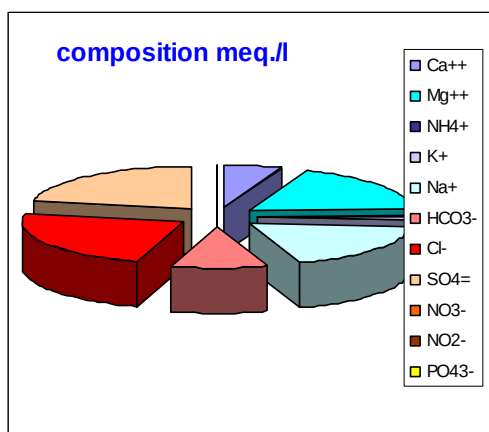
Les résultats des calculs de l'IPO et des indicateurs géologiques sont dans les tableaux et les figures suivants sachant que chaque paramètre est représenté tout seul.

6. Les indicateurs géologiques

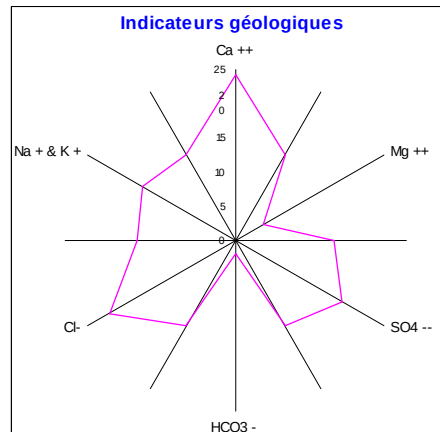
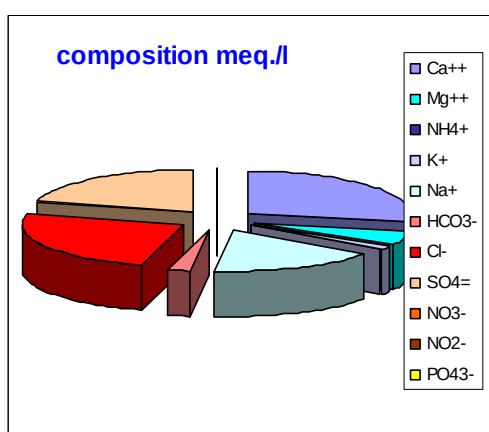
Station 01 :



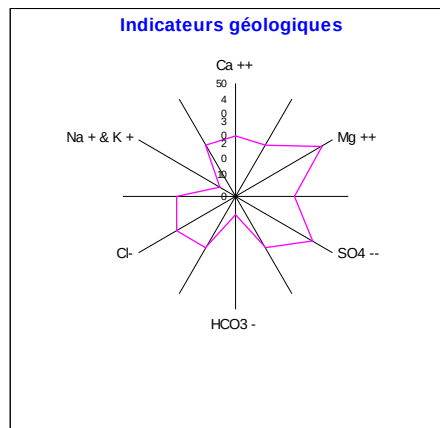
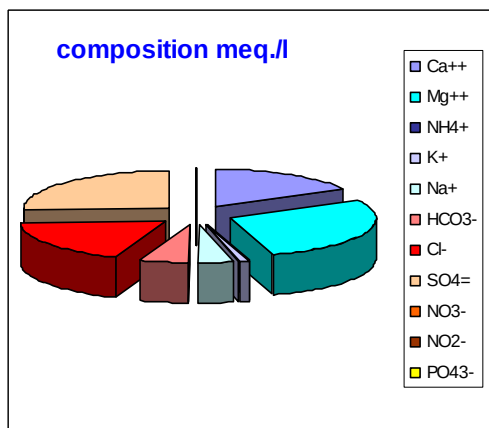
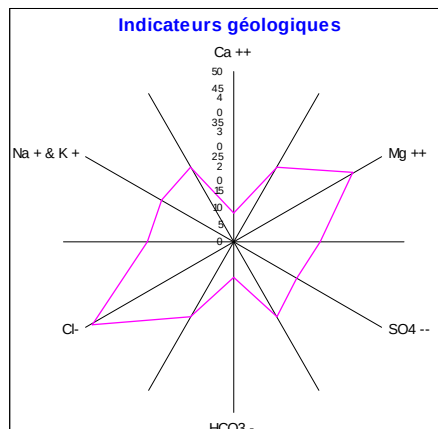
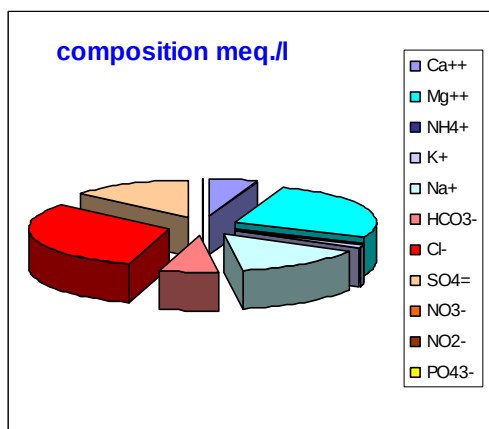
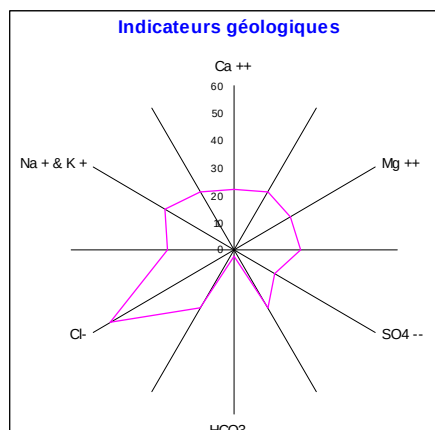
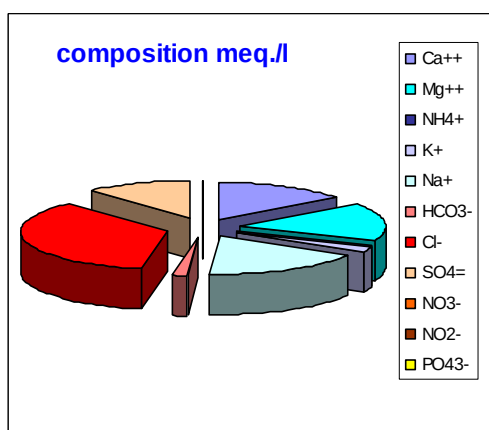
Campagne 01 (03/04/2007)

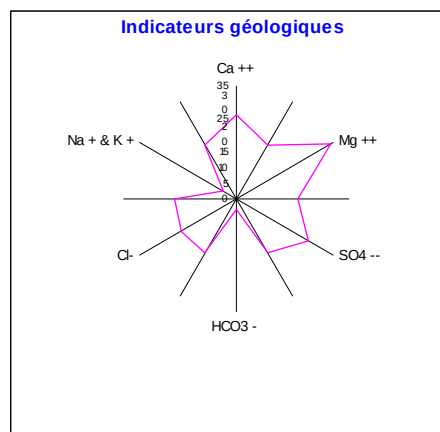
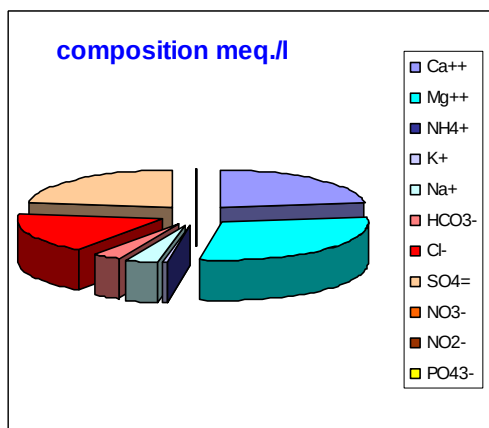
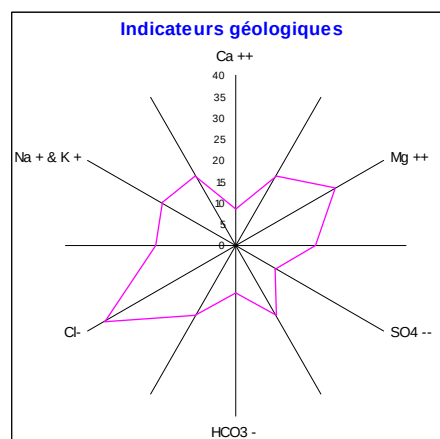
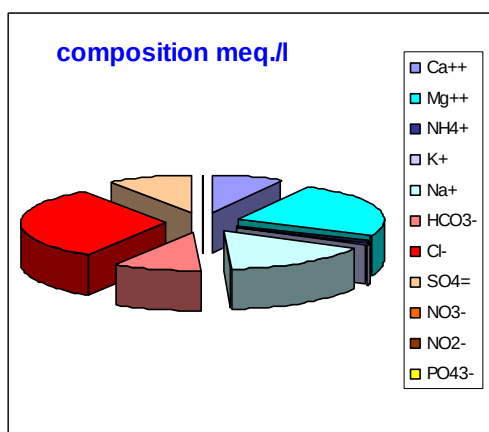
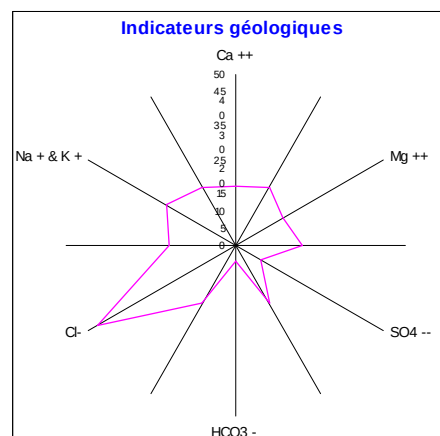
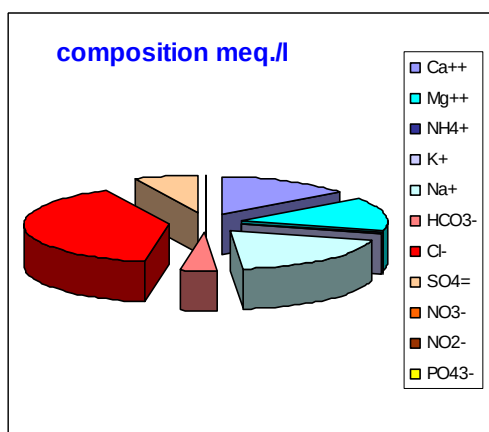


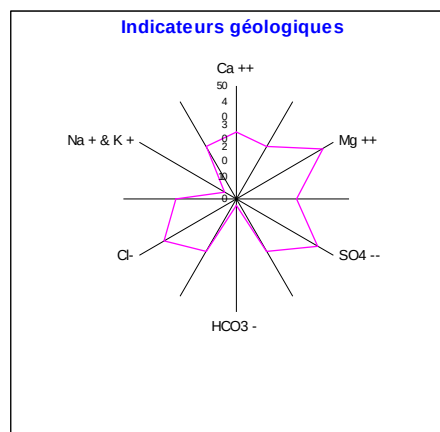
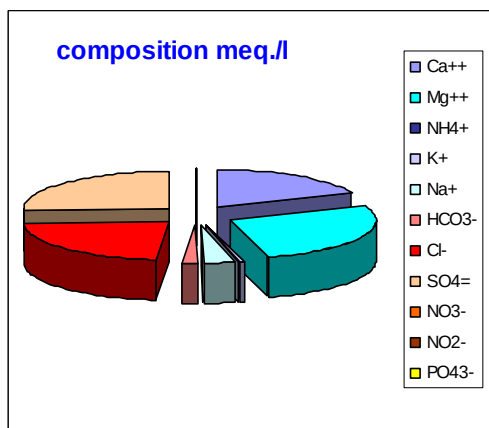
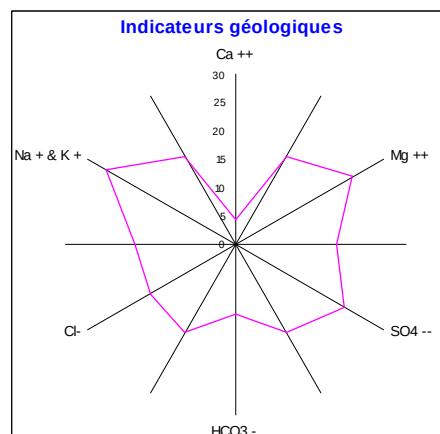
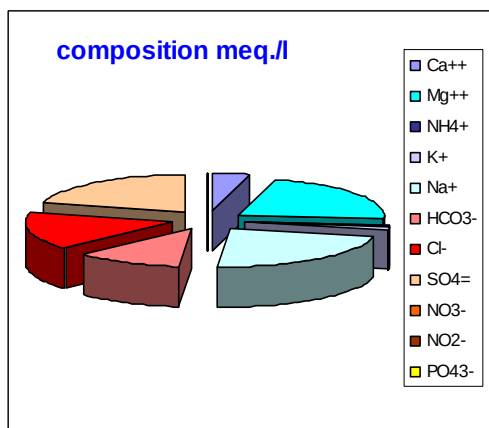
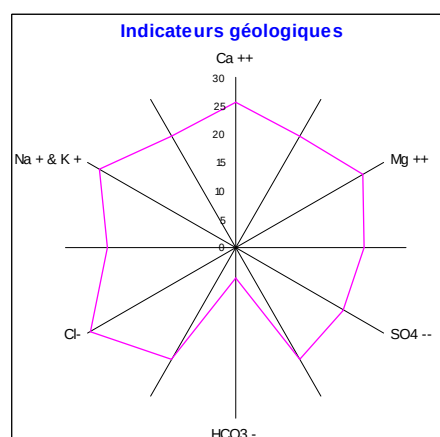
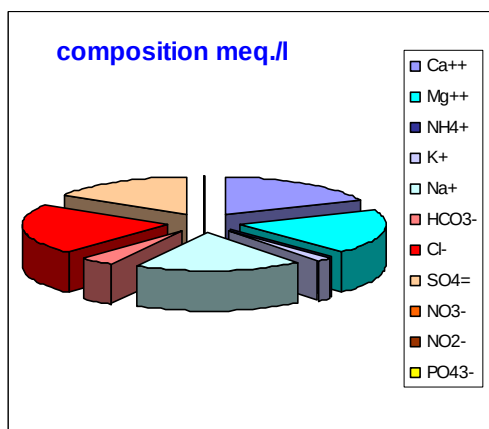
Campagne 02 (07/06/2007)

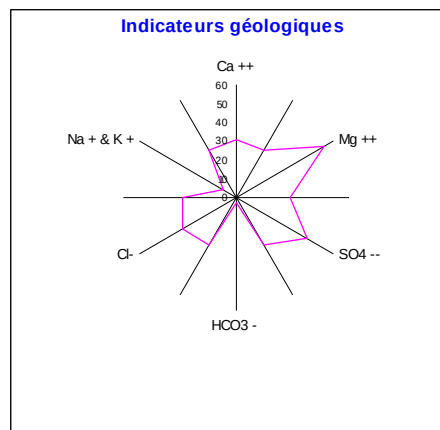
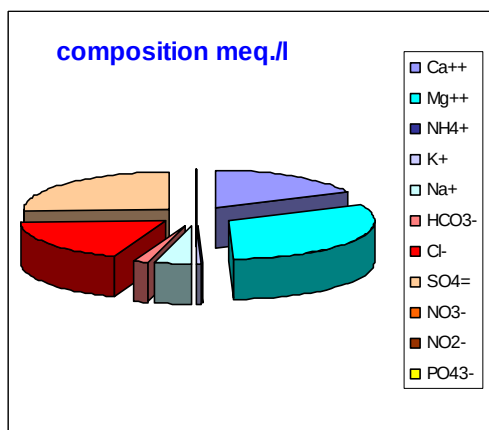
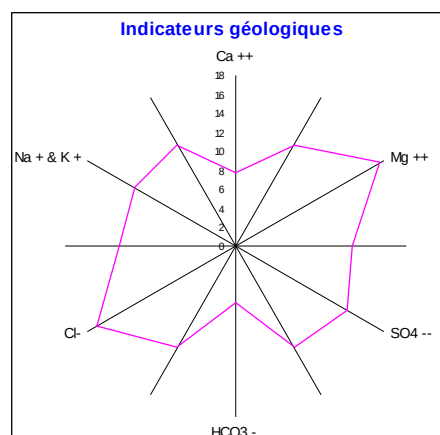
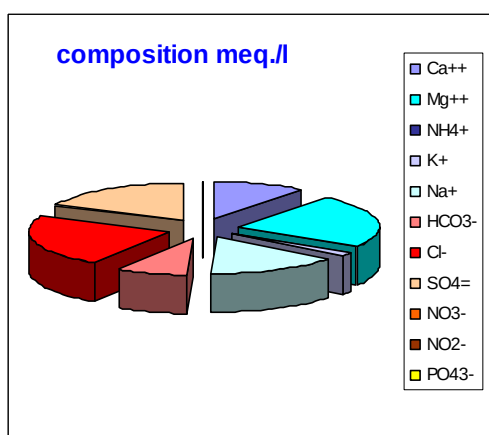
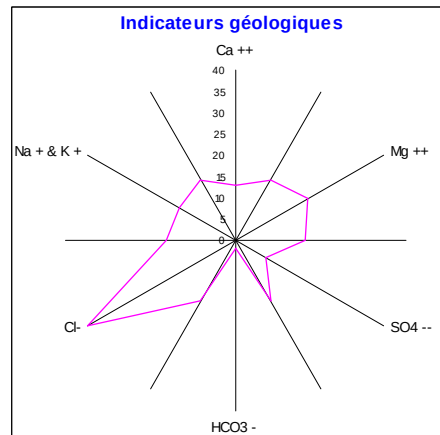
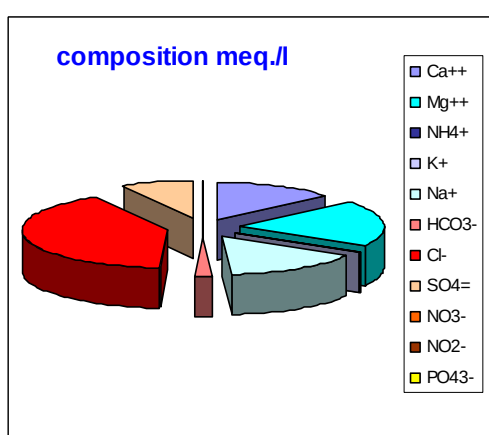


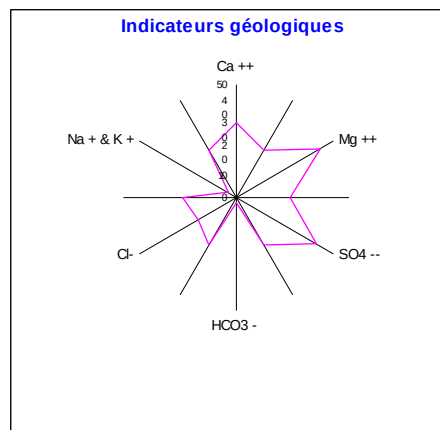
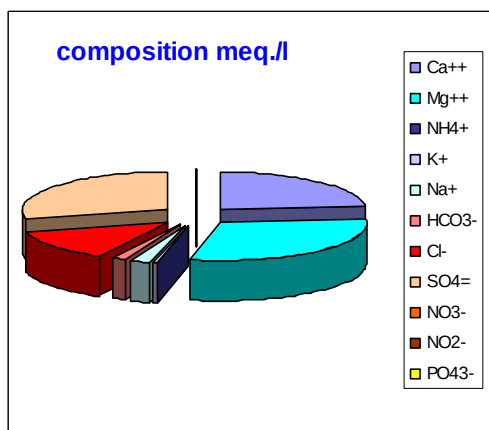
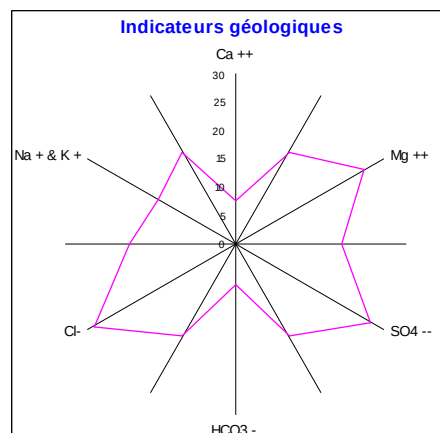
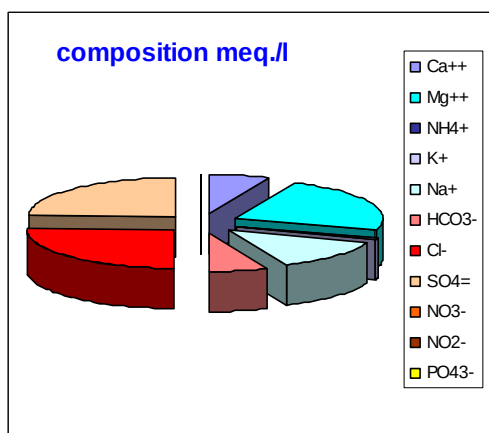
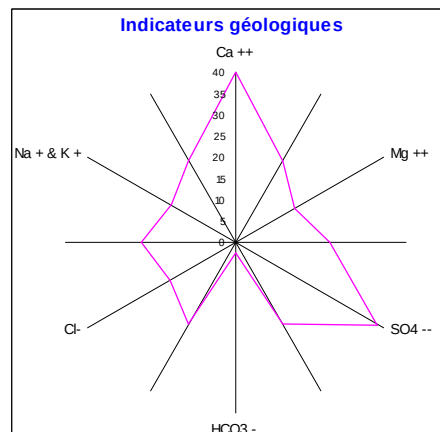
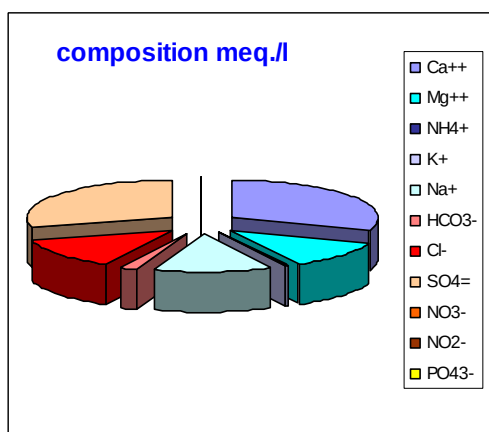
Campagne 03 (09/09/2007)

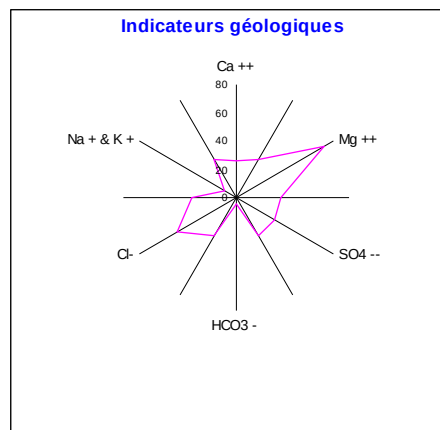
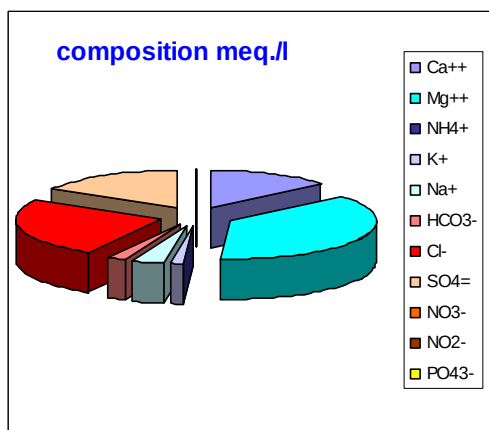
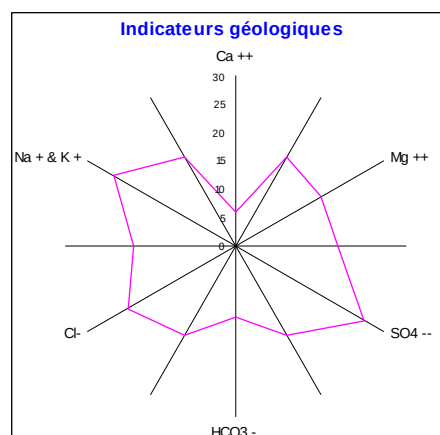
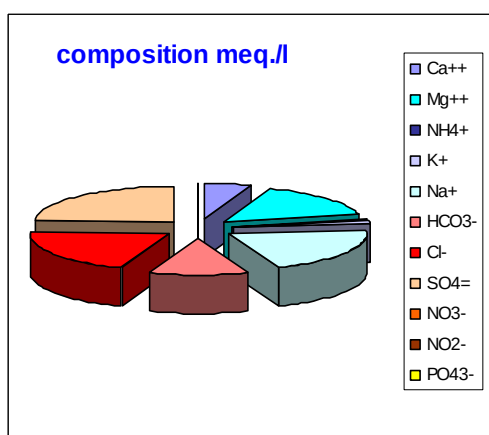
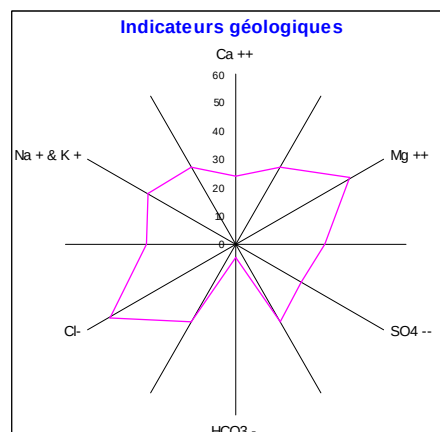
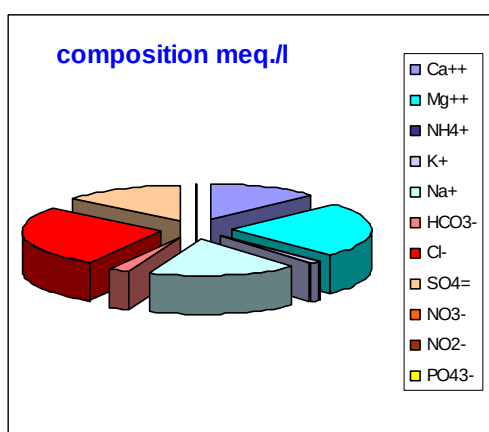
Station 04 :**Campagne 01 (03/04/2007)****Campagne 02 (07/06/2007)****Campagne 03 (09/09/2007)**

Puits 01 :**Campagne 01 (03/04/2007)****Campagne 02 (07/06/2007)****Campagne 03 (09/09/2007)**

Puits 02 :**Campagne 01 (03/04/2007)****Campagne 02 (07/06/2007)****Campagne 03 (09/09/2007)**

Puits 05 :**Campagne 01 (03/04/2007)****Campagne 02 (07/06/2007)****Campagne 03 (09/09/2007)**

Puits 08 :**Campagne 01 (03/04/2007)****Campagne 02 (07/06/2007)****Campagne 03 (09/09/2007)**

Drainage :**Campagne 01 (03/04/2007)****Campagne 02 (07/06/2007)****Campagne 03 (09/09/2007)**

7. Discussion**- Stations 01, 02 et 03 :**

Il y a une évolution des concentrations en sodium d'une campagne à l'autre. Le calcium évolue inversement au magnésium il prend des concentrations moyennes (campagne 01), faibles (campagne 02) et très fortes (campagne 03).

- Station 04 :

Présente la même évolution dans les concentrations des cations et des chlorures que les trois stations précédentes, cependant la concentration des sulfates est moindre dans la campagne 03.

- Puits 01 :

La campagne 01 : Présente des concentrations élevées en Mg^{++} , SO_4^- et Cl^- , toutefois le sodium a des concentrations faibles.

La campagne 02 : Le calcium a subi une diminution. Les concentrations en sodium augmentent en relation avec l'élévation de la température.

La campagne 03 a connue une légère diminution dans les concentrations en Mg^{++} accompagnés par une augmentation dans les teneurs de Ca^{++} . Les concentrations en sulfates diminuent d'une campagne à l'autre.

- Puits 02 :

Les graphes présentent la même allure que le puits 01 sauf pour la campagne 03 où les concentrations sont élevées pour tous les éléments à l'exception des bicarbonates qui restent toujours dans les normes et cela est de même pour les puits 03, 04, 06 et 07 (voir annexe).

- Puits 05 :

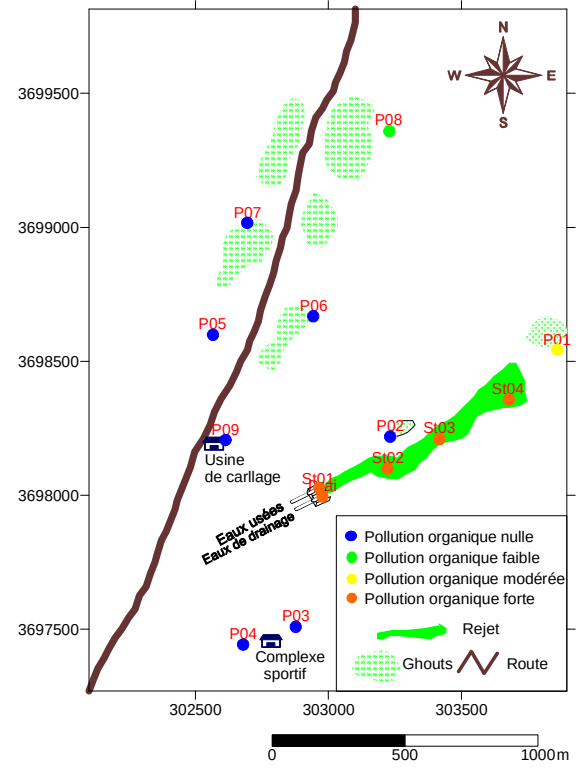
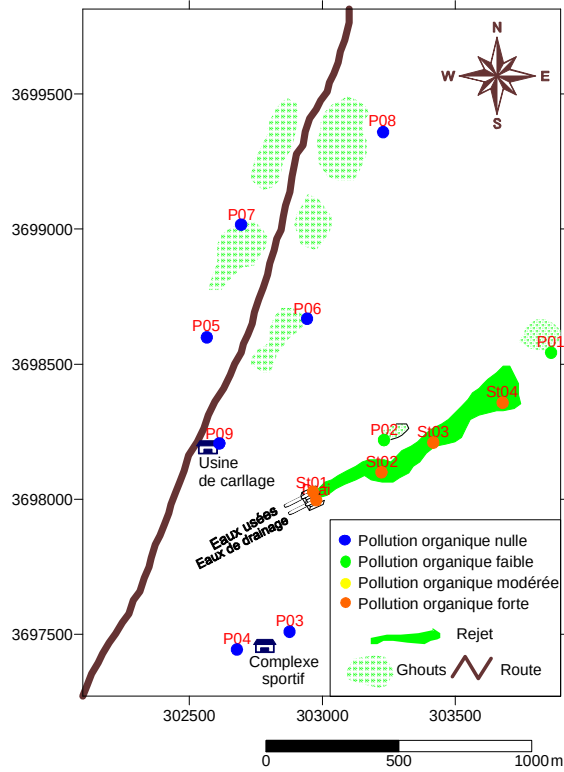
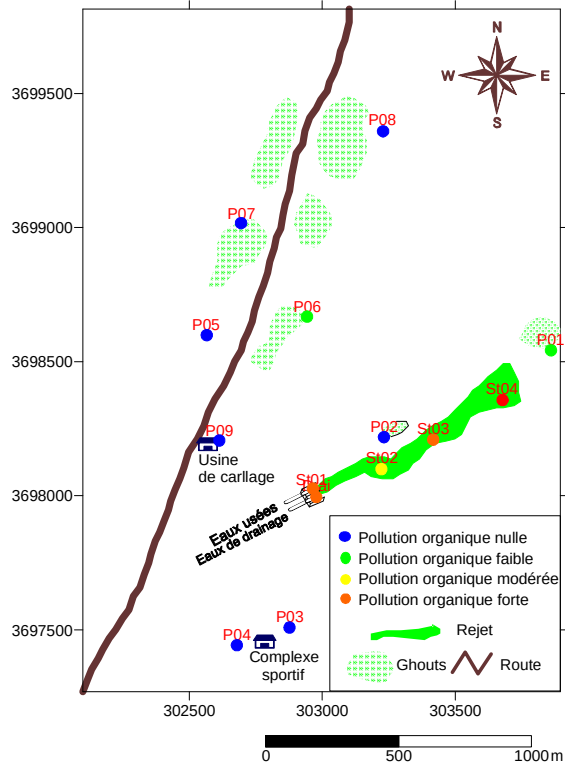
Présente la même allure que les puits précédents pour les deux premières campagnes. La campagne 03 montre des concentrations faibles et homogènes en Mg^{++} , Ca^{++} et Na^+ . La concentration des sulfates a diminué.

- Puits 08 et 09 :

La même évolution est marquée pour les deux premières campagnes en comparaison avec les autres puits, mais la campagne trois présente une exception illustrée par les fortes concentrations en Ca^{++} .

8. L'indice de pollution organique (IOP) :**Tableau N°25 : Tableau récapitulatif des IPO et des indicateurs d'eutrophisation.**

Echantillon	Compagne I		Compagne II		Compagne III	
	IPO	Eutrophisation	IPO	Eutrophisation	IPO	Eutrophisation
Station 01	Forte	Très forte	Forte	Forte	Forte	Très forte
Station 02	Modéré	Très forte	Forte	Forte	Forte	Forte
Station 03	Forte	Très forte	Forte	Forte	Forte	Forte
Station 04	Très forte	Très forte	Forte	Nulle	Forte	Modéré
Puits 01	Faible	Nulle	Faible	Nulle	Modéré	Nulle
Puits 02	Nulle	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 03	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 04	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 05	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 06	Faible	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 07	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 08	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 09	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Faible	Nulle
Drainage	Forte	Nulle	Faible	Nulle	Forte	Modéré



9. Interprétation des diagrammes des indicateurs géologiques :

D'après les diagrammes des indicateurs géologiques on remarque qu'il y a vraiment une contamination d'origine géologique marquée par de fortes teneurs qui dépassent largement les normes en chlorures et en sulfates pour les anions, et en sodium et tantôt le calcium tantôt le magnésium pour les cations. Cette pollution naturelle due aux fortes dissolutions des croûtes gypseuses, et des formations argileuses qui constituent la formation aquifère, et aux apports qui viennent des nappes profondes par les forages implantés dans ces deux nappes pour l'AEP et l'irrigation et qui se rejette dans la nappe phréatique, ou induite par le mélange de ces eaux avec les eaux ménagères et les fosses septique suite à la remontée des eaux.

10. Interprétation des cartes de l'indice de la pollution organique :

Les cartes montrent clairement que la pollution organique est forte à très forte dans le rejet c'est tout à fait logique parce que ce sont des eaux usées chargées en matière organique, par contre les puits ne présentent pas une pollution organique (IPO nulle dans presque tout les puits) sauf le puits 01 qui présente une pollution faible à modérée et le puits 02 qui présente une pollution faible à cause de leurs positions qui sont très proches du rejet. Donc on peut dire que les sables ont un pouvoir autoépuratoire très élevé (bon filtre) contre la percolation des polluants.

11. Les indicateurs d'eutrophisation

Ces indicateurs regroupent les nitrates et surtout les phosphates : ils représentent le stade final de la dégradation des polluants contenant de l'azote et du phosphore dans une rivière ou lac. Ils n'ont pas un caractère toxique direct pour les êtres vivants de la rivière ou le lac, mais ils peuvent provoquer un déséquilibre de l'écosystème en favorisant un développement anarchique des plantes aquatiques.

Ces indicateurs sont forts à très forte dans les eaux de rejet ce qui a provoqué un grand déséquilibre de l'écosystème marqué par le fort développement des plantes.

12. Conclusion :

La qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude est fonction de plusieurs paramètres physique, chimique, biologique, et la lithologie du terrain étudié

Pour connaître l'état actuel des eaux souterraines dans la zone d'étude une méthode des indices de pollution organique a été retenue pour l'établissement de la carte de la pollution organique, cette dernière a montré que les différentes eaux souterraines de la zone d'étude ont une pollution organique faible à nulle.

Les eaux usées évacuées dans la zone du rejet posent un problème même si le pouvoir autoépuratoire des sables est élevé.

Conclusion générale :

La région du Souf, qui fait partie du Sahara septentrionale et appartenant administrativement à la wilaya de l'Oued Souf, est caractérisée par une activité économique basée principalement sur le commerce et la culture de palmiers dattiers, et dernièrement la pomme de terre.

La région est caractérisée par climat sub saharien avec des étés très chauds et avec une pluviométrie relativement très faible de l'ordre de 73 mm.

L'analyse lithostartigraphique montre que le système hydrogéologique de la région est composé de trois nappes aquifères la première correspondant au continental intercalaire d'âge Albien, la deuxième est représentée par le complexe terminal d'âge Miopliocène et la dernière qui surplombe les deux premières et qui correspond à la nappe libre.

La carte du toit de substratum, montre des courbes isobathes organisées en une suite de structure fermée correspondant à une série de dépressions et de bombements. Ainsi nous pouvons remarquer que la profondeur du substratum argileux varie très fortement de 18 à 100m.

La piézomètre montre un sens d'écoulement général Sud-Nord vers les chotts. La nappe phréatique présente une tendance à la hausse sous les agglomérations ayant une AEP à partir de la nappe profonde, et à la baisse dans les zones agricoles irriguées à partir de celle ci.

La chimie des eaux de la nappe libre d'Oued Souf possède des valeurs élevées de la conductivité, due à l'existence de certains éléments chimiques à concentrations élevées (Cl^- , Na^+ , Ca^{++} , SO_4^{--}) ce qui rend les eaux de la nappe impropre à l'irrigation. Cette excès est dû d'une part à la dissolution des terrains (formation salifères, argile, formations évaporitiques), et d'autre part à la forte évaporation des eaux surtout dans les Ghouts.

Les concentrations des nitrates sont au dessus des normes de l'OMS pour l'eau de boisson, elle présente un danger pour la santé humaine.

La détermination des paramètres hydrodispersifs dans la zone du rejet donne une valeur de dispersivité longitudinale α_L faible.

L'interprétation des trois campagnes d'analyses des échantillons effectuées dans la zone du rejet sur neufs points pour les eaux souterraines et quatre points pour les eaux usées et un pour les eaux de drainage montrent que la pollution organique est importante au niveau de la zone de rejet mais au niveau des eaux

de la nappes cette pollution est moins ressentie grâce au rôle épurateur de la couverture sableuse.

Références bibliographiques

1. **AMINOT ET CHAUSSE-PIED ; 1983** : Analyse d'eau de mer.
2. **ANRH ; 1999** : Etude de la nappe phréatique dans les Ghouts agricoles de la vallée du Souf (Wilaya d'El Oued). Direction régionale d'Ouargla.
3. **ANRH ; 1999** : Note sur l'inventaire de forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya d'El Oued. Direction régionale d'Ouargla.
4. **ANRH ; 2001** : Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation de la vallée du Souf (Wilaya d'El Oued). Direction régionale d'Ouargla.
5. **BAHROUN. S ; 2006** : Impact des eaux usées urbaines et industrielles sur les eaux naturelles dans la région d'El Tarf. Mém de Magister. de l'Univ d'Annaba. 123p.
6. **BELKHIRI. L ; 2005** : Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux de la plaine de Ain Azel Wilaya de Setif Est Algérien. Mém de Magister de l'Univ Batna. 168p.
7. **BOEGLIN. G.C** : Analyse des eaux résiduaires.
8. **BOUSBIA BRAHIM. A ; 2002** : Approche hydrodynamique et hydrogéologique de la nappe libre de l'Oued Souf et définition du problème de la remontée des eaux ; Mém d'ing ; Univ Annaba, 110 p.
9. **CASTANY.G ; 1982**: Hydrogéologie principe et méthode. Edition Dunod 236 p.
10. **DEBIECHE, T.H., 2002**: Evolution de la qualité des eaux (salinité, acidité et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la Seybouse, N.E. algérien. Thèse de Doc. de l'univ. de Franche-Comté, 200p.
11. **HPO – BONNARD ET GARDELL ; 2001** : Rapport de la première campagne des mesures hydrogéologiques dans la nappe phréatique du souf.
12. **HPO – BONNARD ET GARDELL ; 2001** : Rapport de la deuxième campagne des mesures hydrogéologiques dans la nappe phréatique du souf.
13. **HPO – BONNARD ET GARDELL ; 2002** : Rapport de la troisième campagne des mesures hydrogéologiques dans la nappe phréatique du souf.
14. **HPO – Bonnard et Gardell ; 2003** : Rapport sur les essais de pompages dans la nappe phréatique du souf.
15. **KHADRAOUI.A ; 1998** : Contribution à l'étude de la remontée des eaux de la nappe phréatique du Souf (wilaya d'El Oued)
16. **NOËL. M, CHEIKH .B ; 2001** : Problème de Contamination des nappes phréatiques par les rejets domestiques d'Afrique Noire cas de la nappe de Brazzaville au Congo. Sécheresse 2001 ; 12 (3) 175-82.

- 17. OUADI.T et al... ; 2001 :** Imapct de la pollution sur l'unique réseau hydrographique de Casablanca, Maroc. Sècheresse 2001 ; 12(2) : 129-3.
- 18. PAUL. L et al...; 2004 :** Analyse physicochimiques niveaux R&C, OFEFP du département fédéral de l'envirenement, de transport, de l'enrgie et de la communication (DETEC), Berne.
- 19. RODIER.J ; 1978 :** L'analyse de l'eau : eau naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Edition Bordas 1135p.
- 20. SAUTY.J.P ; 1977 :** Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage. Thèse de Doc. de l'univ. de Grenoble, 157p.
- 21. ZAIDA. N, LECHHEB.S ; 2006 :** Etude hydrogéologique et essais de modélisation des nappes aquifères de la région de Souf .Mém d'Ing de l'Univ Constantine, 132p.

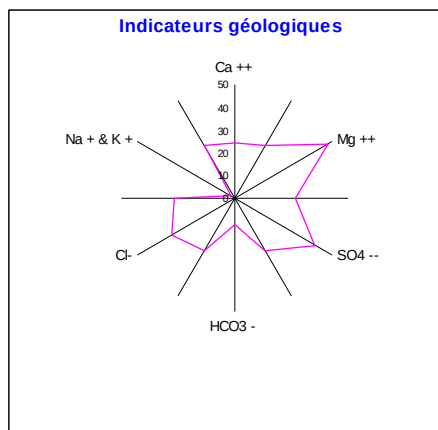
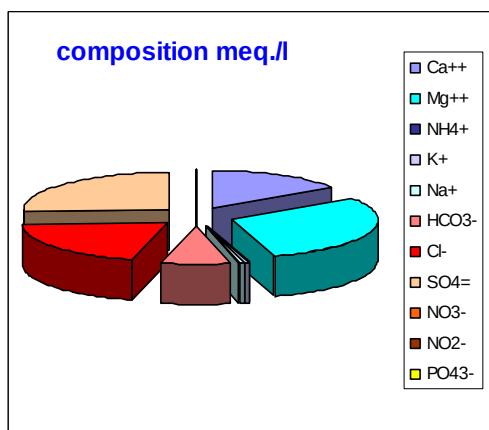
Annexe N°02 : L'indice d'échange de base pour les deux compagnes
(Mai 1995 et Mars 1998)

NOM	i,e,b (Mai 1995)	NOM	i,e,b (Mars 1998)
H1	0,12891801	H01	-0,25762081
H2	0,07836835	H03	-0,02255831
H4	-0,07830006	H06	-0,6963795
H7	0,02479974	H07	-0,25662876
H9	0,05675129	H09	0,10605506
H11	0,155076	H11	0,11950101
H12	0,02194755	H13	0,22998361
H13	-0,04961319	H26	-0,07432419
H14	0,30951357	H33	-0,08932193
H15	-0,14565334	H78	-0,48015608
H20	0,05883845	H80	0,0092
H22	0,01337793	H86	-0,46088411
H25	0,0425038	H103	-0,1840344
H26	-0,0740893	H110	0,18529224
H28	-0,54718855	P31	0,21324738
H29	-0,38989918	P39	-0,27351091
H31	0,14272281	H61	-0,44412509
H36	0,06583457	P23	0,06599777
H37	0,20416585	P35	-0,01903488
H39	-0,15780791	P36	0,00016908
H41	0,1432177	P38	0,1194064
H46	0,11269788	H67	0,19331578
H47	0,43422287	H29	0,00437172
H48	0,03468082	H38	-0,43063937
H49	0,05232593	H63	0,11227884
H50	-0,0068091	H74	0,1067879
H51	0,05763446	H35	-0,44469565
H70	0,11434182	H37	-0,233996
H71	-0,30616398	H41	-0,02274827
H78	0,19484083	H49	-0,01442706
H81	0,03057692	P01	-0,14986756
H84	-0,02286059	P02	0,10186476
H86	-0,69612996	P03	-0,06977743
H88	0,19216449	P04	-0,56576475
H89	0,37759865		
H92	0,20088722		
H93	0,64505921		
H95	0,20398737		
H97	0,11356936		
H98	0,44174044		
H100	0,31038183		
H101	-0,03220438		
H104	0,04053698		
H107	-0,01037619		
H109	0,03179508		
H110	0,03928372		
P1	0,01578775		
P2	0,00172575		

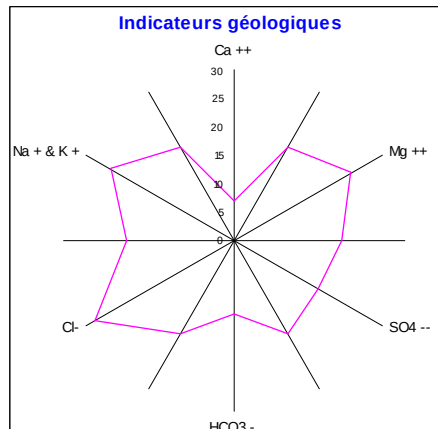
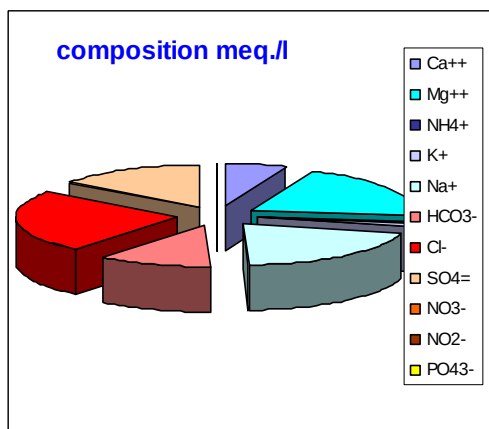
P4	-0,63453716
P5	-0,00481055
P6	0,09199794
P7	-0,1839422
P8	0,01417977
P9	0,11554152
P10	-0,3412373
P15	0,28713071
P19	0,0314051
P22	0,00746156
P30	0,21535553
P32	0,038814
P35	0,1042401
P36	-0,14988119
P37	-0,24498664
P38	0,19202413
P21	0,14437828

Les indicateurs géologiques

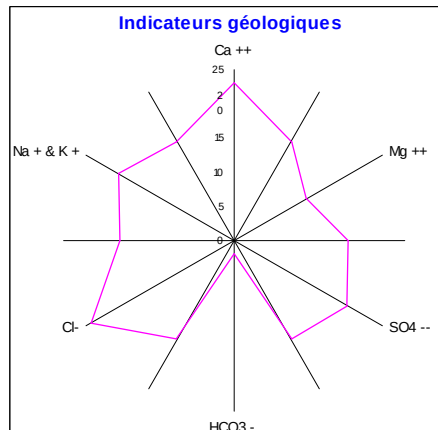
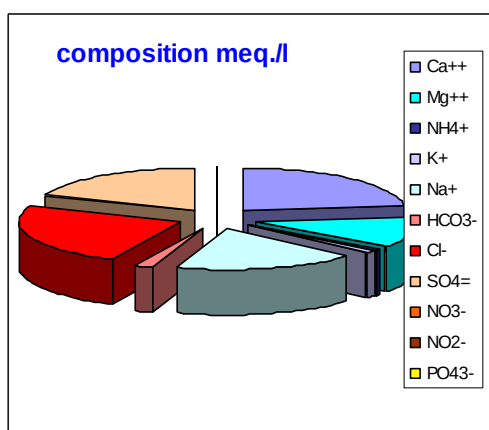
Station 02 :



Compagne 01 (03/04/2007)

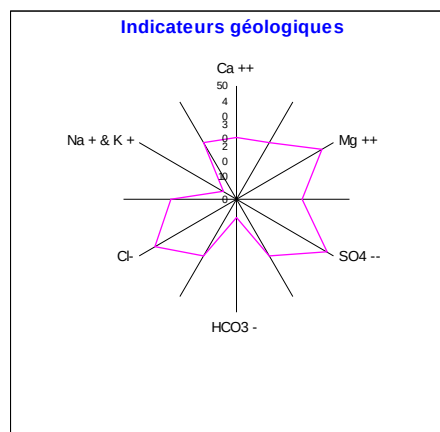
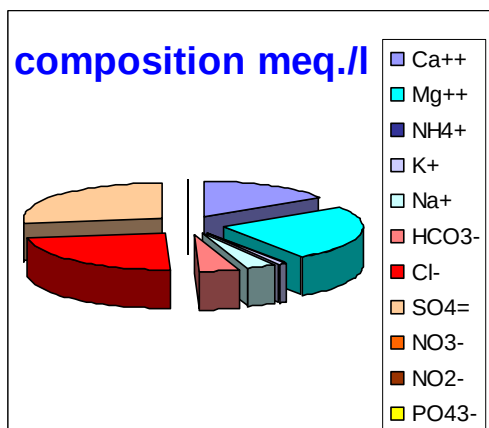


Compagne 02 (07/06/2007)

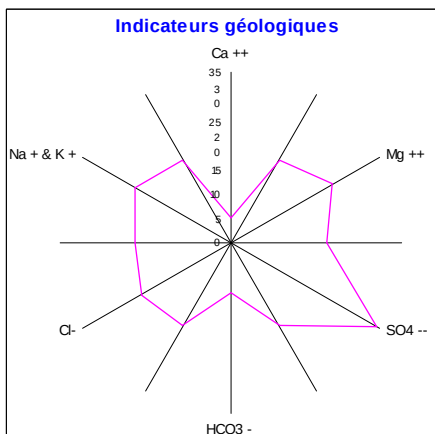
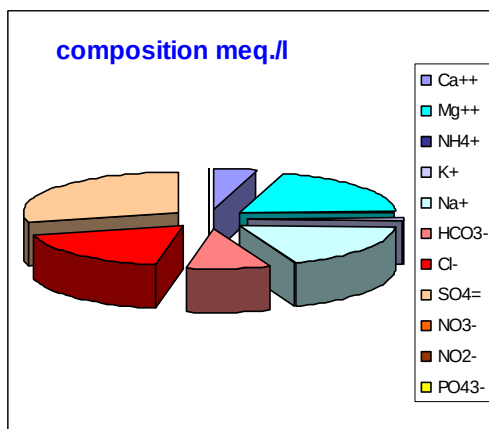


Compagne 03 (09/09/2007)

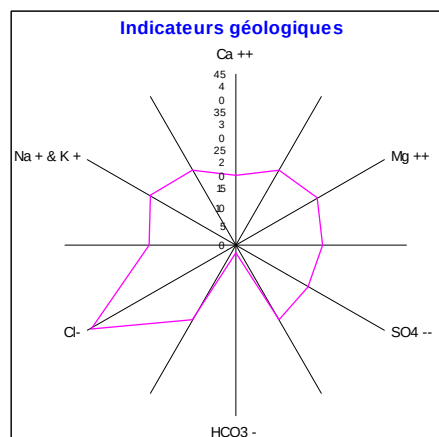
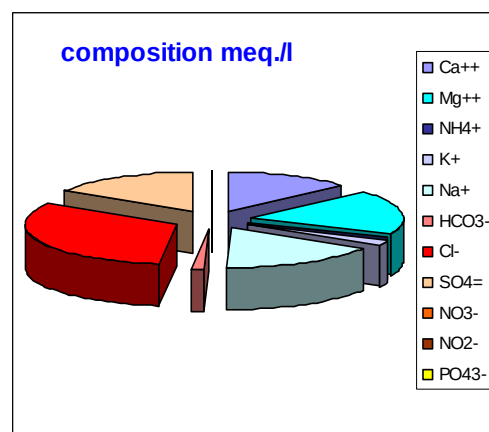
Station 03 :



Compagne 01 (03/04/2007)

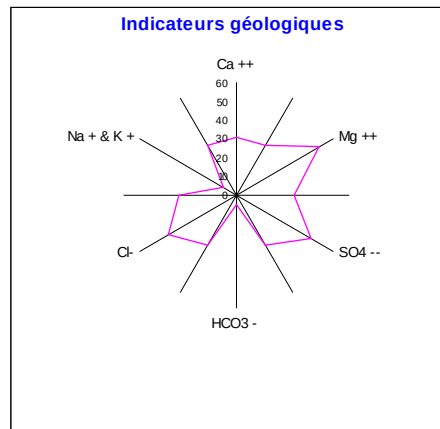
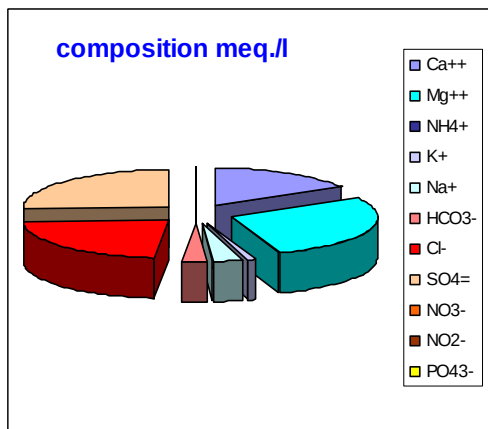


Compagne 02 (07/06/2007)

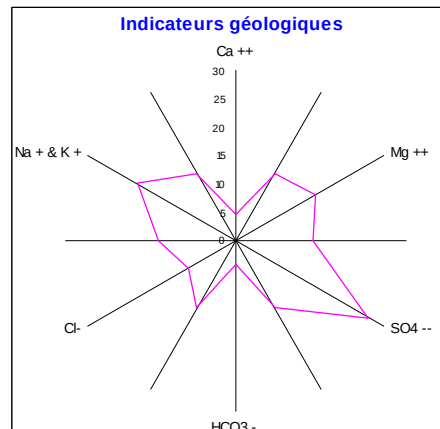
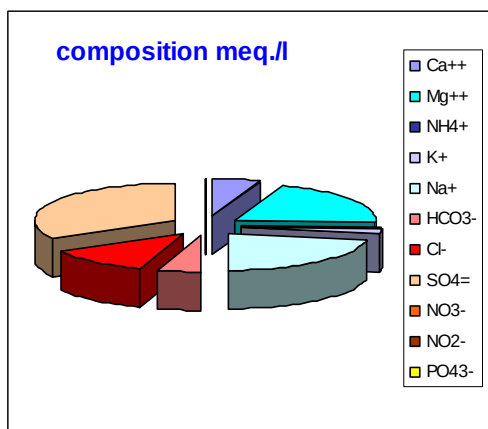


Compagne 03 (09/09/2007)

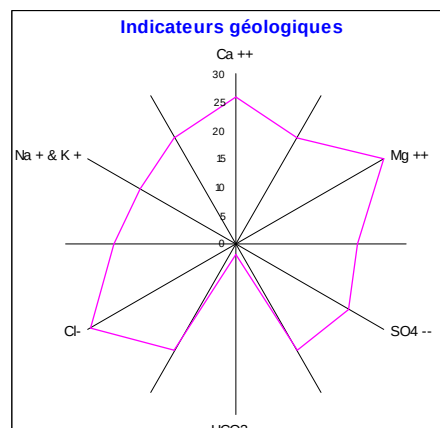
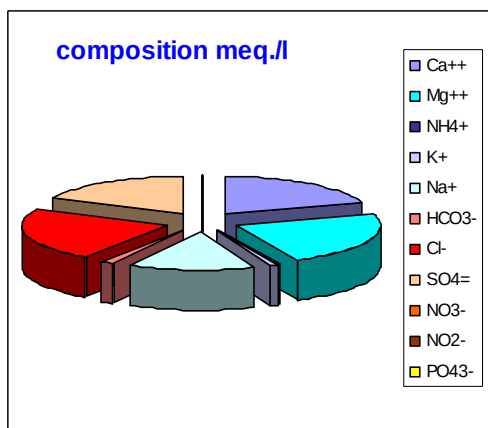
Puits 03 :



Compagne 01 (03/04/2007)

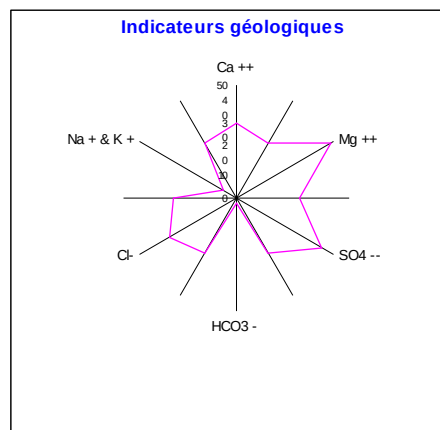
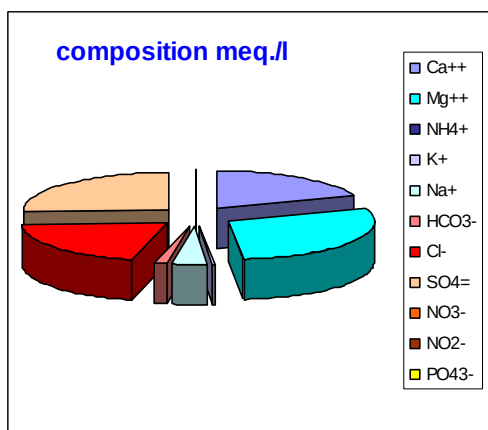


Compagne 02 (07/06/2007)

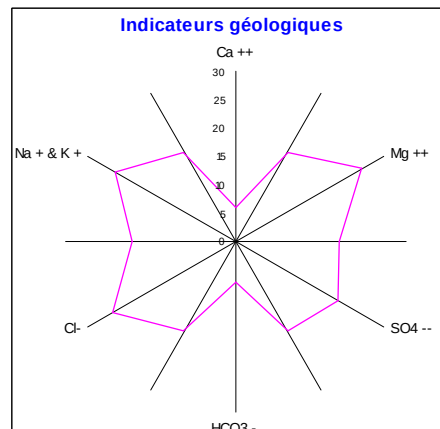
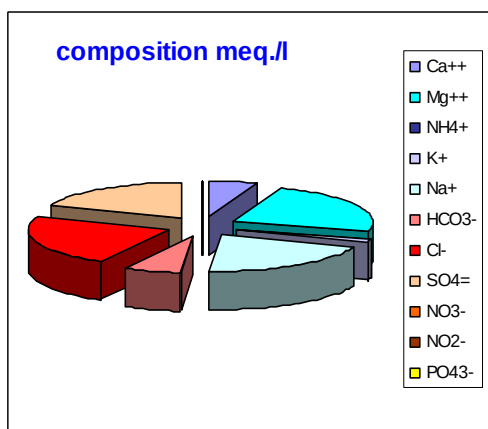


Compagne 03 (09/09/2007)

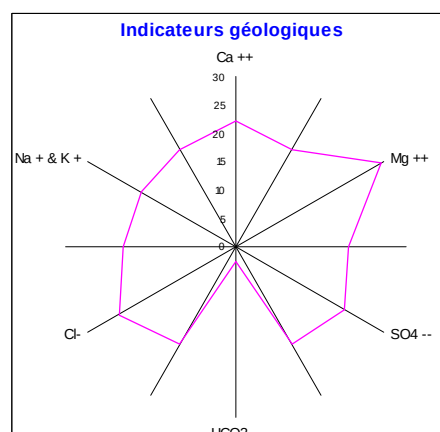
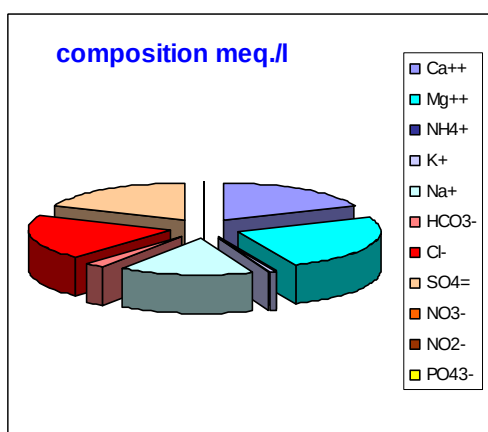
Puits 04 :



Compagne 01 (03/04/2007)

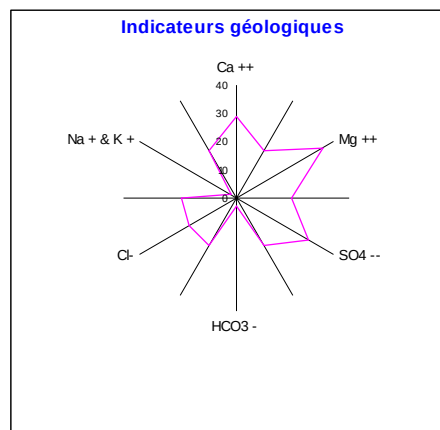
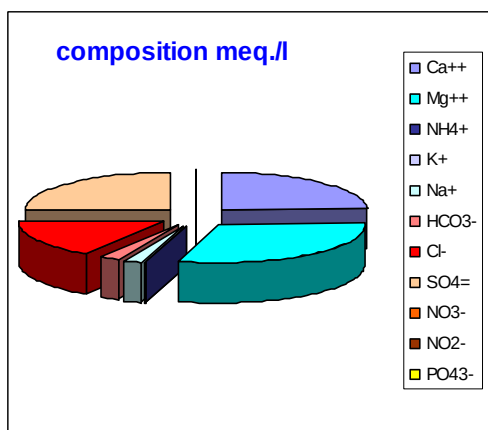


Compagne 02 (07/06/2007)

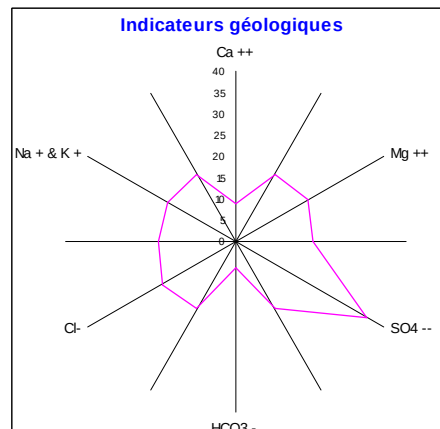
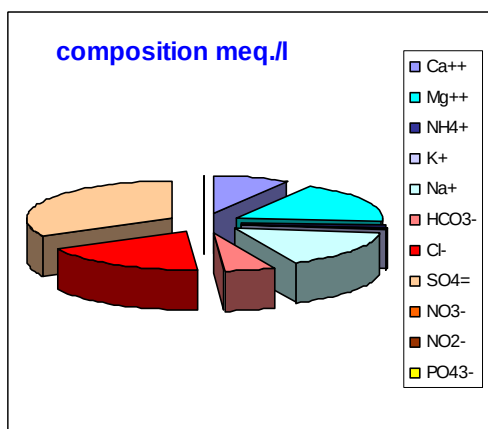


Compagne 03 (09/09/2007)

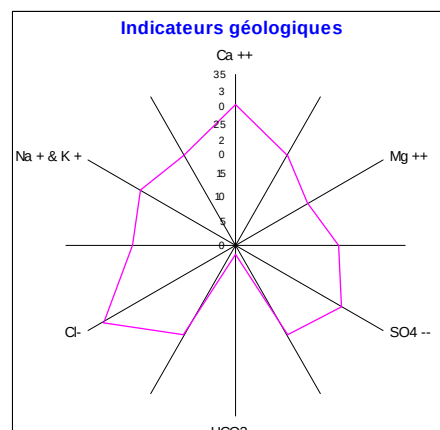
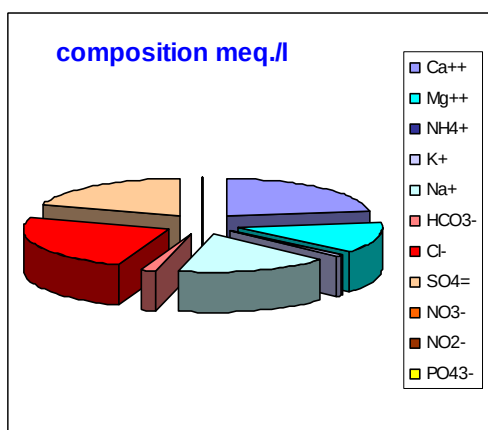
Puits 06 :



Compagne 01 (03/04/2007)

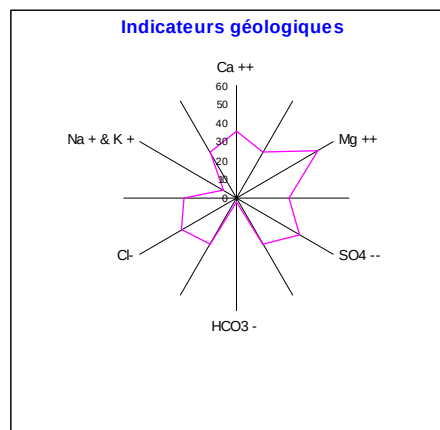
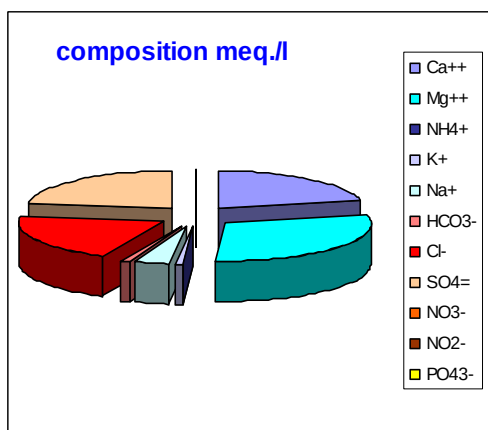


Compagne 02 (07/06/2007)

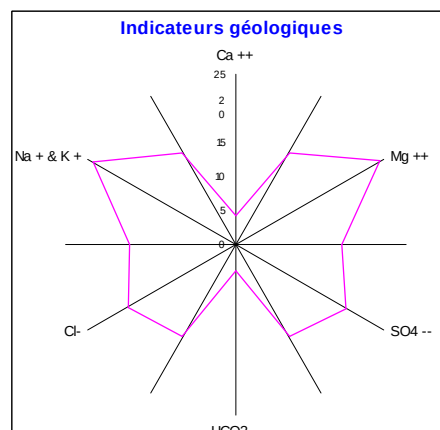
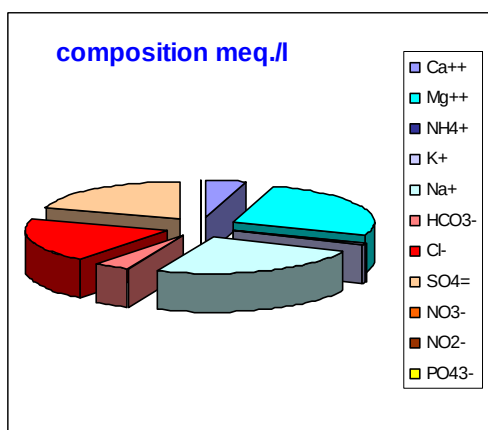


Compagne 03 (09/09/2007)

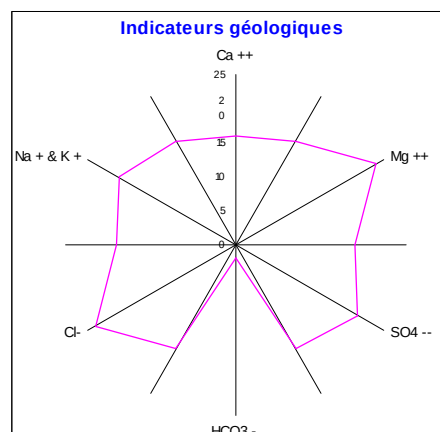
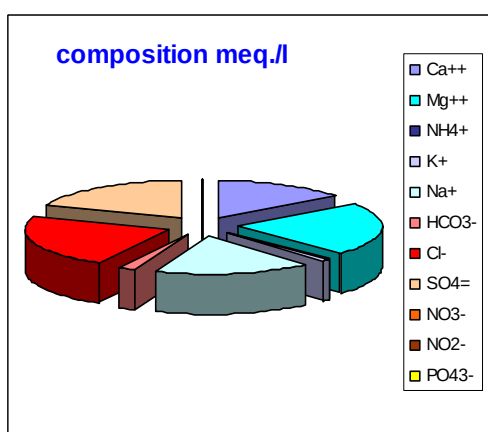
Puits 07 :



Compagne 01 (03/04/2007)

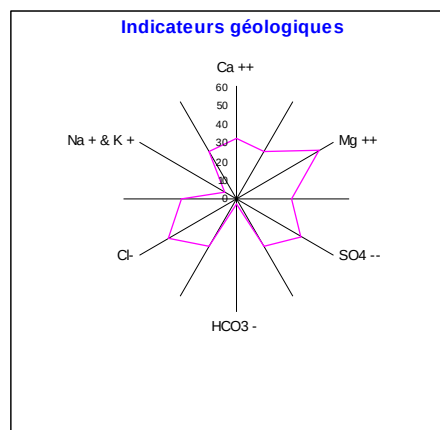
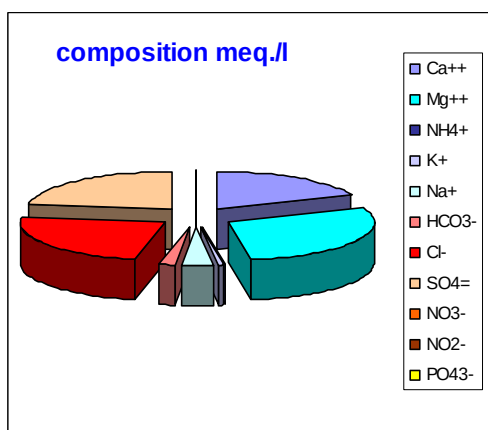


Compagne 02 (07/06/2007)

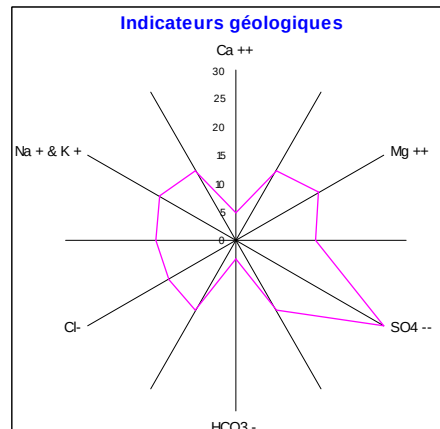
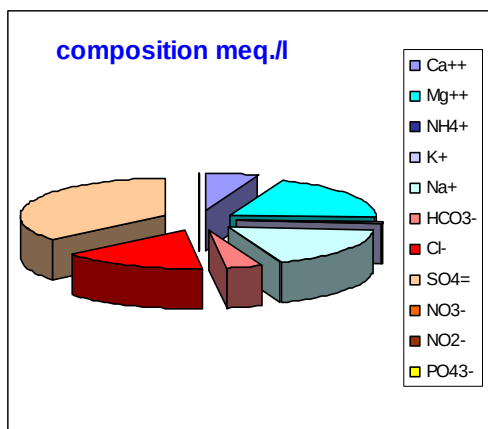


Compagne 03 (09/09/2007)

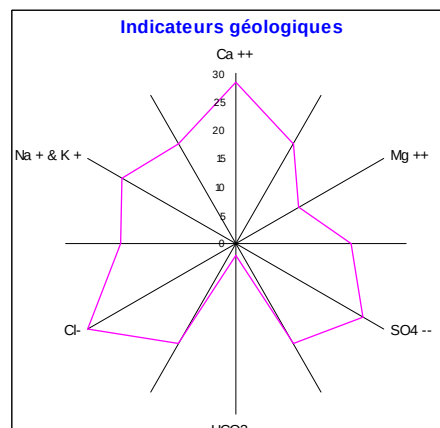
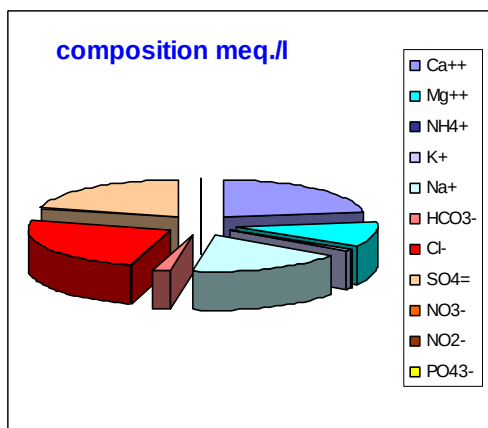
Puits 09 :



Compagne 01 (03/04/2007)



Compagne 02 (07/06/2007)



Compagne 03 (09/09/2007)