

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2014

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

Thèse de Doctorat en Géologie appliquée

Option: Hydrogéologie

Thème

**IMPACT DE LA REMONTEE DES EAUX SUR
LA QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE
ET SUR L'ENVIRONNEMENT DANS
LA VALLEE DU SOUF SUD-EST ALGERIEN**

Par

DROUCHE Abdelmalek

(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie. Magister en Hydrogéologie)

Devant le jury:

Président :	CHAFFAI Hichem	Pr. Université de Annaba
Directeur de thèse :	CHAAB Salah	M.C. Université de Annaba
Examineurs :	CHABOUR Nabil	M.C. Université de Constantine
	DEBIECHE Taha Hocine	M.C. Université de Jijel
	MAOUI Amar	M.C. Université de Guelma
	SAADIA Bachir	M.C. Université de Annaba

Remerciement

Je voudrais exprimer ma vive reconnaissance envers le Maître de conférences Mr. CHAAB Salah, qui a dirigé mon travail depuis le début avec dévouement et une grande compétence. Ses conseils et sa coopération toujours renouvelée m'ont été infiniment précieux. Il m'est impossible de dire combien je lui suis redevable.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous les membres de jury :

- Mr. CHAFAI Hicham Professeur à l'université de Annaba., d'avoir accepté de présider le jury.*
- Mr. CHABOUR Nabil, Maître de conférences à l'Université de Constantine, pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail et pour l'honneur que vous me faites en participant à ce jury.*
- Mr. DEBIECHE Taha-Hocine, Maître de conférences à l'Université de Jijel d'avoir accepté d'examiner ce travail*
- Mr. MAOUI Amar, Maître de conférences à l'Université de Guelma d'avoir accepté d'examiner ce travail*
- Mr. SAADIA Bachir, Maître de conférences à l'Université de Annaba qui a bien voulu juger ce travail, en faisant partie du jury.*

Mes vifs remerciements pour ZAHY F, qui m'a aidé à la réalisation des analyses dans le laboratoire je leur dis un grand merci pour leur soutien durant tous les moments difficiles.

Je tiens à exprimer mes très vifs remerciements à tous mes enseignants de département de géologie de l'université de Annaba auxquels je dois beaucoup pour ma formation en géologie.

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

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

Madame LAKHDËRI Fattoum, Directrice Générale du centre de recherche scientifique et technique sur les régions aride de Biskra, ayant déjà fait lui aussi preuve de gentillesse pour m'avoir donné accès au laboratoire centrale du CRSTRA pour faire les analyses chimiques des eaux. Qu'elle reçoit, ici, mes vifs remerciements.

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

Je remercie l'ensemble du personnel de la Direction régionale des Ressources hydriques (ANRH) de Ourgla.

Par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et toutes celles dont je suis redevable se voient ici vivement remerciés. Je suis redevable à mes parents, ma femme, mes enfants, mes frères et soeurs, que chacun se sente ici vivement remercié pour son amour et son soutien.

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

Abdelmalek

ملخص

للتلوث أسباب عديدة، سواء كانت طبيعية (جيولوجية) أو تحت تأثير الإنسان لاسيما (الزراعة ومياه الصرف الصحي) ويكون لها أثر على نوعية المياه الطبيعية، إن الحفاظ على الموارد المخصصة للاستهلاك البشري تمثل أولوية خاصة، سواء على الصعيد الوطني أو الدولي، من خلال التطبيق التدريجي للأحكام المتعلقة بحماية هذه الموارد من التلوث عن طريق التسيير الكمي لإدارة هذه الموارد.

يشكل غور وادي سوف وحدة للموارد المائية تقع في الجنوب الشرقي الجزائري، ويعتبر خزان كبير من مياه الطبقة السطحية ذات النوعية الرديئة. وطبقتي CT ، و CI الجوفيتين، حيث يتربع على مساحة 11738 كلم²، ويمثل إداريا 18 بلدية ويقطنه 486170 نسمة.

تعاني ولاية وادي سوف من ظاهرة صعود المياه، والتي تسببت في تدهور نوعية المياه الجوفية من خلال امتزاج هذه الأخيرة بالمياه القذرة للبالوعات في غياب تام لشبكات صرف المياه، وقد أثرت هذه المشكلة بشكل مباشر على مدينة الوادي، مما دفع بالسلطات إلى اتخاذ قرار انجاز شبكة محلية لصرف المياه القذرة للمدينة والتي تصب غرب مدينة الوادي (الشط)، في غياب دراسات علمية دقيقة تعمل على الحد من تأثير هذه المياه على المياه الجوفية.

في هذا المنحى نعالج في هذه الدراسة الجانب الهيدروجيولوجي للجيب المائي السطحي بوادي سوف، وبالأخص خطر التلوث بهذه المنطقة وتأثيره على المياه الجوفية.

خلال دراستنا قمنا بستة "06" خرجات ميدانية ثلاثة خلال سنة 2007 م (أفريل، جوان و سبتمبر) اثنان خلال سنة 2010 م (جانفي و أفريل) وواحدة خلال شهر ماي 2012 م، وذلك للقيام بتحاليل 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 تأثير الملوث العضوي، وقد أعطى قياس معاملات التصفية الذاتية للرمل في المنطقة قيمة منخفضة لمعامل التصفية الأفقي، وقد توصلنا إلى أن تراكيز بعض العناصر الطبيعية مثل (Na⁺, Ca⁺⁺, SO₄⁻⁻, Cl⁻) عالية مما يطرح مشكل حقيقي حول صلاحية هذه المياه خاصة للسقي.

الكلمات المفتاحية: جيب مائي - صعود المياه - مياه قذرة - تلوث عضوي - وادي سوف.

Résumé

La nécessité de préserver les ressources destinées à la consommation humaine est une priorité affichée tant au niveau national qu'à l'échelle de la demande progressive donc avoir des dispositions qui concernent tant la lutte contre les pollutions que la gestion quantitative des ressources. De très nombreuses causes de pollution, d'origine naturelle (géologique) ou humaine (rejets urbains et agriculture surtout), ont un impact sur la qualité des eaux naturelles.

La vallée su Souf représente une unité de ressource en eau, elle est située au Sud-Est algérien, elle occupe une superficie de 11738 km², représente 18 communes administrativement et englobe un nombre de population de 486170 habitants. Elle possède un réservoir très important en matière des ressources hydriques représenté par trois niveaux aquifère qui sont : la nappe phréatique, le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI).

La Willaya d'Oued Souf souffre d'un énorme problème « la remontée des eaux de la nappe libre », qui causé une dégradation totale de la qualité des eaux, suite au mélange de ces dernières avec les fosses sceptiques en l'absence d'un réseau d'assainissement global. Ce problème à touché beaucoup plus la ville d'El Oued ce qui poussé les autorités de la wilaya de réaliser un réseau d'assainissement local pour collecter les rejets urbains de la ville d'El Oued, et de les évacuer à l'Ouest de la ville (région de Chott) à l'air libre en dehors de toutes mesures de protection.

La présente étude traite les risques de pollutions dans la zone de rejet à l'Ouest de la ville d'El Oued (N-E Algérien), menacée par deux origines anthropique et naturelle, qui se sont multiplie dans la région. Six campagnes de mesures hydrochimiques ont été faites : trois durant l'année 2007 (avril, juin et septembre), deux durant l'année 2010 (janvier et avril) et une en mai 2012 après l'arrêt de rejet. L'analyse des échantillons et leur interprétation ont permis l'établissement d'une carte de l'indice de pollution organique. Cette dernière a montré que le terrain a un pouvoir autoépuratoire élevé ce qui réduit considérablement les effets de la pollution d'origine organique. Cette tendance est confirmée par les valeurs de la dispersivité longitudinale α_L faibles, déterminées au niveau de la zone de rejet. Pour ce qui est des teneurs de certains éléments majeurs naturels (Na^+ , Ca^{++} , SO_4^- , Cl^- ...), celles-ci restent élevées et posent un sérieux problème d'aptitude de ces eaux à l'irrigation.

Mots clés : *Nappe libre - Remonté des eaux - Eaux usées - Pollution organique - Oued Souf.*

Abstract

The need to preserve resources for human consumption is a priority displayed both nationally and across the gradual application therefore have provisions that concern both protection against pollution that the quantitative management of resources. Numerous causes of pollution, both natural (geological) or human (especially agriculture and urban waste), have an impact on the quality of natural water.

The valley of Souf is a unit of resource water located in south-east Algeria; it occupies a surface of 11738 km², represents 18 communes administratively and includes a population of 486170 inhabitants. It has a very important reservoir in water resources represented by three aquifer levels are: phreatic table, the Terminal Complex (TC) and the Continental Intercalary (CI).

The Willaya Oued Souf suffers from an immense problem "the rising of the water table in the unconfined aquifer", which caused a total degradation of its quality; by 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 wilaya authorities to achieve a sewerage system for collecting local urban discharges from the center of El Oued, and its evacuation to the West (Chott region) in open air outside any protective measures.

This study deals with the risk of pollution in the discharge area in the west of El Oued center (SE Algerian), threaten by both entropic and natural effects which have been multiplied in the region. Three hydrochemical surveys were conducted in the discharging area and its vicinity during 2007 (april, june and september), two during 2010 (january and april) and one in may 2012. Interpretation of analysed samples shows that pollution has a very short extension and the soil has an important self purifying role that reduces the effects of organic pollution that is shown in the established map of index of organic pollution. The low value of longitudinal dispersivity α_L of the soil, evaluated in the discharging area, confirms this trend. We note that the content of some major natural elements such as (Na⁺, Ca⁺⁺, SO₄⁻, Cl⁻ ...etc) is high and the use of the groundwater is not advised for irrigation.

Keywords: *Unconfined aquifer- Rising water level - Wastewater- Organic pollution - Oued Souf.*

Table des matières	
Titre	Page
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : Situation géographique</i>	
1. Situation géographique.....	4
2. Evolution de la population.....	4
3. Le cadre socioéconomique.....	5
4. Aperçu pédologique.....	7
5. Développement agricole.....	7
2. Le relief de la région.....	8
7. La topographie de la région d'étude.....	11
8. Conclusion.....	12
<i>Chapitre II : Etude géologique</i>	
1. Introduction.....	13
2. Géologie régionale.....	13
2.1. La structure synclinale du Bas Sahara.....	13
2.1.1. La sédimentation continentale.....	13
2.1.2. La sédimentation laguno-marine.....	14
2.1.3. L'orogénèse atlasique et ses conséquences.....	16
2.1.4. La mise en place du tertiaire continentale.....	16
3. Géologie locale.....	16
4. Stratigraphie.....	18
4.1. Formation de l'ère Secondaire.....	18
4.1.1. Le Crétacé.....	18
4.2. Le Tertiaire.....	21
4.3. Quaternaire.....	22
5. Evolution tectonique.....	22
5.1. La phase panafricaine.....	22
5.2. La phase calédonienne.....	22
5.2.1. La phase distensive du Cambro-Ordovicien.....	22
5.2.2. Phase de compression tectonique (Caradoc).....	23
5.2.3. Phase calédonienne tardive.....	23
5.3. La phase hercynienne.....	23
5.3. 1. La phase précoce.....	23
5.3. 2. La phase tardive.....	23
5.4. La phase post-hercynienne.....	23
5.5. La phase Autrichienne.....	24
6. Interprétation des coupes géologiques.....	24
7. Conclusion.....	26
<i>Chapitre III : Etude Géophysique</i>	
1. Introduction.....	27
2. Mesure de la résistivité du sous-sol.....	28
3. Sondage électrique.....	29
4. Exécutions des mesures.....	29
5. Théorie d'interprétation des sondages électriques.....	29
5.1. La méthode de superposition à l'aide des abaques.....	32
5.2. La méthode de <i>HUMMEL</i> dite aussi de réduction (Partial Curve Matching).....	32
5.3. La méthode comparative à l'ordinateur.....	32

6. Représentation des résultats.....	33
6.1. Carte de résistivité apparente pour différents AB.....	33
6.2. Carte du toit du substratum.....	34
6.3. Coupes géoélectriques.....	34
7. L'objectif de l'étude.....	34
8. L'exécution des mesures.....	34
9. Présentation et analyse des résultats.....	36
9.1. Echelle des résistivités.....	36
9.1.1. Le sondage électrique vertical 15 et le forage P56.....	36
9.1.2. Le sondage électrique vertical 131 et le forage P51.....	37
9.1.3. Le sondage électrique vertical 76 et le forage P43.....	38
9.1.4. Le sondage électrique vertical 104 et le forage P44.....	39
9.1.5. Le forage P46 et le sondage électrique 30.....	40
9.2. Les coupes géoélectriques.....	41
9.2.1. Coupe géoélectrique à travers le profil A.....	42
9.2.2. Coupe géoélectrique à travers le profil B.....	42
9.2.3. Coupe géoélectrique à travers le profil C.....	43
9.2.4. Coupe géoélectrique à travers le profil D.....	44
9.2.5. Coupe géoélectrique à travers le profil E.....	45
9.2.6. Coupe géoélectrique à travers le profil F.....	46
9.2.7. Coupe géoélectrique à travers le profil G.....	47
9.2.8. Coupe géoélectrique à travers le profil H.....	47
9.2.9. Coupe géoélectrique à travers le profil I.....	48
9.3. Commentaire de la carte du substratum argileux.....	49
10. Conclusion.....	50
<i>Chapitre IV : Etude climatique</i>	
1. Introduction.....	51
2. Les précipitations.....	51
2.1. Répartition interannuelle des précipitations.....	51
2.2. Répartition moyenne mensuelle.....	52
2.2.1. Période 1913-1953.....	52
2.2.2. Période 1976-2008.....	53
2.3. Répartitions saisonnières des précipitations.....	54
3. La température.....	54
3.1. Période 1913-1938 d'après Seltzer, 1946.....	54
3.2. Période 1976-2008.....	55
4. Le climat de la région.....	56
4.1. Indice de De. Martonne.....	56
4.2. Le climat – gramme de L. Emberger.....	57
4.3. Méthode de H. Gaussen et F. Bagnouls.....	57
4.4. Méthode d'Euverte.....	59
5. Bilan hydrique.....	59
5.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	59
5.2. Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement (De).....	60
5.2.1. Formule de TURC.....	60
5.2.2. Méthode de WUNDT.....	61
5.2.3. Formule de COUTAGNE.....	61
6. L'humidité relative de l'air.....	61
7. La durée d'insolation.....	62
8. Le vent.....	63

9. Conclusion.....	63
Chapitre V : Etude hydrogéologique	
1. Introduction.....	65
2. Cadre hydrogéologique.....	65
2.1. Le Continental Intercalaire (BARREMO-ALBIEN).....	67
2.2. Complexe Terminal (PONTIEN).....	67
2.3. Nappe Phréatique.....	68
3. Aperçu historique.....	68
4. Etablissement et interprétation des cartes piézométriques.....	69
4.1. Interprétation des cartes piézométriques.....	72
4.2. Variation du niveau piézométrique entre Février 1993 et Avril 2002.....	72
4.3. Variation du niveau piézométrique entre Avril 2001 et Avril 2002.....	72
5. Interprétation de la carte de perméabilité.....	74
6. Profils de variation de la surface piézométrique.....	74
7. Essais de pompage.....	78
7.1. Débits Spécifiques.....	80
7.2. Transmissivité et perméabilité.....	82
7.3. Porosité efficace n_e	87
8. Conclusion.....	87
Chapitre VI : Détermination des paramètres hydrodispersifs	
1. Introduction.....	89
2. Analyse théorique.....	89
2.1. Notion concernant le milieu poreux.....	89
2.2. Physique des transferts.....	90
2.2.1. La convection.....	90
2.2.2. La loi de Darcy.....	90
2.2.3. Porosité cinématique.....	90
2.2.4. Vitesse effective.....	90
2.2.5. Dispersion.....	91
2.2.6. Dispersion longitudinale.....	91
2.2.7. Dispersion transversale.....	91
2.3. Echanges.....	91
2.3.1. Adsorption Désorption.....	91
2.3.2. Echanges eau libre-eau liée.....	92
3. Manipulation.....	92
4. Détermination graphique des paramètres hydrodispersifs.....	93
5. Conclusion.....	98
Chapitre VII : Etude hydrochimique de la vallée du Souf	
1. Introduction.....	99
2. Les faciès chimiques.....	99
2.1. Formule caractéristique de STABLER.....	99
2.2. Diagramme de Piper.....	100
3. Paramètres physiques.....	101
3.1. La température.....	101
3.2. Le pH.....	102
3.3. Cartes de conductivité.....	102
4. Cartographie hydrochimique.....	103
4.1. Cartes d'inventaire.....	103
4.2. Cartes de calcium.....	106

4.3. Carte du magnésium.....	106
4.4. Carte de sodium.....	106
4.5. Carte du chlorure.....	110
4.6. Carte du sulfate.....	110
4.7. Cartes des concentrations des Nitrates (mars 1993, mars 1998, mars 2000 et avril 2002).....	113
4.8. Carte de résidu sec.....	116
5. Variation des concentrations des nitrates entre mars 1993 et avril 2002.....	116
6. Relation entre la conductivité et le résidu sec.....	116
7. Variation de la conductivité entre Mars 1993 et Avril 2002.....	116
8. Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants.....	119
8.1. Origine des éléments Na^+ et Cl^-	119
8.2. Origine du calcium.....	119
8.3. Le rapport $r \text{Ca}^{++} / r \text{Mg}^{++}$	119
9. Indice d'échange de base (ieb).....	119
10. Qualité chimique des eaux.....	122
10.1. Potabilité des eaux.....	122
10.1.1. Selon l'OMS.....	122
10.1.2. Normes selon le degré hydrométrique total (DHT).....	122
11. Aptitudes des eaux à l'irrigation.....	123
11.1. La salinité.....	123
11.2. Eaux peu salées.....	123
11.3. Eaux à forte teneur en sodium.....	124
12. Conclusion.....	126

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

1. Introduction.....	127
2. Matériels et Méthodes.....	127
2.1. Prélèvements.....	127
2.2. Paramètres mesurés in-situ.....	128
2.3. Analyse des éléments chimiques.....	128
3. Résultats et discussion.....	130
3.1. Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ).....	130
3.1.1. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	130
3.1.2. Conductivité électrique.....	131
3.2. Les éléments de la pollution.....	132
3.2.1. Les éléments majeurs.....	132
3.2.1.1. Calcium (Ca^{++}).....	132
3.2.1.2. Magnésium (Mg^{++}).....	132
3.2.1.3. Chlorure (Cl^-) et Sodium (Na^+).....	133
3.2.1.4. Potassium (K^+).....	134
3.2.1.5. Sulfates (SO_4^{--}).....	134
3.2.1.6. Bicarbonates (HCO_3^-).....	135
3.2.2. Cycle de l'azote.....	135
3.2.2.1. Ammonium NH_4^+	136
3.2.2.2. Nitrites NO_2^-	137
3.2.2.2. Nitrates NO_3^-	138
3.2.3. Les éléments mineurs naturels.....	139
4.2.3.1. Phosphate PO_4^{3-}	139
3.2.4. Les paramètres de pollution organique.....	139
3.2.4.1. Les matières en suspensions (MES).....	139

3.3.4.2. La demande biochimique en oxygène (DBO ₅).....	140
4. Faciès chimique des eaux.....	141
5. Origine des éléments chimiques.....	142
5.1. Les éléments Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻	142
5.2. Les éléments Na ⁺ et Cl ⁻	143
5.3. Les éléments HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ et SO ₄ ²⁻	144
5.4. Les éléments Cl ⁻ et SO ₄ ²⁻	144
6. Analyse en composantes principales (ACP).....	145
6.1. Principe.....	145
6.2. Résultats et interprétations.....	146
7. Etablissement de la carte de l'indice de la pollution organique (IPO).....	149
7.1. La composition chimique globale.....	149
7.2. Les indicateurs géologiques.....	149
7.3. Les indicateurs de pollution organique.....	149
8. Interprétation des cartes de l'indice de la pollution organique.....	153
9. Les indicateurs d'eutrophisation.....	154
10. Conclusion.....	154

Liste des Tableaux

Tableau	Page
Tableau 1 : Estimation de la population (recensement 2008, source : ONS.).....	4
Tableau 2 : Altitude moyenne des différentes communes du Souf.....	12
Tableau 3 : tableau récapitulatif du volume des travaux de terrain.....	36
Tableau 4 : Caractéristiques géographiques de la station climatique.....	51
Tableau 5 : Précipitations interannuelles (1976 – 2008) ONM d’Oued Souf.....	52
Tableau 6 : Précipitations moyennes mensuelles (1913 – 1953) à Oued Souf.....	53
Tableau 7 : Précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2008) ONM d’Oued Souf.....	53
Tableau 8 : Précipitations saisonnières (1976 – 2008) ONM d’Oued Souf.....	54
Tableau 9 : Moyennes des températures mensuelles (1913 –1938).....	54
Tableau 10 : Moyennes des températures mensuelles (1976 – 2008).....	55
Tableau 11 : Les différents paramètres du climat – gramme de L. Emberger.....	57
Tableau 12 : Les valeurs de P/T déterminées par la Méthode d’Euverte.....	59
Tableau 13 : Bilan hydrique de la station de Guemmar sur une période de 30 ans (1976-2008).....	60
Tableau 14 : Humidité relative moyenne mensuelle (1975 – 2008).....	61
Tableau 15 : La durée d’insolation moyenne mensuelle (1976 – 2008).....	62
Tableau 16 : La vitesse du vent moyenne mensuelle (1976 – 2008).....	63
Tableau 17 : Valeurs des débits spécifiques.....	82
Tableau 18 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon I).....	94
Tableau 19 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon II).....	96
Tableau 20 : Classification hydrochimique des eaux souterraines des deux campagnes selon STABLER.....	100
Tableau 21 : Coefficient de corrélation des paramètres physiques (Conductivité – Résidu sec).....	116
Tableau 22 : Normes de potabilité de l’OMS.....	122
Tableau 23 : Dureté des eaux en °F (Theobald et Gama, 1969).....	123
Tableau 24 : Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.....	124
Tableau 25 : Variation des teneurs en calcium pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	132
Tableau 26 : Variation des teneurs en magnésium pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	132
Tableau 27 : Variation des teneurs en sodium et chlorures pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	133
Tableau 28 : Variation des teneurs en potassium pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	134
Tableau 29 : Variation des teneurs en sulfates pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	135
Tableau 30 : Variation des teneurs en bicarbonates pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	135
Tableau 31 : paramètres et classes de l’IPO.....	150
Tableau 32 : L’IPO et les indicateurs d’eutrophisation pour l’année 2007.....	150
Tableau 32 : L’IPO et des indicateurs d’eutrophisation pour les années 2010 et 2012.....	153

Liste des Figures

Figure	Page
Figure 1 : Situation de la zone d'étude (extrait de la carte Michelin n° 953).....	5
Figure 2 : Photo aérienne de la région du Souf (prise par BG, 2001).....	6
Figure 3 : Photo montrant l'état des palmerais d'El Oued après la remontée.....	6
Figure 4 : L'extension de la zone agricole du Souf (ANRH, 2005).....	8
Figure 5 : Représentation des dunes et d'un Ghout	9
Figure 6 : Carte du relief de la région du Souf.....	10
Figure 7 : Carte topographique de la vallée du Souf.....	11
Figure 8 : Les grandes unités géologiques au Sahara	14
Figure 9 : Coupe schématique nord-sud partielle du Bas Sahara (Cornet, 1964).....	17
Figure 10 : Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gousskov)	17
Figure 11 : Log stratigraphique du Forage F1 dans l'Albien (ANRH, 1993).....	19
Figure 12 : Coupe Géologique N°01.....	25
Figure 13 : Coupe géologique N°02.....	25
Figure 14 : Coupe géologique N°03.....	26
Figure 15 : Quadripôle de Schlumberger.....	28
Figure 16 : Equipotentiels de courant dans un sol homogène.....	29
Figure 17 : Principe du sondage électrique vertical (SEV).....	30
Figure 18 : Utilisation de l'abaque pour deux terrains.....	32
Figure 19 : Interprétation d'un sondage électrique par ordinateur.....	33
Figure 20 : Positionnements des SEV dans la région d'Oued Souf.....	35
Figure 21 : forage P56 et Sondage électrique vertical 15.....	37
Figure 22 : forage P51 et le Sondage électrique vertical 131. SEV 131.....	38
Figure 23 : forage P43 et le Sondage électrique vertical 76.....	39
Figure 24 : forage P44 et le Sondage électrique vertical 104.....	40
Figure 25 : forage P46 et le sondage électrique 30.....	41
Figure 26 : La coupe géoélectrique à travers le profil A	42
Figure 27 : La coupe géoélectrique à travers le profil B.....	43
Figure 28 : La coupe géoélectrique à travers le profil C.....	44
Figure 29 : La coupe géoélectrique à travers le profil D.....	45
Figure 30 : La coupe géoélectrique à travers le profil E.....	46
Figure 31 : La coupe géoélectrique à travers le profil F.....	47
Figure 32 : La coupe géoélectrique à travers le profil G.....	47
Figure 33 : La coupe géoélectrique à travers le profil H.....	48
Figure 34 : La coupe géoélectrique à travers le profil I.....	48
Figure 35 : Carte isobathe des valeurs du substratum argileux de la nappe libre de Oued Souf.....	49
Figure 36 : Variation interannuelle des précipitations (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf.....	52
Figure 37 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1913 – 1953) à Oued Souf.....	53
Figure 38 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf... ..	53
Figure 39 : Histogramme de répartition saisonnières de précipitations (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf.....	54
Figure 40 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (1913 – 1938) à Oued Souf.....	55
Figure 41 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf.....	55
Figure 42 : Abaque de l'indice d'Aridité de De. MARTONNE de la vallée du Souf.....	56
Figure 43 : Clima-gramme de L. EMBERGER de la vallée du Souf.....	58
Figure 44 : Diagramme Ombrothermique de la vallée du Souf	58
Figure 45 : Histogramme d'humidité relative moyenne mensuelle (1997 – 2008) ONM d'Oued Souf.....	62
Figure 46 : Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle (1997 – 2008) ONM d'Oued Souf.....	62
Figure 47 : Histogramme de La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2008) ONM d'Oued Souf.....	63
Figure 48 : Carte hydrogéologique du Sahara Septentrional (UNESCO, 1972 modifiée par Guendouz et al, 2003).....	66
Figure 49 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972).....	67
Figure 50 : Coupe hydrogéologique du Souf.....	69
Figure 51 : Cartes piézométriques pour les différentes campagnes.....	71
Figure 52 : Fluctuations piézométriques entre février 1993 et avril 2002.....	73
Figure 53 : Fluctuations piézométriques entre avril 2001 et avril 2002.....	73

Figure 54 : Carte d'iso valeurs de perméabilité en 10-3 m/s.....	74
Figure 55 : Carte de situation des profils de la nappe phréatique (HPO & BG, 2004).....	75
Figure 56 : Profil Nord Sud de la nappe phréatique dans l'axe Foulia – El Oued – Oglia (HPO & BG, 2004).....	75
Figure 57 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique passant par Magrane (HPO & BG, 2004).....	76
Figure 58 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique par Taghzout (HPO & BG, 2004).....	76
Figure 59 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique par El Oued (HPO & BG, 2004).....	77
Figure 60 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique par Oglia (HPO & BG, 2004).....	77
Figure 61 : Situation des sites des essais de pompages (HPO & BG, 2004).....	78
Figure 62 : Essais par paliers à Kouinine (HPO & BG, 2004).....	79
Figure 63 : Diagrammes de débit spécifique.....	81
Figure 64 : Essai de pompage de longue durée à El-Oued selon la méthode de Cooper & Jacob.....	83
Figure 65 : Essai de pompage de longue durée à Foulia selon la méthode de Cooper & Jacob.....	83
Figure 66 : Essai de pompage de longue durée à Kouinine selon la méthode de Cooper & Jacob.....	84
Figure 67 : Essai de pompage de longue durée à Mihouensa selon la méthode de Cooper & Jacob.....	85
Figure 68 : Essai de pompage de longue durée à Nakhla selon la méthode de Cooper & Jacob.....	86
Figure 69 : Essai de pompage de longue durée à Ourmes selon la méthode de Cooper & Jacob.....	86
Figure 70 : Essai de pompage de longue durée à Kouinine interprété par la méthode de Moench.....	87
Figure 71 : Le perméamètre de mesure.....	92
Figure 72 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps de l'échantillon I.....	95
Figure 73 : graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en fonction de N_p de l'échantillon I.....	95
Figure 74 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps de l'échantillon II.....	97
Figure 75 : graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en fonction de N_p de l'échantillon II.....	97
Figure 76a : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mai 1995).....	101
Figure 76b : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mars 1998).....	101
Figure 77 : Répartition des mesures de pH en Avril 2002 (HPO & BG, 2004).....	102
Figure 78 : Cartes de conductivité électrique de la vallée du Souf.....	104
Figure 79 : Cartes d'inventaire des points d'eau de la vallée du Souf.....	105
Figure 80 : Cartes des concentrations en calcium de la vallée du Souf.....	107
Figure 81 : Cartes des concentrations en magnésium de la vallée du Souf.....	108
Figure 82 : Cartes des concentrations en sodium de la vallée du Souf.....	109
Figure 83 : Cartes des concentrations en chlorures de la vallée du Souf.....	111
Figure 84 : Cartes des concentrations en sulfates de la vallée du Souf.....	112
Figure 85 : Cartes des concentrations en nitrates de la vallée du Souf.....	114
Figure 86 : Cartes des concentrations en nitrates de la vallée du Souf.....	115
Figure 87 : Cartes de Résidu Sec de la vallée du Souf.....	117
Figure 88 : Carte de différence du teneur NO_3^- entre avril 2002 et mars 1993.....	118
Figure 89 : Carte de différence de CE entre avril 2002 et mars 1993.....	118
Figure 90 : Le couple Na^+, Cl^-	120
Figure 91 : Le couple $\text{Ca}^{++}, \text{SO}_4^{-}$	120
Figure 92 : Le couple $\text{Ca}^{++}, \text{HCO}_3^-$	120
Figure 93 : Le couple $\text{Ca}^{++}, \text{Mg}^{++}$	120
Figure 94 : Echange de base.....	121
Figure. 95 : Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R.....	125
Figure 96 : Carte d'inventaire des points de prélèvements en 2007.....	129
Figure 97 : Carte d'inventaire des points de prélèvements (janvier et avril 2010 et mai 2012).....	129
Figure 98 : Variation de pH pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	130
Figure 99 : Variation de CE pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	131
Figure 100 : Relation entre sodium et chlorure.....	134
Figure 101 : Cycle de l'azote.....	136
Figure 102 : Variation des teneurs en ammonium pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	136
Figure 103 : Variation des teneurs en nitrites pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	137
Figure 104 : Variation des teneurs en nitrates pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	138
Figure 105 : Variation des teneurs en phosphates pour les cinq campagnes (Oued Souf).....	139
Figure 106 : Variation des matières en suspensions pour les trois campagnes (Oued Souf).....	140
Figure. 107 : Variation de la DBO_5 pour les quatre campagnes (Oued Souf).....	140
Figure 108 : Diagramme de Piper (janvier, avril 2010 et mai 2012).....	141
Figure 109 : Détermination de l'origine du calcium.....	142

Figure 110 : Détermination de l'origine du sodium.....	143
Figure 111 : Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.....	144
Figure 112 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de rapport Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	145
Figure 113 : ACP des analyses chimiques pour la campagne de janvier 2010.....	147
Figure 114 : ACP des analyses chimiques pour la campagne d'avril 2010.....	148
Figure 115 : Carte de l'indice de pollution organique (IPO) année 2007.....	151
Figure 116 : Carte de l'indice de pollution organique (IPO) année 2010.....	152
Figure 117 : Carte de l'indice de pollution organique (IPO) mai 2012.....	152

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, une ressource minérale indispensable pour toutes les créatures vivantes, c'est une nécessité pour la vie. Avec l'accroissement démographique, l'homme a dû vivre loin des rivières et autres plans d'eau, par conséquent, d'autres sources comme l'eau souterraine furent découvertes. L'eau souterraine a des avantages évidents sur l'eau de surface. Aussi, a-t-elle été le paramètre principal des études sur l'environnement humain. Scientifiquement, ce domaine a été exploré depuis longtemps : *Darcy, 1856 ; Daubree, 1887 et Hadamard, 1932.*

Le Sahara algérien a fait l'objet de plusieurs études géologiques et hydrogéologiques, en vue de l'exploration des nappes d'eaux souterraines, à savoir le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire.

En 1960, *A. Cornet* a achevé l'étude hydrogéologique du Sahara algérien qui est toujours considérée comme une référence dans le domaine. Elle comporte les divers aspects géologiques et hydrogéologiques des nappes aquifères du Sahara algérien. Suite à ces nombreux travaux, une autre vaste étude de ces nappes est engagée en collaboration entre l'Algérie et la Tunisie sous l'égide de L'UNESCO entre 1968 et 1972. D'importants moyens matériels et humains sont alors déployés dans le cadre du projet ERESS (Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional). Cette étude couvre une superficie de 800 000 km² et concerne l'Algérie et la Tunisie. Une actualisation de l'étude ERESS est réalisée et présentée en 1981 dans le rapport PNUD (Actualisation de l'étude des ressources en eau du Sahara Septentrional). L'objectif principal de ces dernières études est l'évaluation de la demande en eau des régions sahariennes entre 2000 et 2010, afin de construire un modèle mathématique du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire, dont les résultats permettront une meilleure exploitation des eaux de ces deux nappes tout en minimisant l'impact sur l'environnement.

Malheureusement, dans plusieurs régions algériennes, surtout celles situées au Sahara, sont confrontées aujourd'hui à des problèmes liées à des aspects quantitatifs et qualitatifs des ressources en eaux dues essentiellement à la remontée des eaux provenant des nappes phréatiques, qui sont néfastes pour les cultures et les habitations. D'une manière générale, les eaux destinées à l'alimentation en eau potable et l'irrigation, ainsi que celles destinées à l'industrie, proviennent surtout des eaux souterraines. De point de vue quantitative, l'eau au Sahara est généralement disponible et ce grâce à d'importants aquifères, surtout au Bas

Sahara (Sahara Septentrional). Toutefois, cette eau a une qualité médiocre dans certaines régions.

Le présent travail porte sur l'analyse qualitative des ressources en eau de la vallée du Souf et l'impact de sa dégradation sur l'environnement. La région du Souf est bien connue par le phénomène de remontée des eaux de la nappe phréatique. En effet, cette nappe superficielle a entraîné l'inondation de la quasi-totalité des Ghouts et des zones basses de la ville d'El Oued et ses périphéries.

Les premières apparitions de ce phénomène remontent à l'année 1969 et ont pris de l'ampleur dans les années quatre vingt. Les principales causes de ce phénomène sont :

- La forte expansion démographique et le développement urbain très rapide et anarchique venant perturber l'équilibre naturel, qui existe auparavant.
- L'utilisation des eaux des nappes profondes (le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire) d'une façon excessive, ce qui a augmenté considérablement le volume des apports, ainsi que les fuites des réseaux d'AEP et l'absence d'un exutoire naturel pour les rejets des eaux d'assainissement.
- L'utilisation accrue et incontrôlée de la ressource particulièrement dans le secteur agricole, surtout par l'irrigation traditionnelle (submersion, raie,...etc.) dépassant de loin les besoins des palmiers.

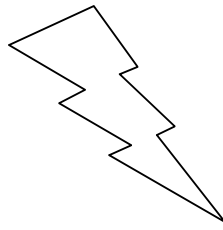
La réunion de tout ces causes est le résultat de plusieurs conséquences sur l'environnement, la santé publique (maladies à transmission hydriques), et sur l'aspect économique (des milliards de dinars sont investis pour trouver une solution adéquate).

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 la présentation du milieu : nous nous sommes donc attachés à définir le cadre général de notre région d'étude, dans le but d'en tirer une monographie géographique, géologique, géophysique et hydroclimatologique.
- 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 hydrodispersifs des échantillons de sables prélevés dans la zone du rejet.

- La troisième partie concerne les études hydrochimiques des eaux de la nappe phréatique de l'Oued Souf et de la pollution dans la zone du rejet. Cette partie est basée sur :
 - La classification des eaux de la nappe phréatique et leur potabilité ;
 - La cartographie des éléments chimiques pour avoir une idée sur la répartition spatiale de la pollution
 - La représentation graphique de l'évolution des éléments chimiques pour avoir une idée sur l'évolution temporelle des différents paramètres de la pollution.
 - L'application de l'analyse en composantes principales (ACP) aux résultats d'analyse des éléments chimiques pour connaître la relation et l'origine commun.
 - Le calcul de l'indice de pollution organique, afin de tirer des conclusions sur le panache pollution causé par le rejet des eaux usées à l'ouest de la ville d'El-Oued.

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 lithostartigraphiques 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 de calcul du bilan hydrique qu'est déficitaire sur toute l'année.

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique

La vallée de l'Oued Souf est située dans le Sahara algérien, au Nord-Est du Grand Erg Oriental. Elle s'étend sur une superficie approximative de 350 000 hectares.

Elle est limitée :

- Au Nord par la zone des chotts (Melghir et Merouanne).
- Au Sud par l'extension de l'Erg Oriental.
- A l'Est par la frontière Tunisienne.
- A l'Ouest par la vallée de l'Oued Righ.

Cette zone se trouve entre les coordonnées géographiques suivantes :

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

Cette région tire son originalité de son architecture typique, caractérisée par les coupoles et par ses palmeraies plantées dans les ghouts (dépressions).

2. Evolution de la population

La région comprend 18 communes qui représentent une population totale de 486170 habitants (248600 masculins et 237570 féminins), selon le recensement de 2008, dont la superficie occupée est de 11738 Km².

Selon le tableau 1, nous remarquons que la commune la plus peuplée est celle d'El-Oued (1826.29 hab/km²), suivie par la commune de Hassani Abdelkerim (411.89 hab/km²), par contre la commune d'El-Ogla à la plus faible densité de population (4.72 hab/km²).

Tableau 1 : Estimation de la population (recensement 2008, source : ONS.)

N°	Commune	Population (hab)	Superficie (km ²)	Densité de la population (hab/km ²)
01	Hassi Khalifa	33115	1112	29.78
02	El-Ogla	6380	1352	4.72
03	Mih Ouansa	17045	1111	15.34
04	El-Oued	140625	77	1826.29
05	Robbah	22910	499	45.91
06	Oued Allenda	7020	712	9.86
07	Bayadha	34185	139	245.93
08	Nakhla	13300	700	19
09	Guemar	41225	1264	32.61
10	Sidi Aoun	12670	480	26.39
11	Trifaoui	8640	474	18.22
12	Magrane	25450	618	41.18
13	Ourmes	6060	443	13.67
14	Kouinine	10590	116	91.29
15	Reguiba	42420	1966	21.57
16	Taghzout	14485	539	26.87
17	Debila	26160	78	335.38
18	Hassani Abdelkerim	23890	58	411.89
Total		486170	11738	41.41

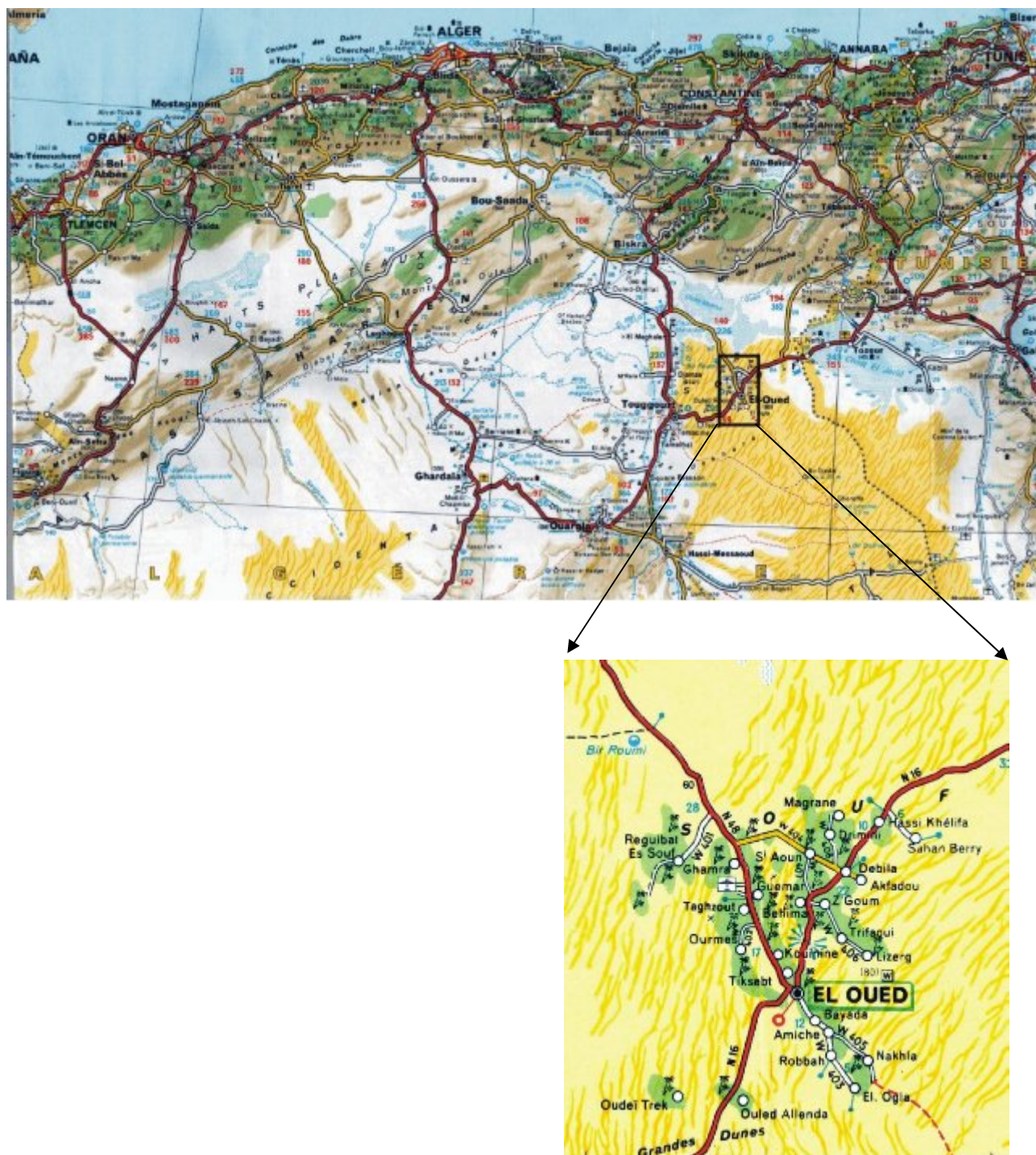


Figure 1 : Situation de la zone d'étude (extrait de la carte Michelin n° 953)

3. Le cadre socioéconomique

L'activité principale a longtemps été représentée par l'agriculture, et notamment l'exploitation du palmier dattier (phoeniculture) en utilisant une méthode originale les ghouts, sortes de cratères creusés et perpétuellement entretenus manuellement par les cultivateurs (*fig. 2*), afin que la profondeur, creusée dans le ghout, aide les racines des palmiers à atteindre l'eau de la nappe phréatique. D'où ce paysage c'est une caractéristique de la vallée du Souf.

Cependant, au fur et à mesure que la région du Souf devenait une cité administrative importante, d'autres activités, initialement embryonnaires, se sont développées, tels que : la commerce, l'artisanat et, plus récemment quelques petites industries. Par ailleurs, la perte de l'importance relative de l'activité phoenicicole a été accélérée par le phénomène de la remontée de la nappe phréatique (fig. 3).



Figure 2 : Photo aérienne de la région du Souf (prise par BG, 2001).



Figure 3 : photo montrant l'état des palmerais d'El Oued après la remontée.

4. Aperçu pédologique

Le sous-sol présente des contrastes frappants. C'est ainsi qu'au Sud, à 6 km d'El-Oued et jusqu'à El-Ogla, 24 Km plus loin, nous remarquons l'absence totale de « Tefza » (pierre à plâtre calcaire), tandis que sur un autre axe allant de El-Oued à Ghamra (en passant par Tiksebt, Kouinine et Guemar) la « Tefza » y occupe tout le terrain.

Une coupe dans le sol nous permet de distinguer :

- **Tercha :**

Formé de fins cristaux qui lui donnent un aspect de grès ; se rencontre en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer.

- **Louss :**

Le Louss est fait de cristaux de gypse en fer de lance imbriqués, il se rencontre sous forme de couches continues, très dures de réseaux mélangés au sable, de bancs isolés ou de colonnes qui semblent être constituées autour d'anciennes racines gypseuses.

- **Salsala ou Smida :**

Se trouve en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer comme le Louss, mais plus fins et plus serrés.

- **Tefza :**

C'est un grès blanc assez dur, constituant la pierre à chauffer qui donnera le plâtre. (Tercha, Louss, Salsala, Smida et Tefza) sont les appellations locales, utilisées pour les différentes couches des sols).

5. Développement agricole

La région du Souf connaît une forte dynamique agricole s'appuyant sur ses potentialités naturelles (hydriques, climatiques, édaphiques...etc.), impulsée par les différents programmes agricoles, ces derniers sont à l'origine de l'introduction de nouvelles cultures notamment la culture de la pomme de terre, qui a pris un essor particulier dans la région.

La Wilaya de l'Oued Souf dispose d'une superficie agricole totale de 1591869 hectares, mais la superficie réellement exploitée est de 51437 hectares. La superficie irriguée est de 49982 hectares. (DSA : Direction de Service Agricole d'El-Oued, 2009).

Cependant la mise en valeur des terres irriguées dans la région d'Oued Souf est possible le long de la frontière Algéro-Tunisienne, qui ne présente pas actuellement de problèmes particuliers d'aménagement.

Quant à l'extension ou à la création de zones de mise en valeur des terres agricoles dans la vallée du Souf est déconseillée pour le moment, sauf si l'irrigation se fait par les eaux de la nappe

phréatique, du fait que l'utilisation des eaux de cette dernière pour l'agriculture permettra de rabattre le niveau d'eau, qui est actuellement proche de la surface du sol.

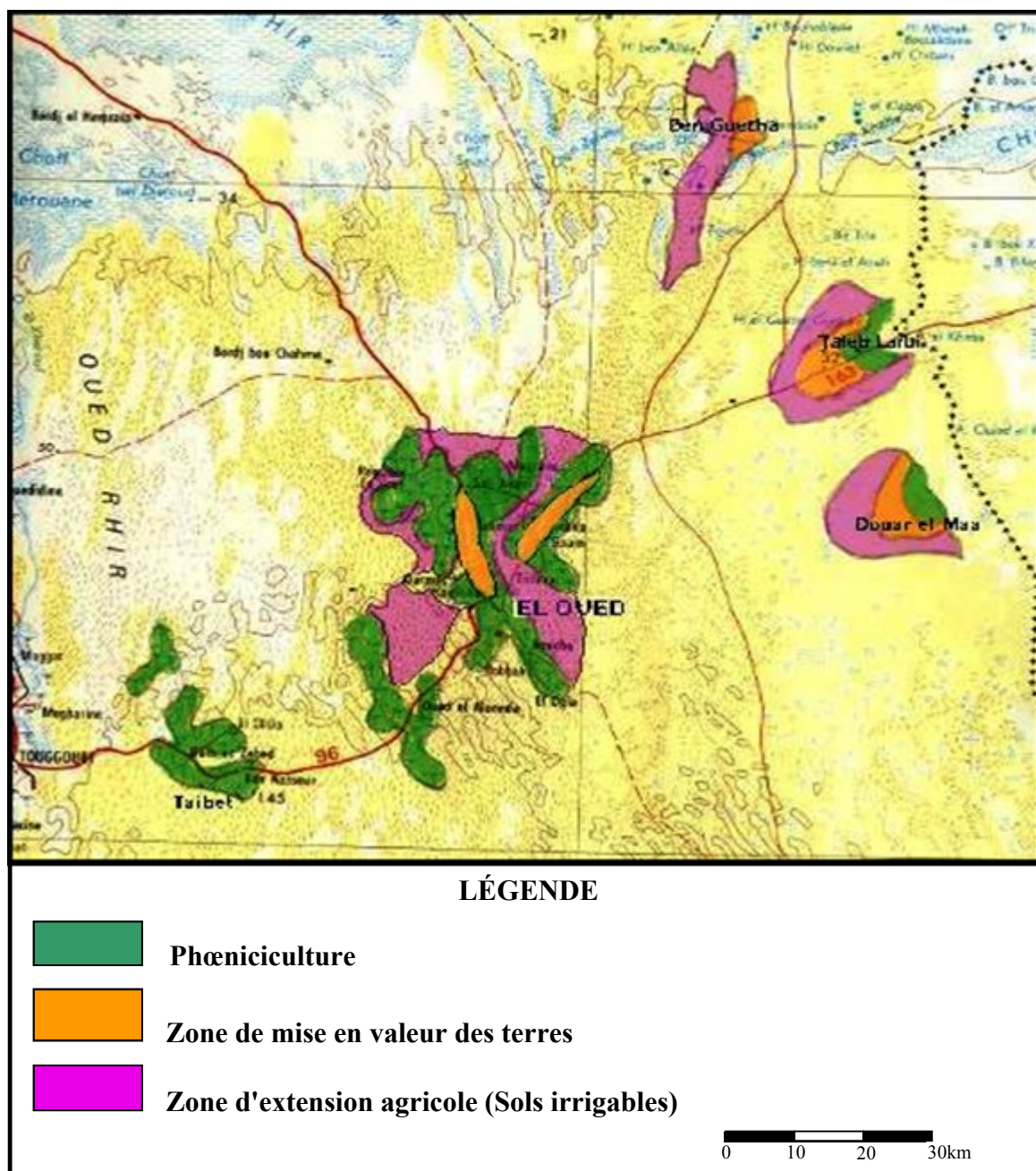


Figure 4 : L'extension de la zone agricole du Souf (ANRH, 2005)

6. Le relief de la région

Le relief de la vallée d'El Oued est caractérisé par l'existence de trois principales formes : Le relief se présente sous un double aspect, l'Erg et le Sahane, dans une région sableuse. Une forme de plateaux rocheux, qui s'étend vers le Sud avec une alternance de dunes et de crêtes rocheuses.

Une zone de dépression, caractérisée par la présence d'une multitude de chotts qui plongent vers l'Est.

Dans le Sud du Souf, on rencontre des dunes immenses et bien différenciées, atteignant parfois 200 m de hauteur; on les appelle les Ghroudes.



Dunes (07/02/2005)



Ghout (07/02/2005)

Figure 5 : Représentation des dunes et d'un Ghout (Site web www.Oued Souf.com)

La différence fondamentale à faire dans la topographie du Souf est celle qui existe entre l'Erg et Sahane:

L'Erg est une région où le sable s'accumule en dunes; c'est la partie la plus importante, elle occupe 3/4 de la surface totale, est relativement épaisse, toujours de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres, les fonçages récents de puits ont montré une épaisseur un peu plus grande qu'on ne le pensait 70-80m dans la partie sud de Souf, 60m à l'endroit d'El-Oued, il s'amincit progressivement vers le Nord du Souf à 30m, et n'est plus qu'une couverture au niveau des sebkhas. Il repose sur un substratum argileux imperméable du Pliocène.

Le Sahane est une région plate et déprimée, parfois caillouteuse, formant les dépressions fermées, entourées par les dunes, au fond desquelles, quelques rares végétaux poussent sur une croute gypseuse.

Le relief du Souf est presque tout entier compris entre trois lignes principales orientées Est-Ouest (*fig. 6*):

- La première ligne au Sud est la courbe de 100m, passe par El-Ogla, Amiche, Oued Ziten et Oued El Alanda.
- La seconde au milieu est la courbe de 75m, passe par Z'goum, Guemar et Taghzout.

- La troisième au Nord est la courbe de 50m, passe par Hassi Khalifa, Magrane et Reguiba.

Il est à signaler que l'altitude diminue du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est pour devenir négative au niveau des Chotts.

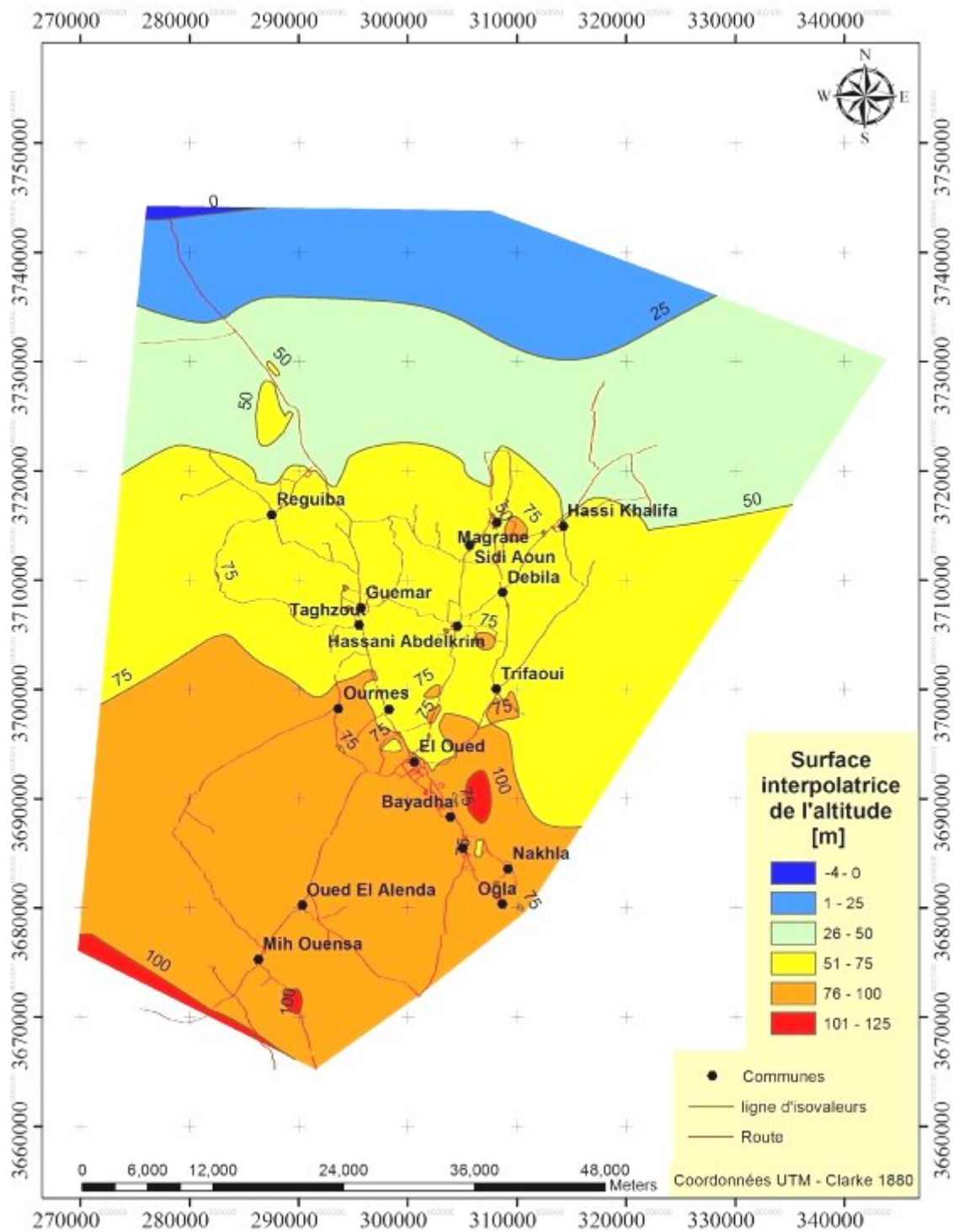


Figure 6 : Carte du relief de la région du Souf.

7. La topographie de la région d'étude

La région de Oued Souf appelée aussi région du Bas-Sahara à cause de la faible altitude et sa situation au Sud-Est du pays. Le point le plus haut se trouve à la cote 125m à la commune d'Essoualah, alors que le point le plus bas se trouve à la cote 29m à la commune de Réguibia (Foulia).

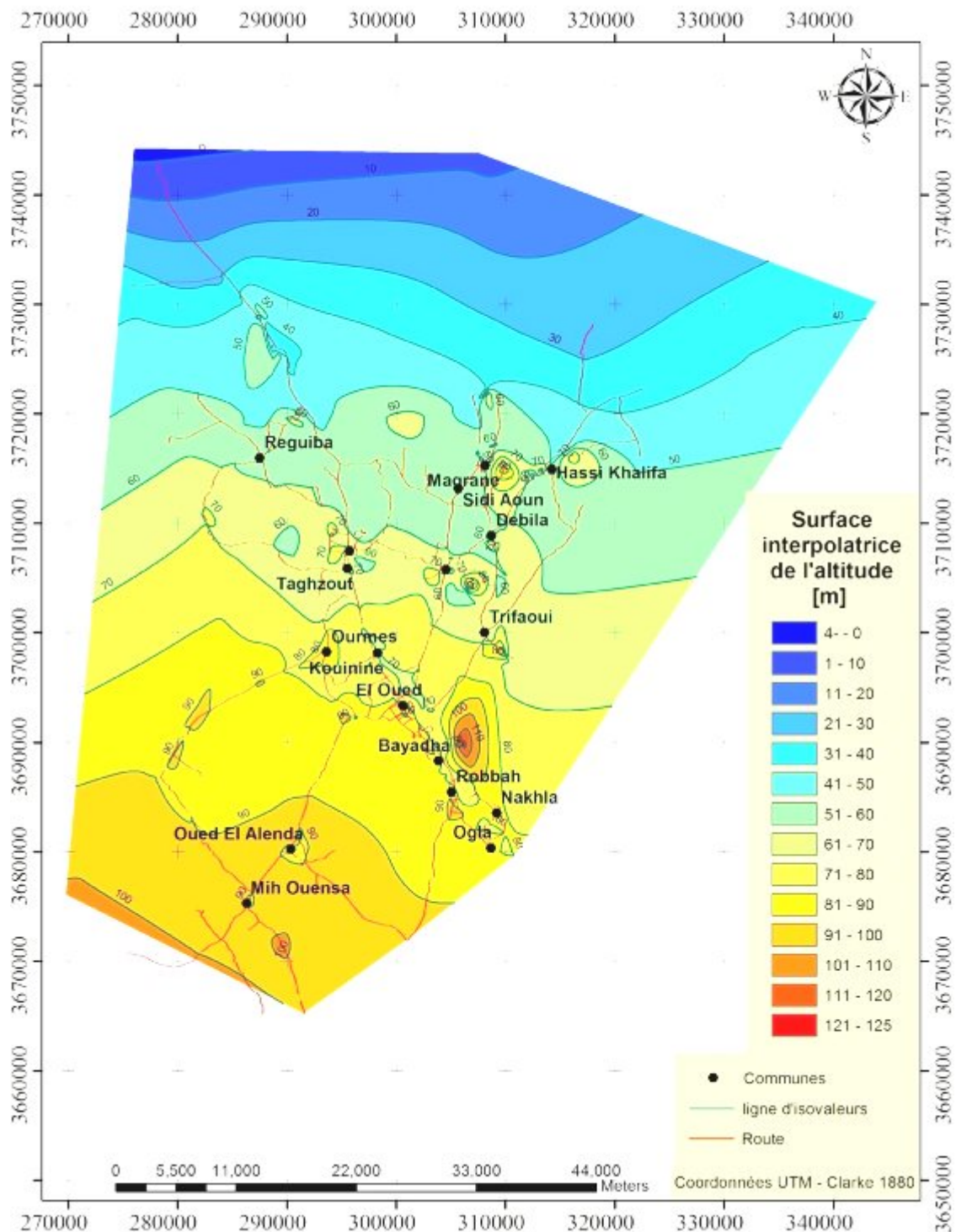


Figure 7 : Carte topographique de la vallée du Souf.

L'altitude moyenne de la région est de 80 m et dénonce une diminution du Sud ver le Nord pour être de 25 m au dessous du niveau de la mer dans la zone des Chotts (ANRH, 2005).

Tableau 2 : Altitude moyenne des différentes communes du Souf.

N°	Commune	Altitude Moy (m)	N°	Commune	Altitude
01	Hassi Khalifa	77	10	Sidi Aoun	54
02	El-Ogla	91	11	Trifaoui	81
03	Mouih Ouansa	91	12	Magrane	60
04	El Oued	77	13	Ourmes	85
05	Robbah	93	14	Kouinine	75
06	Oued Allenda	83	15	Reguiba	57
07	Bayadha	90	16	Taghzout	78.5
08	Nakhla	85	17	Débila	62
09	Guemar	64	18	Hassani Abdelkrim	66

(DHW, 2004)

8. Conclusion

La wilaya d'El Oued englobe les vallées du Souf et de l'Oued Righ. Elle est considérée comme l'une des régions les plus touristiques en Algérie et plus particulièrement au Sahara central. Ses palmeraies, appelées « Ghitanes », ses mosquées, ses Zaouïates, ses ruelles ombragées et ses dunes de sables blancs, enserrant de minuscules palmeraies sur des immenses étendues de sables, ont fait du Souf et de l'Oued Righ l'une des plus belles régions d'Algérie.

Le Souf est en train de trouver une nouvelle cohérence, il a essayé de construire une économie plurielle, dans les paysages actuels du Souf. Les investissements récents dans le domaine de l'agriculture, aidés par le soutien de l'Etat aux agriculteurs a conduit à l'application de nouvelles techniques (pivot centrale pour les pommes de terre, le système goutte à goutte, les serres pour les tomates, ...etc.).

Au fil des années, la culture de pomme de terre de consommation a favorisé une extension remarquable de la superficie cultivée. En effet de nouvelles surfaces sont devenues des aires productives chaque année.

Il ne faut cependant pas mésestimer les risques pour l'avenir qui sont liés à la fragilité écologique, relative à l'eau et héritée des décennies passées, à la fragilité économique, relative aux débouchés extérieurs et qui est liée au nouveau style d'agriculture soufie. Cependant la société a suffisamment fait preuve d'esprit d'adaptation et d'innovation au cours de l'histoire pour pouvoir y faire face, forte de sa structure interne et appuyée sur ses assises externes, elle doit pouvoir s'inscrire dans la durabilité.

Chapitre II

Caractéristiques géologiques de la région

1. Introduction

La géologie est la base de toute étude en hydrogéologie, car elle permet la détermination des horizons susceptibles d'être aquifères, et du fait que l'extension des eaux souterraines dépasse de loin les limites des régions où elle pleut, que les unités aquifères existantes ont une très grande extension et débordent largement au delà de la zone étudiée, il nous a paru préférable de présenter la géologie générale de la région et de donner par la suite en détail la description de chaque formation aquifère.

2. Géologie régionale

La région du Bas Sahara se présente comme une vaste cuvette limitée à l'Ouest par la dorsale du M'Zab, au Sud par les Hamadas du Tademaït et de Tinghert, à l'Est par les plateaux du Dahar Tunisien et au Nord par les monts des Aurès et des Nememchas (*fig. 8*). 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, dressée au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par des Chotts et dont le fond est inférieur au niveau de la mer. La région d'étude fait partie du bassin du Sahara Septentrional de l'Algérie ou plus précisément du bassin oriental.

2.1. La structure synclinale du Bas Sahara

Grâce aux travaux de certains auteurs : *Cornet (1961), Bel et Demargne (1966)* cités par *Nesson (1975)*. La région a connu, en effet, au cours de son histoire géologique de longues phases de sédimentation alternative entre marines et continentales. Les dépôts qui se sont constitués, ont été importants et ont permis l'apparition d'un immense bassin très tôt en cette partie du Sahara et qu'il a été presque constamment affecté par des mouvements de subsidence (*fig. 9*).

2.1.2. La sédimentation continentale

Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis des mouvements post-hercyniens. Ils ont soulevé des massifs (Hoggar), ondulé la couverture sédimentaire primaire et affaissé le Sahara Nord Oriental. L'érosion éolienne, alors très vive, a arraché du Hoggar et des Tassilis, des matériaux qui ont été, par la suite transportés par les eaux vers la cuvette au Nord. Avec l'abaissement des reliefs, l'érosion devenant moins vive et les écoulements moins puissants ; des masses considérables de sables et d'argiles sont alors abandonnées sur la cuvette, recouvrant cette dernière d'un matériau uniforme.

Peu épais au Sud, ces dépôts deviennent de plus en plus puissants vers le Nord pour atteindre environ 2000 m. Un tel entassement de sédiments traduit l'existence d'une zone de subsidence, située sur la bordure septentrionale du socle africain. Depuis, cette région, se produisent,

à plusieurs reprises, des transgressions marines, au Jurassique et au Crétacé inférieur par exemple. Ces dernières sont de courte durée et l'essentiel des sédiments accumulés à cette époque sont des sables éoliens et fluviatiles et des argiles continentales. L'ensemble de ces dépôts, dont les sables ont été transformés en grès poreux est appelé : Continentale Intercalaire, car il apparaît dans l'échelle stratigraphique après les formations, résultant d'une transgression marine d'époque Cénomaniennne.

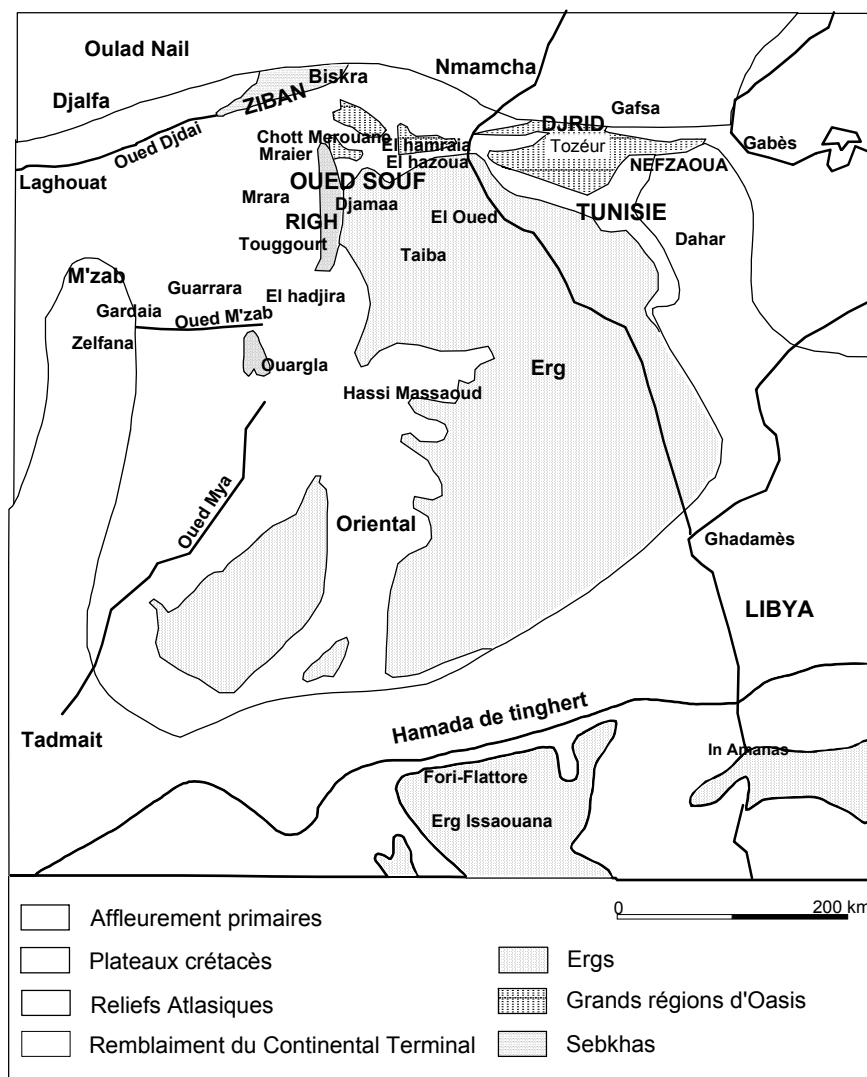


Figure 8 : Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1975)

2.1.3. La sédimentation laguno-marine

Sur les alluvions, uniformément épandues du Continental Intercalaire, apparaît au Vraconien un régime de lacs et de lagunes, plus au moins douces ou salés, résultant du retrait de la mer. Ce régime a engendré des dépôts alternés d'argiles, de dolomies, d'argiles sableuses, de grès à ciment calcaire. Avec le Cénomanienn inférieur, une mer peu profonde s'avance vers le Sud jusqu'aux Tassilis. Cependant, elle connaît plusieurs phases de régression. Ses dépôts se composent d'une alternance d'argile et d'anhydrite. Le Cénomanienn supérieur est plus

franchement marin avec des dépôts de dolomie et de calcaire dolomitique, disposés en bancs de quelques mètres d'épaisseur, entre lesquels apparaissent encore de l'anhydrite et de l'argile. Faciès et épaisseur des dépôts varient vers le Nord-Est : les carbonates deviennent plus importants et la puissance des bancs s'accroît. Ils indiquent l'origine vraisemblable de la transgression Cénomaniennne.

Au Turonien, un régime marin franc responsable du dépôt des calcaires et des dolomies s'établit sur l'ensemble du Sahara algérien. Le banc carbonaté est homogène sur toute son étendue, par endroits, leur épaisseur peut dépasser les 100 m. Des variations de faciès peuvent être observées, légèrement lagunaire au Sud, il devient plus franchement marin au centre et au Nord. Ce changement de faciès s'accompagne d'un épaississement des sédiments qui montre que le rebord de la plate forme est toujours affecté par des mouvements de subsidence.

Dès la fin du Turonien, la mer est remplacée par des lagunes dont les eaux sont moins profondes et parfois disparaissent entièrement, provoquant des émergences momentanées. Les dépôts se présentent alors par une alternance irrégulière de bancs d'une puissance de quelques mètres seulement, constituent d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel. L'anhydrite et le sel peuvent constituer des couches de dix mètres et plus. L'ensemble de ces dépôts, dont l'épaisseur varie de 0 à 600 m, appartient au Sénonien inférieur lagunaire. Comme les dépôts précédents, celui-ci voit sa puissance s'accroître rapidement vers le Nord.

Une nouvelle transgression marine se manifeste au Sénonien supérieur. Elle est responsable du dépôt de dolomies, de calcaires dolomitiques et d'intercalations de marnes, d'argiles et quelques fois d'anhydrite. Leur faciès un peu varié, mais leur épaisseur augmente régulièrement vers le Nord. Tandis que, se produit la subsidence Nord-Orientale, révélée par un accroissement des épaisseurs des dépôts carbonatés du Sénonien et de l'Eocène, un mouvement d'exhaussement se manifeste au Nord-Ouest. Mais la sédimentation dans le Sahara Nord Oriental est peu affectée par ces mouvements. Les calcaires à silex, que l'on rencontre au sommet du Sénonien, se retrouvent dans l'Eocène ; seule la présence de nummulites les distingue. Pourtant les calcaires prédominent les dolomies et les évaporites qui deviennent rares.

Après l'Eocène inférieur, la mer n'occupe plus qu'un golfe très réduit dans la partie septentrionale de la cuvette. Sa faible profondeur et son extension limitée, au Sud à l'embouchure de l'Oued M'Zab, en font une mer résiduelle où se déposent alternativement des calcaires, des argiles, des marnes et de l'anhydrite. Cet Eocène évaporitique achève d'ailleurs sa formation à l'Eocène moyen quand la mer se retire définitivement de la plateforme saharienne. Désormais, le modelé du Sahara sera, alors, le fait des agents atmosphériques, de l'eau et du vent qui enlèvent les sédiments d'ici pour les accumuler ailleurs.

2.1.4. L'orogénèse atlasique et ses conséquences

Nous avons noté précédemment que la mer se retire définitivement pendant le début du Tertiaire. Le contrecoup de l'orogénèse atlasique sur le socle saharien est à l'origine de l'apparition de déformations à grand rayon de courbure. Les calcaires Crétacés du M'Zab sont transformés en dorsale, ceux de Tadmaït en cuvette. Au Sud, l'axe Amguid-El Biod s'effondre pour faire place à un axe synclinal méridien qui se prolonge jusqu'aux Aurès.

Des axes secondaires apparaissent aussi çà et là : citons la ride anticlinale NW-SE, la ride de Sidi-Rached et celle de Sidi-Khelil dans l'Oued Righ.

La tectonique atlasique a également d'autres conséquences : les bancs rigides de la couverture sédimentaire saharienne, celui du Turonien et celui du Sénonien et de l'Eocène, sont affectés par de nombreuses diaclases, fractures et même de failles.

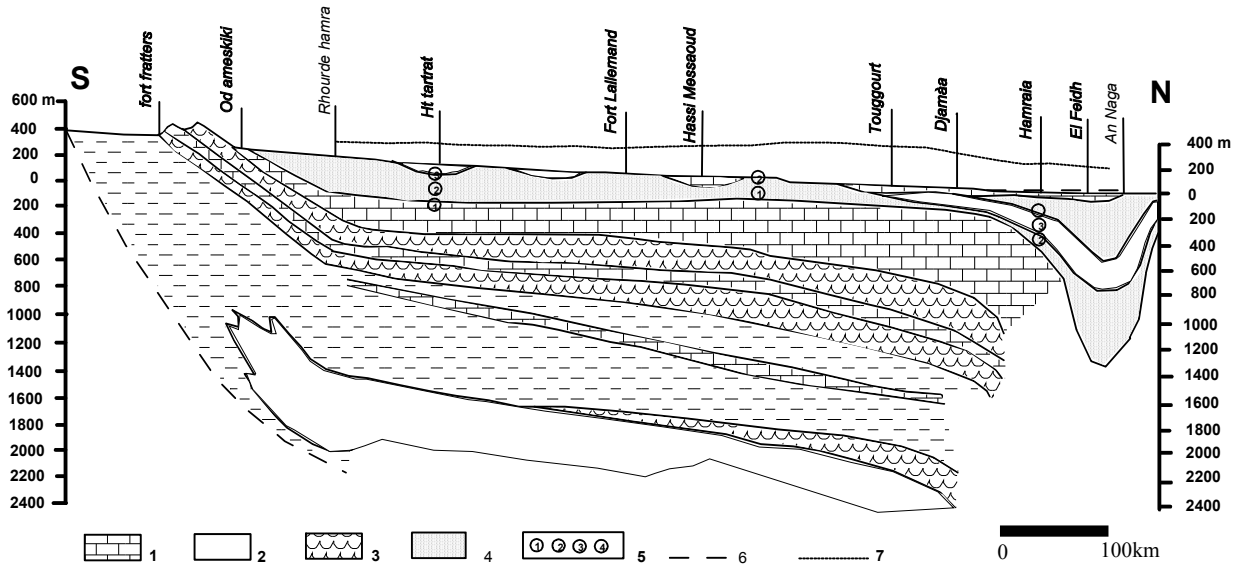
2.1.5. La mise en place du Tertiaire continental

Les hautes montagnes de l'Atlas subissent surtout à partir du Miocène, une érosion intense qui permet la construction d'un vaste glacis de piémont composé de sables et d'argiles rouges reposant, en discordance, sur des terrains variés du Primaire à l'Ouest et de l'Eocène à l'Est. Ces terrains fluvio-lacustres recouvrent d'immenses étendues de part et d'autres de la dorsale M'Zab émergés et s'étalent très loin vers le Sud où ils forment aujourd'hui le substratum des grands ergs. Leur épaisseur varie de quelques mètres à plus de 2000 m dans la fosse Sud aurasienne, toujours affectés par la subsidence. Grâce à la présence dans l'Aurès de Miocène inférieur marin daté par des fossiles, nous pouvons attribuer aux formations continentales supérieures un âge Pontien. Par analogie de faciès nous pouvons, vers le Sud, reconnaître le Pontien, lorsque le Miocène marin est absent.

Le reste des dépôts peut appartenir au Miocène inférieur et même peut être localement à l'Oligocène. Le Sahara, alors entièrement émergé, ne pouvait fournir de sédiments continentaux bien différents de ceux étalés plus tard, d'où une grande difficulté à les distinguer. Quelque soit l'âge exact de ces formations du Tertiaire continental, il importe de savoir quelle est leur nature car leurs possibilités aquifères en dépendent essentiellement.

3. Géologie locale

Les formations des dunes éoliennes, atteignant des dizaines de mètres de hauteur, couvrent la zone d'étude. Au dessous se trouve des formations continentales du Quaternaire représentées par une croûte constituée d'un mélange d'évaporites, de sables et d'argiles, formant une couche plus au moins tendre, et qui est utilisée par les habitants dans la construction des maisons et l'aménagement de pistes (*fig. 10*).



1. calcaire, dolomie. - 2. Marnes, argiles. - 3. Gypse, anhydrite. - 4. Sables. - 5. niveaux stratigraphiques du continental terminal
6. niveau hydrostatique du continental terminal. - 7. niveau hydrostatique du continental intercalaire

Figure 9 : Coupe schématique Nord-Sud partielle du Bas Sahara (Cornet, 1964)

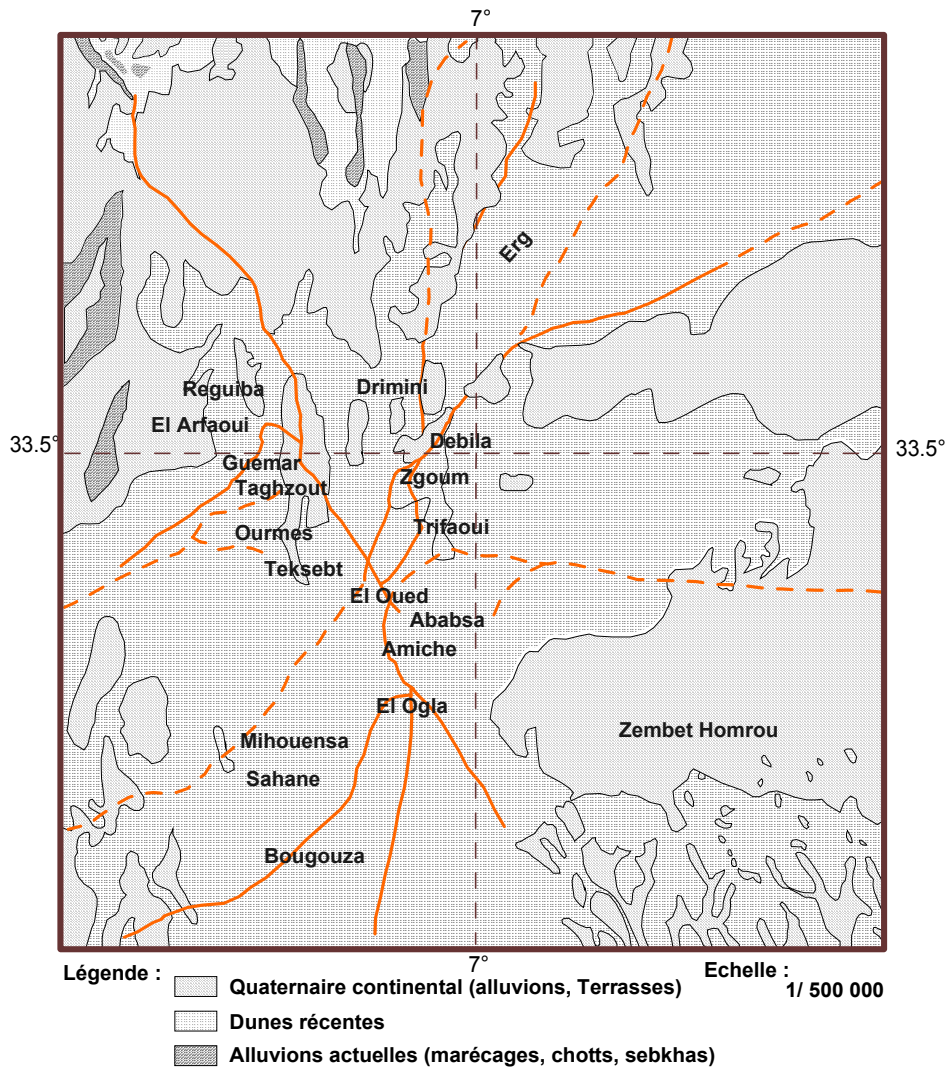


Figure 10 : Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gousov 1952)

4. Stratigraphie

Grace aux travaux de nombreux auteurs qui ont travaillé et publié des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Sahara Septentrional, aussi bien dans le cadre de la géologie pétrolière, que par des chercheurs universitaires ; *Savornin, 1931 ; Karpoff, 1952 ; Cornet, 1964 ; Furon, 1964 ; Busson, 1967-1971 et Conrad, 1969*, et sur la base d'un log litho-stratigraphique de forage de l'Albien, réalisé par l'ANRH (1993), dans la région de l'Oued Souf, nous citons les principales strates répétées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers le plus récente (*fig. 11*) :

4.1. Formation de l'ère Secondaire

4.1.1. Le Crétacé :

Nous abordons ici une époque géologique intéressante pour deux raisons, d'une part, le Crétacé affleure sur les bords du Bas Sahara et en constitue le substratum sus-jacente au Paléozoïque (*Karpoff, 1952*) ; d'autre part, l'étendue des affleurements crétacés est très importante en Algérie Orientale.

➤ *Crétacé inférieur :*

Le Barrémien : capté à partir de 1619 m (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 231 m.

L'Aptien : constitué des formations dolomitiques marneuses et marnocalcaires, d'après le log de forage F1 (*fig.11*), nous remarquons que l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 m.

L'Albien : Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès, de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile.

La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 m, alors que dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 m.

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

Dans la zone d'étude, l'épaisseur de cet étage varie entre 250 et 300 m. En raison de l'importance de ses niveaux argileux, il constitue une importante couverture de l'Albien.

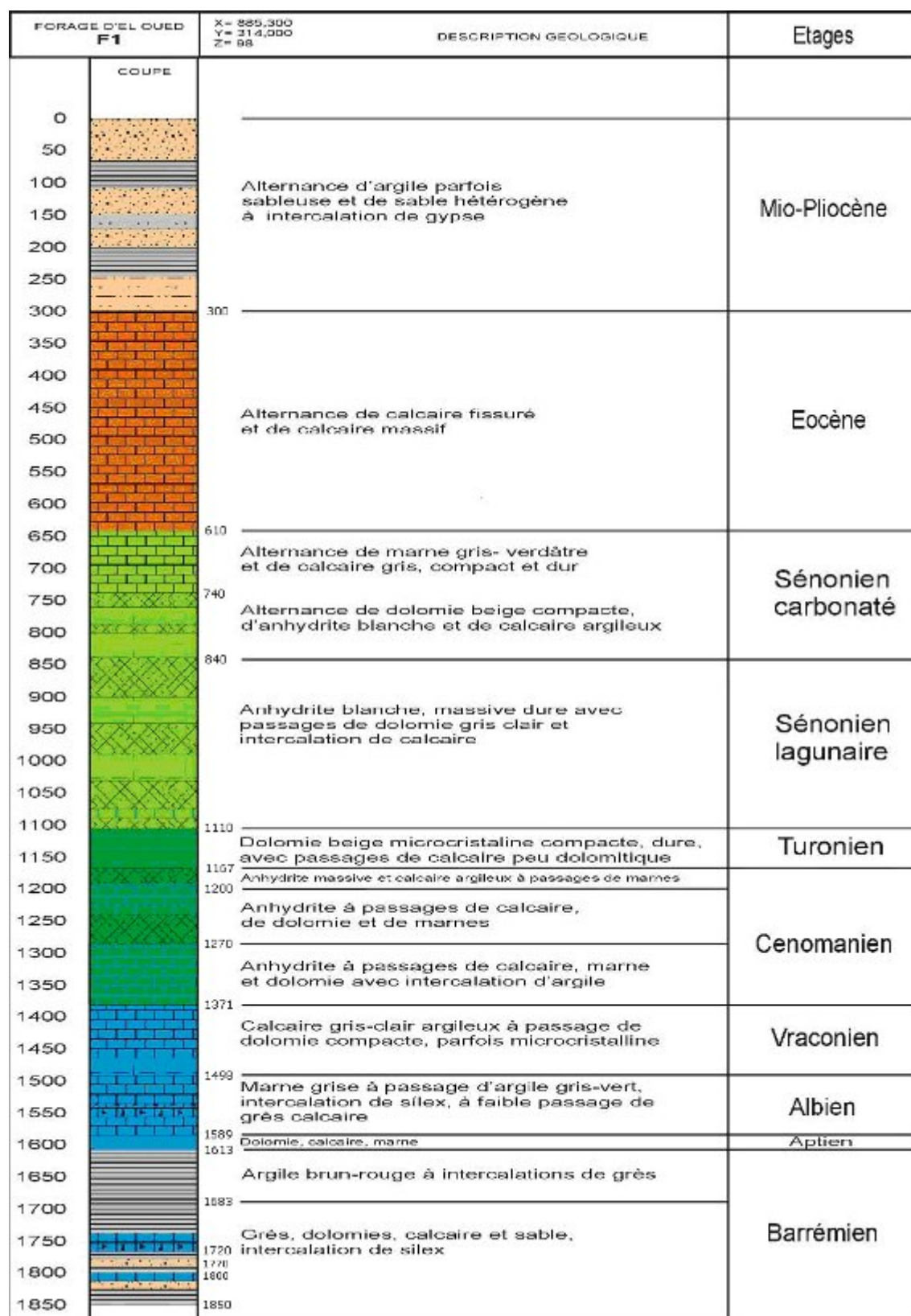


Figure 11 : Log stratigraphique du Forage F1 dans l'Albien (ANRH, 1993)

➤ **Crétacé moyen :**

Le Cénomaniens : Cet étage marque, pour la première fois, depuis le Paléozoïque le retour de la mer au Sahara jusqu'aux régions les plus lointaines. Selon *Karpoff (1952)*, son faciès est partout lagunaire ou détritique, nous pouvons alors en déduire que le Bas Sahara, au moment de cette transgression était partout ramené à une pénéplaine extrêmement plate. D'après le log des forages (*fig. 11*), il est constitué d'anhydrites à passage de calcaires et marnes, d'intercalation d'argiles qui constitue la limite inférieure des calcaires, des marnes, des dolomies et d'argiles. Le Cénomaniens 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.

Le Turonien : Au Turonien, le régime marin persiste dans le Bas Sahara et la mer présente le maximum d'extension. Nous trouvons des dolomies, moins de marnes et de gypse Turonien. Dans l'ensemble, il est calcaire, dolomitique et marneux à la base et dolomitique ou calcaire au sommet. Son épaisseur varie d'un endroit à l'autre et dépasse parfois les 650 m.

➤ **Crétacé supérieur**

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 faciès, l'un correspond au Sénonien lagunaire situé à la base et l'autre au Sénonien carbonaté qui représente la partie supérieure.

- **Sénonien lagunaire** : La limite inférieure du sénonien lagunaire est généralement nette. En effet, les évaporites et argiles sénoniennes sont aisément différenciables des calcaires et dolomies du Turonien. Le passage est beaucoup moins net entre Sénonien lagunaire et Sénonien carbonaté. *Bel et Demargne (1966)*, ont pris comme limite supérieure du Sénonien lagunaire, soit le dernier banc lorsque le passage est franc, soit le point où le pourcentage des carbonates dépasse celui des évaporites lorsque le passage se fait de façon progressive.

Du point de vue lithologique, le Sénonien lagunaire est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel. Les bancs ont une puissance de quelques mètres seulement. Cependant l'anhydrite et le sel peuvent constituer des couches de dix mètres. L'ensemble de ces dépôts ont une épaisseur varie de 0 à 600 m et joue le rôle d'une barrière imperméable.

- **Sénonien carbonaté** : La limite entre les Sénoniens lagunaire et carbonaté n'est pas toujours bien nette. La limite supérieure du Sénonien carbonaté est encore plus indéfinie, en effet, il y a pratiquement continuité du point de vue lithologique entre le Sénonien et

l'Eocène carbonaté, les deux niveaux étant formés de calcaires de même nature, seule la présence de nummulites permet d'identifier l'Eocène.

Le Sénonien carbonaté est essentiellement formé de dolomies et de calcaires dolomitiques, avec des intercalations de marnes et d'argiles, plus rarement d'anhydrite. Son épaisseur dépasse parfois 200 m.

4.2. Le Tertiaire

Les forages captent la quasi-totalité des séries tertiaires.

L'Eocène inférieur carbonaté: Après l'Eocène carbonaté, la mer n'occupe qu'un golfe très réduit dans la partie septentrionale de la cuvette avec une mer résiduelle, où se déposent alternativement des calcaires, des argiles, des marnes et de l'anhydrite. L'Eocène évaporitique achève d'ailleurs sa formation à l'Eocène moyen quand la mer se retire définitivement de la plate forme Saharienne. Donc nous distinguons dans l'Eocène deux ensembles du point de vue lithologique : l'Eocène carbonaté à la base et l'Eocène évaporitique au-dessus.

La présence de nummulites a été observée dans la plupart des forages du Bas Sahara qui ont atteint cet horizon. Le Sénonien et l'Eocène carbonaté réunis, forment un puissant ensemble calcaire. Sa puissance peut atteindre 600 m dans la région des Chotts (*Nesson, 1975*).

L'Eocène moyen évaporitique : Au-dessus de l'Eocène carbonaté, on rencontre une formation constituée par une alternance de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrite. Elle renferme une faune d'âge Eocène : nummulites et globigérines. C'est la formation que l'on désigne dans le Bas Sahara sous le nom d'Eocène évaporitique.

Les bancs carbonatés sont suffisamment importants pour constituer des niveaux aquifères. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 m.

Le Mio-pliocène : Il repose en discordance indifféremment sur le Primaire, le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens ou l'Eocène, il appartient à l'ensemble appelé communément Continental Terminal. La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montrent que le Mio-pliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo-argileux avec des intercalations gypseuses et des passées de grès.

Bel et Demargne (1966) distinguent, de bas en haut, quatre niveaux :

- Niveaux argileux : Il est peu épais et existe uniquement dans la zone centrale du Sahara Oriental. Avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Mio-pliocène constituent une barrière peu perméable entre les nappes du Sénon-Eocène carbonatées et celles du Pontien sableux.
- Niveaux grès-sableux : C'est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara Oriental. A sa base, nous

trouvons parfois des graviers, alors que le sommet se charge progressivement d'argiles. L'épaisseur de ce niveau peut atteindre 400 m, c'est le principal horizon aquifère du Mio-pliocène.

➤ Niveaux argileux : Ce niveau est formé d'argiles et de sables dont les contours sont mal définis et n'est pas présent partout.

➤ Niveau sableux : du point de vue hydrogéologique, ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du Complexe Terminal. Ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent pour ainsi dire à la nappe des sables du Complexe Terminal.

C'est le deuxième niveau sableux du Mio-pliocène, parfois il repose sur le niveau grès-sableux lorsque le niveau argileux est absent et se distingue très mal. Son extension est limitée à quelques régions du Bas Sahara. Dans la partie Nord son épaisseur s'accroît jusqu'à 400 m au pied de l'Aurès.

4.3. 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 67 m. C'est à ce niveau que l'on rencontre la nappe superficielle de l'Oued Souf.

5. Evolution tectonique

L'architecture actuelle de la plate forme saharienne est le résultat de plusieurs phases tectoniques intenses affectant la région au cours des temps géologiques. Dans le Sahara Occidental, les mouvements de l'orogénèse hercynienne sont les principaux responsables de la déformation et de la structuration. Dans le Sahara central et Nord Oriental les mouvements hercyniens et les mouvements de l'époque mésozoïque sont tous les deux responsables de la structuration. Les principales phases tectoniques qui ont modelé la plate forme saharienne sont :

5.1. La phase panafricaine

Au cours de cette période des accidents profonds subméridiens sont provoqués par une collision continentale entre le craton Ouest africain et le bloc Est africain. Les grandes failles subméridiennes ont joué un rôle important dans la structuration et la sédimentation de la plate forme saharienne. Cette phase prend fin au cours du Cambrien et elle sera suivie d'une érosion intense.

5.2. La phase calédonienne

5.2.1. La phase distensive du Cambro-Ordovicien

Cette phase est matérialisée par une variation d'épaisseur et de faciès des séries Cambro-Ordoviciennes et la venue importante de roches volcaniques à la faveur d'une distension

importante. Celle-ci est à l'origine de l'étirement de la croûte continentale, elle est accompagnée d'une subsidence tectonique et thermique.

A la fin de cette phase et après avoir hérité des phases précédentes, les grandes lignes des futurs bassins de la plate forme saharienne sont bien mises en évidence.

5.2.2. Phase de compression tectonique (Caradoc)

Nous assistons dans cette phase à un changement de contraintes qui sont à l'origine de nouveaux mouvements compressifs. Cette situation se matérialise par la formation de plis à axes Nord-Sud le long des accidents majeurs qui sont accompagnés par des soulèvements régionaux.

5.2.3. Phase calédonienne tardive

Vers la fin du Silurien et le début du Dévonien, l'équilibre est à nouveau rompu par un important apport de matériel détritique provenant du Sud-Est, cette phase est caractérisée par des variations d'épaisseurs et de faciès le long des axes structuraux majeurs.

5.3. La phase hercynienne

La phase hercynienne semble avoir engendré les plus importants mouvements qu'a connus la plate forme saharienne. Elle est à l'origine des principales déformations (failles, flexures, grabens et horsts). Le cycle orogénique hercynien est caractérisé par deux principales phases ;

5.3. 1. La phase précoce

Les mouvements précoces d'âge Viséen semblent être responsables des bombements de type compressifs de l'Ougarta. Ils se sont manifestés par les plis allongés de direction (NW-SE) accompagnés par des failles inverses de même direction.

5.3. 2. La phase tardive

Les mouvements sont survenus à la fin du Carbonifère, ils ont provoqué l'arrêt de la sédimentation. Après des déformations intenses, une importante érosion des séries paléozoïques, qui se trouvaient dans les zones hautes, a eu lieu à la fin de la phase hercynienne.

La discordance hercynienne est matérialisée par une surface d'érosion qui sépare les séries paléozoïques des séries mésozoïques.

5.4. La phase post-hercynienne

A la fin du Trias et vers le début du Jurassique d'autres phases de plissement, plus limitées, sont marquées par une tectonique distensive, matérialisée par une variation d'épaisseur et de faciès de part et d'autre des accidents NW-SE, NE-SW et des manifestations volcaniques le long de ces failles.

5.5. La phase Autrichienne

Au Crétacé inférieur, la phase Autrichienne est caractérisée par une tectonique compressive qui est à l'origine d'une reprise des failles inverses préexistantes et la création d'autres failles inverses de direction Nord-Sud.

Au Tertiaire, durant le Sénonien et l'Eocène, les failles de direction NE-SW se sont réactivées durant la phase de compression Pyrénéenne.

6. Interprétation des coupes géologiques

Les coupes géologiques orientées Nord - Sud (*fig. 12*), Nord Est - Sud Ouest (*fig. 13*) et Nord Ouest - Sud Est (*fig. 14*) ont pour objectif, d'une part d'établir une corrélation lithologique du sous sol et d'autre part d'identifier l'extension géographique ainsi que l'épaisseur utile de la nappe phréatique de la région.

Coupe 1 (fig.12) : D'après cette coupe orientée Nord-Sud, faite sur la base des coupes des forages, nous remarquons que l'épaisseur des formations Mio-pliocènes constituées 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, mais s'épaississent vers le Sud. Ce manque ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne, (Forages H12.32 et H12.23). L'Eocène inférieur n'apparaît qu'au Nord vu sa grande profondeur.

Coupe 2 (fig.13) : En allant de la région dite Merzaka vers Ourmes, nous remarquons 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 Mio-pliocènes sont caractérisées par une épaisseur considérable, plus de 200 m. Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région.

Coupe 3 (fig.14) : Cette coupe est différente des autres, surtout du point de vue « biseautage », qui résulte d'un événement paléogéographique. Cette situation est bien visible dans les quatre premiers forages. Quant aux formations quaternaires, nous constatons que leur épaisseur est plus importante au Nord –Ouest qu'au Sud –Est.

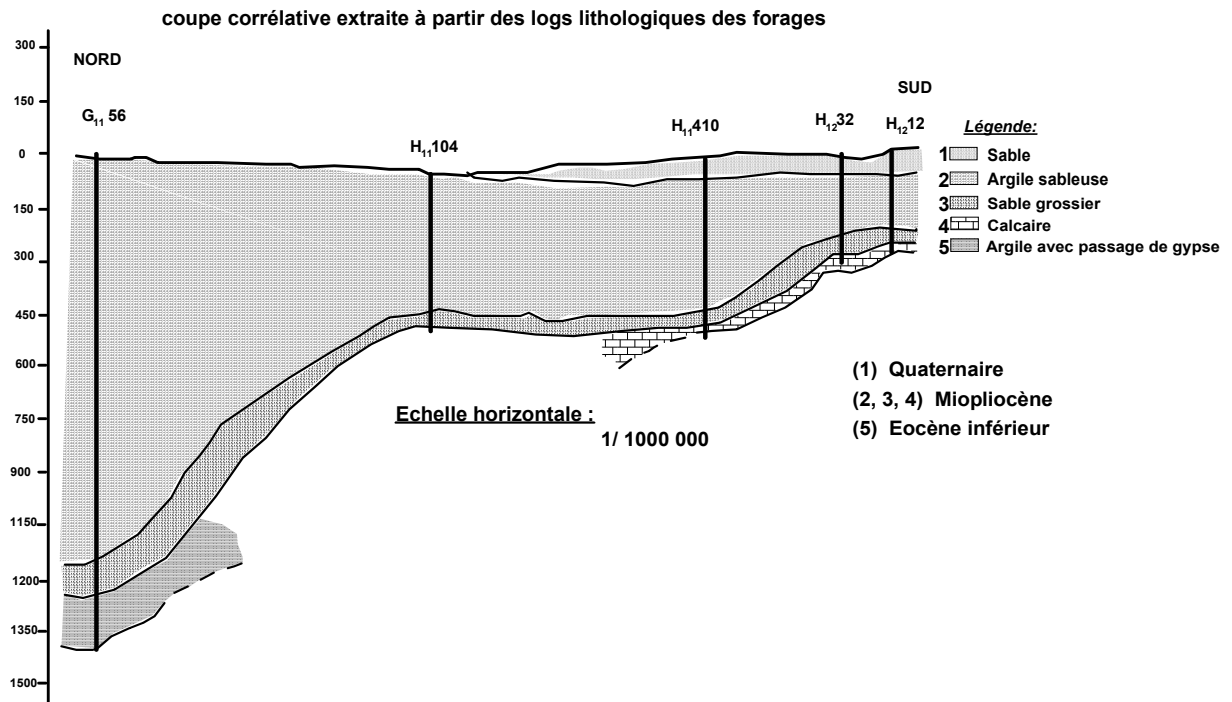


Figure 12 : Coupe Géologique N°01

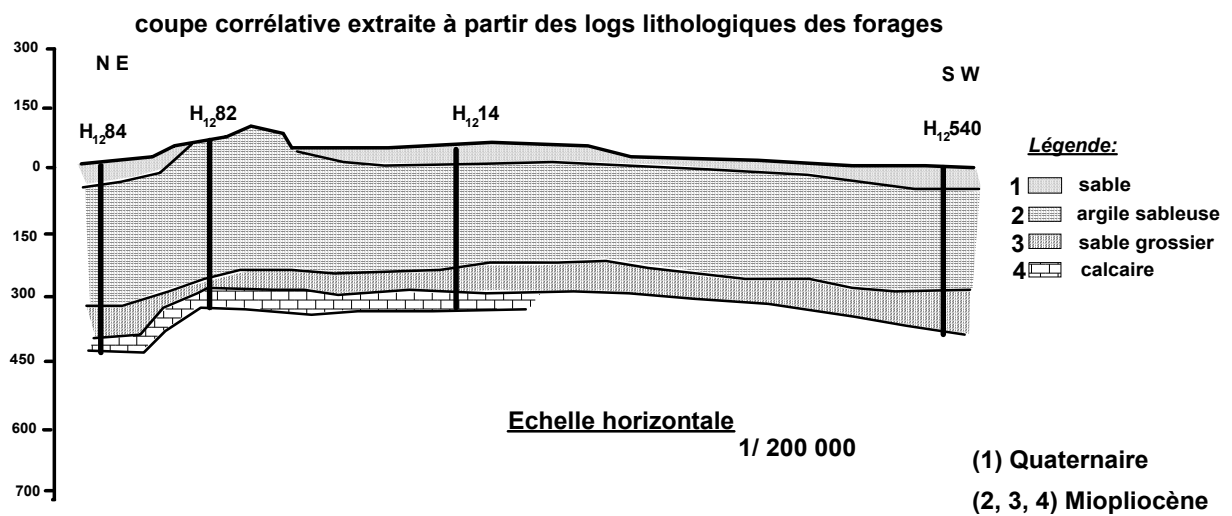


Figure 13 : Coupe géologique N°02

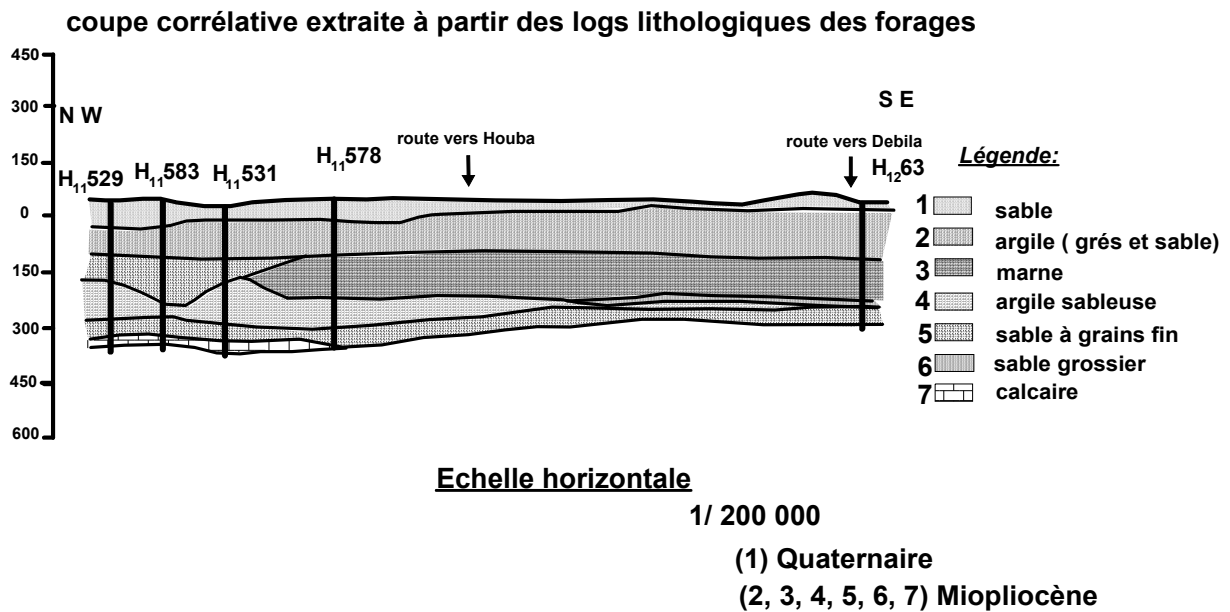


Figure 14 : Coupe géologique N°03

7. Conclusion

La région d'Oued Souf à une particularité spécifique sur un plan géologique. Les conditions tectoniques et paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire avec une lithologie variée dans le temps, mais régulière et homogène dans l'espace.

Ces conditions ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le Bas Sahara de plusieurs couches aquifères, dont le comportement hydrodynamique varie en fonction de leur faciès. La stratigraphie de la région est caractérisée par des séries sédimentaires allant de Crétacé inférieur jusqu'aux dépôts du Quaternaire.

Les formations récentes du Quaternaire forment un aquifère détritique constituant la nappe phréatique. Il est surtout sableux à gréseux avec parfois du gypse et des argiles localisées particulièrement dans la partie Nord - Est où il se termine par une croûte gypseuse, son substratum est argileux imperméable, parfois très peu sableux à son sommet ou gypsifère en totalité.

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. Cette dernière 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 consiste à utiliser divers dispositifs. Nous avons adopté pour nos mesures le quadripôle Schlumberger. Le principe de la méthode (fig.15), 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 suivante :

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

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 et B, ainsi que des épaisseurs et des résistivités des terrains rencontrés.

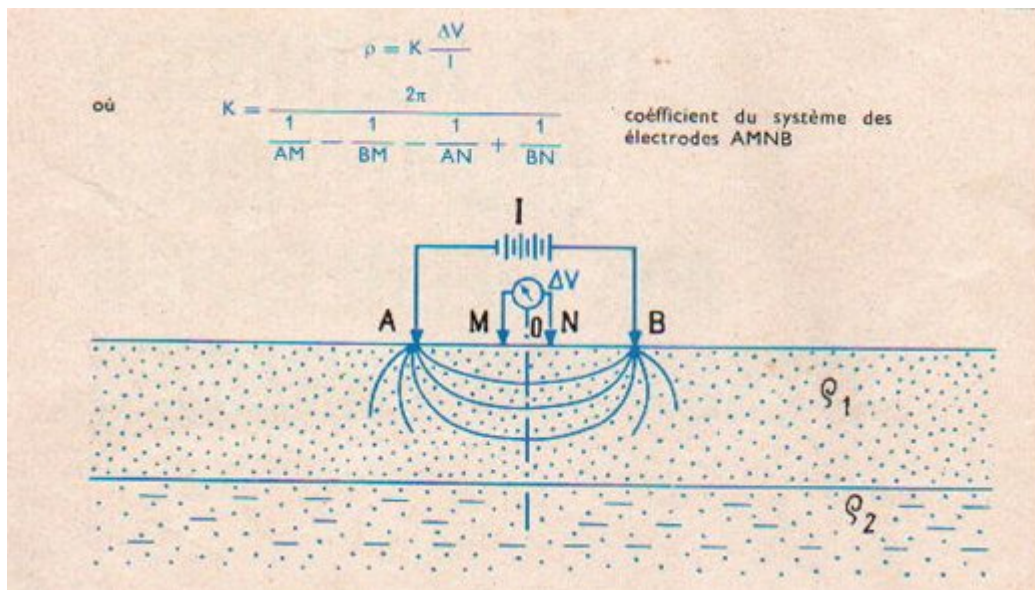


Figure 15 : Quadripôle de Schlumberger

Lorsque les filets de courant circulent entièrement dans un même niveau homogène, la résistivité mesurée correspond à la résistivité vraie de ce terrain (*fig. 16*). 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.

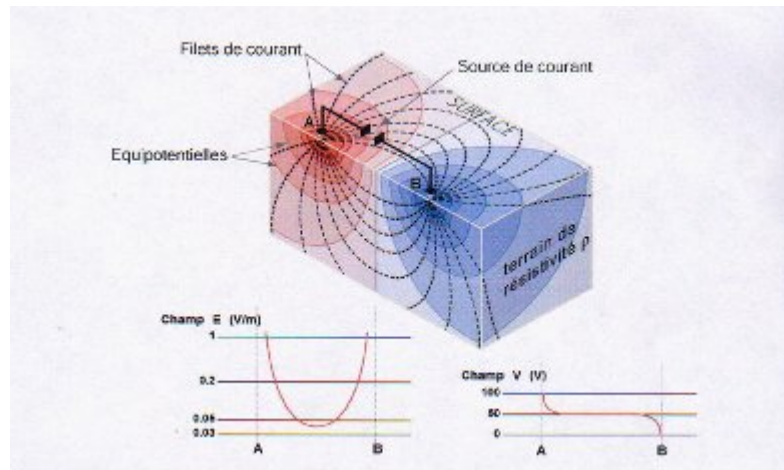


Figure 16 : Equipotentiels de courant dans un sol homogène.

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 (*fig. 17*).

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. Nous voyons 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, nous continuons 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).

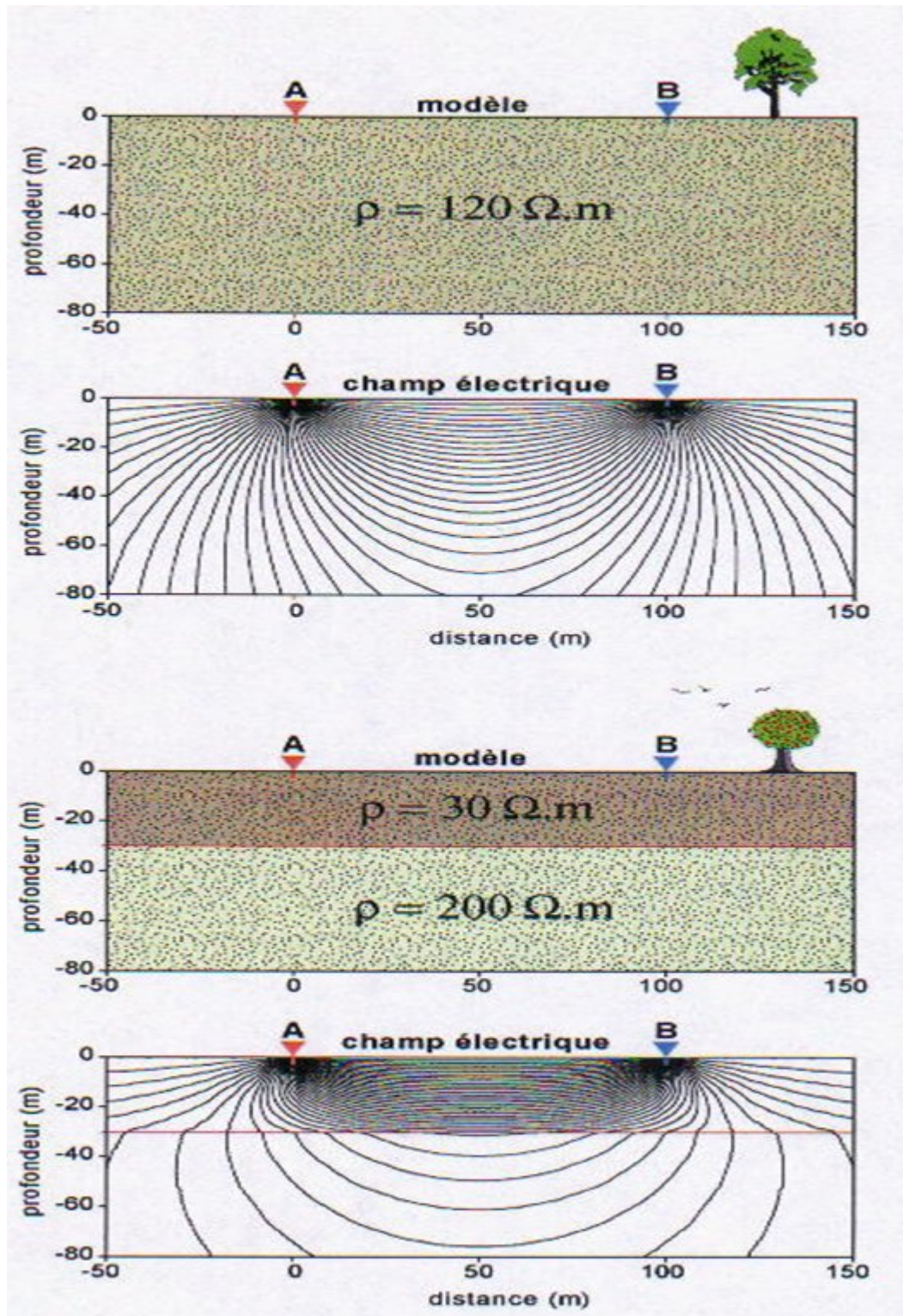


Figure 17 : Principe du sondage électrique vertical (SEV).

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. Nous pouvons 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, nous avons utilisé un résistivimètre, totalement automatique avec une sensibilité de l'ordre du μ volt. 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 et 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 enregistrés dans la mémoire. Une liaison série permet de transférer les données vers une imprimante ou un 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 nous pouvons citer : les trois méthodes les plus importantes.

5.1. La méthode de superposition à l'aide des abaques (fig. 18)

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.

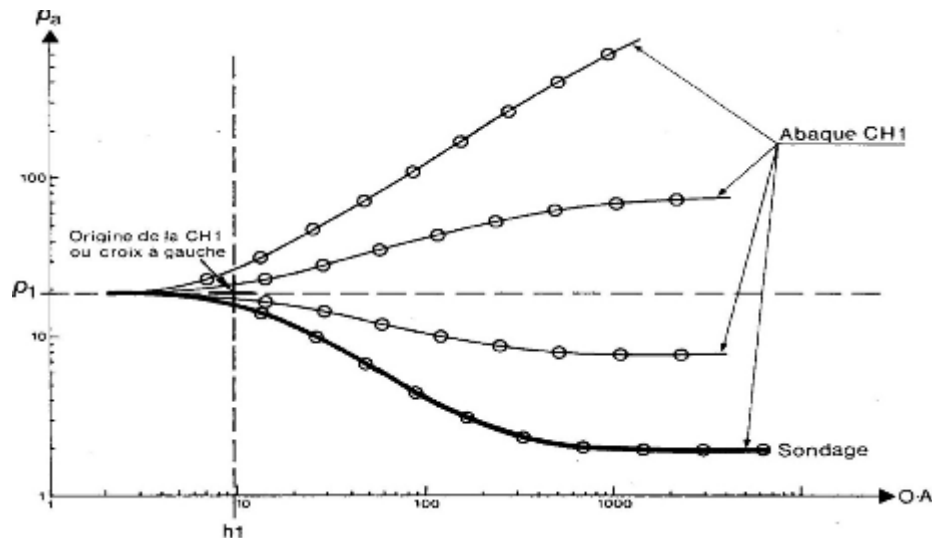


Figure 18 : Utilisation de l'abaque pour deux terrains.

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 précalculés lorsque le sondage est composé de plus de deux terrains. A cet effet, 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 afin de réduire 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. Nous comparons ensuite le graphe calculé et la courbe mesurée (fig.19). 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.

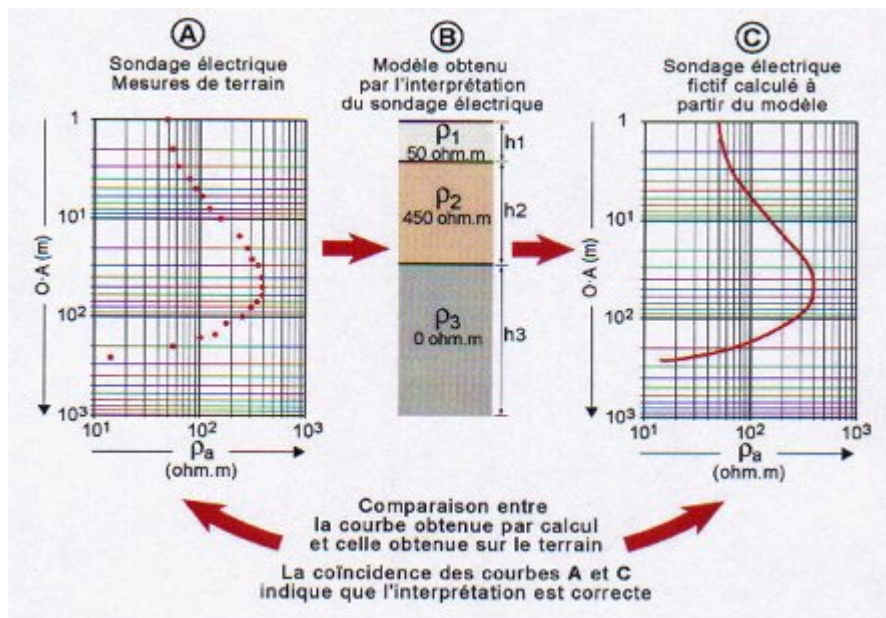


Figure 19 : Interprétation d'un sondage électrique par ordinateur

6. Représentation des résultats

Les mesures de SEV effectuées sur 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 d'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 : nous portons 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. Nous essayons, ensuite, de corréliser entre les différents terrains selon leur résistivité. Pour cela, nous utilisons aussi les coupes verticales (ρ_a) et les profils des résistivités pour différents AB.

7. 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 comporté 362 sondages électriques verticaux répartis sur 9 profils notés alphabétiquement de A à I (*fig. 20*), 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 9 coupes géoélectriques suivant les 9 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)

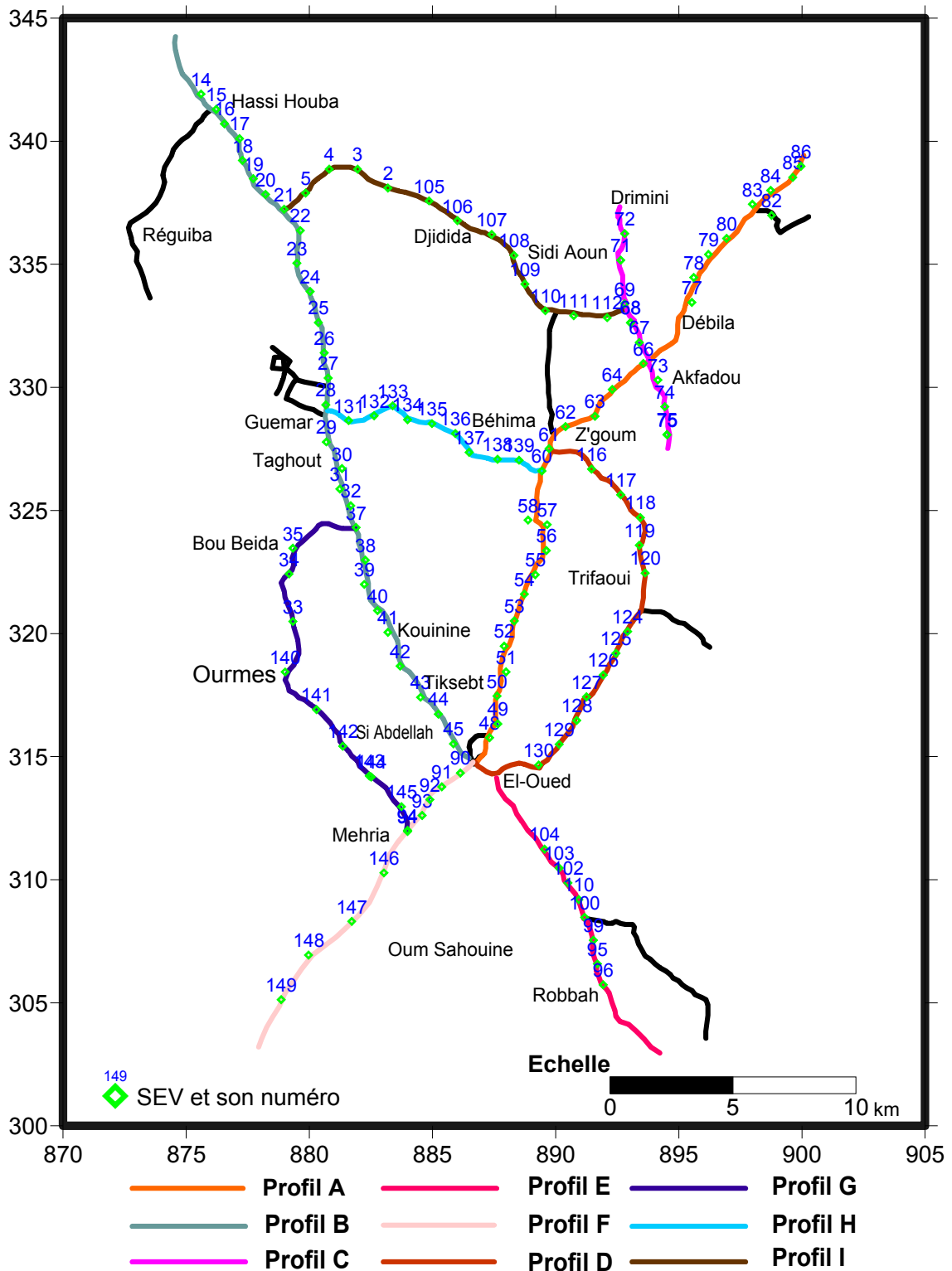


Figure 20 : Positionnements des SEV dans la région d'Oued Souf

Les sondages électriques verticaux sont interprétés à l'aide du logiciel (IPI2 Win) qui donne des valeurs d'itérations $\leq 5\%$.

Le dispositif utilisé est le dispositif de Schlumberger, le tableau suivant (tab. 3) résume le volume des travaux réalisés sur le terrain :

Tableau 3 : 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, 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: (fig. 21)

La colonne stratigraphique du forage 15 montre les formations suivantes du Mio-pliocène :

Profondeur (m)	Lithologie
0 - 2	Sable fin
2 - 24	Alternance de grès à grains fins à moyen et sables fins
24 - 30	Argiles sableuses
30 - 50	Grès 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 ($RT = h_1\rho_1 = 16100 \Omega.m^2$) suivi d'un niveau moins conducteur ($RT = h_2\rho_2 = 120 \Omega.m^2$), suivi d'un terrain plus conducteur que le précédent dont la résistance transversale ($RT = h_3\rho_3 = 493 \Omega.m^2$), suivi d'un substratum conducteur de résistivité ($\rho_4 = 9 \Omega.m^2$)

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

- Sable.....88.43 Ω m
- Argile sableuse.....11.08 Ω m
- Sable argileux.....22.3 Ω m
- Argile.....8.68 Ω m

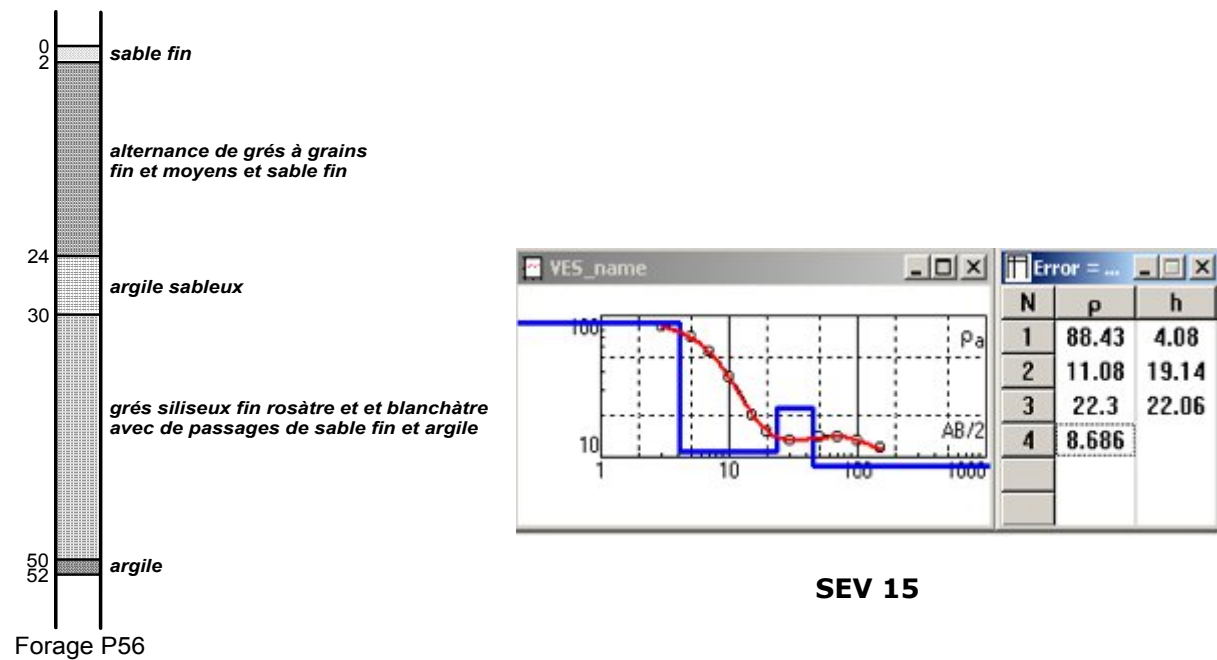


Figure 21 : forage P56 et Sondage électrique vertical 15.

9.1.2. Le sondage électrique vertical 131 et le forage P51 (fig. 22) :

La colonne stratigraphique du forage 15 montre les formations présentées comme suit :

Profondeur (m)	Lithologie
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

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

Sable97 $\Omega.m$
 Argile.....4.06 $\Omega.m$

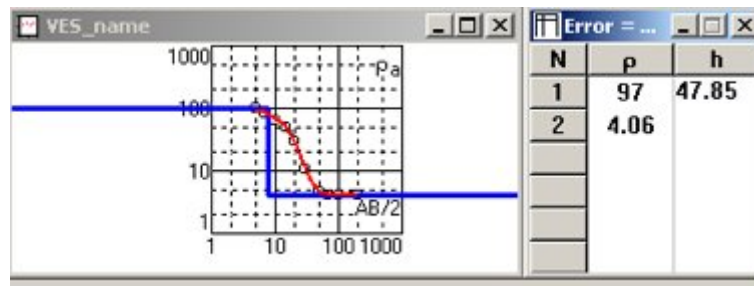
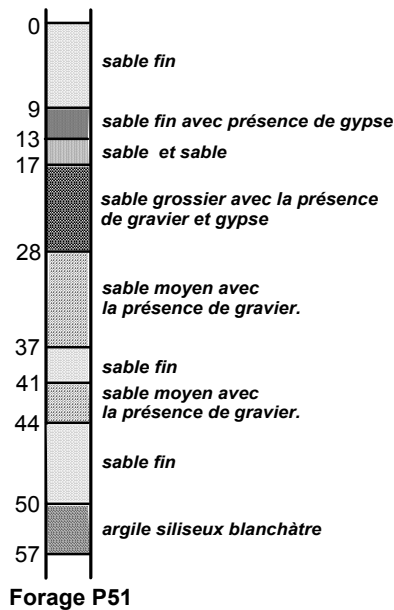


Figure 22 : forage P51 et le Sondage électrique vertical 131.SEV 131

Remarque : 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 (fig. 23)

La colonne stratigraphique du forage 76 montre les formations suivantes :

Profondeur (m)	Lithologie
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 $R_T = \rho_1 h_1 = 5100 \Omega.m^2$.
- Un deuxième terrain peu conducteur de $R_T = \rho_2 h_2 = 3200 \Omega.m^2$.
- Le substratum conducteur a une résistivité $\rho = 7 \Omega.m$.

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

Sable199 Ω.m
 Sable Argileux.....16.7 Ω.m
 Argile..... 9.94 Ω.m

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

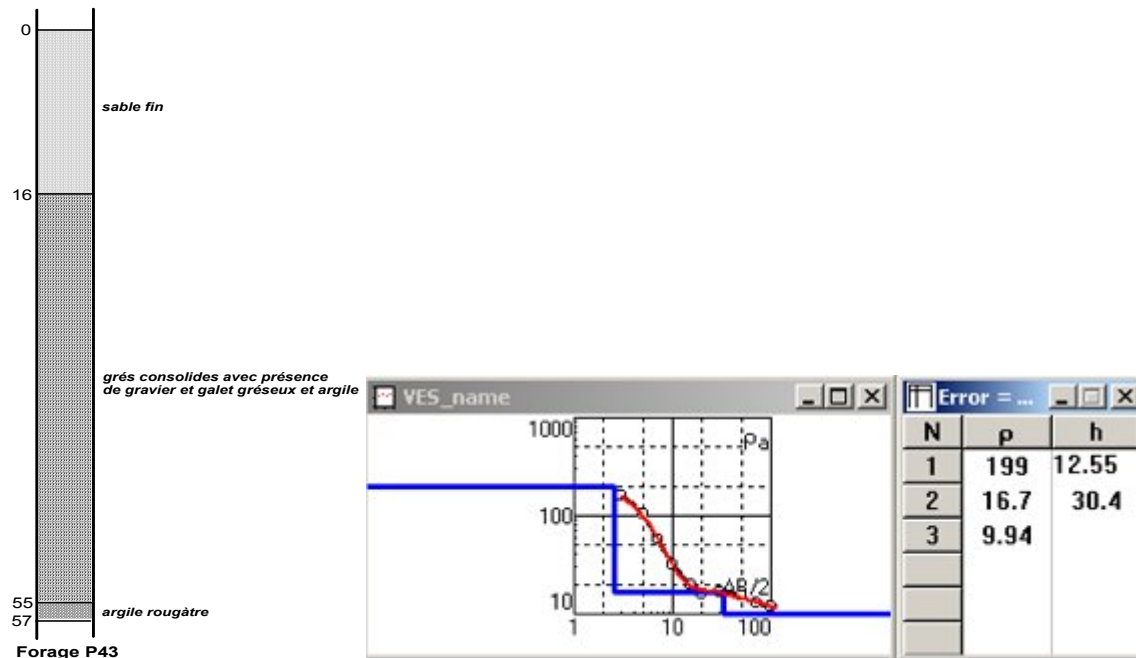


Figure 23 : forage P43 et le Sondage électrique vertical 76.

9.1.4. Le sondage électrique vertical 104 et le forage P44 (fig. 24)

Le forage P44 découvre les formations suivantes :

Profondeur (m)	Lithologie
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 $RT = \rho_1 h_1 = 1300 \Omega.m^2$;
- Le second peu résistant et de résistivité transversale $RT = \rho_2 h_2 = 2340 \Omega.m^2$;
- Le substratum conducteur de résistivité égale à $15 \Omega m$;

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

Sable165.1 Ω m
 Sable Argileux.....24.01 Ω m
 Argile 7.14 Ω m

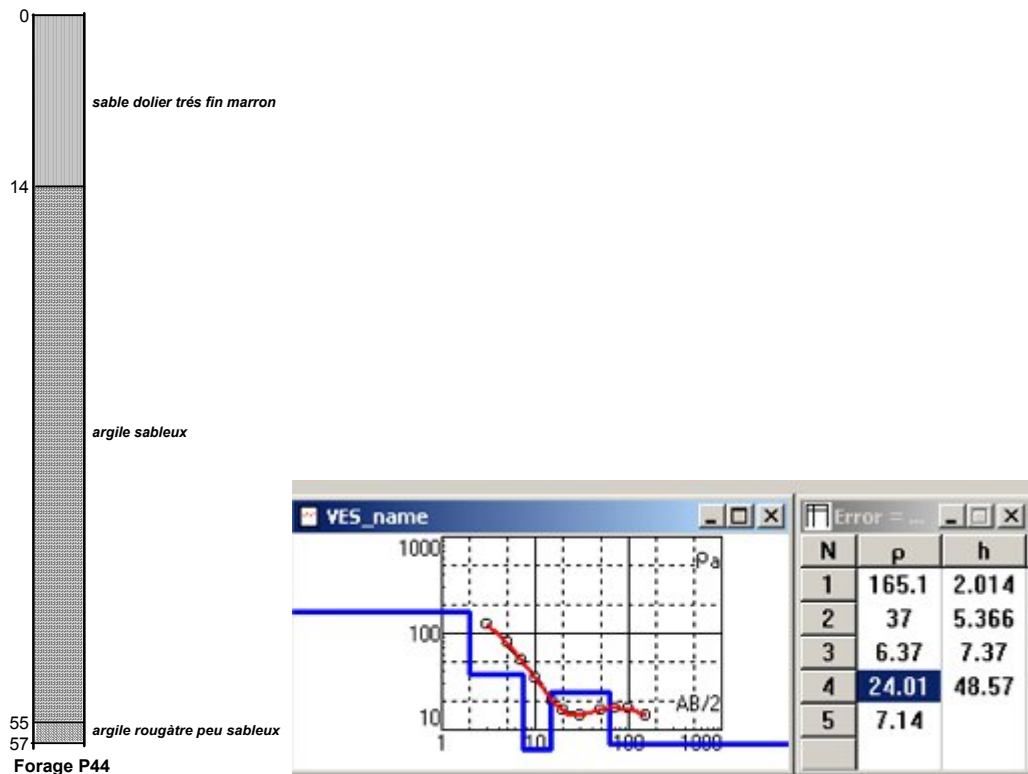


Figure 24 : forage P44 et le Sondage électrique vertical 104.

9.1.5. Le forage P46 et le sondage électrique 30 (fig. 25) :

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

Profondeur (m)	Lithologie
0 - 2	Sable fin
2 - 24	Alternance de grès a grain fin à moyen et sable fin
24 - 30	Argiles sableuses
30 - 45	Grès 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 quatre terrains :

- Le premier terrain très résistant de résistivité $R_T = \rho_1 h_1 = 2500 \Omega.m^2$;
- Le deuxième terrain peu conducteur de résistivité $R_T = \rho_2 h_2 = 136 \Omega.m^2$;
- Le troisième terrain peu résistant de résistivité de l'ordre de $R_T = \rho_3 h_3 = 1330 \Omega.m^2$;
- 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 :

- Sable fin.....124.8 Ω.m
- Sable Argileux.....19.54 Ω.m
- Argile sableuse.....8.65 Ω.m
- Argiles.....15.86 Ω.m

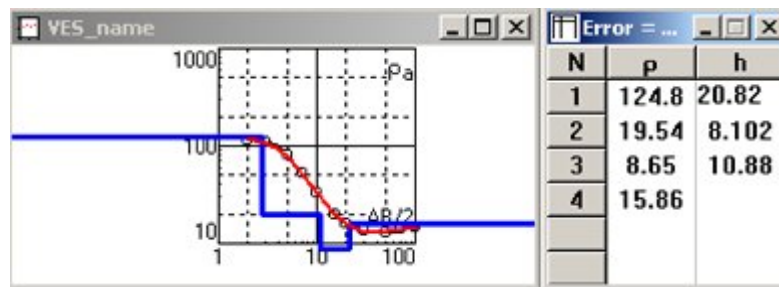
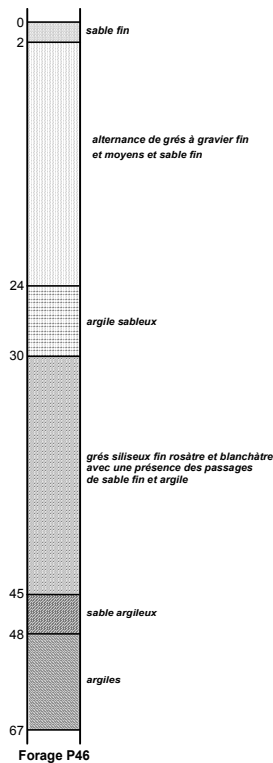


Figure 25 : forage P46 et le sondage électrique 30

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 :

Formation	Résistivité (Ω 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 horizontales et verticales respectivement de 1/100000 et 1/2000.

9.2.1. Coupe géoélectrique à travers le profil A (fig. 26)

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 35 m. 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 nous avons une couche généralement plus conductrice que la précédente (10 à 19 ohms.m) mais épaisse 50 m 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 ;

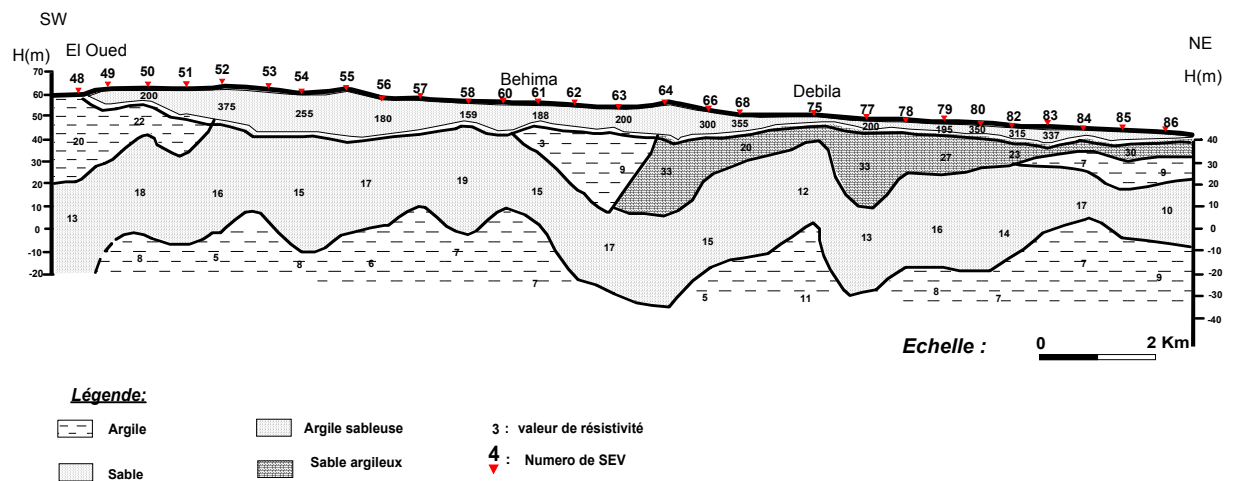


Figure 26 : La coupe géoélectrique à travers le profil A

9.2.2. Coupe géoélectrique à travers le profil B (fig. 27)

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), un deuxième terrain moins résistant (20 à 50 ohms.m) et de faible épaisseur, ce terrain peut être attribué à des sables argileux ;
- 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 50 m ;
- Un troisième terrain de résistivité sensiblement constante et d'épaisseur importante de l'ordre de 70 m 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 ;

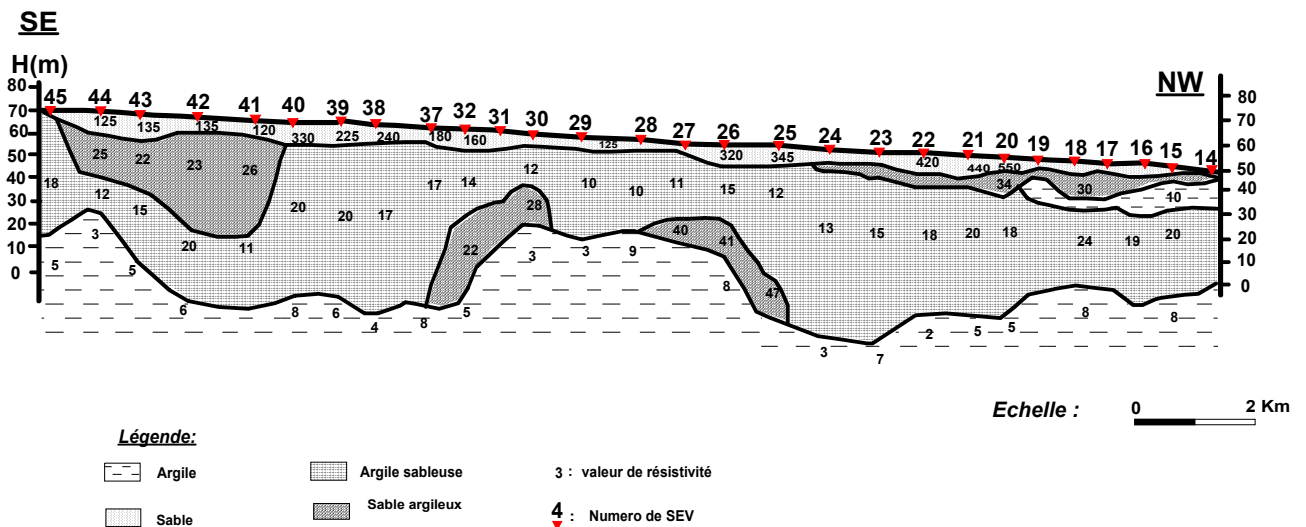


Figure 27 : La coupe géoélectrique à travers le profil B

9.2.3. Coupe géoélectrique à travers le profil C (fig. 28)

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 nous observons une couche très résistante de 400 à 800 ohms.m et d'épaisseur faible n'excédant pas 10 m 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 15 m
- Un troisième terrain plus conducteur avec des résistivités de 11 à 15 ohms.m, cette couche à une épaisseur très importante atteignant par endroit 90 m ;
- En fin un substratum très conducteur (< 10 ohms.m) que l'on attribue aux argiles ;

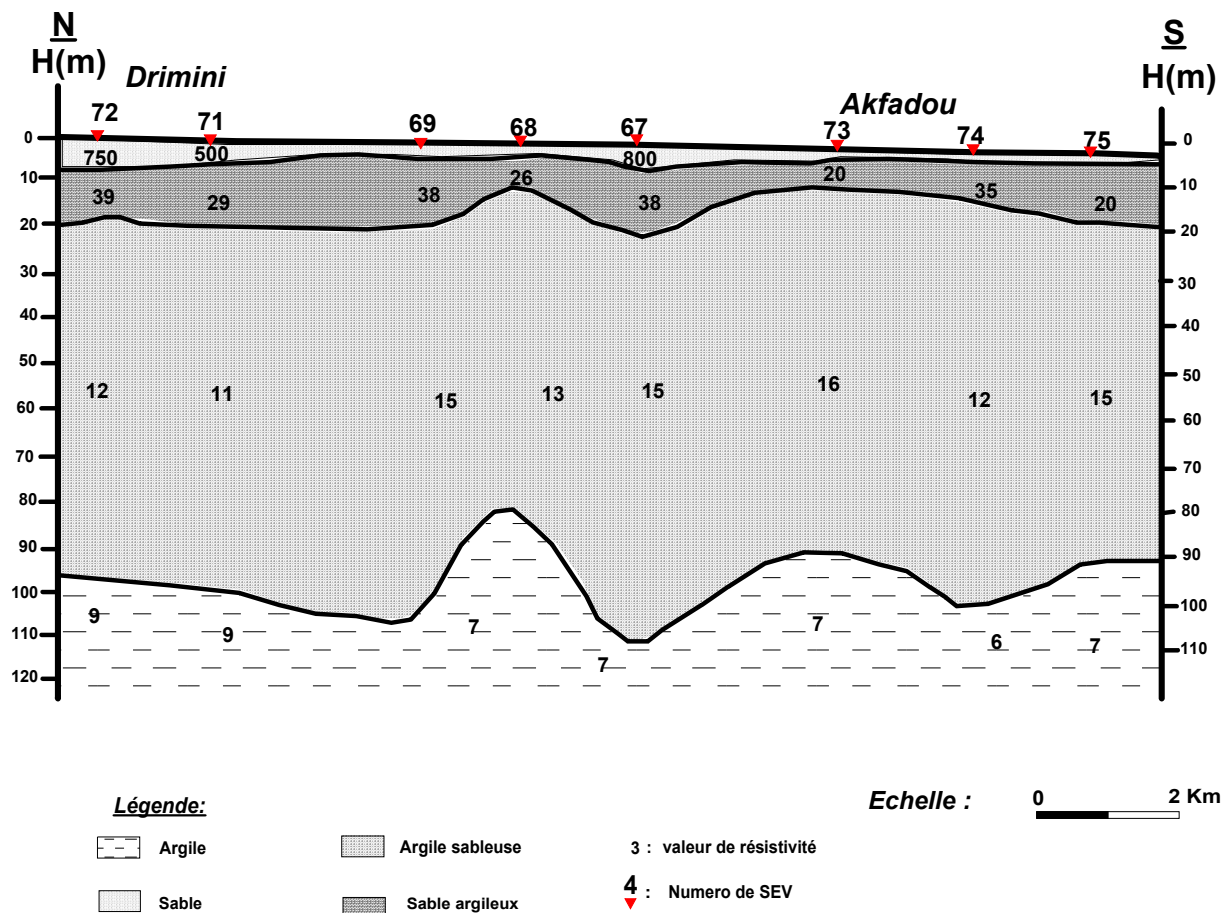


Figure 28 : La coupe géoélectrique à travers le profil C

9.2.4. Coupe géoélectrique à travers le profil D (fig. 29)

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 (de préférence indiqué la résistivité) ;
- Un deuxième terrain conducteur de résistivité comprise entre 10 et 20 ohms.m et d'épaisseur pouvant atteindre 80 m, ce terrain correspond à une formation argilo-sableuse ;
- Le substratum argileux très conducteur de résistivité inférieure à 10 ohms.m ;

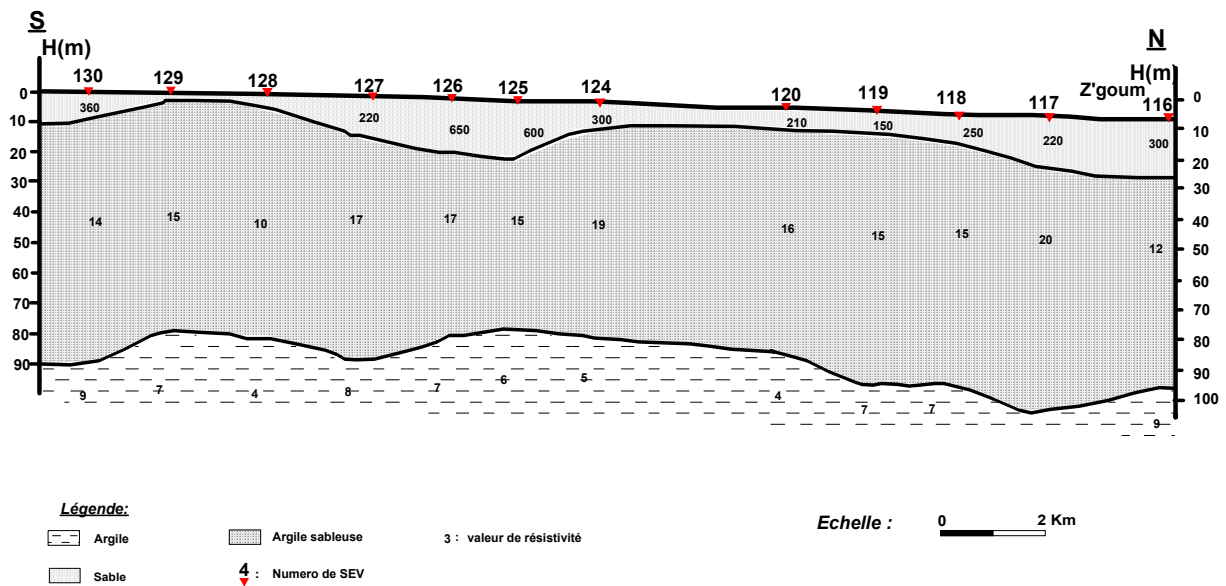


Figure. 29 : La coupe géoélectrique à travers le profil D

9.2.5. Coupe géoélectrique à travers le profil E (fig. 30)

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 5 m ;
- Plus bas dans la coupe, nous observons un horizon d'épaisseur moyenne de 15 m 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 50 m en moyenne que l'on rattache aux argiles sableuses ;
- A la base sous les argiles sableuses, nous rencontrons un substratum très conducteur correspondant aux argiles ;

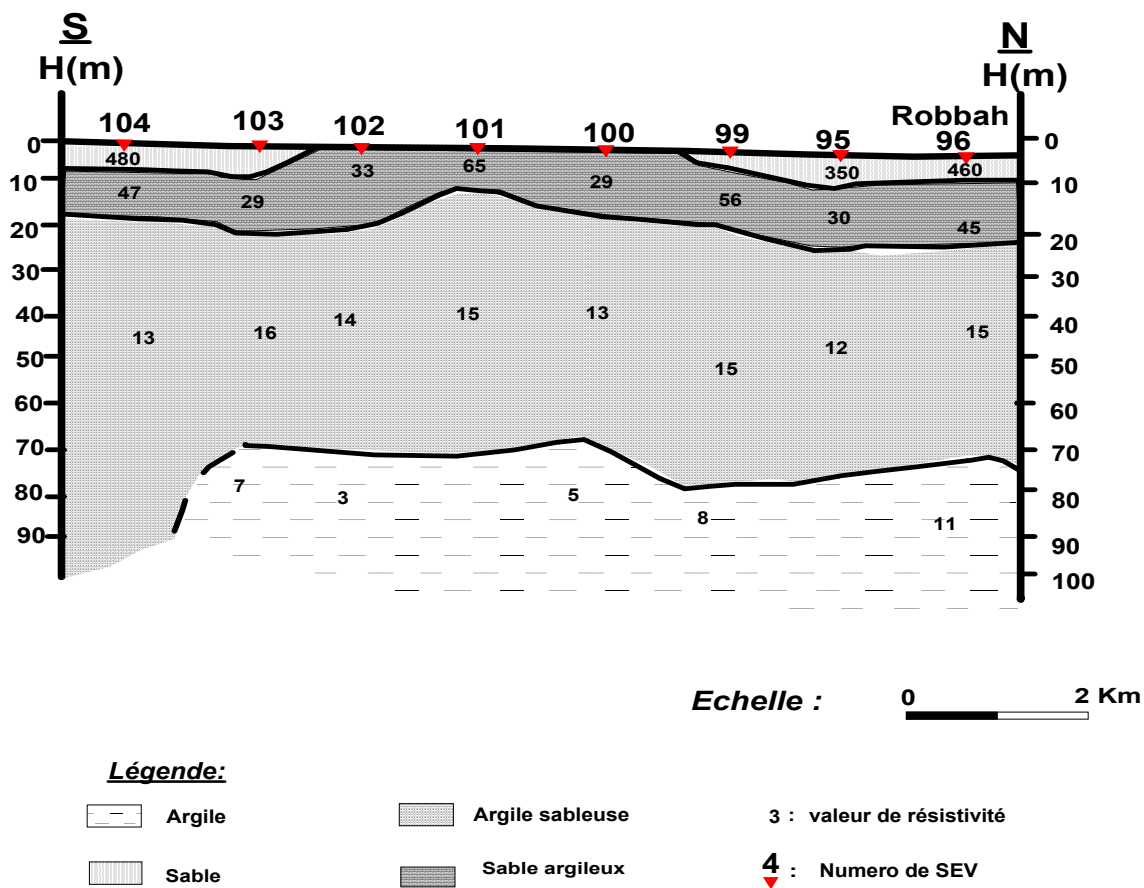


Figure 30 : La coupe géoélectrique à travers le profil E

9.2.6. Coupe géoélectrique à travers le profil F (fig. 31)

La coupe est 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 12 m que l'on associe au sable dunaire ;
- Un deuxième terrain conducteur (10 à 20 ohms.m) très épaisse (environ 80 m), constitué probablement par d'argiles sableuses;
- Un substratum très conducteur (3 à 11 ohms.m) correspondent toujours aux argiles ;

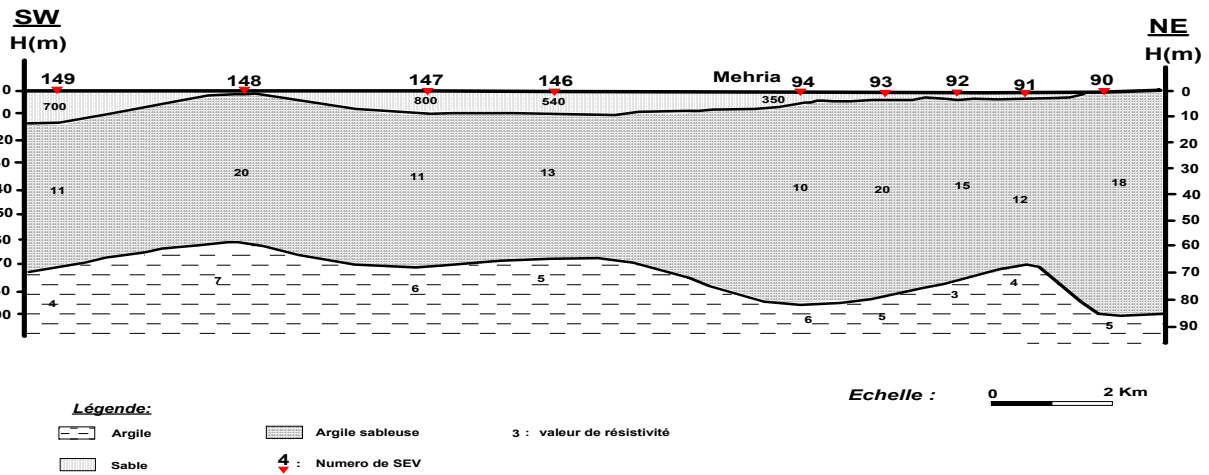


Figure 31 : La coupe géoélectrique à travers le profil F

9.2.7. Coupe géoélectrique à travers le profil G (fig. 32)

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 ;

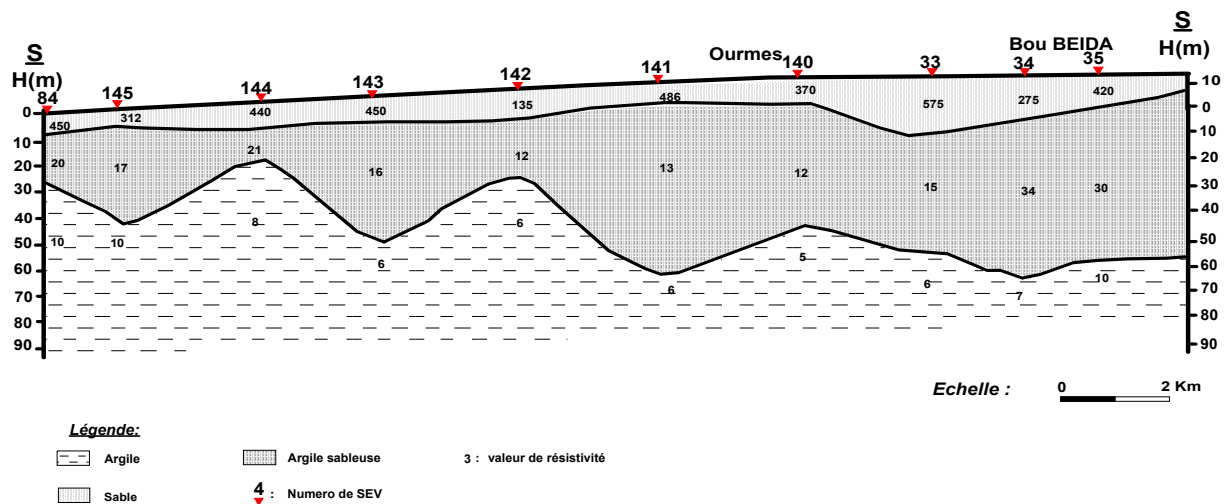


Figure 32 : La coupe géoélectrique à travers le profil G

9.2.8. Coupe géoélectrique à travers le profil H (fig. 33)

La coupe est 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 deux particularités remarquables :

- 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 (50 m) avec presque la disparition de la deuxième couche ;

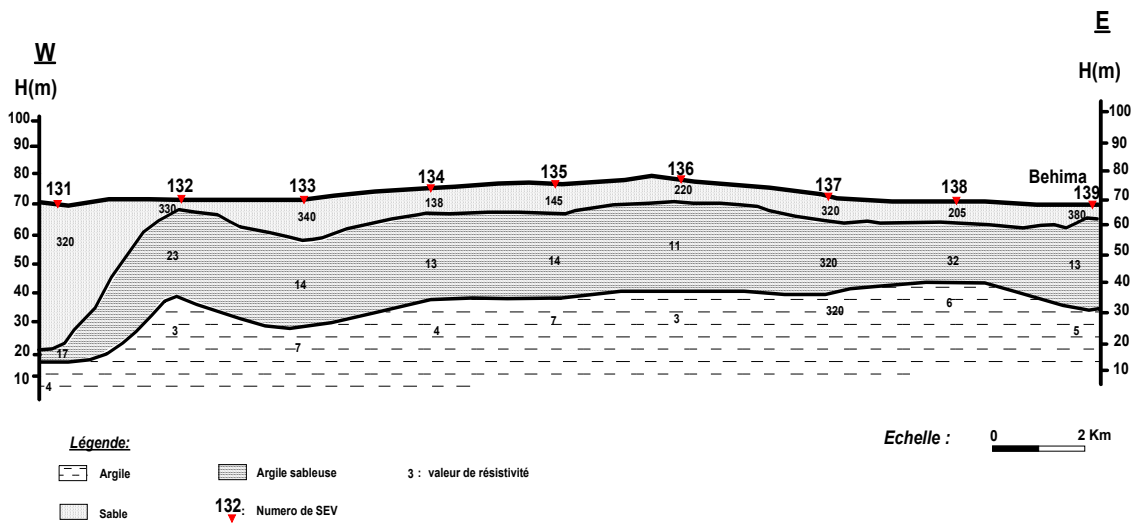


Figure 33 : La coupe géoélectrique à travers le profil H

9.2.9. Coupe géoélectrique à travers le profil I (fig. 34)

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 au 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 ;

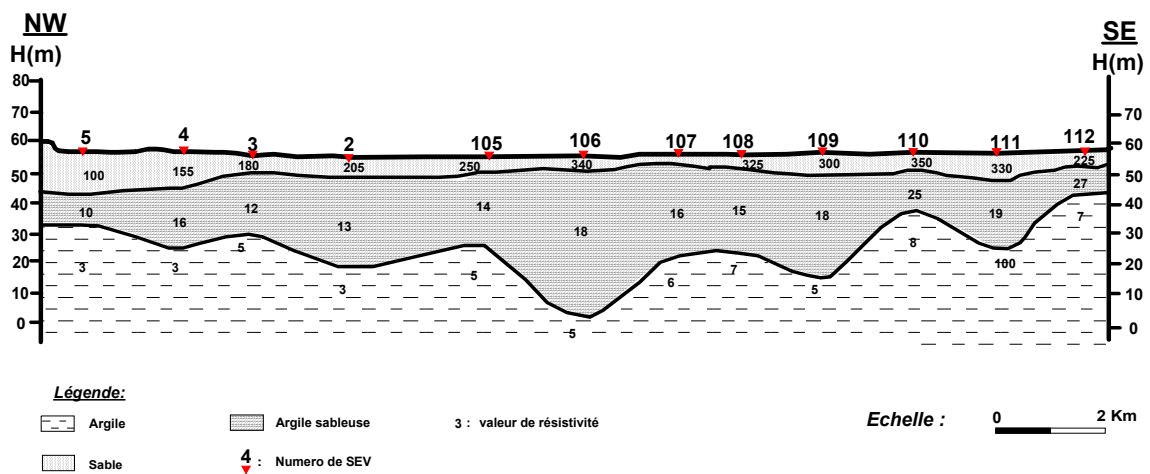


Figure 34 : La coupe géoélectrique à travers le profil I

9.3. Commentaire de la carte du substratum argileux (fig. 35)

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 les 90 m. 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 18 m comme indique dans la coupe géoélectrique à travers le profil G.

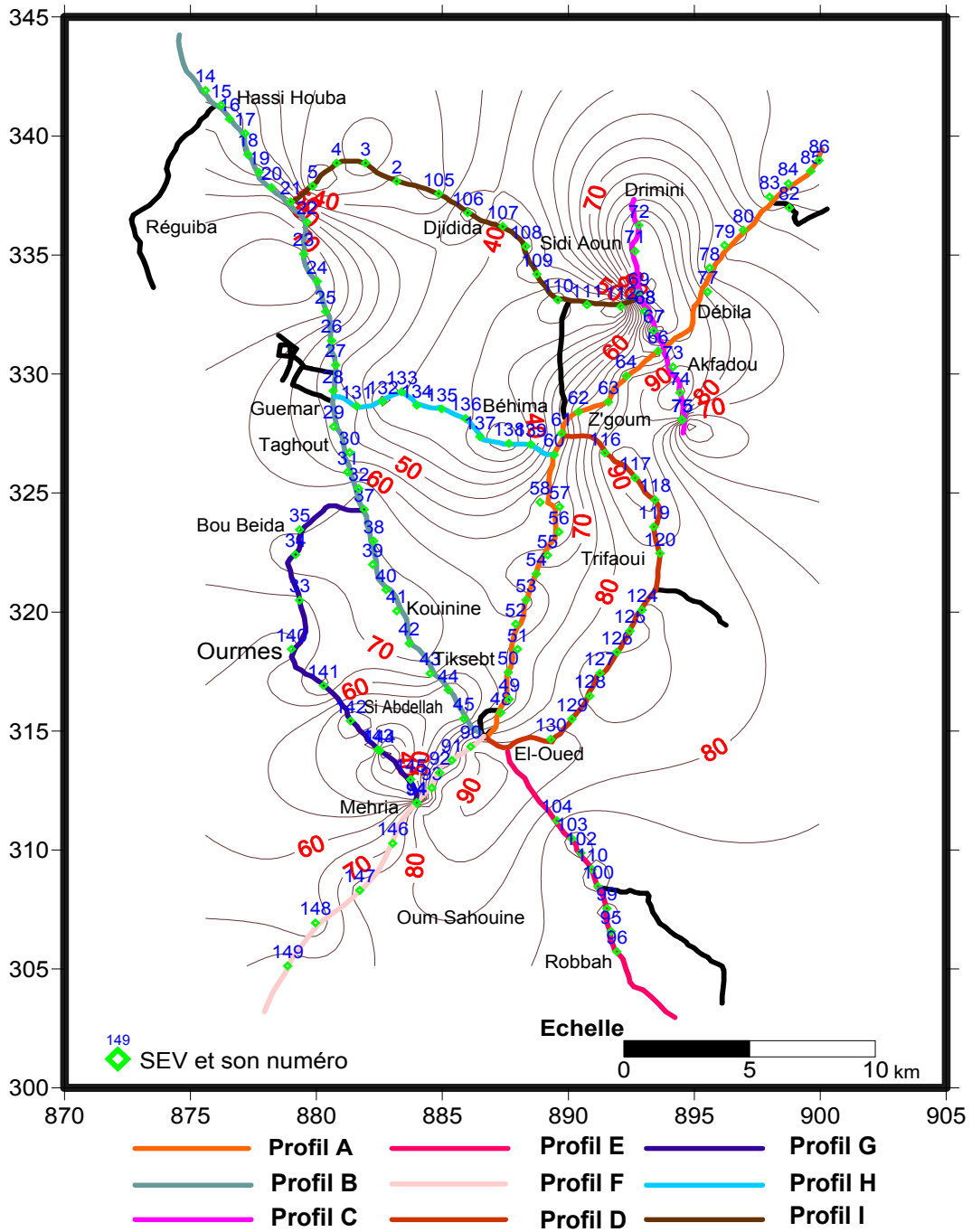


Figure 35 : Carte isobathe des valeurs du substratum argileux de la nappe libre de Oued Souf

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.

10. Conclusion

L'étude géophysique menée par l'équipe de la recherche de l'Entreprise Nationale de Géophysique (*ENAGEO*) avait pour but de déterminer la morphologie du substratum argileux de la nappe libre, ainsi que les paramètres physiques (résistivités et épaisseurs) des formations géologiques et leur extension latérale.

Pour une meilleure corrélation entre la résistivité et la lithologie des formations, nous avons choisi cinq forages qui se localisent à l'emplacement de cinq SEV, afin de dresser une échelle de résistivité pour les différentes formations traversées.

Les résultats ont été présentés sous forme de coupes géoélectriques, ces coupes nous a permis de sortir les terrains rencontrés dans la zone d'étude qui sont constitués essentiellement de sable, de sable argileux et d'argile. En effet les sables formant la première couche s'identifient clairement par les fortes résistivités (> 100 ohms.m). La variation des résistivités remarquées le long des coupes est due à la présence des argiles.

Le deuxième terrain constitué tantôt par des sables argileux tantôt par des argiles sableuses se distingue par des résistivités généralement faibles (10 à 50 ohms.m).

Le substratum très conducteur est constitué d'argile ceci est vérifié par les faibles résistivités de l'ordre de 10 ohms.m.

Chapitre IV

Caractéristiques climatiques de la région

1. Introduction

Du fait de sa situation géographique et de son grand territoire l'Algérie se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes, la première avec un climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride vers l'intérieur du pays dans les hauts plateaux et enfin la troisième avec un climat aride, caractéristique du grand Sahara, dont la zone d'étude en fait partie.

L'étude du climat est importante, 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 à long terme sur le comportement des nappes aquifères.

Les données traitées intéressent la station Guemar sise à l'aéroport d'El Oued, dont les caractéristiques géographiques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Caractéristiques géographiques de la station climatique.

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

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 comportement hydrodynamique et hydrochimique des eaux souterraines.

2.1. Répartition interannuelle des précipitations

La variation interannuelle des précipitations pour la période de 1976 à 2008 est présentée dans le tableau 5 et illustrée sur le graphique (*fig. 36*). Pour la station de mesures nous remarquons que la hauteur annuelle des précipitations pour la période considérée varie de 16.8 mm en 1983 à 212.4 mm en 1990, tandis que le module pluviométrique interannuel est égal à 72.33 mm.

La station météorologique de Guemar a enregistré 20 années de précipitations inférieures à la moyenne et 13 années au-dessus de la moyenne.

Selon le graphique (*fig. 36*), nous remarquons l'existence de trois intervalles de variation des précipitations :

- la première comprise entre 1976 et 1980 représente une période plus au moins sèche, la hauteur maximale évaluée à 112.8 mm;
- la deuxième comprise entre 1980 et 1989 comprend le maximum de déficit pluviométrique qui est de l'ordre de 16.8 mm pour l'année 1983 ;
- La dernière partie du graphique, de 1989 à 2008, représente une période plus au moins humide avec un maximum observé en 1990 de 212.4 mm.

D'après *Dubief (1963)*, les régimes des précipitations dans les régions Sahariennes sont différents et en relation aux saisons ; durant l'été elles sont dues aux dépressions de mousson, en hiver leur provenance est due aux dépressions accompagnant la migration vers le Sud des fronts polaires, alors que pendant la période intermédiaire, ces précipitations sont dues aux dépressions Soudano-Sahariennes du Sud vers le Nord.

Tableau 5 : Précipitations interannuelles (1976 – 2008) 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	112.8	1982	87.6	1988	76.8	1995	57.6	2002	31.2
1977	86.4	1983	16.8	1989	18	1996	108	2003	97.2
1978	73.2	1984	60	1990	212.4	1997	70.8	2004	133.2
1979	88.8	1985	39.6	1991	45.6	1998	73.2	2005	34.8
1980	105.6	1986	88.8	1992	63.6	1999	144	2006	105.6
1981	28.8	1987	39.6	1993	45.6	2000	37.2	2007	56.3
				1994	54	2001	62.4	2008	31.4

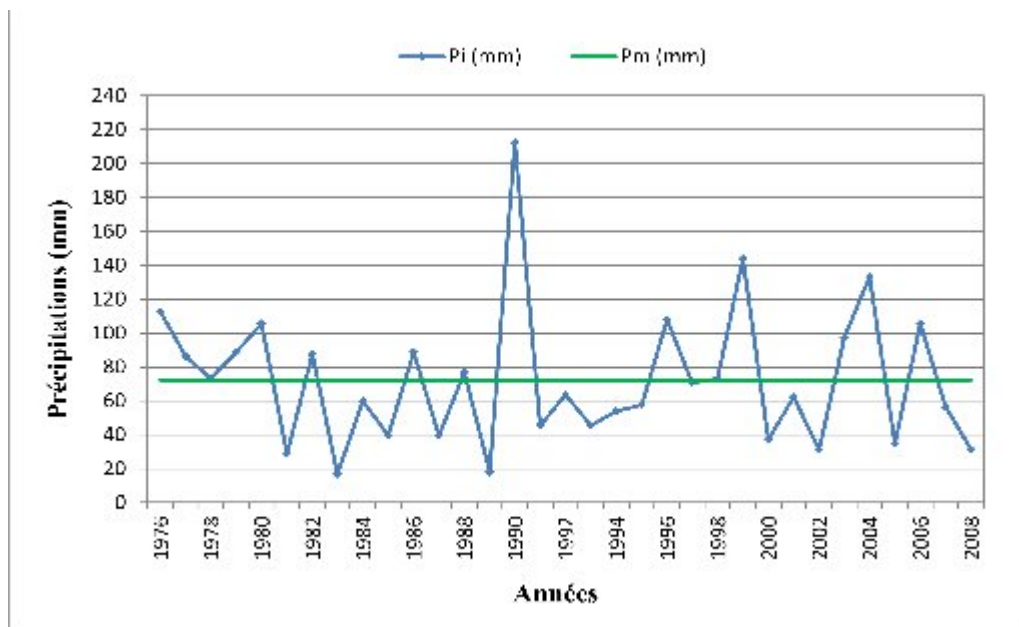


Figure 36 : Variation interannuelle des précipitations (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf.

2.2. Répartition moyenne mensuelle

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

2.2.1. Période 1913-1953 (fig. 37)

Levassor (1978) considère une hauteur annuelle moyenne de précipitations à Oued Souf de 75 mm/an, basée sur les travaux de *Dubief (1953)* pour la période allant de 1913 - 1953. Les moyennes mensuelles des hauteurs de pluie sur une période de 40 ans sont portées sur le tableau 6 :

Tableau 6 : Précipitations moyennes mensuelles (1913 – 1953) à Oued Souf.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aout	Moy
P (mm)	3	8	11	9	7	7	12	9	5	3	0	1	75

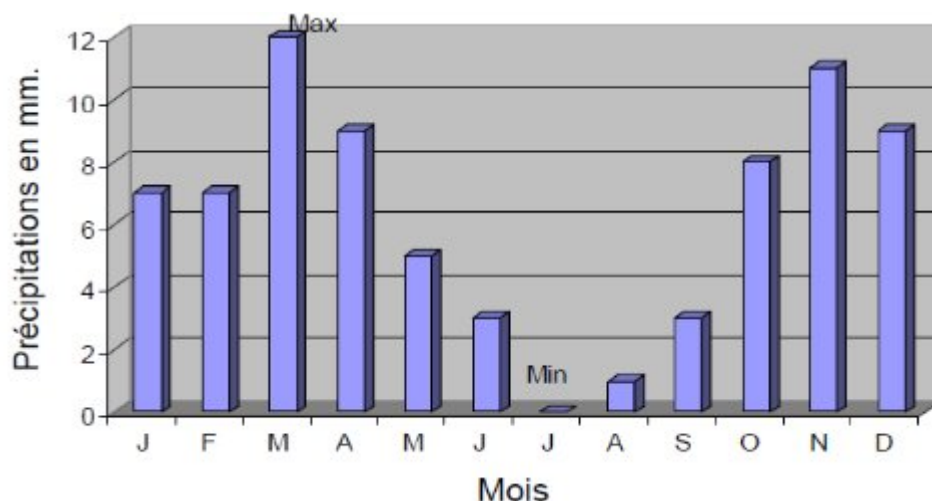


Figure 37 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1913 – 1953) à Oued Souf

2.2.2. Période 1976-2008 (fig. 38)

D'après l'histogramme nous observons que le mois le plus pluvieux est le mois de janvier avec une valeur de 13,78 mm, tandis que le mois le plus sec est celui de juillet de 0,51 mm.

Tableau 7 : Précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aout	Moy
P (mm)	5.04	7.48	9.03	6.8	13.78	6.97	7.72	6.8	4.57	1.38	0.51	1.96	72.04

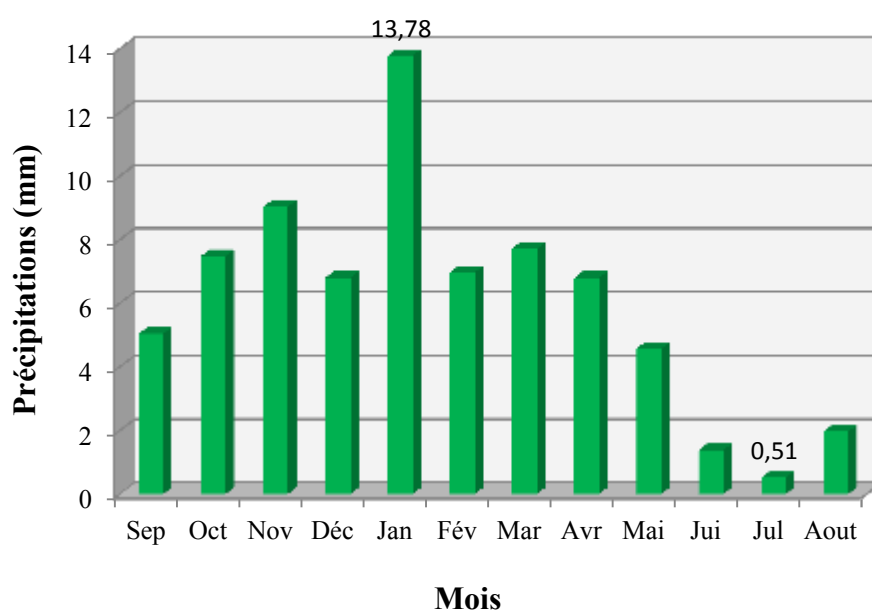


Figure 38 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf

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 (fig. 39)

Tableau 8 : Précipitations saisonnières (1976 – 2008) 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		

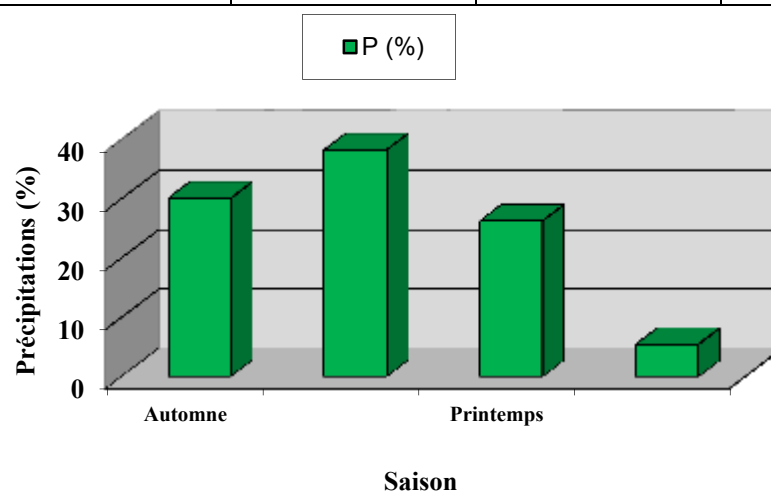


Figure 39 : Histogramme de répartition saisonnière de précipitations (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf

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 moyennes mensuelles et annuelles 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 celles de *Seltzer (1946)* pour la période 1913-1938, et celles observées à la station de Guemmar pour la période de 1976 - 2008, elles figurent sur les tableaux 9 et 10.

3.1. Période 1913-1938 d'après Seltzer, 1946 (fig. 40)

Tableau 9 : Moyennes des températures mensuelles (1913 –1938)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aout	Moy
T°C	29.2	22.8	16.3	21.4	10.9	13.3	16.8	21	25.2	30.3	35	32.7	23

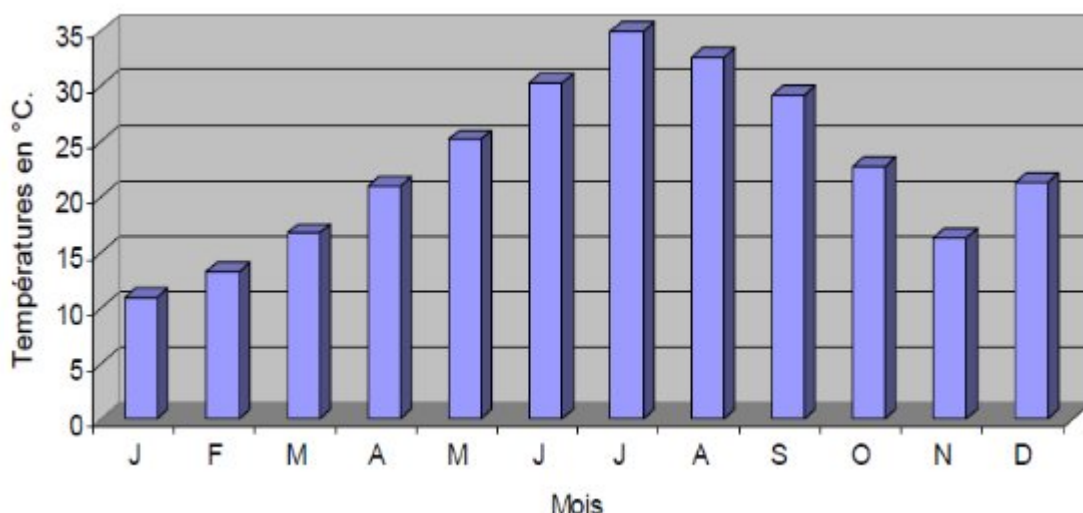


Figure 40 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (1913 – 1938) à Oued Souf

3.2. Période 1976-2008 (fig. 41)

Tableau 10 : Moyennes des températures mensuelles (1976 – 2008)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aout	Moy
T°C	29.22	22.85	16.2	11.33	10.71	13.16	17.16	20.76	26.33	31.03	34.18	33.89	22.23

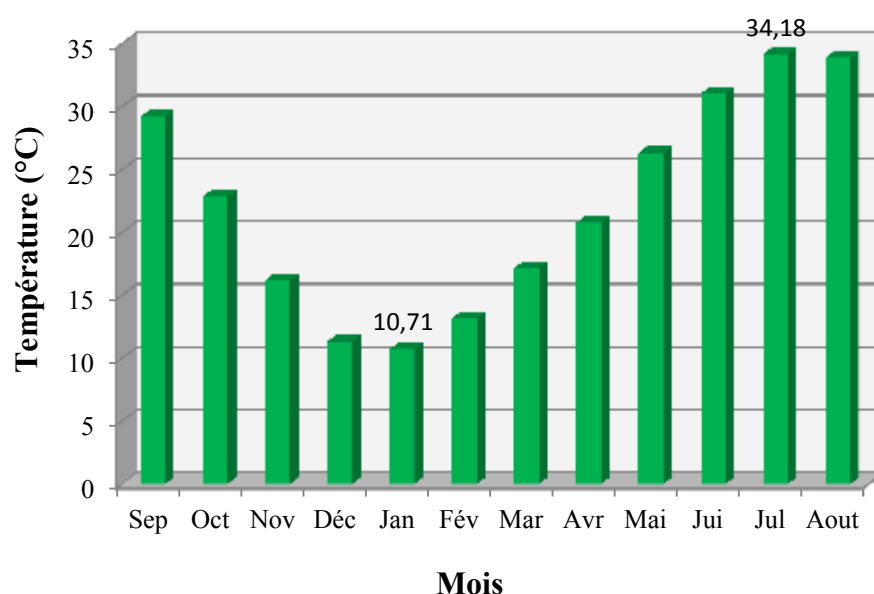


Figure 41 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (1976 – 2008) ONM d'Oued Souf

Les données observées pendant une période de 25 selon *Seltzer (1946)*, et 32 ans à la station de Guemmar, font ressortir que les températures moyennes enregistrées prennent en général des valeurs élevées avec un maximum enregistré au mois de Juillet 35 et 34.18°C respectivement et un minimum pendant le mois de Janvier 10.9 et 10.71 °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 (1923)*, le diagramme de *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 ($I = 2.28$) ce qui correspond a un climat Saharien (confirmé par l'abaque de l'indice d'aridité) (*fig. 42*).

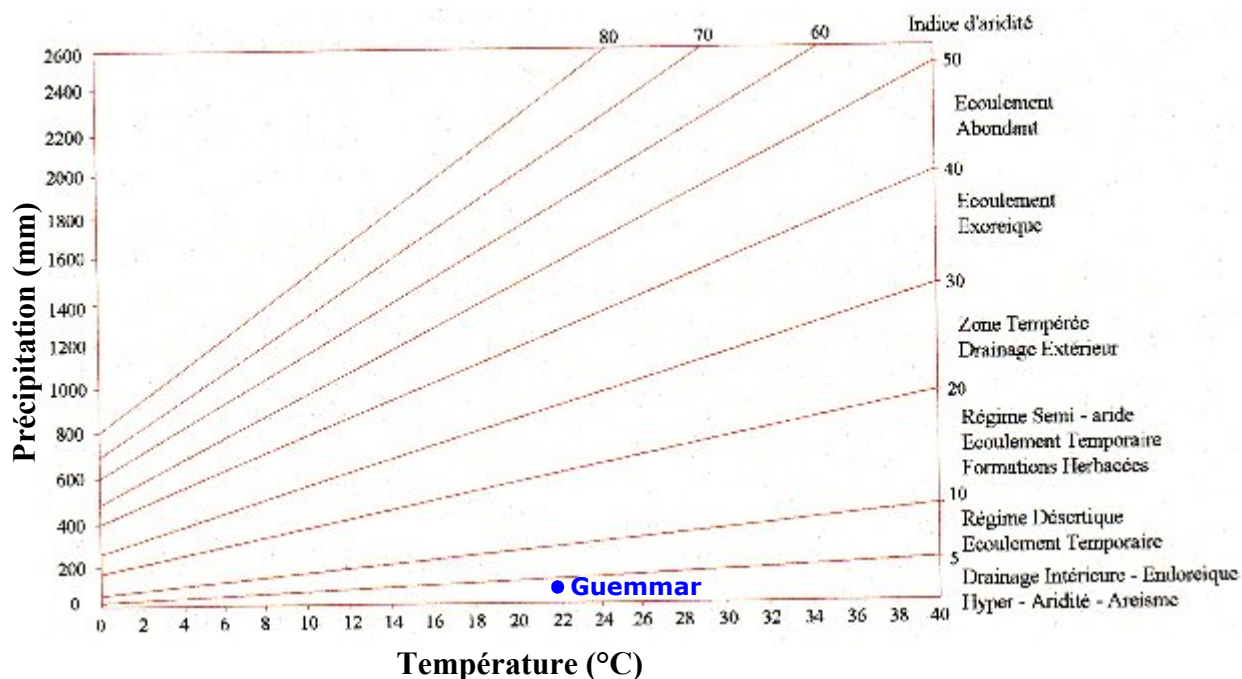


Figure 42 : Abaque de l'indice d'Aridité de De. MARTONNE de la vallée du Souf

4.2. Le climat – gramme de L. Emberger

Pour préciser le climat de la région nous employons le “climatgramme” de L. Emberger (*fig. 43*) sur lequel nous avons reporté les données relatives à la station de Guemmar avec en abscisse la moyenne des minimas de la saison froide en (°C) et en ordonnée le quotient pluviothermique Q_2 donné par la formule suivante :

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

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) ;
($T \text{ °K} = T \text{ °C} + 273.2$).

Les valeurs des différents paramètres et les résultats sont reportés dans le tableau 11.

Selon le climatgramme de L. Emberger, nous constatons que la station se situe dans la zone saharienne avec hiver chaud.

Tableau 11 : Les différents paramètres du climat – gramme de L. Emberger

Station	P (mm)	M		m		Q ₂
		°C	°K	°C	°K	
Guemmar	72.04	36.14	309.3	8.4	281.6	8.78

4.3. 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 (*fig. 44*). 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 ($P \leq 2T \text{ °C}$). Cette relation permet d'établir un graphique ombrothermique sur lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations. D'après la figure 44, nous remarquons que la station de Guemmar présente une seule période sèche qui s'étale sur toute l'année.

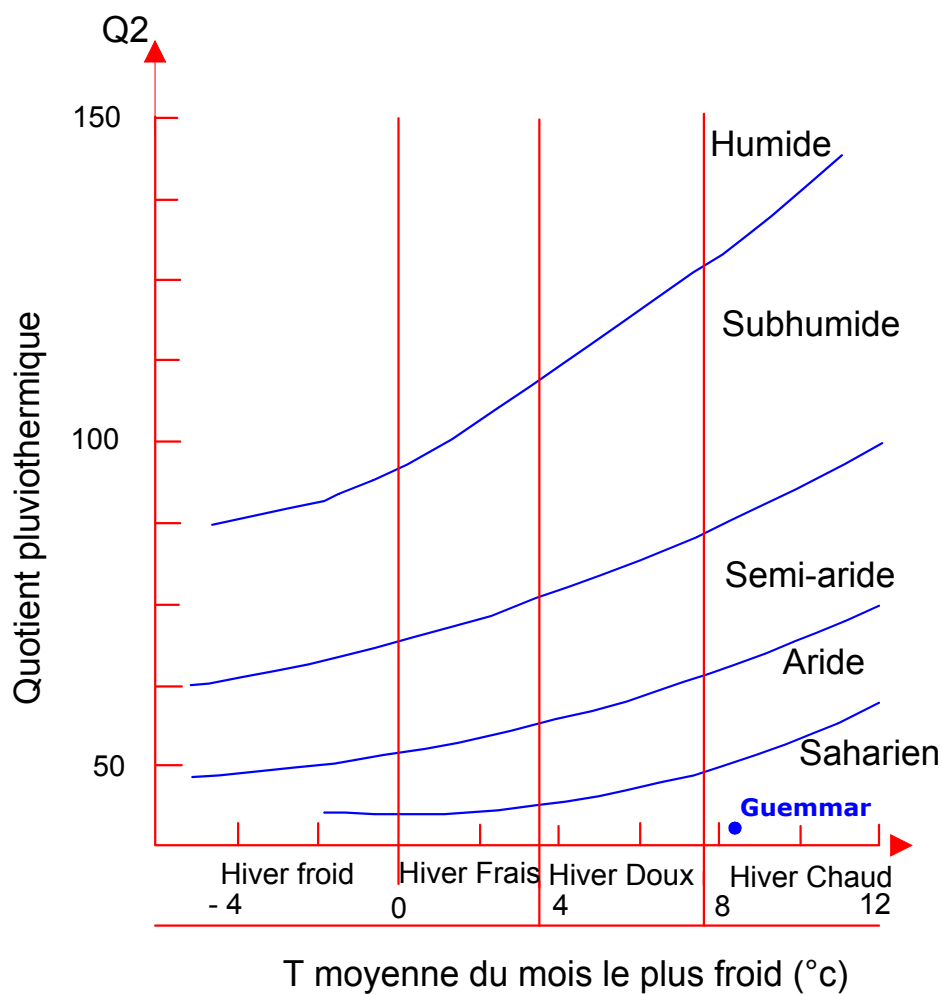


Figure 43 : Clima-gramme de L. EMBERGER de la vallée du Souf

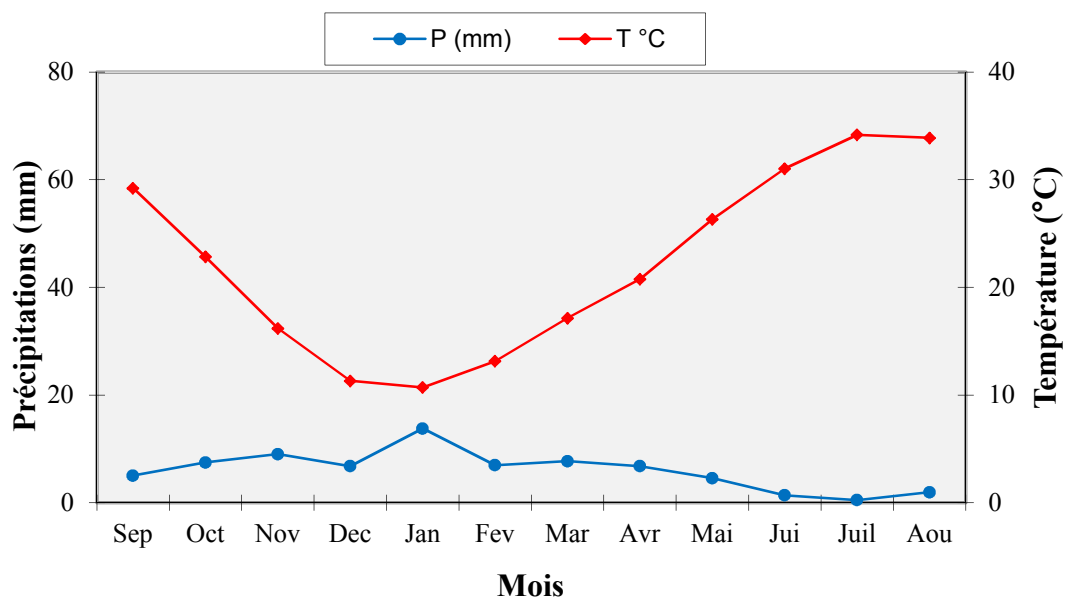


Figure 44 : Diagramme Ombrothermique de la vallée du Souf

4.4. 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 12 : 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)	5.04	7.48	9.03	6.8	13.78	6.97	7.72	6.8	4.57	1.38	0.51	1.96
T (°C)	29.22	22.85	16.2	11.33	10.71	13.16	17.16	20.76	26.33	31.03	34.18	33.89
P/T	0.17	0.33	0.56	0.60	1.29	0.53	0.45	0.33	0.17	0.04	0.01	0.06

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

5. Bilan hydrique

Le bilan hydrique permet d'évaluer la répartition des précipitations entre leurs différents composants (pluie, température, évapotranspiration potentielle et réelle...etc). La formule du bilan est la suivante : $P = ETR + R + I$

P : désigne la précipitation moyenne annuelle en mm.

ETR : désigne l'évapotranspiration réelle en mm.

R : désigne le ruissellement en mm.

5.1. 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 :

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

Où :

ETP : Evapotranspiration mensuelle ;

T : Température moyenne mensuelle en (°C) ; P_m (mm)

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 13 : Bilan hydrique de la station de Guemmar sur une période de 30 ans (1976-2008)

Mois Paramèt	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Annuel
P (mm)	5.04	7.48	9.03	6.8	13.78	6.97	7.72	6.8	4.57	1.38	0.51	1.96	72.04
T (°C)	29.22	22.85	16.2	11.33	10.71	13.16	17.16	20.76	26.33	31.03	34.18	33.89	29.22
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)	140.98	72.90	28.59	11.69	10.43	16.84	38.51	64.83	126.35	190.16	244.72	225.94	1171.94
ETR (mm)	5.04	7.48	9.03	6.8	10.43	10.32	7.72	6.8	4.57	1.38	0.51	1.96	72.22
RFU (mm)	0	0	0	0	3.35	0	0	0	0	0	0	0	3.35
EX (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DA (mm)	135.94	65.42	19.56	4.89	0	6.52	330.79	58.03	121.78	188.78	244.21	223.98	2591.46

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 2591.46 mm ce qui nécessite une irrigation presque sur toute l'année.

5.2. Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement (De)

L'ETR ou le déficit d'écoulement (De) est la quantité d'eau évaporée effectivement par le sol, les végétaux et les surfaces d'eau libres. Pour calculer l'ETR, plusieurs formules sont utilisées :

5.2.1. Formule de TURC

Formule en fonction des températures et des précipitations moyennes annuelles. Elle est applicable à tous les climats :

$$\text{Où } L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

Avec:

P : désigne précipitation moyenne annuelle (mm) ;

L : désigne un paramètre dépendant de la température (T)

T : désigne la température moyenne annuelle (°C).

Le calcul donne un **ETR = 76.14 mm**

Nous remarquons que l'ETR obtenue par l'application de la formule de Turc est supérieure aux précipitations, ce qui ne correspond pas réellement aux observations que l'on peut faire sur le terrain. En fait, ce calcul doit se faire sur la période où il pleut et a tenir compte de la durée de la pluie.

5.2.2. Méthode de WUNDT

L'abaque de WUNDT permet de déduire directement la valeur de l'ETR, cette valeur est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations.

Sur cet abaque on reporte en abscisse les températures moyennes annuelles, et en ordonnées les précipitations moyennes annuelles, et par lecture sur cet abaque on obtient le déficit d'écoulement correspondant à la station d'El Oued. Le report des valeurs sur l'abaque nous montre :

- Un déficit d'écoulement inférieur à 200 mm / an.
- Un quotient d'écoulement nettement inférieur à 10 %.

5.2.3. Formule de COUTAGNE

Le déficit d'écoulement (De) ou ETR peuvent être estimés en fonction de la température moyenne annuelle et de la précipitation moyenne annuelle, selon la formule suivante applicable

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

Où $\lambda = 1/0.8 + 0.14 T$

Et $ETR = De = P - \lambda P^2$

Avec :

De : désigne le déficit d'écoulement en mm

P : désigne la précipitation moyenne annuelle en m/an

λ : désigne un paramètre dépendant de la température.

T : désigne la température moyenne annuelle en °C.

Pour le cas de notre région, les précipitations sont inférieures à la limite inférieure donc cette formule n'est pas applicable ou inadaptée à ce type de climat.

6. 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, nous pouvons dire que la variation de l'humidité est homogène avec des moyennes mensuelles varient entre 31.37 % et 66.65 % et une moyenne annuelle de l'ordre de 48 %.

Tableau 14 : Humidité relative moyenne mensuelle (1997 – 2008)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Humidité %	47.49	53.02	60.28	66.65	65.26	55.91	48.9	43.72	38.6	34.43	31.37	34.91

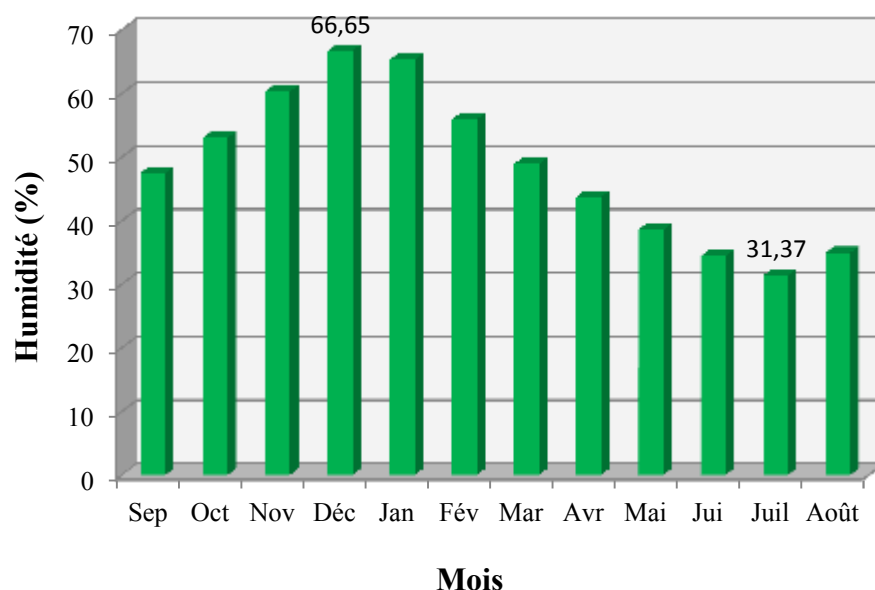


Figure 45 : Histogramme d'humidité relative moyenne mensuelle (1997 – 2008) ONM d'Oued Souf

7. La durée d'insolation

La vallée du Souf reçoit une quantité de lumière solaire relativement très forte (tab. 15) le maximum est atteint au mois de Juillet avec une durée d'insolation de 351.9 heures et le minimum enregistré au mois de Décembre avec une durée de 228 heures.

Tableau 15 : La durée d'insolation moyenne mensuelle (1997 – 2008)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Insolation (h)	274.4	257.2	233.6	228	240.2	248.6	276.5	288.6	307.5	345.9	351.9	331.7

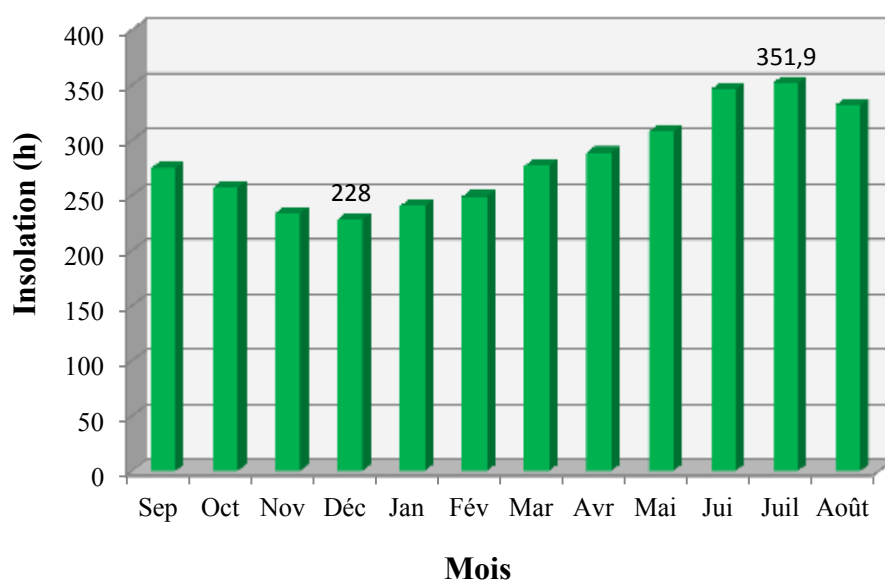


Figure 46 : Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle (1997 – 2008) ONM d'Oued Souf

8. Le vent

D'après les observations notées au niveau de la station d'ONM d'El Oued les vents ont une direction Est et Nord-Est, dites Bahri, prédominant ; puis à degré moindre ceux de direction Ouest et Sud –Ouest, caractérisés par une température élevée (Sirocco).

Généralement c'est au printemps que les vents 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 ci-dessous le maximum est enregistré au mois de Mai avec une vitesse de 4.29 m/s et le minimum en janvier de 2.25 m/s.

Tableau 16 : La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2008)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Le vent m/s	3.24	2.42	2.4	2.54	2.25	2.64	3.37	4.12	4.29	3.79	3.58	3.17

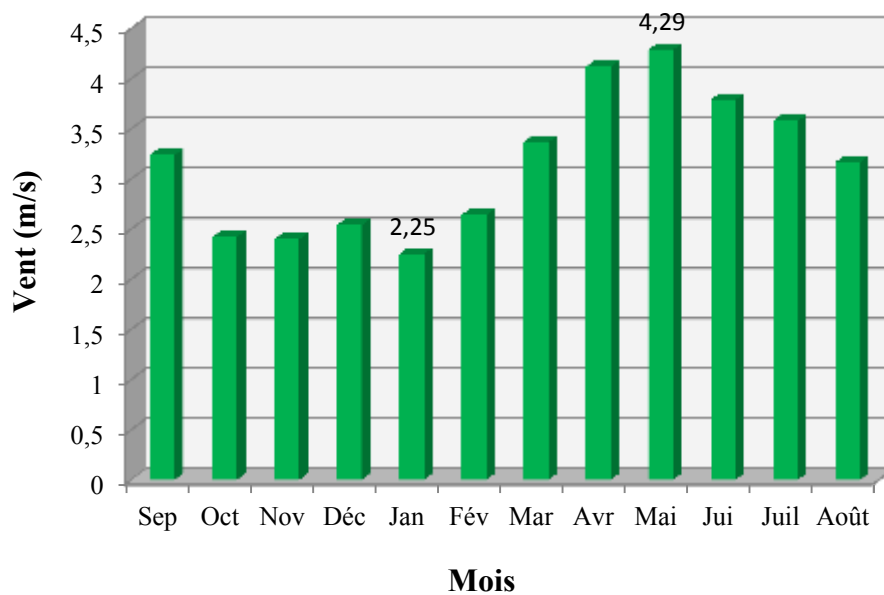


Figure 47 : Histogramme de La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2008) ONM d'Oued Souf

9. Conclusion

La région d'Oued Souf est caractérisée par un climat désertique ou hyperaride, avec un été chaud et sec et un hiver plutôt doux.

Les précipitations sont faibles et irrégulières, de l'ordre de 72.04 mm, et ne jouent généralement aucun rôle dans la recharge directe des nappes, sauf lorsqu'elles sont intenses

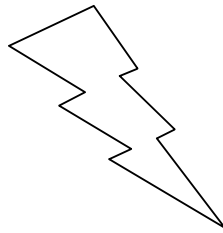
La température moyenne est de 22.23 °C pour la période (1976 - 2008), avec un maximum de 34.18 °C au mois de juillet et un minimum au mois de janvier 10.71 °C.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne 1171.94 mm, pour la période (1976 - 2008), l'évapotranspiration réelle est de 72.22 mm pour la même période. Elle est de 76.14 selon la méthode de TURC. Le déficit annuel est de 2591.46 mm.

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 %. Le mois le plus humide est décembre, caractérisé par une forte humidité (moyenne de 66.65 %) et d'un faible rayonnement solaire (moyenne de 228 heures), et le mois le plus sec est juillet, caractérisé par une faible humidité (moyenne de 31.37 %). La radiation solaire est très élevée (moyenne de 351.9 heures) ce qui traduit un pouvoir évaporant excessif.

Les vents sont de direction Est et Nord - Est avec une vitesse pouvant atteindre 50 km / h. C'est le paramètre le plus régulier dans la zone d'étude.

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 afin de calculer la dispersivité longitudinale α_L

Chapitre V

Caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques

1. Introduction

L'étude hydrogéologique a pour objectif de définir la structure et la géométrie de la nappe, les caractéristiques des réservoirs d'eaux souterraines, les modalités de leur 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'emménagement, la Perméabilité, ...etc.).

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

- Une nappe libre constituée essentiellement de sables et exploitée par un grand nombre de puits
- 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 Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye (*fig. 48*), dont l'extension couvre une superficie d'environ 1.000.000 km² (OSS, 2003) et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tinrhert, et d'Ouest en Est depuis la vallée du Guir - Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye.

Ce système a fait l'objet de plusieurs études depuis les années 1960 (*GEOPETROLE, 1964 ; BEL et CUCHE, 1969 ; UNESCO, 1972 ; De Marsily et al, 1978 ; GEOMATH, 1994 ; Besbes et Zammouri, 1988 ; Zammouri, 1990 ; Besbes et al, 2003*), qui ont contribué à la description des principales formations aquifères et à la délimitation de leurs extensions.

Ce bassin, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. Il renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs, appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Sur la base des rapports OSS (2003a et b), ainsi que les études de *Busson, 1970 et Fabre, 1976*, les termes CI et CT sont définies comme suit :

Le terme « Continental Intercalaire » désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins :

- à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne,
- au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la transgression cénomaniennne.

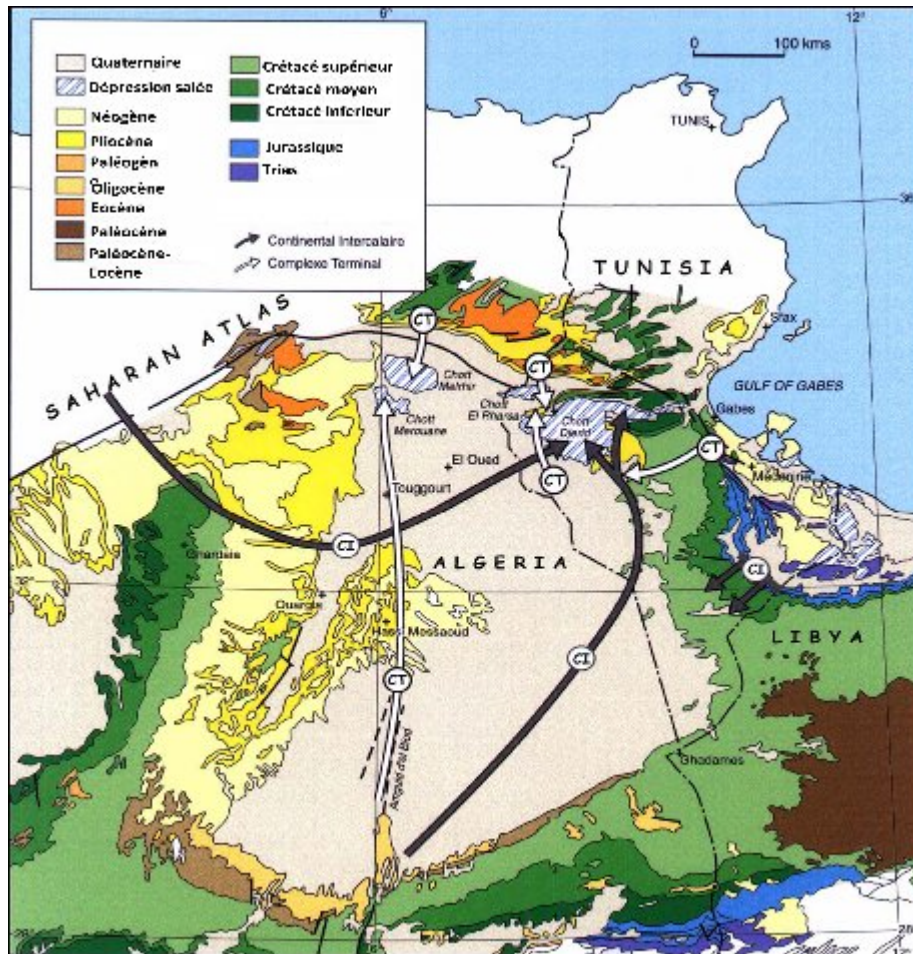


Figure 48 : Carte hydrogéologique du Sahara Septentrional (UNESCO, 1972 modifiée par Guendouz et al, 2003)

Le Complexe Terminal est, quant à lui, un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire, principalement du Miocène.

Une coupe schématique orientée Sud-Ouest Nord-Est à travers le Sahara (*fig. 49*) montre la nature et la disposition typique des principales formations du système aquifère du Sahara. 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, constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres.

Les accidents importants qui jalonnent la dorsale d'Amguid-El Biod ont affecté le réservoir du Continental Intercalaire dans la partie Sud du domaine, mais ne peuvent pas constituer une barrière hydraulique, puisque dans cette zone les écoulements sont parallèles aux failles qui, de plus, constituent plutôt des voies privilégiées pour l'écoulement que des véritables barrières (UNESCO, 1972).

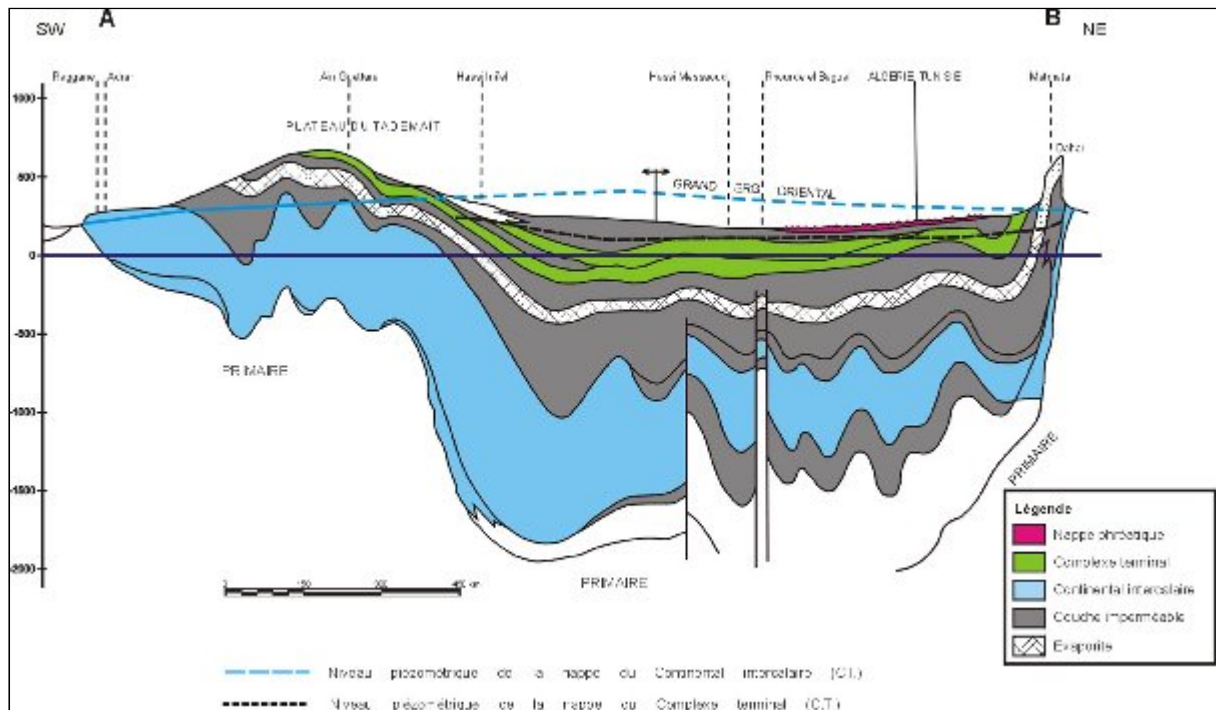


Figure 49 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972)

2.1. Le Continental Intercalaire (Barremo-Albien) : La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur. C'est un système aquifère multicouche, dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et une puissance variant entre 200 et 400 mètres. Le CI est qualifiée dès 1945 de « plus grand système hydraulique du Sahara » *Savornin, (1945)*.

Le trait marquant de ce réservoir aquifère est son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600.000 km² et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. Cependant, bien que l'intérêt majeur de ce système aquifère soit constitué par les grandes quantités d'eau qui y ont été stockées pendant les périodes pluvieuses du Quaternaire (*UNESCO, 1972*). Dans la région d'étude, cette nappe est captée par trois forages profonds d'une profondeur de (1800 à 2100 m), donnant un débit total de 680 l/s dont deux forages pour l'alimentation en eau potable (AEP) de la ville d'El Oued (430 l/s) et un forage pour l'irrigation à Sahan Berry d'un débit de 250 l/s, l'épaisseur du réservoir est importante et varie de 200 à 400 m, sa température atteint 60°C et la pression en tête de puits fermé est de 25 à 27 bars (*HPO & BG ; 2004*).

2.2. Le Complexe Terminal (Pontien) : Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes, englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène. En fait,

il est possible d'y distinguer trois ensembles aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. Ces trois ensembles sont représentés par les calcaires et dolomies du Sénonien et de l'Eocène inférieur, par des sables, grès et graviers du Pontien et, par les sables du Mio-Pliocène.

Dans le Souf, le meilleur niveau aquifère est contenu dans les sables du Pontien inférieur (*Dubost, 2002*) (fig. 50). Ceux-ci sont séparés des calcaires éocènes par les argiles sableuses et les marnes de la base du Continental Terminal (CI). En revanche, la nappe paraît en continuité avec les argiles et les sables du Mio-Pliocène, mais ceux-ci sont souvent d'une moins bonne perméabilité.

En allant du Sud vers le Nord de la région, le toit de la nappe principale s'enfonce rapidement en passant de - 150 m à El Oued pour atteindre - 450 m en bordure des chotts (Sif el Menadi). La surface piézométrique est située à quelques dizaines de mètres au-dessus du niveau de la mer: l'eau est ascendante dans le Sud (El Ogla) et nettement jaillissante au Nord (*Oeltzschner, 2003*). C'est d'ailleurs dans le Souf septentrional qu'on trouve les meilleures conditions d'exploitation : les sables grossiers du Pontien inférieur ont plus de 100 m d'épaisseur et l'eau a une qualité assez bonne (3 g/l de résidu sec). Jusqu'à 2004 la nappe du Complexe Terminal 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'AEP avec un débit de 2128 l/s (*HPO & BG ; 2004*).

2.3. La nappe phréatique : La Nappe libre est contenue dans des sables fins, intercalés par des tufs ou des lentilles d'argiles sableuses et gypseuses. Ce type de lithologie favorise le phénomène d'infiltration et le processus de la remontée capillaire. Cette nappe repose sur une bonne assise argileuse compacte et plastique imperméable d'une épaisseur de 20 m. La profondeur de l'aquifère varie entre 10 et 40 m, et son épaisseur peut atteindre localement 100 m (*Saibi, 2009*). Elle est exploitée par 1040 puits équipés de groupes motopompes (*HPO & BG, 2002*). La perméabilité moyenne de la nappe libre est de 10^{-4} m/s (*Kherici, 1996*). Sa transmissivité horizontale et son coefficient d'emmagasinement ont été estimés respectivement à 10^{-2} et $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ (*Levassor, 1978*).

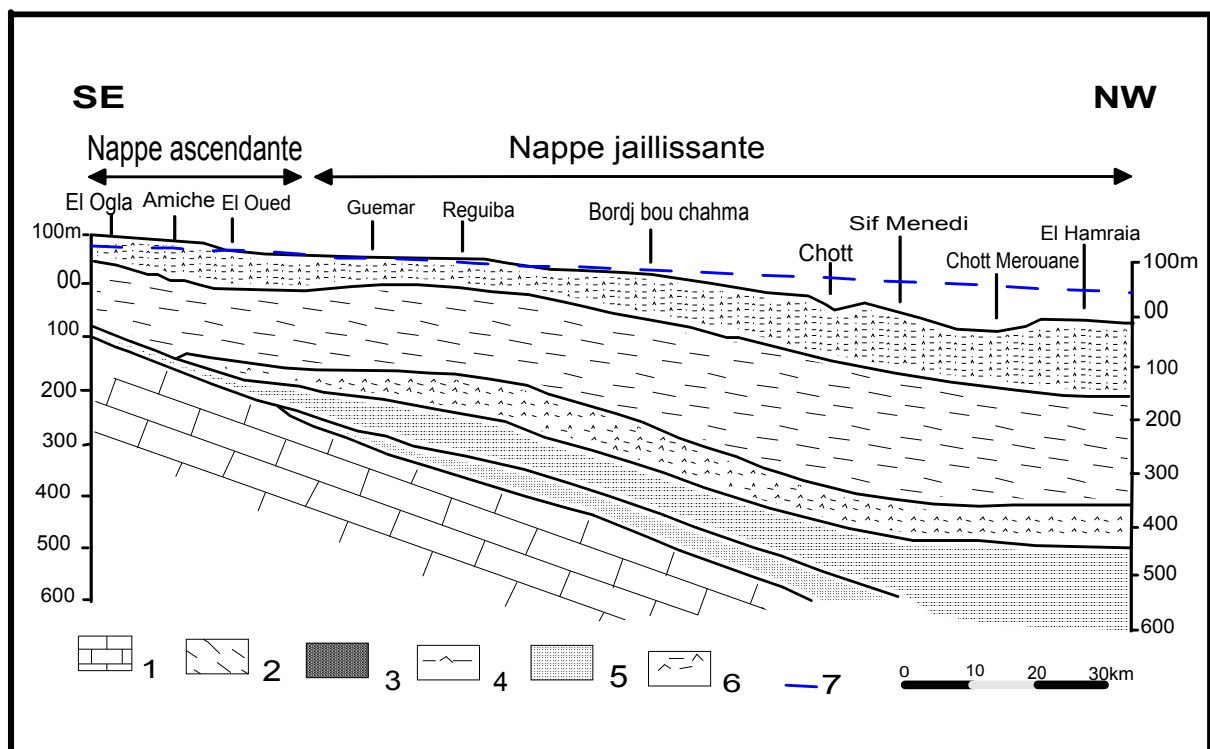
3. Aperçu historique

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 déperies.

Avant la réalisation du premier forage en 1956, la nappe ne suscitait pas d'inquiétudes, car elle était presque l'unique ressource exploitée, soit pour l'AEP ou pour l'irrigation. Autre fois, dans le Souf la palmeraie était plantée dans le Ghout à environ 1 m 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 impose ainsi une demande importante et incessante des besoins en eau pour l'AEP 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 $119.92 \text{ Hm}^3/\text{an}$ (ANRH, 2005) 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.

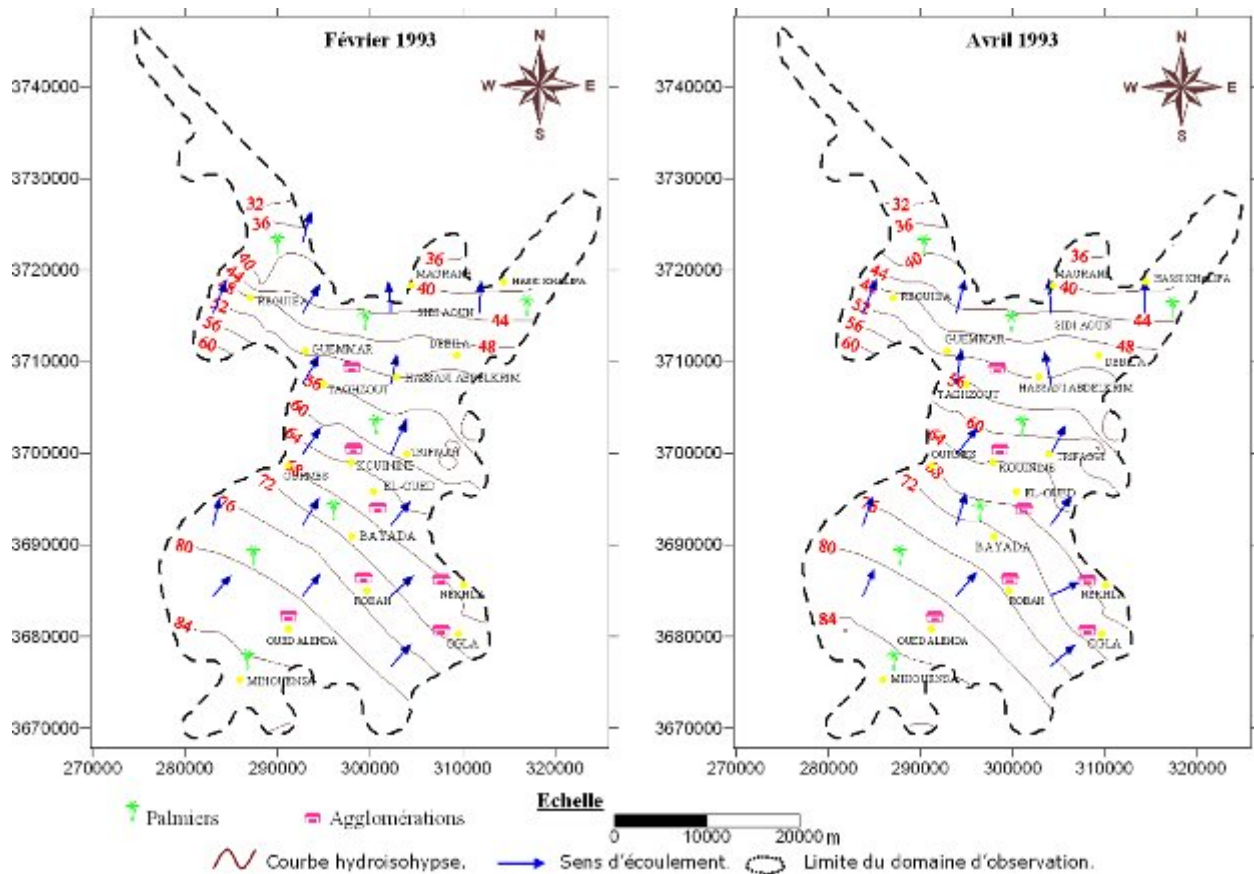


1- calcaire de l'Eocène inférieur marin et de l'Eocène moyen évaporitique. 2- Argiles sableuses et marnes de la base du continental terminal. 3- Sable grossiers à graviers du Pontien inférieur. 4- Argiles et gypse dominants. 5- Argiles et sable dominants. 6- Argile sable et gypse (les trois derniers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

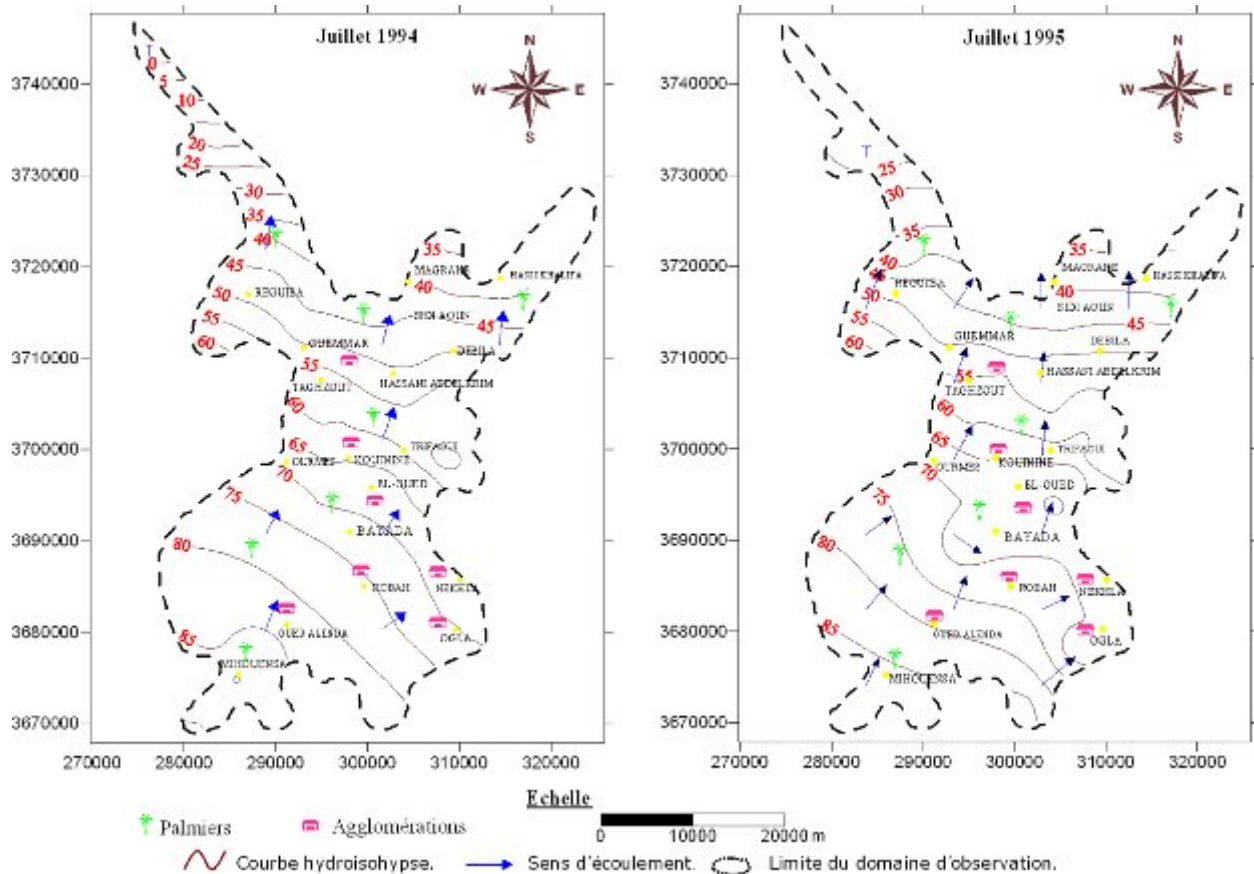
Figure 50 : Coupe hydrogéologique du Souf

4. Etablissement et interprétation des cartes piézométriques

Depuis 1950, aucune carte piézométrique de la nappe libre du Souf n'a été établie ; ceci est dû soit à un manque de moyens, soit à l'absence d'un réseau de surveillance piézométrique. A partir du mois de février 1993 plusieurs campagnes de mesures piézométriques ont été effectuées par les services de l'ANRH sur un réseau de surveillance préalablement choisi.



P



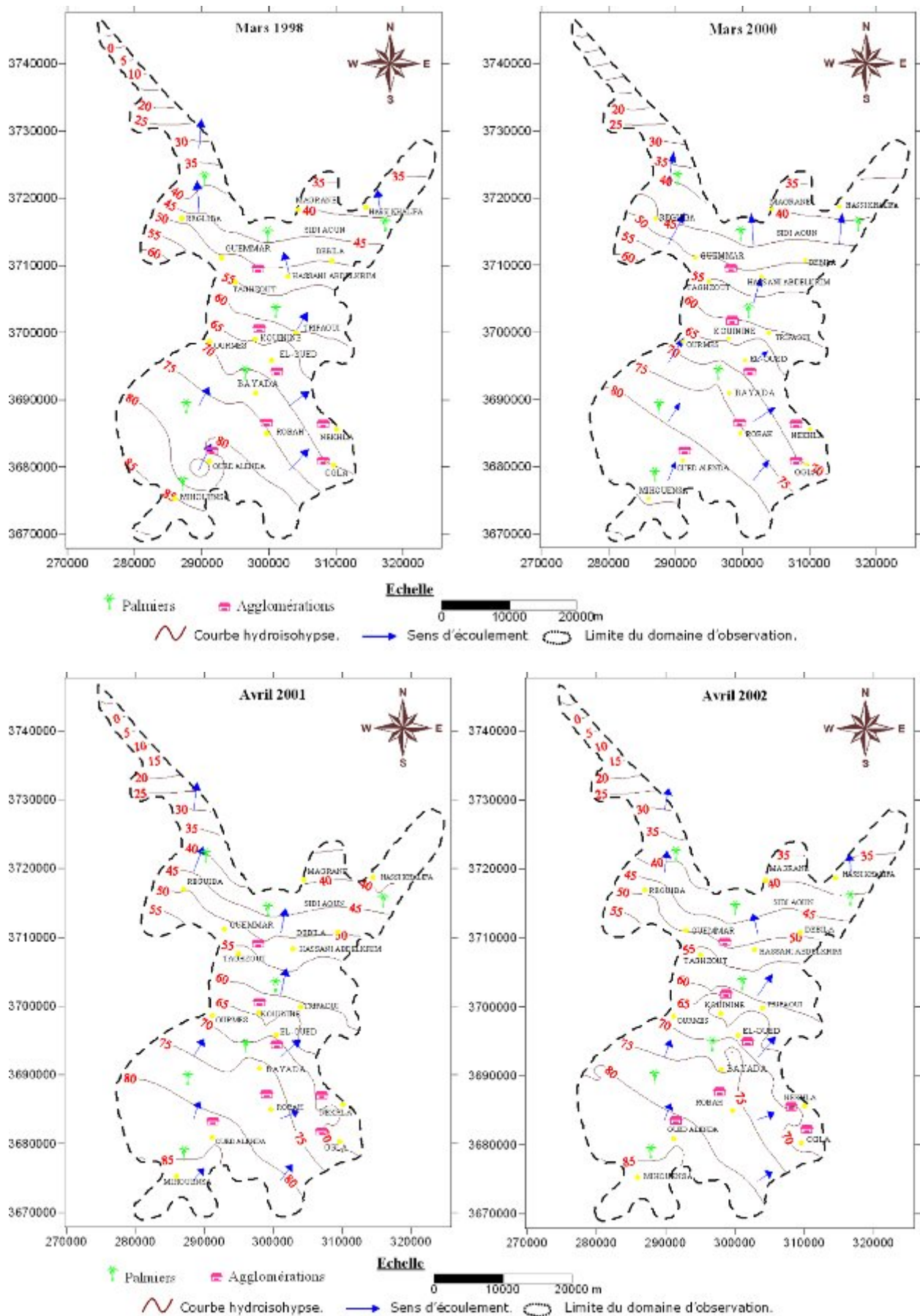


Figure 51 : Cartes piézométriques pour les différentes campagnes

4.1. Interprétation des cartes piézométriques (fig. 51)

D'après les cartes piézométriques de février et avril 1993, juillet (1994, 1995), mars (1998, 2000) et avril (2001, 2002) nous remarquons que le niveau piézométrique le plus haut de la nappe est située au Sud-Ouest avec une cote près de 90 m (Mihouensa et Oued Alenda), alors que le plus bas est localisé au Nord-Ouest avec une cote d'ordre 5 m (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 variant entre 0.5‰ (carte piézométrique février 1993) et 0.9‰ (carte piézométrique juillet 1994). Par contre, dans la partie Nord-Ouest les courbes sont plus serrées avec un gradient de l'ordre 6 ‰. D'une manière générale l'écoulement de la nappe se fait du Sud vers le Nord pour toutes les cartes.

4.2. Variation du niveau piézométrique entre février 1993 et avril 2002

Afin de voir la variation du niveau piézométrique entre la première campagne réalisée en février 1993 et la dernière campagne en avril 2002, nous avons élaboré la carte ci-dessous (fig. 52), cette dernière nous a permis de constater :

Une montée du niveau piézométrique de la nappe phréatique:

- Aux plantations irriguées par les forages du CT de Foulia (de 1.4 m).
- Près du rejet de la ville d'El Oued avec une montée atteint les 4.5 m.
- 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 6 m au Nord-Est de Guemmar, 1.8 m dans la région de Riguiba et Hassi Khalifa, 1 m entre Nekhla et Ogla et de 0.7 m à Mihouensa. (Drouiche, 2008)

4.3. Variation du niveau piézométrique entre avril 2001 et avril 2002

Entre avril 2001 et avril 2002 (fig. 53), une montée (en vert) du niveau de la nappe phréatique a été constatée au rejet de la ville d'El Oued et vers le Nord-Ouest avec une montée de 1 m. Cependant un rabattement (en bleu) à été enregistré dans les zones agricoles au Nord d'El Oued avec une descente de 2.4 m à l'Est de Guemmar, et de 0.5 à 1 m au Sud-Est de Hassani Abdelkarim, autour de ceux-ci et aux alentours de Nekhla et à l'Ouest de Bayada.

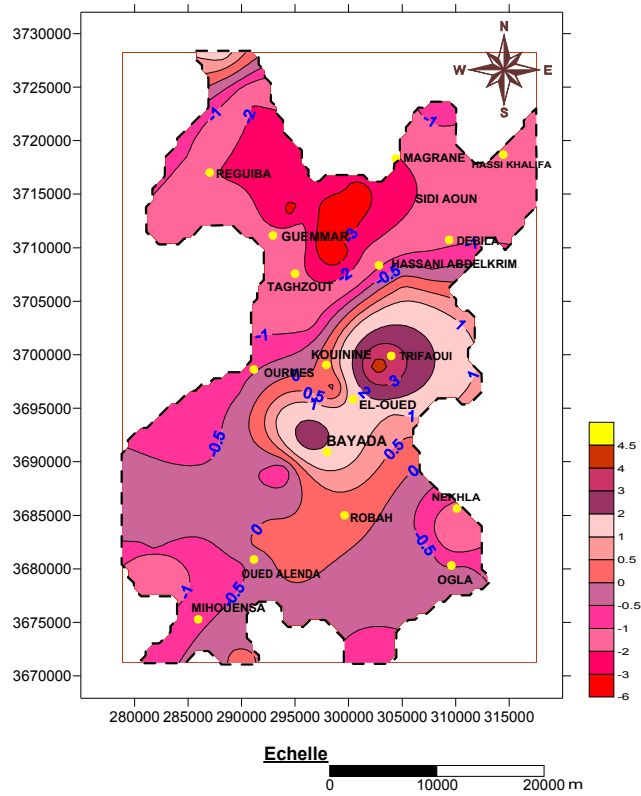


Figure 52 : Fluctuations piézométriques entre février 1993 et avril 2002

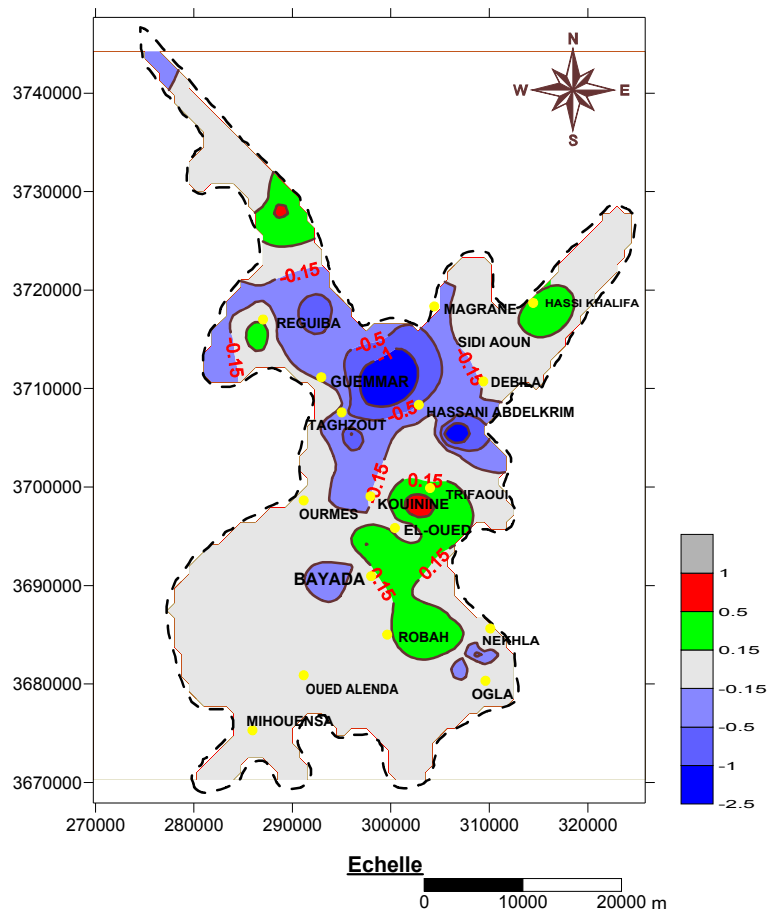


Figure 53 : Fluctuations piézométriques entre avril 2001 et avril 2002

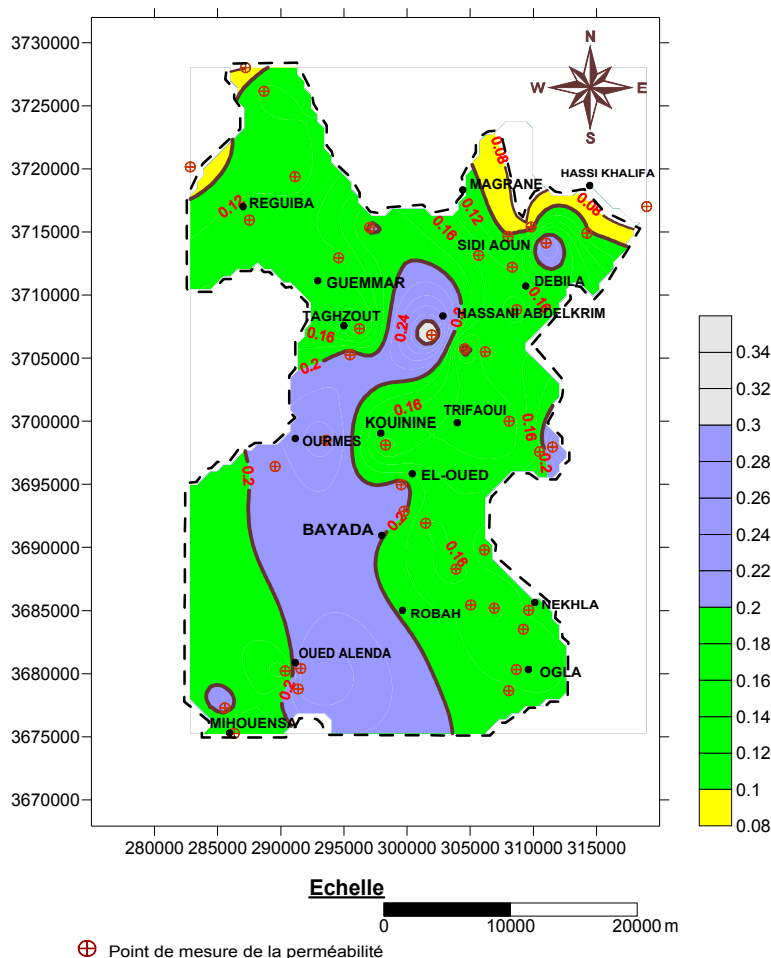


Figure 54 : Carte d'iso valeurs de perméabilité en 10^{-3} m/s

5. Interprétation de la carte de perméabilité

La plupart de la zone d'étude (fig. 54) a des valeurs de perméabilité qui varient entre 10^{-4} et $2 \cdot 10^{-4}$ m/s. Le couloir Oued Alenda, Bayada, Ourmes jusqu'à Hassani Abdelkrim présente des valeurs de perméabilité oscillant entre $2 \cdot 10^{-4}$ et $3 \cdot 10^{-4}$ m/s. Dans le Nord-Est et le Nord- Ouest nous notons des valeurs relativement faibles de l'ordre de $0.08 \cdot 10^{-3}$ (couleur jaune). Nous pouvons dire que les valeurs de K sont très proches et tournent autour de 10^{-4} m/s

6. Profils de variation de la surface piézométrique

Pour avoir une idée sur la fluctuation de niveau piézométrique par rapport à la cote topographique (terrain naturel) et de visualiser les irrégularités de ce dernier, cinq profils ont été réalisés sur toute la zone d'étude ; l'un en long d'orientation Nord Sud, et quatre transversaux d'orientation Est Ouest. Les positions de ces profils sont illustrées sur la carte ci-dessous (fig. 55).

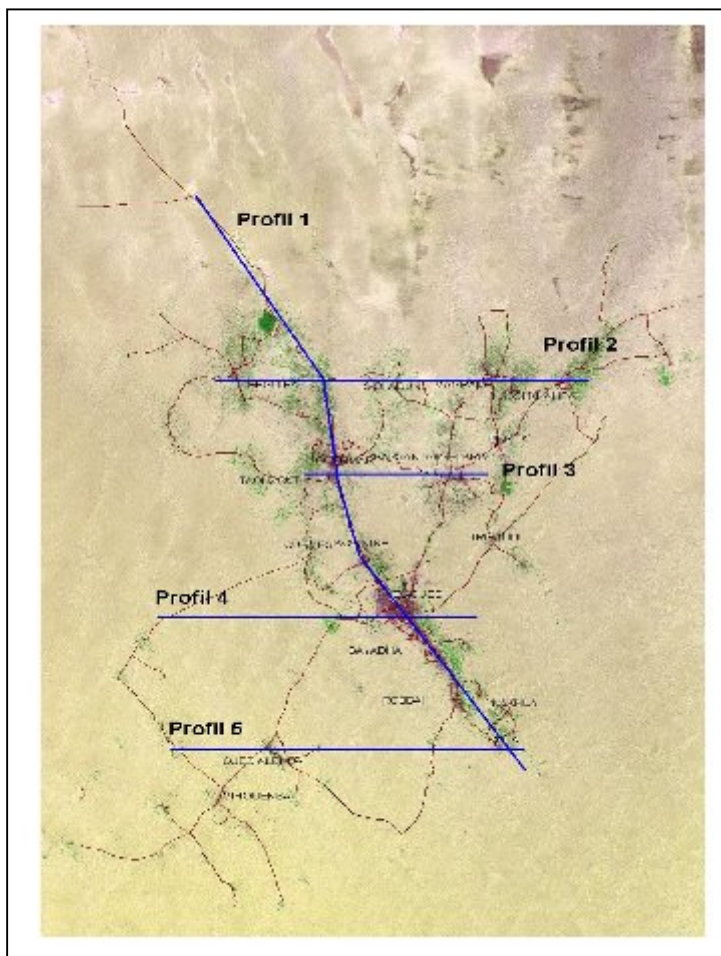


Figure 55 : Carte de situation des profils de la nappe phréatique (HPO & BG, 2004).

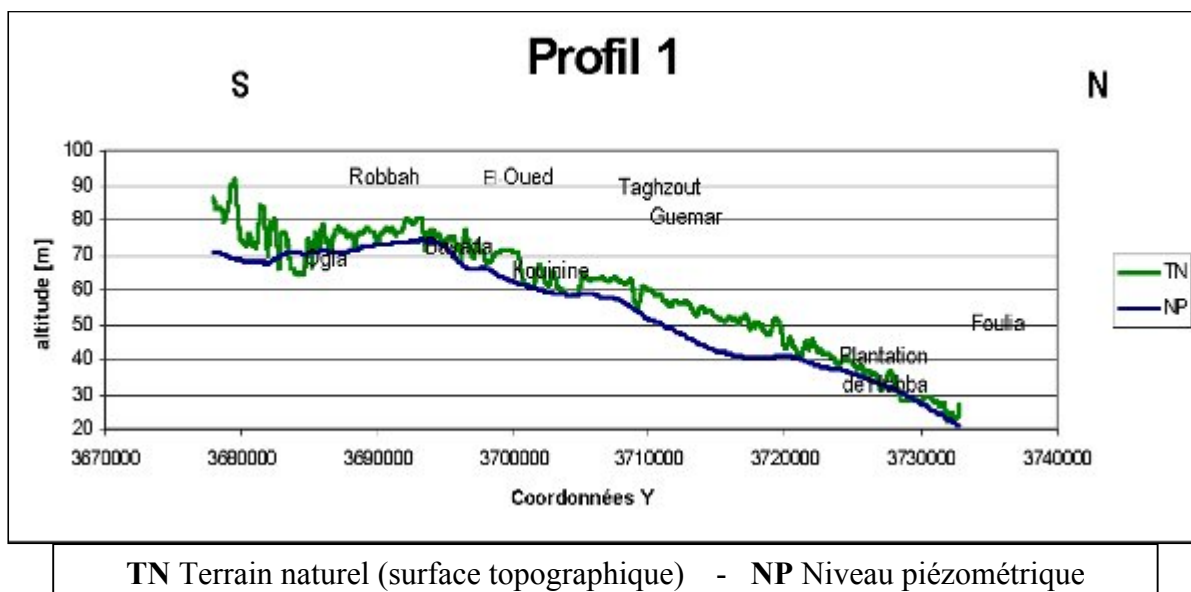


Figure 56 : Profil Nord Sud de la nappe phréatique dans l'axe Foulia – El Oued – Oglia (HPO & BG, 2004).

Le profil 1 (fig. 56) passe par les principales agglomérations. La nappe affleure à la surface dans les agglomérations d'El-Ogla, Bayada et El-Oued, elle envoie les ghouts près de ces dernières. Au Nord, elle s'approche de la surface du sol.

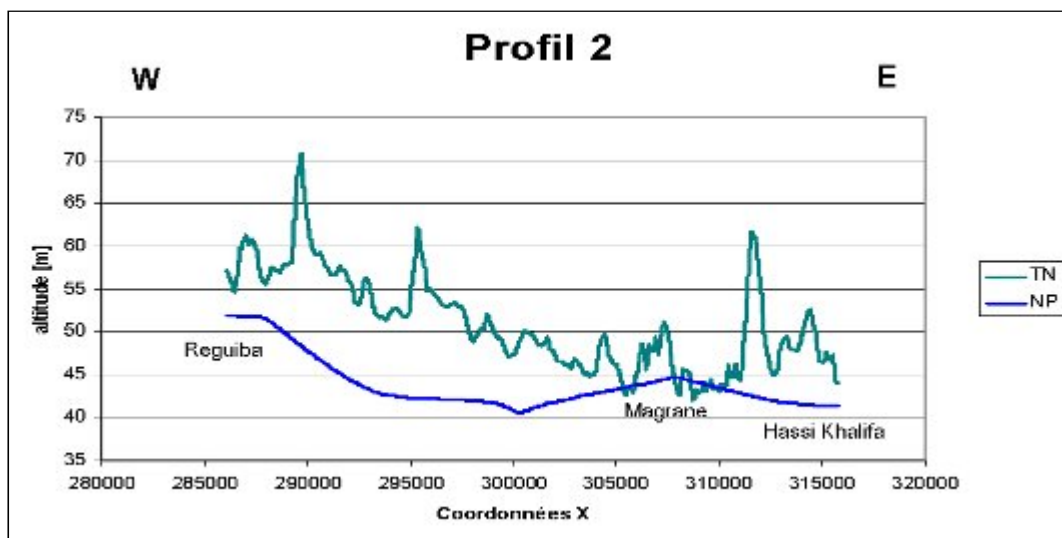


Figure 57 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique passant par Magrane (HPO & BG, 2004).

Le profil de la figure 57 montre que la nappe est profonde à l'Ouest et au centre, ensuite devient très proche de la surface du sol près de Magrane. Elle est déprimée sous les zones de cultures.

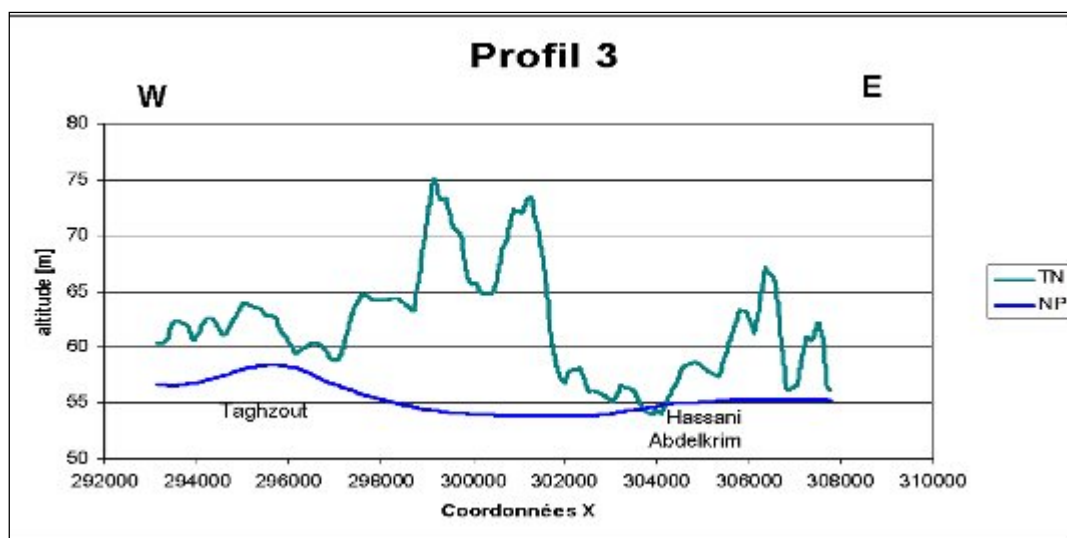


Figure 58 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique par Taghzout (HPO & BG, 2004).

Ce profil (fig. 58) montre que la nappe est peu profonde à l'Ouest et profonde au centre, puis devient proche de la surface et même affleure à la surface du sol à Hassani Abdelkrim.

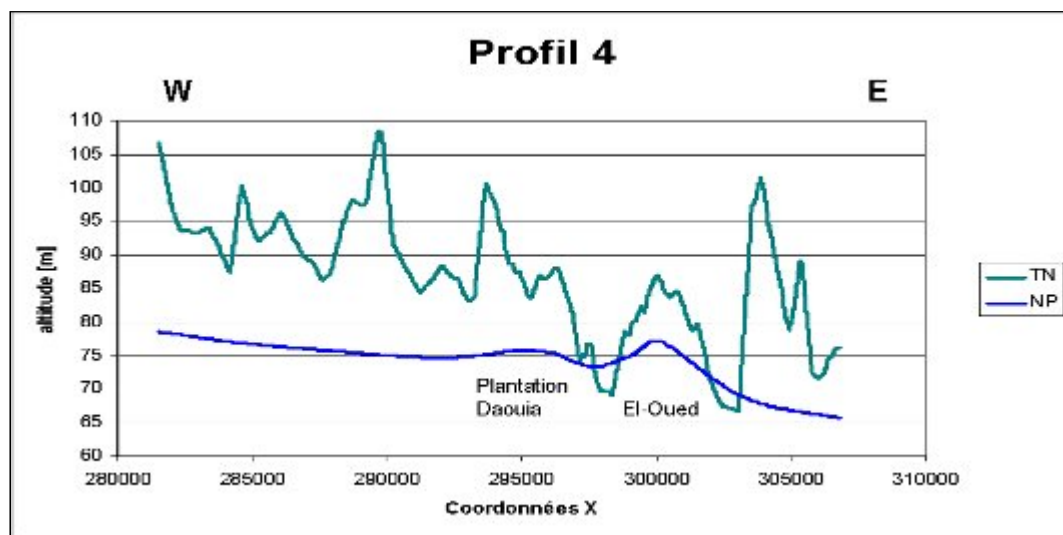


Figure 59 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique par El Oued (HPO & BG, 2004).

Ce profil (*fig. 59*) montre la remontée du niveau piézométrique de la nappe dans les zones d'alimentation au niveau de la plantation Daouia (irriguée à partir du CT) et de l'agglomération d'El Oued.

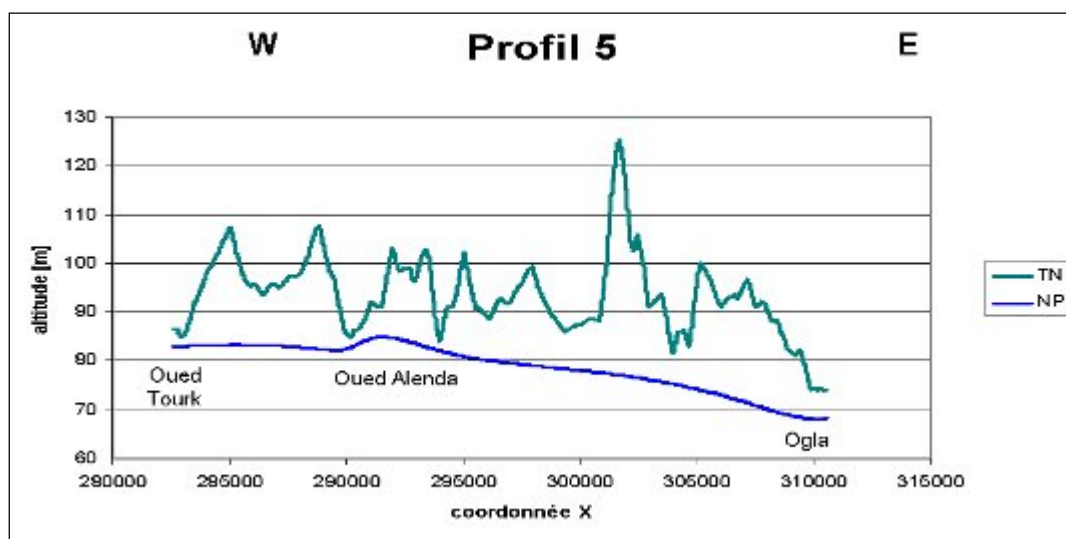


Figure 60 : Profil Est Ouest de la nappe phréatique par Ogla (HPO & BG, 2004).

Ce profil (*fig. 60*), situé le plus au Sud, présente la nappe à son état quasi naturel, sauf à Oued Alenda où la nappe monte localement sous l'effet du pompage des nappes profondes pour l'AEP de cette région.

A partir de ces profils, on note des hauts niveaux piézométriques dans les zones d'alimentation représentées par les agglomérations et les plantations irriguées à partir des nappes profondes, et des niveaux bas dans les zones influencées par l'évaporation des étends d'eau libre (Chott,

ghouts inondés) et évapotranspiration de la végétation (cultures traditionnelles en ghouts et cultures irriguées par des puits traditionnels ou améliorés dans la nappe phréatique).

7. Essais de pompage

Afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques de la nappe phréatique de la vallée du Souf, nous avons utilisé les données des essais de pompage (par palier et de longue durée), réalisés par les services de BG et HPO sur six sites répartis sur la vallée du Souf (Mihouensa, Nakhla, Ourmes, El-Oued, Kouinine et Foulia), du 24/02/2003 au 7/04/2003.

Chaque site d'essais est constitué par un puits de pompage et trois piézomètres complets, situés à 5, 15 et 45 m du puits de pompage (*fig. 61*). Les puits de pompage sont des puits existants avec des caractéristiques différentes, alors que tous les piézomètres réalisés pour ces essais sont identiques.

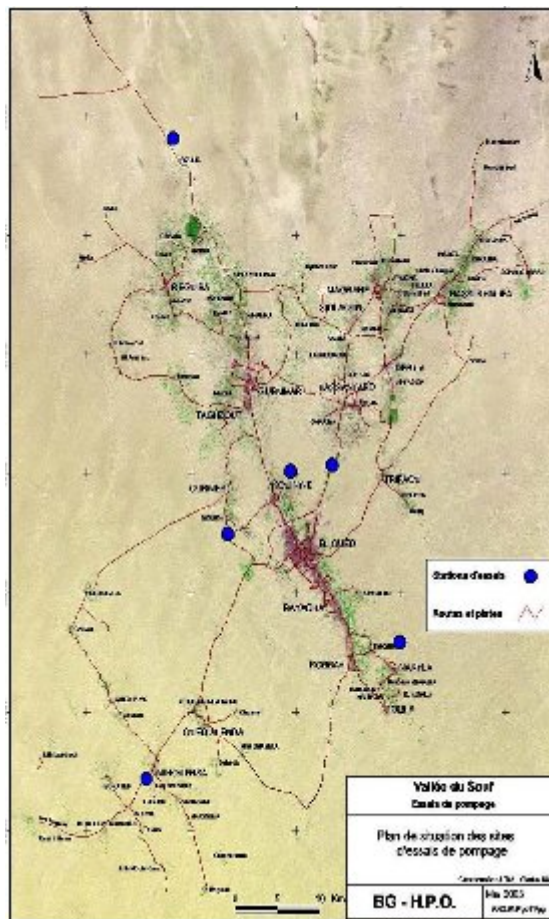


Figure 61 : Situation des sites des essais de pompages (HPO & BG, 2004).

Quatre limnigraphes ont été utilisés pour enregistrer les niveaux d'eau 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 (fig. 62), 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) et la porosité efficace (n_e).

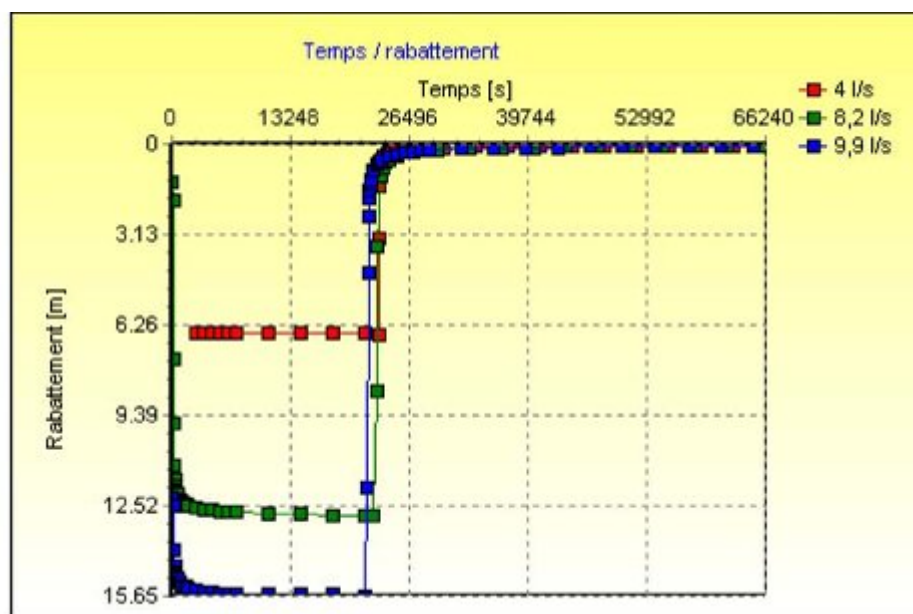


Figure 62 : Essais par paliers à Kouinine (HPO & BG, 2004).

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

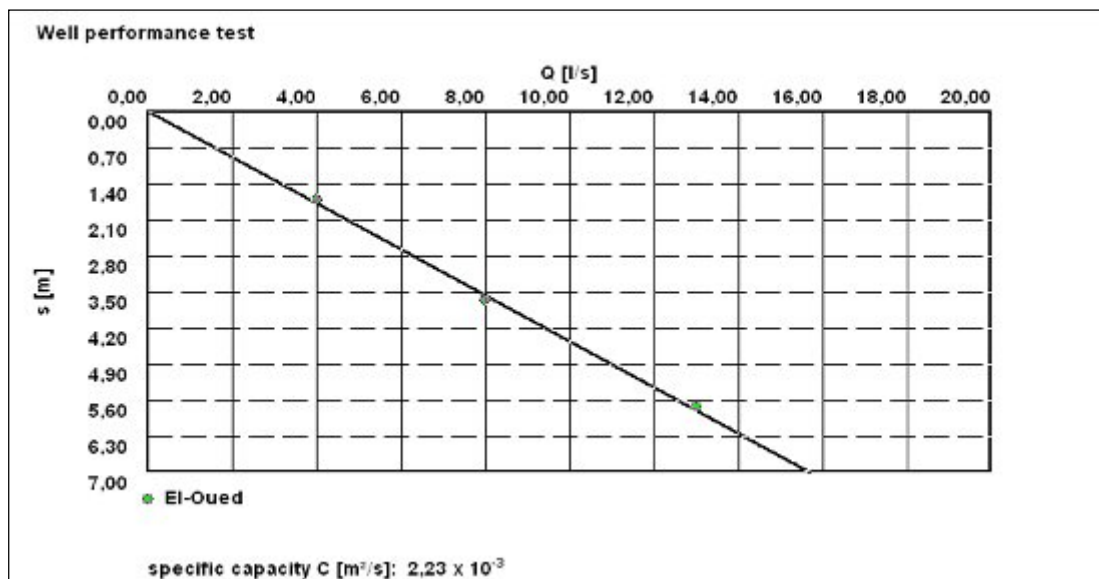
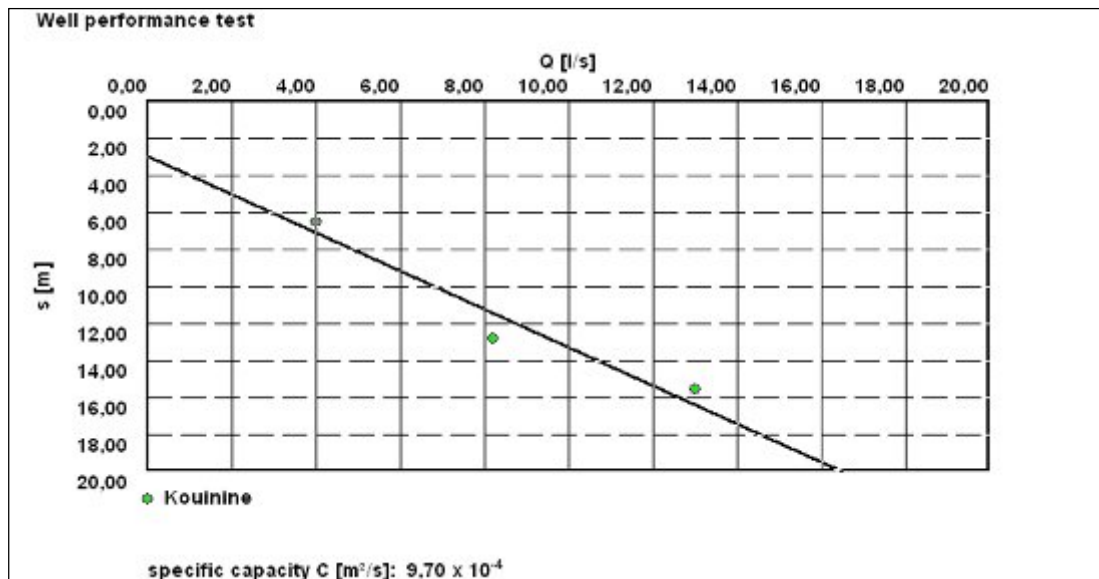
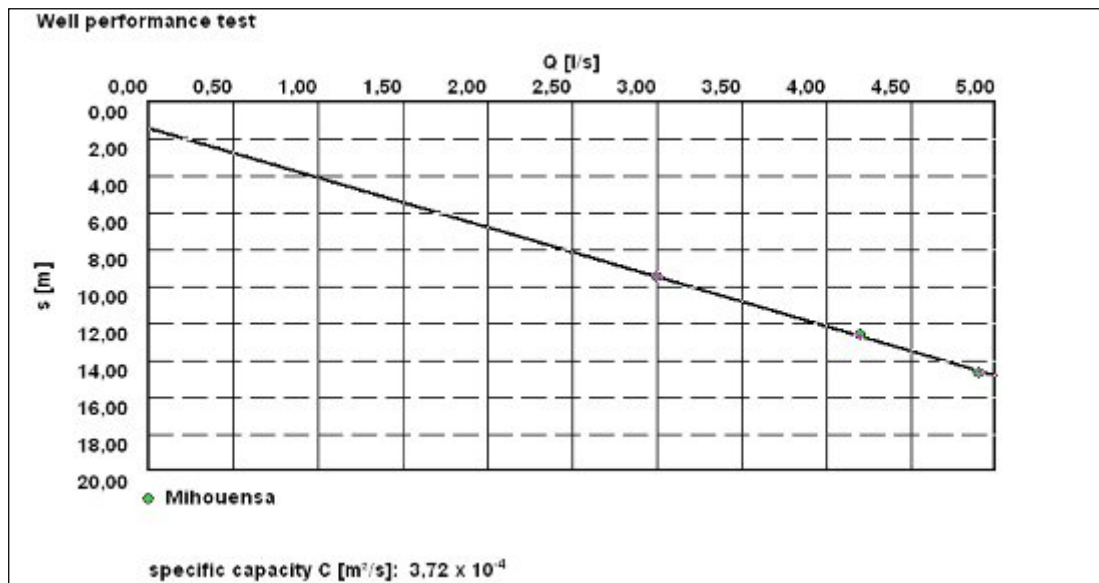
- Méthode de Cooper – Jacob distance – rabattement (pour des temps relativement élevés).
- Méthode de Moench (extension de la méthode de *Neuman (1972)* itérative pour des nappes libres ou confinées, avec un puits de pompage partiel ou complet et plusieurs puits d'observations).

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 a un diamètre supérieur à 0.06 mm. 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. Débit Spécifique :



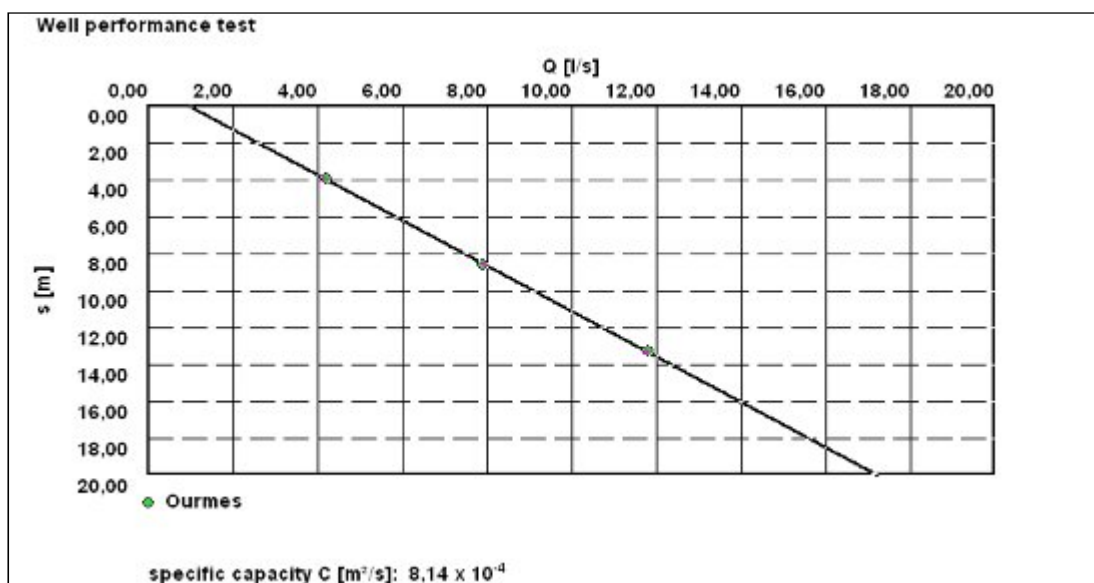
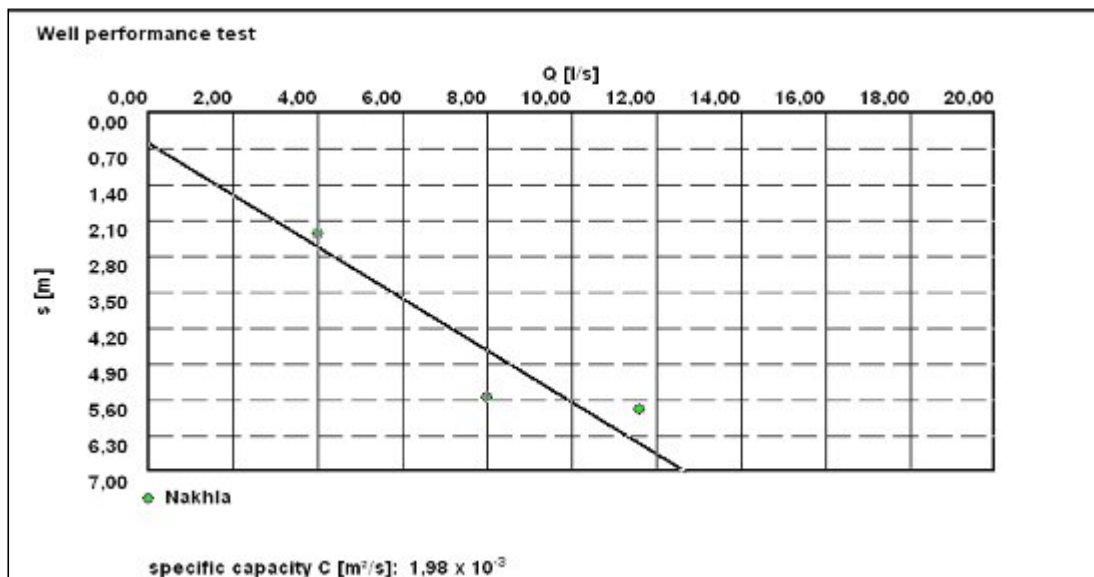
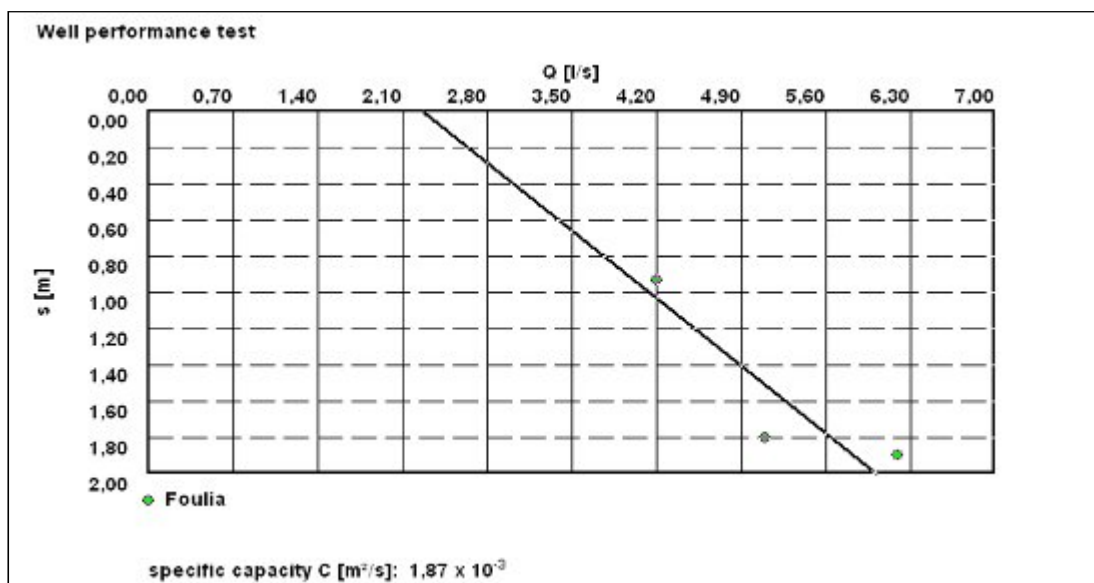


Figure 63 : Diagrammes de débit spécifique

Le débit spécifique à des valeurs moyennes d'ordre $1.87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ à El-Oued, Nakhla et Foulia, alors qu'il est relativement faible ne dépasse pas $9.70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ à Kouinine, Ourmes et Mihouensa (fig. 63). Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des débits spécifiques pour chaque site.

Tableau 17 : 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. Transmissivité et perméabilité

Essai de pompage de longue durée à El-Oued : un essai de pompage de 72 heures à débit constant de 15.4 l/s suivi de 24 heures de remontée, a été effectué 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. L'aquifère dans ce site est séparé par des niveaux moins perméables, constitués de sable fin, plus ou moins enduré, comprenant une forte proportion de gypse.

Les résultats des mesures sont représentés sur le même graphique, temps/rabattement, et l'utilisation de la méthode de Cooper-Jacob (fig. 64) a permis de déterminer la transmissivité et la perméabilité.

$T = 3.53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $K = 8.4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ pour une épaisseur effective de 42 m

Essai de pompage de longue durée à Foulia : l'essai a été effectué entre le 02/04/2003 et le 9/04/2003 sur un piézomètre exploité du réseau de surveillance d'ANRH, au-delà de la localité de Foulia, en direction de Biskra. La durée de l'essai est de 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. Dans ce site l'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.

Les mesures des rabattements dans le puits de pompage et les trois piézomètres sont représentées sur le même graphique « temps/rabattement » (fig. 65).

La transmissivité T déterminée par la méthode de Cooper & Jacob est de : $T = 2.58 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité $K = 2.15 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ pour une épaisseur effective de 12 m

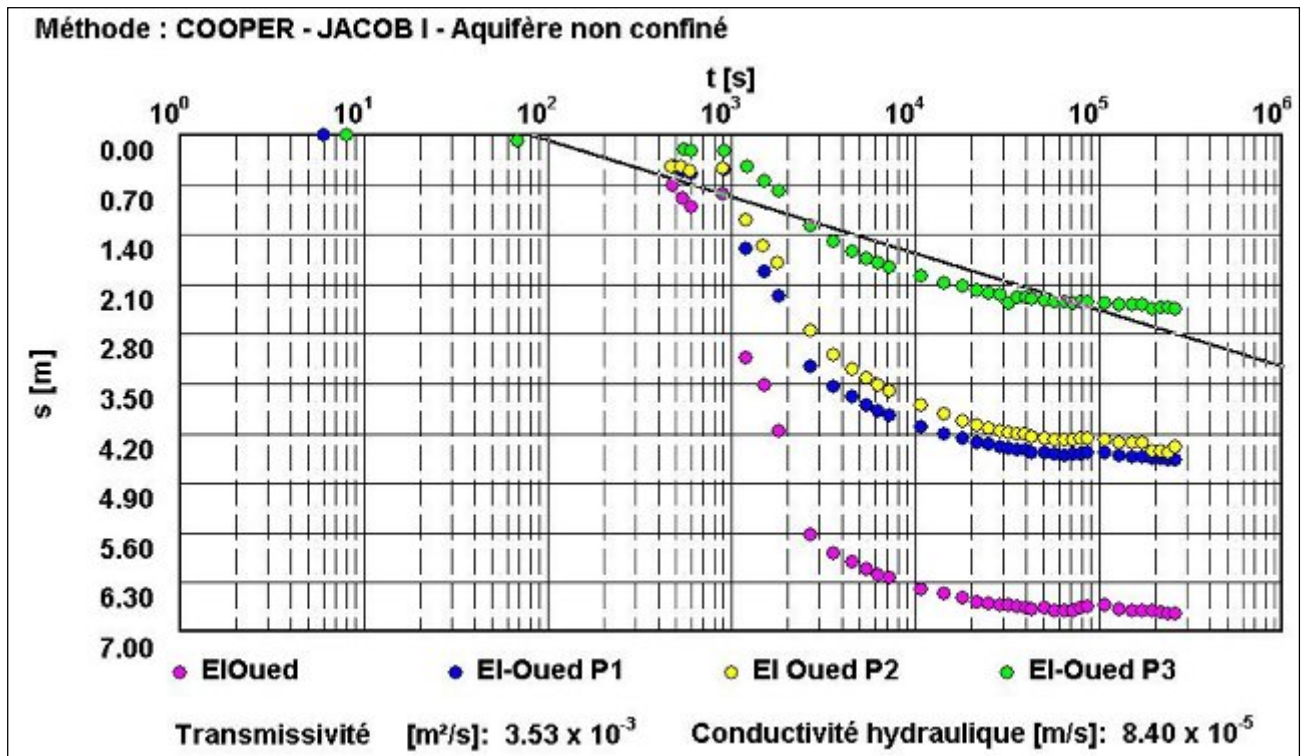


Figure 64 : Essai de pompage de longue durée à El-Oued selon la méthode de Cooper & Jacob

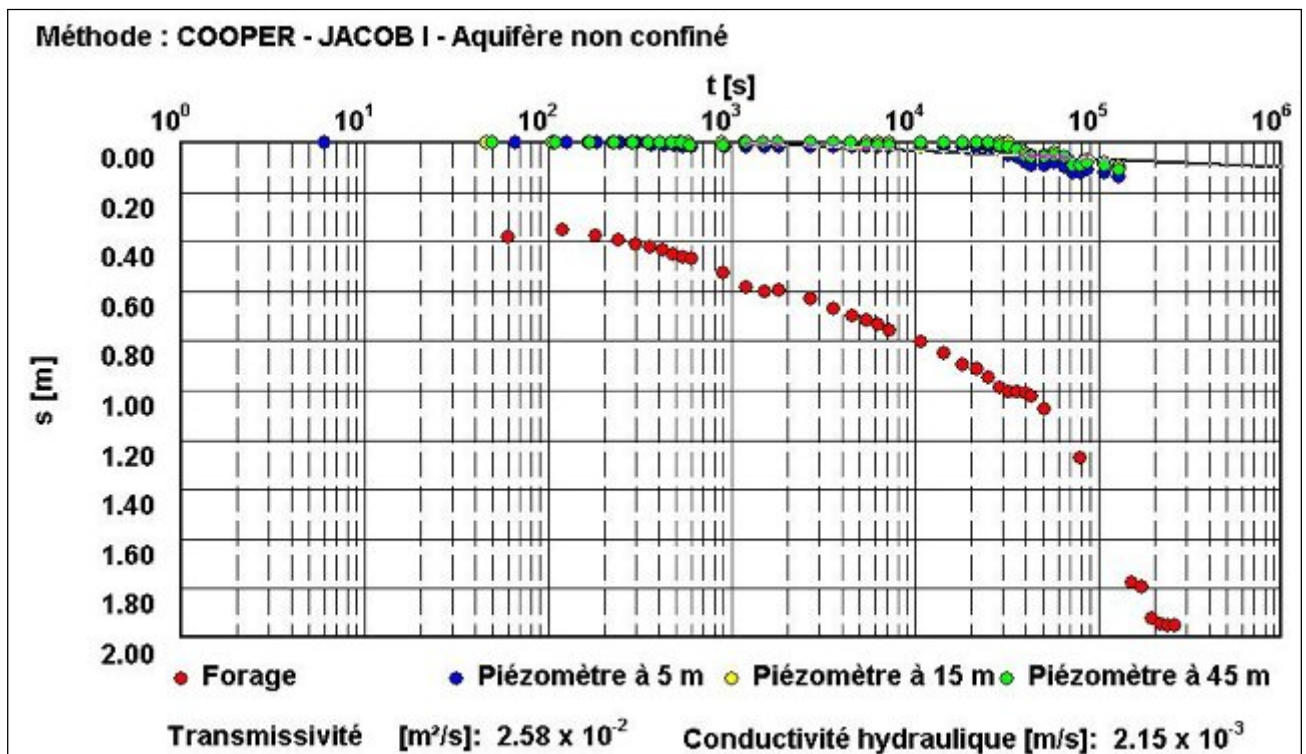


Figure 65 : Essai de pompage de longue durée à Foulia selon la méthode de Cooper & Jacob

Essai de pompage de longue durée à Kouinine : l'essai de pompage a été effectué 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. La durée de l'essai 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 du pompage. Le rabattement a été mesuré dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres. Les mesures sont représentées sur le même graphique « temps/rabattement » (fig. 66).

La transmissivité T déterminée par la méthode de Jacob & Cooper est de : $T = 3.73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité $K = 9.34 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ avec une épaisseur effective de 40 m.

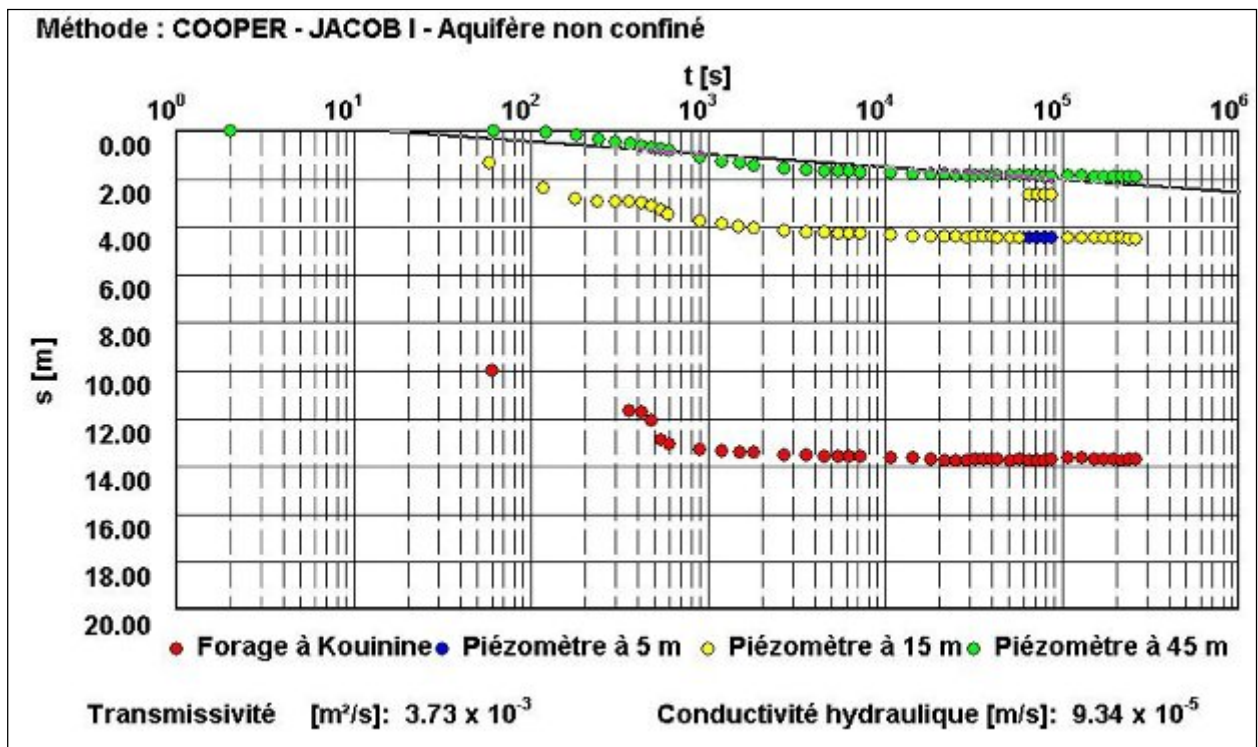


Figure 66 : Essai de pompage de longue durée à Kouinine selon la méthode de Cooper & Jacob

Essai de pompage de longue durée à Mihouensa : l'essai de pompage a été effectué entre le 27/03/2003 et le 01/04/2003 sur un puits amélioré, non exploité, dans un périmètre agricole exploité. L'aquifère est séparé par des niveaux moins perméables, constitué par du sable limoneux gypseux peu argileux. Cet essai à une durée de 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 résultats sont représentés sur le même graphique, temps/rabattement (fig. 67), en utilisant la méthode de Cooper-Jacob.

La transmissivité T, déterminée par la méthode de Jacob & Cooper, est de : $T = 2.57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité $K = 3.67 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ avec une épaisseur effective de 7 m.

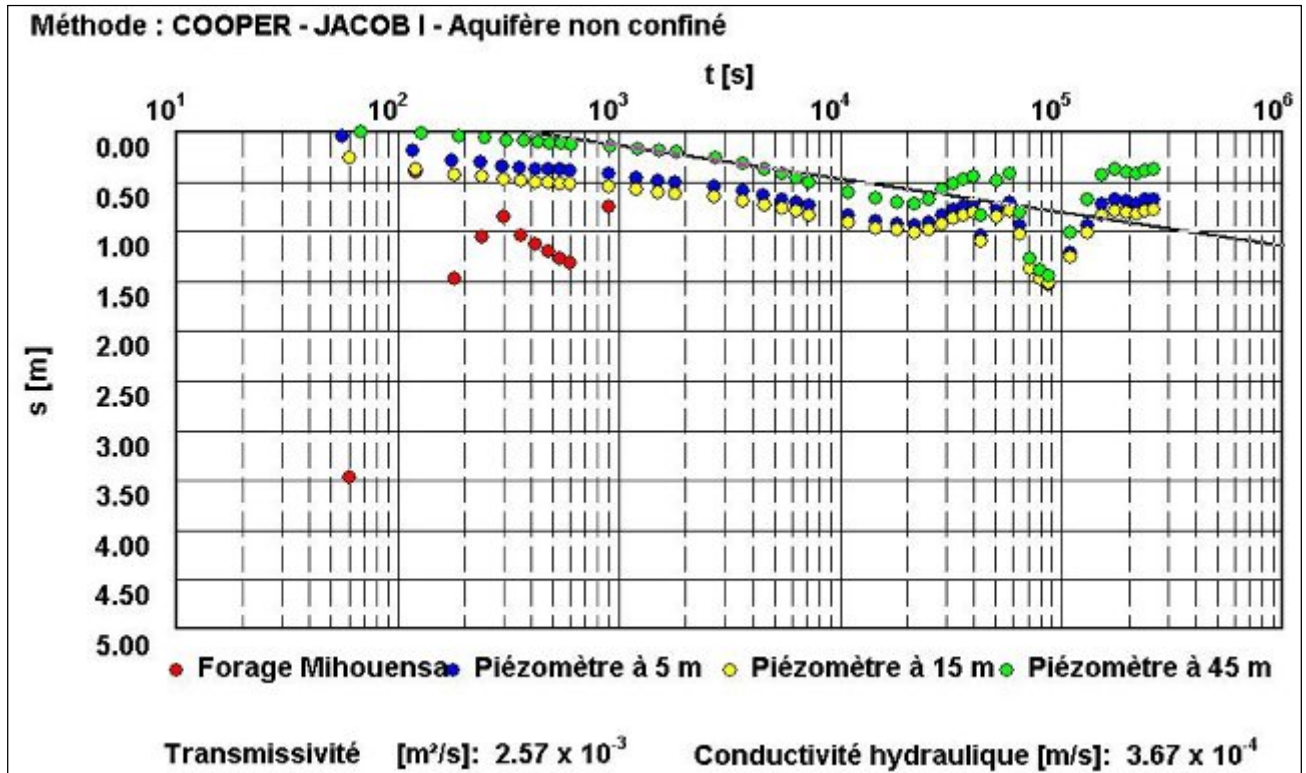


Figure 67 : Essai de pompage de longue durée à Mihouensa selon la méthode de Cooper & Jacob

Essai de pompage de longue durée à Nakhla : L'essai de pompage a été effectué 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. La durée de l'essai est de 72 h et 30 s à débit constant de 14.4 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt du pompage.

Les rabattements mesurés dans le puits de pompage et les trois piézomètres sont représentés sur le même graphique, temps/rabattement (*fig. 68*), en utilisant la méthode de Cooper-jacob.

La transmissivité T déterminée par la méthode de Jacob & Cooper est de : $T = 5.43 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité $K = 6.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ avec une épaisseur effective de 8 m.

Essai de pompage de longue durée à Ourmes : l'essai de pompage a été effectué entre le 17/03/2003 et le 24/03/2003 sur un puits amélioré exploité, dans la commune de Ourmes.

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 où les rabattements mesurés dans le puits de pompage et les trois piézomètres sont représentées sur le même graphique, temps/rabattement (*fig. 69*) a donné les valeurs de transmissivité et perméabilité suivantes :

$$T = 1.63 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K = 5.1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \text{ avec une épaisseur effective de 32 m.}$$

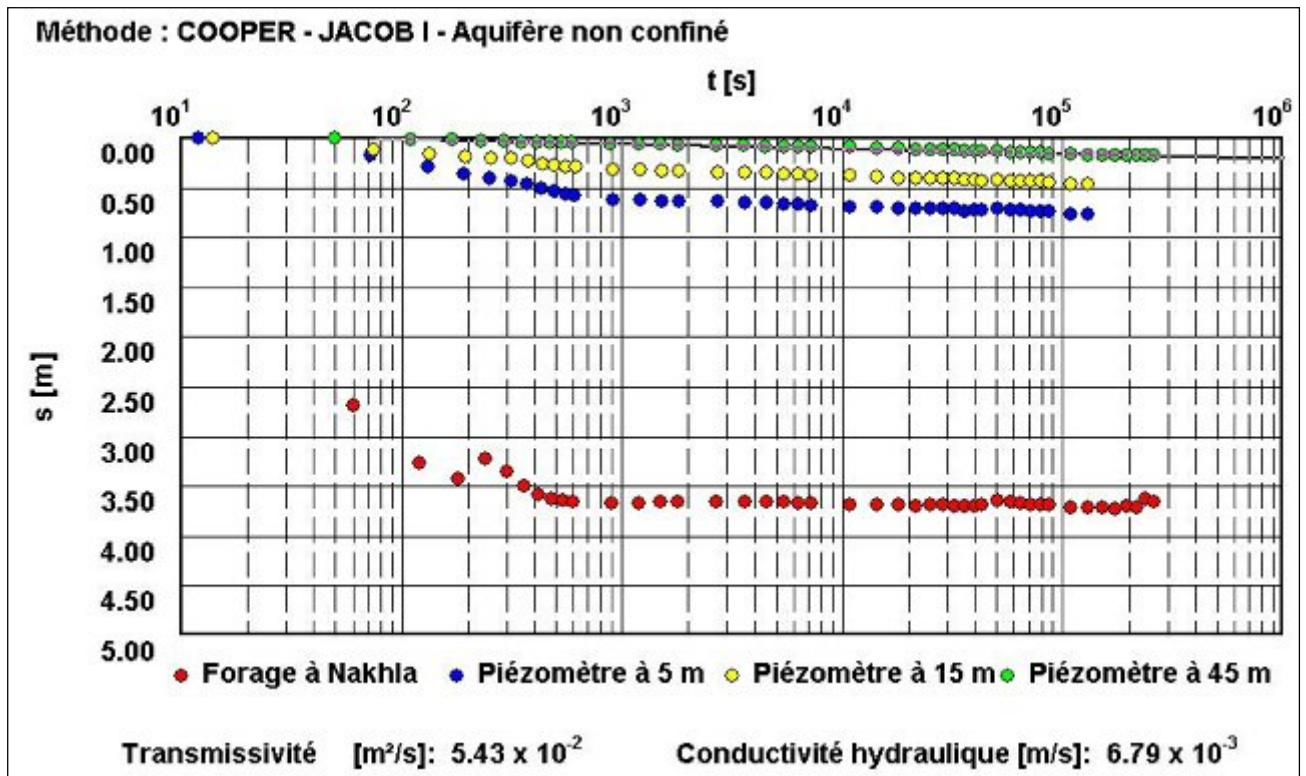


Figure 68 : Essai de pompage de longue durée à Nakhla selon la méthode de Cooper & Jacob

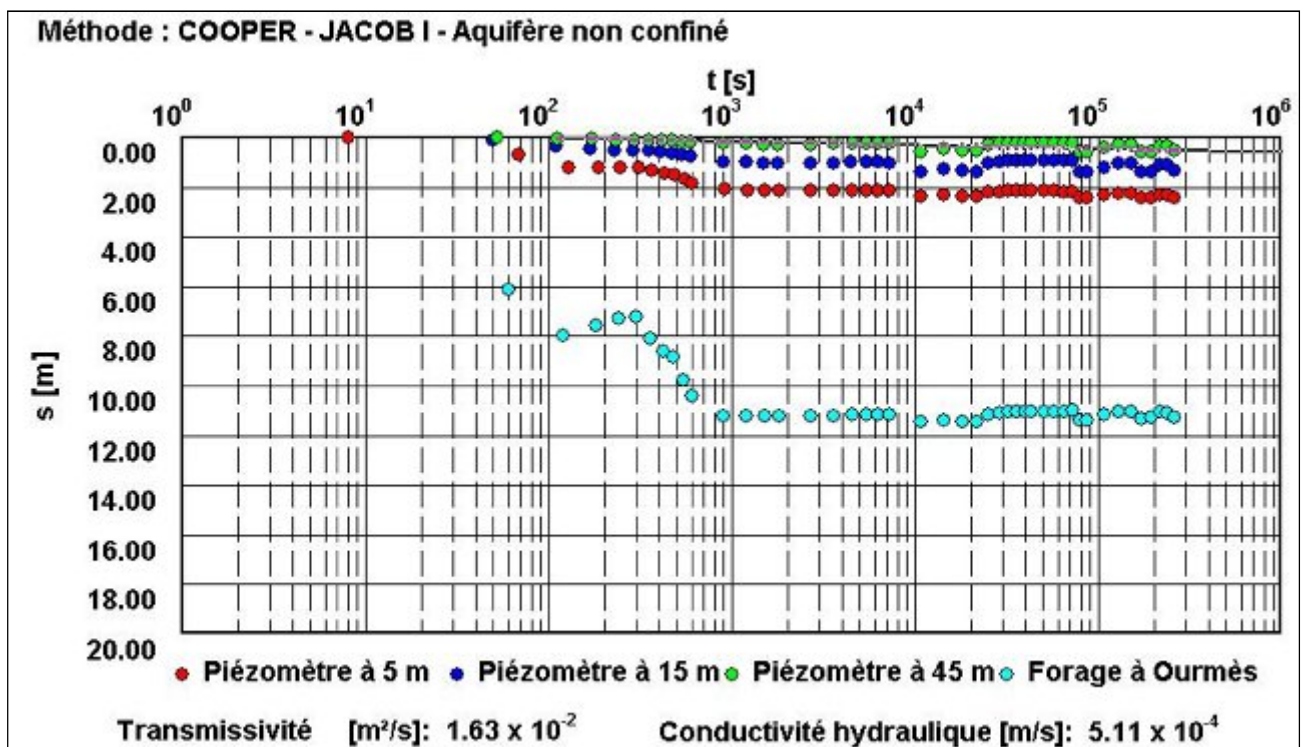


Figure 69 : Essai de pompage de longue durée à Ourmes selon la méthode de Cooper & Jacob

7.3. Porosité efficace n_e

La porosité efficace a été définie pour les nappes libres. Elle a été déterminée par la méthode de Moench (fig. 70) et est comprise entre 6 % à Kouinine et 23 % à Nakhla, soit 12 % en moyenne. Ces valeurs sont usuelles pour des sables fins.

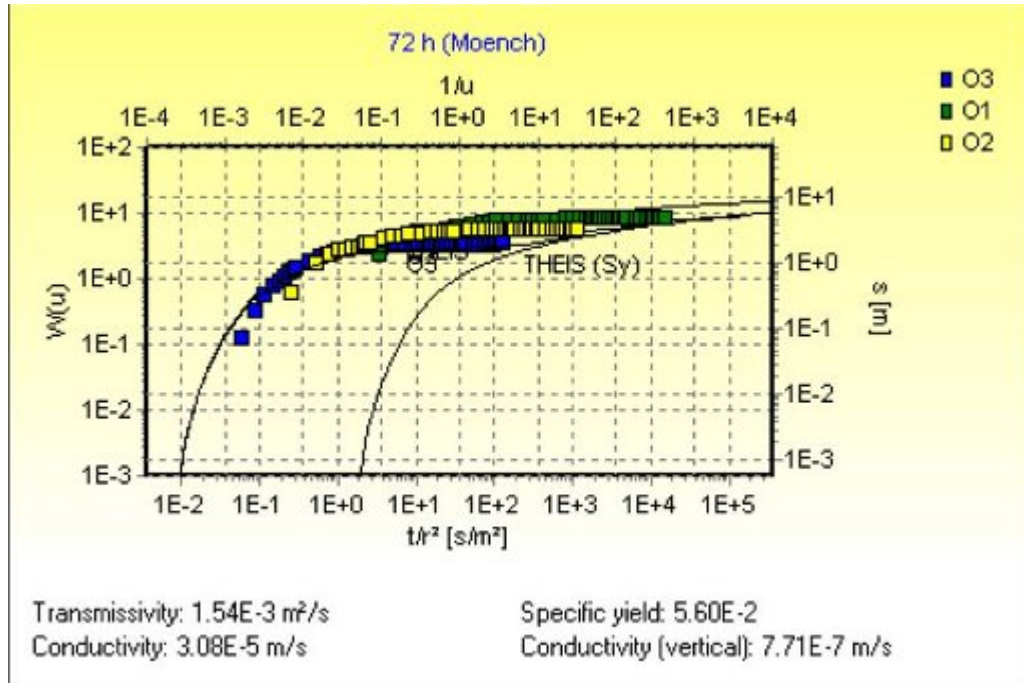


Figure 70 : Essai de pompage de longue durée à Kouinine interprété par la méthode de Moench

Si les essais par paliers ont permis de déterminer le débit spécifique, ce dernier montre que la réalisation technique 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, les valeurs sont presque équivalentes, avec une faible marge d'écart de la transmissivité. Nous avons jugé 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.

Conclusion

L'étude de la structure et de la géométrie de la nappe aquifère a permis de définir une nappe libre constituée généralement de sables. L'analyse de la piézométrie entre 1993 et 2002, montre que la nappe a vu son niveau s'élever 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 aussi à

cause d'une utilisation excessive de l'eau et de l'irrigation irrationnelle des surfaces agricoles. L'écoulement de l'eau est lent à cause de la faible pente et du caractère topographique plat de la région, qui se ressent sur le gradient faible. Localement, à proximité des villes par exemple, là où la recharge est importante à cause d'une AEP importante, ce qui a causé une remontée du niveau de quelques mètres et se traduit par une pente plus marquée.

L'interprétation des essais de pompage, réalisés par le BG et HPO du 24/ 02/ 2003 au 7/ 04/ 2003, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Une variation peu importante de la transmissivité d'une station à l'autre, oscille entre $2.57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ à Mihouensa et $5.43 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ à Nakhla. Avec une moyenne de $1.725 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Les valeurs de la perméabilité sont typiques de celles des sables dunaires et tourne autour de $1.69 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Il faut noter que les valeurs de la transmissivité et de perméabilité sont proche des valeurs données par *Levassor (1978) et Khérici (1996)*.

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 (les deux pourraient éventuellement peu différer) 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

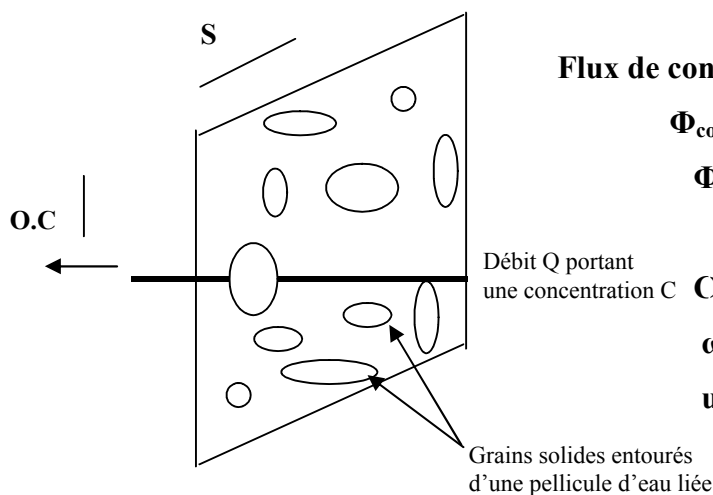
La convection représente l'entraînement des éléments en solution dans le mouvement du fluide qui déplace. Le soluté est transporté par le mouvement général de l'eau, à la vitesse définie par la loi de Darcy.

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 :

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

Ou :

\mathbf{q} : le débit transitant par le tube de courant, d'où : $\mathbf{q} = \mathbf{v}/\omega$

\mathbf{v} : vitesse de Darcy.

ω : porosité cinématique.

\mathbf{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 dû 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 vitesse 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.

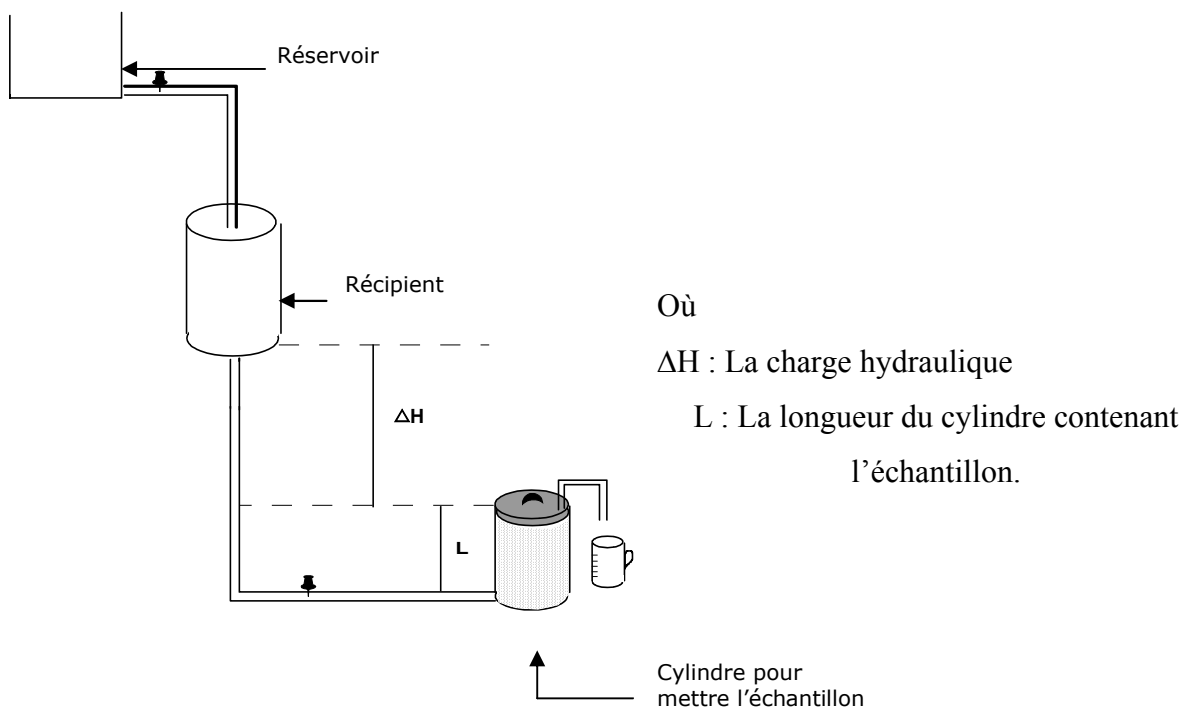


Figure 71 : Le perméamètre de mesure

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

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 :

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

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

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 les tableaux 18 et 19 et de tracer deux graphes pour chaque échantillon : Le premier représente la concentration cumulée en fonction du temps C (g/l) = $f(t)$ (fig. 72,74) et le deuxième $\zeta = \xi \sqrt{N_p}$ (paramètre sans dimension représentant la fonction du temps), (fig. 73,75). (Chestakov, 1975)

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

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

Tableau 18 : 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=erfinv(1-2 \underline{C})	sqrt Np	Np	z=x * 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 C⁰ = 0.1 g/l et C₀=0

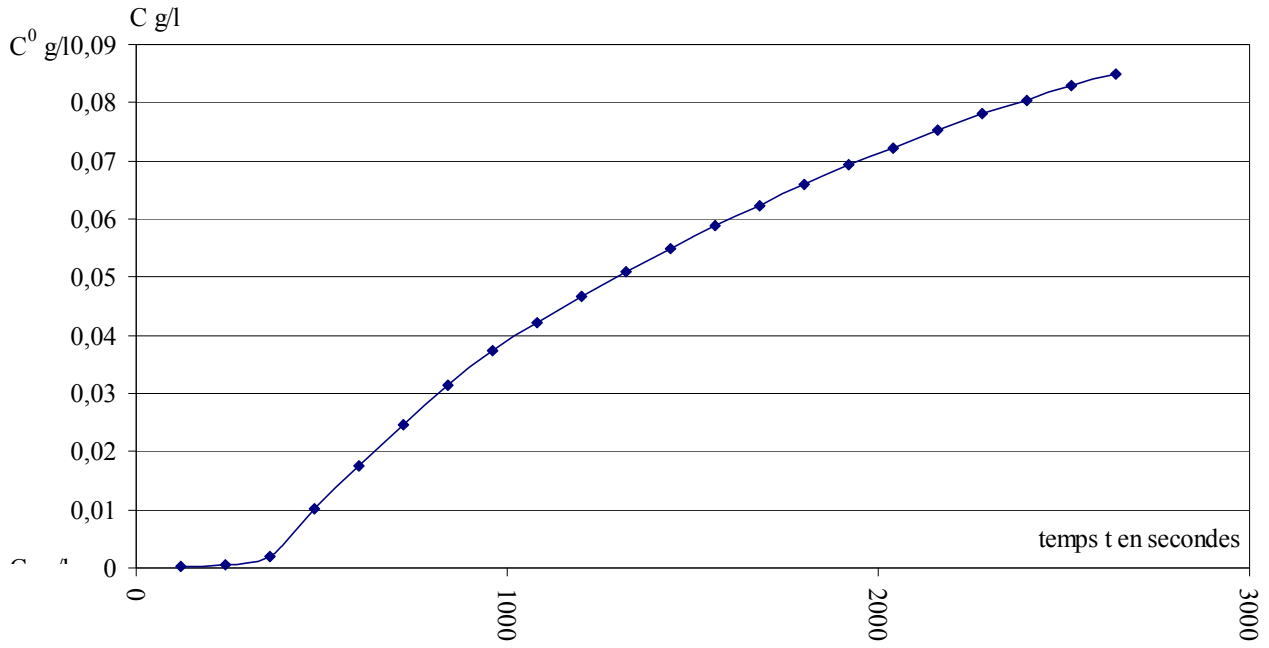


Figure 72 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps de l'échantillon I.

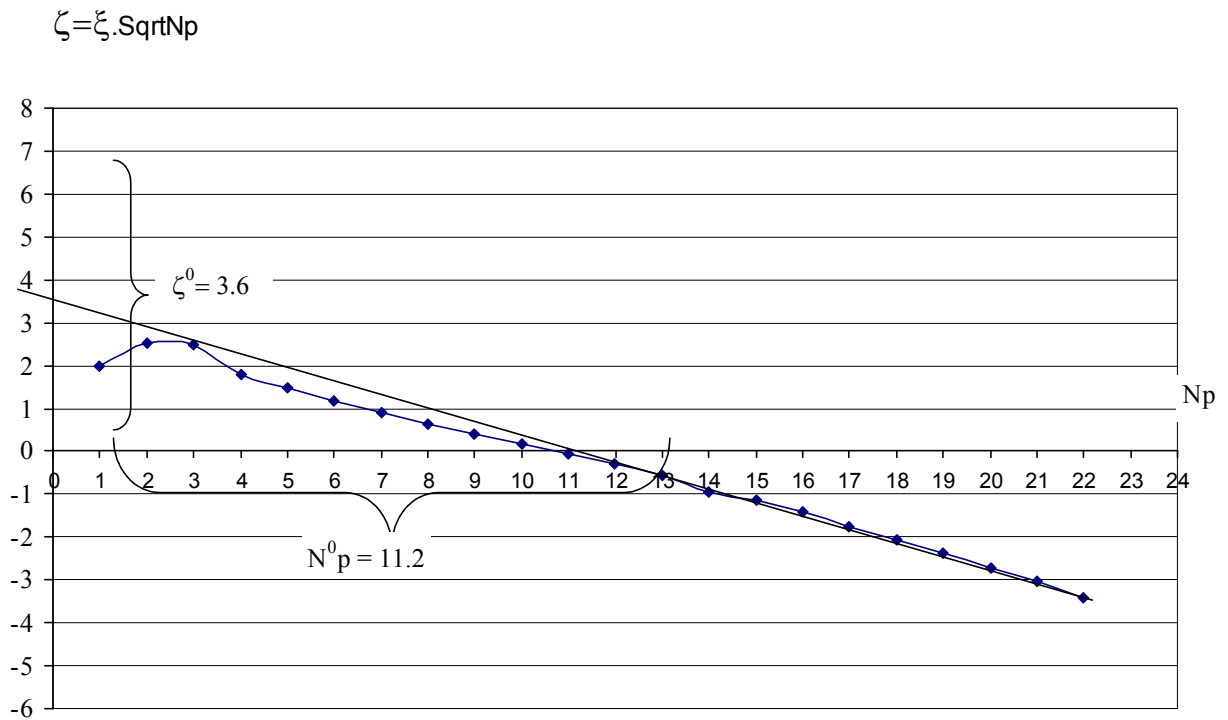


Figure 73 : graphe de $\xi \sqrt{N_p}$ en fonction de N_p de l'échantillon I

Tableau 19: Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon II)

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	0,0004	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 $C_0=0$

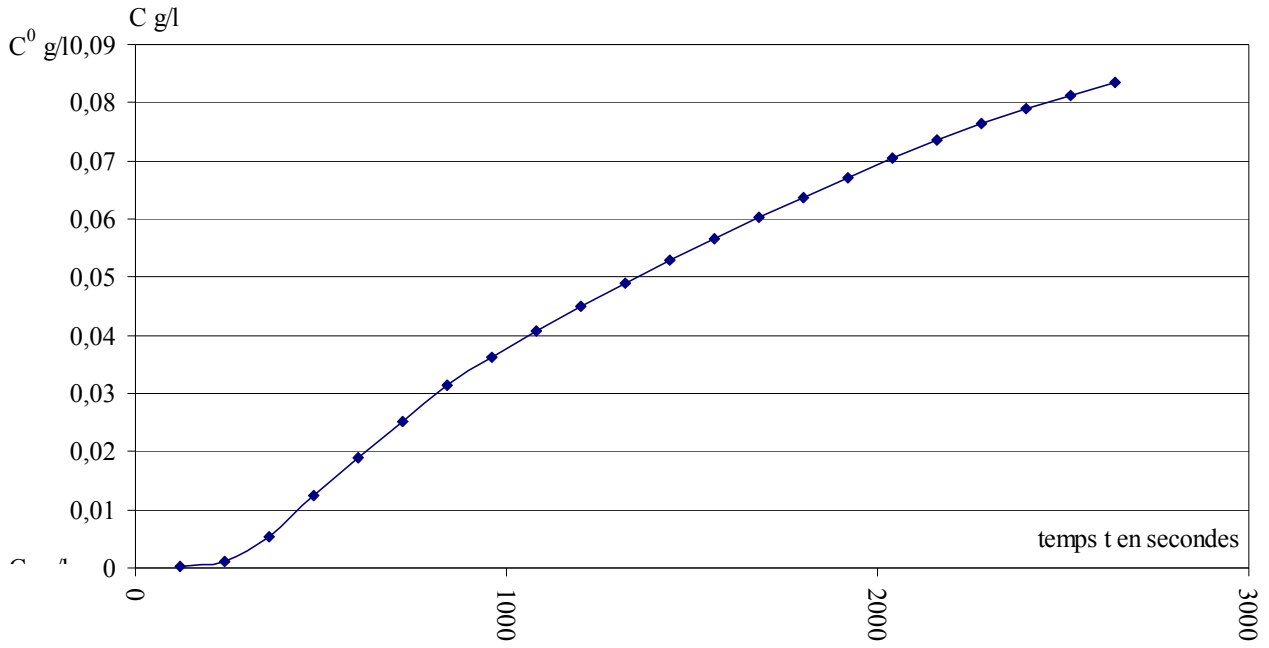


Figure 74 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps de l'échantillon II.

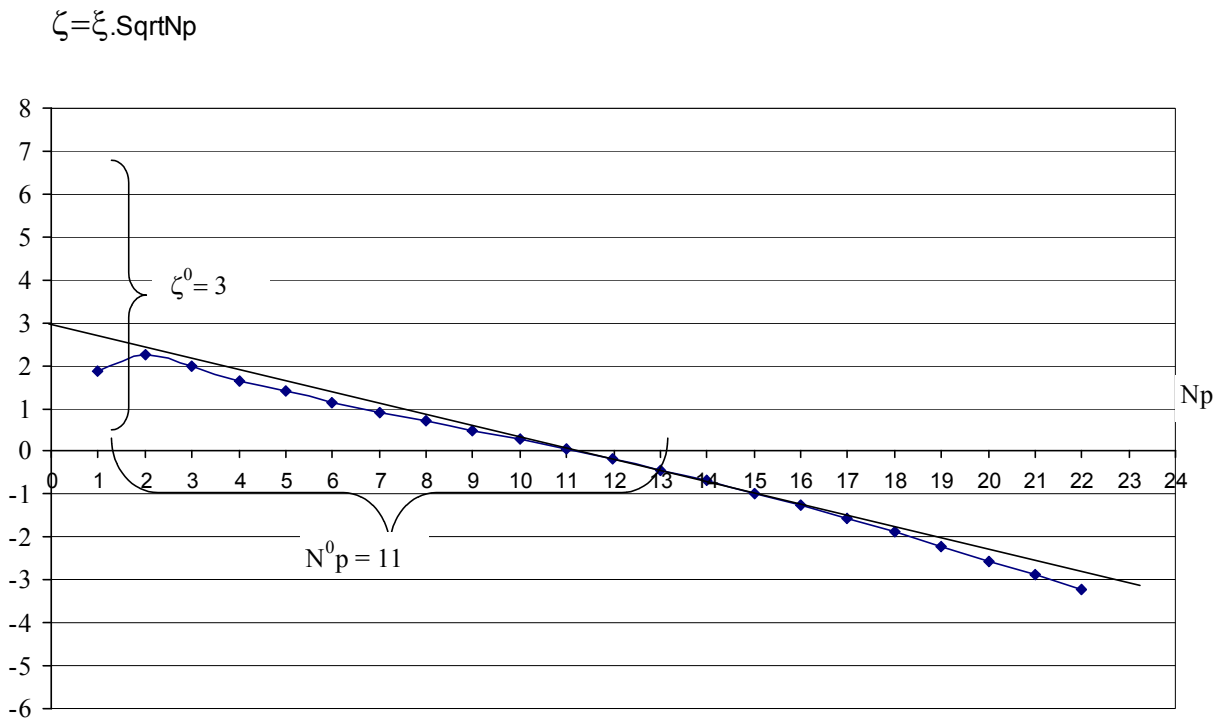


Figure 75 : graphe de $\xi \sqrt{N_p}$ en fonction de N_p de l'échantillon II

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

L'application numérique donne :

Pour l'échantillon I.

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

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

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

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

$$D = v \cdot \alpha_l \quad \text{donc} \quad \alpha_l = \frac{D}{v} = \frac{5.67 \times 10^{-5}}{2.89 \times 10^{-5}} = 1.96 \text{ m}$$

Pour l'échantillon II.

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

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

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

$$D = v \cdot \alpha_l \quad \text{donc} \quad \alpha_l = \frac{D}{v} = \frac{6.69 \times 10^{-5}}{2.41 \times 10^{-5}} = 2.78 \text{ m}$$

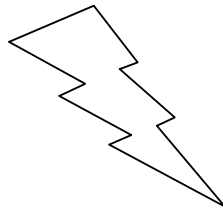
5. Conclusion

Afin de calculer la dispersivité longitudinale, nous avons fait recourir aux essais de traçage à l'aide d'un traceur artificiel (la Fluorescéine) (Chestakov, 1975) et (Sauty, 1977) sur deux échantillons de sable prélevés de la zone d'étude (zone de rejet).

Les résultats obtenus montrent que le traceur utilisé (la Fluorescéine) se disperse avec une vitesse faible. Ce qui dénote de la faible dispersivité des sables dans la zone du rejet.

La valeur faible de la dispersivité des sables de la région nous a permis de dire que les sables de la région constituent un excellent filtre avec un pouvoir épurateur élevé, leur permettant de réduire la propagation d'éléments polluants vers les eaux de la nappe phréatique.

Partie 3



Comporte deux chapitres :

- **Le premier chapitre** étudie les hydrochimiques des eaux de la nappe de l'Oued Souf en déterminant leurs faciès chimiques, 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 cinq campagnes réalisées sur les eaux de la zone à fin de dresser des cartes de l'indice de pollution organique.

Chapitre VII
Etude hydrochimique
de la vallée du Souf

1. Introduction

La qualité chimique d'une eau dépend de sa composition chimique, car elle définit son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie, ... etc.).

Dans les pays en voie de développement à climat aride, le rôle des eaux souterraines est primordial, et représente souvent la seule source d'approvisionnement en eau potable et donc les eaux souterraines deviennent vitales pour le développement de ces pays (*Travi, 1993*).

L'accroissement des besoins en eau dans les oasis du Sahara algérien a conduit à un recours de plus en plus important à l'exploitation des nappes d'eau souterraine. L'exploitation intensive de ces nappes est apparue, aux décideurs, comme inévitable pour le développement des régions sahariennes (*Idder, 2007*).

L'agrandissement de la superficie des terres agricoles a engendré une augmentation du débit de pompage de la nappe profonde, contribuant par le biais des retours d'irrigation à l'augmentation du volume de la nappe supérieure (facilité par une perméabilité élevée du sol de type sable dunaire). Le réseau d'assainissement collectif partiel à El Oued et absent dans les autres commune de la région d'El Oued où les eaux utilisées sont collectées individuellement dans les fosses septiques a contribué à la réinfiltration de ces eaux et à la pollution de la nappe phréatique. (*Remini, 2006*).

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques effectuées sur les échantillons d'eau de la nappe libre prélevées par les services de l'ANRH, 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 vallée du Souf.

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. 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 20. 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 20 : Classification hydrochimique des eaux souterraines des deux campagnes selon STABLER

Campagne 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 (*fig. 76a*) 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 une dissolution évaporitique riche en sels et en gypse.

Campagne 1998 : Le report de 34 points sur le diagramme de piper (*fig. 76b*) montre deux ensembles semblables à ceux de 1995, mais avec une légère différence marquée par la dominance du magnésium par rapport au calcium.

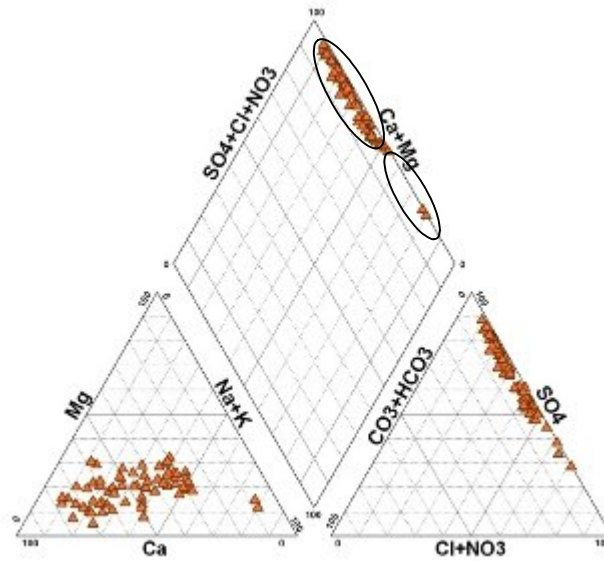


Figure 76a : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mai 1995).

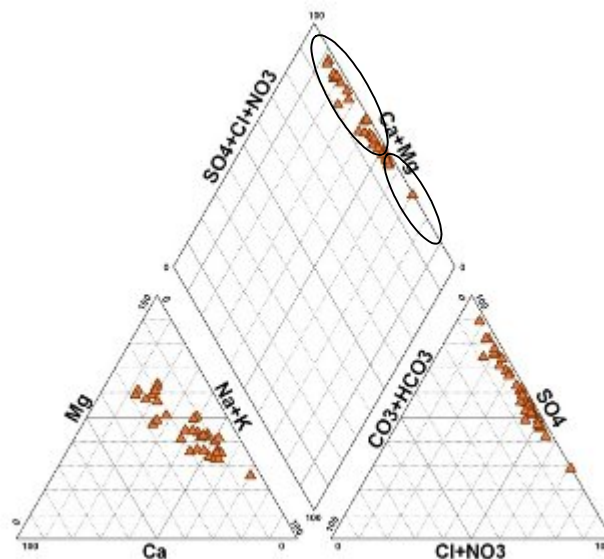


Figure 76b : Faciès chimique des eaux de la nappe libre de l'Oued Souf (Mars 1998).

3. Paramètres physiques

3.1. La température

La température de l'eau varie dans les alentours de 20°C, elle est fonction de l'heure de la mesure, de la saison et de l'ensoleillement lorsque la nappe est peu profonde, quant la nappe devient plus profonde (30 à 40 m de profondeur), des variations apparaissent encore, selon le mois de l'année ou la saison. La température est aussi influencée par l'activité humaine, par exemple 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 (HPO & BG, 2004)

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.

3.2. Le pH

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité des eaux. Les mesures du pH (fig. 77) montrent que presque tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité. Les valeurs des pH sont généralement comprises entre 7 et 7.7, ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles. Les valeurs 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 (HPO & BG, 2004).

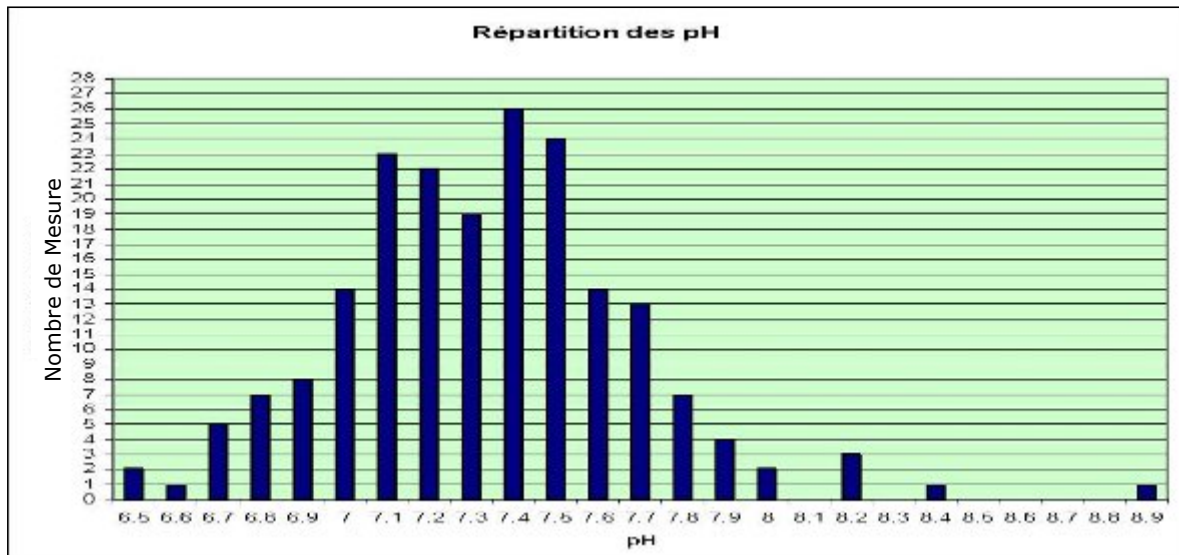


Figure 77 : Répartition des mesures de pH en Avril 2002 (HPO & BG, 2004)

3.3. 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.

Carte de mars 1993(fig. 78) : Trois zones se distinguent:

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 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

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

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

Carte d'avril 2002 (fig. 78) : Trois grandes zones peuvent être définies :

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

La zone I : caractérisée par des conductivités inférieures à 5000 $\mu\text{s/cm}$, cette zone se localise dans la partie Sud de la vallée où la pratique des cultures traditionnelles est le plus dominant. Cependant, il existe des localités de conductivité élevée qui sont :

Les ghouts inondés entre El-Oued et Khoubna avec des conductivités variant entre 5000 et 8000 $\mu\text{s/cm}$, les ghouts humides à Oued Alenda (10500 $\mu\text{s/cm}$) (HPO & BG, 2004).

Les zones de cultures irriguées au Sud de Nakhla, entre Mihoensa et Oued Alenda, au Nord d'Oued Turk et autour d'Ourmes avec des conductivités qui varient entre 5600 et 7200 $\mu\text{s/cm}$.

La zone II : s'ouvrant en V, comprise entre El-Oued et Régouba au Nord-Ouest et Hassi Khalifa au Nord-Est, elle est caractérisée par des conductivités qui varient entre 5000 et 10000 $\mu\text{s/cm}$, ces valeurs de conductivité dues :

Au chott d'El-Oued avec des conductivités de 24000 et 53000 $\mu\text{s/cm}$. En période estivale la conductivité peut atteindre 100000 $\mu\text{s/cm}$ (HPO & BG, 2004), durant la période hivernale l'apport d'eau d'AEP, ainsi que la faible évaporation conduit à la dilution des eaux du chott, et par conséquent la contamination de la nappe suite à l'écoulement des eaux vers le Nord-Est et le Nord-Ouest.

Les ghouts ennoyées ou humides dans lesquelles la conductivité augmente par évaporation, c'est le cas des ghouts humides à l'Est de Guemmar où la conductivité varie entre 11600 et 15900 $\mu\text{s/cm}$ (HPO & BG, 2004).

Au niveau des zones irriguées intensivement, ce qui conduit à une concentration des sels après évaporation.

La zone III : située toute au Nord de la vallée, de conductivité très élevée supérieure à 15000 $\mu\text{s/cm}$, c'est l'exutoire de la nappe où l'écoulement se dirige vers lui.

3. Cartographie hydrochimique

3.1. Cartes d'inventaire

La localisation des points d'échantillonnage pour les deux campagnes à savoir mai 1995 et mars 1998 est donnée par la figure 79. Le nombre de puits échantillonnés est légèrement différent d'une campagne à l'autre, ainsi la densité dans la partie Nord est beaucoup plus importante qu'au Sud, mais, nous avons jugé que le nombre des points est suffisant pour établir des cartes de répartition des concentrations.

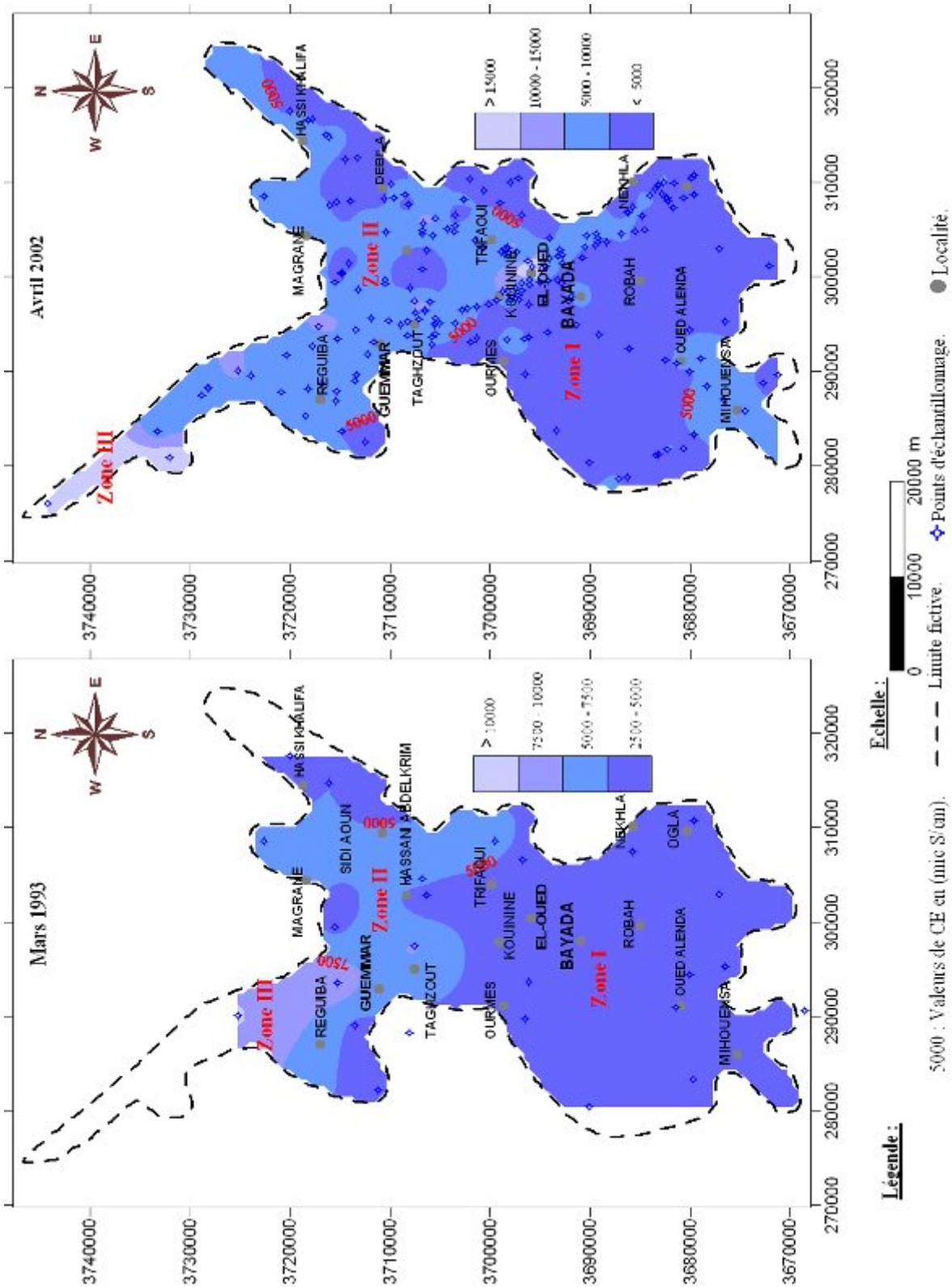


Figure 78 : Cartes de conductivité électrique de la vallée du Souf

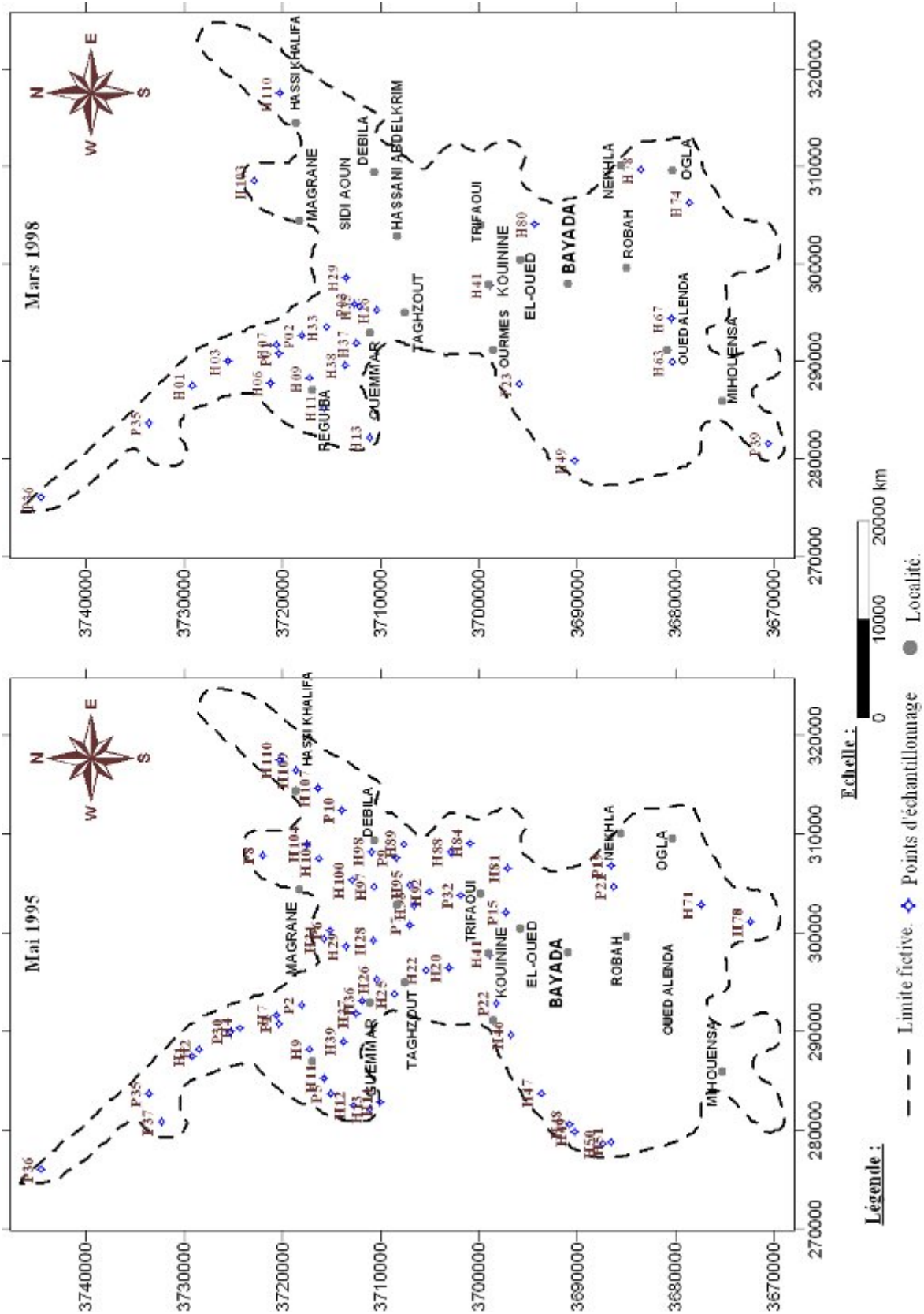


Figure 79 : Cartes d'inventaire des points d'eau de la vallée du Souf

3.2. Cartes de calcium

L'examen des cartes (*fig. 80*) montre que la teneur en calcium varie entre 92 mg/l (puits H78) c'est le seul puits qui présente des teneurs inférieure à la norme d'OMS à 680 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). D'une manière générale les concentrations augmentent du Sud vers le Nord selon le sens général d'écoulement de la nappe.

3.3. Cartes du magnésium

La carte du magnésium (*fig. 81*) montre que les valeurs faibles, inférieurs à la norme s'observent au Sud (Mihouensa, Bayada, Oued Alanda, Nekhla et Ogla) pour la campagne de mai 1995, alors que la campagne de mars 1998 est caractérisée par des teneurs dépassant la norme avec 50 mg/l sur toute la région. Le secteur central est caractérisé par des valeurs qui oscillent entre 50 à 200 mg/l en mai 1995 et 300 à 400 mg/l en mars 1998. Dans la partie Nord-Ouest la concentration en Mg^{2+} dépasse les 500 mg/l en mai 1995 et 600 mg/l en mars 1998. Nous remarquons que la carte de mai 1995 présente des teneurs faibles par rapport à la carte de mars 1998. Cependant, pour les cartes du calcium on remarque l'inverse, ce qu'est expliqué par un échange cationique entre Ca^{2+} et Mg^{2+} .

3.4. Cartes de sodium

D'après les cartes (*fig. 82*) les concentrations en sodium 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). Cette augmentation se fait selon l'axe d'écoulement principal. Les extrémités Est et Sud-Ouest présentent des teneurs inférieurs à la norme (150 mg/l), expliquées par la faible exploitation de la nappe dans ces localités qui montre par conséquent des retours des eaux vers la nappe faibles.

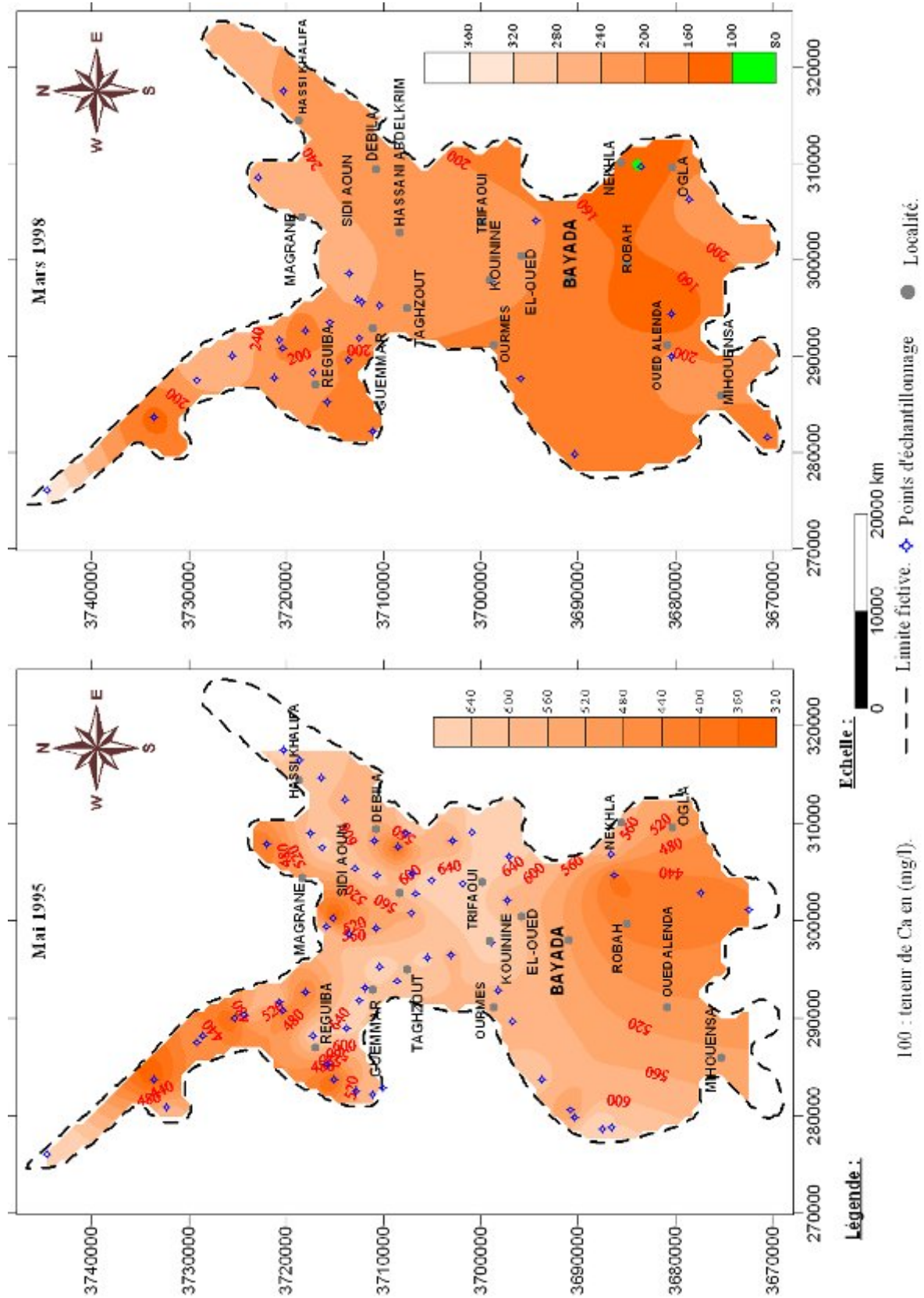


Figure 80 : Cartes des concentrations en calcium de la vallée du Souf

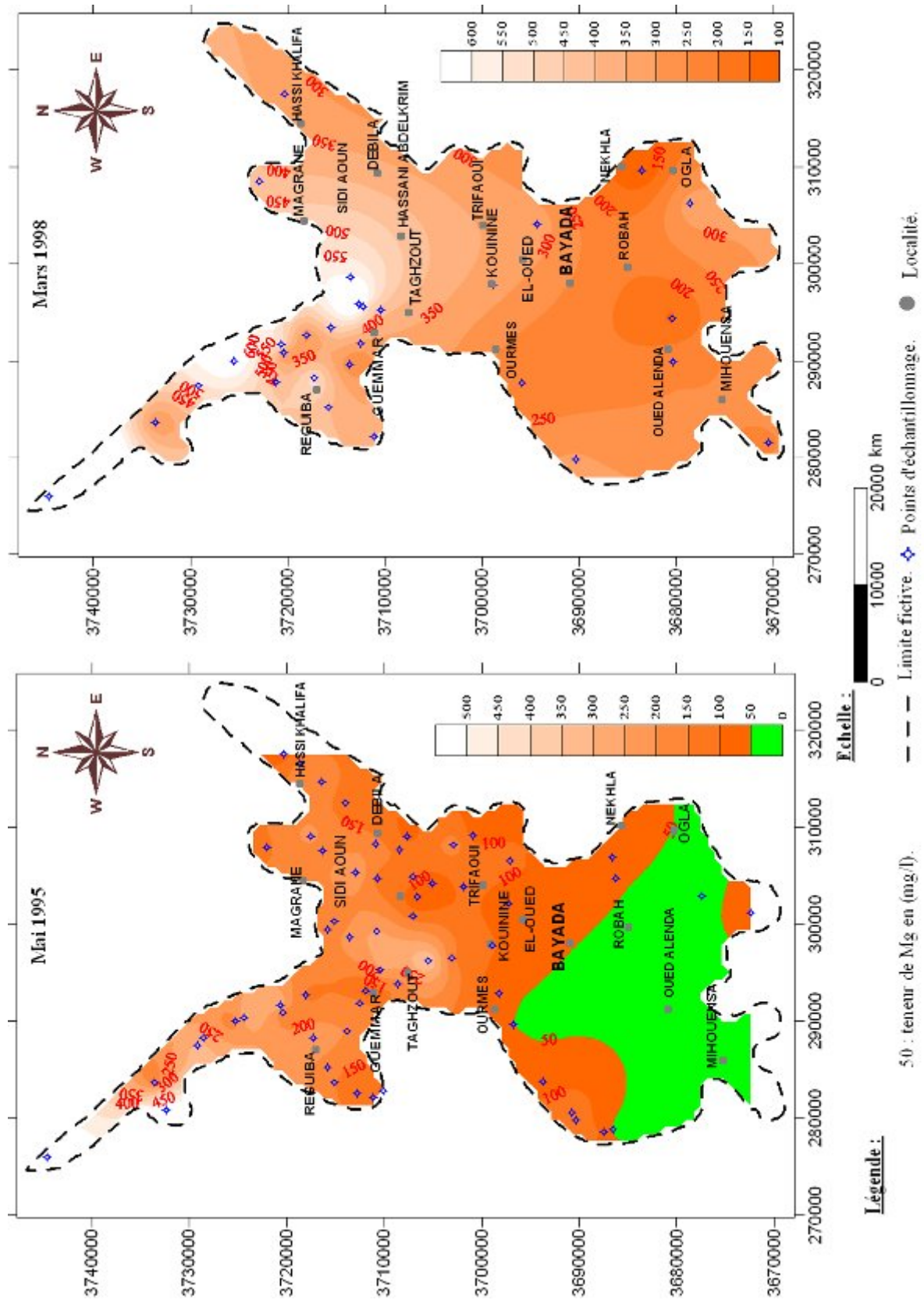


Figure 81 : Cartes des concentrations en magnésium de la vallée du Souf.

3.5. Carte des chlorures

La répartition des teneurs en chlorure se ressemble beaucoup à celles de sodium, dont l'évolution se fait du Sud vers le Nord-Ouest. De se fait la lecture des deux cartes (*fig. 83*) 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 oscillent entre 500 et 1000 mg/l.
- Dans la zone Nord –Ouest, les concentrations sont élevées (> 1000 mg/l) en liaison directe avec le sens d'écoulement.

3.6. Carte du sulfate

Les résultats des analyses chimiques, donnent des valeurs supérieures à la norme préconisée par l'OMS (250 mg/l), avec des concentrations qui varient entre 570 et 6960 mg/l. D'après les cartes de répartition de cet élément (*fig. 84*) nous distinguons trois zones pour chacune des cartes :

La carte de Mai 1995

Une zone au Sud, englobant Robah et sa région Sud, est caractérisée par des valeurs inférieures à 1200 mg/l.

Une zone entourant cette dernière et qui s'étale jusqu'au centre, présente des valeurs variant entre 1200 et 1600 mg/l.

La zone Nord–Ouest où les teneurs sont élevées et pouvant atteindre 6960 mg/l.

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 qui oscillent entre 600 et 1400 mg/l.

La zone Nord –Ouest se caractérise par des concentrations très élevées 6625 mg/l.

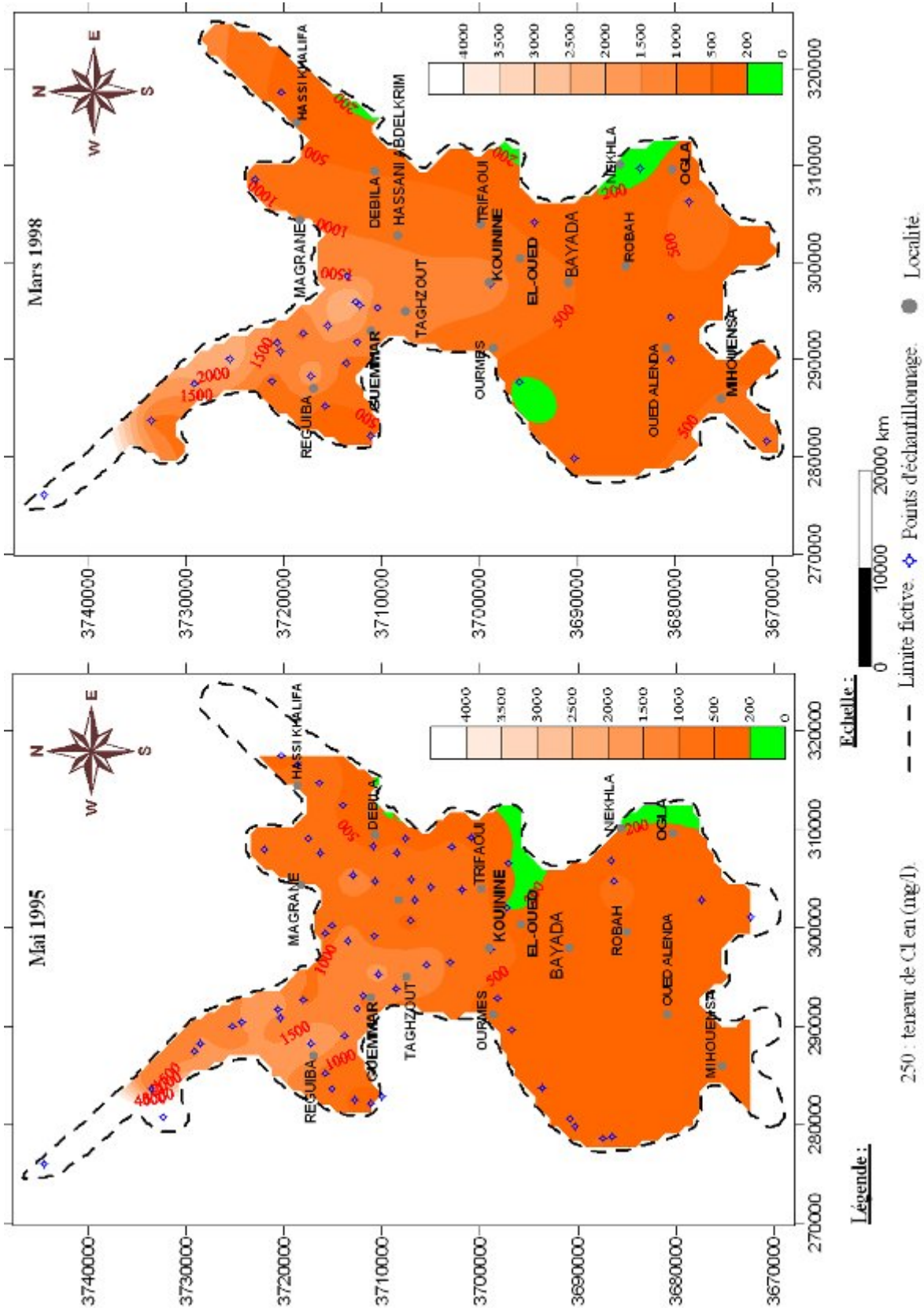


Figure 83 : Cartes des concentrations en chlorures de la vallée du Souf

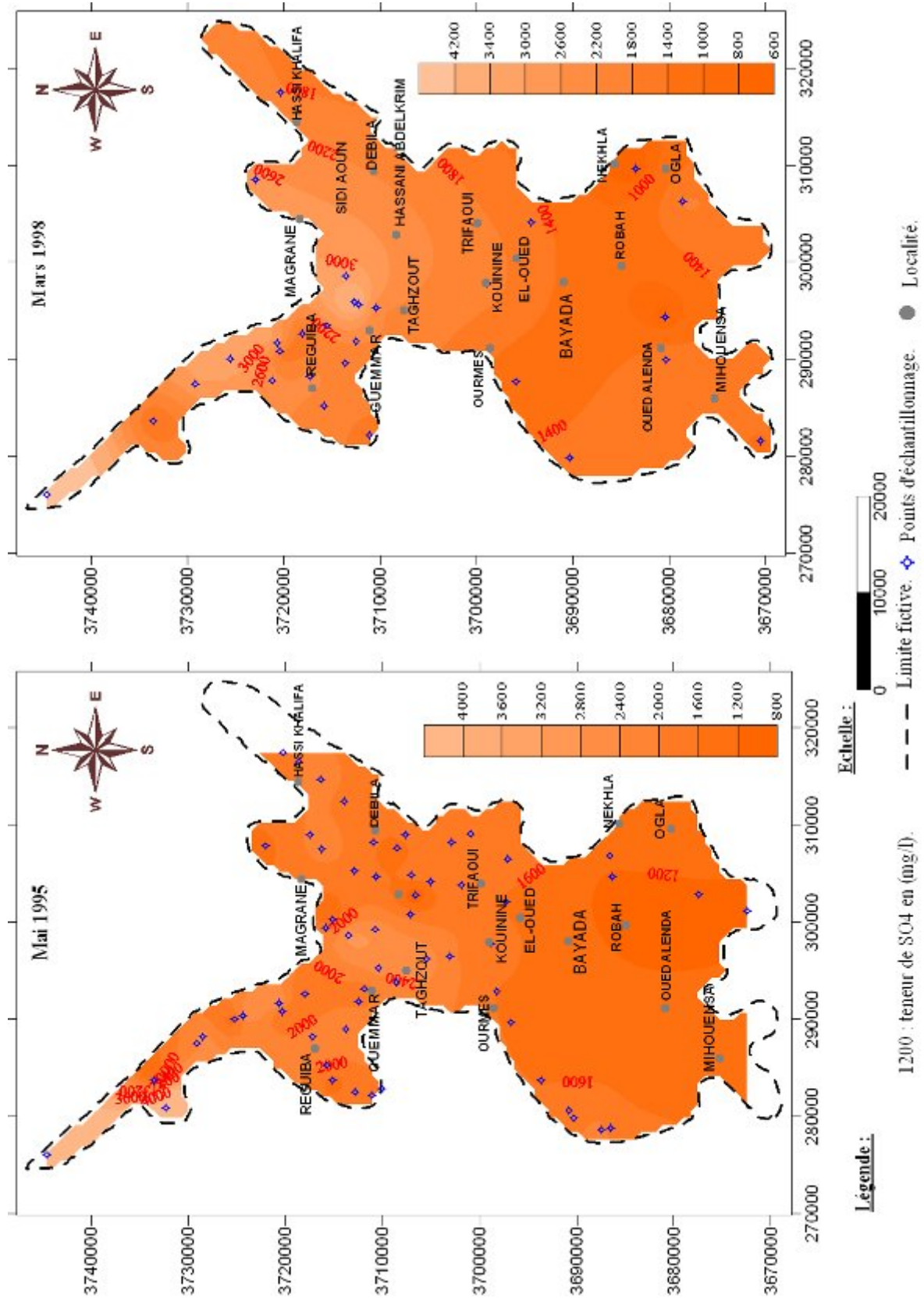


Figure 84 : Cartes des concentrations en sulfates de la vallée du Souf

3.7. Cartes des concentrations des Nitrates (mars 1993, mars 1998, mars 2000 et avril 2002)

D'après les cartes des Nitrates (fig. 85, 86) on remarque que les concentrations des nitrates dépassent les normes admissibles par l'OMS (45 mg/l). Elles dépassent par endroit 200 mg/l.

Carte de mars 1993 : La carte montre que la plus grande partie de la vallée du Souf présente des teneurs en nitrates qui dépassent la norme de l'OMS (50 mg/l), sauf quelques localités où les teneurs restent inférieurs à la norme: la première localité se trouve à l'Ouest d'El-Oued, la deuxième à l'Est de Trifaoui, la troisième à Hassani Abdelkarim et la quatrième au Nord de Reguiba. Cet excès en nitrates est dû, soit à l'oxydation des nitrites et de l'ammonium suite à une pollution de la nappe par les eaux usées (fosses septiques) (Guendouz, 2006), soit par l'utilisation des engrais pour l'agriculture.

Carte de mars 1998 : caractérisée par des valeurs qui dépassent les normes dans la majeure partie de la vallée, sauf quelques endroits où on enregistre des valeurs inférieures à la norme 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 au niveau des agglomérations (El-Oued, Kouinine, Réguiba, Taghzout, Guemmar), ce qui confirme l'influence des fosses septiques d'une part, et l'agriculture d'autre part.

Carte de mars 2000 : elle présente la même allure que celle de mars 1998. Toutefois, la zone localisée au Nord-Est de Réguiba devienne plus grande par rapport au mars 1998, due probablement à un ralentissement de l'écoulement de la nappe.

Carte d'avril 2002 : elle est un petit peu différente par rapport aux autres cartes, elle est caractérisée par la présence de plusieurs localités dont les concentrations inférieurs à la norme, ces endroits se localisent selon le bureau d'étude BG dans :

- 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,
- dans les ghouts ennoyés
- 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 phréatique caractérisée par des teneurs en nitrates qui dépassent largement la norme préconisée, ce qui rend les eaux non potable.

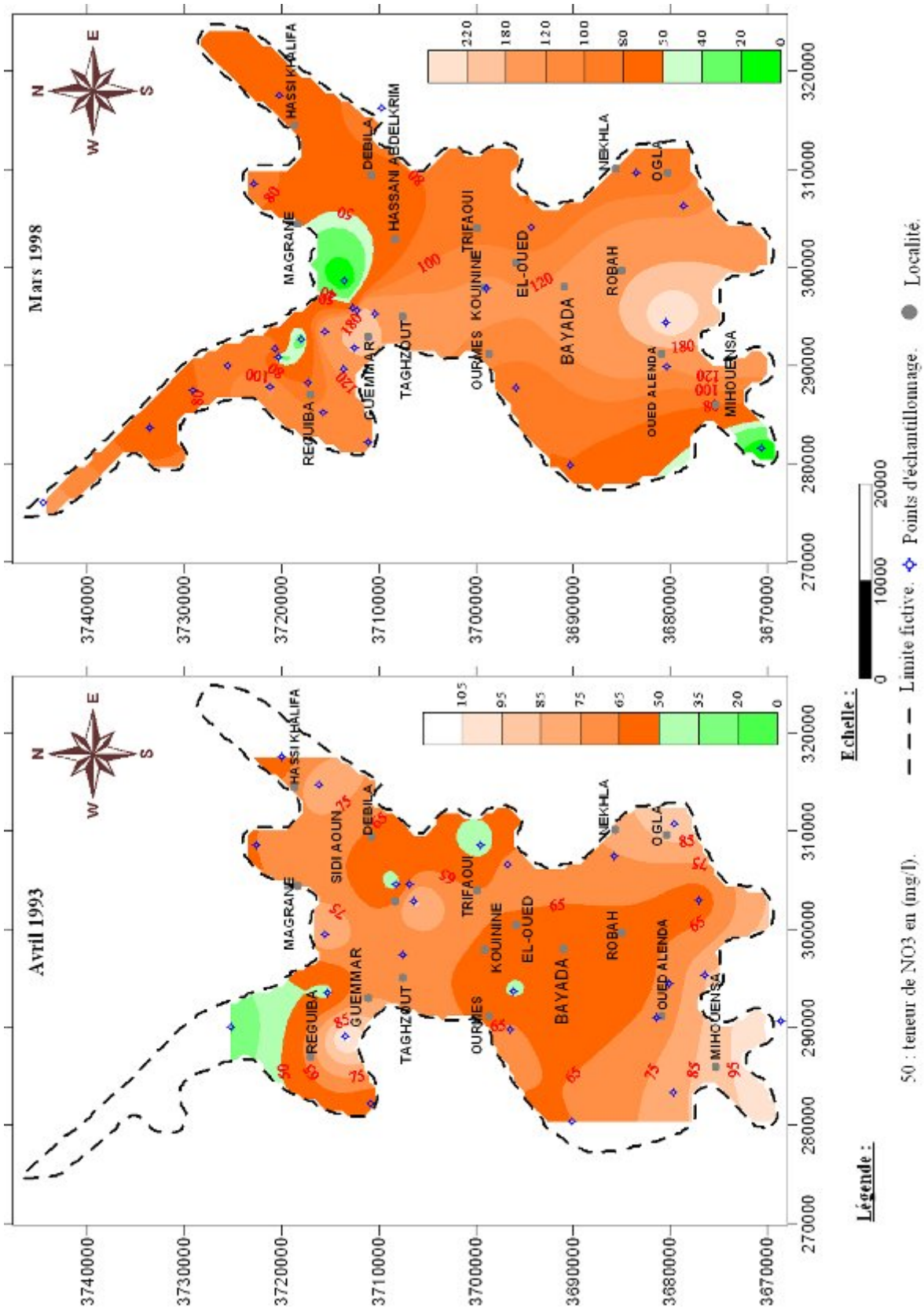


Figure 85 : Cartes des concentrations en nitrates de la vallée du Souf

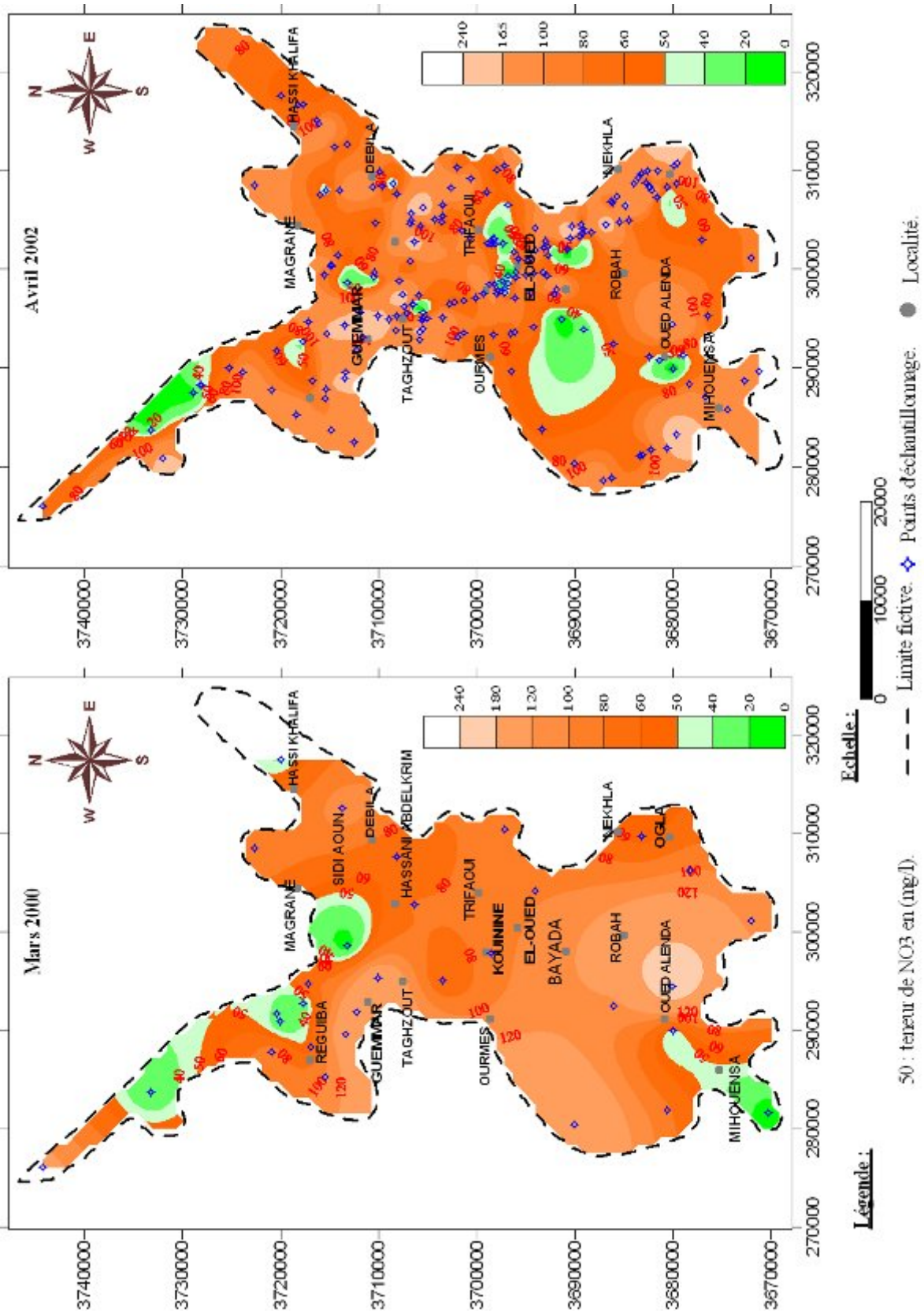


Figure 86 : Cartes des concentrations en nitrates de la vallée du Souf

3.8. 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 (*fig. 87*), 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.

4. Variation des concentrations des nitrates entre mars 1993 et avril 2002

Des mesures de concentrations 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 (*fig. 88*).

On constate une augmentation générale des teneurs en nitrates entre 1993 et 2002, avec des valeurs qui dépassent les 100 mg/l, surtout au niveau des zones agricoles suite à l'utilisation des engrais chimiques (160 mg/l à l'Ouest de Hassani Abdelkrim).

5. Relation entre la conductivité et le résidu sec

Le tableau 21 montre qu'il existe une bonne corrélation entre la conductivité et le résidu sec.

Tableau 21 : Coefficient de corrélation des paramètres physiques (Conductivité – Résidu sec).

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

6. 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 basé sur les 20 points ayant des mesures de conductivité en 1993 et 2002. Elle représente son évolution sur une période de 9 ans (*fig. 89*).

A l'exception des zones Sud où les valeurs de la conductivité restent stables, on constate une augmentation de la conductivité pour le reste de la région, et ce à partir du Nord d'El-Oued. Cette augmentation risque de limiter l'utilisation des eaux de la nappe, ce qui pose la question sur le recours à des eaux de faible conductivité (eaux usées traitées et les eaux des nappes profondes).

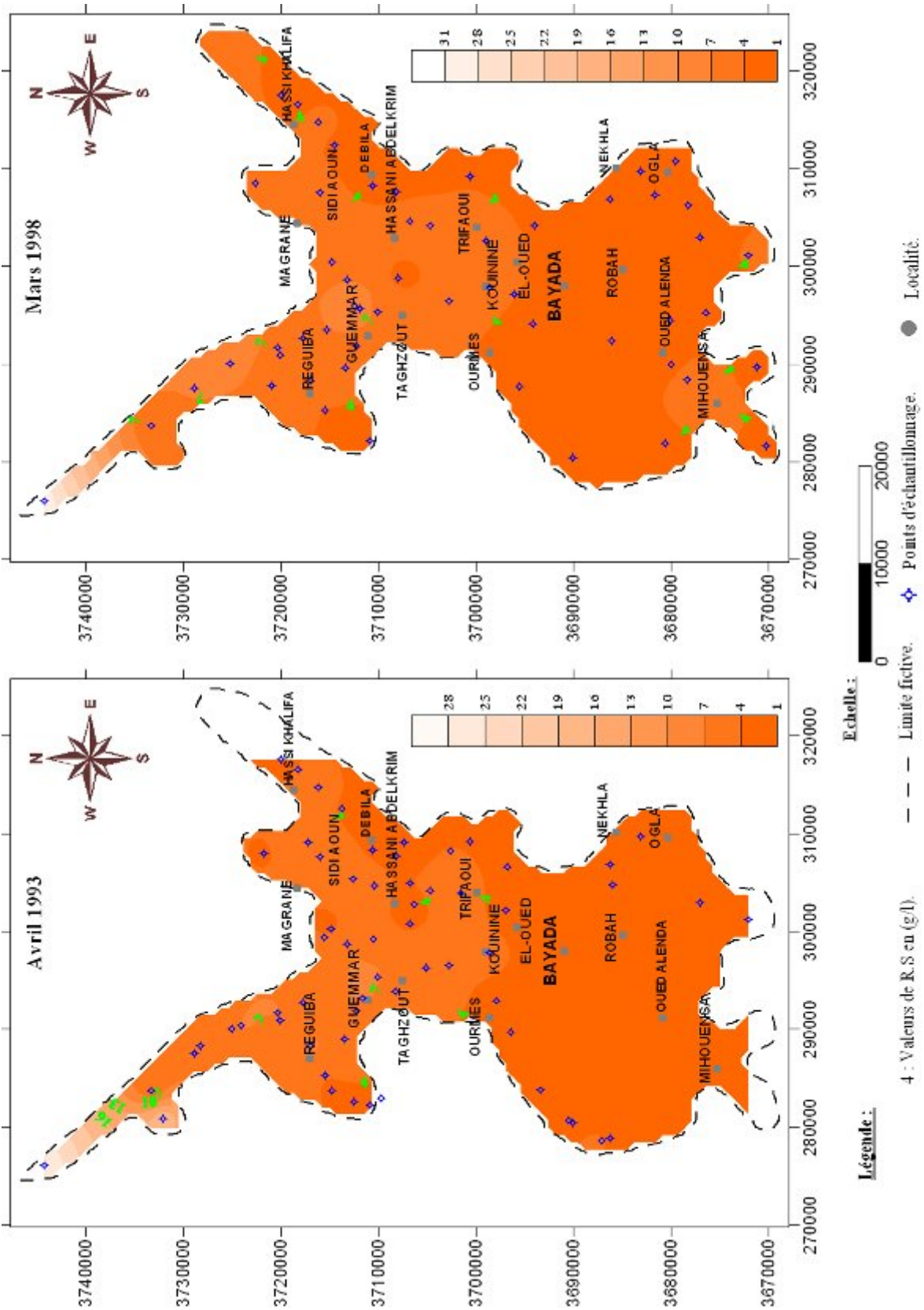


Figure 87 : Cartes de Résidu Sec de la vallée du Souf

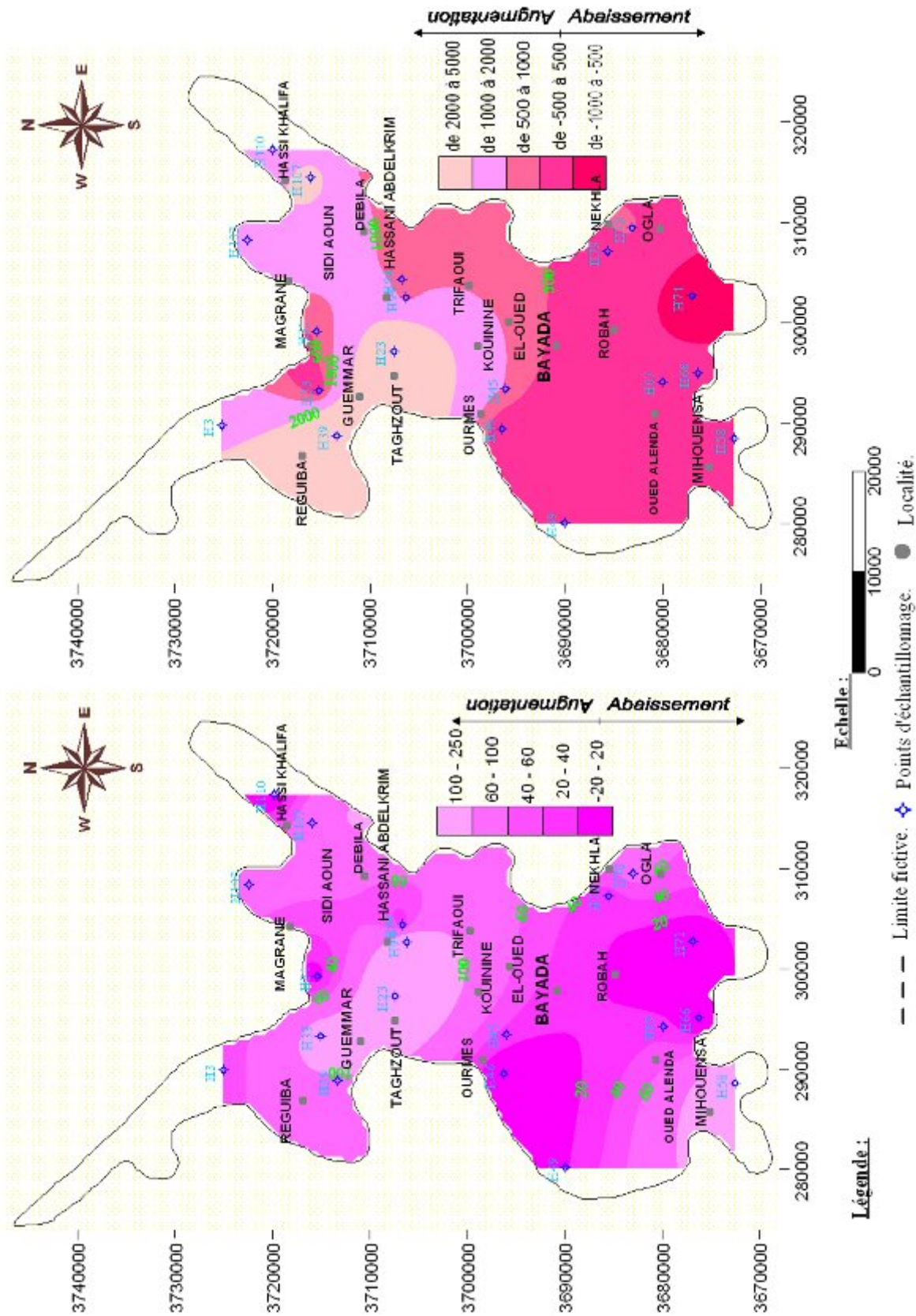


Figure 88 : Carte de différence du teneur NO_3^- entre avril 2002 et mars 1993. Figure 89 : Carte de différence de CE entre avril 2002 et mars 1993.

7. Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants

7.1. Origine des éléments Na^+ et Cl^-

Dans les eaux naturelles, la présence des deux éléments Na^+ et Cl^- est attribuée à la dissolution de l'halite que l'on rencontre dans les formations évaporitiques. Cependant, les chlorures comme le sodium peuvent avoir d'autres origines (naturelles ou anthropiques).

La représentation graphique de l'évolution du Na^+ en fonction de Cl^- (fig. 90) a montré un excès des teneurs en Cl^- , qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions chlorures (autre que l'halite) probablement les eaux usées suite aux fuites des fosses septiques.

7.2. Origine du calcium

Le calcium tire son origine des carbonates et du gypse, la détermination de l'origine de chaque concentration en Ca^{2+} est nécessaire pour connaître les mécanismes du chimisme de la nappe. De ce fait le faciès calcique a été étudié à l'aide de deux diagrammes, à cause de sa double origine (carbonatée et évaporitique). Les figures 91 et 92 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.

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

La figure 93 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 durant la période de mars 1998. Le faciès magnésien peut être lié à la présence d'argiles ou de dolomies riches en magnésium, ou d'un échange cationique entre le Ca^{2+} et le Mg^{2+} .

8. Indice d'échange de base (ieb)

L'indice d'échange de base défini par Schoeller, (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 :
$$= \frac{(\quad)}{(\quad)}$$

Si l'ieb 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'ieb 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'ieb est négatif c'est-à-dire lorsqu'il y a échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins des permutolites.

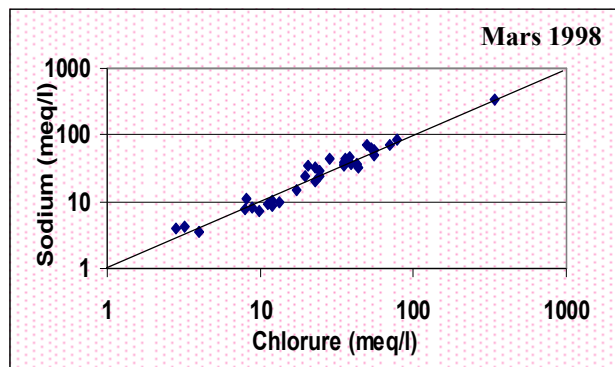
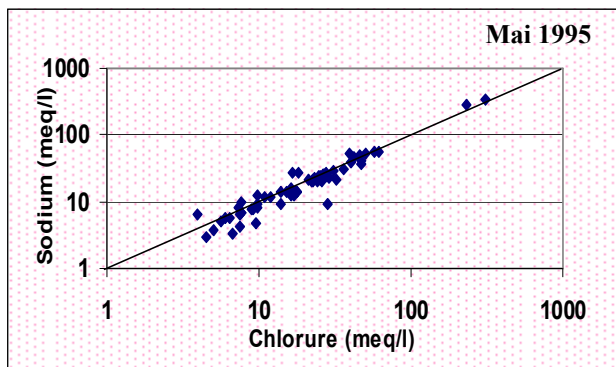


Figure 90 : Le couple Na^+ , Cl^-

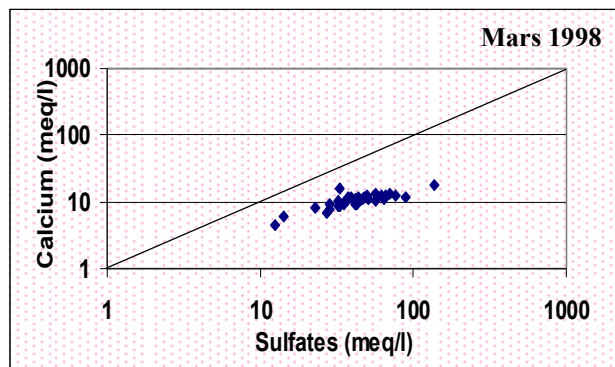
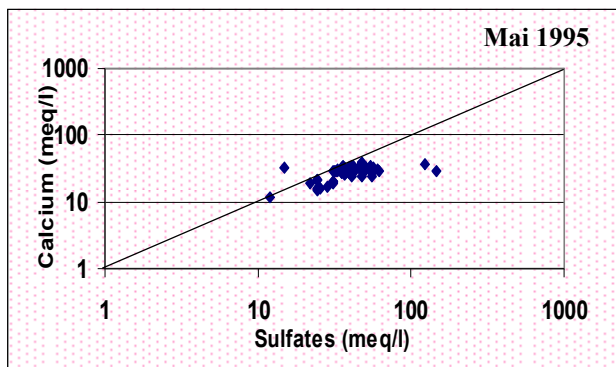


Figure 91 : Le couple Ca^{++} , SO_4^{-}

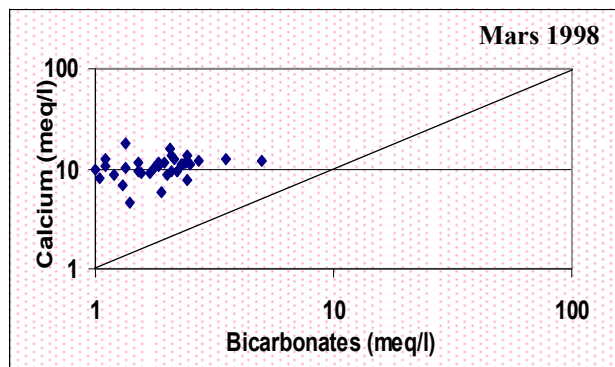
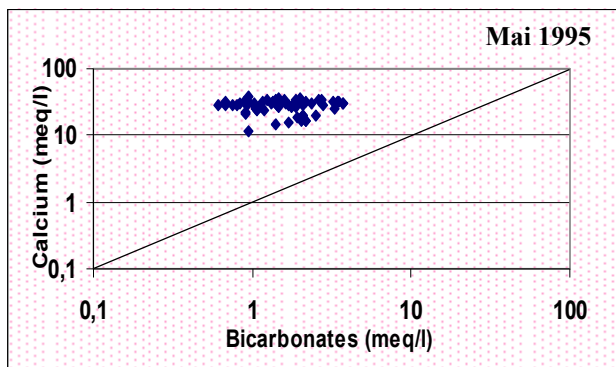


Figure 92 : Le couple Ca^{++} , HCO_3^-

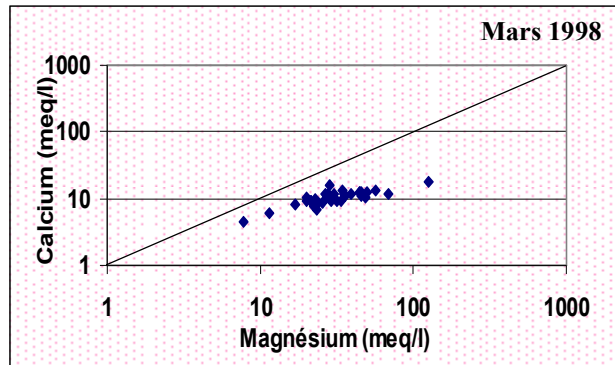
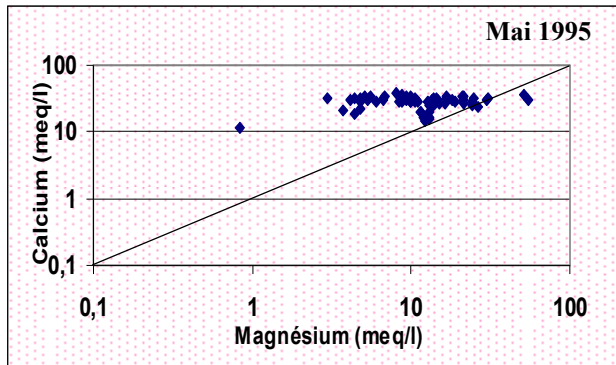
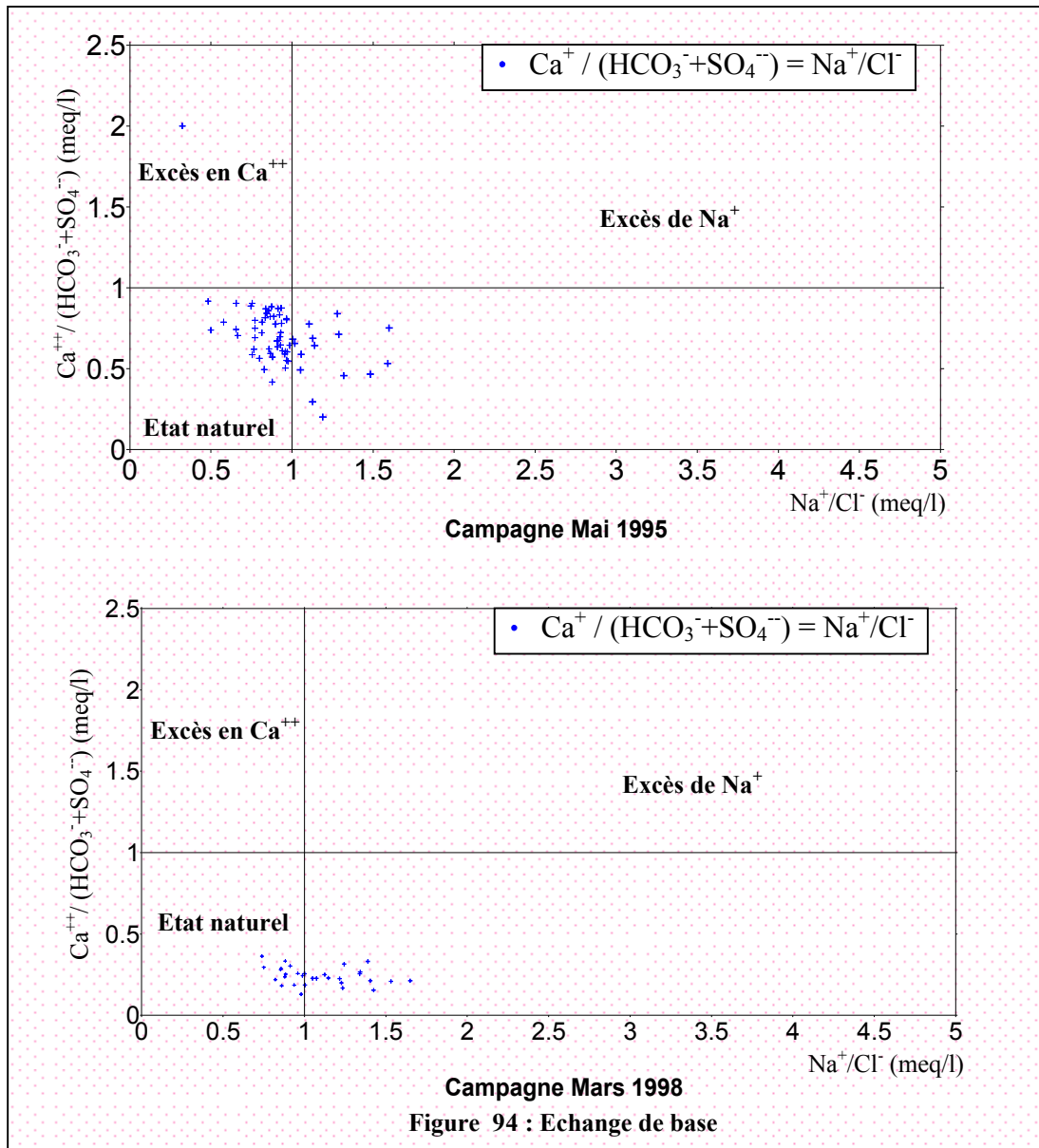


Figure 93 : Le couple Ca^{++} , Mg^{++}

Il est préférable de calculer l'ieb par la formule suivante :
$$= \frac{\text{Ca}^{++} - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{--})}{\text{Na}^+ - \text{Cl}^-}$$

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 de l'ieb calculé (Annexe) a montré que la majorité des eaux souterraines de la nappe libre de l'Oued Souf (période de mai 1995) ont un ieb positif, ce qui vérifie la prédominance de faciès calcique. Par contre pour la période de mars 1998, où plus de 50% des eaux, ont un ieb négatif, ce qui traduit la prédominance du faciès sodique.

La figure 94 montre que la majorité des points d'eaux (> 50%) restent à l'état naturel, ils n'ont pas subi un échange de base puisque peut être le temps de contact sol-eau n'est pas suffisant.



9. 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 (OMS) et d'autre part le degré hydrométrique.

9.1. Potabilité des eaux

La potabilité des eaux souterraines est définie selon deux critères: normes de l'OMS et le DHT.

9.1.1. Selon l'OMS

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales (Tab. 22) qui traduisent les limites de potabilité. On distingue :

- 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 pour la santé.

Tableau 22 : Normes de potabilité de l'OMS

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 22 montre que tous les échantillons ont des teneurs en SO_4^{--} (mai 1995 et 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 compagne. La concentration maximale admissible pour le magnésium est dépassée pour 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 compagne de mai 1995 elles restent tous inférieures aux normes maximales admissibles.

9.1.2. Normes selon le degré hydrométrique total (DHT)

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 23 : Dureté des eaux en °F (Theobald et Gama, 1969)

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

Le tableau 23 montre que la totalité des eaux analysées (100%) sont très dures, dont le DTH 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.

10. 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.

10.1. La salinité

Selon *Ayers et 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.

10.2. 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 (*Ayers et 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.

10.3. 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 (Ayers et 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 » (SAR) 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.

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

Classification de Richards :

Le tableau 24 Récapitule les résultats obtenus après interprétation de diagramme de Richards (fig. 95).

Tableau 24 : 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 d'Oued Souf sont salées.

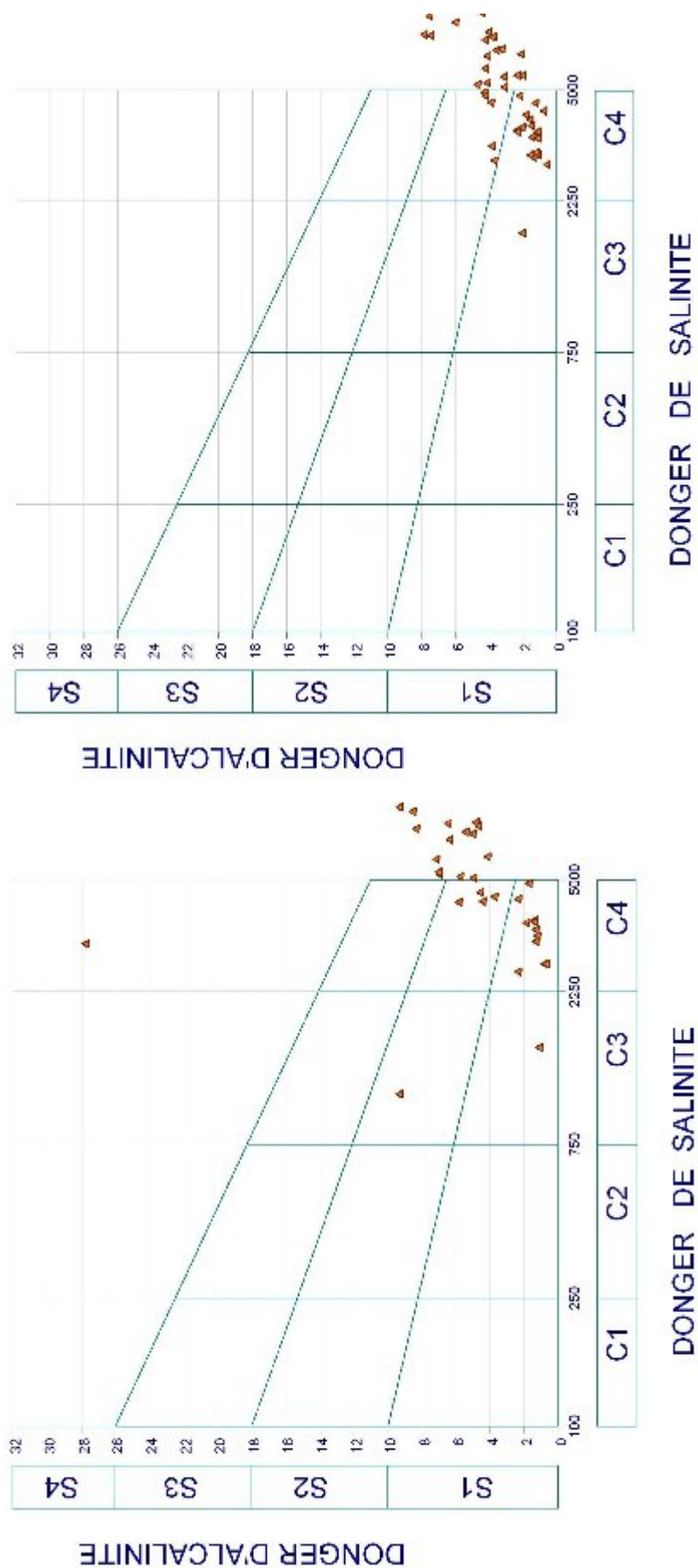


Figure. 95 : Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R

11. Conclusion

La représentation graphique des résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe phréatique d'Oued Souf, nous a permis de ressortir deux familles des eaux : la famille sulfatée avec un pourcentage qui dépasse le 80%, et la famille chlorurée avec un pourcentage qui ne dépasse pas les 20%.

La température des eaux de la nappe varie selon la saison, elle est aussi influencée par l'activité humaine. En générale la température tourne autour de 20 °C.

Le pH des eaux varie pour la plupart des échantillons entre 7 et 7.7, ce qui confère un caractère naturel aux eaux.

La cartographie de la conductivité électrique fait ressortir trois zones de conductivité croissante, la zone Sud de conductivité relativement faible, la zone Nord de conductivité très élevée et entre les deux une zone centrale de conductivité élevée.

La cartographie des sels dissous, montre que tous les éléments chimiques présentent des concentrations supérieures aux normes de l'OMS, sauf pour quelques localités où la nappe est moins exploitée ou un peu profonde. Ces localités se situent toujours dans la partie Sud de la vallée du Souf.

Les cartes de nitrates présente des teneurs en nitrates supérieures à la norme pour la totalité de la vallée, exception faite pour les zones où se localise les plantations irriguées par les forages du CT, (processus de dilution) et les ghouts ennoyés (milieux anaérobies).

Une augmentation de la conductivité est observée entre 1993 et 2002, sauf pour les zones Sud où elle reste stable. Idem pour les nitrates où nous avons constaté une augmentation générale qui peut atteindre les 100 mg/l.

L'étude des rapports caractéristiques montre une prédominance des chlorures par rapport au sodium, ce qui explique une origine probablement anthropique des chlorures. Le calcium tire son origine des formations évaporitiques.

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation montre que plus de 50% des points d'eau échantillonnés sont hors classe, ce qui montre le caractère très salé des eaux de la région du Souf.

Chapitre VIII

Etude de la pollution dans la zone du rejet

P1. Introduction

L'évacuation des eaux usées des oasis du Sahara, comme c'est le cas pour la plupart des agglomérations situées en zones arides, se heurte au problème du réseau d'assainissement partiel ou même inexistant et d'un réseau hydrographique suffisamment important, susceptible de servir d'exutoire (Idder, 2007)

Les rejets d'eaux usées urbaines sont liés aux rejets des agglomérations dans les réseaux d'assainissements. Les apports sont caractérisés par de fortes teneurs en ammonium, en phosphates et autres (Kabour, 2011). Des analyses chimiques ont été effectuées sur des échantillons provenant des eaux usées qui sont déversées directement dans le sol sableux.

Les résultats obtenus montrent que les eaux sont riches en éléments organiques tels que NH_4^+ , PO_4^{2-} et la DBO_5 , dont la présence est due à l'utilisation des produits détergents et aux urines. Ces rejets détériorent la qualité des eaux souterraines lors de leur infiltration.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Prélèvements

Les campagnes d'échantillonnage se sont concentrées sur toute la zone qui entoure le rejet, afin de définir le degré et l'étendue de la pollution.

Trois (3) campagnes de mesures et d'échantillonnage ont été effectuées en avril, juin et septembre de l'année 2007. Les prélèvements concernent la zone de rejet et les puits avoisinants (fig. 96).

Les eaux de rejet sont prélevées tout le long de la zone sur 4 points, alors que les échantillons d'eaux souterraines proviennent des neuf puits exploitant la nappe libre (2 puits au Sud, 1 à l'Est et 6 au Nord). L'eau de drainage est prélevée à sa sortie du réseau avant qu'elle ne soit mélangée aux eaux usées.

Un réseau d'échantillonnage dense est nécessaire pour déterminer avec précision le contaminant et sa distribution (Schiedek et al ; 2007). De ce fait, pendant l'année 2010, deux campagnes de mesures ont été réalisées en janvier et avril, selon le mode d'échantillonnage de l'année 2007, avec une augmentation du nombre de puits échantillonnés, qui passe de neuf à douze puits, ainsi que le remplacement des puits 1 et 2 par deux autres après leur arrêt (fig. 97).

Après l'arrêt du rejet, vers la fin de l'année 2010, nous avons effectué une autre campagne en mai 2012 avec le même réseau d'échantillonnage de l'année 2010, en prélevant des échantillons dans les mêmes puits que ceux utilisés lors des campagnes de 2010, avec l'ajout de

deux puits, situés au Nord (P14) et au Sud (P13), pour avoir une idée sur la pollution résiduelle des eaux de la nappe.

2.2. Paramètres mesurés in-situ

Ce sont les paramètres mesurés directement sur le terrain à l'aide d'un appareil multi-paramètres. Il s'agit essentiellement de la température (T°), du potentiel d'hydrogène et d'oxydoréduction (pH et Eh), de l'oxygène dissout (O_2), et de la conductivité électrique (CE).

2.3. Analyse des éléments chimiques

L'analyse des sels nutritifs (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , et PO_4^{2-}), la demande biologique en oxygène (DBO_5) et la concentration des matières en suspension (MES) pour l'année 2007, a été effectuée au Laboratoire de Biologie Marine (Université Badji Mokhtar Annaba). Les mêmes éléments ont été analysés au laboratoire du département de Géologie de l'Université de Constantine pour l'année 2010 et au laboratoire central du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Région Arides (CRSTRA) pour l'année 2012. En fonction de l'ion à doser différentes techniques, décrites dans les ouvrages généraux de chimie (*Aminot, 1983 ; Rodier, 1996 ; Mathieu & Pieltain, 2003*), ont été utilisées :

Le dosage des sels nutritifs a été effectué par spectrophotométrie :

- Azote ammoniacal ($NH_3 + NH_4^+$) avec $\lambda = 630 \text{ nm}$;
- Nitrites (NO_2^-) avec $\lambda = 543 \text{ nm}$,
- Nitrates (NO_3^-) avec $\lambda = 543 \text{ nm}$,
- Phosphate (PO_4^{3-}) où $\lambda = 885 \text{ nm}$.

Pour les sels dissous, nous avons utilisé les méthodes suivantes :

- La volumétrie pour les ions HCO_3^- ,
- La complexométrie pour les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ,
- La méthode de Mohr pour les ions Cl^- ,
- La turbidimétrie pour les SO_4^{2-} ,
- La spectrophotométrie de flamme pour le Na^+ et le K^+ ,

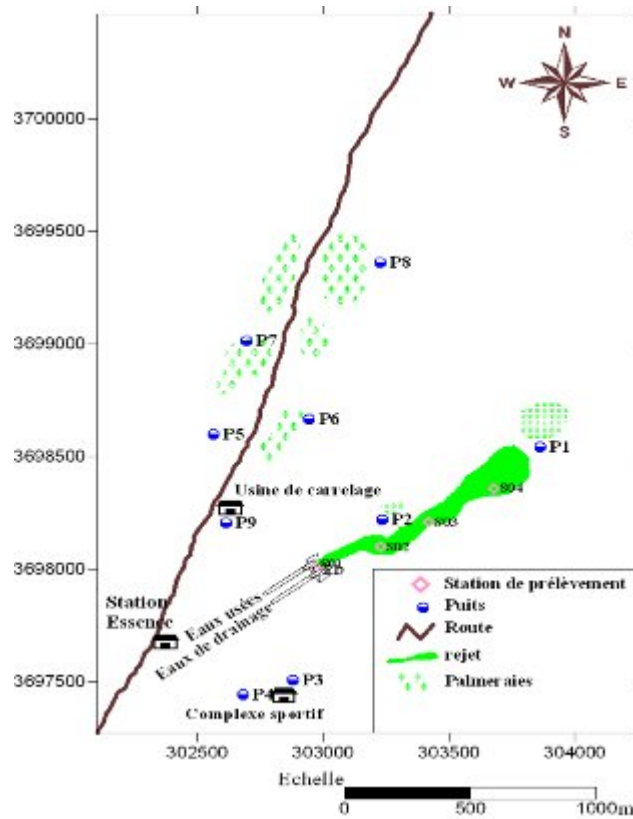


Figure 96 : Carte d'inventaire des points de prélèvements en 2007.

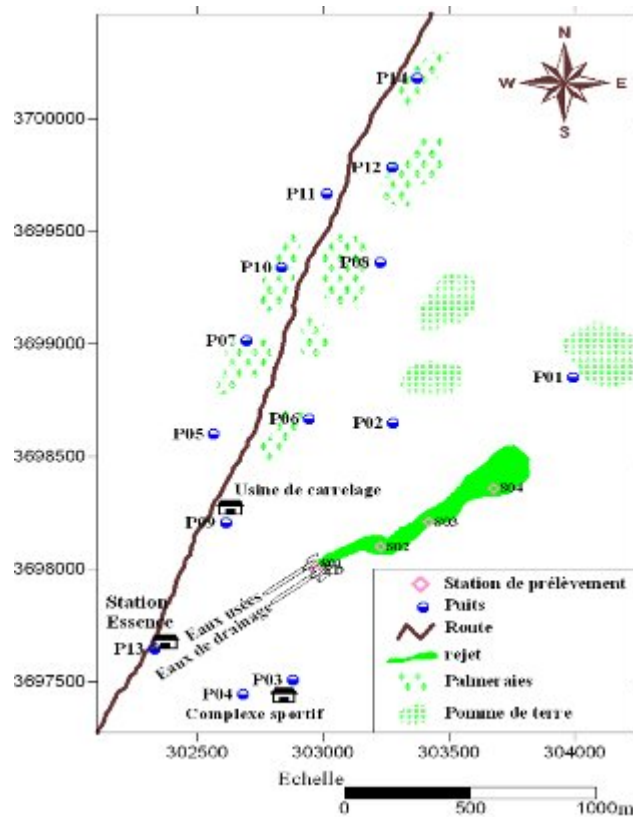


Figure 97 : Carte d'inventaire des points de prélèvements (janvier et avril 2010 et mai 2012)

3. Résultats et discussion

3.1. 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.

3.1.1. Le potentiel d'hydrogène (pH)

On l'utilise pour déterminer l'alcalinité et l'acidité des eaux. Le pH est cologarithme de (H^+) et correspondant à la concentration $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$. Cependant, certains auteurs ont de bonnes raisons de penser que, H^+ étant une particule subatomique, un proton ne peut exister à l'état libre. Il faudrait remplacer la notion d'ion H^+ par celle d'ion H_3O^+ , l'hydroxynium ou hydronium (Schoeller, 1962). Plusieurs paramètres peuvent influencer le pH, tels que la température et les phénomènes biologiques (photosynthèse et dégradation de la matière organique). La solubilité du CO_2 diminue lorsque la température augmente de sorte que le pH s'élève en même temps. A l'inverse la solubilité du CO_2 augmente lorsque la température diminue, ce qui conduit à une baisse du pH (Liechti et al 2004). 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 CO_2 . La nitrification de l'ammonium agit dans le même sens.

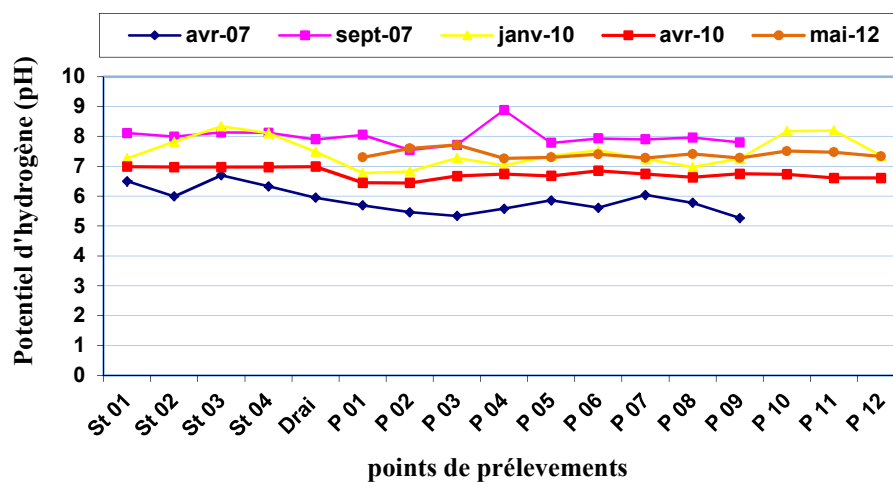


Figure 98 : Variation de pH pour les cinq campagnes (Oued Souf).

D'après le diagramme de variation du pH (fig. 98) on remarque une grande variabilité dans les valeurs de pH (5.27 à 8.88) indiquant une forte pollution de ces eaux par les rejets. La campagne d'avril 2007 présente des eaux à un pH plus au moins acide. Par contre, les autres campagnes ont des eaux avec un pH voisin de la neutralité, ou plus au moins alcalin. Les eaux usées présentent toujours les valeurs du pH les plus élevées dues 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 de pH à cause de la couverture sableuse qui isole de l'air.

3.1.2. Conductivité électrique

La relation entre la conductivité électrique et la composition chimique est basée sur le fait que la conductivité électrique d'une solution saline complexe est la somme des conductivités attribuées à chacun des ions qu'elle renferme (Schoeller, 1962). C'est un 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 aquifères, 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, à cause de l'activité humaine, nous retenons d'abord les nutriments, comme les nitrates, les nitrites, l'ammonium et les phosphates et aussi l'utilisation de précipitants dans les stations d'épurations (sodium, chlorures).

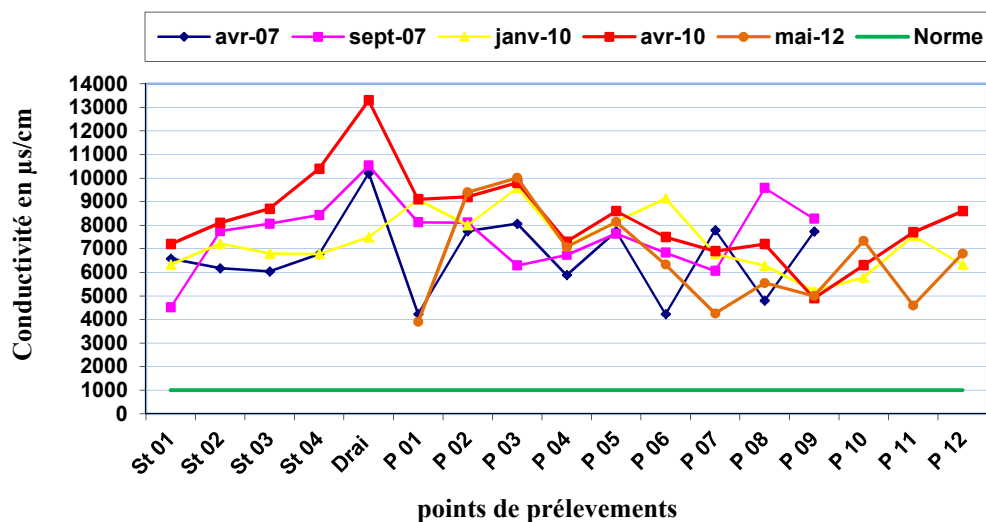


Figure 99 : Variation de CE pour les cinq campagnes (Oued Souf).

Le diagramme ci-dessus (fig. 99) montre une certaine hétérogénéité des valeurs de CE d'une campagne à l'autre, oscillant entre 3900 et 13300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dues pour les eaux usées aux fortes concentrations de sels nutritifs (ammonium, phosphates et nitrites) et en fortes teneurs en sels dissous. Les eaux de drainage sont issues d'un réseau de puits destinés spécialement pour rabattre le niveau de la nappe phréatique dans la ville d'El-Oued. Elles présentent les valeurs les plus élevées de conductivité, dues à la forte évaporation des eaux de la nappe phréatique, à la faible vitesse d'écoulement de la nappe et à la relation de cette dernière avec les nappes profondes.

Pour les puits (eaux souterraines), les fortes valeurs sont dues à la présence des formations gypseuses, à la forte dureté de l'eau, à la forte évaporation et à la possibilité de l'influence des eaux de rejet.

3.2. Les éléments de la pollution

3.2.1. Les éléments majeurs

3.2.1.1. Calcium (Ca^{2+}) : la présence des ions Ca^{2+} 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).



Tableau 25 : Variation des teneurs en calcium pour les cinq campagnes (Oued Souf).

Paramètres	Avril 2007	Septembre 2007	Janvier 2010	Avril 2010	Mai 2012
Moyenne	581.43	470.53	564.38	603.54	419.33
Minimum	430	259.53	384	104	224
Maximum	710	800	721.44	881.76	544
Ecart-type	74.53	127.59	104.64	169.74	82.75

Le tableau ci-dessus montre que tous les points d'eau de la zone de rejet présentent des concentrations supérieures à la norme de potabilité des eaux (100 mg/l). Les fortes concentrations dans les puits et les eaux de drainage sont dues à la présence des passages gypsifères dans la nappe (*Dervieux, 1957*). Les eaux usées présentent des valeurs moins élevées par rapport aux puits, à cause probablement à l'élévation du pH qui favorise la précipitation de Ca^{2+} .

3.2.1.2. Magnésium (Mg^{2+}) : 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).

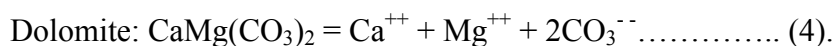
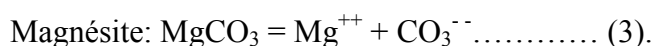


Tableau 26 : Variation des teneurs en magnésium pour les cinq campagnes (Oued Souf).

Paramètres	Avril 2007	Septembre 2007	Janvier 2010	Avril 2010	Mai 2012
Moyenne	571.79	262.82	212.66	267.01	251.47
Minimum	410	55.43	136	147.96	93.6
Maximum	870	568.27	296.88	517.68	369.6
Ecart-type	106.83	119.05	50.22	93.50	80.49

L'évolution des teneurs en magnésium (*tab. 26*), est identique à celle du calcium, dont l'origine provient des formations évaporitiques. Tous les points de prélèvements présentent des concentrations en Mg^{2+} supérieures à la norme de potabilité (50 mg/l).

3.2.1.3. Chlorure (Cl⁻) et Sodium (Na⁺) : L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution des formations salifères, à l'effet de l'évaporation dans les milieux fermés (systèmes endoréiques) (*Zeddouri, 2010*). La dissolution des minéraux salifères (halite) se fait selon la relation suivante :



Le tableau 27 montre une grande variabilité dans les teneurs en chlorures et en sodium soit d'une campagne à l'autre, soit dans la même campagne (Ecart type atteint 509 mg/l).

L'examen de ces valeurs montre que les concentrations de ces éléments sont fortes et loin des normes de potabilité (150 mg/l pour le Na⁺ et 200 mg/l pour le Cl⁻)

La présence de ces deux éléments dans les eaux usées est liée à des activités humaines (utilisation des précipitants) et au mélange de ces dernières avec les 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 (*Guendouz, 2006*), à l'influence du rejet qui peut contamine la nappe et à l'évaporation des eaux surtout durant la période estivale.

La relation entre ces deux éléments (*fig. 100*) est caractérisée par un coefficient de corrélation fort ($R^2= 0.917$)

Les teneurs en chlorures présentent des valeurs importantes à celles 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 (*Debieche, 2002*).

Tableau 27 : Variation des teneurs en sodium et chlorures pour les cinq campagnes (Oued Souf).

Paramètres		Avril 2007	Septembre 2007	Janvier 2010	Avril 2010	Mai 2012
Sodium	Moyenne	121	483.21	686.96	673.66	358.18
	Minimum	27	327.5	239.2	294.4	165.00
	Maximum	169	750	1266.6	1183.94	692.21
	Ecart-type	41.27	108.93	277.96	229.88	150.69
Chlorures	Moyenne	1190.86	1180.40	770.93	1115.76	1031.13
	Minimum	668.6	629.85	319.5	497	603.5
	Maximum	1704	1864.66	1192.8	1988	1775
	Ecart-type	311.16	394.54	216.75	509.69	305.84

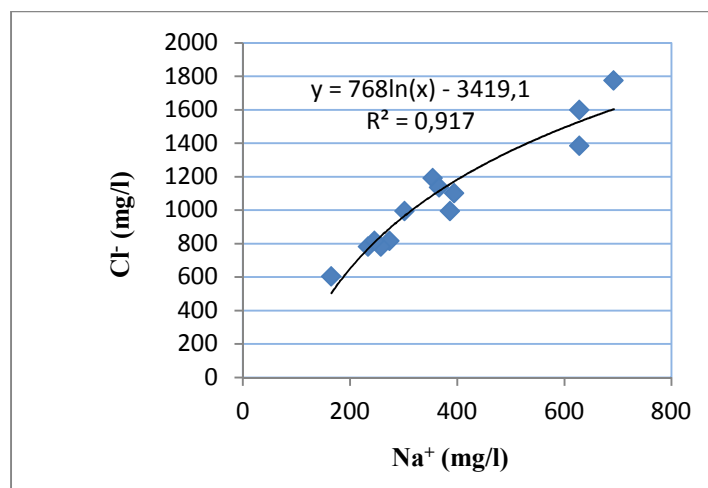


Figure 100 : Relation entre sodium et chlorure

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

Tableau 28 : Variation des teneurs en potassium pour les cinq campagnes (Oued Souf).

Paramètres	Avril 2007	Septembre 2007	Janvier 2010	Avril 2010	Mai 2012
Moyenne	41.71	56.25	52.02	53.18	29.86
Minimum	12	12.5	18.4	12.6	19.53
Maximum	107	127.5	74	78	48.16
Ecart-type	23.97	34.18	16.71	19.76	8.73

Le tableau ci-dessus montre des valeurs importantes en K⁺, en générale variées entre 12 et 127 mg/l, où les teneurs les plus élevées sont toujours enregistrées dans les eaux de rejet, donc la majorité des points de prélèvements ont des teneurs supérieures à la norme (12 mg/l). 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 surtout avec le développement agricole reconnue dans la région du Souf, soit à l'influence du rejet.

3.2.1.5. Sulfates (SO₄²⁻) : Les sulfates ont des origines très diverses : roches sédimentaires (gypse), minerais, engrais, transformations chimiques et biochimiques de SO₂, H₂S, etc. (Bouziane, 2009)

Les sulfates donnent un gout amer et un gout médical à l'eau s'il dépasse la concentration de 250 mg/L. Cela rend désagréable la consommation de l'eau. Des importantes concentrations en sulfates peuvent être corrosives pour les tuyauteries en particulier les tuyauteries en cuivre. Dans les endroits où l'on retrouve des concentrations importantes en sulfates, il est préférable d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion comme des tuyaux en plastique (Zeddouri, 2010).

Les valeurs des teneurs en sulfates mesurées pour les cinq campagnes sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau 29 : Variation des teneurs en sulfates pour les cinq campagnes (Oued Souf).

Paramètres	Avril 2007	Septembre 2007	Janvier 2010	Avril 2010	Mai 2012
Moyenne	1872.14	1136.43	2387.82	2837.94	1477.45
Minimum	1240	520	1680	1840	576.17
Maximum	2240	1700	3290	4140	2280.18
Ecart-type	280.69	336.07	426.20	641.39	491.60

D'après le tableau 29, on remarque que les teneurs en sulfates varient de 520 mg/l à 3290 mg/l pour respectivement septembre 2007 et janvier 2010. Ce sont des valeurs très élevées. C'est l'élément le plus abondant dans la région du Souf. Les sulfates proviennent de la dissolution de l'anhydrite (CaSO_4), du Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en contact avec l'eau. Ils se présentent sous forme d'intercalations dans les sables d'âge quaternaire (*Saibi, 2003*). Le Gypse se présente à des faibles profondeurs entre 0.5 et 1m (*Dervieux, 1957*). Sa dissolution se fait pendant la recharge et/ou le retour des eaux d'irrigation (*Guendouz, 2006*).

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

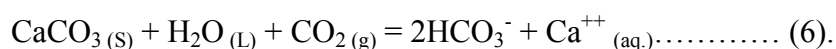


Tableau 30 : Variation des teneurs en bicarbonates pour les cinq campagnes (Oued Souf).

Paramètres	Avril 2007	Septembre 2007	Janvier 2010	Avril 2010	Mai 2012
Moyenne	305.59	162.41	319.37	325.52	273.18
Minimum	137.25	112.9	140.3	91.5	148.84
Maximum	707.6	323.95	707.6	817.4	335.5
Ecart-type	193.26	72.64	202.15	214.58	50.60

Les valeurs des bicarbonates sont dans les normes pour les eaux souterraines (*tab. 30*), cependant elles dépassent les normes pour les eaux usées et les eaux de drainage. Les fortes concentrations proviennent des eaux des deux nappes profondes (CT et CI), exploitées pour l'AEP et l'irrigation.

3.2.2. Cycle de l'azote

L'azote est présent au niveau de la zone des rejets sous trois formes chimiques (nitrates, nitrites 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 (*fig. 101*). Le transfert 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 CO₂ et la faible teneur en oxygène accroissent la concentration en ammonium dans l'eau.

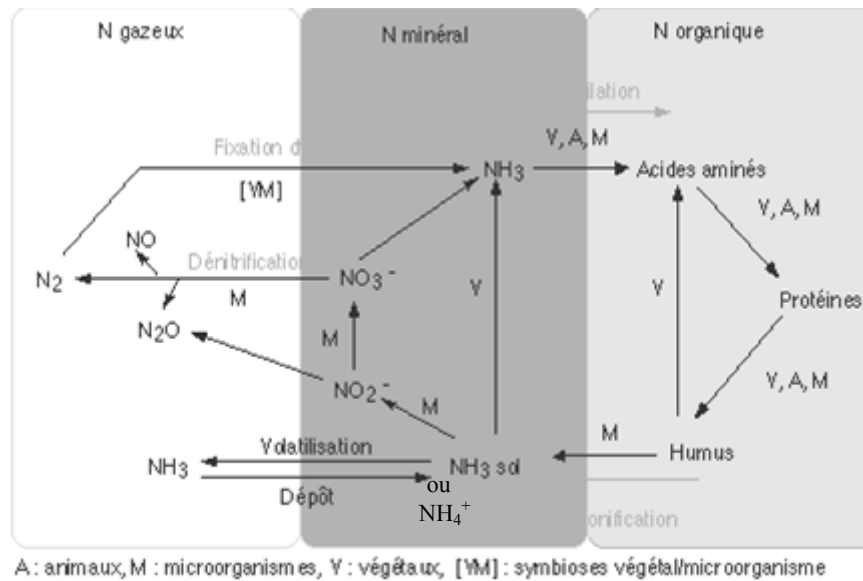


Figure 101 : Cycle de l'azote

3.2.2.1. Ammonium NH₄⁺ : La concentration en ammonium est indicatrice de la pollution des eaux, soit par le déversement des eaux usées ménagères, soit au lessivage des sols agricoles. Etant donné que l'ammonium n'est pas très stable au plan chimique, car durant le temps qui s'écoule entre le prélèvement et l'analyse au laboratoire, une importante dégradation biologique peut se produire durant le transport. Cette transformation est particulièrement sensible pour de faibles concentrations. Il faut alors garantir une réfrigération adéquate de l'échantillon lors du prélèvement et du transport (Liechti et al, 2004).

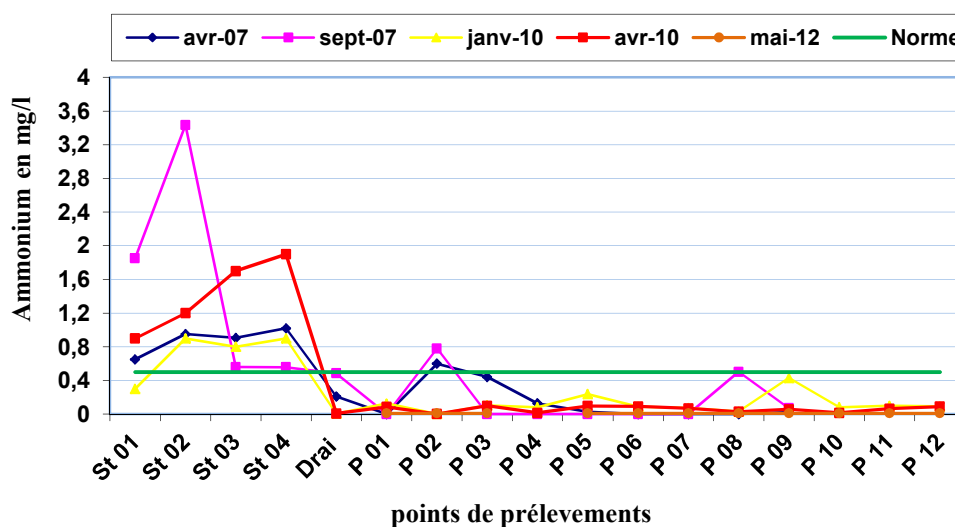


Figure 102 : Variation des teneurs en ammonium pour les cinq campagnes (Oued Souf).

L'allure des courbes de variation des teneurs en ammonium (fig. 102), montre que les valeurs les plus élevées sont relevées dans le rejet où elles atteignent 3.43 mg/l à la station 2 (septembre 2007). Le puits P2 présente des concentrations supérieures aux normes avec 0.78 mg/l (septembre 2007) à cause de sa position proche du rejet. Les puits P3 et P4, localisés au Sud du rejet, présentent des concentrations proches aux normes. Ceci s'explique, soit par la réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) ou par contamination par les eaux de rejet. Ce phénomène de réduction est observé au niveau de puits P8 avec une concentration de 0.509 mg/l. Les eaux de drainage présentent des concentrations inférieures aux normes et oscillent entre 0.006 mg/l et 0.485 mg/l respectivement pour janvier 2010 et septembre 2007, car ces eaux proviennent d'un réseau de puits, destiné uniquement à rabattre la nappe et sont canalisées séparément du réseau des eaux usées.

3.2.2.2. Nitrites NO_2^- : Les nitrites sont instables au plan biochimique. Entre le remplissage des flacons et l'analyse au laboratoire, une importante dégradation biologique peut se produire durant le transport. En présence de fortes concentrations en ammonium dans l'échantillon, les nitrites peuvent également apparaître par nitrification ; c'est la raison pour laquelle les échantillons devraient être réfrigérés ($< 4^\circ\text{C}$) et analysés rapidement après prélèvement (Liechti et al, 2004).

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.

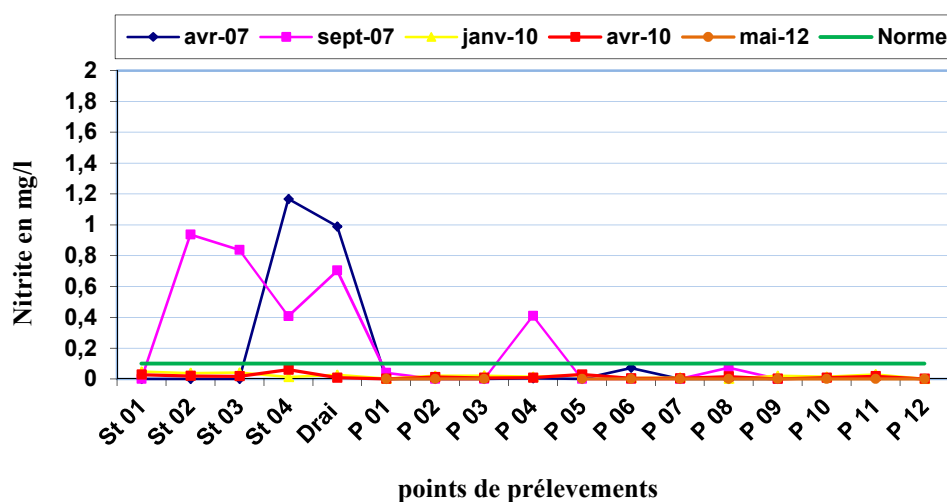


Figure 103 : Variation des teneurs en nitrites pour les cinq campagnes (Oued Souf)

Le diagramme ci-dessus (fig. 103) montre que les concentrations en nitrites commencent à apparaître à la station 2, c'est-à-dire après l'oxygénation des eaux qui favorise la transformation

de NH_4^+ en NO_2^- (oxydation). Les nitrites ont des concentrations élevées qui dépassent largement les normes (0.1 mg/l), elles atteignent un maximum de 1.167 mg/l au niveau de la station 4 de rejet en avril 2007. Cet excès peut être expliqué par la transformation biologique de l'ammonium en nitrates. Cependant, elles sont liées à la réduction des nitrates pour les eaux de drainage et les eaux du puits P4.

3.2.2.3. Nitrates NO_3^- : Les nitrates dans l'eau potable sont considérés comme un contaminant majeur. Ils sont, aujourd'hui, fréquemment constatés dans les aquifères. Dans les régions arides et régions semi-arides, les sources de nitrates dans les eaux souterraines sont soit liées à la pollution anthropique directe dans les villes ou avec le lessivage des engrais dans les zones agricoles (Girard et Hillaire Marcel, 1997). Par ailleurs, le transfert des nitrates vers les nappes est favorisé par une infiltration excessive d'eau d'irrigation ou de pluie (Berdai, 2004)

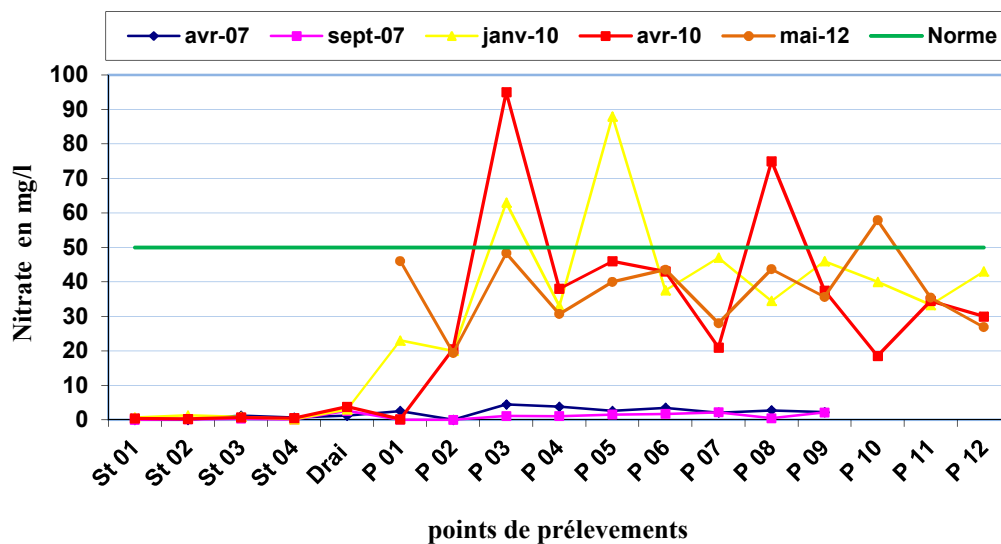


Figure 104 : Variation des teneurs en nitrates pour les cinq campagnes (Oued Souf)

Généralement, les teneurs en nitrates des eaux de rejet sont faibles et restent toujours inférieures aux normes (50 mg/l) durant toutes les campagnes (fig. 104). Elles oscillent entre 0 et 3.3 mg/l, et sont dues à la transformation de l'ammonium en nitrates en présence de l'oxygène. En revanche, dans les eaux souterraines leur concentration dépasse parfois la norme, et peut atteindre 95 mg/l au P3 (avril 2010). Les valeurs élevées des nitrates dans les puits sont dues aux nouvelles méthodes de culture dans la région, relatives à l'introduction de la pomme de terre, qui nécessite l'utilisation d'engrais chimiques. Elles dues aussi à l'influence de la zone de rejet, suite à la transformation de l'azote organique, contenu dans les eaux usées grâce à l'activité bactérienne aérobie, en nitrite puis en nitrates, favorisée par la présence de l'oxygène en permanence due à la forte porosité des sables dunaires et au contact de ces derniers avec l'atmosphère (Guendouz, 2006).

3.2.3. Les éléments mineurs naturels

3.2.3.1. Phosphates PO_4^{3-} : Les phosphates peuvent se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO_3 , pyro $H_4P_2O_7$ et ortho H_3PO_4 , en milieu aqueux, les formes méta et pyro tendant vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphates sont données par :



Le diagramme ci-dessous (fig. 105), montre que seules les eaux de rejet présentent des concentrations en phosphates, ils varient entre 0.3 mg/l et 4.37 mg/l successivement pour avril 2010 et avril 2007. Leur origine est due d'une part aux rejets urbains et d'autre part à l'effet de la stagnation des eaux (Debieche, 2002).

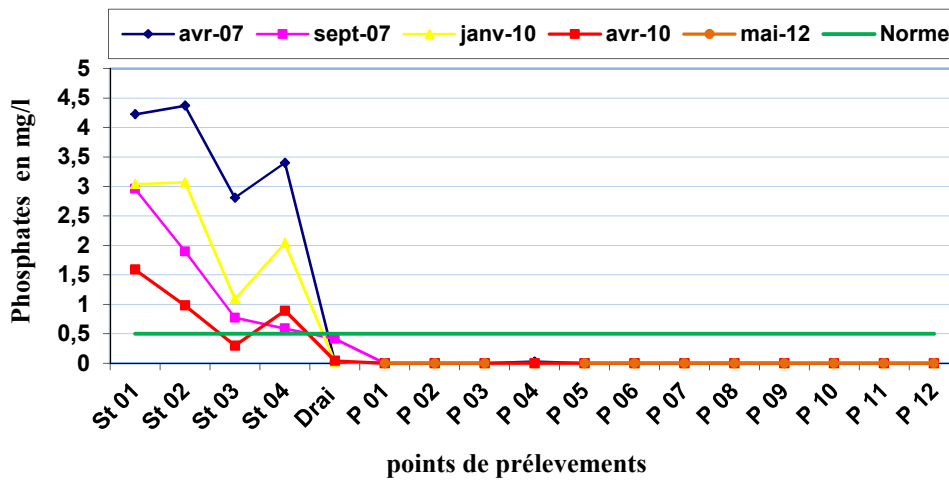


Figure 105 : Variation des teneurs en phosphates pour les cinq campagnes (Oued Souf)

3.2.4. Les paramètres de pollution organique

3.2.4.1. Les matières en suspensions (MES) : Elles représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenues par un filtre.

Les MES qui comportent les matières organiques et minérales, constituent un indicateur important du degré de pollution.

D'après le diagramme (fig. 106), nous remarquons 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 de faibles valeurs (< 100 mg/l), sauf pour les puits P1, P2, P3 et P5, qui présentent des valeurs supérieures à 100 mg/l durant la campagne de septembre 2007. Ceci est dû à la présence de matières minérales résultant de l'excès de pompage.

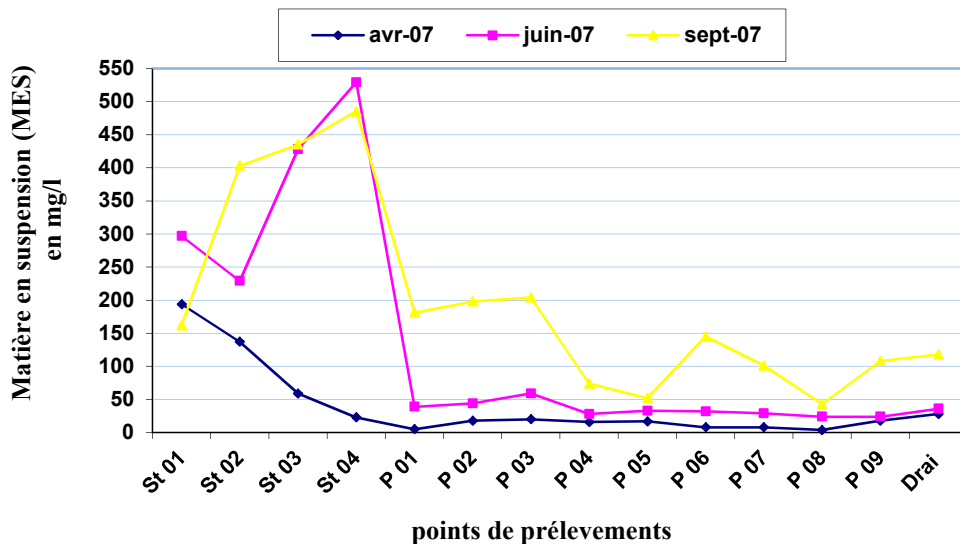


Figure 106 : Variation des matières en suspensions pour les trois campagnes (Oued Souf)

3.2.4.2. La demande biologique en oxygène (DBO₅) : une pollution anthropique se traduit par des valeurs importantes en matière organique (DCO et DBO₅) (El Asslouj et al ; 2007). La demande biologique en oxygène (DBO₅) mesure la consommation en oxygène par les phénomènes de dégradation biologique durant une période donnée, 5 jours (DBO₅). Les substances consommant de l’oxygène comprennent en particulier : carbone organique, ammoniacque, nitrites, hydrogène sulfuré et d’autres composés réduits, surtout les substances facilement dégradables. De ce fait, la transformation des aliments est responsable de plus de 50% de la charge en DBO₅.

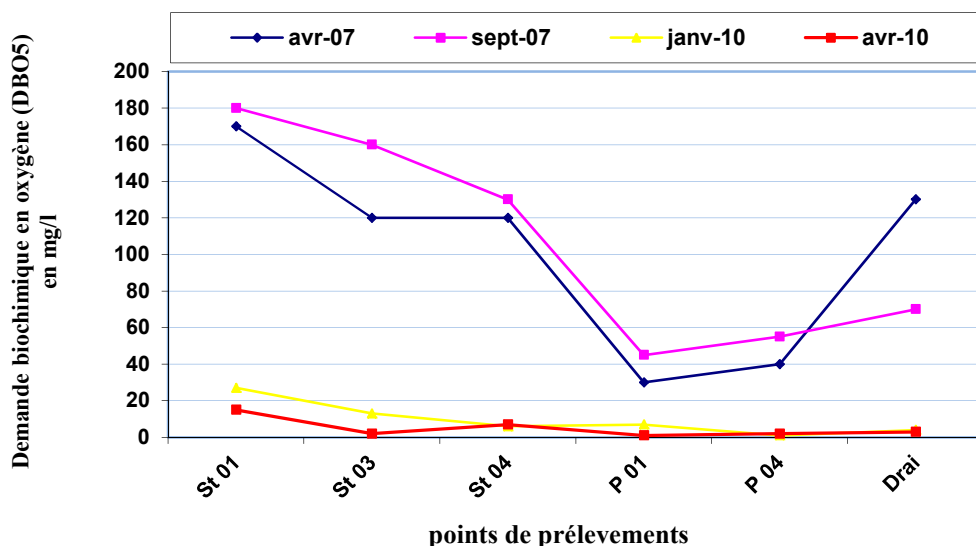


Figure. 107 : Variation de la DBO₅ pour les quatre campagnes (Oued Souf)

Le diagramme (fig. 107) montre que les fortes valeurs du DBO₅ sont enregistrées dans les eaux usées avec des valeurs atteignant les 300 mg/l (station 1) à cause de la présence de l’oxygène et

de la matière organique. Les eaux souterraines présentent de faibles valeurs à cause du manque de substance consommant d'oxygène.

4. Faciès chimique des eaux

Pour déterminer le faciès chimique des eaux de la région d'étude, une représentation graphique, basée sur le diagramme triangulaire de Piper (fig. 108 a, b, c), a été effectuée à partir des résultats analytiques obtenus durant les campagnes de janvier 2010, avril 2010 et mai 2012. Cette représentation a montré une dominance remarquable du faciès sulfaté calcique ou sodique pour les campagnes de janvier et avril 2010. Pour la campagne de mai 2012, un faciès sulfaté calcique pour les puits P1 et P12, sulfaté magnésien pour les puits P8-P11, chloruré calcique pour les puits P2, P4 et P6, chloruré magnésien pour les puits P3 et chloruré sodique pour le puits P7. Cette variété de faciès est due essentiellement à l'arrêt de rejet fin 2010.

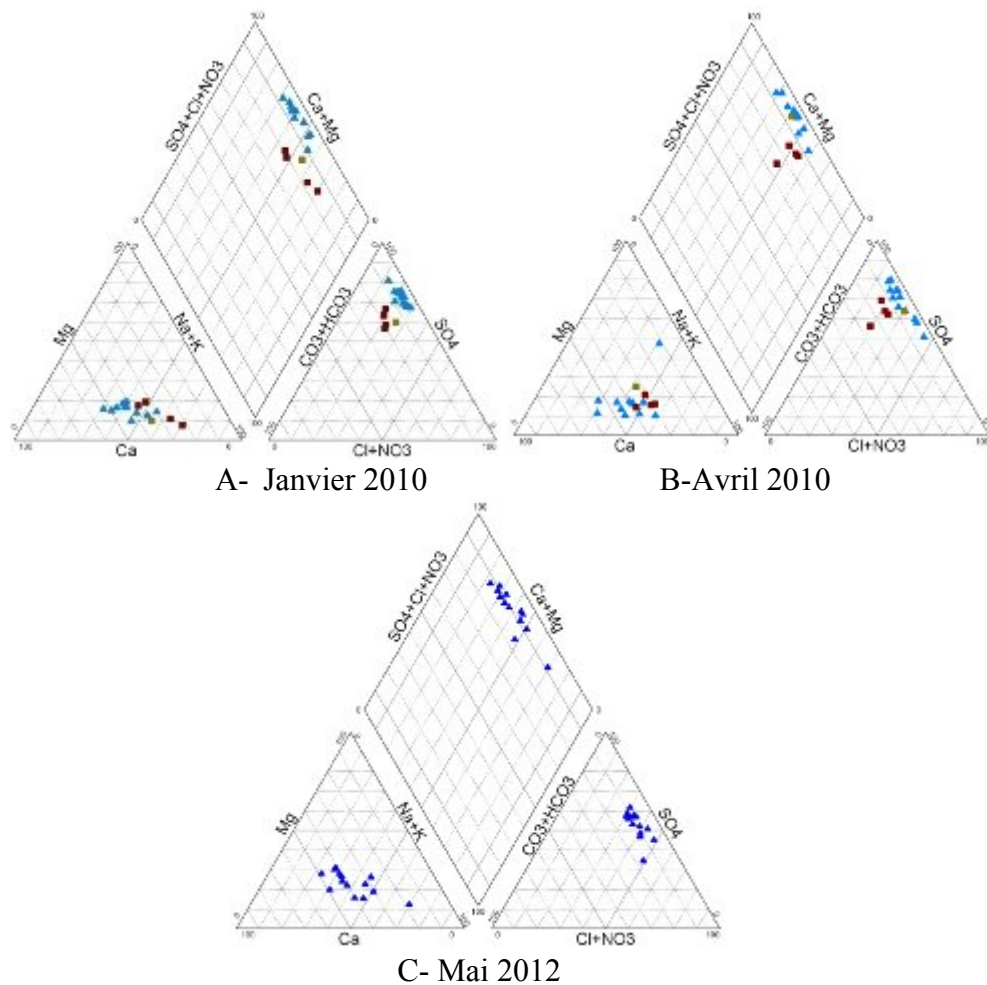


Figure 108 : Diagramme de Piper (janvier, avril 2010 et mai 2012)

Selon Schoeller 1948 in (Tabouche et Achour, 2004) pour les familles chlorurées et sulfatées sodiques et magnésiennes ainsi que pour la famille chlorurée sodique, la lithologie de l'aquifère

est plus fine, la circulation de l'eau est lente, le temps de contact eau-roche augmente d'où l'augmentation de la salinité et l'influence des argiles devient plus marquée. Cette interprétation traduit le phénomène de concentration par dissolution.

5. Origine des éléments chimiques

Les eaux souterraines, circulant dans la nappe phréatique de l'Oued Souf, proviennent de la ré-infiltration des eaux de pompage des nappes profondes et des précipitations efficaces occasionnelles dans la région. Ensuite, elles s'écoulent dans un matériel très hétérogène (des sables, des graviers, des dépôts évaporitiques...etc.). Le parcours d'écoulement et les couches traversées influent sur l'acquisition des éléments chimiques. Afin de déterminer l'origine probable de tous les ions, en se basant sur les mesures et les analyses chimiques de toutes les campagnes.

5.1. Les éléments Ca^{2+} , HCO_3^- et SO_4^{2-}

Le calcium tire son origine des carbonates et du gypse. La détermination de l'origine des concentrations en Ca^{2+} est nécessaire pour connaître les mécanismes du chimisme de la nappe.

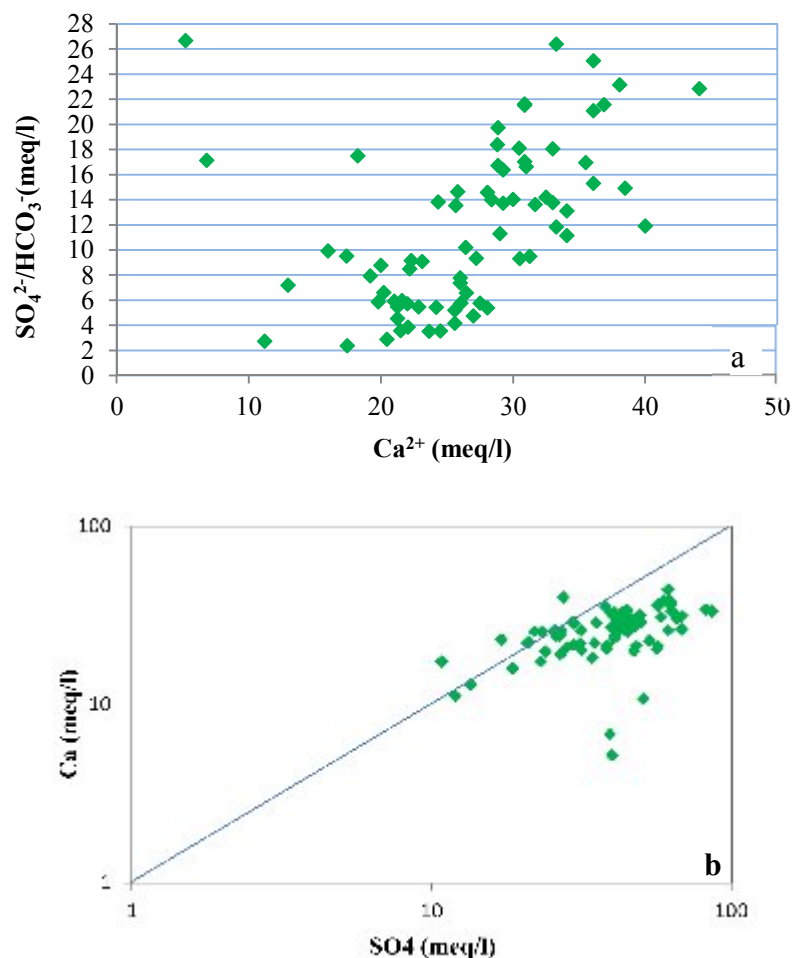


Figure 109 : Détermination de l'origine du calcium

Pour déterminer l'origine carbonatée ou gypsifère du calcium, nous avons établi un graphique représentant l'évolution du calcium en fonction du rapport sulfates-bicarbonates (fig. 109,a). L'analyse de ce graphique montre que tous les échantillons se localisent dans la partie où le rapport est supérieure à 1, ce qui confirme l'origine évaporitique du calcium. Cependant, le déficit en calcium observé dans la relation Ca^{2+} vs SO_4^{2-} (fig. 109,b) peut être attribué à l'échange cationique entre Ca^{2+} et Mg^{2+} .

5.2. Les éléments Na^+ et Cl^-

Dans les eaux naturelles, la présence des deux éléments Na^+ et Cl^- est attribuée à la dissolution de la halite (NaCl) que l'on rencontre dans les formations évaporitiques. Cependant, les chlorures comme le sodium peuvent avoir d'autres origines (naturelles ou anthropiques).

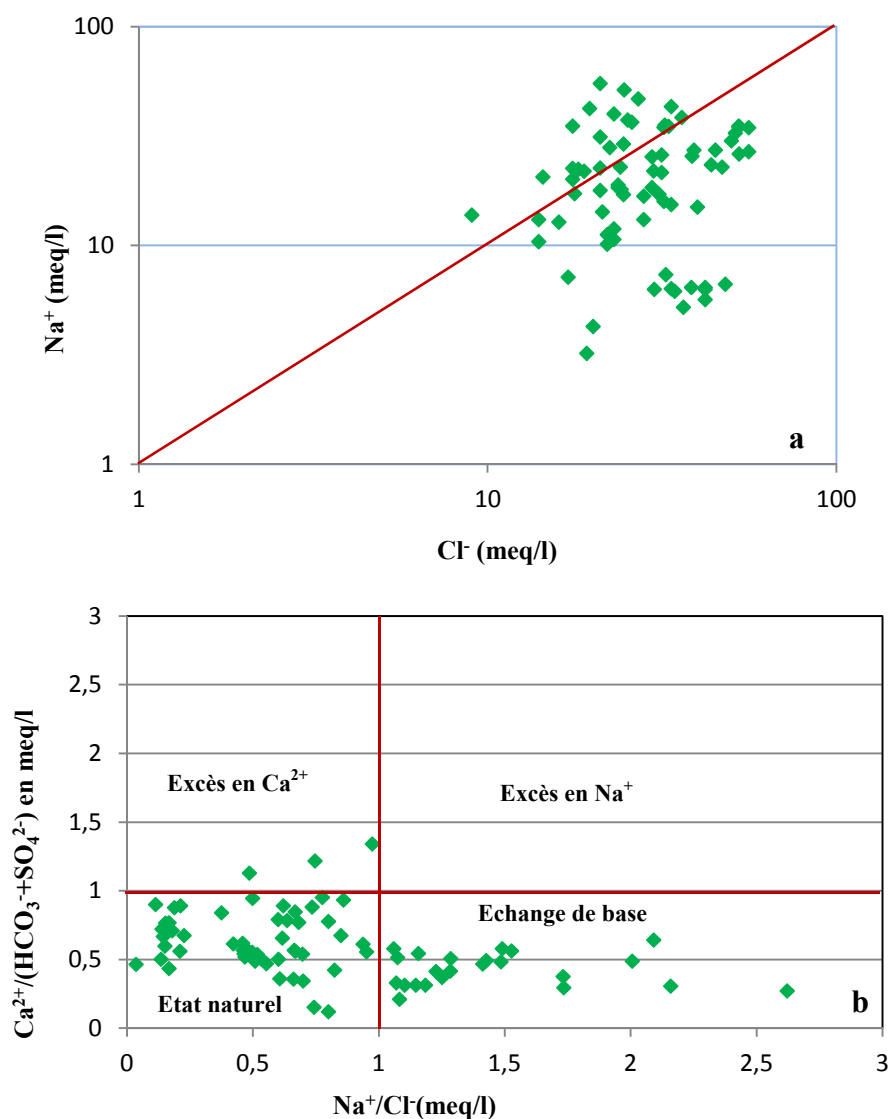


Figure 110 : Détermination de l'origine du sodium.

La représentation graphique de l'évolution du Na^+ en fonction de Cl^- (fig. 110,a) a montré un excès des teneurs en Cl^- pour environ 70% des échantillons. La prédominance des chlorures par rapport au sodium s'explique par l'existence d'une autre origine (les eaux usées) pour les ions chlorures autre que l'halite.

La figure 110,b montre que 30% des échantillons ont subi le phénomène d'échange de base, le reste des échantillons sont dans l'état naturel. Ces résultats montrent que le sodium vient de la dissolution de l'halite d'une part et à la forte évaporation d'autre part.

5.3. Les éléments HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-}

Après avoir fait le point sur les origines des cations, nous avons essayé de représenter l'évolution des anions en fonction de la conductivité électrique. L'interprétation de la figure 111 montre que la conductivité électrique n'évolue pas avec les bicarbonates, par contre une évolution proportionnelle est remarquable entre les chlorures, les sulfates et la conductivité. Ce qui nous a permis de constater que la conductivité est due aux éléments salifères.

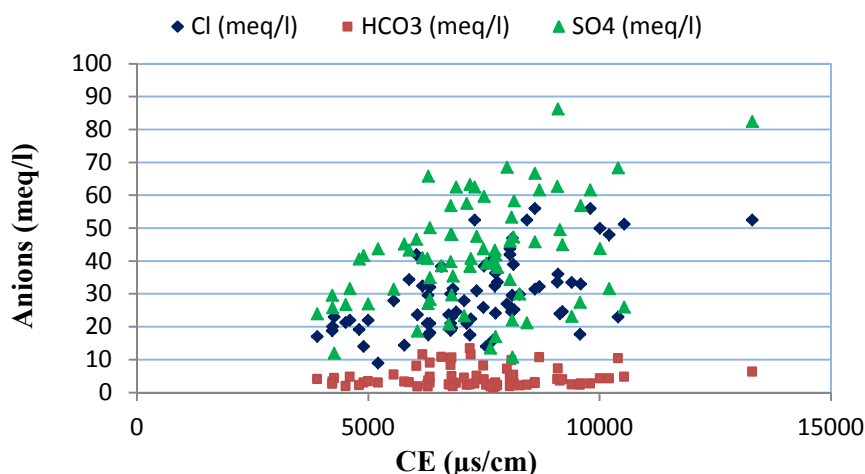


Figure 111 : Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.

5.4. Les éléments Cl^- et SO_4^{2-}

Ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le SO_4^{2-} provient du gypse et le Cl^- provient de la dissolution de l'halite et de la pollution anthropique. Nous avons associé l'évolution de ces ions à la conductivité électrique pour mettre en relief la façon selon laquelle ils évoluent et déterminer lequel d'entre eux est influé sur la salinité des eaux de la nappe.

L'interprétation du graphique (fig. 112) a révélé que la majorité des points d'eau présente un rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) inférieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions SO_4^{2-} par rapport aux ions Cl^- , ce qui confirme la dominance du faciès sulfaté calcique et sodique. Quelques points d'eau présentent des valeurs du rapport ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) supérieures à 1, indiquant une origine salifère ou anthropique.

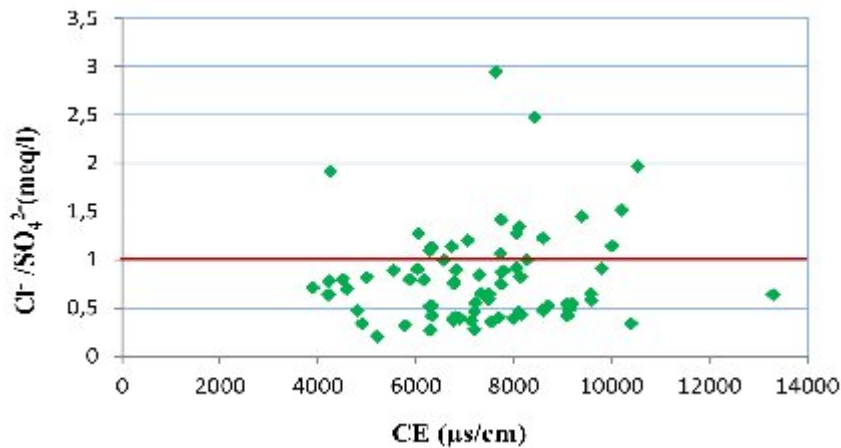


Figure 112 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$.

6. Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP 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, ...etc.) sur les quels sont mesurées des « variables quantitatives » (CE, teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- ...etc.) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières.

6.1. Principe

Dans un tableau comportant (n) variable quantitatives, les individus peuvent être représentés dans un « espace à n 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 ACP, 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'ACP 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 dernière 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'ACP « variable à expliquer » ou « variable supplémentaire » (ne participe pas à la construction des axes).

6.2. Résultats et interprétations

Pour observer les individus, on construit les plans à partir des composantes principales les plus importantes, c'est le plan engendré par les axes F1 et F2, car par définition, c'est le plan sur lequel le maximum d'information est visible. Nous examinerons d'autres plans, selon la part d'information prise en compte par ces derniers. Les résultats de l'ACP 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.

Nous réalisons ainsi l'ACP 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 ».

Dans le cadre de notre étude 14 variables ont été prises en compte, représentés par les paramètres physico-chimiques suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , pH, conductivité électrique (CE), NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{2-} et la DBO_5 . La projection des variables et des individus a été effectuée sur les premiers trois axes, qui représentent 76.26% de la variance totale pour la campagne de janvier 2010 et 70.64% pour la campagne d'avril 2010.

ACP de la campagne de Janvier 2010 :

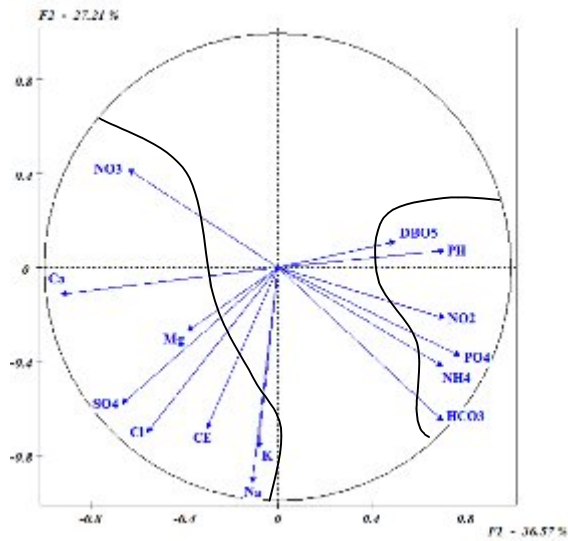
La projection sur le plan F1-F2 montre l'existence de deux groupes (*fig. 113,a,b*) :

Le premier se développe sur la partie positive de l'axe F1 (36.57% de variance), il représente la pollution organique par NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{2-} , DBO_5 et HCO_3^- , en opposition avec les nitrates, il est représenté par les points de rejet (S1-S4).

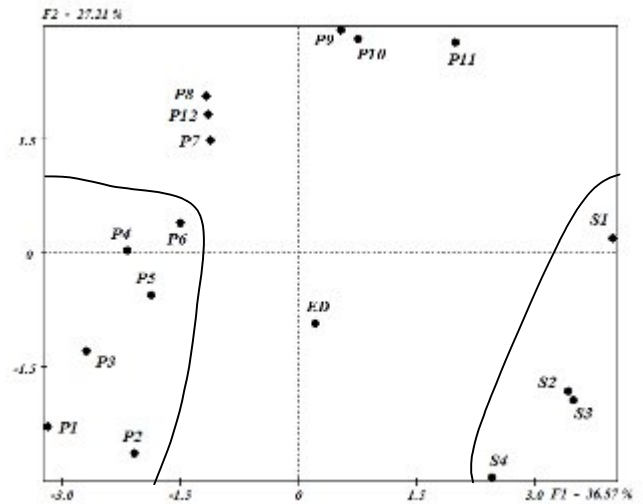
Le deuxième se développe sur la partie négative et représente la minéralisation globale avec une bonne corrélation entre la conductivité électrique, SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} et K^+ . La projection des individus montre que cet axe explique surtout les puits P1-P6.

Ce plan montre aussi une opposition entre le Ca^{2+} et le pH, parce que l'augmentation de pH favorise la précipitation du calcium.

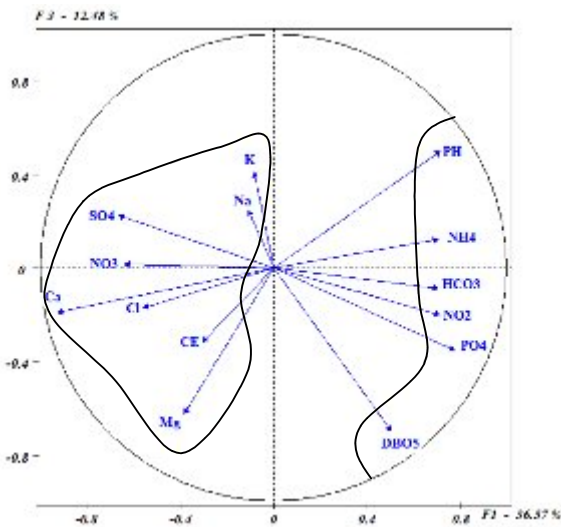
La projection sur le plan F1-F3 (49.05% de variance) montre une opposition entre les eaux de rejet chargées en NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{2-} , DBO_5 et HCO_3^- et les eaux de puits fortement minéralisées (*fig. 113,c,d*). Cette minéralisation est due à l'influence des eaux de rejet et à l'exploitation excessive de la nappe phréatique, qui accélère la circulation des eaux, ce qui favorise la dissolution des formations évaporitiques.



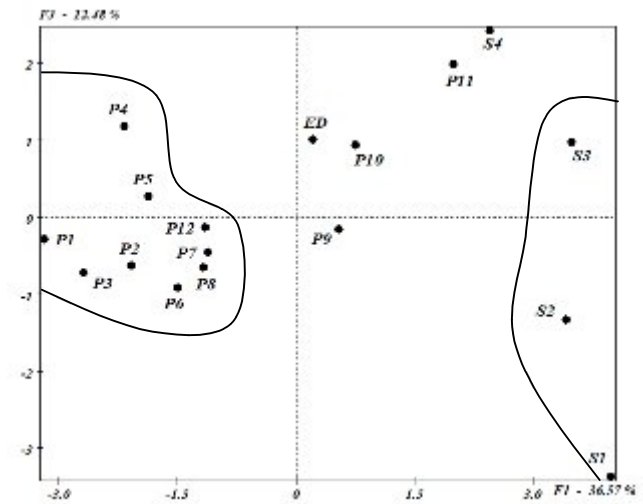
a- Projection des variables sur le plan F1-F2



b- Projection des individus sur le plan F1-F2



c- Projection des variables sur le plan F1-F3



d- Projection des individus sur le plan F1-F3

Figure 113 : ACP des analyses chimiques pour la campagne de janvier 2010

ACP de la campagne d'avril 2010 :

La projection sur le plan F1-F2 montre l'existence de deux groupes (fig. 114,a,b) :
 Le premier se développe sur la partie positive de l'axe F1 (34.07% de variance), il indique la pollution urbaine par NH_4^+ , NO_2^- , DBO_5 et PO_4^{2-} marquée au niveau des stations S1-S4, en opposition avec les nitrates qui présentent de fortes teneurs au niveau des eaux des puits, dues soit au phénomène d'oxydation, soit à l'utilisation des engrais pour l'agriculture.
 Le deuxième se localise sur la partie positive de l'axe F2 (24.66% de variance), il représente une forte minéralisation correspond aux puits P1, P3 et P4, ainsi que les eaux de drainage en opposition avec les puits P7, P9, P10 et P11 qui sont moins minéralisés.
 La projection sur le plan F1-F3 montre l'existence de deux ensembles (fig. 114,c,d) :

L'un se manifeste sur l'axe F1 (34.07% de variance) représente la pollution organique relevée au niveau des quatre points de mesure au niveau de la zone de rejet.

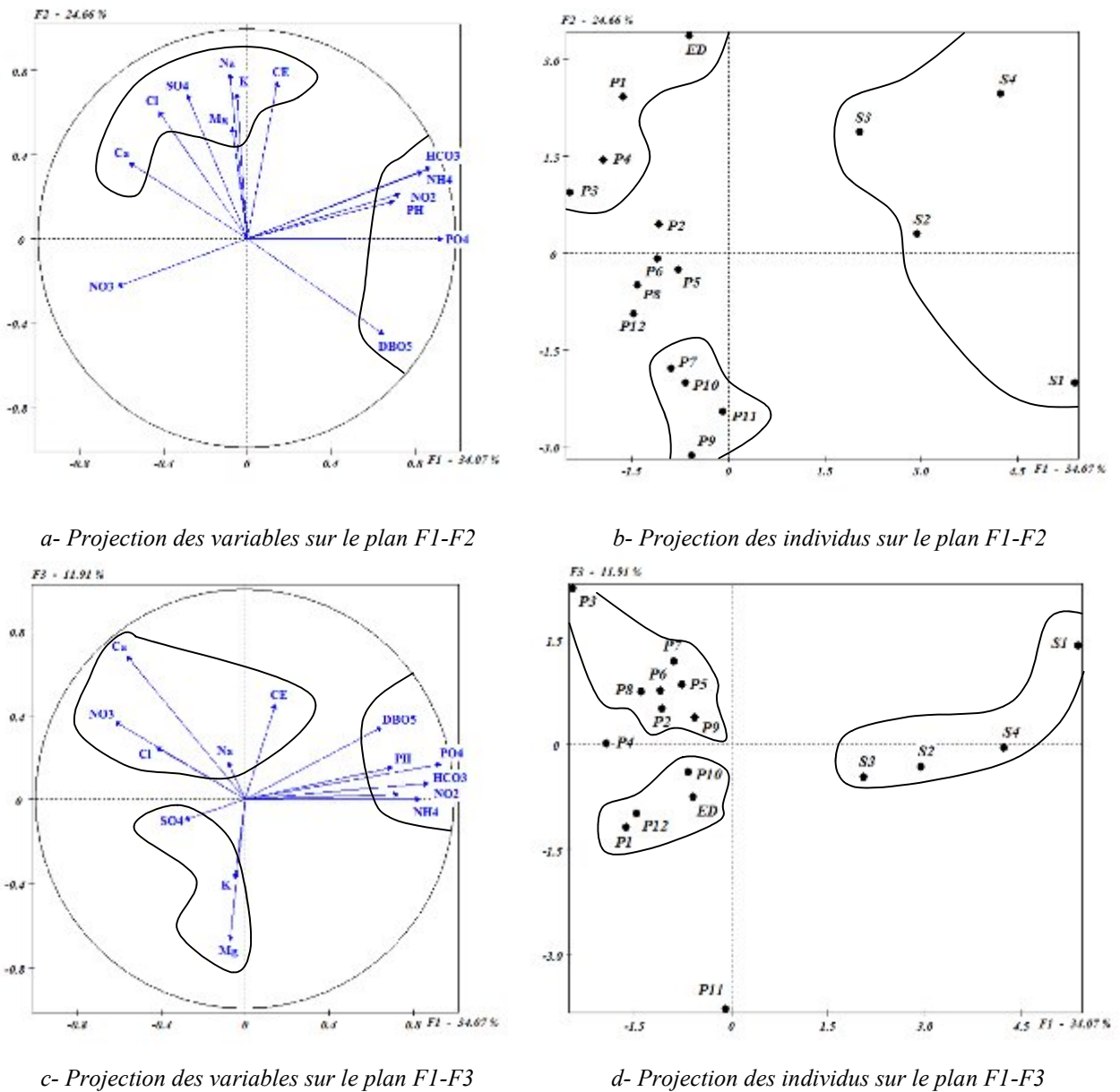


Figure 114 : ACP des analyses chimiques pour la campagne d'avril 2010

L'autre se présente sur l'axe F3 (11.91% de variance), la partie positive représente la minéralisation par Ca^{2+} , Cl^- et NO_3^- , Na^+ , ces éléments sont responsable de la minéralisation, et sont fortement corrélés avec la conductivité électrique. La participation des ions Cl^- et Na^+ à la minéralisation totale des eaux résulterait d'une éventuelle dissolution de l'halite et/ou de l'anhydrite (Kamel et al, 2010). Cette minéralisation est observée au niveau des puits P3, P7, P6, P8, P5, P9 et P2. Par contre, la partie négative regroupe les puits P1, P12, P11, ainsi que les eaux de drainage, qui sont moins minéralisées, mais riches en SO_4^{2-} , Mg^{2+} et K^+ . Cette richesse en SO_4^{2-} est due à la dissolution des formations gypsifères.

7. Etablissement des cartes de l'indice de pollution organique (IPO)

L'établissement des cartes de l'indice de pollution organique des eaux naturelles de la région de l'Oued Souf (zone de rejet) nous renseigne à l'impact des rejets urbains sur la qualité des eaux de la nappe phréatique.

A l'aide du logiciel **Aquakit**, deux petits programmes (macros) Aquexmono et Aquexmulti inclus dans l'environnement du tableur Excel et qui permettent de traiter les données et de les présenter en graphiques pour en faciliter l'interprétation (Djidel, 2008).

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

7.1. 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.

7.2. Les indicateurs géologiques

Les indicateurs géologiques sont des ions qui peuvent être libérés par les roches, du sol ou du sous-sol, dont la présence de ces ions est normale dans une eau souterraine. 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 (annexe).

Il n'est cependant pas exclu que des quantités importantes de ces ions soient introduites dans l'eau de la nappe.

7.3. Les indicateurs de pollution organique

Les indicateurs de pollution regroupent les phosphates et les ions dérivés de l'azote qui provoquent une pollution organique.

Un indice de pollution organique IPO, calculé à partir des concentrations de ces ions, permet de classer l'eau analysée sur une échelle à cinq (5) niveaux de pollution (tab. 31) (Leclercq et Vandevenne, 1987). 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 cinq jours (DBO₅). Toutefois, ce paramètre n'est mesuré que pour six échantillons à la fois (un seul appareil ne se fait que pour six échantillons). Dans le cas où le DBO₅ n'est inclus pas dans le tableau de calcul, 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 de l'IPO.

Tableau 31 : 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 du calcul de l'IPO et des indicateurs d'eutrophisation sont illustrés dans les tableaux 32 et 33 et les figures 115, 116 et 117, sachant que, chaque paramètre est représenté tous seul.

Tableau 32 : L'IPO et les indicateurs d'eutrophisation pour l'année 2007.

Echantillon	Avril 2007		Juin 2007		Septembre 2007	
	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

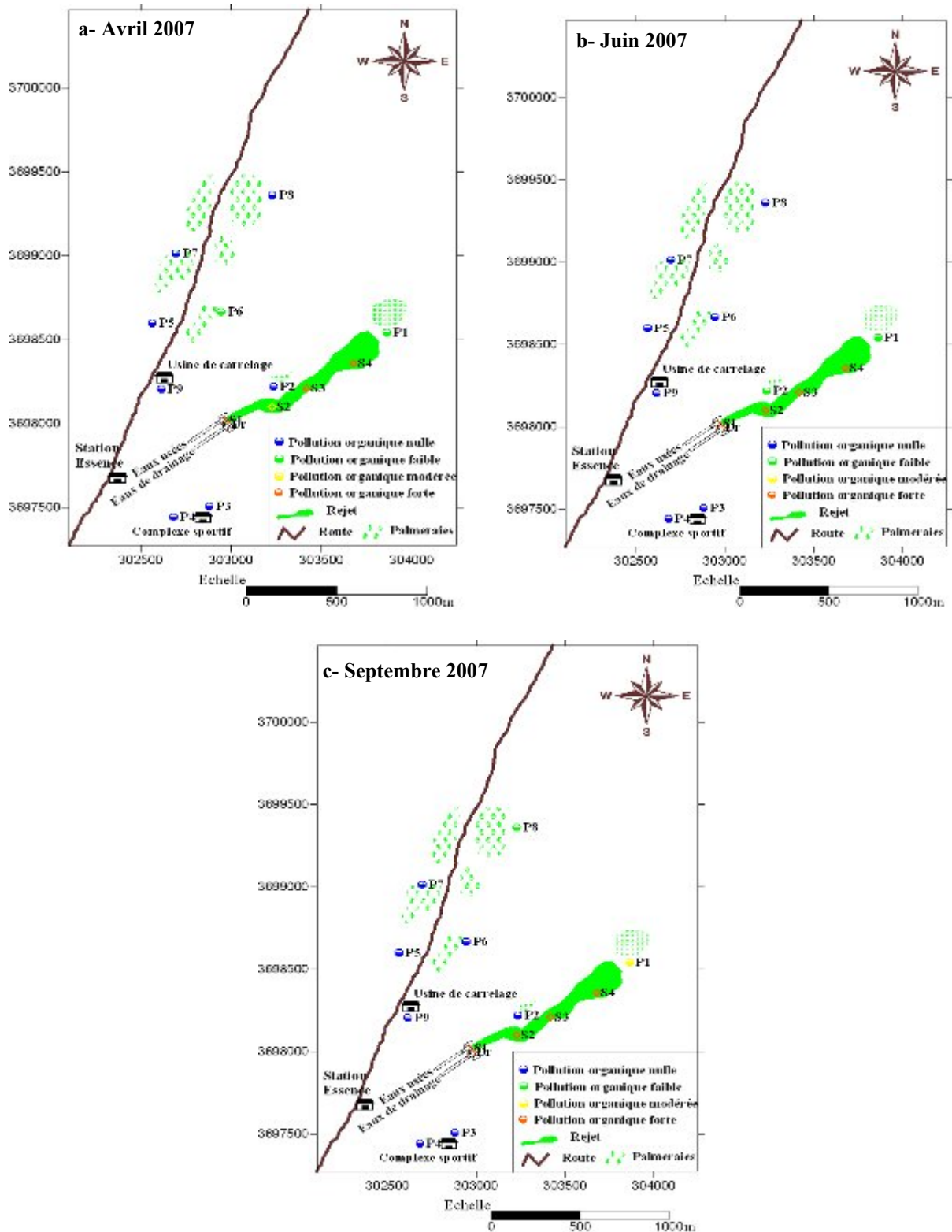


Figure 115 : Carte de l'indice de pollution organique (IPO) année 2007.

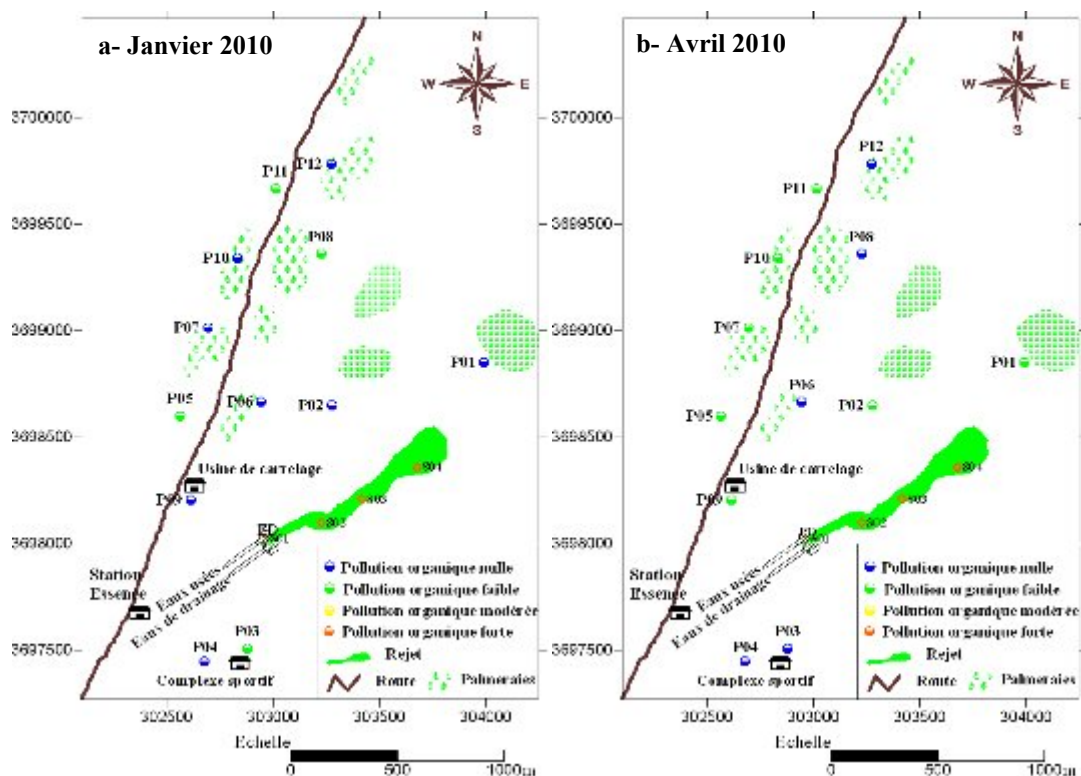


Figure 116 : Carte de l'indice de pollution organique (IPO) année 2010.

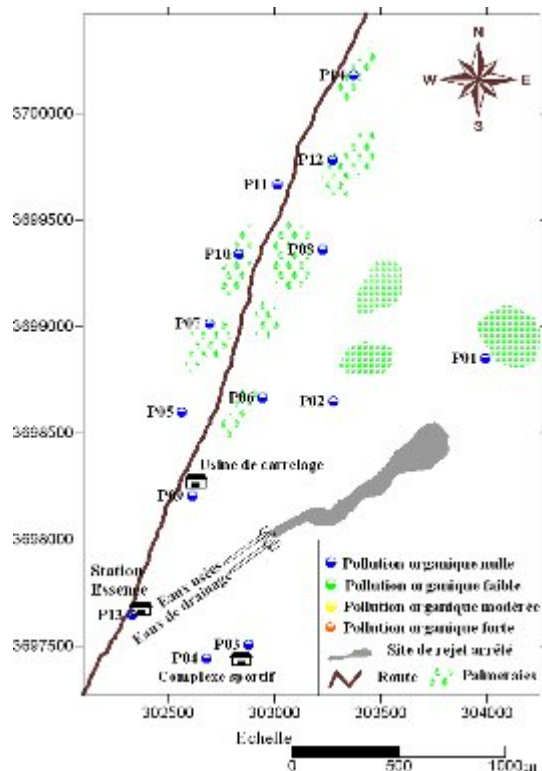


Figure 117 : Carte de l'indice de pollution organique (IPO) mai 2012

Tableau 33 : L'IPO et des indicateurs d'eutrophisation pour les années 2010 et 2012.

Echantillon	Janvier 2010		Avril 2010		Mai 2012	
	IPO	Eutrophisation	IPO	Eutrophisation	IPO	Eutrophisation
Station 01	Très forte	Très forte	Très forte	Forte	-	-
Station 02	Forte	Forte	Forte	Forte	-	-
Station 03	Forte	Forte	Forte	Forte	-	-
Station 04	Forte	Forte	Forte	Nulle	-	-
Puits 01	Faible	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 02	Nulle	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 03	Faible	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 04	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 05	Faible	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 06	Faible	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 07	Nulle	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 08	Faible	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 09	Nulle	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 10	Nulle	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 11	Faible	Nulle	Faible	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 12	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
Puits 13	-	-	-	-	Nulle	Nulle
Puits 14	-	-	-	-	Nulle	Nulle
Drainage	Forte	Nulle	Forte	Nulle	-	-

8. Interprétation des cartes de l'indice de la pollution organique

Les cartes (fig. 115 a, b et c) montrent clairement que la pollution organique est forte à très forte dans les eaux de la zone de rejet. Ce sont des eaux usées chargées en matière organique.

L'évaluation de la pollution des eaux souterraines par l'IPO montre une contamination par les eaux de rejet, ceci est noté aux puits P1, P2 et P6. Cependant, le degré de pollution reste moindre par rapport aux eaux de rejet à cause du pouvoir autoépurateur des sables et l'éloignement des points d'eau par rapport à la source de pollution, ainsi que la profondeur du toit de la nappe, l'ensemble constitue un critère significatif (Moukolo, 2001).

Les cartes (fig. 116 a et b) montrent que la pollution organique est importante dans le rejet, ce qui est logique. Cependant, elle est faible à nulle dans les eaux de la nappe, ce qui reflète le pouvoir épurateur des sables d'une part, et d'autre part, la présence des roseaux en densité importante jouant un rôle dans l'épuration biologique, parce que les concentrations élevées de contaminants ne sont pas nécessairement en corrélation avec des flux élevés et vice-versa (Schiedek et al ; 2007). Toutefois, il faut noter que le nombre de puits ayant un IPO faible est plus important qu'en 2007, ce qui explique que la capacité autoépuratrice des sables s'affaiblit et que le panache de la pollution s'est agrandi avec le temps. La carte du mois de mai 2012

(fig. 117), après l'arrêt de rejet, montre que tous les puits ont un IPO nulle, ce qui confirme l'influence de la zone de rejet sur les eaux de la nappe.

9. 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, le lac et les étangs d'eau, mais ils peuvent provoquer un déséquilibre de l'écosystème en favorisant un développement anarchique des plantes aquatiques.

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

10. Conclusion

La qualité des eaux souterraines dans la zone de l'Oued Souf est fonction de plusieurs facteurs ; physique, chimique, biologique et lithologique.

Les eaux de la région d'étude présente un caractère plus au moins acide pour la campagne d'avril 2007. Par contre, les autres campagnes ont des eaux de pH voisin de la neutralité, avec un caractère plus au moins alcalin.

La mesure de la conductivité électrique a donnée des valeurs très élevées oscillant entre 3900 et 13300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, surtout pour les eaux de drainage qui présentent les valeurs les plus élevées. Ces fortes valeurs sont dues essentiellement à la forte évaporation des eaux de la nappe phréatique, la faible vitesse d'écoulement de la nappe, ainsi que la dissolution des formations gypseuses.

La détermination du faciès chimique des eaux de la zone d'étude, a montré la prédominance du faciès sulfaté calcique et sodique pour les campagnes de janvier et avril 2010. Pour la campagne du mois de mai 2012, nous avons une variété de faciès, expliquée par l'arrêt de rejet fin 2010.

L'étude de l'origine des éléments chimiques nous a permis de mettre en évidence une origine évaporitique pour le calcium, le sodium, ainsi que les sulfates. Les chlorures présentent une origine anthropique pour les eaux usées et la dissolution de l'halite. Quand à l'évolution de la conductivité électrique avec les anions, nous avons montré une évolution proportionnelle de la conductivité avec les chlorures et les sulfates, alors que cette dernière n'évolue pas avec les bicarbonates.

Pour confirmer lesquels des éléments chimiques sont responsables de la minéralisation, on a fait recours à l'analyse en composante principale (ACP). Cette dernière a montrée que les

éléments suivants ; Ca^{2+} , Cl^- et NO_3^- , Na^+ sont responsables de la minéralisation, car ils sont fortement corrélés avec la conductivité électrique.

Les cartes de l'indice de pollution organique montrent un IPO fort à très fort au niveau des eaux de rejet. Toutefois il est faible à nul dans les eaux souterraines, ceci s'explique par le pouvoir autoépuratoire des sables. Ce pouvoir s'atténue si l'évacuation des eaux usées sans traitement se poursuit. La région connaît un phénomène de remontée des eaux de la nappe phréatique qui peut jouer un rôle important dans la pollution de la nappe par le rétrécissement de la zone non saturée.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La vallée de l'oued Souf est située dans le Sahara algérien, au Nord-Est du Grand Erg Oriental. Elle est limitée au Nord par la zone des Chotts, au Sud par l'extension de l'Erg Oriental, à l'Est par la frontière tunisienne et à l'Ouest par la vallée de l'Oued Righ. Elle s'étend sur une superficie approximative de 350 000 hectares, elle comprend 18 communes qui représentent une population totale de 486170 habitants selon le recensement de 2008, dont un quart (1/4) environ réside dans la commune d'El Oued.

L'altitude moyenne de la région est de 80 m et dénonce une diminution du Sud vers le Nord pour être de 25 m au dessous du niveau de la mer dans la zone des Chotts.

La région d'Oued Souf à une particularité spécifique sur un plan géologique. Les conditions tectoniques et paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire avec une lithologie variée dans le temps, mais régulière et homogène dans l'espace.

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 de la bordure située au Nord-Est du bassin. Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaires et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire y succède et est constitué essentiellement de sables dunaires, dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres.

Le climat de la région est comme le climat saharien se caractérise par une température élevée (la moyenne de 22.23 °C) et un faible taux de précipitations (72.04 mm), d'une évaporation importante et d'un rayonnement solaire excessif.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne 1171.94 mm, pour la période (1976 - 2008), l'évapotranspiration réelle est de 72.22 mm pour la même période. Elle de 76.14 selon la méthode de Turc. Ces résultats sont loin de la réalité, car elles sont basées sur des formules empiriques inadaptées à notre région. Le déficit annuel est de 2591.46 mm.

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 100 m.

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 Mio-Pliocène et la dernière qui surplombe les deux premières et qui correspond à la nappe phréatique.

L'étude piézométrique 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. L'interprétation des essais de pompage par paliers et à longue durée qui ont été effectués au niveau des six stations nous permet de définir les différents paramètres hydrodynamiques.

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^{2+} , SO_4^{2-}) 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, argiles, 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'AEP, elles présentent un danger pour la santé humaine.

L'étude des rapports caractéristiques montre une prédominance des chlorures par rapport au sodium, ce qui explique une origine probablement anthropique des chlorures. Le calcium tire son origine des formations évaporitiques.

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation montre que plus de 50 % des points d'eau échantillonnés sont hors classe, ce qui montre le caractère très salé des eaux de la région du Souf.

La détermination des paramètres hydrodispersifs dans la zone du rejet donne une valeur de dispersivité longitudinale α_L faible. Ce qui par conséquent, nous laisse dire que les sables de la région constituent un excellent filtre avec un pouvoir épurateur élevé, permettant de réduire la propagation d'éléments polluants vers les eaux de la nappe phréatique.

L'interprétation des cinq campagnes d'analyses des échantillons effectuées dans la zone du rejet : deux campagnes durant l'année 2007, deux campagnes durant l'année 2010 et une campagne pour l'année 2012 montre que la pollution organique est importante au niveau de la zone de rejet, mais au niveau des eaux de la nappe cette pollution est moins ressentie grâce au rôle épurateur de la couverture sableuse.

L'étude de l'origine des éléments chimiques nous a permis de mettre en évidence une origine évaporitique pour le calcium, le sodium, ainsi que les sulfates. Les chlorures présentent une autre origine anthropique plus que la dissolution de l'halite. Quand à l'évolution de la conductivité électrique avec les anions, nous avons montré une évolution proportionnelle de la conductivité avec les chlorures et les sulfates, alors que cette dernière n'évolue pas avec les bicarbonates.

Pour confirmer lesquels des éléments chimiques sont responsables de la minéralisation, nous avons fait recours à l'analyse en composante principale (ACP). Cette dernière a montrée que les éléments suivants ; Ca^{2+} , Cl^- et NO_3^- , Na^+ sont responsables de la minéralisation, car ils sont fortement corrélés avec la conductivité électrique.

RECOMMANDATIONS

- La création de nouveaux périmètres agricoles irrigués à partir de la nappe phréatique avec l'introduction des nouvelles techniques d'irrigation (goutte à goutte, aspersion et capillarité...).
- Evolution du taux de raccordement au réseau d'assainissement, l'épuration et le suivi des installations.
- Renforcer la surveillance et le contrôle de la qualité des eaux de la nappe phréatique pour les paramètres prioritaires comme les nitrates et la bactériologie.
- Développement de l'agriculture biologique par l'activation du développement de micro-organismes du sol : humus enrichi par l'apport du fumier et de compost (déchets managers transformés), ce sont des micro-organismes qui mettent les éléments nutritifs en solution. Ce type d'agriculture nouvelle va diminuer l'utilisation des engrais ammonitrates qui produisent l'azote (origine des nitrates) et les engrais phosphopotassiques.
- Informer, sensibiliser les agriculteurs sur l'utilisation des engrais et pesticides.
- Augmentation du nombre de points d'eau dans le réseau de surveillance pour le contrôle du niveau de la nappe.
- Contrôle des débits d'exploitations des forages et des puits destinés à l'AEP et l'irrigation.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Aminot & Chausse-Pied., 1983. Analyse d'eau de mer.

ANRH., 1999. Etude de la nappe phréatique dans les Ghouts agricoles de la vallée du Souf (Wilaya d'El Oued). Direction régionale d'Ouargla.

ANRH., 1999. Note sur l'inventaire de forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya d'El Oued. Direction régionale d'Ouargla.

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.

Ayers R.S & Westcot D.W., 1988. La qualité de l'eau en agriculture. *Bul. FAO d'Irrig. et de Drain.* 29 rev.1, Rome, 180 p.

Bardai. H., Soudi. B & Bellouti. A., 2004. Contribution à l'étude de la pollution nitrique des eaux souterraines en zones irriguées : cas du Tadla. *Revue H.T.E. N° 128, pp. 65-87.*

Bel et Cuche., 1969. Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal. *ERESS ; Ouargla.*

Bel F & Demargne F., 1966. Etude géologique du Continental Terminal. *Dossier de la direction de l'énergie et des carburants (Ministère de l'industrie et de l'énergie). Alger, 22 p., 24 pl.*

Besbes M & Zammouri M., 1988. Extension en Libye du modèle du CI algéro-tunisien. *Int. Conf. Comput. methods and water resources, Rabat.*

Besbes M., 2003. Cours d'hydrogéologie. Polycopiés. *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.*

Bouziane M.T & Labadi A., 2009. Les Eaux Profondes de la Région de Biskra (Algérie) *European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.25 No.4, pp.526-537.*

Busson G., 1967. Le Mésozoïque saharien, 1^{ère} partie : l'extrême sud Tunisien. *Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 8, 194 p. Ed. CNRS.*

Busson G., 1970. Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. *CNRS.*

Busson G., 1970. Le Mésozoïque saharien, 2^{ème} partie : essai de synthèse des données de forage Algéro-tunisiens. *Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol., 11, 811p. Ed. CNRS.*

BUSSON G., 1971. Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. *Thèse Paris, 464p.*

Chestakov V. M., 1975. "Hydrodynamique souterraine en pratique (en Russe)", *Nedra, 179p.*

Conrad G., 1969. L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). *Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, CNRS, Paris, 527p.*

Cornet A., 1961. Géologie de l'Oued R'Hir. *Terre et eaux, Alger, n°37, 3^e et 4^e trim. pp. 18-24, fig.*

Cornet A., 1964. Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. *Rev. Géogr phys. et géol dyn., Paris, Masson, vol. VI, fasc. 1, p5-72, 28 fig.*

Coutagne A., 1939. A la recherche d'une méthode et d'une formule pour mesurer et exprimer le pouvoir évaporant de l'atmosphère. *La Météorologie, novembre-décembre, 288-292.*

Coutagne A., 1943. L'évaporation du sol et le déficit d'écoulement considérés du point de vue hydrographique, agronomique et climatologique. *La Météorologie, juillet-décembre, 125-146.*

De Marsily G & al., 1978. Modelling of large multilayered aquifer systems, theory and applications; *J. of Hydrology, 36, p 1-33.*

De Martonne EMM., 1940. Traité de Géographie Physique. Sixième édition revue et corrigée. Tome premier. Notions générales, Climat, Hydrographie. Edition Armand Colin, 496 pages.

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 Doctorat univ. de Franche-Comté, 200p.*

Dervieux F., 1957. **La nappe phréatique du Souf ;** Etude du renouvellement de la nappe. Contribution à l'étude des phénomènes capillaires dans un milieu pulvérulent. *Terres et eaux numéro 29 (1) 12-33.*

Djidel M & al., 2008. Alteration of the aquifer water in hyperarid climate, by wastewater : cases of groundwater from Ouargla (Northern Sahara, Algeria). *American journal of environmental sciences 4 (6): 569-575.*

Dubief J., 1953. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. *Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie ; Service des Etudes Scientifiques ; Alger, Algérie. 451p.*

Dubost D., 2002. Ecologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algériennes. N° Dépôt légal : 1092-2002. Edition du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides.

El Asslouj J., Kholtei S., El Amrani-Paaza N & Hilali A., 2007. Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau, vol. 20 n° 3, p. 309-321.*

Emberger L., 1955. Une classification biogéographique des climats. *Recueil des travaux des laboratoires de botanique, géologie et zoologie de la faculté des sciences de l'université de Montpellier (Série Botanique), Fascicule 7, 3-43.*

Fabre J., 1976. Introduction à la géologie du Sahara algérien. *SNED, Alger. Algérie. 422p.*

Furon R., 1964. Le Sahara ; Géologie ; Ressources minérales. *Paris. Payot, 2^e éd., 313 p., 30 fig.*

Gausse H & Bagnouls F., 1952. L'indice xérothermique. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 222-223, 10-16.

GEOMATH., 1994. Western Jamahirya System ; Hydrogeological Modelling of aquifers & well fields ; *Final Report ; Text & pl . ref : AW-MI-579.*

GEOPETROLE., 1964. Etude analogique de la nappe du Continental Intercalaire saharien, pour l'orge. Mise en valeur sous-sol saharien. *Direction Générale des Ressources en Eau, Tunis.*

Girard. P & Hillaire Marcel. C., 1997. Determining the source of nitrate pollution in the Niger discontinuous aquifers using the natural $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios. *Journal Hydrology* 199, pp. 239-251.

Guendouz A., Moulla A. S., Remini B & Michelot J. L., 2006. Hydrochemical and isotopic behaviour of a Saharan phreatic aquifer suffering severe natural and anthropic constraints (case of Oued-Souf region, Algeria). *Hydrogeology Journal* 14: 955–968. Edition SPRINGER.

Hydro Projet Oran – Bonnard et Gardell., 2001. Rapport de la première campagne des mesures hydrogéologiques dans la nappe phréatique du souf.

Hydro Projet Oran – Bonnard et Gardell., 2001. Rapport de la deuxième campagne des mesures hydrogéologiques dans la nappe phréatique du souf.

Hydro Projet Oran – Bonnard et Gardell., 2002. Rapport de la troisième campagne des mesures hydrogéologiques dans la nappe phréatique du souf.

Hydro Projet Oran – Bonnard et Gardell., 2003. Rapport sur les essais de pompages dans la nappe phréatique du souf.

Hydro Projet Oran – Bonnard et Gardell., 2004. Mission II. Rapport final, Document inédit 111 p.

Idder T., 2007. Le problème des excédents hydriques à Ouargla : situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Sécheresse vol. 18, n° 3, 161-167.*

Kabour A., Hani A. & Chebah I., 2011. Impact des eaux usées domestiques sur l'environnement, et évaluation de l'indice de risque sur la santé publique : Cas de la ville de Béchar, SW Algérien. *European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol. 53 No.4, PP.582-589.*

Kamel S., Dassi L & Zouari K., 2006. Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie. *Hydrological sciences journal, vol. 51 n° 4, 713-730.*

Karpoff R., 1952. Observation préliminaire sur l'hydrologie du Bas Sahara, in l'hydrologie des régions arides et subarides. *C.R. du XIX° Congrès géol. Intern., Alger, sect. VIII, Fasc. VIII.*

Kherici N., Zouini D., Kherici H., 1996. Origine de la remontée des eaux de la nappe superficielle de Souf (Nord-Est du Sahara Septentrional Algérien). *Association Espanola de Hidrologia Subterranea. Hidrogeologia* 12:49-59.

Leclercq L, Vandevenne L., 1987. Impact d'un rejet d'eau chargée en sel et d'une pollution organique sur les peuplements de diatomées de la Gander (Grand-Duché de Luxembourg). *Cahiers de Biologie. Marine.*, 28(2), 311-318.

Levassor A., 1978 : Simulation et gestion des systèmes aquifères, application aux nappes du complexe terminal du Bas Sahara Algérien, *Thèse Docteur de 3ème cycle à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 et à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.*

Levassor A., 1978. Simulation et gestion des systèmes aquifères. Application aux nappes du 'Complexe Terminal' du bas Sahara, Algérie. *Thesis, Paris-VI University, Paris, France.*

Mathieu C & Pielain F., 2003. Analyse chimique des sols ; Méthodes choisies. *Edition TEC & DOC Londres – Paris – New York, ISBN : 2 – 7430 – 0620 – X, 382 p.*

Moukolo N & Gaye C.B., 2001. Problèmes de contamination des nappes phréatiques par les rejets domestiques dans les métropoles d'Afrique Noire. Cas de la nappe de Brazzaville au Congo. *Sécheresse. Vol. 12, n° 3, 175-182.*

Oeltzschner H., 2003. Quelques remarques sur le phénomène de la remontée des eaux dans le Souf. *Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du Sud.*

Oga M.S & al., 2009. Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fracture : cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research, vol. 31 n° 1, 72-87.*

Liechti P., Frutiger A & Zobrist J., 2004. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. *Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF), Berne, Rapport 43p.*

Rahaoui M., Soudi B & Ahmed F. Id., 2000. Situation actuelle de la pollution nitrique des eaux souterraines dans le périmètre irrigué des Doukkala. *Séminaire " Intensification agricole et qualité des sols et des eaux ", Rabat 2-3 Novembre.*

Remini B., 2006. La disparition des ghouts dans la région d'El Oued (Algérie). *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05, pp.49-62.*

Rodier. J., 1996. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. *8ème édition Dunod, Paris, France, 1383 p.*

Saibi H., 2003. Analyse qualitative des ressources en eau de la vallée du Souf et impact sur l'environnement, région aride à semi-aride d'El Oued. *Mémoire de magister en hydrogéologie université des sciences et de la technologie houari Boumediene 199p.*

Saibi H., Semmar A., Mesbah A & Ehara S., 2009. Variographic analysis of water table data from the Oued-Souf phreatic aquifer. Northeastern part of the Algerian Sahara. *Arabian Journal of Geosciences, 2, 83-93. Edition SPRINGER, ISSN: 1866-7538.*

Sauty J.P., 1977. Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage. *Thèse de Doctorat de l'université de Grenoble, 157p.*

Savornin J., 1931. La Géologie Algérienne et Nord-Africaine, *Paris, Masson.*

Savornin J., 1945. Le plus grand appareil hydraulique du Sahara (nappe artésienne dite de l'Albien). *Travaux Institut de Recherche Saharien., IV, 26-66.*

Schiedek T., Beier M & Ebhardt G., 2007. An Integrative Method to Quantify Contaminant Fluxes in the Groundwater of Urban Areas. *Journal Soils Sediments 7 (4) 261–269.*

Schoeller H., 1962. Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. *Editions Masson et Cie, 642 pages.*

Seltzer P. 1946. Le climat de l'Algérie. *Travaux de l'Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie. Alger.*

Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS », 2003. Gestion commune d'un bassin transfrontière principaux résultats.

Tabouche N & Achour S., 2004. Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien, *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 03, pp.99-113.*

Travi Y., 1993. Hydrologie et Hydrochimie des aquifères du Sénégal, Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines. *Mémoire N°95, institut de géologie, Université Louis.*

Turc L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle (Formule climatique simplifiée mise à jour). *Annales Agronomiques, 12 (1), 13-49.*

UNESCO., 1972. Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional, Rapport sur les résultats du Projet REG-100, *UNESCO, Paris (1972).*

Zammouri M., 1990. Contribution à une révision des modèles hydrogéologiques du sud tunisien. *Thèse doct. Fac. sc. Tunis.*

Zeddouri A., 2010. Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des nappes du complexe terminal de la région de ouargla. *Thèse de doctorat, univ. Annaba, 168p.*

Annexes

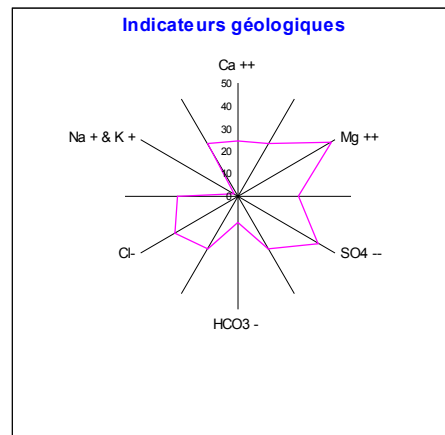
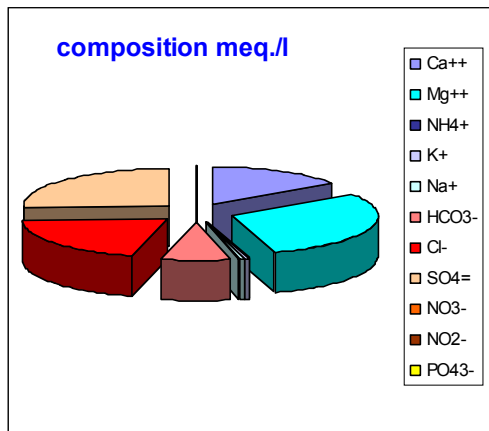
**Annexe N°02 : L'indice d'échange de base pour les deux compagnes
(Mai 1995 et Mars 1998)**

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		

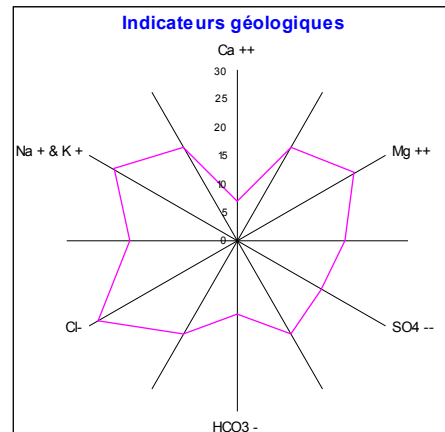
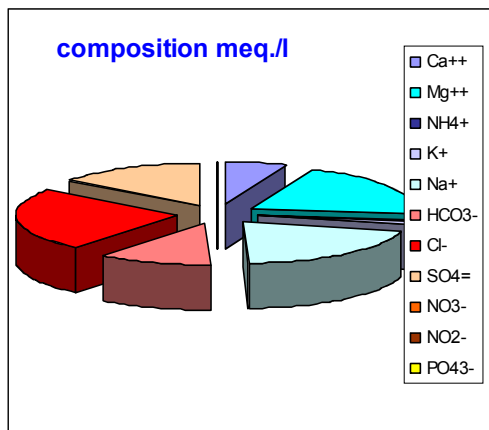
P4	-0,63453716
P5	-0,00481055
P6	0,09199794
P7	-0,1839422
P8	0,01417977
P9	0,11554152
P10	-0,3412373
P15	0,28713071
P19	0,0314051
P22	0,00746156
P30	0,21535553
P32	0,038814
P35	0,1042401
P36	-0,14988119
P37	-0,24498664
P38	0,19202413
P21	0,14437828

Les indicateurs géologiques

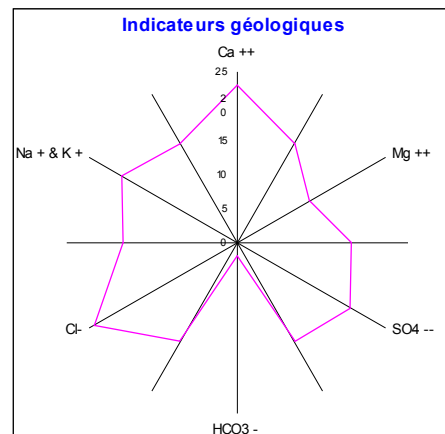
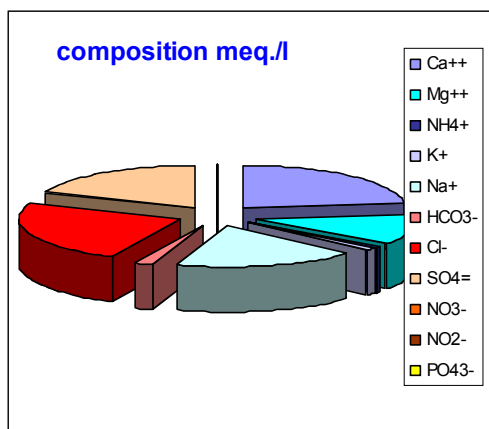
Station 02 :



Compagne 01 (03/04/2007)

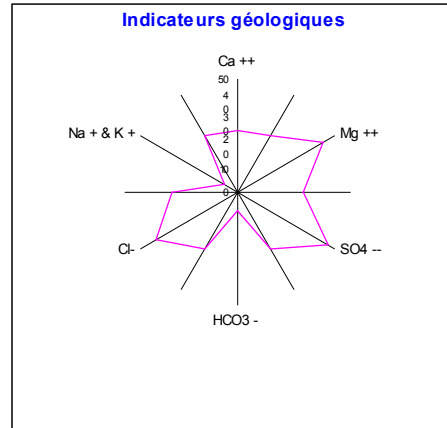
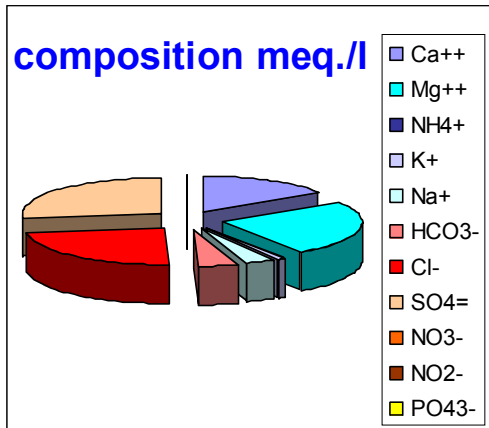


Compagne 02 (07/06/2007)

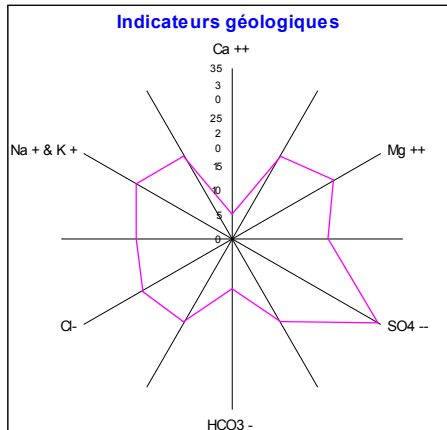
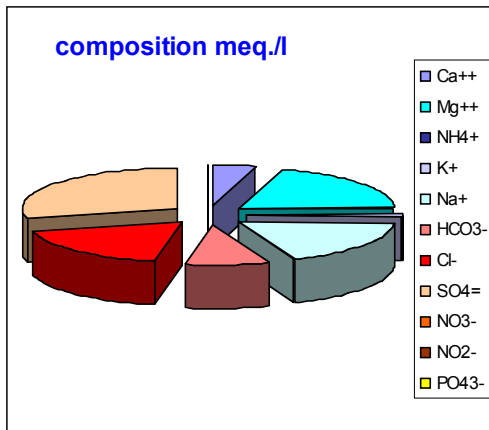


Compagne 03 (09/09/2007)

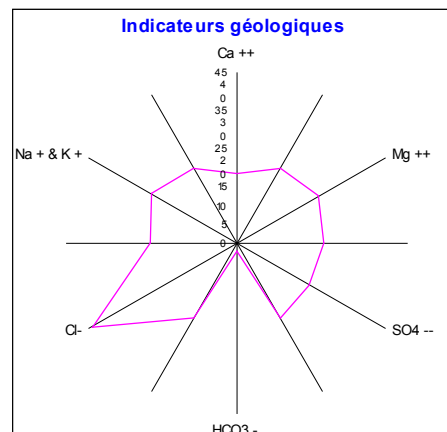
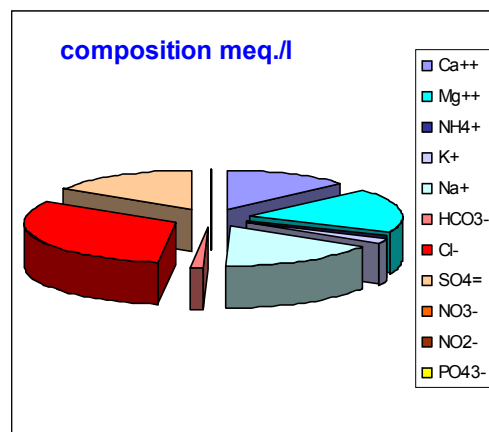
Station 03 :



Compagne 01 (03/04/2007)

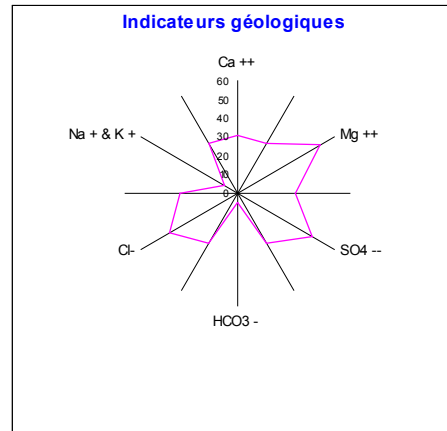
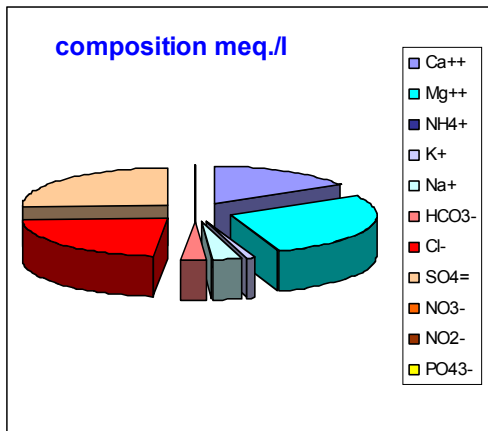


Compagne 02 (07/06/2007)

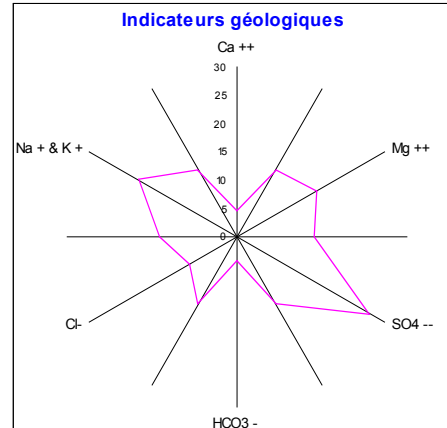
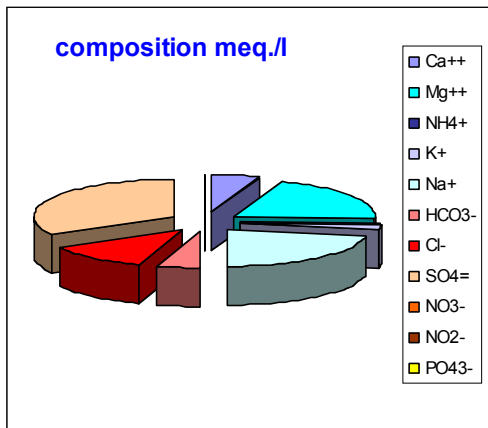


Compagne 03 (09/09/2007)

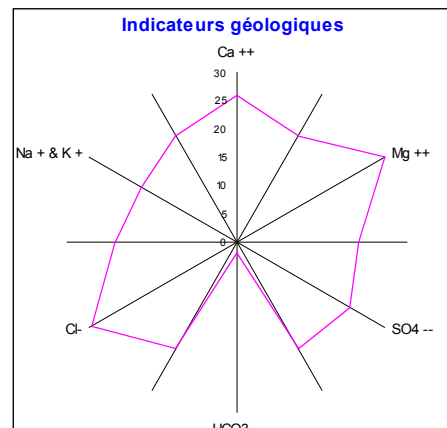
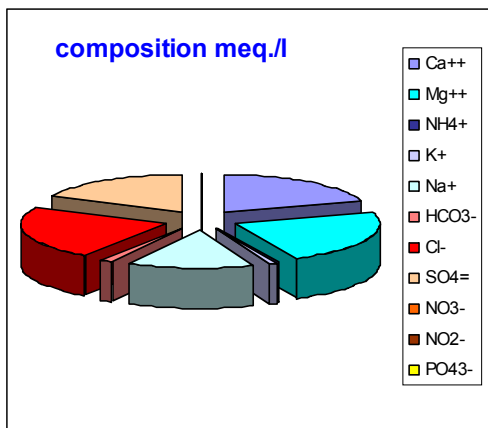
Puits 03 :



Compagne 01 (03/04/2007)

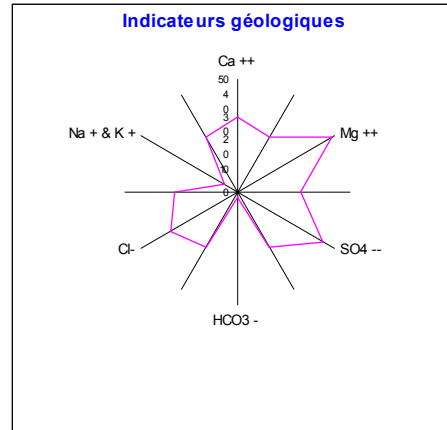
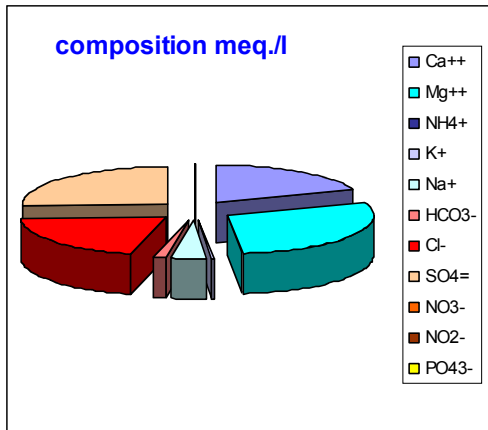


Compagne 02 (07/06/2007)

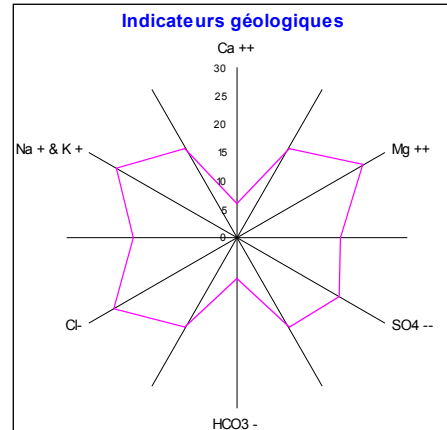
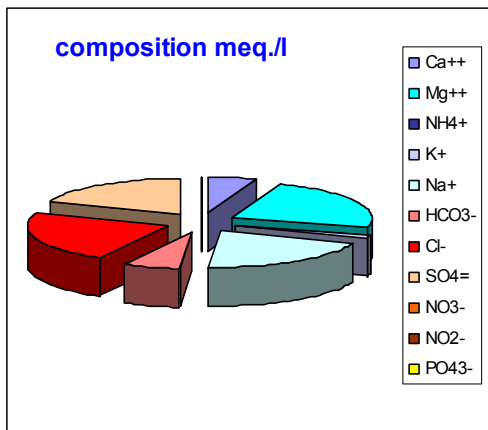


Compagne 03 (09/09/2007)

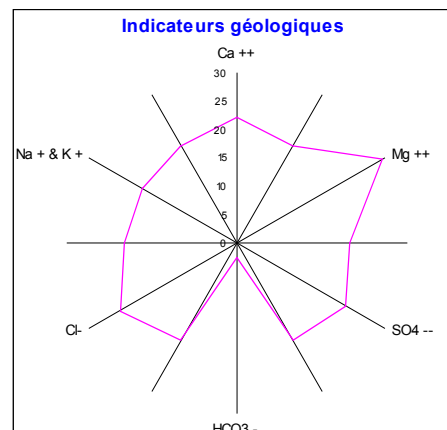
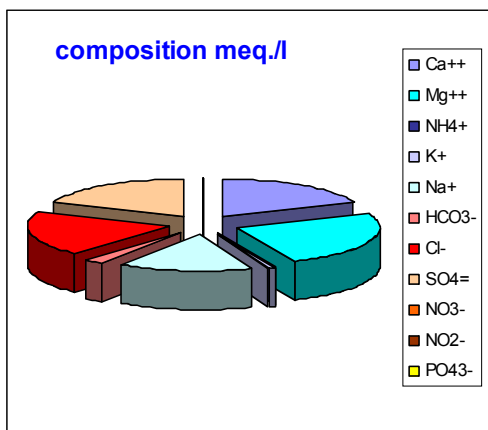
Puits 04 :



Compagne 01 (03/04/2007)

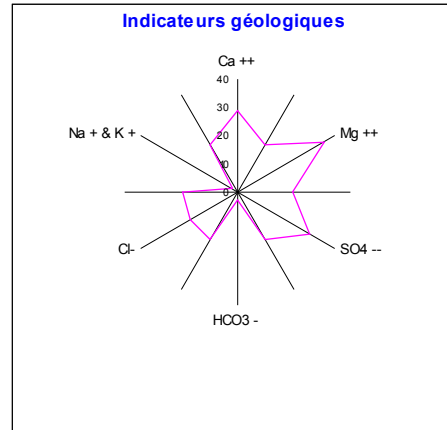
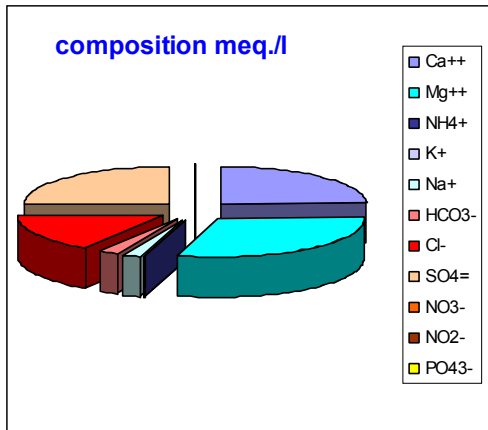


Compagne 02 (07/06/2007)

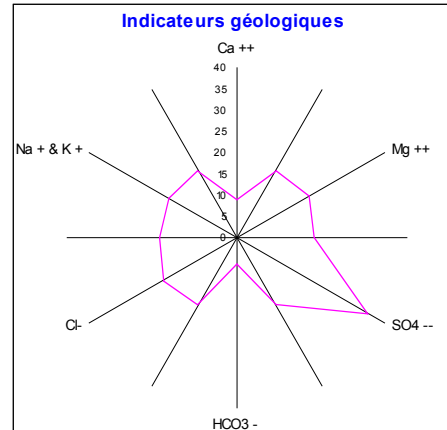
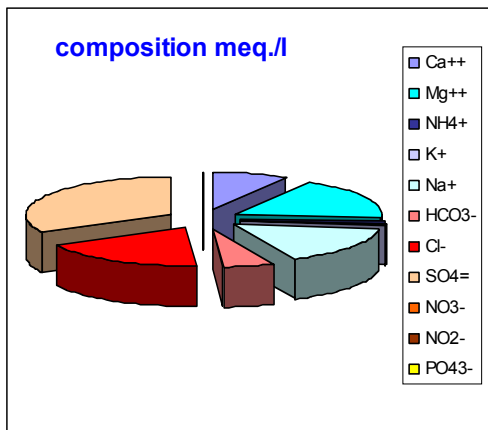


Compagne 03 (09/09/2007)

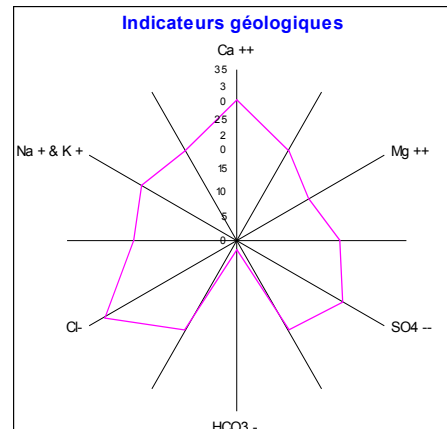
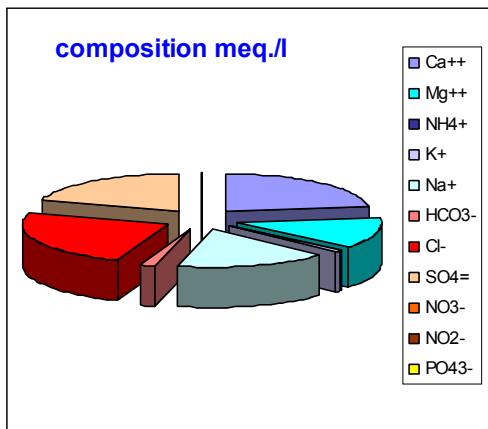
Puits 06 :



Compagne 01 (03/04/2007)

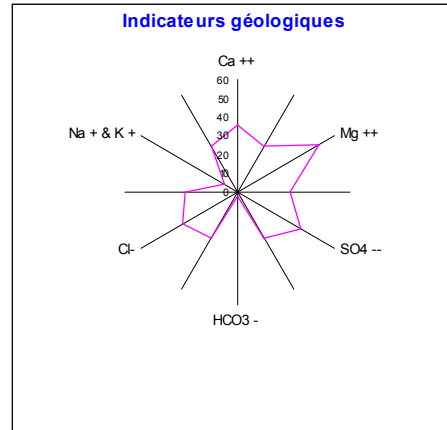
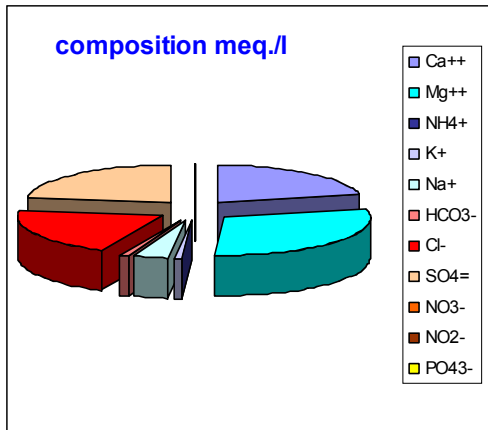


Compagne 02 (07/06/2007)

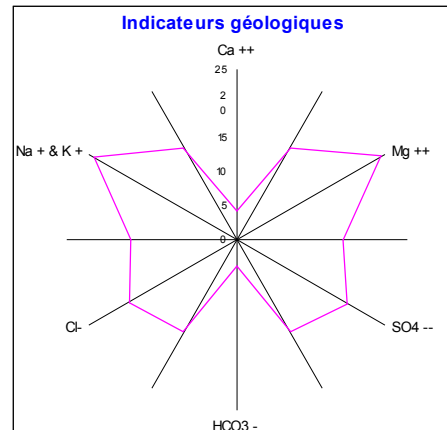
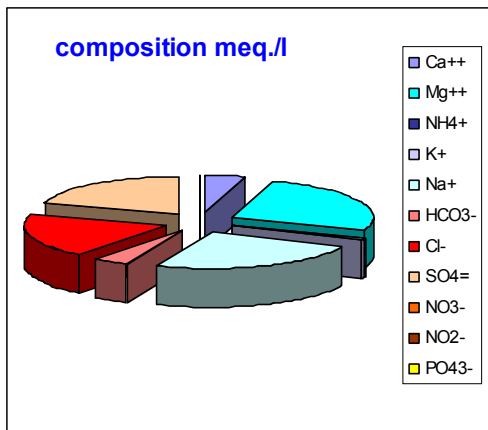


Compagne 03 (09/09/2007)

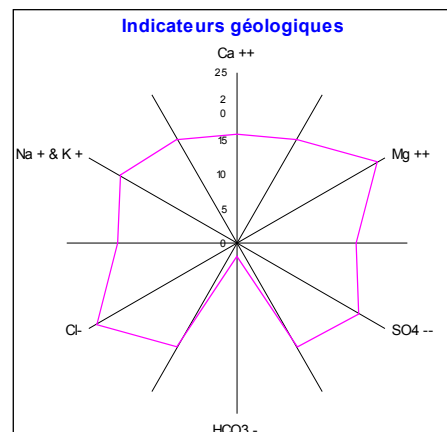
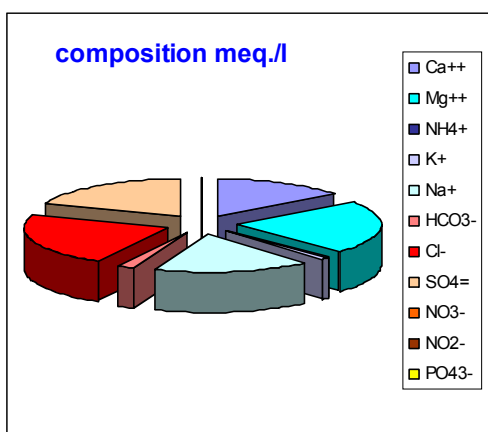
Puits 07 :



Compagne 01 (03/04/2007)

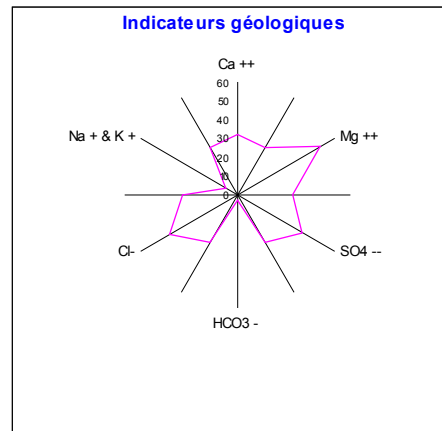
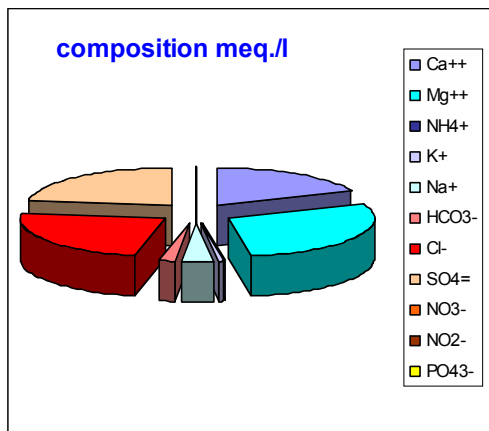


Compagne 02 (07/06/2007)

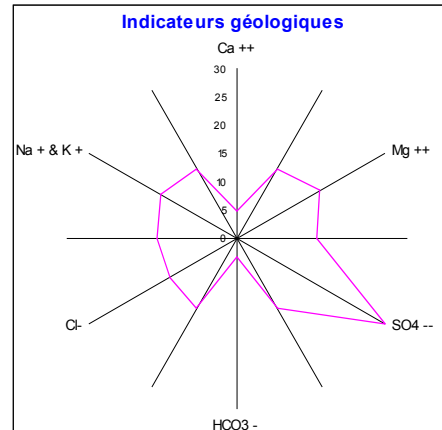
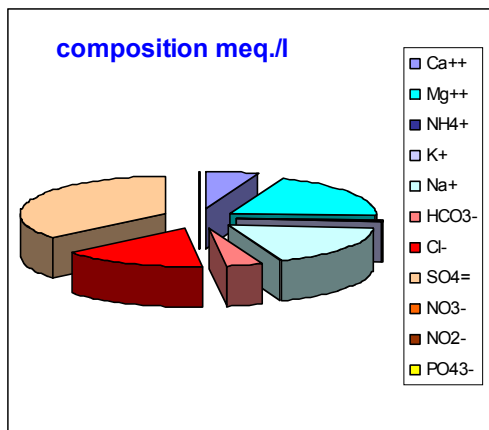


Compagne 03 (09/09/2007)

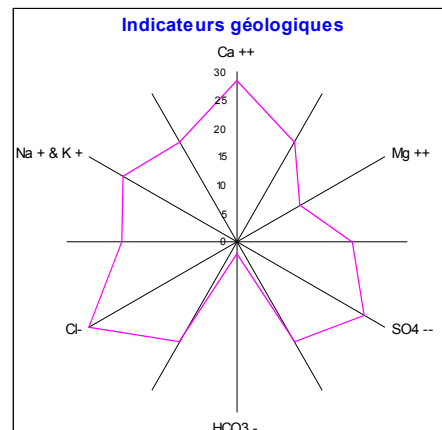
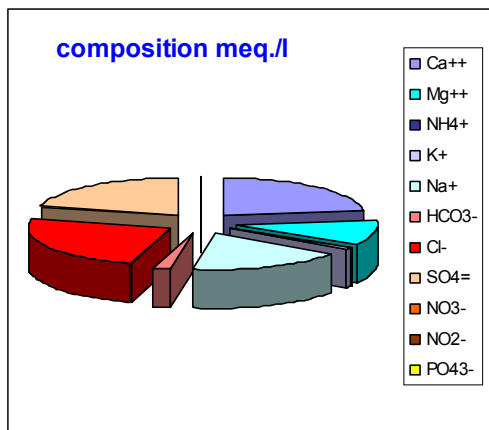
Puits 09 :



Compagne 01 (03/04/2007)



Compagne 02 (07/06/2007)



Compagne 03 (09/09/2007)