

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Constantine 1
Faculté des Sciences de la Terre, de la géographie et de l'Aménagement du Territoire
Département des Sciences Géologiques

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de
Magister en Géologie
Option Hydrogéologie

Thème:
Synthèse hydrogéologique sur la region d'El-Oued
Sahara nord oriental – Est Algérien

Présenté par: Khaled BOULIFA

Devant le jury:

BOUDOUKHA Abderrahmène: Professeur, Université de Batna, Président

MARMI Ramdane: Professeur, Université de Constantine 1

CHABOUR Nabil: Maître de Conférences, Université de Constantine 1

DEMDOUM Salim: Maître de Conférences, Université de Sétif

ملخص:

على الناحية الشمالية الشرقية للعرق الشرقي الكبير (الصحراء المنخفضة) وتحت المناخ الصحراوي (شديد الجفاف) الذي يخيم على كل الجنوب الجزائري، يقع حوض منطقة الوادي، التساقط ضعيف (74,4م/سنة). الحرارة المرتفعة (بمعدل 21,58°م) تؤثر على باقي الإعدادات المناخية. مقسمة إلى 18 بلدية و تغطي مساحة 11738 كلم².

هذه الأخيرة تتربع على أكبر احتياطي مائي في العالم. متمثلا في الخزان المائي للطبقة القارية الوسيطة (CI) والمتواجدة في مكونات العصر الطباشيري الأسفل. أول حفر لها كان في طبقة الألبان ومنها اشتق اسمها "الطبقة المائية للألبان".

يمتد على مساحة 600000 كلم²، تعلوه خزانات طبقة المركب النهائي (CT) {الطبقة المائية الأولى والثانية للميولبوسان، الخزان المائي لطبقة السينونيا-أيوسين} والتي تغطي مساحة 350000 كلم². وأخيرا الطبقة المائية الأكثر استعمالا في مجال الري والموجودة في مكونة الطمي الرملي والطيني للحقبة الرابعة. هذه الطبقة ليست صالحة للشرب ولا للري أيضا، حسب ما أفرزته التحاليل الكيميائية.

جيولوجيا منطقة البحث تتكون من مجموعات رسوبية تبدأ في العصر الطباشيري الأسفل وتنتهي في العصر الرابع.

اتجاه حركة المياه حسب القياسات البييزومترية تكون من الجنوب الغربي إلى الشمال الشرقي. تفسير تجارب الضخ، مكننا من التعرف على مختلف الإعدادات الهيدروديناميكية. صعود المستوى البييزومتري، بداية من الثمانينات، أفرز ظاهرة أصبحت شائكة وبعدها تحذيرية. إنها ظاهرة صعود مياه الطبقة المائية السطحية.

هناك ظاهرتان مختلفتان و متضادتان الواحدة بالنسبة إلى الأخرى. طبقة مائية متضررة من المياه الآتية إليها من مياه الطبقات العميقة، وطبقة مائية متضررة من المياه المأخوذة منها والتي تتعدى حجم المياه التي تغذيها. هاتين الظاهرتين أخلتا بالتوازن الطبيعي لعمليهما، مما أدى إلى ارتفاع ملوحة المياه والتربة، وأحدث عملية تآكل لقنوات المياه نتيجة الإرتفاع الحاد للسوفات والكلورير.

الحلول المقترحة، بالنسبة للجانب الهيدروديناميكي، هي إحداث محيطات فلاحية جديدة، مسقية من الطبقة المائية السطحية (لخفض المستوى البييزومتري). تقليص أو إنهاء السقي من الطبقات المائية العميقة. المتابعة المستمرة لتقلبات الطبقة المائية السطحية. بالنسبة للجانب الهيدروجيوكيميائي والبيئي، الحلول تتمثل في جعل المياه عذبة وصالحة لاستعمالات السقي والشرب (محطات معالجة للمياه) و برمجة معالجات كيميائية و بكتيريولوجية كلاسيكية.

Résumé :

Sur la partie Nord-Est du grand erg oriental (bas Sahara) et sous un climat saharien (hyper aride) qui règne sur toute la région du Sud Algérien, se situe la vallée d'El-Oued. La pluviométrie est faible (74,4 mm/an), la température élevée (moy = 21,58° C), influe sur les autres paramètres climatiques. Subdivisée en 18 communes, elle couvre une superficie de 11738 Km².

Cette dernière, repose sur les plus importantes ressources hydriques du monde : le réservoir du Continental Intercalaire, contenu dans les formations du crétacé inférieur (percé dans la couche albienne) d'où son nom : "nappe albienne". Il s'étend sur 600000 Km². Surmonté par les réservoirs du Complexe Terminal (première et deuxième nappe mio-pliocène, aquifère des calcaires sénoniens-éocènes) qui couvre une superficie de 350000 Km² et par la nappe la plus sollicitée pour les besoins d'irrigation (la nappe phréatique), contenue dans les formations alluvionnaires sableuses et argileuses du Quaternaire. Elle est impropre à l'AEP et même à l'irrigation (par endroit), d'après les résultats des analyses chimiques effectuées.

La géologie du secteur d'étude comprend des séries sédimentaires, stratigraphiquement, allant du Crétacé inférieur jusqu'au Quaternaire.

Le sens des écoulements, d'après les mesures piézométriques effectuées, est du Sud-ouest vers le Nord-est. L'interprétation des essais de pompage a permis de définir les différents paramètres hydrodynamiques. La hausse du niveau piézométrique à partir des années 1980, a provoqué un phénomène, devenu épineux et alarmant par la suite, c'est la remontée des eaux de la nappe superficielle.

On a deux phénomènes différents et inverses, l'un par rapport à l'autre. Une nappe qui souffre des venues et arrivages d'eaux à partir des nappes profondes et une nappe qui souffre des prélèvements intenses dépassants sa recharge. Ces deux phénomènes ont perturbés l'équilibre naturel de leur fonctionnement ce qui a provoqué une augmentation de la salinité, des eaux et des sols, et a entraîné une corrosion des conduits d'eau par les teneurs extrêmement élevées en sulfates et en chlorures.

Les solutions préconisées, pour le contexte hydrodynamique, sont la création de nouveaux périmètres agricoles irrigués à partir de la nappe phréatique (pour rabattre le niveau piézométrique). Diminuer ou éliminer l'irrigation à partir des nappes profondes. Suivre, en permanence, l'évolution des fluctuations de la nappe superficielle. Pour le contexte hydrogéochimique et environnement, les solutions consistent en l'adoucissement des eaux, des réseaux pour AEP et irrigation (stations d'épuration) et d'envisager des traitements chimiques et bactériologiques classiques.

Abstract :

On the North-east of the big Erg Oriental (low Sahara) and under the Saharan Climate (hyper dry type), which reigns over all the Southern Algerian, is located « El Oued valley ». low rainfall and high temperature have an impact on the other climate aspects. It covers an area of 11738 km subdivided into 18 Townes.

The latter, is based on the most important water resources in the world: the reservoir of continental infill contained in the lower cretaceous formation hence its name « Albion web » covers 600000 km². Overcome by the final complex reservoirs (first and second web mio-pliocene limestone aquifer senonian-eocene) which covers the are350000 Km² a offend finally the web is the most requested for irrigation purposes contained in the sandy and clay alluvial formation Quaternary. It is unfit for the AEP and even for irrigation (by location) after the results of chemical analyzes.

Geology within the study area consists of sedimentary series stratigraphically going from lower cretaceous to Quaternary.

After the piezometric measurements the direction of flow is from the Southwest to the Northeast. The interpretation of pumping tests allowed defining the different hydrodynamics settings. The rising groundwater level from 1980's is causing phenomena that become thorny and subsequently alarming is the upwelling of the shallow aquifer.

We have two different phenomena and inverse relative to each other. A layer that suffers from the arrival of water from the deep and a layer which suffers from intense protruding samples the ground water recharge. These two phenomena have disturbed the natural balance of their operation which caused an increase in the salinity of water and soil, and let to a corrosion of water pipes by extremely high levels of sulfates and chlorides.

The recommended solutions to the hydrodynamic context are the creation of new agricultural irrigation from groundwater. Reduce or eliminate irrigation from deep aquifers. Follow continuously the evolution of fluctuation in the shallow aquifer. For hydro geochemical context and environment, the solutions consist of softening water, irrigation and water supply networks and consider conventional chemical and bacteriological treatments.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à Dieu.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury, Messieurs : Pr. A. E. Boudoukha (Président), Pr. R. Marmi (Rapporteur), M^{res} de C^{ces}: N. Chabour et S. Demdoun (Examineurs).

Je remercie particulièrement Mademoiselle M. Djebbar.

Liste des figures

Pages

<i>Fig.1- Situation géographique de la zone d'étude</i>	4
<i>Fig.2- Situation géographique de la zone d'étude selon le découpage administratif (1994)</i>	5
<i>Fig. 3- Localisation et Superficie des daïras et communes de la zone d'étude dans la wilaya d'El-Oued. (ANRH)</i>	6
<i>Fig.4 - Découpage par espace de référence du Sahara et situation du Bas Sahara</i>	7
<i>Fig. 5 - Géomorphologie du Sahara. (Source : CDARS1998)</i>	9
<i>Fig.6 - Carte du réseau hydrographique du Sahara Algérien</i>	9
<i>Fig.7- Carte géologique régionale du Sahara</i>	16
<i>Fig. 8 - Carte géologique du SASS (OSS, 2008)</i>	18
<i>Fig. 9 - Log du forage Albien F1 (ANRH, 1993)</i>	24
<i>Fig.10 - Coupe géologique n°1 extraite à partir des Logs lithologiques de forages (ANRH,1989)</i>	25
<i>Fig. 11- Coupe géologique n° 2 extraite à partir des Logs lithologiques de forages (ANRH,1989)</i>	26
<i>Fig.12- Coupe géologique n° 3 extraite à partir des Logs lithologiques de forages (ANRH,1989)</i>	27
<i>Fig.13-Dispositif Wenner</i>	32
<i>Fig.14-Dispositif Schlumberger</i>	32
<i>Fig.15 - Carte de Situation des sondages électriques (El-Oued) Compagne(ENAGEO)</i>	34
<i>Fig.16 - Coupe géo électrique n°: 1</i>	35
<i>Fig.17 - Coupe géo électrique n° : 2</i>	36
<i>Fig.18 - Coupe géo électrique n° : 3</i>	37
<i>Fig.19 - Coupe géo électrique n° : 4</i>	37
<i>Fig.20 - Coupe géo électrique n° : 5</i>	38
<i>Fig.21 - Coupe géo électrique n° : 6</i>	38
<i>Fig.23 - Coupe géo électrique n° : 7</i>	39
<i>Fig.24 - Log du forage n° : 5. Douar El Ma</i>	43
<i>Fig.25- Log du forage n° :7. Oued El Alenda</i>	43
<i>Fig.26 : Log du forage n° : 1. El Oued F1</i>	44
<i>Fig.27 : Log du forage n° : 15. Robbah</i>	44
<i>Fig.28 - Log du forage n° : 2. Bayada II</i>	45
<i>Fig.29 - Log du forage n° : 10. El Ougla I</i>	45
<i>Fig.30 - Légende des Logs lithologiques (Log B) des différents forages</i>	46
<i>Fig. 31- Carte de situation des sous bassins versants du Sahara algérien et de leurs stations météorologique (Cahier de Sècheresse, n° :98)</i>	48
<i>Fig.32 - Carte en isohyètes moyennes des précipitations annuelle du Sahara Algérien (Cahier de Sècheresse n° : 98)</i>	50
<i>Fig.33 - Histogramme de répartition des moyennes annuelles des précipitations pour les deux stations</i>	52
<i>Fig.34 - Histogramme de répartition des moyennes mensuelles des précipitations pour les trois stations</i>	53
<i>Fig.35 - Evolution interannuelle des précipitations pour 4 décennies(Station : d'El Oued)</i>	56
<i>Fig.36 - Evolution interannuelle des précipitations pour 3,2 décennies (Station : Touggourt)</i>	56

<i>Fig.37 - Répartition saisonnière de la pluviométrie, station d'El-Oued (1967 – 2006)</i>	57
<i>Fig.38 - Répartition saisonnière de la pluviométrie, station de Touggourt (1975 – 2006)</i>	57
<i>Fig.39 - Isohyètes du SASS (OSS,2008)</i>	58
<i>Fig.40 - Températures moyennes mensuelles des trois stations : El Oued, Biskra et Touggourt.</i>	59
<i>Fig.41 - Températures moyennes annuelles (stations : El Oued, Touggourt)</i>	61
<i>Fig.42 - Diagramme pluvio-thermique: station de Biskra</i>	62
<i>Fig.43 - Diagramme pluvio-thermique: station de Touggourt</i>	62
<i>Fig.44 - Diagramme pluvio-thermique: station d'El Oued (p : ancienne)</i>	63
<i>Fig.45 - Diagramme pluvio-thermique: station d'El Oued (p : récente)</i>	63
<i>Fig.46 - Localisation du climat des trois zones (El Oued, Touggourt et Biskra)</i>	66
<i>Fig.47 - Histogramme de répartition de l'humidité moyenne mensuelle pour les memes périodes. Stations (El Oued, Touggourt et Biskra)</i>	70
<i>Fig.48 - Histogramme de répartition de l'évaporation moyenne mensuelle pour les memes périodes. Stations (El Oued, Touggourt et Biskra)</i>	71
<i>Fig.49 - Histogramme de répartition des vitesses et nombre de jours du vent (station : El Oued)</i>	72
<i>Fig.50 - Histogramme de répartition des vitesses et nombre de jours du vent (station : Touggourt)</i>	73
<i>Fig.51 - Histogramme de répartition des vitesses du vent (station : Biskra)</i>	73
<i>Fig.52 - Orientation et nombre de jours des vents (station : El Oued)</i>	74
<i>Fig.53 - Moyenne mensuelle de la durée d'insolation (El-Oued, Touggourt et Biskra)</i>	75
<i>Fig.54 - Histogramme des variations de l' ETP moyenne mensuelle (station : El Oued et Touggourt)</i>	80
<i>Fig.55 - Carte du réseau de surveillance - El-Oued. H : Puits, P : Piézomètre.</i>	90
<i>Fig. 56- Carte piézométrique de la nappe superficielle - Février 1993</i>	91
<i>Fig.57 - Carte piézométrique de la nappe superficielle - Mars 1995</i>	92
<i>Fig.58 - Carte piézométrique de la nappe superficielle - Mars 2000</i>	93
<i>Fig.59 - Carte piézométrique de la nappe superficielle - Avril 2002</i>	94
<i>Fig.59'- Localisation des profils de la nappe superficielle</i>	96
<i>Fig.60 - Profil 1 (NW - SE) de la nappe superficielle passant par les principales agglomérations</i>	97
<i>Fig.61 - Profil 2 (E - W) de la nappe superficielle passant par Magrane</i>	97
<i>Fig.62 - Profil 3 (E - W) de la nappe superficielle passant par Taghzout et H. Abdelkrim</i>	98
<i>Fig.63 - Profil 4 (E - W) de la nappe superficielle passant par la plantatuon Dhaouia et El-Oued.</i>	99
<i>Fig.64 - Profil 5 (E - W) de la nappe superficielle passant par Oued Alenda</i>	99
<i>Fig.65 - Graphe : débit-rabattement du forage D1</i>	101
<i>Fig.66 - Graphe : débit-rabattement des forages D 02 à D 11</i>	102
<i>Fig.67 - Graphe : débit-rabattement des forages : D 15 à D 24</i>	102
<i>Fig.68 - Graphe : débit-rabattement des forages: D 25 à D 32</i>	103
<i>Fig.69 - Graphe : débit-rabattement des forages : D 33 à D 42</i>	103
<i>Fig.70 - Graphe : débit-rabattement des forages : D 44 à D 51</i>	104

<i>Fig.71 - Graphe : débit-rabatement des forages : D 52 à D 58</i>	104
<i>Fig.72 - Essai de pompage longue durée à El-Oued (Méthode : Cooper-Jacob)</i>	107
<i>Fig.73 - Essai de pompage longue durée à Kouinine (Méthode : Cooper-Jacob)</i>	109
<i>Fig.74 - Essai de pompage longue durée à Ouermès (Méthode : Cooper-Jacob)</i>	111
<i>Fig.75 - Essai de pompage longue durée à Foulia (Méthode : Cooper-Jacob)</i>	113
<i>Fig.76 - Essai de pompage longue durée à Mih-Ouensa (Méthode : Cooper-Jacob)</i>	115
<i>Fig.77 - Essai de pompage longue durée à Nakhla (Méthode : Cooper-Jacob)</i>	117
<i>Fig.78 - Coupe hydrogéologique du SASS (CT et CI). OSS (2003b)</i>	120
<i>Fig.79 - Extension et limites du SASS (sans échelle)</i>	121
<i>Fig.80 - Coupe hydrogéologique schématique (N –S) du Complexe Terminal</i>	123
<i>Fig.81 - Piézométrie du Complexe Terminal (OSS, 2003)</i>	124
<i>Fig. 82 - Piézométrie du Continental Intercalaire. (OSS, 2003)</i>	128
<i>Fig.83 - Carte géologique du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement du CT et CI. ERESS modifiée par Guendouz et Al,2003</i>	130
<i>Fig. 84 - Points de prélèvement pour analyse du chlore $36(^{36}\text{Cl})$: Guendouz et Michelot</i>	131
<i>Fig.85 - Evolution des prélèvements et répartition des Forages dans le SASS. (OSS, 2008)</i>	132
<i>Fig.86 - Diagramme de l'évolution des prélèvements dans les trois pays</i>	133
<i>Fig.87 - Evolution des Rabattements (m) dans le SASS, 1960 – 2000. (OSS-2008)</i>	134
<i>Fig.88 - Corrélation entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée</i>	138
<i>Fig.89 - Faciès géochimiques des eaux par les rapports molaires $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ vs $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$</i>	140
<i>Fig.90 – Diagrammes triangulaires de Piper</i>	141
<i>Fig.91 - Diagramme global de Piper</i>	142
<i>Fig.92 - Profils hydrogéochimiques des eaux de forage de la nappe Mio-Pliocène</i>	143
<i>Fig.93 - Corrélation entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée</i>	144
<i>Fig.94 - pH vs Eh</i>	145
<i>Fig.95 - pH vs HCO_3^-</i>	146
<i>Fig.96 - Faciès géochimiques des eaux par les rapports molaires $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ vs $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$</i>	148
<i>Fig.97 - Diagrammes triangulaires de Piper</i>	149
<i>Fig.98 - Diagramme global de Piper</i>	149
<i>Fig.99 - Correlation Cl^- vs SO_4^{2-}</i>	150
<i>Fig.100 - a- Profil hydrogéochimique 1 (Échantillons d'eau 1 à 1)</i>	151
<i>Fig.101 - b- Profil hydrogéochimique 2 (Échantillons d'eau 15 à 29)</i>	152
<i>Fig.102 - Profile hydrogéochimique 3 (Échantillons d'eau 30 à 44)</i>	152
<i>Fig.103 - Profile hydrogéochimique 4 (Échantillons d'eau 45 à 53)</i>	153
<i>Fig.104 - Plan F1-F2 de l'ACP des eaux de puits de la nappe phréatique.</i>	154
<i>Fig.105 - Plan F1-F3 de l'ACP des eaux de puits de la nappe phréatique.</i>	155
<i>Fig.106 - Plan F2-F3 de l'ACP des eaux de puits de la nappe phréatique.</i>	155
<i>Fig.107 - Evolution spatiale et temporelle des substances ioniques et de la conductivité</i>	158
<i>Fig.108 - Diagramme de Riverside (Prélèvements en 1993)</i>	159
<i>Fig.109 - Diagramme de Riverside (Prélèvements en 2002)</i>	160

Liste des tableaux

<i>Tab.1 - Superficie des communes de la zone d'étude (DHW El Oued)</i>	7
<i>Tab. 2 – Les séries marines et continentales (d'après KILLIAN, 1931)</i>	13
<i>Tab.3- Coordonnées et altitudes des trois stations météorologiques</i>	49
<i>Tab.4 Répartition moyenne mensuelle et annuelle des précipitations</i>	51
<i>Tab.5- St :El-Oued</i>	54
<i>Tab.6- St :Touggourt</i>	55
<i>Tab.7- Températures moyennes mensuelles et annuelles des trois stations: El Oued, Biskra et Touggourt.</i>	58
<i>Tab.8 - Températures moyennes annuelles (stations : El Oued, Touggourt)</i>	60
<i>Tab.9 - Type de climat selon la classification par De Martonne</i>	67
<i>Tab.10 – Régime du climat selon la méthode d'Euverte (Station d'El Oued)</i>	68
<i>Tab.11 – Régime du climat selon la méthode d'Euverte (Station de Touggourt)</i>	68
<i>Tab.12 – Régime du climat selon la méthode d'Euverte (Station de Biskra)</i>	69
<i>Tab.13 – Humidité relative. Stations :(El-Oued, Touggourt et Biskra)</i>	69
<i>Tab.14 - Evaporation moyenne mensuelle (El-Oued , Touggourt et Biskra)</i>	70
<i>Tab.15 - Moyenne mensuelle des vitesses et nombre de jour du vent</i>	72
<i>Tab.16 - Moyenne mensuelle des vitesses et nombre de jour du vent</i>	72
<i>Tab.17-Moyenne mensuelle des vitesses des vents : Station de Biskra Période : 75 – 84</i>	73
<i>Tab.18 - Direction des vents au cours d'une année (El-Oued)</i>	74
<i>Tab.19 - Durée d'insolation moyenne mensuelle (El-Oued, Touggourt et Biskra)</i>	75
<i>Tab.20 – Valeurs de L et ETR. Stations (El Oued, Touggourt)</i>	77
<i>Tab.21 – Indices thermiques mensuels et ETP. Stations (El Oued, Touggourt)</i>	79
<i>Tab.22- Coefficient d'ajustement mensuel et ETP corrigée. Stations (El Oued, Touggourt)</i>	79
<i>Tab.23 – ETP annuelle et Ruissellement. Stations (El Oued, Touggourt)</i>	81
<i>Tab.24 – Bilan hydrique El Oued</i>	82
<i>Tab.25 – Bilan hydrique Touggourt</i>	83
<i>Tab.26 –Lithostratigraphie et niveaux aquifères de la région d' El Oued</i>	87
<i>Tab.27 - Coordonnées UTM des six sites d'essais</i>	101
<i>Tab.28 - Niveaux statiques, débits d'exploitation et débits spécifiques des 58 forages,El-Oued</i>	105
<i>Tab.29 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à El-Oued</i>	107
<i>Tab.30 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Kouinine</i>	109
<i>Tab.31 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Ouermès</i>	111
<i>Tab.32 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Foulia</i>	113
<i>Tab.33 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Mih Ouensa</i>	115
<i>Tab.34 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Nakhla</i>	117
<i>Tab.35 - Résultats des paramètres hydrodynamiques des essais de pompage longue durée</i>	117
<i>Tab.36 - Présentation du Bassin (SASS). OSS,2003</i>	125
<i>Tab.37 - Quantité des minéraux contenus dans 1litre d'eau de l'albien Source : La monographie d'El-Oued</i>	126
<i>Tab.38 - Débits et usage des forages du CI. Source : DHW. El-Oued</i>	127

SOMMAIRE

Introduction

CHAPITRE : I. Généralités et caractéristiques géographiques-

1- Situation.....	4
2- Caractéristiques géographiques	5
2.1- Aperçu géomorphologique.....	8
2.2- Réseau hydrographique.....	9
2.3- Climat de la région.....	10

CHAPITRE : II. Cadre géologique

1-Géologie régionale (Histoire géologique régionale).....	12
- Conclusion.....	14
2- Géologie Locale	17
2.1- Lithostratigraphie.....	18
2.1.1- Les formations du Secondaire.....	18
2.1.2- Les formations du Tertiaire.....	20
2.1.1- Les formations du Quaternaire.....	23
2.2- Interprétation des coupes géologiques.....	25
2.3- Conclusion.....	27

CHAPITRE : III. Cadre géophysique

1- Introduction	30
2- Synthèse des données de sondages	30
2.1- Les sondages électriques.....	30

2.1.1- Introduction.....	30
2.1.2- Principe.....	31
2.1.3- Dispositifs de mesure.....	32
2.1.4- Avantage de la méthode	33
2.1.5- Inconvénients de la méthode	33
2.1.6- Application	33
2.1.7- Interprétation des coupes géo électriques	35
2.2- Les Diagraphies.....	40
2.2.1- Introduction.....	40
2.2.2- Les Diagraphies de Polarisation Spontanée	41
2.2.3- Les Diagraphies électriques.....	41
2.2.4- Assemblage et reproduction des courbes.....	42

CHAPITRE : IV. Etude hydrométéorologique

1- Introduction	48
2- Analyse des différents paramètres climatiques (Bilan hydrique)	
2.1- Précipitations.....	49
2.2.1- Répartition (des précipitations) dans le temps et dans l'espace	49
2.2.1.1- Evolution dans le temps	50
2.2.1.1.1- Hauteurs des précipitations moyennes mensuelles	
2.2.1.1.2- Hauteurs des précipitations interannuelles...	52
2.2.2- Coefficient pluviométrique.....	53
2.2- Température	58
2.2.1- Températures moyennes mensuelles et annuelles des trois stations	
2.2.2- Rapports précipitation-température.....	61
2.2.2.1- Diagramme pluviothermique (Gaussen et Bagnouls)	61
2.2.2.2- Climagramme d'Eemberger.....	64
2.2.2.3- Indice d'aridité de De Martonne	66
2.2.2.4- La méthode d'Euverte.....	68
2.3- L'humidité relative de l'air.....	69

2.4- L'évaporation.....	70
2.5- Les vents.....	71
2.5.1- Types de vents.....	71
2.5.2 Vitesse des vents.....	72
2.5.3 Direction des vents	74
2.6- Durée d'insolation.....	74
3- Détermination des facteurs du bilan hydrique.....	76
3.1- L'évapotranspiration (ET)	76
3.2- L'évapotranspiration réelle (ETR)	76
3.3- L'évapotranspiration potentielle (ETP):	78
3.4- Détermination du Ruissellement (R)	80
3.5- Estimation de la Réserve Facilement Utilisable : RFU.....	81
4- Conclusion.....	84

CHAPITRE : V. Etude Hydrogéologique

1- Introduction	87
2- Etude de la nappe superficielle.....	88
2.1- Fluctuations de la Nappe	89
2.1.1- Interprétation	95
2.3- Profils de la nappe superficielle.....	95
2.4- Détermination des paramètres Hydrodynamiques.....	100
2.4 .1- Présentation des résultats de débits spécifiques.....	101
2.5- Essais de pompage longue durée et interprétation.....	106
2.5.1- Essais de pompage à El Oued.....	106
2.5.2- Essais de pompage à Kouinine.....	108
2.5.3- Essais de pompage à Ouermès.....	109
2.5.4- Essais de pompage à Foulia.....	111
2.5.5- Essais de pompage à Mih Ouensa.....	113
2.5.6- Essais de pompage à Nakhla.....	115

2.5.7- Coefficient de porosité efficace (ne)	118
2.5.8- Interprétation des paramètres de Perméabilité et de Transmissivité	
2.6- Conclusion.....	118
3- Etude du Système Aquifère du Sahara Septentrionale (SASS)	
3.1- Le complexe terminal.....	121
3.1.1- La première nappe des sables.....	122
3.1.2- La deuxième nappe des sables	122
3.1.3- L'aquifère des calcaires Sénonien-Eocène.....	122
3.1.4- Piézométrie et direction des écoulements.....	122
3.2- Le continental Intercalaire.....	124
3.2.1- Les ressources en eaux du Continental Intercalaire.....	125
3.2.2- Piézométrie et direction des écoulements.....	127
4- Remontée des eaux de la nappe superficielle	128
4.1- Origine du phénomène.....	129
4.2- Mesures prises pour limiter le phénomène	129
5- Age des eaux et vitesse moyenne d'écoulement (chlore-36)...	131
6- Les prélèvements dans le Bassin du Sahara Septentrional ..	132
7- Conclusion.....	134

CHAPITRE : VI. Hydrogéochimie et environnement

1- Introduction	137
2- Hydrogéochimie de l'aquifère Mio-Pliocène.....	137
- Balance ionique	138
- Cohérence entre la composition chimique en éléments majeurs et la conductivité électrique.....	138
2.1- Paramètres physicochimiques.....	139
2.1.1- Température.....	139
2.1.2- pH.....	139

2.2- Variables calculées.....	139
2.2.1- Pression partielle en CO ₂	139
2.2.2- Etat géochimique vis-à-vis du gypse et de la calcite.....	139
2.2.3- Minéralisation ou TDS.....	139
2.2.4- Dureté [°THf]	139
2.2.5- Conductivité électrique.....	140
2.2- Les ions majeurs.....	140
2.3- Faciès géochimiques.....	140
2.3.1- Rapports molaires SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻ et Mg ²⁺ /Na ⁺	140
2.3.2- Diagramme de Piper.....	141
2.3.3- Profils hydrogéochimiques Schöeller-Berkaloff.....	143
3- Hydrogéochimie de la nappe des sables Quaternaires.....	143
- Balance ionique	143
- Conductivité électrique mesurée et la conductivité électrique calculée	
3.1- Paramètres physicochimiques.....	144
3.1.1- Température.....	144
3.1.2- pH.....	144
3.1.3- Corrélation entre le pH et le potentiel redox	145
3.1.4- Corrélation entre le pH et l'alcalinité carbonatée.....	145
3.2- Variables calculées.....	146
3.2.1- Pression partielle en CO ₂	146
3.2.2- Etat géochimique vis-à-vis du gypse et de la calcite.....	146
3.2.3- Minéralisation ou TDS.....	146
3.2.4- Dureté [°THf]	147
3.2.5- Conductivité électrique.....	147
3.3- Les ions majeurs.....	147
3.4- Faciès géochimiques.....	147
3.4.1- Rapports molaires SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻ et Mg ²⁺ /Na ⁺	147
3.4.2- Diagramme de Piper.....	148
3.4.3- Profils hydrogéochimiques Schöeller-Berkaloff.....	151
3.5- Analyse multidimensionnelle	153
3.5.1- Plan F1-F2	154

3.5.2- Plan F1-F3	154
3.5.3- Plan F2-F3	155
4- Incidences de l'activité humaine sur l'évolution chimique des eaux de la nappe phréatique	156
4.1- Evolution spatio-temporelle de la charge minérale.....	156
4.2- Influence de l'irrigation sur la salinité des eaux	159
5- Conclusion.....	160
Conclusion générale.....	162
Bibliographie.....	165
Annexe.....	169

Abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques – Ouargla.

AEP : Alimentation en Eau Potable

AEA : Alimentation en Eau d'Agriculture.

AEI : Alimentation en Eau d'Industrie

ABHS : Agence de Bassin Hydrographique du Sahara

ADE : Algérienne Des Eaux

CI : Continental Intercalaire

CT : Complexe Terminal

CE : Conductivité Electrique mesurée en $\mu\text{S}/\text{cm}$

CEc : Conductivité Electrique calculée en $\mu\text{S}/\text{cm}$

DE : Direction de L'environnement

DEM : Direction de L'Energie et des Mines.

DHW : Direction d'Hydraulique de la Willaya

DSA : Direction des Services Agricoles.

GIRE : Gestion Intégrée de la Ressource en Eau.

ISc : Saturation vis-à-vis de la calcite

ISg : Saturation vis-à-vis du gypse

ONA : Office National d'Assainissement.

ONM : Office National Météorologique.

OSS : Office du Sahara et du Sahel

PMH : Petite et Moyen Hydraulique.

SASS : Système Aquifère du Sahara Septentrionale

SAU : Surface Agricole Utile.

SAR : taux de Sodium Adsorbé = pouvoir alcalinisant

TDS : Total de Solides Dissous [mg/L]

Introduction

Nous vivons sur la planète bleue. L'eau joue un rôle déterminant dans la vie des hommes, des animaux et des plantes. C'est un composé chimique ubiquitaire sur la terre, essentiel pour tous les organismes vivants connus.

Dans les régions arides et semi-arides, où la rareté de l'eau est prédominante, l'eau souterraine a joué un rôle essentiel pour satisfaire la demande domestique et répondre aux besoins d'irrigation. Dans la région du bas Sahara, surtout la région d'El-Oued, les eaux souterraines ont été massivement exploitées pour des fins d'irrigation.

La qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation se pose avec acuité dans l'ensemble des régions sahariennes. D'une manière générale, les eaux de la région étudiée proviennent des eaux souterraines.

Du point de vue quantité, l'eau au Sahara est généralement disponible et ce, grâce à d'importants aquifères, mais sa qualité physico-chimique (salinité, dureté) est le plus souvent médiocre. Cette salinité des eaux, dont une partie est d'origine géologique (salinisation primaire). L'accroissement continu de ce phénomène, par une mauvaise gestion de la ressource en eau, notamment souterraine, provoque une (Salinisation secondaire).

Cependant, plusieurs régions surtout celles situées au Sahara septentrional (région d'El-Oued) sont confrontées aujourd'hui à des problèmes de remontée des eaux provenant des nappes phréatiques, qui sont nuisibles pour les cultures et les habitations.

Cette remontée des eaux est l'une des causes de l'accroissement de l'excès de salinité dans les sols agricoles. Cette forte teneur en sels a engendré très souvent, la chute des rendements des cultures et parfois la stérilisation des sols par la destruction de la structure.

Pour répondre à la demande alimentaire croissante et à l'évolution des habitudes alimentaires au cours des trente prochaines années, les experts estiment que la superficie irriguée effective devra augmenter de 34% dans les pays en développement, et que 14%

d'eau supplémentaire devront être prélevés pour les besoins agricoles. Il faut également garder en mémoire que l'agriculture irriguée fournit quelque 40% des disponibilités alimentaires mondiales sur 20% des terres cultivées

Notre étude va porter dans les premiers chapitres, sur les caractéristiques géographiques, géologiques, géophysiques et hydro climatiques. Dans les derniers chapitres sur l'étude quantitative et qualitative des ressources hydriques.

CHAPITRE 1

Généralités et caractéristiques géographiques

CHAPITRE : I. Généralités et caractéristiques géographiques

1- Situation

La région d'El-Oued est située au Nord-est du Sahara algérien (Bas-Sahara), aux confins septentrionaux du Grand Erg Oriental, entre les parallèles : (33° et 34°) Nord, et (6° et 8°) Est. Cette immense étendue sablonneuse se trouve, d'une part, à mi-chemin entre la mer méditerranéenne au Nord et la limite méridionale du Grand-Erg Oriental au Sud, et d'autre part, à égales distances entre le golfe de Gabès à l'Est et l'Atlas Saharien à l'Ouest. La zone est délimitée par :

La frontière Algéro-Tunisienne (chotts El-Djerid : région de Tozeur) à l'Est

Les chott Melghir et Merouane au Nord (région de Biskra)

L'Oued-Righ (région de Touggourt) à l'Ouest

L'extension de l'Erg Oriental au Sud. (Fig.1)



Fig.1- Situation géographique de la zone d'étude,

El-Oued forme un massif dunaire qui se trouve à environ 700 Km au Sud – Est d'Alger et 350 Km à l'Ouest de Gabes (Tunisie) avec une largeur d'environ 160 km

L'altitude moyenne d'El-Oued est de 80 m, alors que celle des Chotts, situés au Nord, elle descend jusqu'à moins 40 m (surface topographique) au dessous du niveau de la mer. Il couvre une superficie de 80.000 km².

Après le découpage administratif de 1984, la wilaya d'El-Oued est délimitée par :

- Les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa, au Nord
- La frontière Algéro-Tunisienne à l’Est
- Les wilayas de Biskra, Djelfa et Ouargla, à l’Ouest
- La wilaya de Ouargla au Sud. (Fig.2)

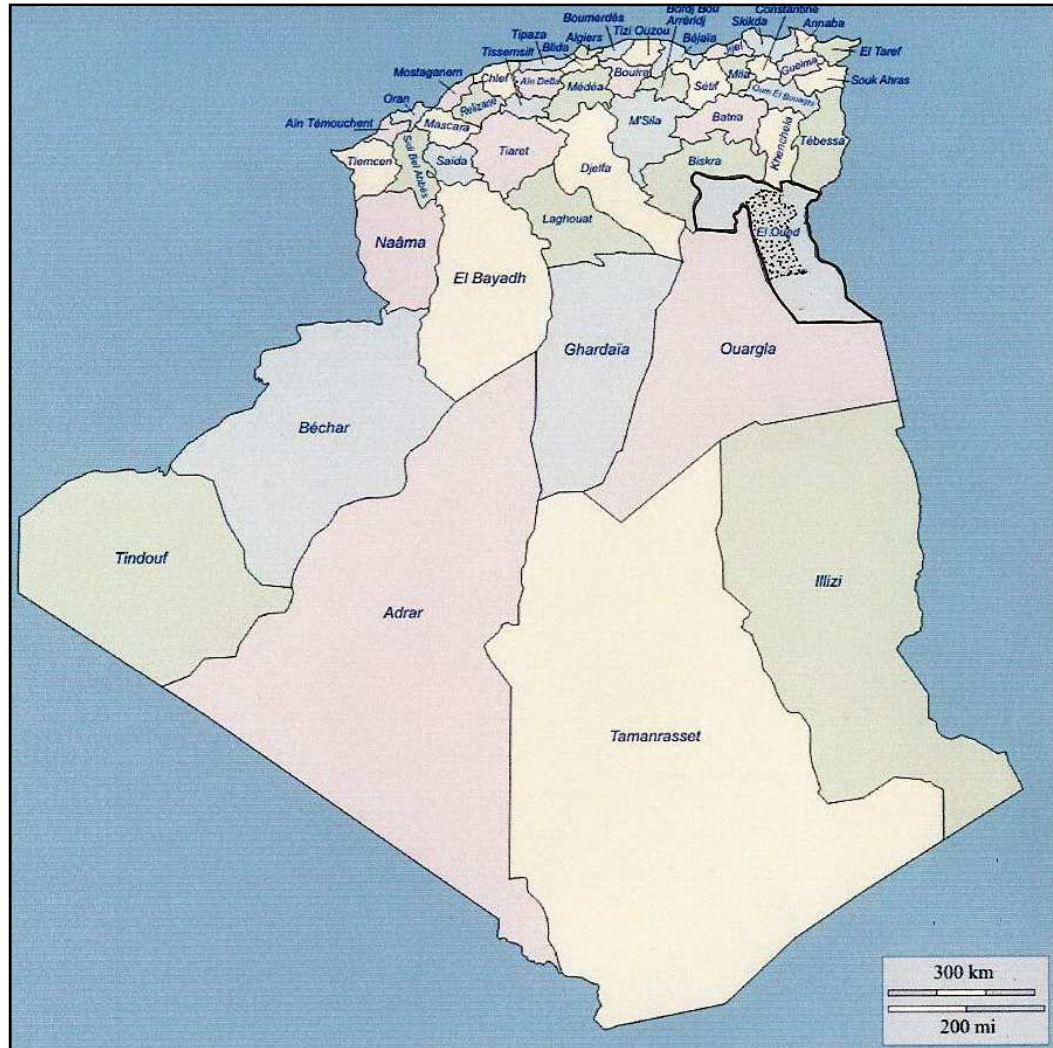


Fig.2- Situation géographique de la zone d'étude selon le découpage administratif

2- Caractéristiques géographiques

Les coordonnées Lambert d’El Oued sont les suivantes :

$$X = 275\ 200 / 322\ 000 \quad , \quad Y = 3\ 665\ 000 / 3743\ 000$$

Dans la partie nord d’El-Oued, le Grand Erg Oriental s’abaisse et perd de massivité avec la disparition des dunes qui cèdent la place à des plateaux couverts d’une maigre végétation qui se prolongent jusqu’aux chotts arides et dénudés. (Fig.4)

Cette dernière portion du désert, pauvrement broussailleuse, devient un excellent pâturage après de bonnes pluies.

Le relief est très simple, dans sa disposition générale il est caractérisé par les massifs dunaires où prédominent les formes douces. Celles-ci, dont certaines atteignent par endroit 100 m de hauteur, forment des collines de sable en forme de cratères où subsistent, selon la direction des vents dominants, des couloirs propices à la circulation.

La couverture végétale est l'œuvre artificielle de ses habitants. Les palmeraies sont enfouies dans d'énormes entonnoirs (ghouts), au fond desquels s'épanouissent les palmiers-dattiers dont les racines s'alimentent directement de la nappe superficielle ; l'irrigation est inutile (avant la remontée des eaux).

Les 18 communes de la zone d'étude couvrent une superficie de 11738 km². (Fig.3) D'après le recensement de 1998, le nombre d'habitants est de 363110 dont : 185484 masculins et 177626 féminins (ANRH Ouargla) - (Tab.1)

La situation (d'après le dernier découpage administratif) des communes et daïras de la zone d'étude est illustrée selon les cartes de la (Fig.3)

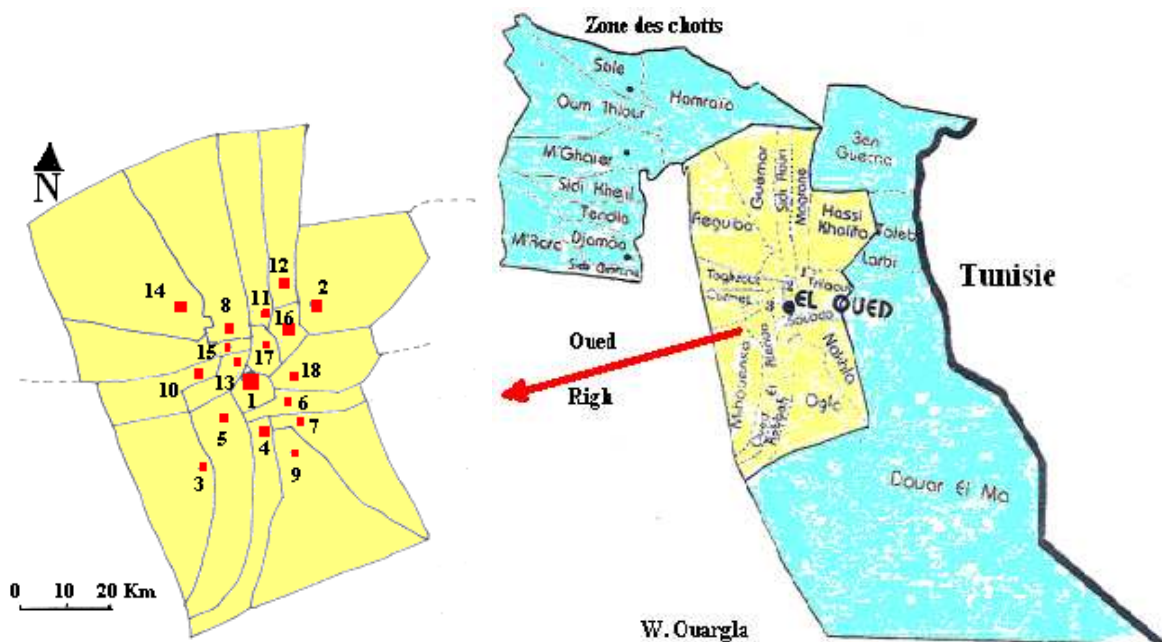


Fig. 3- Localisation et Superficie des daïras et communes de la zone d'étude dans la wilaya d'El-Oued. (ANRH)

01 El Oued 77 km ²	10 Ouermes 443 km ²
02 Hassi Khalifa 1112 km ²	11 Sidi Aounn 480 km ²
03 Mih Ouansa 1111 km ²	12 Magrane 618 km ²
04 Robbah 499 km ² km ²	13 Kouinine 116 km ²
05 Oued Allenda 712 km ²	14 Reguiba 1966 km ² km ²
06 Bayadha 139 km ²	15 Taghzout 539 km ²
07 Nakhla 700 km ²	16 Debila 78 km ²
08 Guemar 1264 km ²	17 Hassani Abdelkerim 58 km ²
09 El-Ogla 1352 km ²	18 Trifaoui 474 km ²

Superficie Total : 11738 km²

Tab.1 - Superficie des communes de la zone d'étude (DHW El Oued)

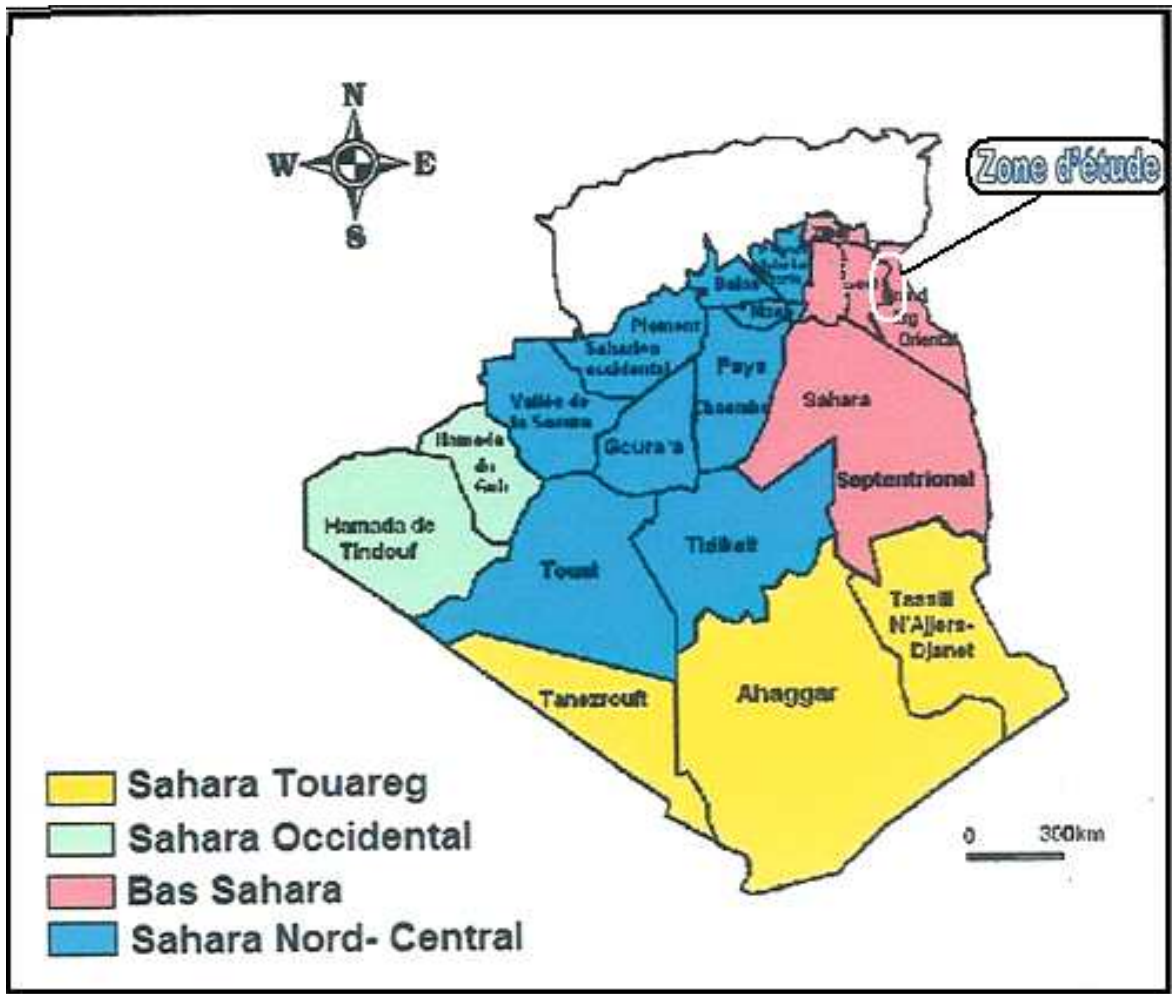


Fig.4 - Découpage par espace de référence du Sahara et situation du Bas Sahara

2.1- Aperçu géomorphologique

Situé au nord-ouest de l'Afrique, l'Algérie est subdivisée en deux grandes zones très différentes, sur le plan géographique, morphologique, géologique, hydrogéologique, climatique..Etc. : Le Nord et le Sud Algérien. Ces deux domaines sont séparés par l'accident sud atlasique (Atlas saharien ou la flexure sud-atlasique), sensiblement orienté « WSW – ENE ». L'atlas saharien est constitué par les monts d'Ouled-neil, des Aurès et des Nemamchas).

Le Nord algérien, plus peuplé, ouvert sur la Méditerranée (en sa partie nord), appartient à la marge nord du continent africain. Il appartient au vaste système alpin, qui d'Est (Gibraltar) en Ouest (Himalaya) n'a pas encore terminé son évolution. C'est une zone instable, bouleversée, à relief confus, et jeune.

L'autre partie commence au pied de l'Atlas saharien et s'étend vers le Sud : c'est le Sahara (Désert), dur, monotone, stable où le jaune, l'ocre et le noir des sables ou de la patine désertique ne sont souvent qu'un léger voile sous lequel on peut lire des structures tectoniques, sédimentaires et magmatiques.

Le Sahara algérien comprend des ensembles géologiques différents. Morphologiquement, il est constitué de sols très variés tel que :

Les Regs : généralement des zones plates, peu élevées, sableuses et caillouteuses qui ont été débarrassées des éléments fins par le vent.

Les Hamadas : plateaux peu élevés, la partie supérieure ressemble à une surface structurale (Hamada Sud-atlasique : calcaire). Entre les Regs et Hamadas, nous avons :

Les Ergs : désert de dunes, plus précisément des champs de dunes fixes dont seul le sable superficiel est remodelé sans cesse par le vent. Ils occupent environ 20% de la surface du Sahara. Certains ont commencé à se former au cours du pléistocène.

Le Sif : constitue la partie sommitale des dunes. Il sépare la partie en pente douce (pente "au vent") de la partie en pente raide (pente "sous le vent").

Les plateaux : Surfaces structurales surélevées, occupées soit par des Ergs ou par des Hamadas (plateau de Tademaïte).

Oued : signifie rivière en arabe, désigne les cours d'eau d'Afrique du Nord et des régions désertiques et semi-désertiques.

Chott : (de l'arabe chatt) : est une étendue d'eau salée permanente, aux rivages changeants, située dans les régions arides et semi-arides. (Fig.5)

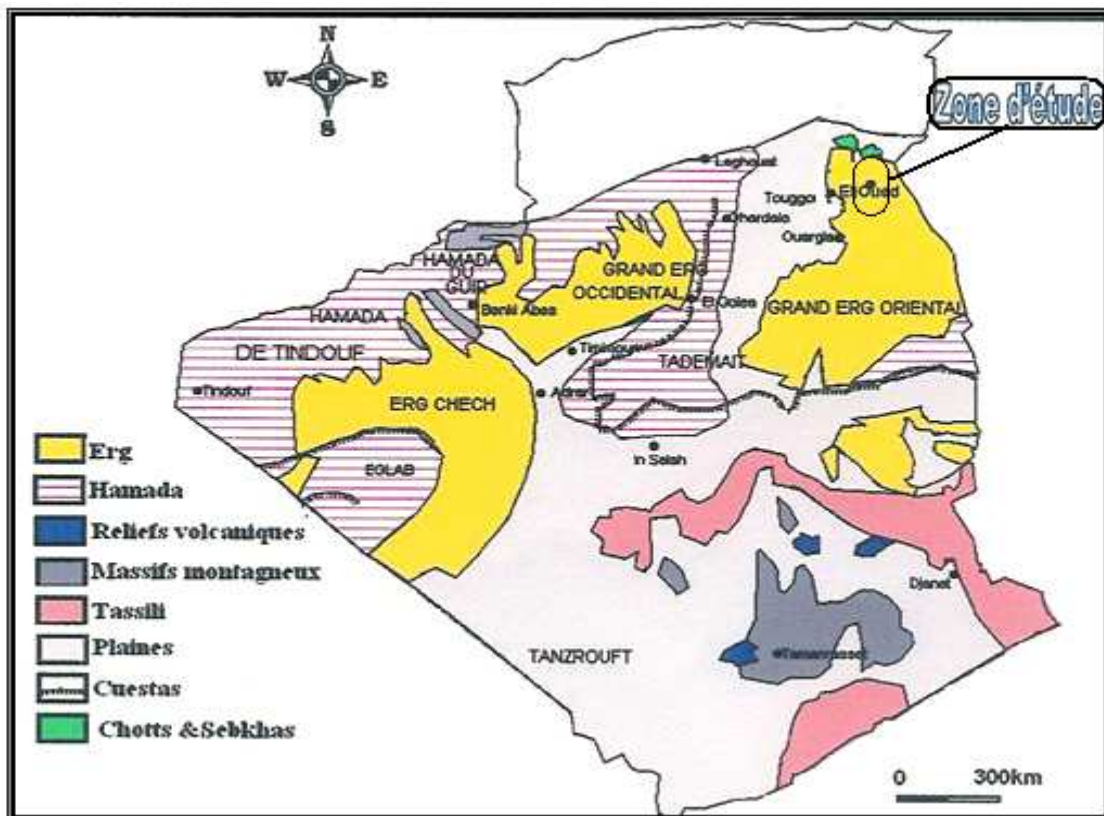


Fig. 5 - Géomorphologie du Sahara. (Source : CDARS1998)

2.2- Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est très faible et ne peut être représenté qu'à l'échelle de tout le Sahara. Le sens d'écoulement de tous les oueds convergent vers les zones les plus basses (zone des chotts). Ces oueds ont un caractère temporaire et épisodique. (Fig.6)

Les directions des écoulements endoréiques des oueds sont illustrées sur la carte. (Fig.6)

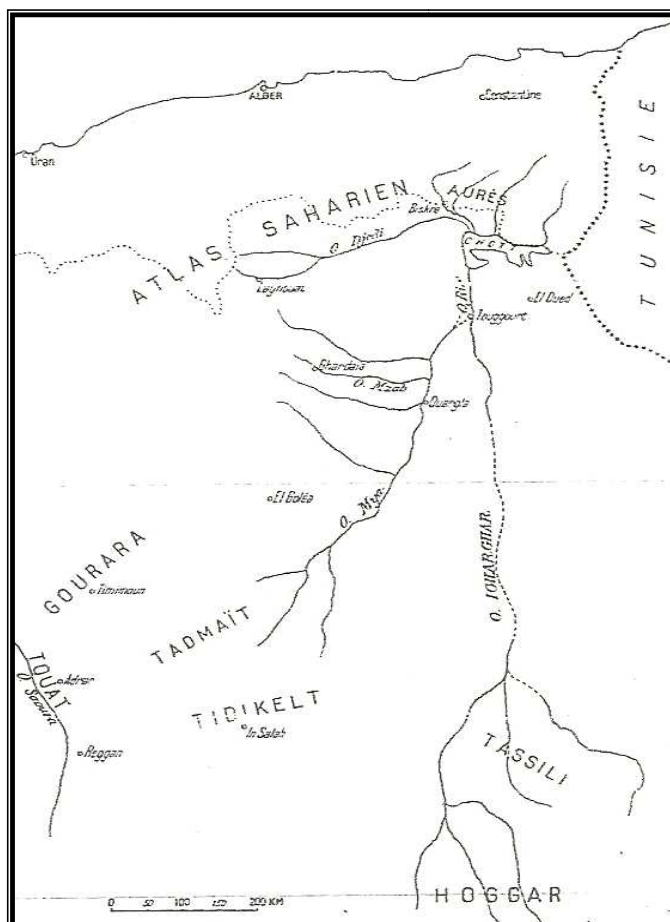


Fig.6 - Carte du réseau hydrographique du Sahara Algérien

2.3- Climat de la région

Le climat est caractérisé par une aridité extrême (climat hyper aride). L'hyper aridité et la chaleur sont ses caractères essentiels.

Les vents, par l'évaporation qu'ils provoquent, contribuent à la hausse de son aridité. Leurs régularités sont souvent contrariées. L'agitation de l'air est souvent provoquée, localement, par les contrastes de températures.

Les mois d'été sont très chauds, et les températures atteignent 49° à l'ombre et plus de 50° les jours de sirocco (Chihili). La couche superficielle du sable frôle les 60°, mais la température chute à la nuit tombante d'une vingtaine de degrés.

Une moyenne de 250mm de pluie tombe sur l'Atlas saharien, chute à 100 et même à 50 mm plus bas, 20 mm à Timimoun et 14 mm à Adrar et Ain-Salah.

Notons que le grand Erg est aride et constitue un vrai désert. Sur le Hoggar (3000m), la pluie atteint 50 à 60 mm.

Au Nord du Sahara, le climat est de type méditerranéen avec des pluies pendant l'hiver et le printemps.

Les températures sont très élevées, très contrastées (l'écart entre le jour et la nuit), ainsi que l'écart entre le minima et le maxima, peut atteindre 50°C.

CHAPITRE III

Cadre géologique

- Géologie régionale
- Géologie Locale

CHAPITRE : II. Cadre géologique

1-Géologie régionale (Histoire géologique régionale)

Le Sahara a subi au cours des temps géologiques plusieurs périodes de stabilité et d'instabilité qui ont conduit à la structure actuelle.

Les principaux traits de la structure géologique et la reconstitution paléogéographique du Sahara sont : (d'après A.CORNET, 1964 et FABRE, 1974).

- 1- Le socle précambrien
- 2- Les Tassilis
- 3- Les mers primaires et les plissements hercyniens
- 4- Le continental intercalaire

Ce régime continental dure jusqu'au milieu de la période crétacé : soit entre 175 et 100 million d'années.

Le développement des grès a été particulièrement abondant de l'Hauterivien à l'Albien et à ce dernier étage surtout.

L'importance provient de la perméabilité et de l'extension de ses grès qui renferment actuellement la plus grande ressource aquifère du Sahara, constituant l'un des plus importants bassins artésiens du monde.

- 5- La dernière invasion marine (Transgression Cénomaniennne)
- 6- La phase continentale tertiaire et actuelle

Killian en 1931 a proposé une nomenclature aux grandes formations continentales, résumée dans le tableau suivant : (Tab.2).

AGE	SERIES CONTINENTALES	SERIES MARINES	FACIES CONTINENTAL LOCALE DES SERIES MARINE
Tertiaire post - lutétien	Continental Terminal		
Cénomanién et Lutétien		Série Hamadienne	Continental Hamadien
Moscovien - Albien	Continental Intercalaire		
Dévonien moyen – Namurien		Série post - Tassilienne	Continental post - Tassilien
Cambrien-Dévonien inférieur		Série Tassilienne	Continental Tassilien
Cambrien inférieur	Continental de base		
Socle antécambrien			

Tab. 2 – Les séries marines et continentales (d’après KILLIAN, 1931)

Commentaire du tableau : (d’après KILLIAN, 1931)

Séries marines :

Autour du Hoggar, la première sédimentation marine qui se manifeste au dessus du socle cristallin est la série Tassilienne qui va du Cambrien au Dévonien inférieur.

Les dépôts marins qui suivent immédiatement et qui vont du Dévonien moyen au Namurien se distinguent des premiers parce que moins détritiques et de faciès plus profonds (calcaires et schistes plutôt que grés). Ils sont groupés sous le terme de série Post-Tassilienne.

Au dessus et après une longue interruption vient la troisième et dernière série marine (Cénomanién-Lutétien) que KILLIAN, 1931 appelle série Hamadienne parce qu’elle constitue les grands Hamadas du Tademait à la Hamada el Hamra.

Séries continentales

Entre le socle précambrien et la série Tassilienne , KILLIAN,1931 avait distingué une formation continentale due à l’exondation du socle ancien précédant la transgression

Tassilienne. Il avait appelé continentale de base cette série reconnue dans les poudingues et les grès à stratification entrecroisée du Tassili interne.

L'existence de ce continental de base ne paraît pas évidente, elle est même contredite en beaucoup de points par la découverte des calcaires à stromatolithes reposant directement sur le socle entre les dépôts des mers primaires et la série marine Hamadienne se place un complexe continental important : Le Continental Intercalaire .

Enfin, au dessus de la série Hamadienne vient le continental terminal comprenant les argiles et les sables rouges des Hamadas sud-atlasiques et tout les atterrissements tertiaires ou quaternaires qui se sont formées et se forment encore de nos jours.

- Conclusion

Comme on l'a précisé au début, la flexure sud Atlasique constitue un passage entre deux domaines très différents, surtout sur le plan structural.

La partie sud constitue un vaste continent, bouclier rigide, stable dont le socle est formé de roches sédimentaires et éruptives, plissées et métamorphisées constituant l'ossature de toute l'Afrique, une transgression marque le début de l'ère primaire. Soumises à l'érosion de vastes surfaces ont été rabotées.

La disposition auréolée, de ces énormes amas gréseux à stratification de grès des tassilis internes. La deuxième falaise qui entoure l'ensemble du massif « HOGGAR-TASSILI » est dite Tassili externe entre les deux falaises se situe la dépression intra Tassilienne constituée de sédiments gréseux et schisteux tendres.

Après le retrait des mers primaires et les mouvements hercyniens le bouclier africain à suivi une grande période continentale qui a contribué à niveler le bouclier, le recouvrant d'un épais manteau de grès tendre, sables et argiles qui, par la suite, donneront lieu au plus grand réservoir hydraulique du Sahara : le Continental Intercalaire:

Après la transgression Cénomaniennne (la dernière invasion marine au Sahara), une couverture crétacé s'est déposée pour constituer le toit de la nappe du Continental Intercalaire.

Elle est constituée d'argiles, de gypse, calcaire et calcaire dolomitique.

Au début du Tertiaire (à l'Eocène Inferieur), la mer se retire, marquant un nouvel épisode continental.

L'Atlas Saharien commence sa surrection, les produits de démantèlement des reliefs, que l'érosion à étalée sur la plate forme saharienne vont constituer le « Continental Terminal ». Ce dernier est formé de sables, graviers, grès et d'argiles rouges qui constituent les dépôts acquières du bas Sahara et le substratum du grand Erg oriental. (Fig.7) et(Fig.8)

Les poussées et les mouvements venants du nord contre le socle et sa couverture sédimentaire, ont provoqués des plis à grand rayons de courbure (DORSALE DU M'ZAB, Syclinal de TADMAIT et effondrement du Sahara centrale). Cette évolution mécanique n'est pas immédiate et se poursuit encore à notre époque actuelle : cycle Alpin. (Fig.7) et (Fig.8)

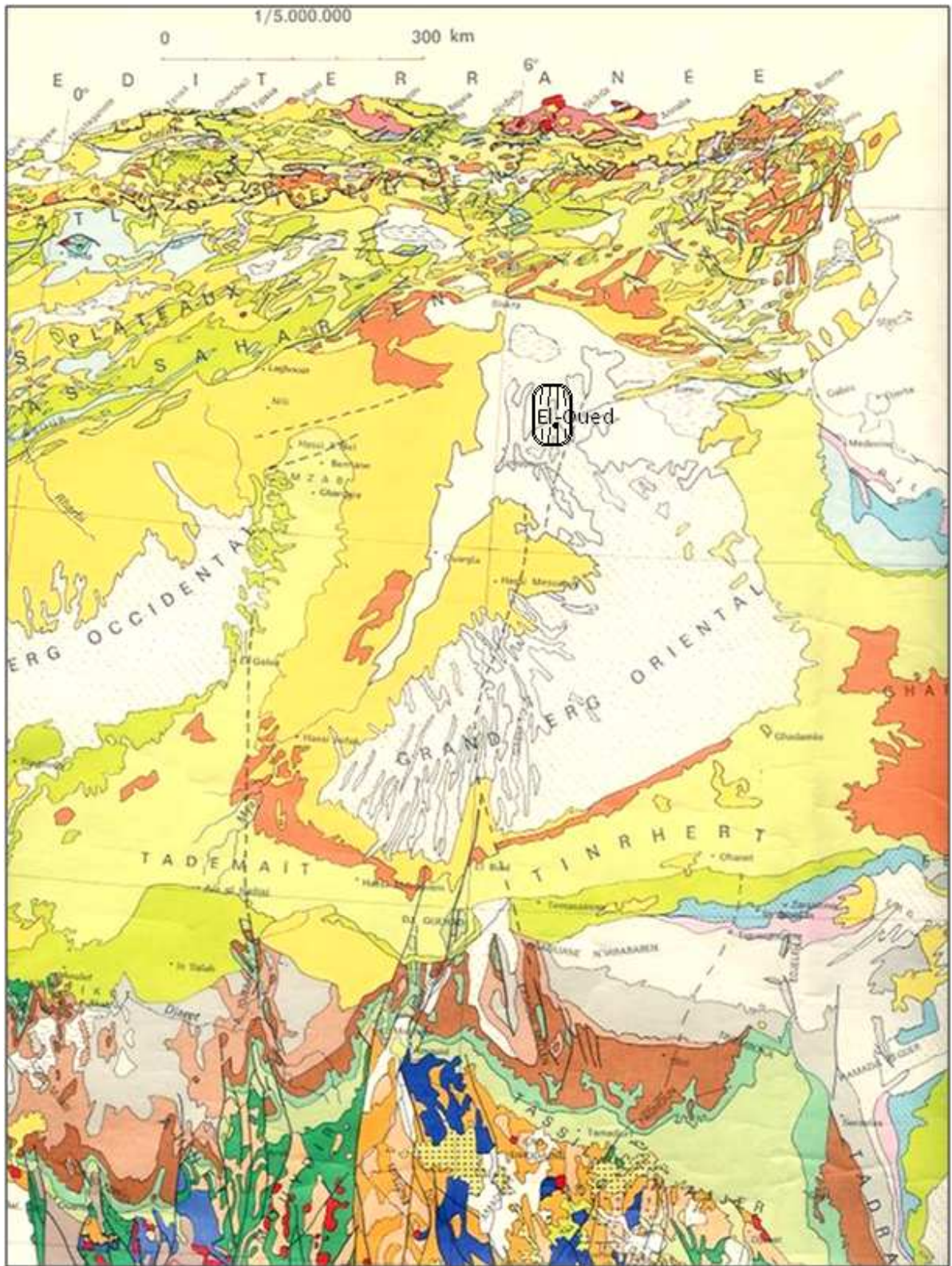


Fig.7- Carte géologique régionale du Sahara(extraite de la carte géologique du Nord de l'Afrique :1/5.000.000)

Légende de la carte géologique

<u>Légende</u>	PALEOZOÏQUE
QUATERNAIRE CENOZOÏQUE	
QUATERNAIRE.	Carbonifère indifférencié.
Sebkhâ, lacs.	Carbonifère supérieur et Permien.
Dunes.	Carbonifère inférieur.
Néogène + Oligocène.	Dévonien indifférencié.
Eocène.	Dévonien supérieur et moyen.
MESOZOÏQUE	Dévonien inférieur.
Crétacé indifférencié.	Silurien.
Crétacé supérieur et moyen.	Ordovicien.
Crétacé inférieur.	Cambrien.
Jurassique indifférencié.	Primaire indifférencié.
Jurassique supérieur et moyen.	Champ de dykes.
Jurassique inférieur.	Contour, limite d'affleurement.
Trias ou Permo-Trias.	Faille, décrochement.
	Front de chevauchement.

2- Géologie Locale

La région étudiée comprend, d'une manière générale, plusieurs horizons aquifères, d'où la nécessité de connaître la géologie des formations réservoirs, leurs toits et murs. (Tab.26)

Le réservoir le plus important et le plus profond rencontré est celui du continental intercalaire, appelé aussi la nappe Albienne parce que c'est la première formation ou le premier étage dans lequel la nappe est percée.

Selon les coupes géologiques établies à partir des logs, de sondage et forage, d'une part et l'étude faite par Cornet (1964), Bel et Cuch (1968) et l'école des mines de Paris (1975) d'autre part, on remarque que les profondeurs des couches et leurs épaisseurs varient d'une région à l'autre.

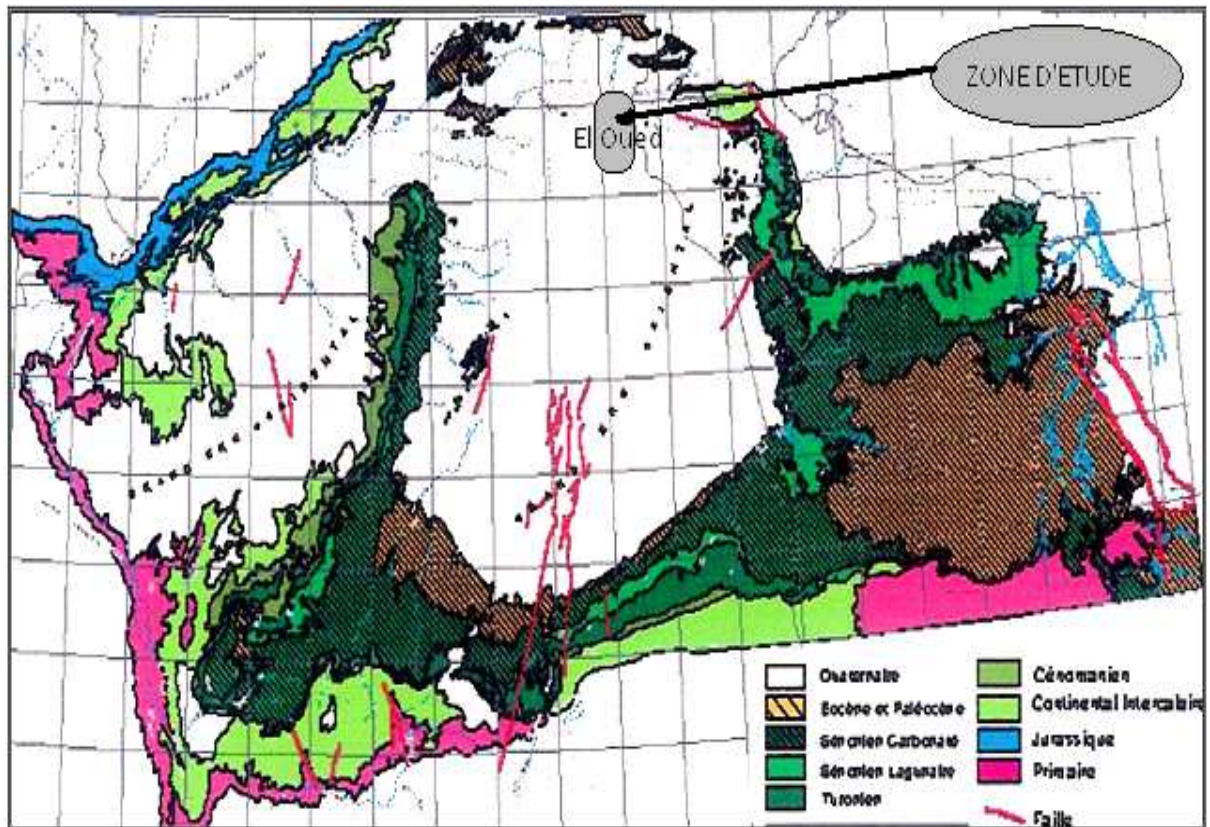


Fig. 8 - Carte géologique du SASS (OSS, 2008)

D'après ces études et les Logs des forages, la lithostratigraphie des formations est la suivante : (de bas en haut) (Fig.8) et (Fig.9)

2.1- Lithostratigraphie

2.1.1- Les formations du Secondaire

Le Trias :

Les formations triasiques reposent transgressivement sur la surface érodée des roches sédimentaires et effusives de la série inférieure. Il est constitué d'argiles rouges avec d'abondants amas de gypse et de chlorure de sodium, le tout intercalé de coulées basaltiques.

On trouve également des grés fins, argileux, à rares passées de calcaires dolomitiques. Cette formation curieuse n'a pu s'élaborer que sous un climat spécial, probablement subdésertique.

Le Jurassique :

Il est représenté par des sédiments lagunaires, marins et continentaux et fait partie de la formation du Continental Intercalaire.

- Jurassique inférieur (Lias) :

Constitué essentiellement d'anhydrites à passées d'argiles, calcaires et de sel blanc rose, on peut trouver également des calcaires oolithiques et des marnes.

- Jurassique moyen (Dogger) :

Représenté essentiellement d'anhydrites et par une alternance de calcaire, de grès souvent glauconieux et d'argiles bariolées.

- Jurassique supérieur (Malm)

C'est une série argilo-gréseuse à passées de calcaires, d'anhydrites et de dolomies, la présence de glauconie est bien caractéristique.

Le Crétacé :

Comme on l'a déjà remarqué dans l'étude de la géologie régionale, le Crétacé (jusqu'au Cénomaniens) est représenté dans la majeure partie du Sahara algérien par des faciès continentaux du Continental Intercalaire.

- Le crétacé inférieur :

Le Néocomien :

Il est représenté par des sédiments continentaux bariolées grés-argileux avec quelques passées d'anhydrite.

Le Barrémien :

Cet étage est généralement percé par tous les forages du Continental Intercalaire réalisés dans le bas Sahara. Il présente une alternance de grès avec passage d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on a également des sables avec présence de silex.

D'après les forages d'El-Oued l'épaisseur moyenne est variable (entre 200 et 240 mètres).

L'Aptien :

Il est principalement constitué de formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. D'après les coupes géologiques des forages de la région, cet étage est le seul dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres.

L'Albien :

Il est formé d'une alternance de marnes, de grés, de sables et surtout par des calcaires avec passages de silex et d'argiles. Sa 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.

A l'Est de la région d'étude l'épaisseur de cette étage varie de 100 à 150m, par endroits elle peut atteindre 200 mètres (d'après les coupes de sondages et les forages Albien).

Le Vraconien :

Il constitue une zone de transition entre l'Albien greso-sableux et le Cénomaniens argilo-carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques.

On trouve aussi des argiles sableuses et de rares passées de grés à ciment calcaire. Les niveaux argileux que contient cet étage présentent une importance, car ils constituent la couverture de l'Albien. L'épaisseur varie entre 250 et 300 mètres.

Le Cénomaniens :

Constitué par une alternance de dolomies, de calcaire dolomitique, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites.

Ces formations donnent à cet étage le caractère d'un écran imperméable. La limite inférieure est caractérisée par les évaporites, les dolomies, qui la distinguent nettement de la limite supérieure dont les formations sont les évaporites et les calcaires.

Le Turonien :

La nature lithologique de ses formations est généralement carbonatée, constituée de calcaire dolomitique et des dolomies micro-cristallines compactes avec des intercalations de calcaires sénoniens et parfois de marnes.

Il constitue la base du Complexe Terminal, son épaisseur varie, par endroit, elle dépasse parfois les 650 mètres.

Le Sénonien :

Les différentes études géologiques effectuées à travers le Sahara algérien montrent une différence, du point de vue faciès, entre le Sénonien lagunaire situé à la base et le Sénonien carbonaté situé à la partie supérieure.

a- Le Sénonien Lagunaire :

La limite du Sénonien lagunaire est généralement nette, elle est caractérisée par un faciès évaporitique avec des argiles. Ces derniers sont aisément différenciables des calcaires et dolomies du Turonien. Egalement cet étage est constitué de bancs : d'anhydrite, de dolomite, d'argile et de sel massif.

L'épaisseur totale avoisine les 150 mètres.

b- Le Sénonien Carbonaté :

Est essentiellement constitué de dolomies vacuolaires et de calcaires dolomitiques avec des intercalations de marnes et d'argiles, plus rarement d'anhydrites, son épaisseur dépasse parfois les 300 mètres.

Il faut noter que la limite entre le Sénonien lagunaire et carbonaté n'est pas toujours bien nette et que la limite supérieure du Sénonien carbonaté est encore plus floue, car il existe une continuité lithologique entre le Sénonien et l'Eocène carbonaté.

La présence de nummulites dans les calcaires a permis la différenciation des deux formations carbonatées et bien sûre leur datation : Sénonien et Eocène.

2.1.2- Les formations du Tertiaire

L'Eocène :

L'Eocène est carbonaté à sa base, sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaire, formées par des argiles et des sables , parfois on rencontre du gypse et des graviers.

L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 mètres.

Le Mio-Pliocène :

Les 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.

Il est en discordance indifféremment sur le Primaire d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé communément Complexe Terminale (C.T).

Bel et Demargne séparent cet horizon en quatre niveaux:

Niveau argileux :

Il existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental, Il est peu épais. Il constitue avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Mio-Pliocène, une barrière peu perméable entre les nappes du Sénono-Eocène carbonatées et le Pontien sableux.

Niveau grès- sableux :

Son épaisseur est régulière sur toute l'étendue du Sahara oriental. Il est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique. Sa base est constituée parfois de graviers alors que le sommet formé d'argiles. Ce niveau présente le principal horizon aquifère du Complexe Terminal.

Niveau argilo-sableux :

Ce niveau est constitué de lentilles sableuses qui peuvent former le quatrième niveau (sableux) du Mio-Pliocène. Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique.

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 à la nappe des sables du Complexe Terminal.

2.1.1- Les formations du Quaternaire

Elles sont composées d'un matériel alluvial et éolien contenant des évaporites. A la base des couches d'argiles et d'évaporites, ces dernières sont surmontées par des couches à

dominante sableuses et argilo-sableuses.

Elles forment la couverture superficielle qui se localise au niveau des dépressions et couvrent la plus grande extension au niveau du bassin du bas Sahara,

Les formations superficielles sont sous forme de dunes de sables en mouvement, dont le dépôt se poursuit à l'heure actuelle.

Cette formation quaternaire renferme la nappe superficielle de notre zone d'étude. (Fig.8) et (Fig.9).

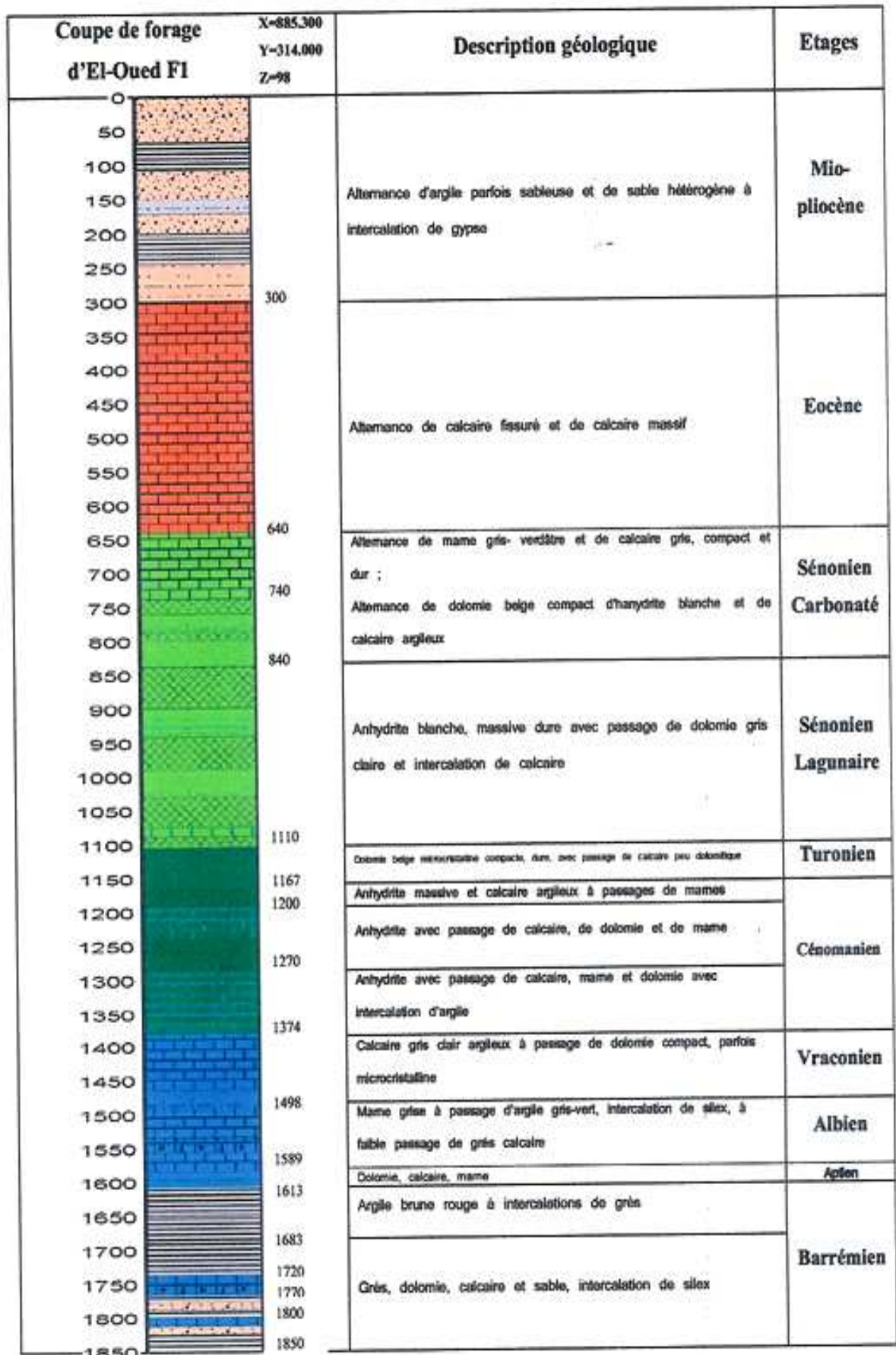


Fig. 9 - Log du forage Albien F1 (ANRH, 1993)

2.2- Interprétation des coupes géologiques

L'établissement des coupes géologiques a pour but la réalisation d'une corrélation lithologique du sous sol, ainsi que d'identifier l'extension géographique, l'épaisseur approximative de la nappe et l'épaisseur utile des couches.

Coupe N° 1 :

La coupe n° 1 (Fig.10) est réalisée à partir des logs de forages, elle est orientée Nord-Sud.

La formation Mio-Pliocène est constituée par des argiles, des sables et des calcaires. Son épaisseur diminue du Nord vers le Sud.

Au niveau du forage H₁₁104, on remarque l'absence des formations quaternaires représentées par des sables. Cela peut être expliqué par une érosion à ce niveau (Fig.10).

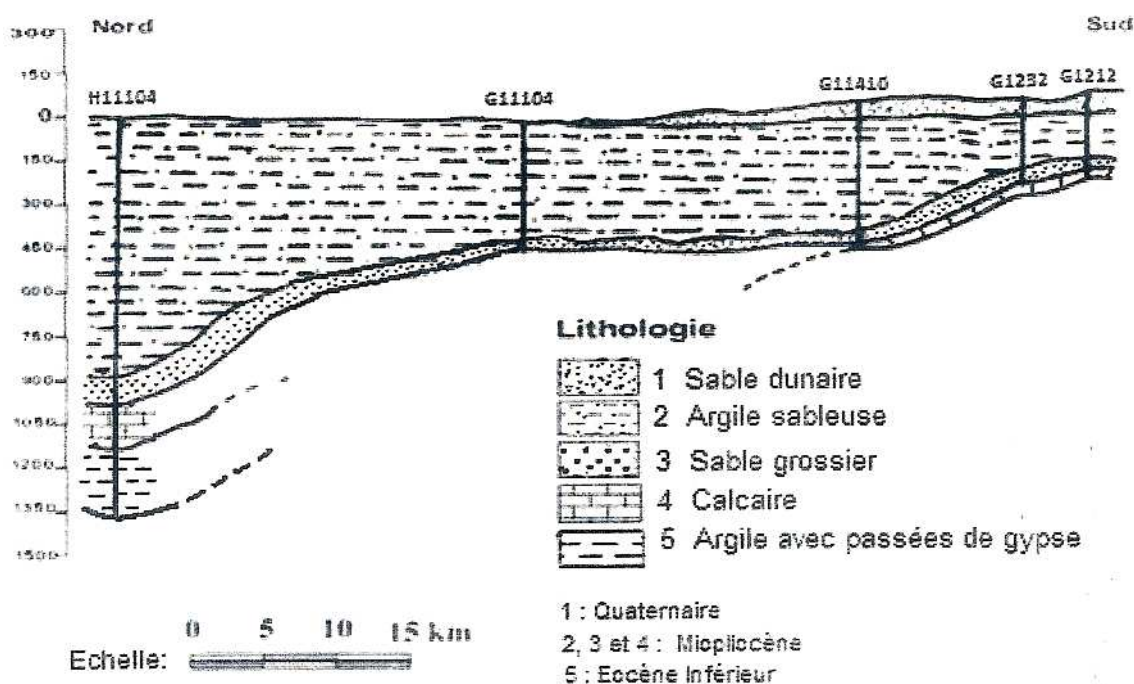


Fig. 10 - Coupe géologique n° 1 extraite à partir des Logs lithologiques de forages (ANRH,1989)

Coupe N° 2

L'orientation de cette coupe est différente à la première (NW –SE). Sa stratification est entrecroisée, avec des couches qui biseautent (Fig.11).

Les quatre premiers forages, illustrent bien cette situation.
 On remarque aussi que l'épaisseur des formations quaternaires, est plus importante au Nord-Ouest qu'au Sud-Est (Fig.11).

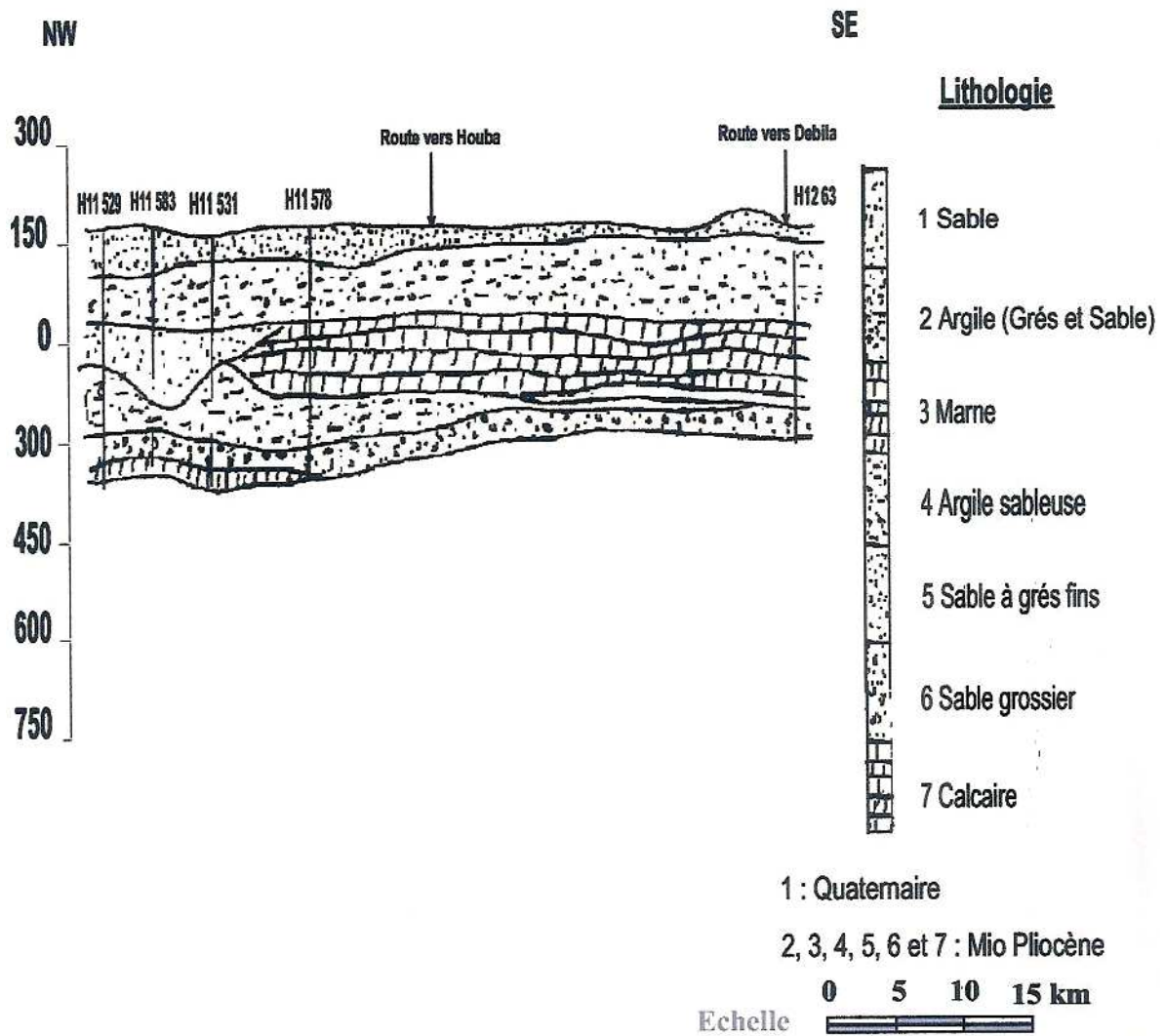


Fig. : 11 Coupe géologique n° 2 extraite à partir des logs lithologiques de forages (ANRH,1989).

Coupe N° 3:

L'orientation de cette coupe est orthogonale à la coupe précédente (NE-SW), en allant de la région dite Merzaka vers Ourmès, on remarque l'absence du Quaternaire au niveau du forage (H52₁₂), , ceci peut être expliqué par l'effet d'une érosion éolienne.

Les formations mio-pliocènes sont caractérisées par une importante épaisseur (plus de 200 m). Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région, au contraire de celle du Quaternaire qui est constituée par des sables qui changent d'une région à l'autre (par exemple, au niveau du forage H540₁₁ l'épaisseur présente presque la moitié de celle de H84₁₂) (Fig.12).

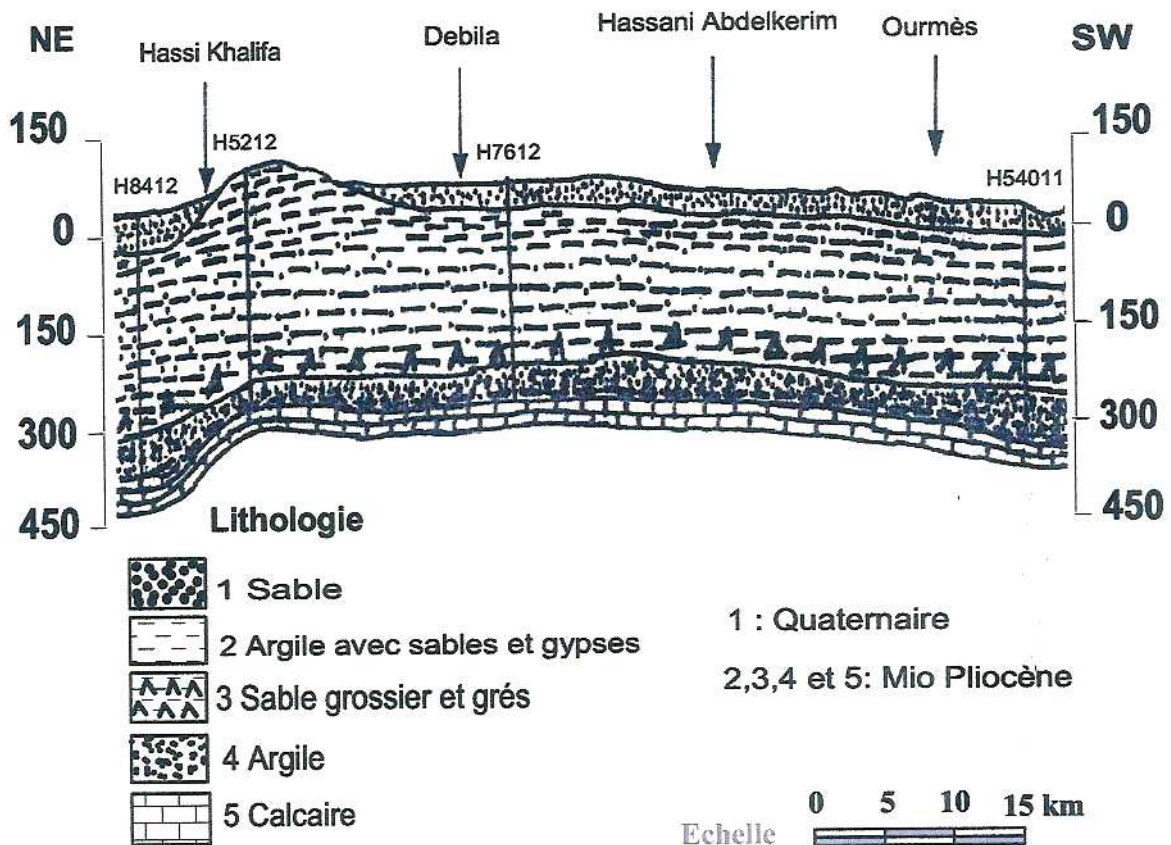


Fig. : 12 Coupe géologique n° 3 extraite à partir des Logs lithologiques de forages (ANRH,1989)

2.3- Conclusion

La région d'El Oued fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780 000 km². Ce bassin, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est

marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques sub-verticaux.

Du point de vue géologique, la région a une particularité spécifique. Ainsi, les conditions tectoniques et paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire avec une lithologie régulière et homogène dans l'espace, variée dans le temps.

Ces conditions ont favorisé la formation, dans la région d'El Oued et dans tout le bas Sahara, de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès, le continental intercalaire (CI), le complexe terminal (CT) et la nappe superficielle.

La stratigraphie de la région est caractérisée par la formation de séries sédimentaires allant du Crétacé inférieur jusqu'au Quaternaire.

Les formations récentes du Quaternaire forment l'aquifère détritique de la nappe superficielle, cet aquifère est sableux à gréseux parfois il devient gypseux et argileux. Ces dernières formations sont localisées particulièrement dans la partie nord-est du terrain où elles se terminent par une croûte gypseuse, son substratum est argileux imperméable parfois très peu sableux à son sommet ou alors gypsifère en totalité.

CHAPITRE III

Cadre géophysique

Les sondages électriques

Les Diagraphies

CHAPITRE : III. Cadre géophysique

1- Introduction

La géophysique est un outil mis à la disposition de l'hydrogéologue. Elle est aussi un élément essentiel, parmi les autres disciplines utilisées, pour la réalisation d'un travail en hydrogéologie. Elle permet de compléter et préciser les données géologique et hydrogéologique en vue de leur utilisation immédiate.

Notons aussi, qu'elle peut remplacer, efficacement, le forage en détectant avec précision la structure, la puissance, la lithologie, les limites et les paramètres physiques des formations étudiées.

L'hydrogéologue et le géophysicien se complètent par leurs travaux, et c'est le premier qui doit savoir orienter les travaux du second, quand il s'agit d'une étude hydrogéologique.

Dans ce chapitre, sur la base des données bibliographiques, logs stratigraphiques des forages et résultats des sondages (électriques, diagraphies des forages) nous allons essayer de reconstituer la géologie et de donner une synthèse sur les aquifères.

Les méthodes géophysiques utilisées sont :

- les sondages électriques
- les diagraphies.

2- Synthèse des données de sondages

2.1- Les sondages électriques

2.1.1- Introduction

Le sondage électrique consiste à étudier les propriétés électrique du sous-sol au moyen de mesures effectuées à la surface.

La technique de mesure est souvent appelée : (méthode des résistivités)

D'après G . Castany (1968) il existe deux types de conductivités :

- la première caractérise les métaux et les minéraux, c'est la conductivité métallique
- la deuxième caractérise les roches, c'est la conductivité électrolytique.

La propagation du courant, grâce aux ions, est fonction de la teneur en eau des roches, d'où son intérêt en hydrogéologie.

La résistivité d'un terrain dépend de la nature lithologique des roches, de la quantité et de la composition chimique de l'eau d'imbibition.

2.1.2- Principe

Le dispositif utilisé pour ces mesures comprend habituellement deux circuits : un circuit d'émission entre deux points A et B et un circuit de réception entre deux points : M et N.

L'ensemble constitue un quadripôle. A . B . M et N.

On envoie dans le sol, entre les deux points A et B (appelés pôles, électrodes, prise de terre), un courant d'intensité I au moyen d'une source de courant S (batterie, piles sèches, groupe électrogène) et d'un câble isolé sur lequel est branché un ampèremètre qui mesure I le passage du courant produit, par chute ohmique, des différences de potentiel dans le sol.

Entre deux points M et N choisis à volonté, on mesure une différence de potentiel ΔV avec un potentiomètre P.

La résistivité est calculée à partir de la formule :

$$\Delta V = V_M - V_N = \rho I / 2\pi (1/AM - 1/BM - 1/AN - 1/BN)$$

ΔV : différence de potentiel en millivolt (mV)

V_M et V_N : potentiels aux électrodes M et N

ρ : résistivité en ohm . mètre (ohm . m ou $\Omega . m$)

I : intensité du courant en milliampère (mA)

AM , BM , AN , BN : les distances entre les électrodes en mètre .

On parle de résistivité vraie lorsque le terrain est homogène, si le terrain est hétérogène la résistivité calculée est dite résistivité apparente

2.1.3- Dispositifs de mesure

Les plus utilisés sont les dispositifs WENNER et SCHLUMBERGER.

La configuration des électrodes étant linéaire :

le dispositif WENNER est caractérisé par une disposition des électrodes, telle que :

$$AM = MN = NB = a. \text{ d'où}$$

$$\rho = (\Delta V / I) \cdot 2\pi a$$

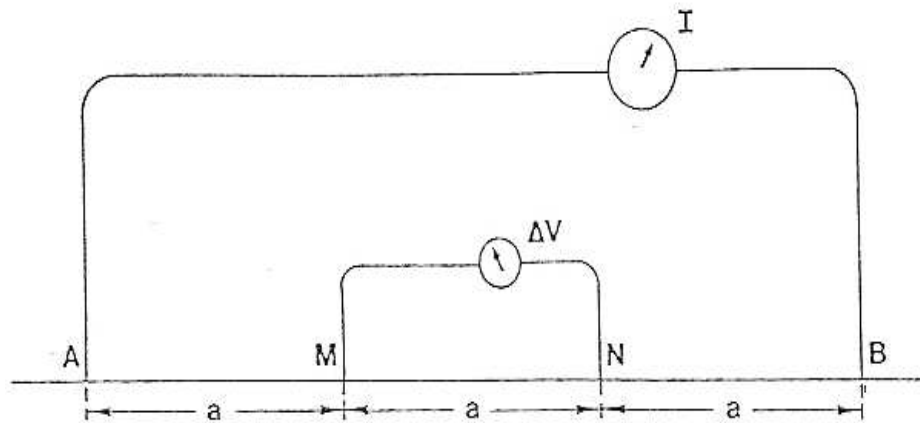


Fig.13- Dispositif Wenner

Dans le dispositif Schlumberger, les électrodes sont placées de telle sorte que : (Fig.13)

$$AB = 2L \text{ et } MN = 2l \quad \text{d'où}$$

$$\rho = (\Delta V / I) \cdot 2\pi \cdot (L^2 - l^2) / 4l$$

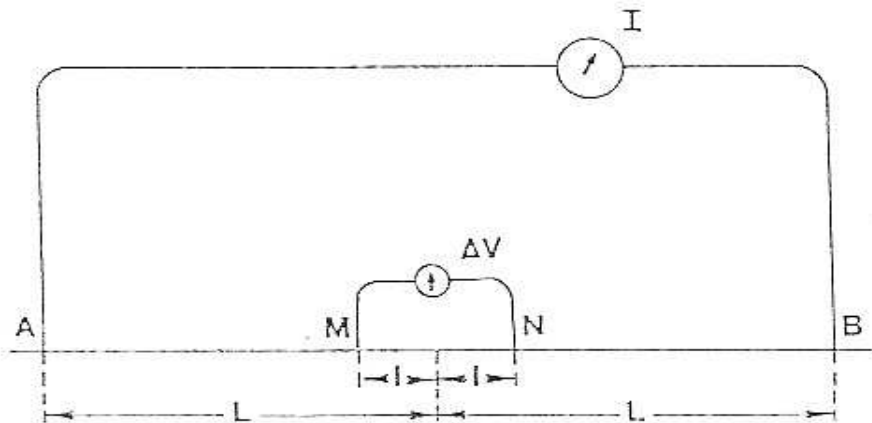


Fig.14- Dispositif Schlumberger

Comme le centre du dispositif est fixe, la profondeur d'investigation croît avec l'écartement des électrodes A et B. (Fig.14)

2.1.4 – Avantage de la méthode :

- Cette méthode n'est pas coûteuse, simple, nécessitant peu de matériel et d'opérateurs.
- Elle permet l'estimation de certaines caractéristiques hydrogéologiques des roches telle que la perméabilité, la teneur en eau.
- A la lumière de nouvelles informations et de nouvelles techniques d'interprétation, les résultats de mesures électriques peuvent être réinterprétés plusieurs fois.
- Elle est non destructrice.

2.1.5 – Inconvénients de la méthode :

- Manque de précision, nécessitent d'être contrôlée par une autre méthode d'investigation.
- En saison sèche, les sols très secs s'opposent à la circulation du courant, réduisant ainsi la profondeur d'investigation.

2.1.6 – Application :

L'entreprise nationale de géophysique a réalisé, dans le secteur d'El Oued, deux campagnes de prospection géophysique (sondages électriques).

La profondeur d'investigation, pour les deux campagnes réalisées, atteint sensiblement la partie supérieure des calcaires (deuxième campagne).

Les sondages électriques réalisés par ENAGEO, durant le mois de juin et juillet 1992, couvrent la majorité du terrain de la région d'El-Oued. Elle a utilisé la méthode de Schlumberger (Fig.15).

Ces deux campagnes ont permis la réalisation de 21 coupes géo électriques, neuf appartenant à la première campagne et douze à la deuxième, ainsi qu'une carte du substratum argileux de la nappe superficielle.

Cette étude a permis l'identification de plusieurs formations géologiques :

- Une formation de sables dunaires, constituant le terrain superficiel à résistivité très élevée (dépassant, par endroit, les 2000 Ohm-mètre) et à une épaisseur moyenne qui varie entre 5 et 20 mètres.
- Une formation de sables et d'argiles constituée, généralement, à sa partie supérieure par des sables argileux qui biseautent en donnant parfois des formes lenticulaires, et à sa partie inférieure par des argiles sableuses. C'est une formation épaisse et moins résistante que la précédente. Le substratum de la nappe est constitué par une formation argileuse très conductrice.
- Localement, une formation carbonatée, latéralement discontinue et caractérisée par des résistivités qui varient entre 80 et 130 Ohm-m.

La coupe géo électrique n°1(Fig.16), est traversée par les sondages 25 à 31, d'une direction : S – N, allant de Chott El-Gram à Chott El-Moktaa. La formation superficielle montre des résistivités allant de 300 (sondage 27) à 595 Ohm-m (sondage 28). La deuxième formation est moins résistante : 10 Ohm-m (sondage 29) à 70 Ohm-m (sondage 28). La formation sous jacente est plus conductrice (1 à 9 Ohm-m) cela est due probablement aux eaux très chargées et au pourcentage élevé d'argiles. La dernière couche est légèrement plus résistante avec des valeurs allant de 4 à 13 Ohm-m. Elle peut correspondre au substratum imperméable de la nappe superficielle (Fig.16).

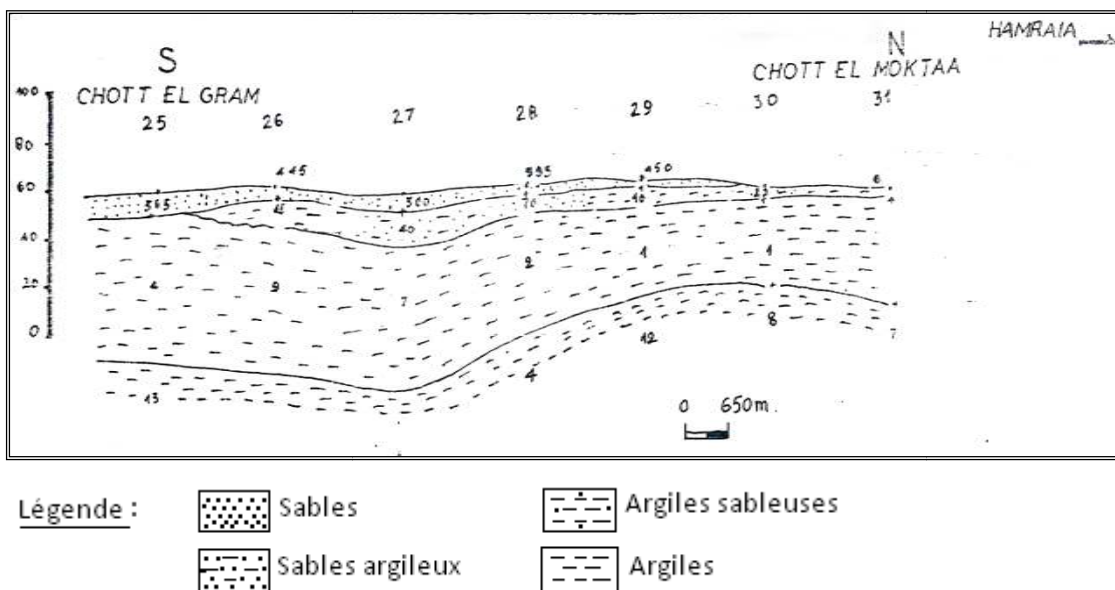


Fig.16 - Coupe géo électrique n° 1
(SEV de 25 à 31, entre les chotts : El-Gram et Moktaa)

La coupe géo électrique n°2, est traversée par les sondages 21 à 28, avec une direction : E – W. La partie Ouest de la couche superficielle est fortement moins résistive (90 à 100 Ohm-m) que la partie Est (275 à 800 Ohm-m).

L'inverse est vraie pour la formation sous jacente, le coté Ouest plus résistant (400 à 470 Ohm-m) que le coté Est de la coupe (240 Ohm-m).

Les autres formations sont plus conductrices (1 à 17 Ohm-m) et gardent les memes remarques de la coupe n° 1 (Fig.16).

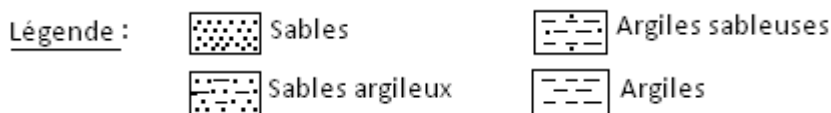
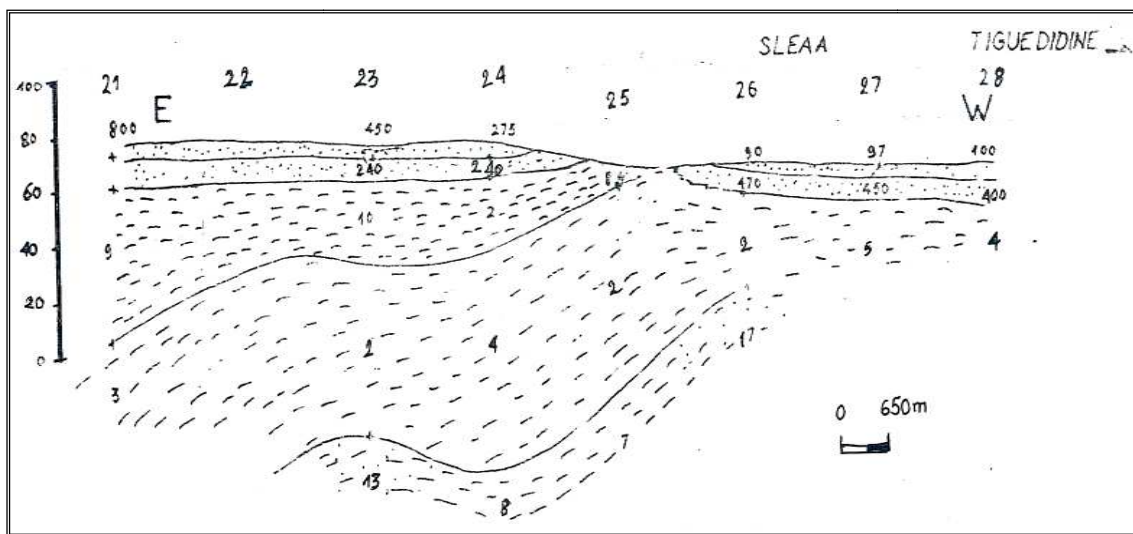


Fig.17 - Coupe géo électrique n° 2.
(SEV de 21 à 28, passant par Sleaa et Tiguedidine)

Les résistivités de la couche superficielle de la coupe n°3 (de Hassi-Khalifa à Bouaroua), augmentent du SE vers le NW (de 165 à 700 Ohm-m) et la couche inférieure (de 45 à 220 Ohm-m).

La dernière couche présente des résistivités très faibles (2 à 9 Ohm-m) (Fig.18).

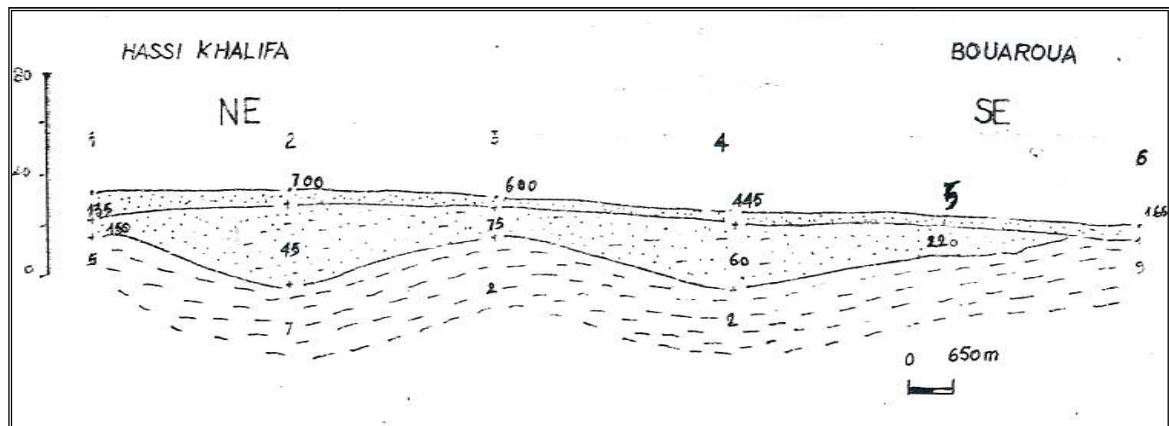


Fig.18 - Coupe géo électrique n° 3 (SEV de 1 à 6, entre Hassi-Khalifa et Bouaroua)

La coupe 4 est orientée SE –NW, allant de Oued-Alenda à Gueddachi et la coupe 5 est orientée NE – SW, allant d’El-Ketf à Drimini. Les résistivités de la couche superficielle des coupes : 4 et 5 sont très élevées, dépassants parfois les 1750 Ohm-m, c’est la couche des sables dunaires. Les couches sous jacentes sont moins résistantes, allant de (280 à 1015 Ohm-m) pour la coupe : 4 et de (57 à 400 Ohm-m) pour la coupe : 5. Les couches argileuses sont beaucoup moins résistantes : de (5 à 11Ohm-m) pour la coupe : 4 et de (7 à 38 Ohm-m) pour la coupe : 5. Les deux coupes montres l’existence de formations carbonatées, latéralement discontinues et de résistivité allant de 80 à 130 Ohm-m (Fig.19, 20).

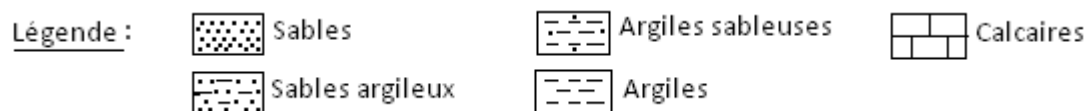
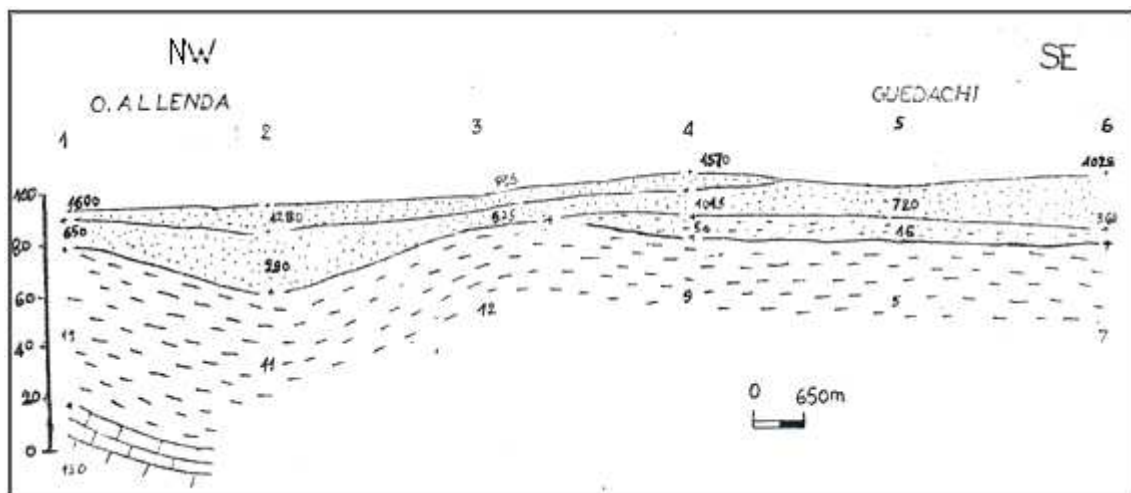
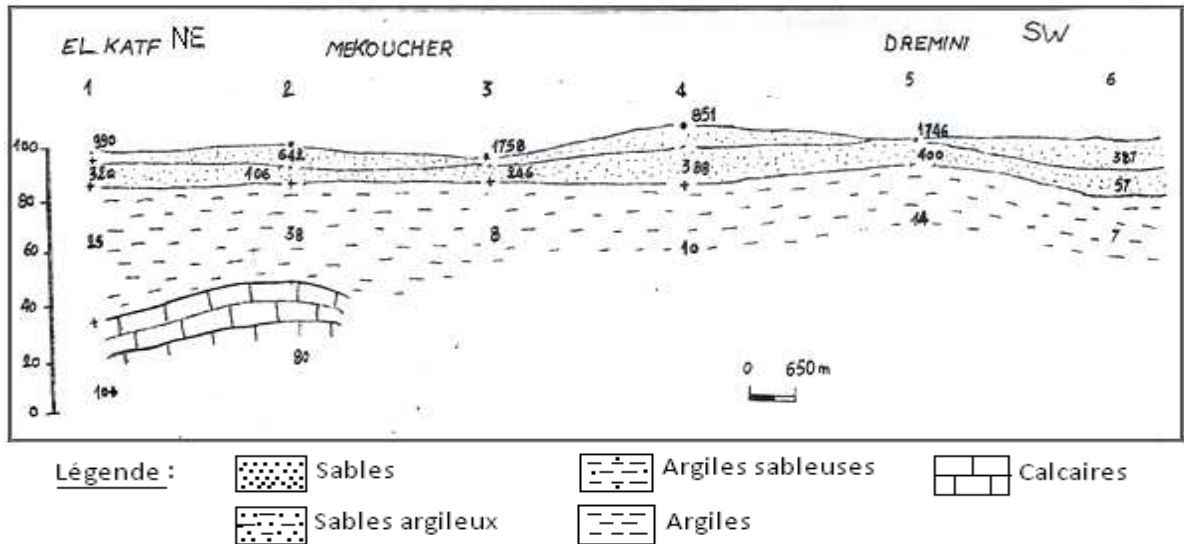
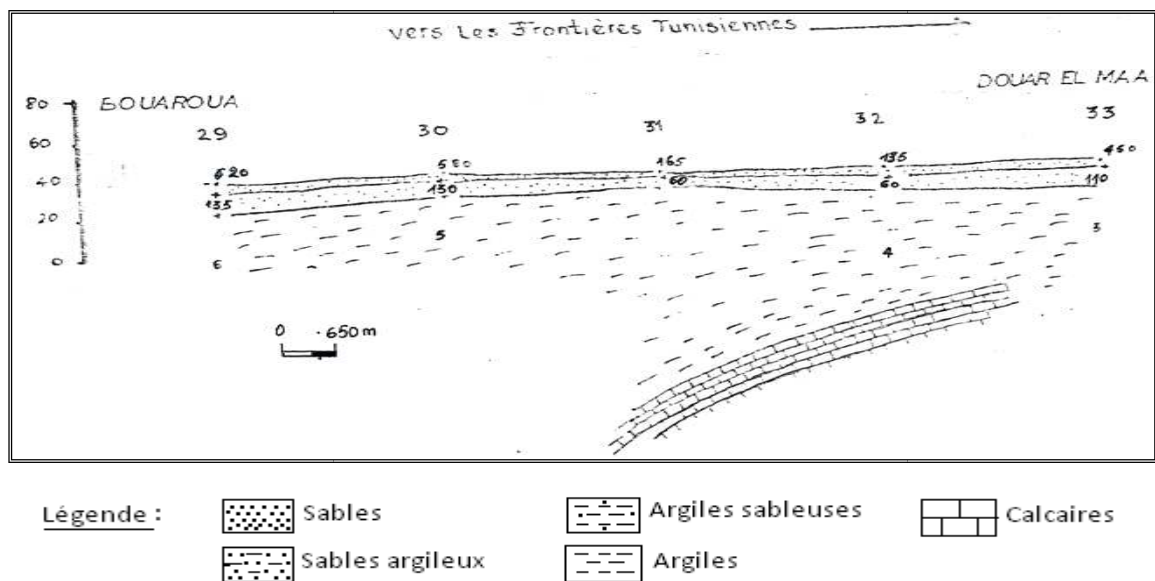
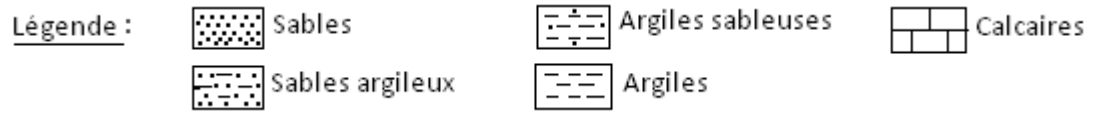
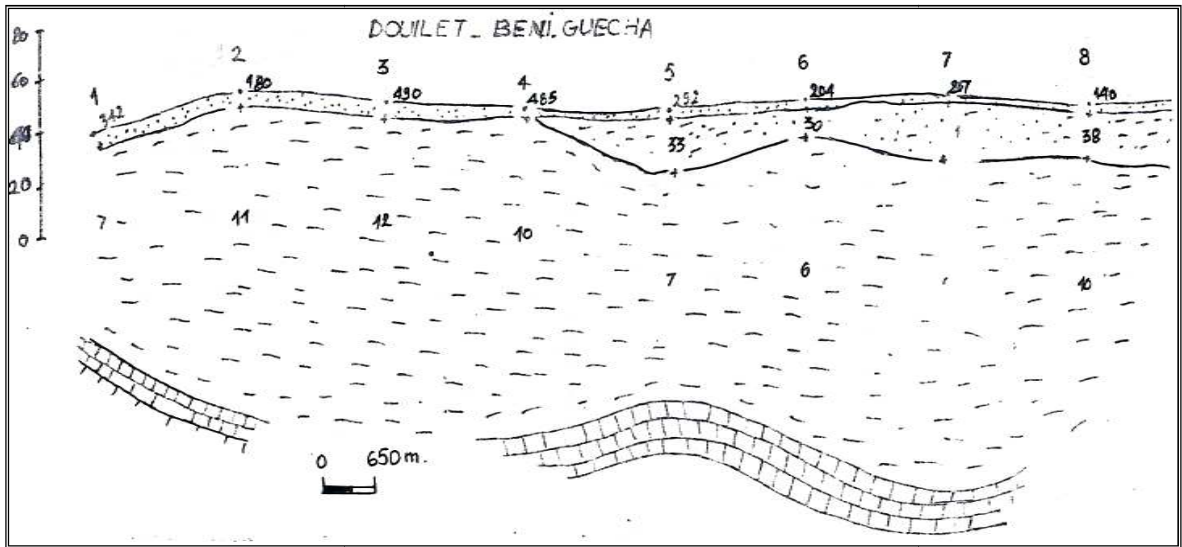


Fig.19 - Coupe géo électrique n° 4 (SEV de 1 à 6, entre O.Alenda et Guedachi)



Les deux dernières coupes présentent des couches superficielles ne dépassant pas 10 m d'épaisseur et des résistivités de 135 à 620 Ohm-m pour la coupe 6 et de 140 à 490 Ohm-m pour la coupe 7. La deuxième couche sablo-argileuse offre des résistivités nettement inférieures (60 à 135 Ohm-m) pour la coupe 6 et (30 à 38 Ohm-m) pour la coupe 7. Le reste des couches ont les mêmes caractéristiques électriques que les coupes précédentes. La variation latérale de la résistivité dans la même couche, nous renseigne sur l'hétérogénéité latérale des formations géologiques rencontrées (Fig.21, 23).





*Fig.23 - Coupe géo électrique n° 7
(SEV de 1 à 8, Douilet - Benguecha).*

2.2- Les Diagraphies

2.2.1- Introduction

Les diagraphies enregistrent en continu, en fonction de la profondeur, les caractéristiques physiques des terrains traversés par un forage.

Le Log classique d'un forage donne la description des terrains en fonction de la profondeur.

Dans le cas des diagraphies différées, s'y ajoute une représentation graphique en fonction de la profondeur, de l'évolution de la valeur d'un paramètre physique tel que la porosité, la teneur en argile, la résistivité,..etc.

Les diagraphies électriques, très souvent utilisées, tout particulièrement dans la prospection et l'exploitation des fluides (eau, hydrocarbures,...), mesurent la résistivité des formations.

Les diagraphies radioactives mesurent la radioactivité naturelle des terrains (diagraphie gamma-ray), les effets dus au bombardement des terrains par un rayonnement neutron (diagraphie neutron) ou par un rayonnement gamma (diagraphie gamma-gamma).

Elles présentent l'avantage de pouvoir être mises en œuvre dans des forages tubés alors que les diagraphies électriques ne peuvent pas être réalisées que dans les portions non tubées.

Les principales informations données par des logs radioactifs et électriques sont :

- 1) La nature lithologique des formations (argile, sables, grés, calcaires,...) données permettant d'identifier les terrains et de déterminer les épaisseurs et l'extension latérale des différentes couches ;
- 2) La mesure relative de grandeurs physiques telles que la porosité, la densité, la compacité, des différentes couches la fracturation, etc.
- 3) Moyennant un étalonnage précis de l'outil par échantillons prélevés, il est possible de traduire les valeurs mesurées en données quantitatives.

2.2.2- Les Diagraphies de Polarisation Spontanée

Le log de polarisation spontanée (P.S) enregistre en continu des différences de potentiel électrique dues à des causes naturelles.

Principe

Le liquide employé lors de l'exécution du forage (eau, boue) diffère presque toujours chimiquement de l'eau renfermée dans les formations traversées. C'est la mise en contact de ces fluides dissemblables qui provoque l'apparition de potentiels naturels.

Le potentiel spontané est causé par des forces électromotrices d'origine électrochimique et électrocinétique

Facteurs influençant la mesure

- Salinités relatives des fluides
- Résistivité des formations
- Influence de la présence d'argile
- Effet des formations compactes
- Dérive de la ligne de base due à un manque d'homogénéité de la boue ou à une variation de la salinité de l'eau de formation.
- Effet de la perméabilité.
- Effet de certains minéraux tels que sulfures métalliques, graphite,...

2.2.3- Les Diagraphies électriques

Les diagraphies électriques donnent, en continu, la mesure de la résistivité des formations traversées par le sondage. Il existe un très grand nombre d'outils permettant d'obtenir ce paramètre.

Toutes les sondes de résistivité nécessitent l'émission d'un courant par l'intermédiaire d'électrodes descendues dans le forage.

Ceci implique que le fluide du forage et le tubage ne soient pas infiniment résistants et que le tubage ne soit pas infiniment conducteur.

Les sondes de résistivité classiques les plus couramment utilisées sont la monoélectrode, les sondes normales et les sondes latérales. - La monoélectrode, ou "single point log" mesure la résistance entre une électrode descendue dans le forage et une électrode de référence en surface. - Les sondes normales mesurent la résistivité des formations en utilisant plusieurs électrodes. - Les sondes latérales mesurent la résistivité des terrains en utilisant plusieurs électrodes. Elles sont particulièrement efficaces en présence de formations résistantes.

Rayons d'investigation

Pour le single point, la profondeur d'investigation est très faible (ordre de 10 fois le diamètre de l'électrode A), mais la résolution verticale est bonne.

Facteurs influençant la mesure

En générale, l'enregistrement fournit une résistivité apparente qui diffère de la résistivité vraie de la formation. Cette différence est fonction de :

- L'espacement des électrodes
- L'épaisseur et la résistivité des bancs
- La diamètre de trou
- La résistivité de la boue
- La profondeur et la résistivité de la zone lavée.

2.2.4- Assemblage et reproduction des courbes

L'élaboration des courbes de diagraphie a nécessité l'assemblage de leurs différentes parties pour former une seule courbe. La deuxième étape consiste en la reproduction des courbes en une seule image avec une réduction à l'échelle : A4.

La dernière étape a permis l'assemblage, en colonnes de toutes les courbes ainsi que leurs Logs réalisés à partir des forages (Log A), ceux que nous avons réalisés à partir des courbes de diagraphies (Logs B), l'échelle des profondeurs et l'âge des formations.

Ce travail sur les données de la diagraphie a permis l'élaboration de planches parmi lesquelles on a choisi celles des figures (24 à 29).

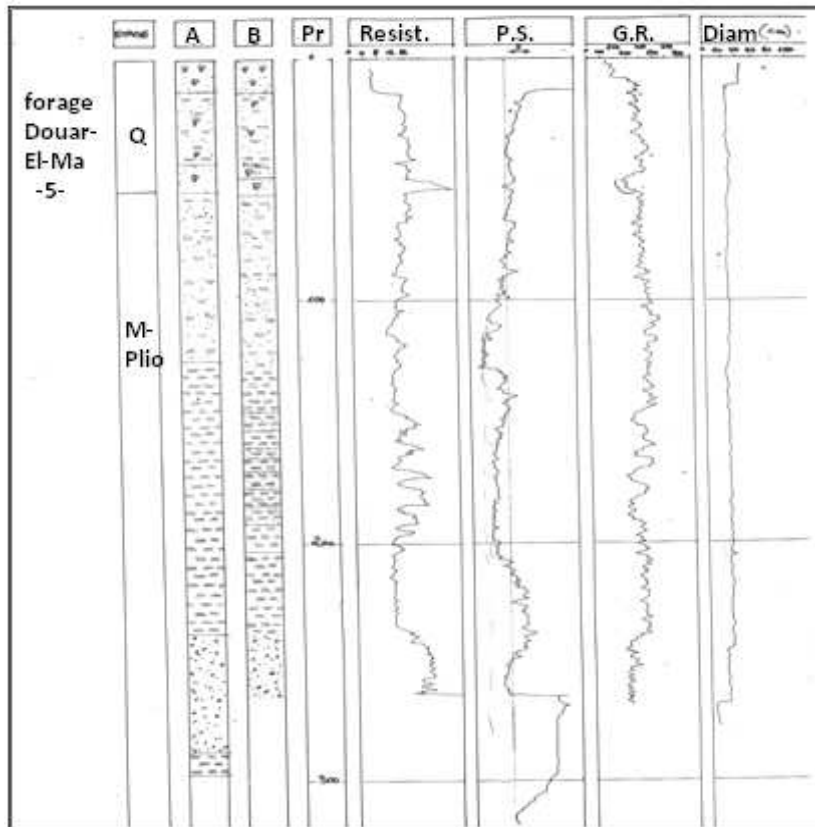


Fig.24 - Log du forage n° 5. Douar El Ma

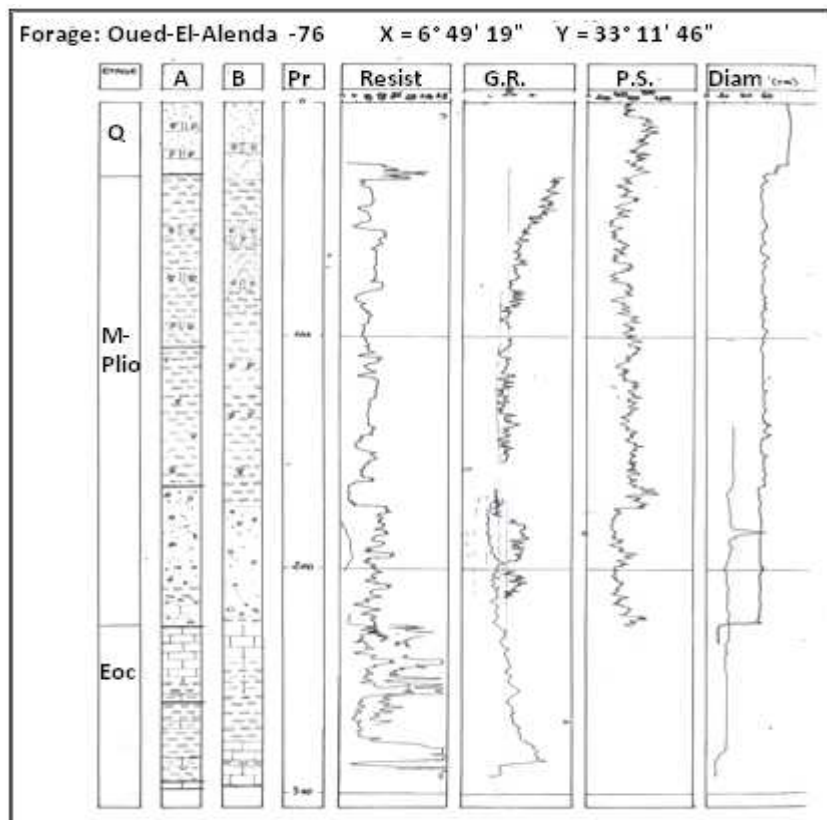


Fig.25- Log du forage n° 7. Oued El Alenda

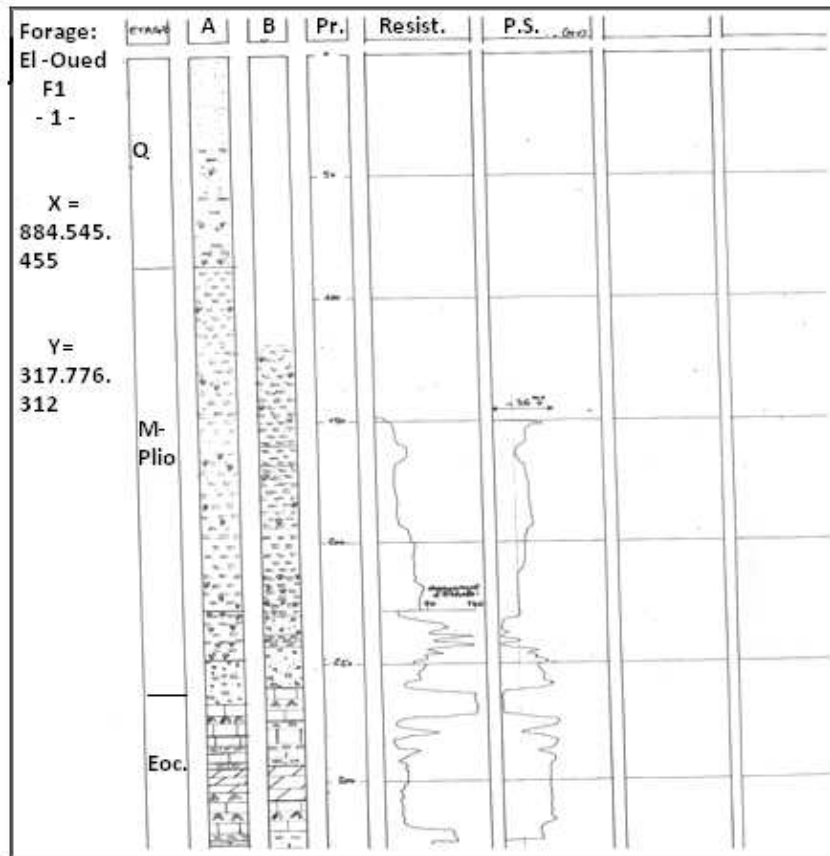


Fig.26 : Log du forage n° 1. El Oued F1

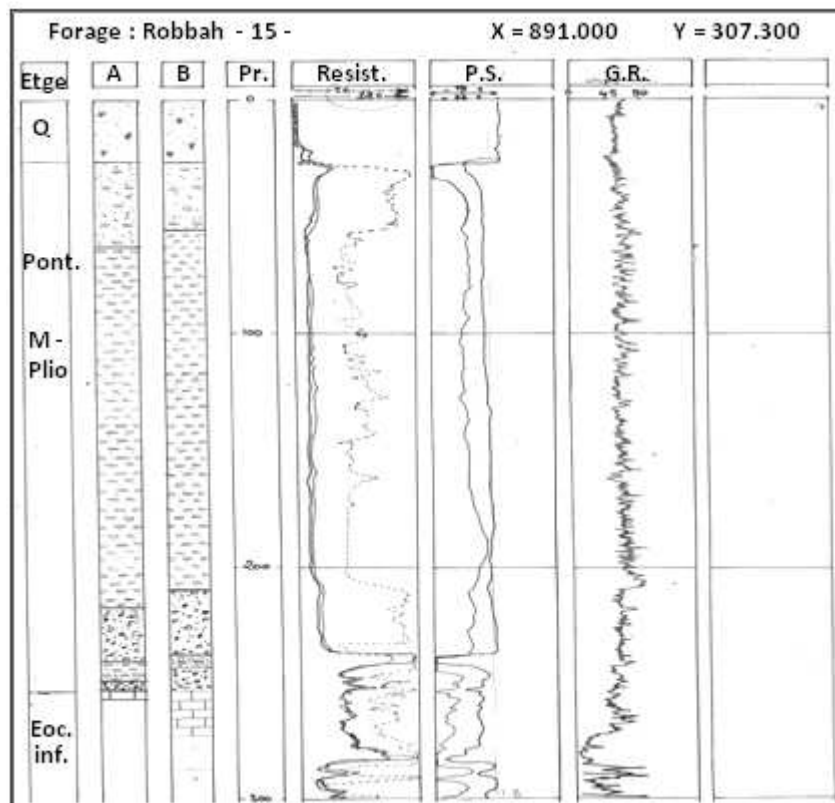


Fig.27 : Log du forage n° 15. Robbah

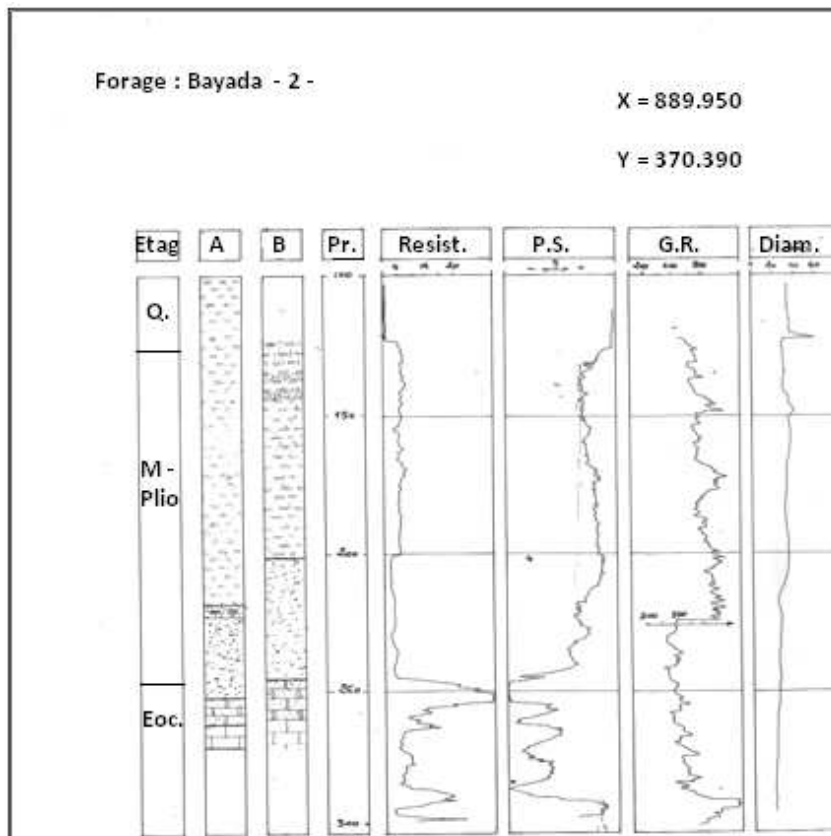


Fig.28 - Log du forage n° 2. Bayada II

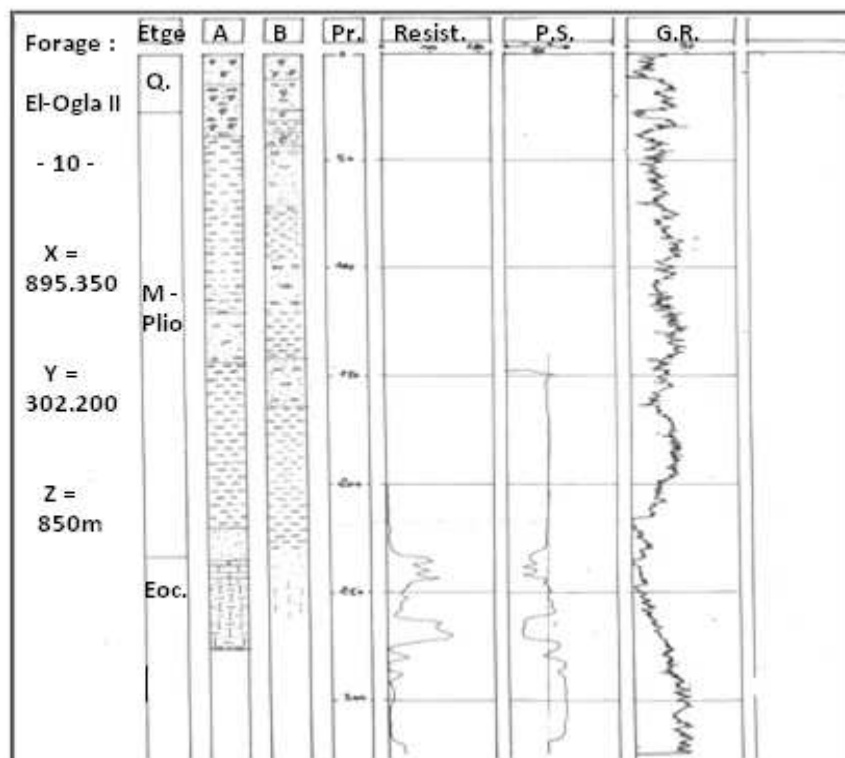


Fig.29 - Log du forage n° 10. El Ougla I

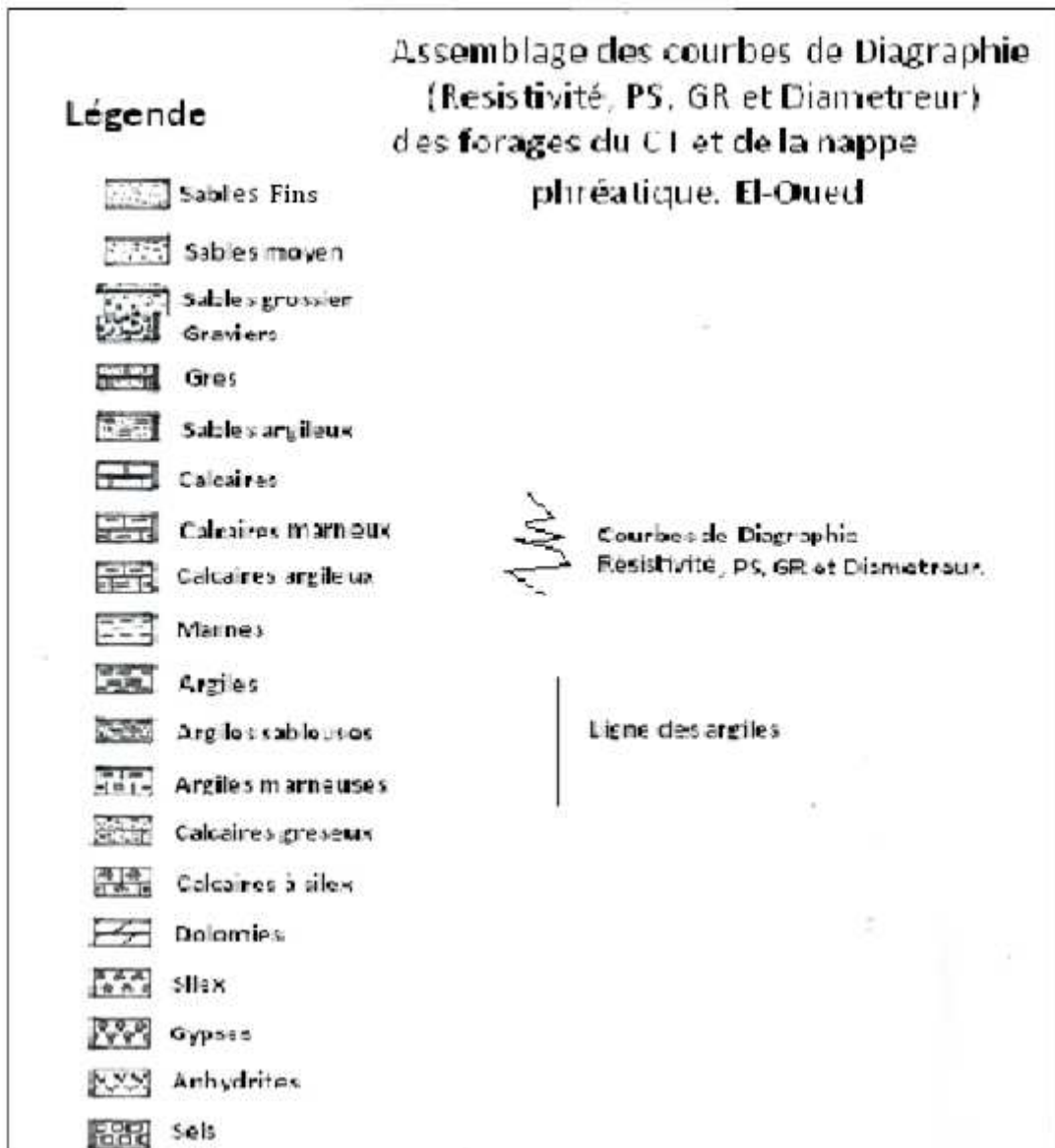


Fig.30 - Légende des Logs lithologiques (Log B) des différents forages

L'analyse et l'interprétation des courbes de (Résistivité, PS, GR...), ont fournies les Logs lithologiques des différents forages (Log B). La comparaison de ces derniers avec les Logs des forages (Logs A), ont données de bonnes corrélations stratigraphiques.

Notons aussi que la présence d'eaux salées et douce, dans les formations géologiques réservoirs, influent sur l'allure des courbes et donc sur la délimitation exacte des limites des formations géologiques (corrections faites avec Professeur Monjoie). (Fig.24 à 30)

Logs : A (réalisés à partir des forages)

Logs : B (réalisés à partir des courbes de diagraphies).

CHAPITRE IV

Etude hydrométéorologique

Précipitations

Température

L'humidité relative de l'air

L'évaporation

Les vents

Durée d'insolation

Détermination des facteurs du bilan hydrique

CHAPITRE : IV. Etude hydrométéorologique

1- Introduction

Les besoins en eau et d'autant plus grand que les températures sont élevées.

La région d'étude appartient au climat Saharien, (zone hyperaride), où l'écart de température entre jours et nuit est important.

Ce climat est caractérisé par un été très chaud et sec, où la température atteint. 49°C à l'ombre, et hiver doux durant le jour, mais froid au cours de la nuit (peut atteindre des valeurs négatives : -5) (Fig.31).

2- Analyse des différents paramètres climatiques (Bilan hydrique)

Le calcul et la comparaison entre les entrées et les sorties (pertes) en eau ainsi que les prélèvements et les réserves sont les éléments essentiels pour l'établissement du bilan hydrique. Les pertes sont du à l'évaporation et à l'évapotranspiration tandis que Les entrées sont représentés par la lame d'eau tombée.

Pour le calcul des paramètres météorologiques on s'est basé sur les données requises de l'ANRH de Ouargla et de la DHW d'El Oued.

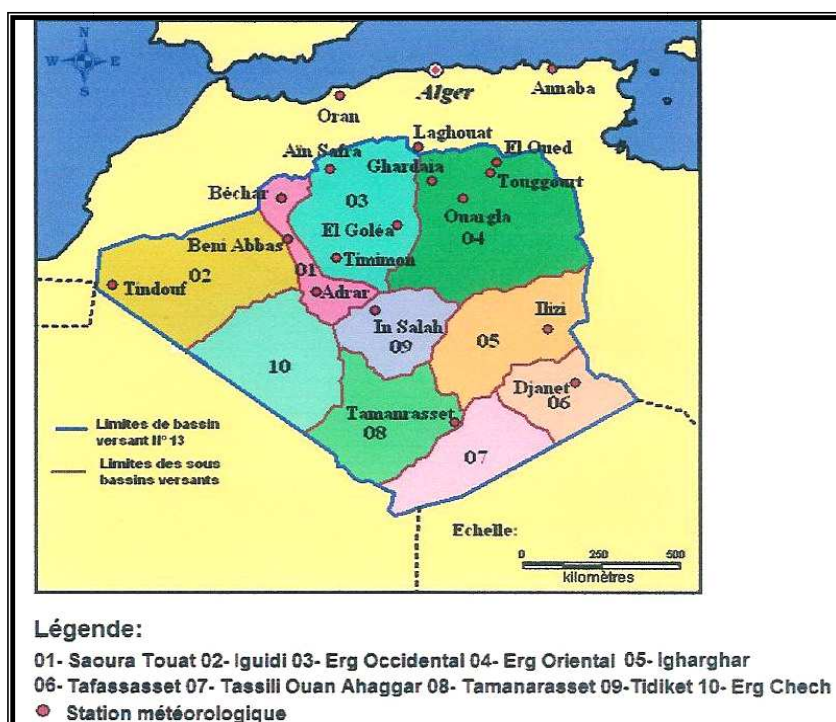


Fig. 31- Carte de situation des sous bassins versants du sahara algérien et de leurs stations météorologiques (Cahier de Sècheresse, n° 98)

2.1- Précipitations

Dans cette région saharienne la pluviosité est faible à cause du caractère d'aridité qui règne sur tout le Sahara Algérien, mais du nord vers le sud le gradient pluviométrique est décroissant ; (Fig.32) Isohyètes : J. Dubief (au nord du Sahara : 100 mm et atteint au sud jusqu'à 15 ou 10 mm)

2.2.1- Répartition (des précipitations) dans le temps et dans l'espace

L'étude de ce paramètre dans l'espace nous a conduit à choisir 3 stations météorologiques :

La station principale située dans la zone d'étude est celle de l'office national Météorologique de Guemar (El-Oued).

Deux autres stations (situées à la même altitude) sont l'ONM de Biskra (stations située au nord) et l'ONM de Touggourt (station située au sud-ouest), ces deux dernières sont prises à titre comparatif.

Stations coordonnées	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Biskra	34° 47' 0" N	5° 45' 0" E	85
EL OUED (Aéroport)	33° 22' 0" N	6° 53' 0" E	70
Touggourt	33° 11' 0" N	6° 13' 0" E	85

Tab.3- Coordonnées géographiques des trois stations météorologiques

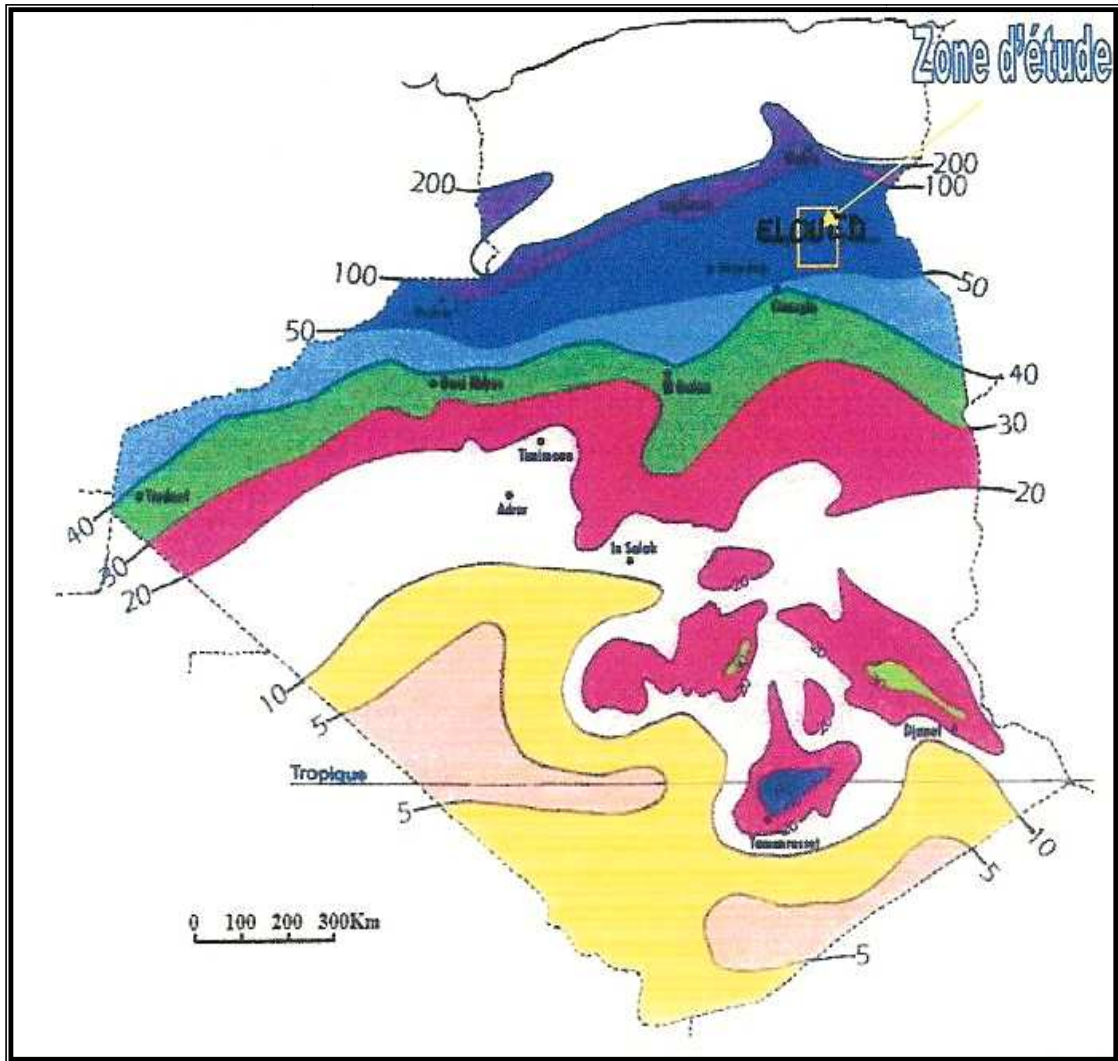


Fig.32 - Carte en isohyètes moyennes des précipitations annuelle du Sahara Algérien (Cahier de Sècheresse n° 98)

2.2.1.1- Evolution dans le temps :

2.2.1.1.1- Hauteurs des précipitations moyennes mensuelles

Les résultats que nous allons illustrer sur le tableau suivant : (Tab.4), concernent les trois stations météorologiques :

- Station d'El-Oued, à travers deux périodes (Ancienne et récente)

La première, de 1913 à 1938 (d'après Seltzer), (2.6 décennies)

La deuxième, de 1967-2006 (4 décennies)

- Station de Biskra, période allant de 1975 à 1984 (1 décennie)
- Station de Touggourt, période allant de 1975 à 2006 (3.2 décennies) (Fig.34).

	Automne			Hiver			Printemps			Eté				
Stations Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Haut Totale	Moy
Biskra	10.5	12.2	21.4	3.5	13.3	12.9	7.0	12.7	13.5	5.1	3.5	8.3	123.90	10.33
13/38 El Oued	3	7	13	8	15	9	13	6	5	4	0	0	83.00	6.92
67/06	5.01	7.4	9.7	6.13	14.1	7.51	9.57	6.52	4.71	1.39	0.46	1.9	74.40	6.20
Touggourt	5.5	5.8	9.3	5.9	16.7	5.6	10.2	5.9	4.1	1.6	0.9	2	73.50	6.13

Tab.4 Répartition moyenne mensuelle interannuelle des précipitations

Le climat Saharien est caractérisé par une pluviométrie faible. Le gradient pluviométrique est décroissant du Nord vers le Sud.

La zone d'étude est située entre les isohyètes 70 et 85 mm/an. (Fig.32).

Station d'El-Oued :

Pour la série d'observation allant de 1913 à 1938 (période ancienne), la lame d'eau maximale enregistrée est de l'ordre de 15 mm, au mois de Janvier, la minimal enregistrée est de l'ordre 0 mm pendant le mois de Juillet et Aout

Pour la série d'observation allant de 1967 à 2006 (période récente), la lame d'eau maximale enregistrée est de l'ordre de 14,1 mm, au mois de Janvier, la minimal enregistrée est de l'ordre 0,46 mm pendant le mois de Juillet.

Station de Biskra :

Pour la série d'observation allant de 1975 à 1984, la lame d'eau maximale enregistrée est de l'ordre de 21,4 mm, au mois de Novembre, la minimal enregistrée est de l'ordre 3,5 mm pendant le mois de Juillet et Décembre.

Station de Touggourt :

Pour la série d'observation allant de 1975 à 2006, la lame d'eau maximale enregistrée est de l'ordre de 16,7 mm, au mois de Janvier, la minimal enregistrée est de l'ordre 0,9 mm pendant le mois de Juillet.

Il est visible que la pluviométrie enregistrée, durant les différentes périodes, dans les trois stations est faible et irrégulière.

La hauteur totale de la lame d'eau pour la station d'El Oued est de :

Période ancienne = 83 mm avec une moyenne de 6,92 mm.

Période récente = 74,40 mm avec une moyenne de 6,20 mm.

Pour la station de Biskra la hauteur totale de la lame d'eau enregistrée est de : 123,90 mm avec une moyenne de 10,33 mm.

Pour la station de Touggourt, la hauteur totale de la lame d'eau enregistrée est de : 73,50 mm avec une moyenne de 6,13 mm.

On remarque aussi que la quantité d'eau précipitée diminue en allant du Nord vers le Sud.

2.2.1.1.2- Hauteurs des précipitations interannuelles

Pour avoir une idée sur la distribution de la lame d'eau précipitée au cours des différentes périodes et à travers les trois stations, nous avons dressé l'histogramme des précipitations interannuelles (Fig.33).

L'année la plus arrosée est : **1990** – 1991 avec (206,2 mm), et la plus sèche est : **1983** – 1984 avec (16,1 mm), pour la station d'El Oued.

L'année la plus arrosée est : **2004** – 2005 avec (161,8 mm), et la plus sèche est : **1989** – 1990 avec (11,5 mm) pour la station de Touggourt.

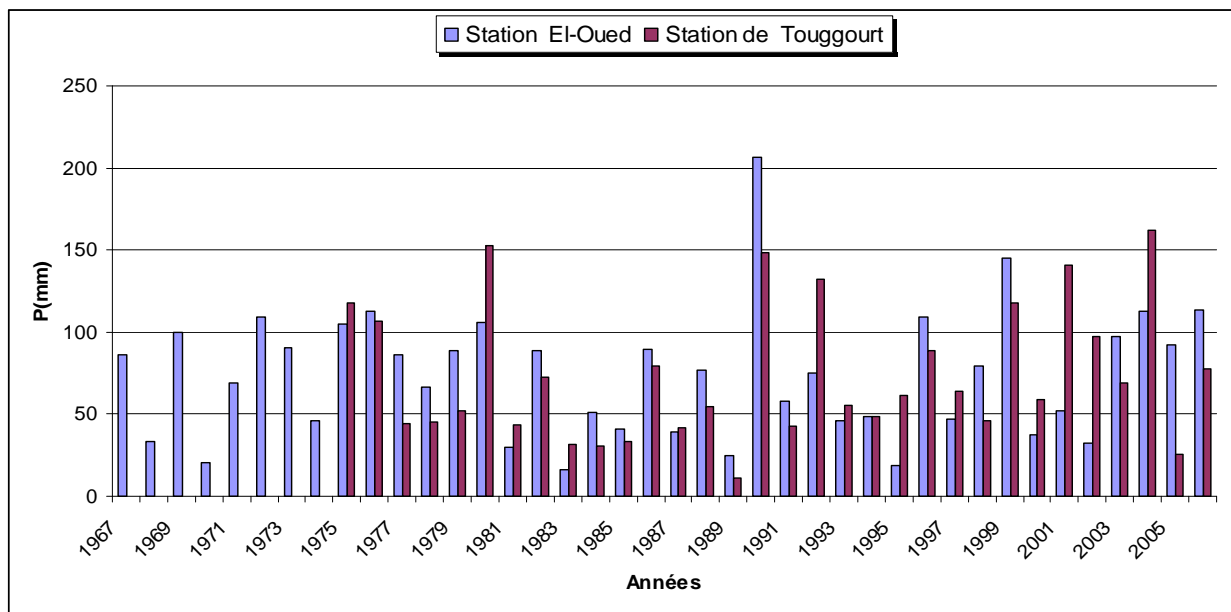


Fig.33 - Histogramme de répartition des moyennes annuelles des précipitations pour les deux stations

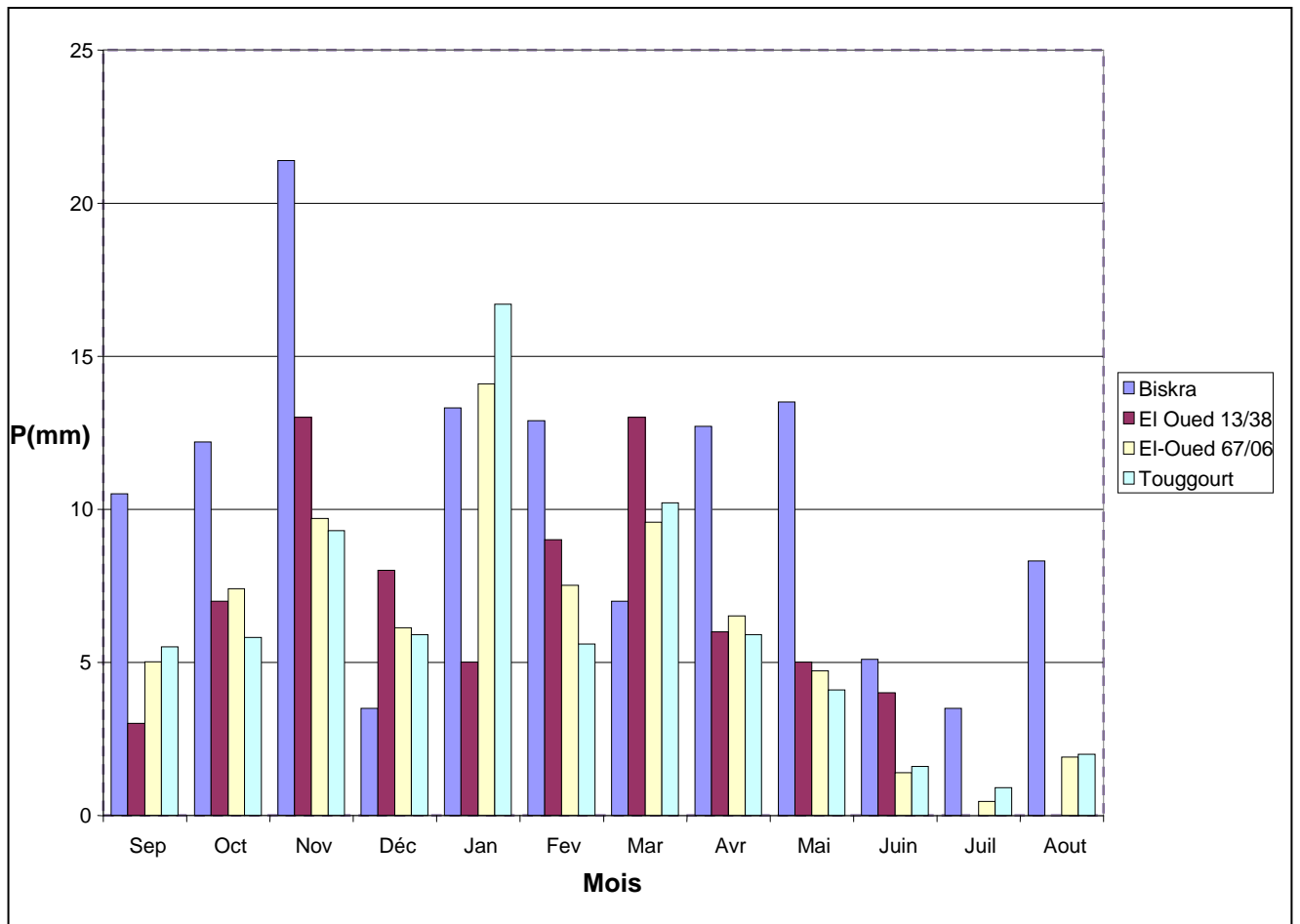


Fig.34 - Histogramme de répartition des moyennes mensuelles des précipitations pour les trois stations

2.2.2- Coefficient pluviométrique

C'est le rapport entre la pluviométrie (P) pour une année et la pluviométrie moyenne (p) pour une série (n) d'années.

L'année est excédentaire ou déficitaire selon ce coefficient : H

Avec :
$$H = \frac{P}{p}$$

Si $H > 1$ Année excédentaire (A+).

Si $H < 1$ Année déficitaire (A-).

Tab.5- S^t El-Oued

Année	Lame d'eau	coefficient pluviométrique	Type d'Année
1967	85.8	1.164	A +
1968	33.3	0.452	A -
1969	99.8	1.354	A +
1970	20.7	0.281	A -
1971	69.5	0.943	A -
1972	108.8	1.476	A +
1973	90.7	1.230	A +
1974	46.5	0.631	A -
1975	105.1	1.426	A +
1976	112.9	1.531	A +
1977	86.4	1.172	A +
1978	66.9	0.907	A -
1979	88.9	1.206	A +
1980	106	1.438	A +
1981	29.9	0.406	A -
1982	88.4	1.199	A +
1983	16.1	0.218	A +
1984	51	0.692	A -
1985	40.6	0.551	A -
1986	89.8	1.218	A +
1987	39.2	0.532	A -
1988	77.2	1.047	A +
1989	24.5	0.332	A -
1990	206.2	2.797	A +
1991	58.2	0.789	A -
1992	75.1	1.019	A +
1993	46.1	0.625	A -
1994	48.6	0.659	A -
1995	19	0.258	A -
1996	109.6	1.487	A +
1997	47	0.638	A -
1998	79.1	1.073	A +
1999	145	1.967	A +
2000	37.3	0.506	A -
2001	52	0.705	A -
2002	32	0.434	A -
2003	97.3	1.320	A +
2004	113	1.533	A +
2005	92	1.248	A +
2006	113.3	1.537	A +

Tab.6- S^t:Touggourt

Année	Lame d'eau	coefficient pluviométrique	Type d'année
1975	118.1	1.604	A +
1976	107	1.453	A +
1977	44.7	0.607	A -
1978	44.9	0.610	A -
1979	51.9	0.705	A -
1980	153	2.078	A +
1981	43.4	0.589	A -
1982	72.4	0.983	A -
1983	31.6	0.429	A -
1984	30.9	0.420	A -
1985	33.7	0.458	A -
1986	79.4	1.078	A +
1987	41.7	0.566	A -
1988	54.4	0.739	A -
1989	11.5	0.156	A -
1990	148.4	2.016	A +
1991	42.8	0.581	A -
1992	132.2	1.796	A +
1993	55.2	0.750	A -
1994	48.7	0.661	A -
1995	61.4	0.834	A -
1996	88.5	1.202	A +
1997	64.2	0.872	A -
1998	46.4	0.630	A -
1999	118.1	1.604	A +
2000	58.6	0.796	A -
2001	141.2	1.918	A +
202	96.9	1.316	A +
2003	69.2	0.940	A -
2004	161.8	2.198	A +
2005	25.7	0.349	A -
2006	78	1.059	A +

2355.9

**Tableaux(5 et 6) des coefficients pluviométriques et types d'années
(stations : El-Oued et Touggourt)**

D'après les deux tableaux (5,6) et les figures (35,36), les valeurs des coefficients pluviométriques obtenues montrent que, pour la station d'El-Oued, on a : 22 années excédentaires et 18 années déficitaires(Tab.5).

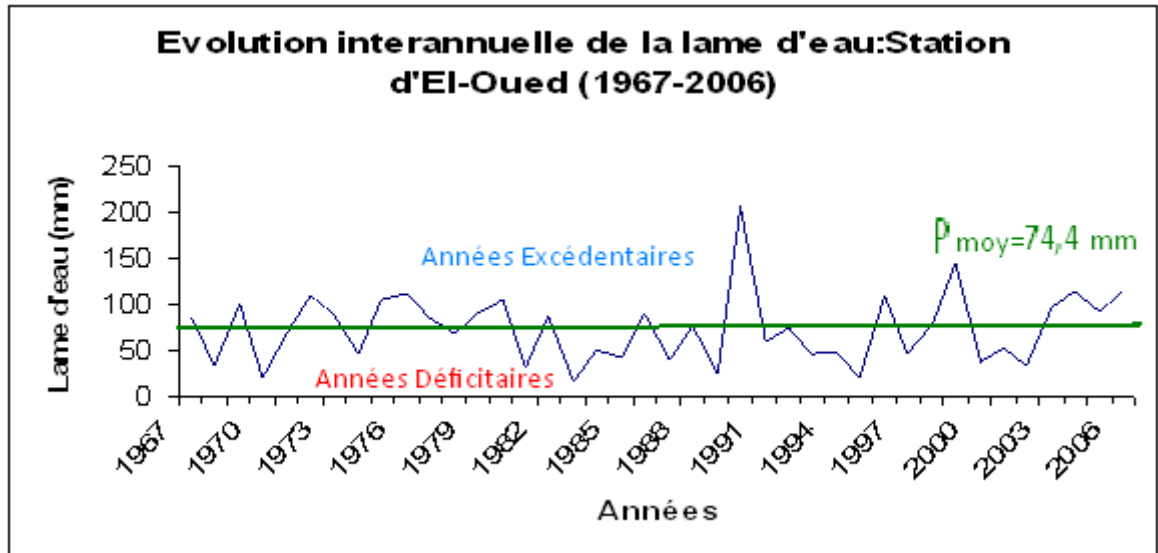


Fig.35 - Evolution interannuelle des précipitations pour 4 décennies (Station : d'El Oued)

Pour la station de Touggourt, on a : 12 années excédentaires et 20 années déficitaires(Tab.6).

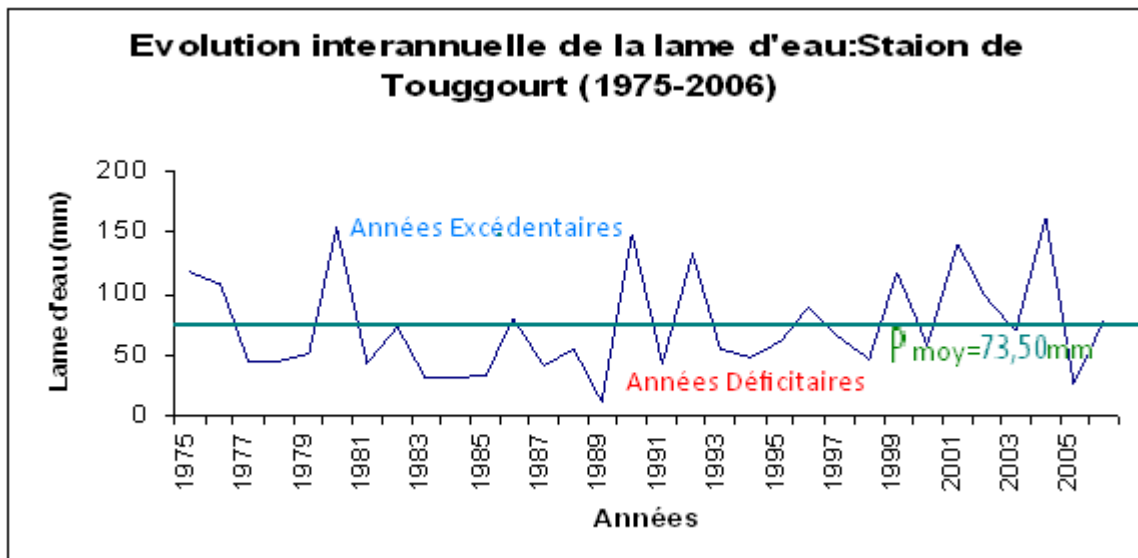


Fig. 36 - Evolution interannuelle des précipitations pour 3,2 décennies (Station : Touggourt)

Pour mieux répartir les pluies sur les saisons de l'année agricole (Automne, Hiver, Printemps et Eté), on a dressé les graphes suivants :

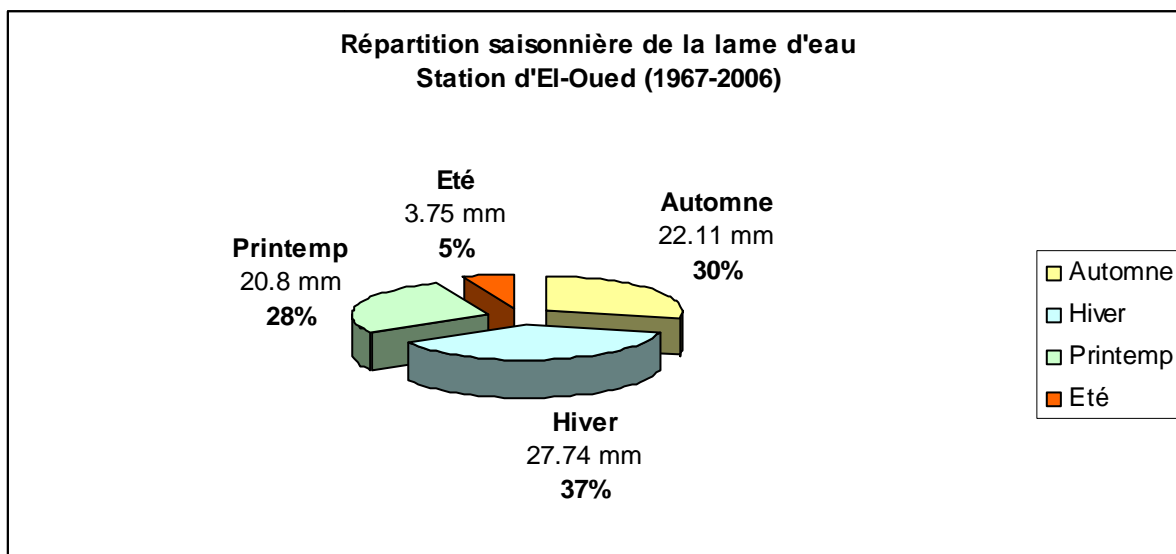


Fig.37 - Répartition saisonnière de la pluviométrie, station d'El-Oued (1967 – 2006).

Le graphe montre que la saison hivernale est la période la plus pluvieuse, avec 27,74 mm de pluie tombée (37 % de la lame d'eau annuelle) et que la saison d'Eté, est la période la sèche, avec 4,5 mm de pluie (6 % de la lame d'eau annuelle) (Fig.37).

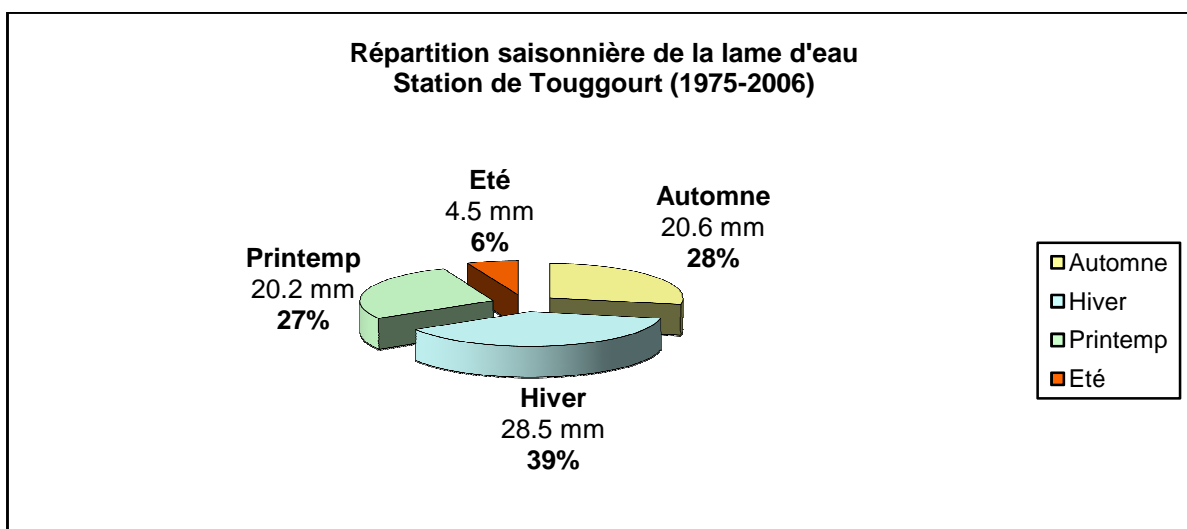


Fig.38 - Répartition saisonnière de la pluviométrie, station de Touggourt (1975 – 2006).

Pour la station de Touggourt, le graphe montre que la saison hivernale est la période la plus pluvieuse, avec : 28,5 mm de pluie tombée (39 % de la lame d'eau annuelle)

La saison d'été, est la période la moins pluvieuse, avec : 4,5 mm de pluie tombée (6% de la lame d'eau annuelle) (Fig.38).

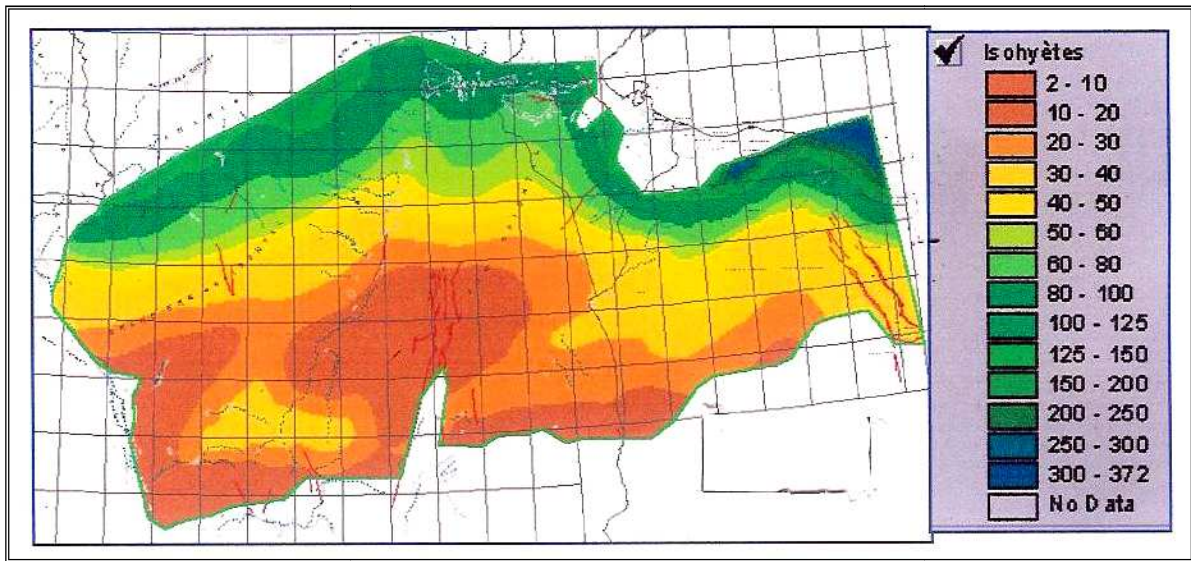


Fig.39 - Isohyètes du SASS (OSS,2008)

2.2- Température

L'influence de la température sur les autres paramètres météorologiques est primordiale. Ses effets directs sur l'évaporation, l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement, d'une manière générale, lui donne une grande importance pour le calcul du bilan hydrique.

C'est la température donc qui conditionne les autres paramètres météorologiques, sur lesquelles elle joue un rôle déterminant.

2.2.1- Températures moyennes mensuelles et annuelles des trois stations

	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Total	Moy
	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout		
Biskra	28	21,7	15,8	12,5	11,5	13,6	16,4	19,8	24,3	30,2	33,4	32,5	259,7	21,64
13/38 El Oued	29,2	22,8	16,3	11,4	10,9	13,3	16,8	21	25,2	30,3	35	32,7	264,9	22,08
67/06	28,48	22,13	15,57	11,3	10,46	12,97	16,2	20,4	25,4	29,99	32,91	33,15	259,0	21,58
Touggourt	28,57	22,61	15,72	11,43	10,29	12,9	16,48	20,63	25,81	31,03	33,61	33,26	262,3	21,86

Tab.7- Températures moyennes mensuelles et annuelles des trois stations: El Oued, Biskra et Touggourt.

La température moyenne annuelle enregistrée à la station d'El-Oued (période ancienne) est de : 22,08 °C, avec maximum enregistré au mois de Juillet, égal à : 35 °C et un minimum enregistré au mois de janvier, égal à 10,9 °C.

Pour la période récente elle est de : 21,58 °C, avec maximum enregistré au mois d'Aout égal à : 33,15 °C et un minimum enregistré au mois de janvier égal à 10,46 °C.

Pour la station de Touggourt, la température moyenne annuelle enregistrée est de : 21,86 °C, avec maximum enregistré au mois de Juillet égal à : 33,61 °C et un minimum enregistré au mois de janvier égal à 10,29 °C (Tab.8) et (Fig.41).

Pour la station de Biskra, la température moyenne annuelle enregistrée est de : 21,64 °C. avec maximum enregistré au mois de Juillet égal à : 33,4 °C et un minimum enregistré au mois de janvier égal à 11,5 °C (Fig.40).

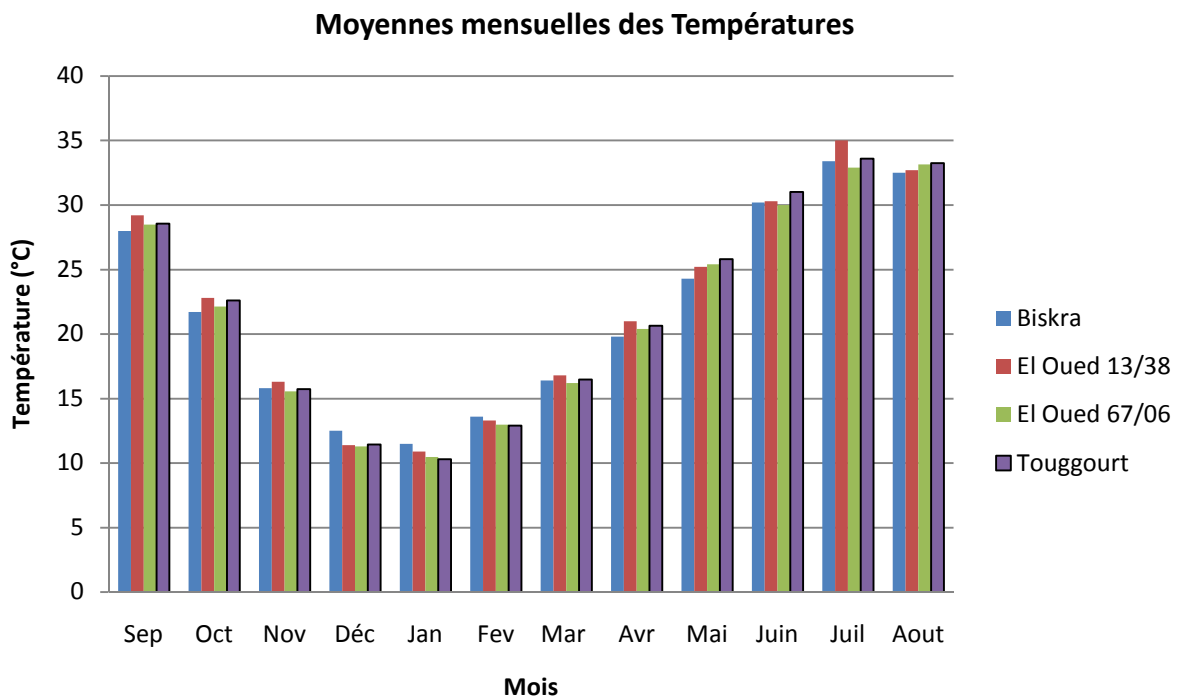


Fig.40 - Températures moyennes mensuelles des trois stations : El Oued, Biskra et Touggourt.

Année	Température		Année	Température	
	Station El-Oued	Station de Touggourt		Station El-Oued	Station de Touggourt
1967	19,99		1987	22,22	22,03
1968	20,61		1988	22,48	22,20
1969	20,73		1989	22,11	21,93
1970	21,00		1990	22,22	21,87
1971	20,68		1991	21,13	20,75
1972	20,63		1992	21,36	20,85
1973	21,28		1993	22,06	21,56
1974	20,26		1994	22,59	21,44
1975	20,36	20,45	1995	22,16	21,88
1976	20,05	20,35	1996	21,06	21,30
1977	21,78	21,70	1997	22,21	22,33
1978	20,66	20,88	1998	21,83	21,79
1979	20,16	21,13	1999	23,12	22,99
1980	20,42	20,41	2000	22,56	22,11
1981	21,46	21,36	2001	23,15	22,97
1982	21,64	21,53	2002	22,70	22,52
1983	21,45	22,03	2003	22,63	22,01
1984	20,98	20,74	2004	22,24	21,93
1985	21,93	21,67	2005	22,15	29,03
1986	22,51	21,38	2006	22,47	22,52
			Total	863,00	699,60
			Moyenne	21,58	21,86

Tab.8 - Températures moyennes annuelles (stations : El Oued, Touggourt)

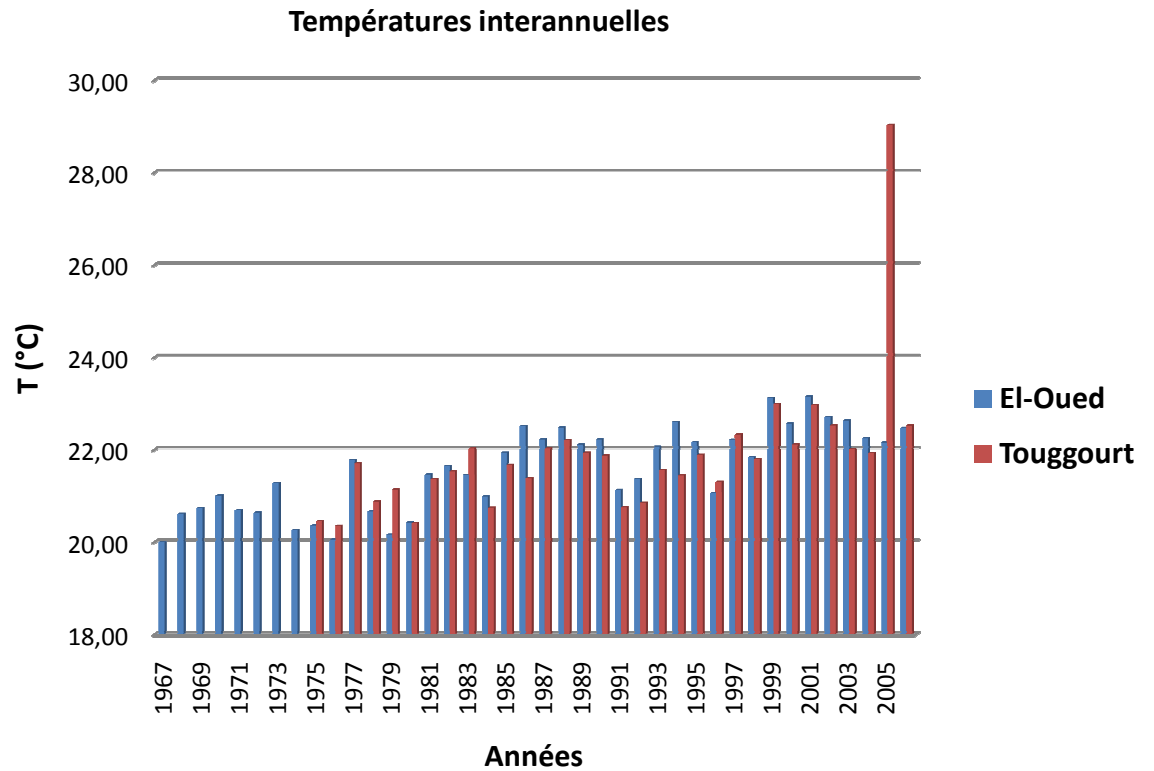


Fig.41 - Températures moyennes annuelles (stations : El Oued, Touggourt)

2.2.2- Rapports précipitation-température

2.2.2.1- Diagramme pluviothermique (Gausсен et Bagnouls)

Son objectif est la détermination de la période sèche ou humide, au cours de la même durée d'observation.

Pour établir ce diagramme, on doit présenter les deux courbes (Température (°C) et Précipitation (mm)) sur un même graphe contenant les deux paramètres à la fois.

Les températures sont représentées sur une échelle double à celle des précipitations.

L'intersection des deux courbes, définit la zone humide. Autrement dit, si la courbe des précipitations est au dessus de celle des températures, la période est dite : humide. Si on a au contraire, la courbe des précipitations est au dessous de celle des températures, la période est dite : sèche.

Ce même principe est appliqué pour le mois. Un mois est dit sec, si sa lame d'eau moyenne est inférieure ou égale au double de sa température moyenne enregistrée.

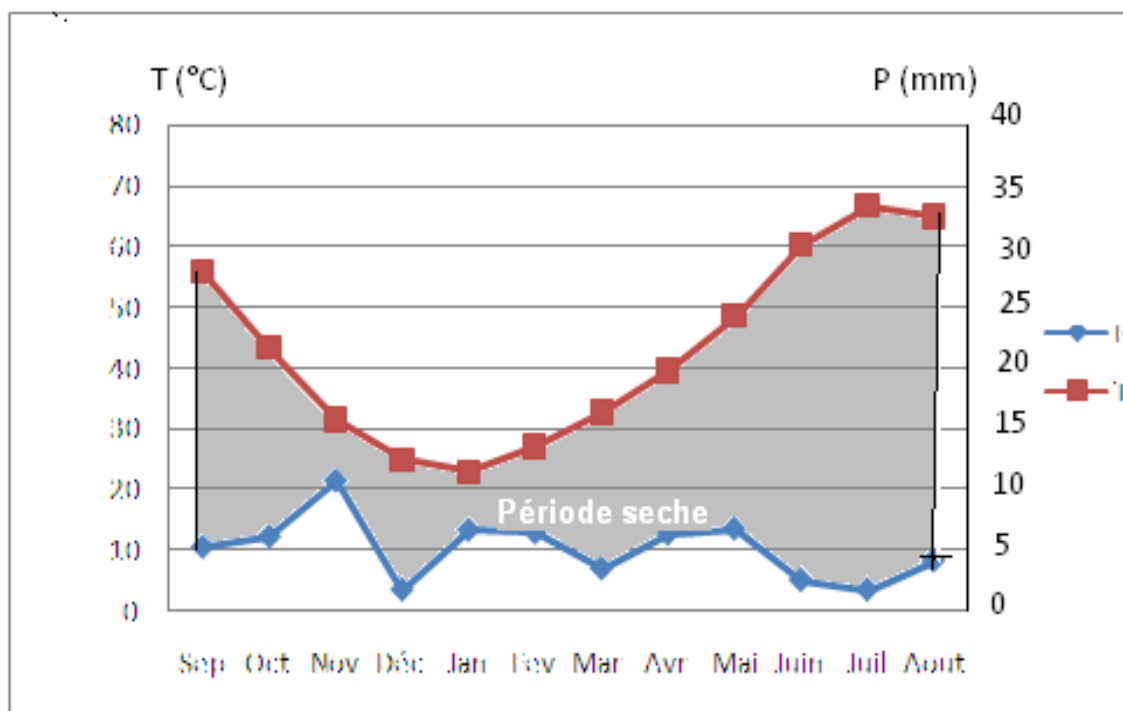


Fig.42 - Diagramme pluvio-thermique: station de Biskra

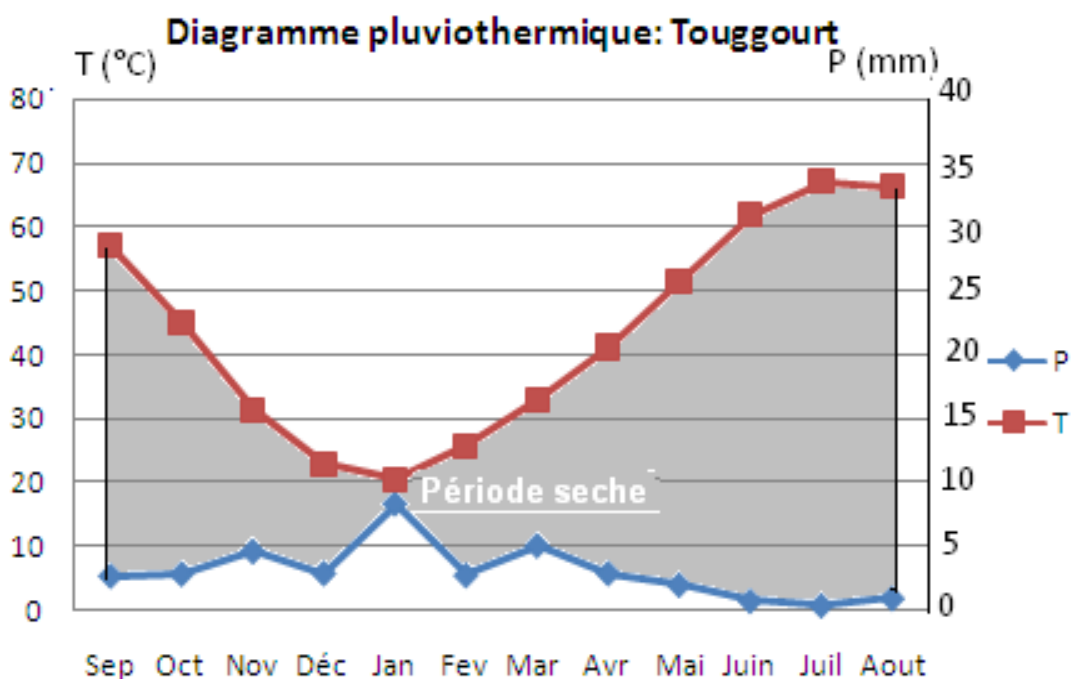


Fig.43 - Diagramme pluvio-thermique: station de Touggourt

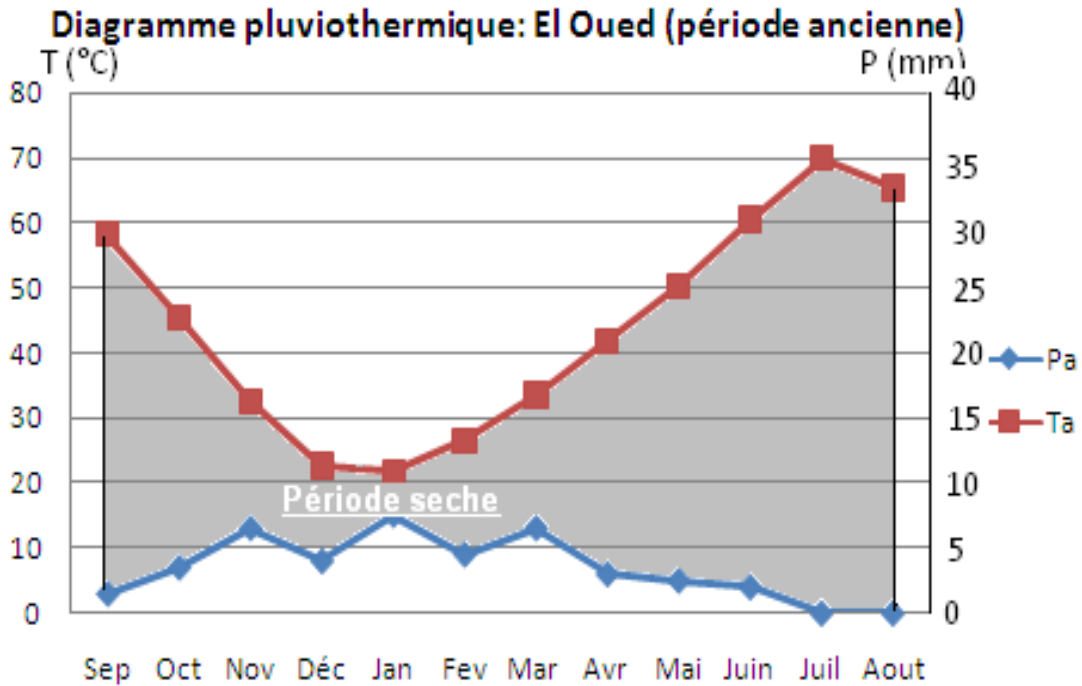


Fig.44 - Diagramme pluvio-thermique: station d'El Oued (p : ancienne)

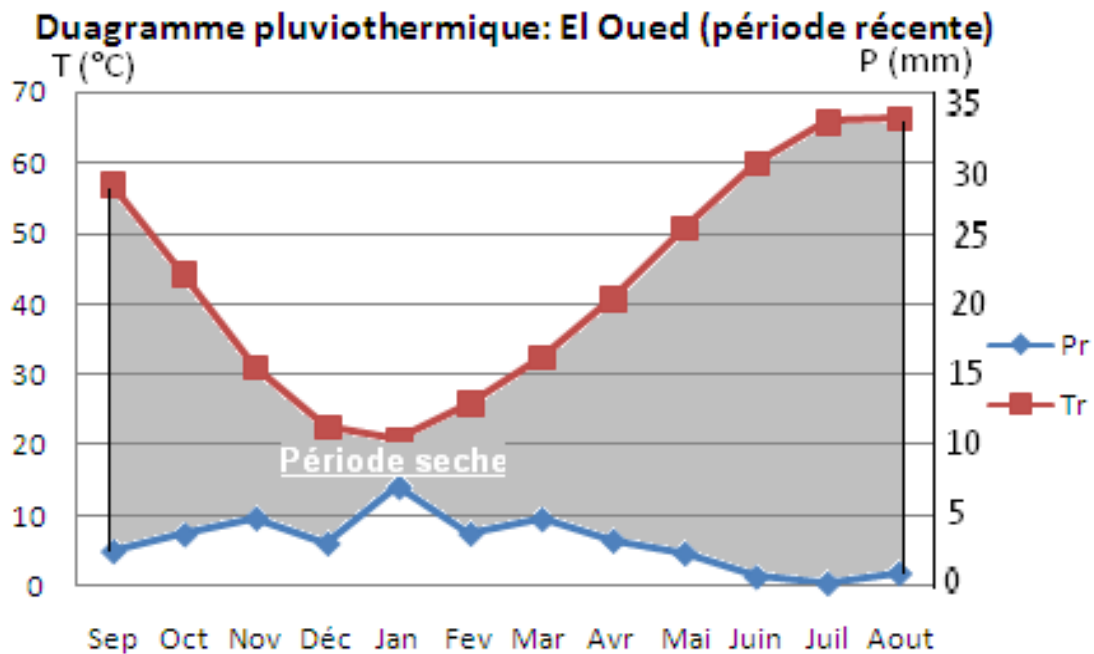


Fig.45 - Diagramme pluvio-thermique: station d'El Oued (p : récente)

D'après les quatre diagrammes, nous distinguons la présence d'une seule période (sèche) qui règne sur la région d'El Oued et sur les stations situées au nord (Biskra) et au

Sud-Ouest (Touggourt), donc sur tout le Sahara septentrionale. Ce phénomène d'aridité caractérise toutes les saisons, à l'exception du mois de Janvier qui est moins sec. (Fig.42à45)

Ce climat désertique nous renseigne sur l'année déficitaire en eau d'où la nécessité de prendre soin des ressources hydriques souterraines non renouvelables.

2.2.2.2- Climagramme d'Emberger

L'utilisation de ce diagramme, qui comporte en abscisses la valeur de la température minimale enregistrée pendant la période étudiée et en ordonnées le quotient pluviométrique Q, nous permet la localisation du climat de la zone d'étude. (Fig.46)

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

Q : Quotient pluviométrique d'Emberger

P : Lamé d'eau moyenne annuelle (mm)

M : Total de température du mois le plus chaud (°C)

m : Total de température du mois le plus froid (°C)

L'application numérique pour la période de quatre décennies (station d'El-Oued) nous donne :

M = Somme des températures du mois d'Aout = 1326 °C

m = Somme des températures du mois de Janvier = 418 °C

$$Q = \frac{2000 \times 74,39}{1326^2 - 418^2} = 0,094$$

Les coordonnées du climagramme d'Emberger seront donc : (8.4 et 0.094)

L'application numérique pour la période de 3.2 décennies (station de Touggourt) nous donne :

M = Somme des températures du mois d'Aout = 1084.8 °C

m = Somme des températures du mois de Janvier = 335.04 °C

$$Q = \frac{2000 \times 73.50}{1084.8^2 - 335.04^2} = 0.138$$

Les coordonnées du climagramme d'Emberger seront donc : (8.1 et 0.138)

L'application numérique pour la période d'une décennie (station de Biskra) nous donne :

M = Somme des températures du mois d'Aout = 334 °C

m = Somme des températures du mois de Janvier = 117 °C

$$Q = \frac{2000 \times 124.1}{334^2 - 117^2} = 2.53$$

Les coordonnées du climagramme d'Emberger seront donc : (7.2 et 2.53).

On remarque donc que les trois stations sont localisées dans la zone d'un climat chaud **hyper aride** (Fig.46).

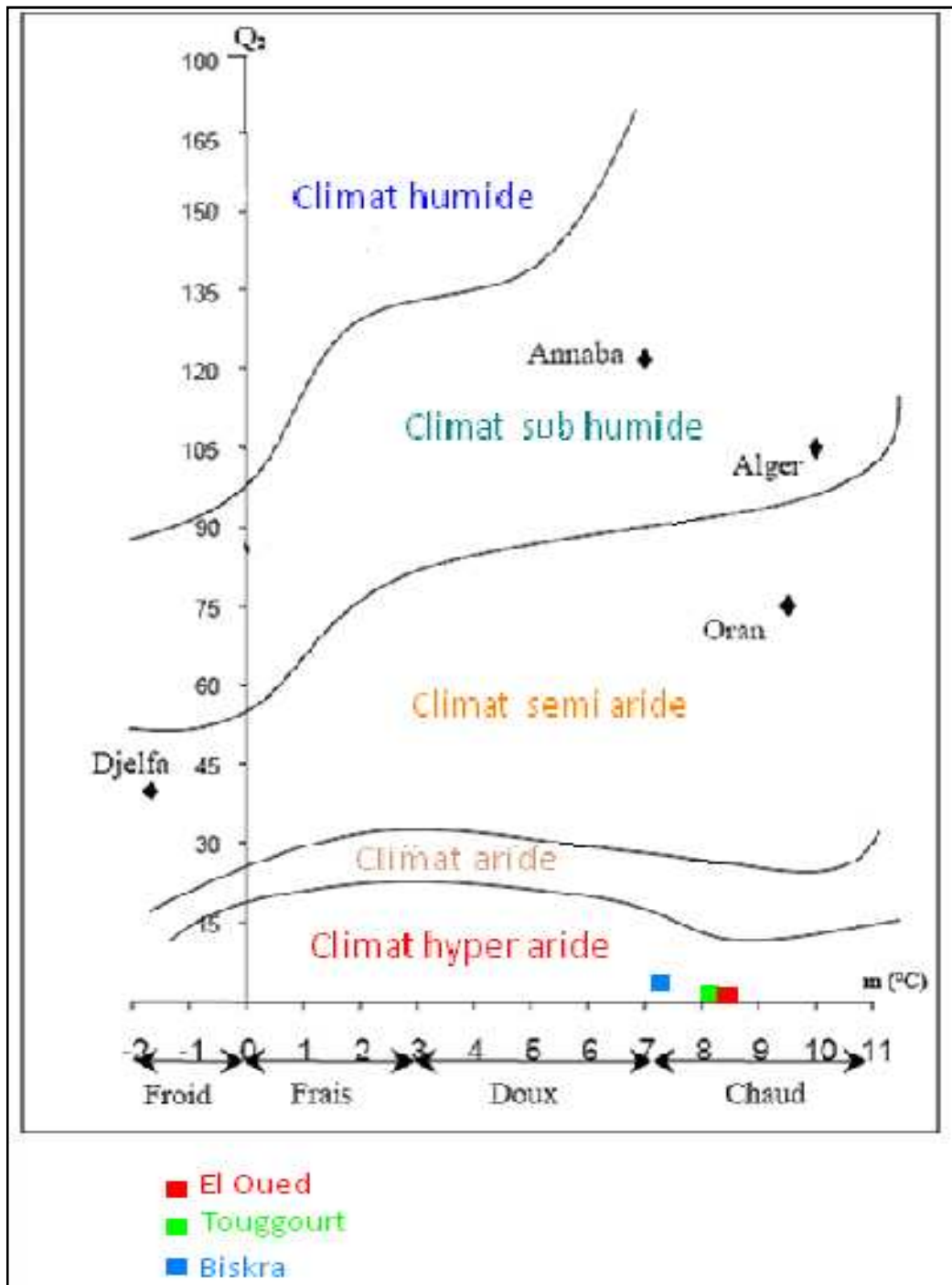


Fig.46 - Localisation du climat des trois zones (El Oued, Touggourt et Biskra)

2.2.2.3- Indice d'aridité de De Martonne

Comme le montre sa relation,
$$I = \frac{P}{T + 10}$$
, cet indice est fonction de la lame d'eau

moyenne mensuelle précipitée :P(mm) et de la température moyenne annuelle :T(°C)

$$\text{L'application numérique pour : - la région d'El-Oued : } I = \frac{74.39}{21.58 + 10} = 2.35$$

$$\text{la région de Touggourt : } I = \frac{73.50}{21.86 + 10} = 2.30$$

$$\text{la région de Biskra : } I = \frac{123.9}{21.7 + 10} = 3.90$$

A partir de la classification, définie par De Martonne, on peut déterminer le type de climat

Indice	Type de climat
20 < I < 30	Climat tempéré (humide)
10 < I < 20	Climat semi-aride
7.5 < I < 10	Climat steppique
05 < I < 7.5	Climat désertique
I < 5	Climat hyper-aride

Tab.9 - Type de climat selon la classification par De Martonne.

D'après le tableau, les trois régions font partie du climat : **hyper aride** (Tab.9).

On peut ajouter une autre méthode qui utilise aussi le rapport : lame d'eau précipitée- température, pour connaître la variation de l'humidité du sol, c'est : la méthode d'Euverte.

2.2.2.4- La méthode d'Euverte

Elle permet l'établissement de trois sortes de régimes

un régime humide, quand le rapport : $\frac{P}{T} > 2$

un régime sec, quand le rapport : $1 < \frac{P}{T} < 2$

un régime très sec, quand le rapport : $\frac{P}{T} < 1$

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pmoy(mm)	5.01	7.4	9.7	6.13	14.1	7.51	9.57	6.52	4.71	1.39	0.46	1.9
Tmoy (°C)	28,48	22,13	15,57	11,3	10,46	12,97	16,2	20,4	25,4	29,99	32,91	33,15
P / T	0.17	0.33	0.62	0.54	1.34	0.57	0.59	0.31	0.18	0.04	0.01	0.05

Tab.10 – Régime du climat selon la méthode d'Euverte (Station d'El Oued)

D'après le tableau 10, le régime (très sec) est le prépondérant avec un rapport (P / T) < 1.

Le seule mois (sec) est celui de juin avec le rapport (P / T) > 1.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pmoy(mm)	5.5	5.8	9.3	5.9	16.7	5.6	10.2	5.9	4.1	1.6	0.9	2
Tmoy (°C)	28,57	22,61	15,72	11,43	10,29	12,9	16,48	20,63	25,81	31,03	33,61	33,26
P / T	0.19	0.25	0.59	0.51	1.62	0.43	0.61	0.28	0.16	0.05	0.02	0.06

Tab.11 – Régime du climat selon la méthode d'Euverte (Station de Touggourt)

La même remarque pour la région de Touggourt (Tab.11).

Biskra

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pmoy(mm)	10.5	12.2	21.4	3.5	13.3	12.9	7.0	12.7	13.5	5.1	3.5	8.3
Tmoy (°C)	28	21,7	15,8	12,5	11,5	13,6	16,4	19,8	24,3	30,2	33,4	32,5
P / T	0.37	0.56	1.35	0.28	1.15	0.94	0.42	0.64	0.55	0.16	0.10	0.25

Tab.12 – Régime du climat selon la méthode d’Euverte (Station de Biskra)

La région de Biskra présente le même régime que celui d’El-Oued et Touggourt mais avec deux mois plus humides (novembre et janvier) (Tab.12).

Donc, sur toute la région règne un climat saharien (très sec), durant toute l’année, à l’exception des mois plus humides cités (secs).

2.3- L’humidité relative de l’air

Elle est exprimée en pourcentage (%) et représente la quantité de vapeur d’eau existante dans l’atmosphère.

Mois Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy
El-Oued	48,15	53,00	64,43	69,72	69,36	65,12	47,43	49,25	39,50	34,40	30,26	33,99	50,38
Touggourt	43,87	51,66	61,18	66,03	64,43	55,00	48,65	43,46	39,94	34,69	32,78	34,00	47,97
Biskra	40,00	47,20	54,60	55,90	52,60	51,20	41,30	38,20	34,70	28,90	25,10	29,50	41,60

Tab.13 – Humidité relative. Stations : (El-Oued, Touggourt et Biskra)

Les mois les plus humides sont surtout : décembre et janvier (saison hivernale) avec un taux d’humidité respectivement

- (69.72 % et 69.36 %) pour la station d’El-Oued
- (66.03 %) pour la station de Touggourt (décembre).
- (55.90 %) pour la station de Biskra (décembre) (Fig.47).

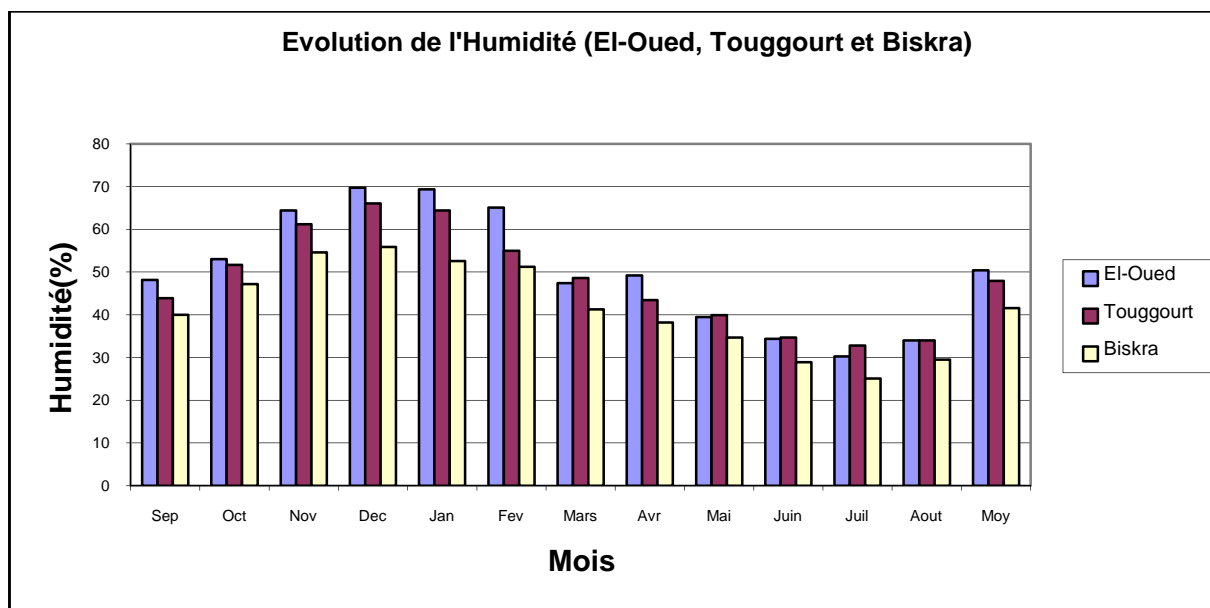


Fig.47 - Histogramme de répartition de l'humidité moyenne mensuelle pour les memes périodes. Stations (El Oued, Touggourt et Biskra).

Le minimum d'humidité est enregistré aux mois de Juillet et Aout (saison d'été) avec

- (30.26 %) pour la station d'El-Oued (juillet).
- (32.78 %) pour la station de Touggourt (juillet).
- (25.10 %) pour la station de Biskra (juillet).

On remarque que l'humidité relative varie presque du simple au double entre la saison de l'hiver et celle de l'été.

2.4- L'évaporation

C'est une étape essentielle pour le mécanisme du cycle de l'eau. Elle augmente proportionnellement avec la durée d'insolation, la température et la surface des eaux exposées à l'atmosphère.

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy
El-Oued	231,0	168,5	125,6	107,8	116,9	127,5	234,4	241,3	254,6	295,8	314,3	291,0	2508,7
Touggourt	279,0	202,8	126,7	110,4	122,4	135,2	212,3	268,0	330,8	392,4	421,7	391,4	2993,1
Biskra	351,0	255,0	183,0	162,0	174,0	195,0	270,0	342,0	405,0	486,0	498,0	495,0	3816,0

Tab.14 - Evaporation moyenne mensuelle (El-Oued, Touggourt et Biskra).

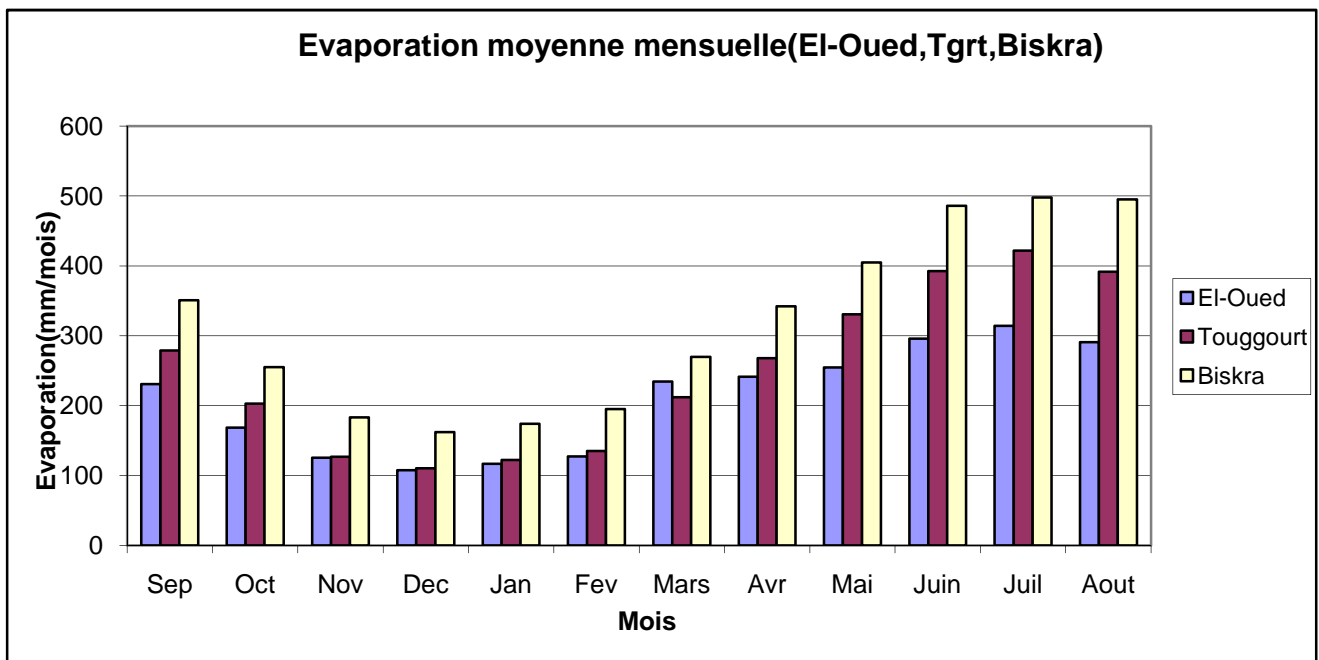


Fig.48 - Histogramme de répartition de l'évaporation moyenne mensuelle pour les memes périodes. Stations (El Oued, Touggourt et Biskra)

Le graphe montre un taux d'évaporation très élevé au mois de juillet et un autre (le moins élevé) au mois de décembre, pour les trois stations (Fig.48).

On remarque aussi une évolution inversement proportionnelle à celle de l'humidité (voir les deux figures : 47 et 48)

2.5- Les vents

2.3.1- Types de vents

Trois types de vents caractérisent cette région, le premier qui est prédominant, à une direction E et NE, désigné fréquemment par EL-BAHRI.

L'autre, à degrés moindre, marqué par des vents chauds (SIRROCO) de direction Ouest et Sud-Ouest, appelé localement CH'HILI.

Le dernier peut durer jusqu'à trois jours mais avec une vitesse plus élevée (40 à 50 km/h) causant une diminution de la visibilité par suite d'entraînement de grains de sables dans le ciel (VENT DE SABLE). Ces derniers coïncident avec la saison du printemps (période de pollinisation des palmiers), souvent du mois de février au mois de mars.

2.3.2 Vitesse des vents

Tab.15 - Moyenne mensuelle des vitesses et nombre de jour du vent

Station : El-Oued Période :1976-2006

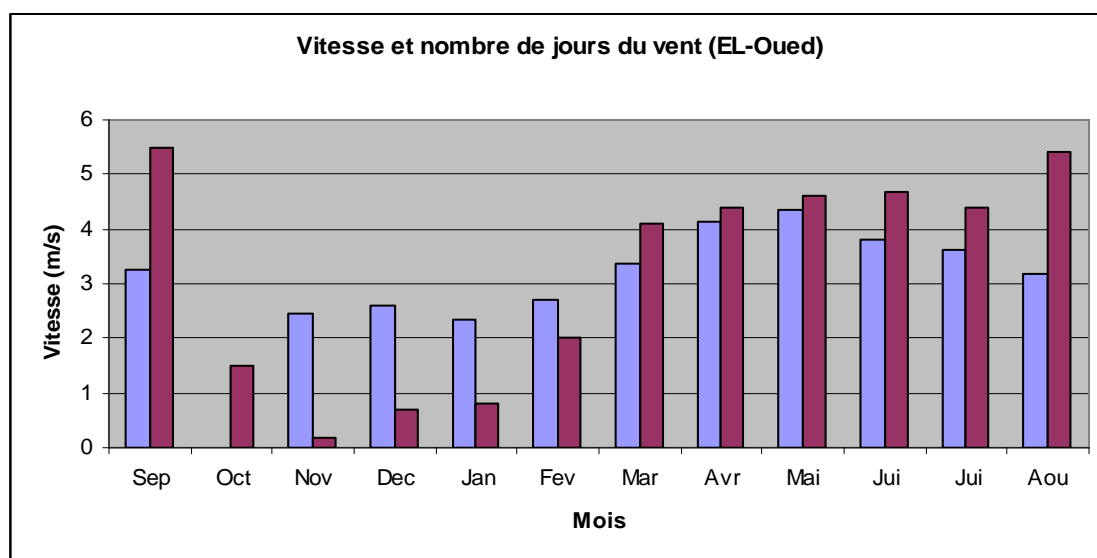
S a i s o n s													
Automne			Hiver				Printemps			Eté			
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Moy
Vitesse(m/s)	3,26	2,40	2,46	2,61	2,33	2,69	3,38	4,12	4,34	3,79	3,63	3,2	3,18
Nbre de jours	5,5	1,5	0,2	0,7	0,8	2	4,1	4,4	4,6	4,7	4,4	5,4	3,19

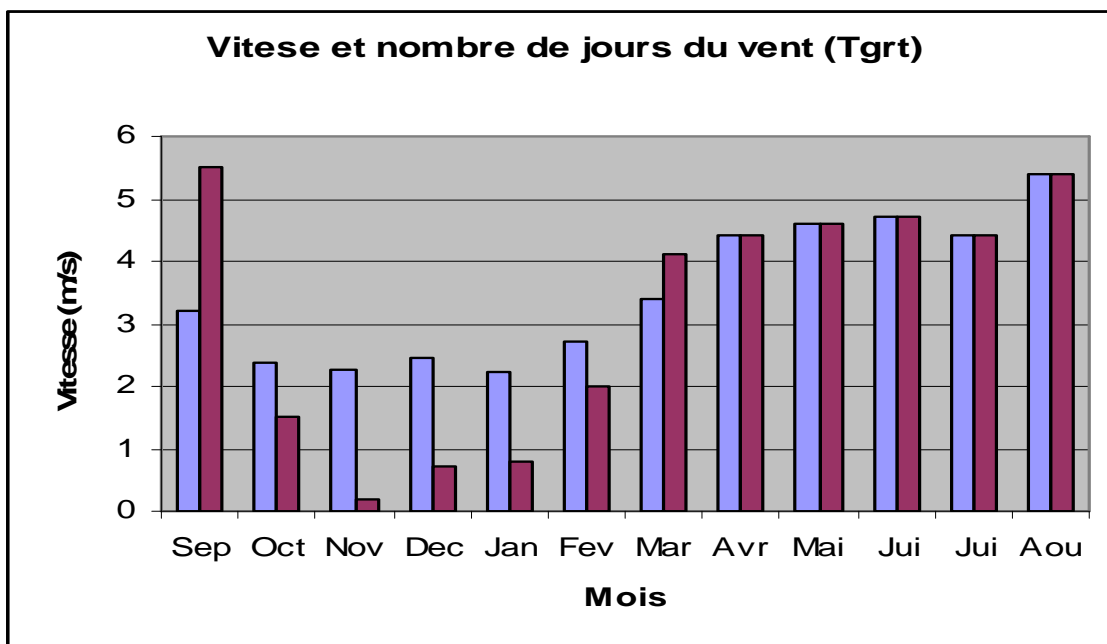
Tab.16 - Moyenne mensuelle des vitesses et nombre de jour du vent

Station : Touggourt Période :1976-2006

S a i s o n s													
Automne			Hiver				Printemps			Eté			
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aout	Moy
Vitesse (m/s)	3,19	2,36	2,28	2,47	2,24	2,71	3,4	4,4	4,6	4,7	4,4	5,4	3,19
Nbre de jours	5,5	1,5	0,2	0,7	0,8	2	4,1	4,4	4,6	4,7	4,4	5,4	3,19

Fig.49 - Histogramme de répartition des vitesses et nombre de jours du vent (station : El Oued)





■ Vitesse (m/s)

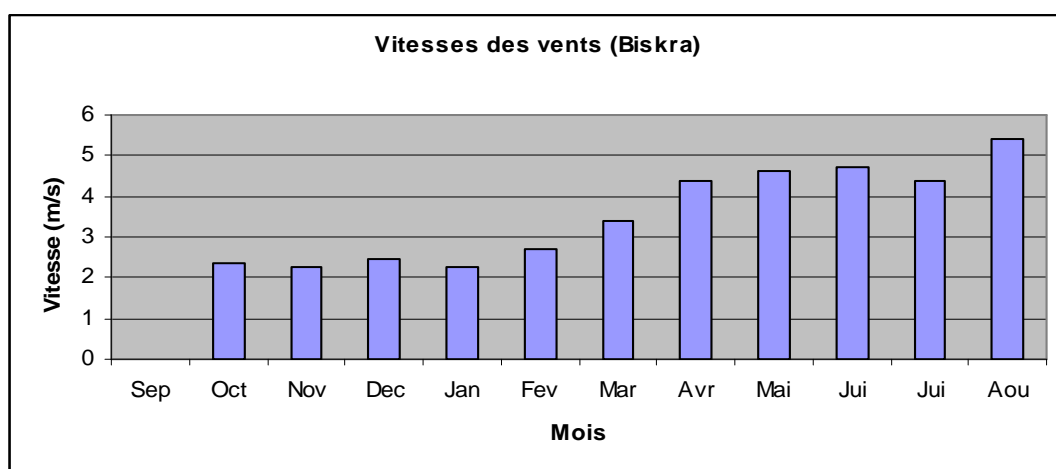
■ Nombre de jours

Fig.50 - Histogramme de répartition des vitesses et nombre de jours du vent (station : Touggourt)

Tab.17-Moyenne mensuelle des vitesses des vents : Station de Biskra Période : 75 - 84

S a i s o n s

Mois	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Moy
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	
Vitesse (m/s)	3.2	3.2	3.2	3.3	3.6	3.9	4.4	4.4	4.9	4.2	3.5	3.5	3.8



■ Vitesse (m/s)

Fig.51 - Histogramme de répartition des vitesses du vent (station : Biskra)

2.3.3 Direction des vents

La direction prédominante des vents est l'Est et le Nord-Est

Direction des vents(ElOued)	N	N-E	E	S-E	S	S-W	W	N-W
Nombre de jours de l'orientation	40	45	75	35	13	40	23	43

Tab.18 - Direction des vents au cours d'une année (El-Oued)

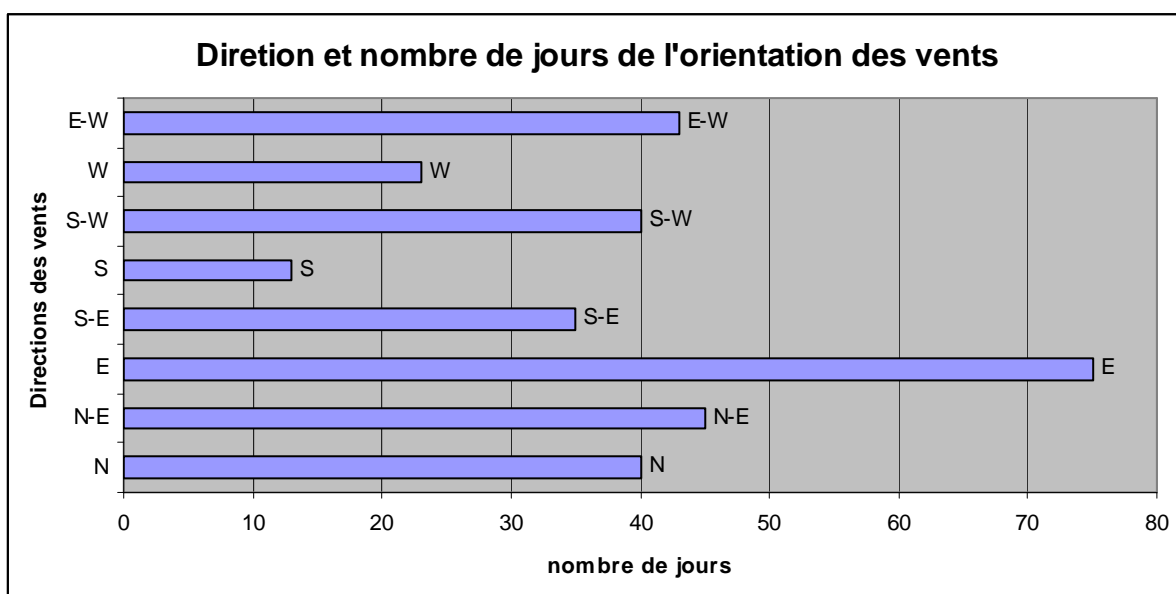


Fig.52 - Orientation et nombre de jours des vents (station : El Oued)

La remarque qu'on peut tirer, du tableau ci-dessus et la figure : 52, est la prédominance des vents à direction E et N-E (120 jours) .

2.4- Durée d'insolation

Elle est exprimée en heure, sa durée débute par le lever du soleil et se termine par son coucher. Elle est fonction des quatre saisons, donc de son éloignement ou rapprochement du soleil et aussi de l'angle d'incidence de ses rayons.

La durée moyenne mensuelle de l'insolation est illustrée dans le tableau suivant :
Période : (1975 – 2006) pour les stations d'El-Oued et Touggourt ,(75 – 1984) pour Biskra

Durée d'insolation moyenne mensuelle « en heure » (El-Oued, Touggourt et Biskra)														
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Som	Moy
El-Oued	276	259	232	229	239	250	277	292	310	346	351	332	3394	283
Touggourt	281	263	237	233	229	236	270	286	313	330	358	338	3374	281
Biskra	282	251	228	220	226	207	260	273	313	339	363	328	3290	274

Tab.19 - Durée d'insolation moyenne mensuelle (El-Oued, Touggourt et Biskra)

Comme nous le montre ce tableau, le nombre d'heures d'ensoleillement est important, atteignant : 3394 heures /an et une moyenne dépassant les 280 heures / mois.

Cette forte quantité de lumière, donc de chaleur, va influencer sur les paramètres tel que l'évaporation, l'évapotranspiration, l'humidité..etc...

On constate que le nombre d'heures d'ensoleillement atteint son maximum au mois de juillet et son minimum au mois de décembre ou janvier (Fig.53).

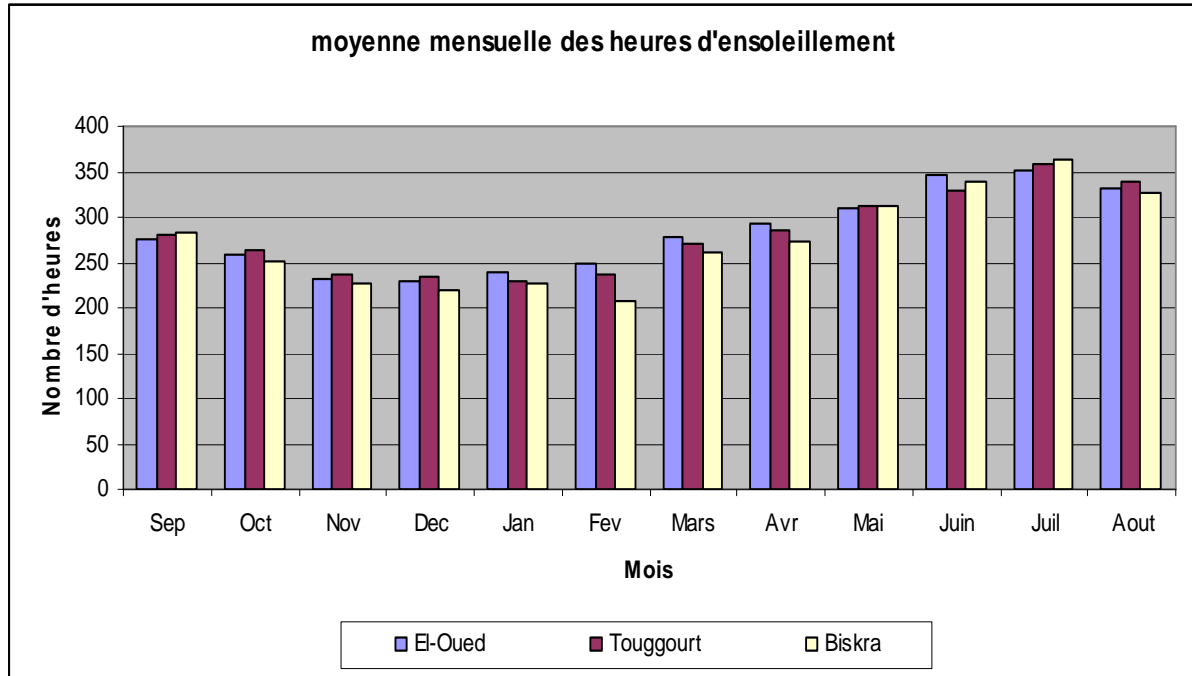


Fig.53 - Moyenne mensuelle de la durée d'insolation (El-Oued, Touggourt et Biskra)

3- Détermination des facteurs du bilan hydrique

La lame d'eau moyenne annuelle tombée, représente la somme des écoulements, infiltration et évapotranspiration réelle. Elle est donnée par la relation suivante :

$$P = ETR + I + R$$

Avec : P : La lame d'eau moyenne annuelle (mm)

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm)

R : Ruissellement moyen annuel (mm)

I : Infiltration moyenne annuelle (mm)

3.1- L'évapotranspiration (ET)

C'est la quantité d'eau restituée à l'atmosphère par l'action conjuguée de l'évaporation et de la transpiration. Elle est exprimée par la hauteur de la lame d'eau évapotranspirée pendant une période déterminée.

Méthodes de mesure et d'évaluation

Les mesures directes de ce paramètre (cases lysimétriques, méthode du vapor transfer) étant très rares, des formules empiriques sont utilisées pour calculer ce terme du bilan hydrologique.

On a deux types d'évapotranspiration

3.2- L'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la quantité d'eau effective évaporée et transpirée, elle correspond au déficit d'écoulement. Ce paramètre est estimé par :

- La formule de Turc : $ETR = f (P , T)$ établie à partir des observations faites sur 254 bassins versants, représentant tous les climats du Globe.

Elle permet de calculer l'évapotranspiration moyenne annuelle réelle en fonction de la température et de la lame d'eau précipitée. Elle est calculée par la formule suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle (mm)

P = hauteur de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée (mm)

L = pouvoir évaporant de l'atmosphère, donné par la relation :

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

(G. Castany)

T = température moyenne annuelle de l'atmosphère (°C)

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Paramètre Station	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
El-Oued	74.40	21.58	1341.98	78.31
Touggourt	73.50	21.86	1368.80	77.44

Tab.20 – Valeurs de L et ETR. Stations (El Oued, Touggourt).

Les valeurs de la lame d'eau précipitée : El-Oued = 74.40 ,Touggourt = 73.50 ne sont pas incluses entre les valeurs de : 0.5λ et 0.125λ , pour appliquer la formule de Coutagne.

avec :

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 T} - 0,26$$

L'évapotranspiration réelle peut être calculée à l'aide de la formule de Thornthwaite

Le premier cas : Si $P - ETP > 0 \rightarrow P > ETP$ donc $ETR = ETP$.

Le deuxième cas : Si $P - ETP < 0 \rightarrow P < ETP$ donc

a - Si $P + RFU > ETP \rightarrow ETR = ETP$

b - Si $P + RFU < ETP \rightarrow ETR = P + RFU$.

3.3- L'évapotranspiration potentielle (ETP):

C'est l'évaporation des eaux, du sol, des surfaces libres et permanentes, ainsi que l'évapotranspiration des plantes et des êtres vivants, pouvant être restitués à l'atmosphère. Elle est calculée en utilisant : la méthode de C. W. Thornthwaite

$$ETP = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a$$

$$a = 0,49239 + (1792 \cdot 10^{-5})I - (771 \cdot 10^{-7})I^2 + (675 \cdot 10^{-9})I^3$$

ETP = L'évapotranspiration potentielle (mm)

T = température moyenne mensuelle (°C)

I = indice thermique annuel

G. Castany et M. Serra proposent pour le calcul de a, la relation :

$$a = \left(\frac{1,6}{100} \right) I + 0,5$$

$$I = \sum i = \sum \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

i = Indice thermique mensuel

Après l'application numérique, les résultats sont donnés au tableau suivant :

Paramètre Mois	Température T (°C) El-Oued	Température T (°C) Touggourt	Indice thermique El-Oued	Indice thermique Touggourt	ETP (mm) El-Oued	ETP (mm) Touggourt
Sep	28.48	28.57	13.93	14.64	132,9	131,47
Oct	22.13	22.61	9.51	9.82	73,46	74,98
Nov	15.57	15.72	5.58	5.66	32,15	31,34
Déc	11.3	11.43	3.44	3.49	15,14	14,58
Jan	10.46	10.29	3.05	2.98	12,62	11,33
Fév	12.97	12.9	4.23	4.20	20,93	19,5
Mar	16.2	16.48	5.93	6.08	35,29	35,1
Avr	20.4	20.63	8.40	8.55	60,67	60,18
Mai	25.4	25.81	11.71	12	101,56	103,02
Juin	29.99	31.03	15.06	15.86	150,06	160,29
Juil	32.91	33.61	17.33	17.89	186,68	194,16
Aout	33.15	33.26	17.52	17.62	189,89	189,34

Tab.21 – Indices thermiques mensuels et ETP. Stations (El Oued, Touggourt)

K = 1 si l'humidité relative, hr ≥ 50 %.

$$\text{Si } hr < 50 \%, \quad K = 1 + \frac{50 - hr}{70}$$

$$\text{ETPc (mm)} = \text{ETP} \times K$$

Paramètre Mois	Coefficient D'ajustement Mensuel : K El-Oued-Touggourt	ETP corrigé (ETPc) El-Oued	ETP corrigé (ETPc) Touggourt
Sep	1.02 - 1.08	135.56	141.98
Oct	1 - 1	73.46	74.98
Nov	1 - 1	32,15	31.34
Déc	1 - 1	15.14	14 .58
Jan	1 - 1	12.62	11.33
Fév	1 - 1	20.93	19.5
Mar	1.04 - 1.02	36.70	35.80
Avr	1.01 – 1.13	61.27	68.00
Mai	1.15 – 1.14	116.79	117.44
Juin	1.22 – 1.21	183.07	193.95
Juil	1.28 -1.24	238.95	240.75
Aout	1.22 – 1.23	233.56	232.88

Tab.22- Coefficient d'ajustement mensuel et ETP corrigée. Stations (El Oued, Touggourt)

La variation de l'ETP moy mensuelle montre que cette dernière atteint son maximum, pour les deux stations, au mois de juillet (El-Oued =238.95 et Tgrt =240.75) et son minimum au mois de janvier (El-Oued = 12.62 et Tgrt =11.33) pour les mêmes périodes citées ultérieurement. (Fig.54)

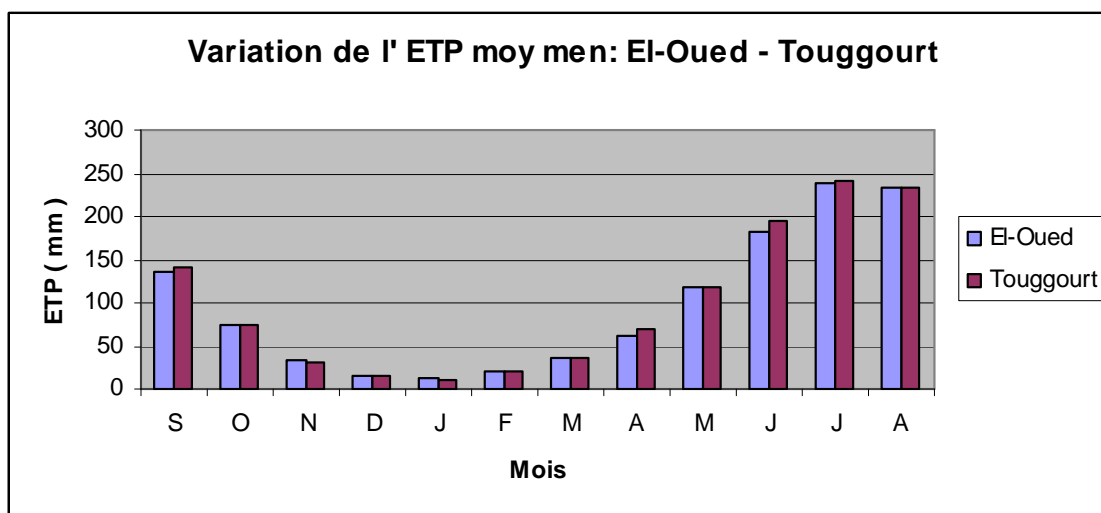


Fig.54 - Histogramme des variations de l'ETP moyenne mensuelle (station : El Oued et Touggourt)

3.4- Détermination du Ruissellement (R)

Le ruissellement peut être calculé en utilisant la valeur de la lame d'eau moyenne précipitée (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la formule de Tixeront-Berkaloff

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

R = Ruissellement (mm)

P = Lamme d'eau moyenne mensuelle précipitée (mm)

ETP = Evapotranspiration potentielle annuelle (mm)

L'utilisation de cette relation est valable pour notre terrain, car il est situé à une isohyette inférieure à 600 mm.

Les résultats sont donnés au tableau suivant:

Station \ Paramètre	P (mm)	ETP (mm)	R (mm)
El-Oued	74.40	1160.20	0.101
Touggourt	73.50	1182.53	0.094

Tab.23 – ETP annuelle et Ruissellement. Stations (El Oued, Touggourt)

3.5- Estimation de la Réserve Facilement Utilisable :RFU

Ce paramètre caractérise l'humidité ou la sécheresse d'un sol, autrement dit, c'est la réserve d'eau contenue dans le sol et nécessaire pour le développement physiologique des plantes.

Les résultats de calcul de Thornthwaite donnent une valeur moyenne de

RFU = 100 mm. Pour plus de précision, Hallaire propose la formule suivante :

$$RFU = \frac{C - F}{100} (h \cdot da) + 30$$

C = Capacité au champ

F = Capacité au point de flétrissement

h = Profondeur du sol

Da = Densité apparente du sol

Il a proposé aussi,

Pour un sol sablo-limoneux : C - F = 5 % (cas de notre terrain)

Pour un sol limoneux : C - F = 10 %

Pour un sol argilo-limoneux C - F = 20 %

Da = 1 , h = 500 mm (Profondeur d'enracinement)

L'application numérique nous donne RFU = 55 mm.

Tab.24 - Bilan El-Oued

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil
P (mm)	5,01	7,4	9,7	6,13	14,1	7,51	9,57	6,52	4,71	1,39	0,46
T (°C)	28,48	22,13	15,57	11,3	10,46	12,97	16,2	20,4	25,4	29,99	32,91
I	13,93	9,51	5,58	3,44	3,05	4,23	5,93	8,4	11,71	15,06	17,33
K	1,02	1	1	1	1	1	1,04	1,01	1,15	1,22	1,28
ETR	5,01	7,4	9,7	6,13	14,1	7,51	9,57	6,52	4,71	1,39	0,46
ETP	135,56	73,46	32,15	15,14	12,62	20,93	36,7	61,27	116,79	183,07	238,95
P-ETP	-130,55	-66,06	-22,45	-9,01	1,48	-13,42	-27,13	-54,75	-112,08	-181,68	-238,49
RFU	0	0	0	0	1,48	0	0	0	0	0	0
Déficit	130,55	66,06	22,45	9,01	-1,48	13,42	27,13	54,75	112,08	181,68	238,49
BH	-130,55	-66,06	-22,45	-9,01	1,48	-13,42	-27,13	-54,75	-112,08	-181,68	-238,49

Tab.25 - Bilan Touggourt

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil
P (mm)	5,5	5,8	9,3	5,9	16,7	5,6	10,2	5,9	4,1	1,6	0,9
T (°C)	28,57	22,61	15,72	11,43	10,29	12,90	16,48	20,63	25,81	31,03	33,61
I	14,64	9,82	5,66	3,49	2,98	4,2	6,08	8,55	12	15,86	17,89
K	1,08	1	1	1	1	1	1,02	1,13	1,14	1,21	1,24
ETR	5,5	5,8	9,3	5,9	16,7	5,6	10,2	5,9	4,1	1,6	0,9
ETP	141,98	74,98	31,34	14,58	11,33	19,5	35,8	68	117,44	193,95	240,75
P-ETP	-136,48	-69,18	-22,04	-8,68	5,37	-13,9	-25,6	-62,1	-113,34	-192,35	-239,85
RFU	0	0	0	0	5,37	0	0	0	0	0	0
Déficit	136,48	69,18	22,04	8,68	-5,37	13,9	25,6	62,1	113,34	192,35	239,85
BH	-136,48	-69,18	-22,04	-8,68	5,37	-13,9	-25,6	-62,1	-113,34	-192,35	-239,85

4- Conclusion

La région d'étude appartient au climat Saharien, (zone hyperaride). La pluviométrie est faible à cause du caractère d'aridité qui règne sur tout le Sahara Algérien, mais du nord vers le sud le gradient pluviométrique est décroissant.

Les trois stations météorologiques ont enregistré une moyenne de la lame d'eau tombée égale à :

El Oued :Période ancienne = 73 mm avec une moyenne de 6,08 mm (max : 13 mm, min : 0 mm)

Période récente = 74,40 mm avec une moyenne de 6,20 mm. (max : 14,1 mm, min :0,46 mm)

Biskra la hauteur totale de la lame d'eau enregistrée est de : 123,90 mm avec une moyenne de 10,33 mm (max : 21,4 mm, min : 3,5mm)

Touggourt, la hauteur totale de la lame d'eau enregistrée est de : 73,50 mm avec une moyenne de 6,13 mm. (max : 16,7 mm, min : 2 mm)

On remarque que la quantité d'eau précipitée diminue en allant du Nord vers le Sud, et que l'année la plus pluvieuse est :1991 pour El Oued et 2005 pour Touggourt.

La saison hivernale est la période la plus pluvieuse, avec 27,74 mm de pluie tombée (37 % de la lame d'eau annuelle) pour El-Oued.

Pour Touggourt, la saison hivernale est la période la plus pluvieuse, avec : 27,74 mm de pluie tombée (37 % de la lame d'eau annuelle)

Concernant la température moyenne annuelle enregistrée à la station d'El-Oued (période ancienne) elle est de : 22,91 °C. Pour la période récente elle est de : 21,58 °C

Pour Touggourt, la température moyenne annuelle enregistrée est de : 21,86 ° et Biskra : 21,64 °C. Il s'agit d'un climat désertique hyper aride

Les mois les plus humides sont surtout : décembre et janvier (saison hivernale) avec un taux d'humidité respectivement - (69.72 % et 69.36 %) pour la station d'El-Oued, (66.03 % et 64.43 %) pour la station de Touggourt, et (54.60 % et 55.90 %) pour la station de Biskra.

Le vent prédominant, a une direction E et NE, désigné fréquemment par EL-BAHRI. L'autre, à degrés moindre, marqué par des vents chauds (SIRROCO) de direction Ouest et Sud-Ouest.

Le nombre d'heures d'ensoleillement est important, atteignant : 3394 heures /an et une moyenne dépassant les 280 heures / mois.

Cette forte quantité de lumière, donc de chaleur, va influencer sur les paramètres tel que l'évaporation, l'évapotranspiration, l'humidité..etc. .

La variation de l'ETP moyenne mensuelle montre que cette dernière atteint son maximum, pour les deux stations, au mois de juillet (El-Oued =238.95 et Touggourt =240.75) et son minimum au mois de janvier (El-Oued = 12.62 et Touggourt =11.33) pour les mêmes périodes citées ultérieurement.

CHAPITRE V

Etude Hydrogéologique

Etude de la nappe superficielle

Etude du Système Aquifère du Sahara Septentrionale (SASS) :CT-CI

Remontée des eaux de la nappe superficielle

Age des eaux et vitesse moyenne d'écoulement (Chlore-36)

Les prélèvements dans le Bassin du Sahara Septentrional

CHAPITRE : V. Etude Hydrogéologique

1- Introduction

L'étude hydrogéologique nous a permis l'identification des différents aquifères, leur géométrie, l'évolution du niveau piézométrique, le sens d'écoulement des eaux, les caractéristiques hydrodynamiques et leur mode d'alimentation.

Cela nous conduit à la réalisation:

Des cartes de substratum de l'aquifère.

- Des coupes hydrogéologiques générales, régionales et locales.

- Des cartes piézométriques avec sens des écoulements des eaux.

- L'évaluation des caractéristiques de l'aquifère/ouvrage de captage (Débit spécifique, débit critique,...).

- La détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (Transmissivité, Perméabilité, Porosité efficace,...)

L'étude hydrogéologique générale a montré l'existence de trois horizons aquifère de bas en haut :

Le Continental Intercalaire (CI) qui s'étend sur une superficie de 600000 km², limité dans sa partie ouest par Bechar et Touat, à l'Est il s'étend sur le territoire Libyen, au Sud il est limité par les affleurements du primaire et du socle et enfin au Nord par l'accident Sud atlasique.

Le Complexe Terminal (CT) s'étend sur une superficie de 350000 km². Il est constitué de formations de la fin du Crétacé supérieur (secondaire) jusqu'à la fin du Mio-Pliocène (Tertiaire).

Cet horizon aquifère est constitué de bas en haut par les formations calcaires et dolomies de l'Eocène (aquifère des calcaires), de la deuxième nappe des sables du Pontien et de la première nappe des sables mio-pliocènes.

La nappe superficielle (libre) contenue dans les formations continentales du Quaternaire, se sont des sables fins localement intercalés d'argiles sableuses et gypseuses lenticulaires. Elle couvre toute la région d'étude (Tab.26).

ERE	Etage	Lithologie	Intérêt Hydrogéologique	
Quaternaire		Sables.	Nappe superficielle (la nappe phréatique)	
		Argiles, évaporites.	Substratum (imperméable)	
Tertiaire	Mio-Pliocène	Sables.	1 ^{ère} nappe des sables (Complexe Terminal).	
		Argiles gypseuses	(semi-perméable)	
	Pontien	Sables, graviers et grès	2 ^{ème} nappe des sables (Complexe terminal).	
	Eocène	Moyen	Argiles lagunaires	Substratum (imperméable)
		Inférieur		Nappe des calcaires (Complexe Terminal).
Secondaire	Crétacé	Sénonien calcaire	Dolomies et calcaires	
		Sénonien lagunaire	Evaporites, argiles	
		Cénomaniens	Argiles, marnes	
		Albien Aptien Barrémien	Sables et grès	

Tab.26 –Lithostratigraphie et niveaux aquifères de la région d' El Oued

2- Etude de la nappe superficielle

Cette nappe contenue dans les formations alluvionnaires sableuses et argileuses est la plus sollicitée dans la région pour les besoins d'irrigations. La profondeur du toit de cette nappe varie de quelques mètres à plus de 20 mètres

L'alimentation de cette nappe se fait par les pluies torrentielles, les forages détruits (corrosions) venant des nappes sous-jacentes (CT-CI) les eaux d'irrigations (CT-CI), les eaux industrielles et les eaux d'assainissements.

L'implantation de deux forages (1956-1968) et neuf forages débitants de 20 à 30 l/s (1977-1985) dans le CT ainsi que les conditions, citées ci-dessus, étaient les premiers signes de la remontée des eaux constatées à partir de l'année 1980.

Cette nappe est exploitée par plus de 1200 puits traditionnels destinés en majorité à l'irrigation.

Le sens d'écoulement principal des eaux de cette nappe superficielle est généralement vers le Nord, avec une direction secondaire vers le Nord-Est(Sud et Sud-Est du terrain).

2.1- Fluctuation de la Nappe

Le bureau d'étude B.G a effectué une campagne de mesures durant le mois d'Avril, portant sur 207 points opérationnels, le niveau piézométrique a été relevé sur les 177 puits qui n'étaient pas en pompage, dont une centaine de nouveaux points situés dans les zones urbaines (Fig.55).

L'épaisseur de cette nappe atteint 54 mètres du coté sud du terrain et diminue en allant vers le nord où elle atteint une vingtaine de mètres.

En 2006, la COSIDER a réalisé 58 forages, qui vont servir au drainage vertical, dans le cadre de la lutte contre la remontée des eaux de la nappe superficielle.

A l'aide des données du niveau piézométrique fournies par l'ANRH (Ouargla) et la DHW d'El-Oued, on a pu réaliser quatre cartes de fluctuations du niveau piézométrique de la nappe, pour les années : Février 1993, Mars 1995, Mars 2000 et Avril 2002 (Fig.56 à 59).



Nord

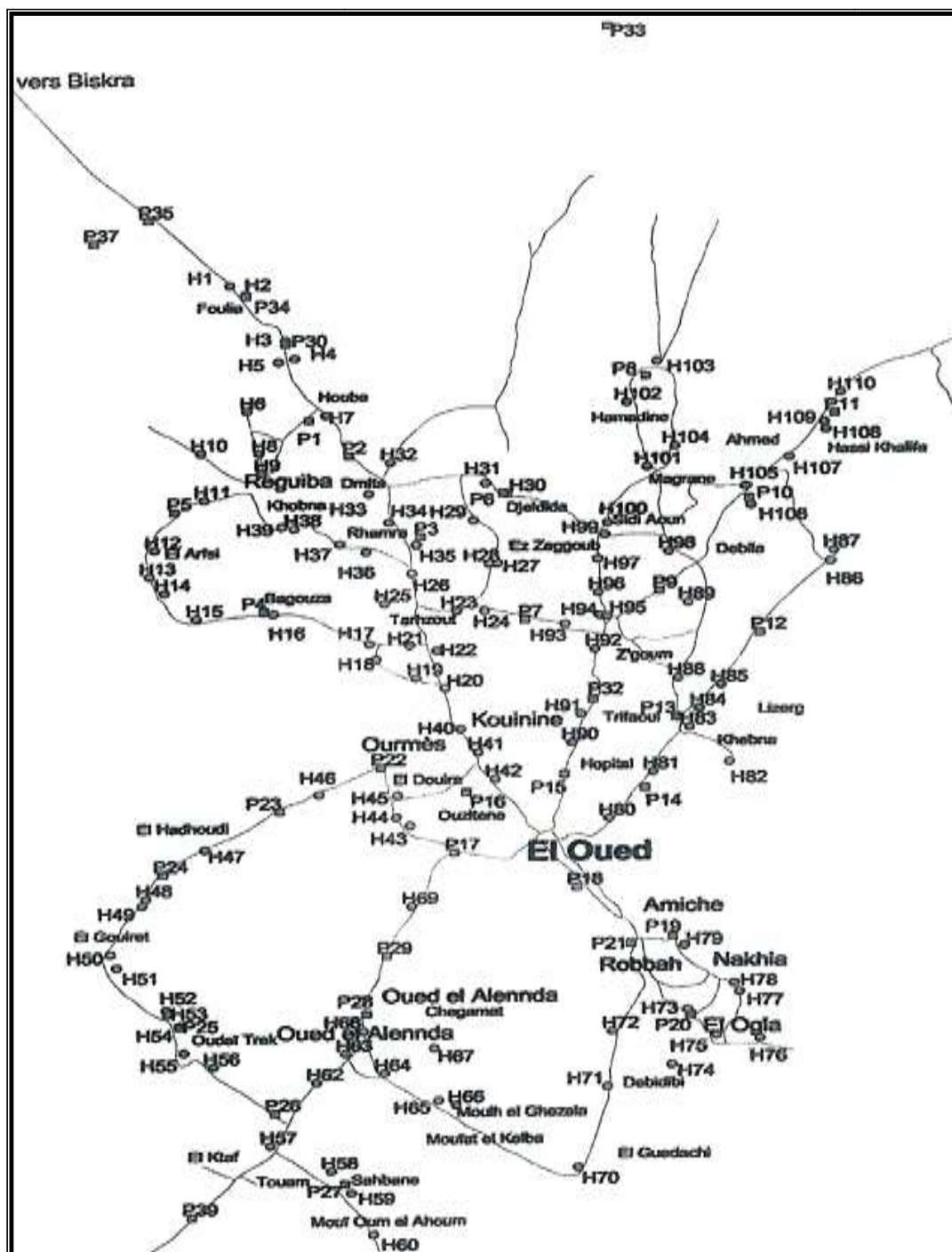


Fig.55 - Carte du réseau de surveillance - El-Oued. H : Puits, P : Piézomètre.

Echelle : 1/400.000^e

~~ : Routes

Carte piézométrique de la nappe superficielle - Février 1993

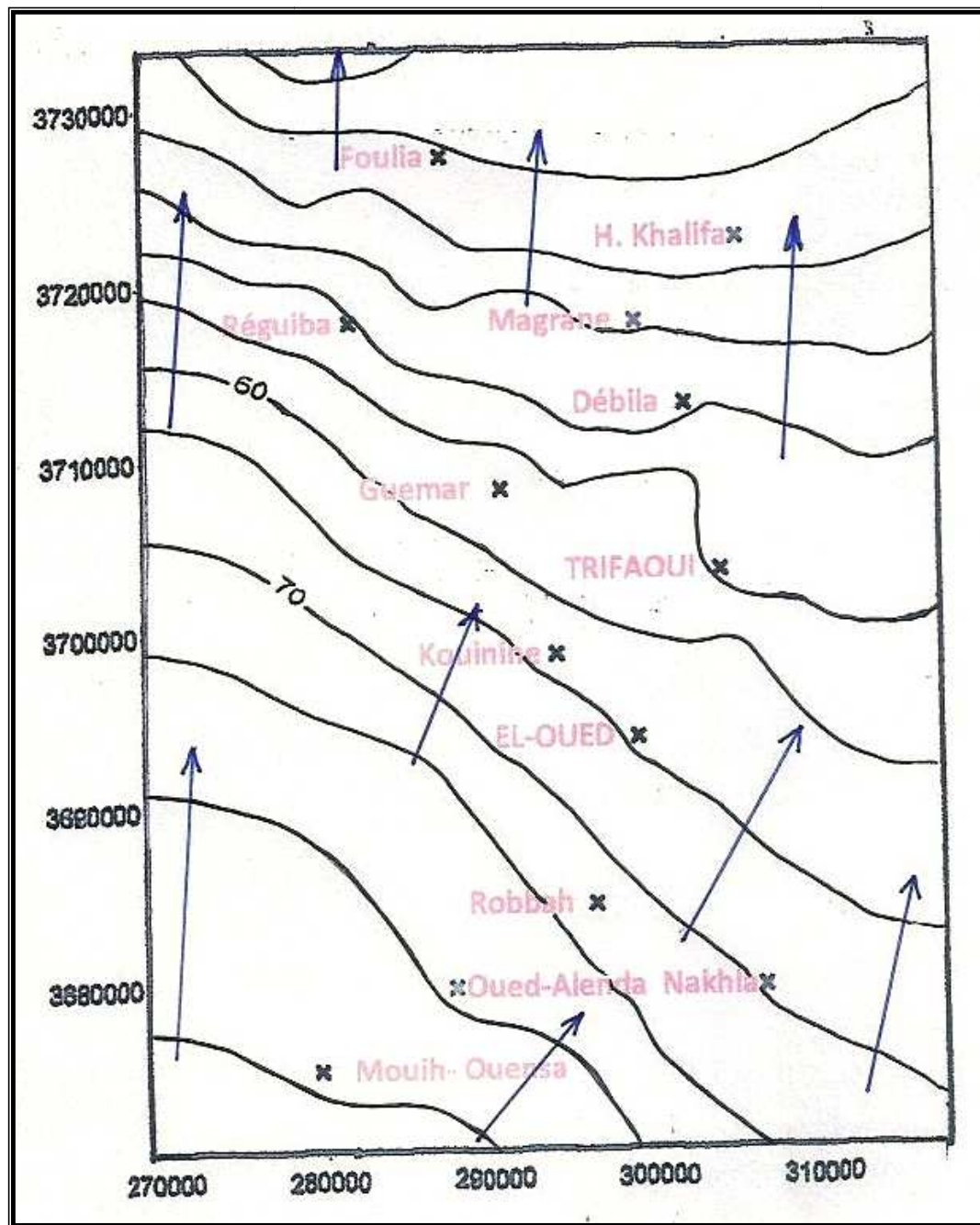


Fig. 56 - Carte piézométrique de la nappe superficielle - Février 1993

Echelle : 1/400.000^e

→ : Sens d'écoulement

— 75 — C. isopièzes

X : localité

Pour l'année 1995, la carte piézométrique de la nappe superficielle est la suivante :

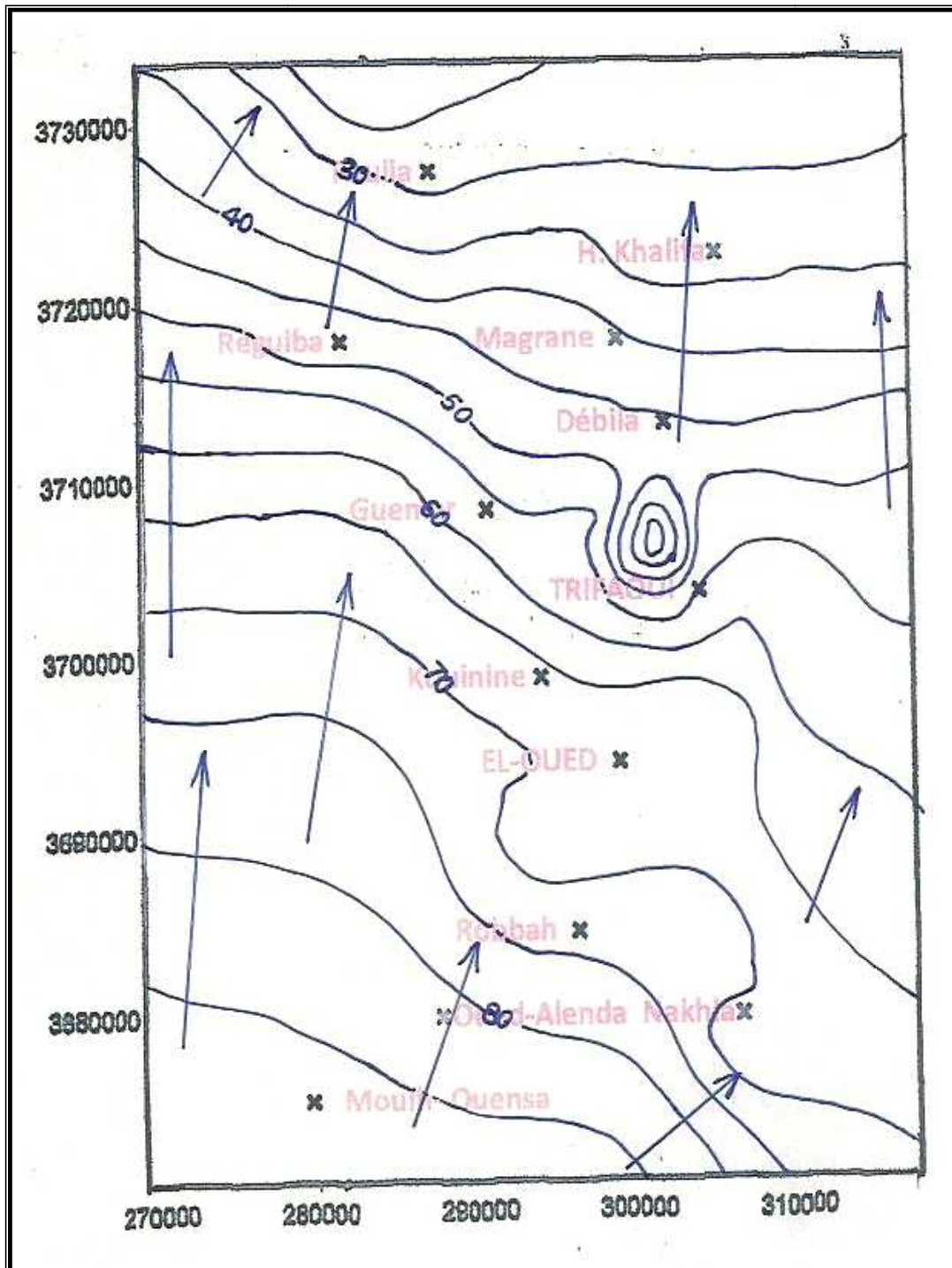


Fig.27 - Carte piézométrique de la nappe superficielle - Mars 1995

Echelle : 1/400.000^e

→ : Sens d'écoulement

— 75 — C. isopièzes

X : localité

Carte piézométrique de la nappe superficielle – Mars 2000

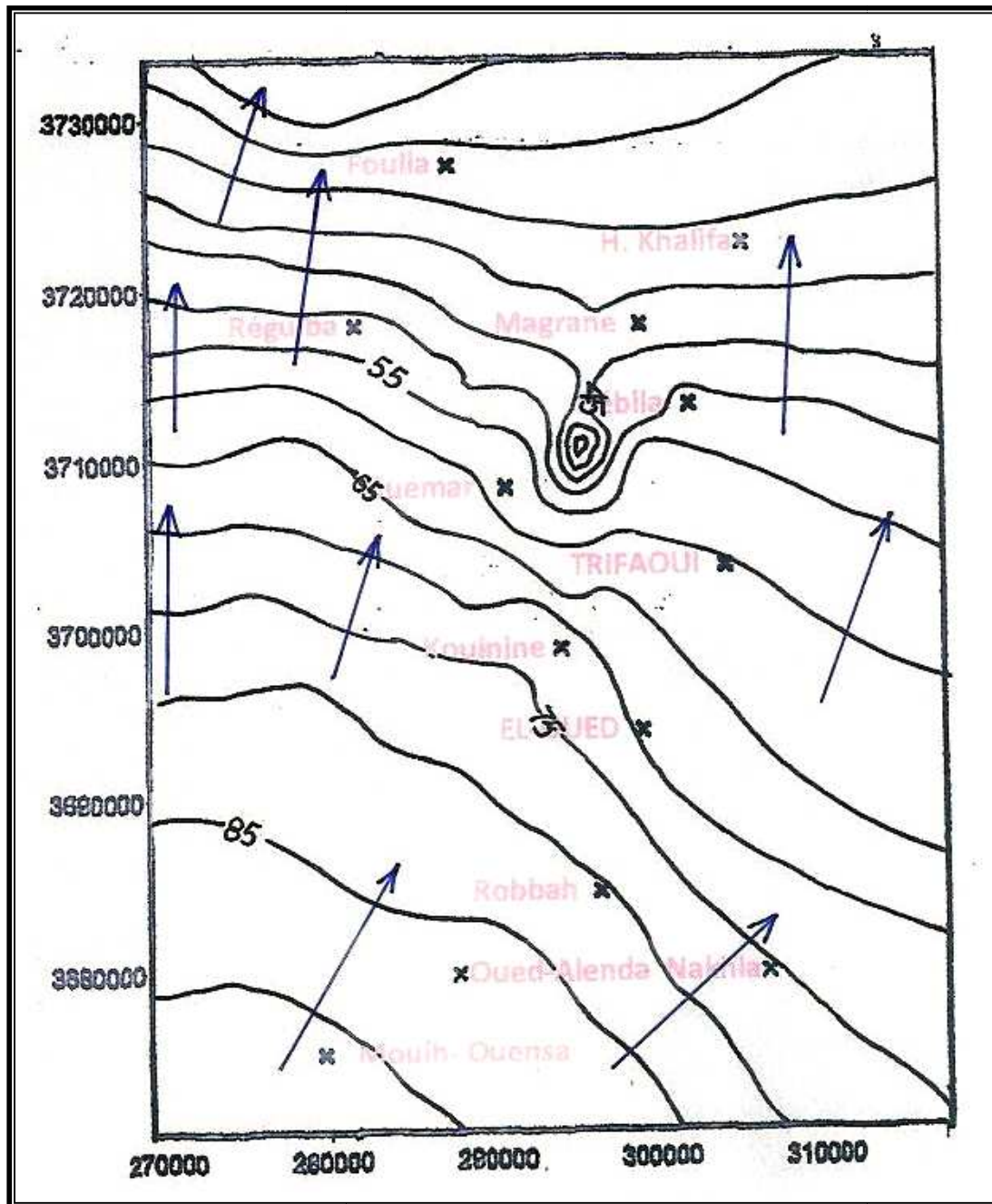


Fig.58 - Carte piézométrique de la nappe superficielle - Mars 2000

Echelle : 1/400.000^e

→ : Sens d'écoulement

— 75 — C. isopièzes

X : localité

Carte piézométrique de la nappe superficielle – avril 2002

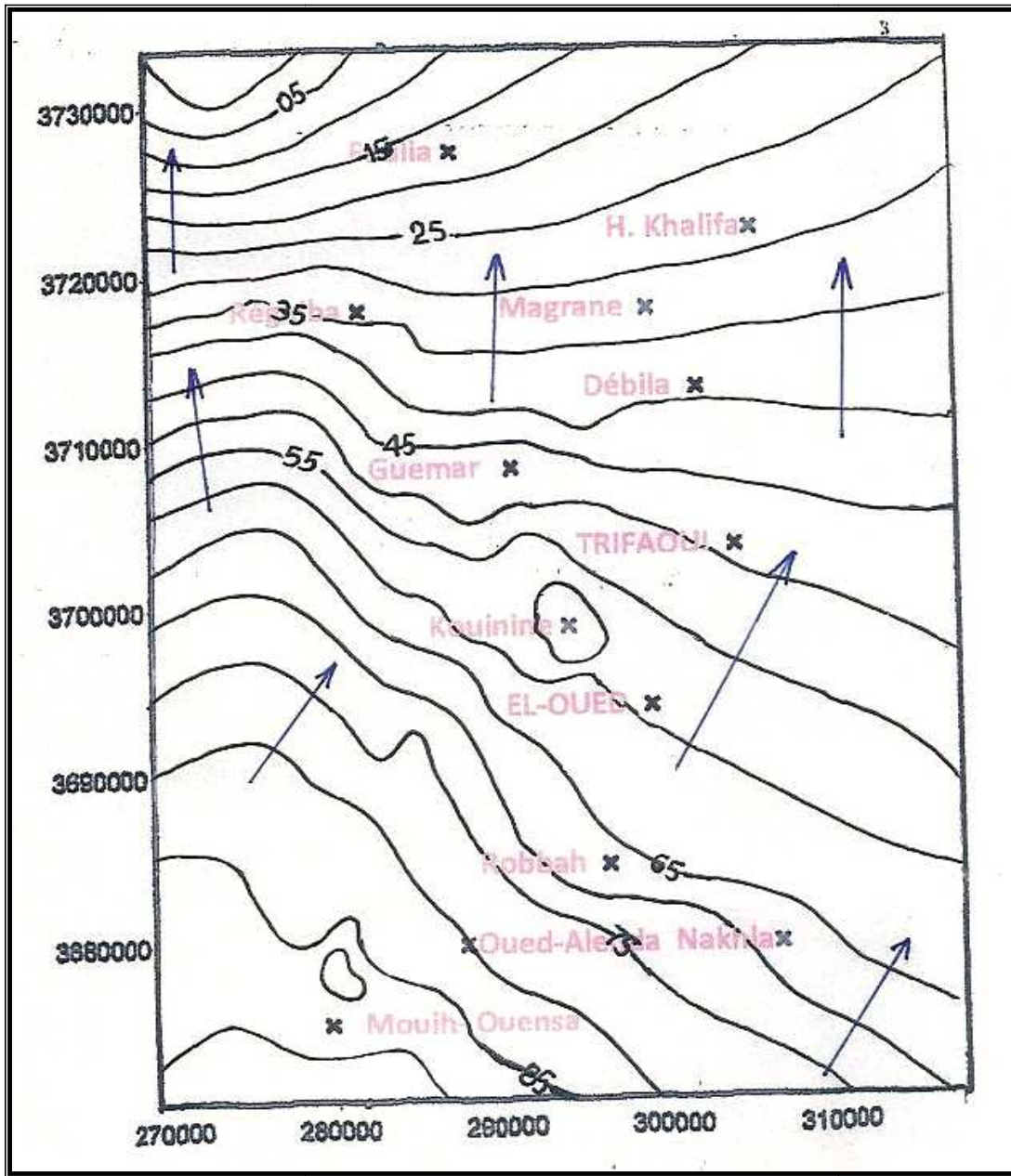


Fig.59 - Carte piézométrique de la nappe superficielle - Avril 2002

Echelle : 1/400.000°

→ : Sens d'écoulement

— 75 — C. isopièzes

X : localité

2.1.1- Interprétation

On remarque que le gradient hydraulique et le sens d'écoulement n'ont pas évolués du coté plein Est du terrain, avec un sens d'écoulement vers le Nord-Est à sa moitié Sud et vers le Nord à sa moitié Nord.

Le gradient hydraulique est faible par rapport au coté Nord-Ouest de la carte. Du coté Ouest du terrain, il a subit une évolution remarquable surtout au mois d'Avril 2002 (partie NW du terrain) ;

Le gradient le plus faible est enregistré du coté Sud-Ouest du terrain, avec une stabilité enregistrée de Février 1993 à Avril 2002.

En Avril 2002 le Nord-Ouest du terrain a subit une baisse importante du niveau piézométrique de la nappe (courbes plus serrées) d'où un gradient hydraulique plus fort.

On constate que la surface piézométrique est irrégulière et instable, soumise à plusieurs facteurs tel que l'alimentation par les rejets des agglomérations, les fuites issues des forages détériorés, les plantations irriguées à partir des nappes profondes, les prélèvements destinés à l'industrie et l'irrigation ainsi que les milieux d'évaporation (les chotts, les ghouts inondés) et l'évapotranspiration (Fig.56 à 59).

2.3- Profils de la nappe superficielle

Pour montrer, les lieux où le niveau piézométrique atteint ou déborde la surface du sol, autrement dit, les zones où se manifeste la remontée de la nappe superficielle, cinq profils ont été réalisés (Fig.59'). Le profil 1, a une direction : NW – SE et traverse la ville d'El Oued. Les autres profils ont une direction : E – W, dont le profil 4 passe aussi par la même ville.

La superposition du profil topographique sur le profil du niveau piézométrique de la nappe superficielle, nous montre l'éloignement ou l'intersection de ces derniers (profils) et donc des indications sur la remontée de la nappe.

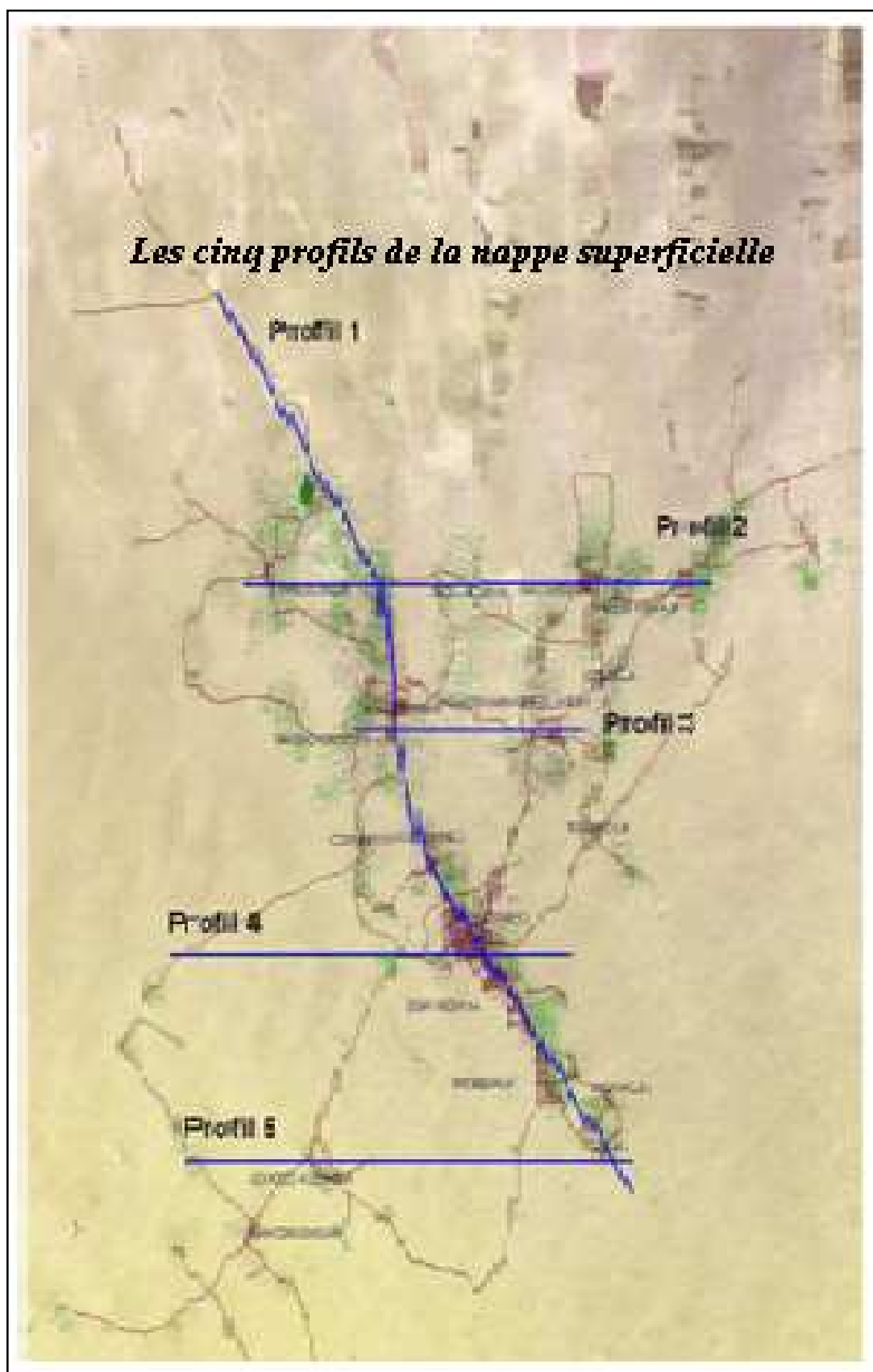


Fig.59' - Localisation des profils de la nappe superficielle

Le profil :1 débute au sud d'El-Ogla et se termine à Foulia, suivant l'axe : Robbah , El-Oued, Kouinine, Guemar . On constate que le niveau piézométrique atteint ou déborde la surface du sol au niveau des agglomérations citées. Cela est due à l'intense utilisation des nappes profondes que ce soit pour l'AEP, l'industrie ou l'irrigation. (Fig.60)

Profil : 1

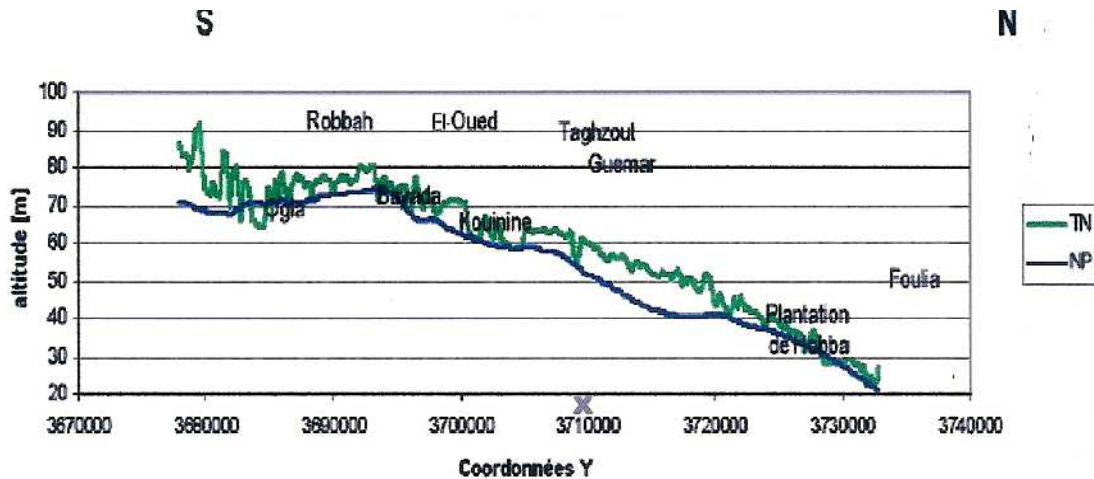


Fig.60 - Profil 1 (NW - SE) de la nappe superficielle passant par les principales agglomérations

TN : Terrain naturel

NP : Niveau piézométrique

Le profil :2 relie Réguiba et Hassi Khalifa en passant par Magrane .Le niveau piézométrique dépasse la surface du sol dans les dépressions et ghouts, alors qu'elle est loin de la surface aux extrémités (Réguiba et Hassi Khalifa). Cela s'explique par l'utilisation des eaux de la nappe superficielle pour l'agriculture (Fig.61).

Profil : 2

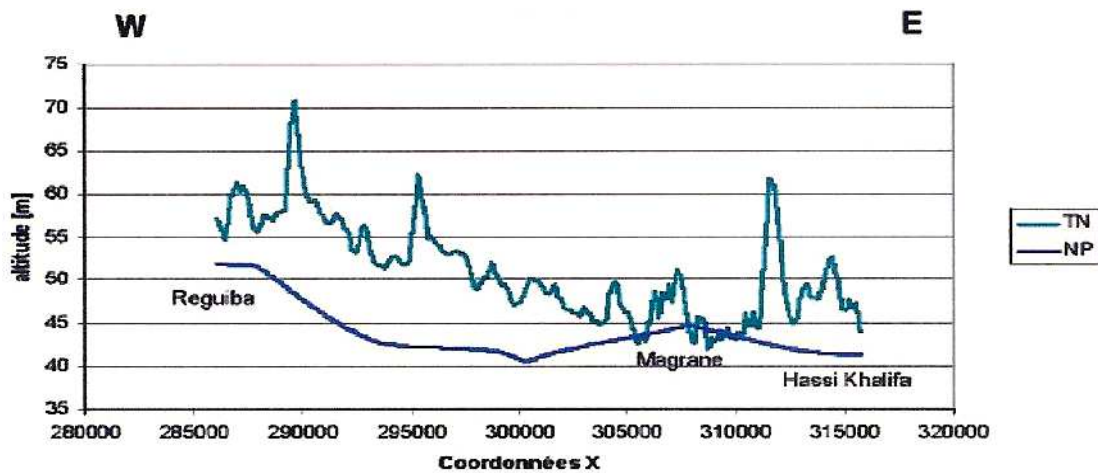


Fig.61 - Profil 2 (E - W) de la nappe superficielle passant par Magrane

La remarque précédente est valable pour le profil :3(Fig.62)

Profil : 3

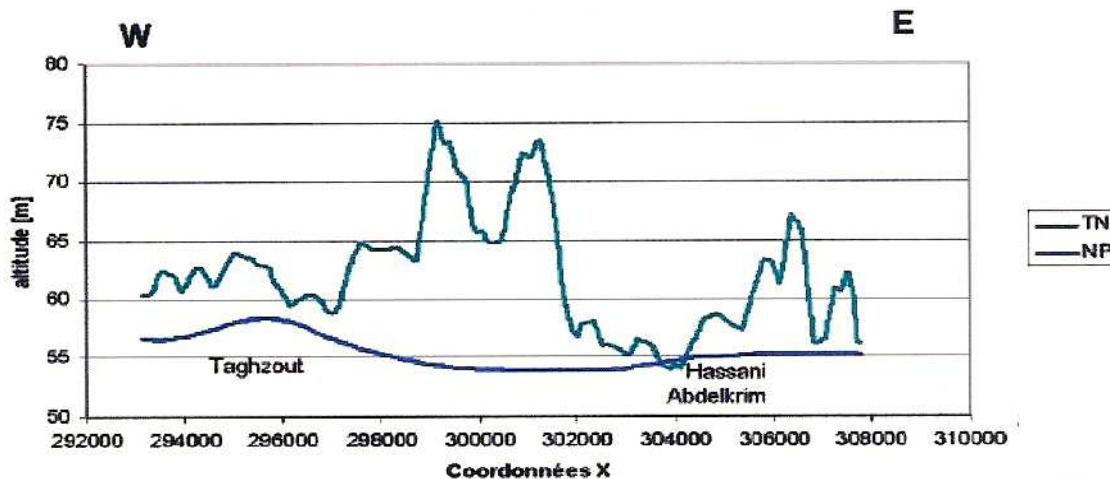


Fig.62 - Profil 3 (E - W) de la nappe superficielle passant par Taghzout et H. Abdelkrim

Ces deux sites utilisent les eaux des nappes profondes, l'implantation Daouia est irriguée à partir des eaux du continental terminal et la ville d'El-Oued consomme les eaux du CT et CI (AEP, industrie et irrigation). (Fig.63)

Profil : 4

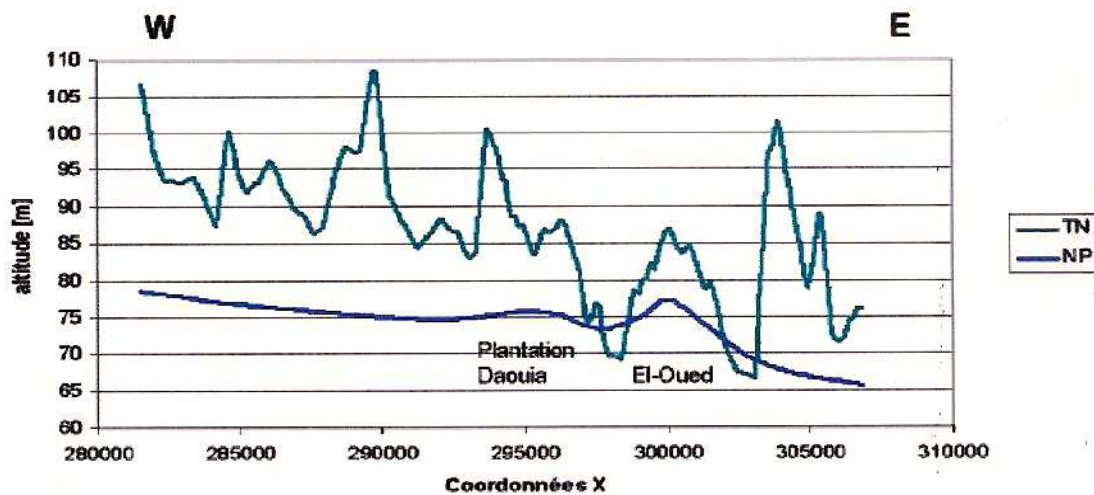


Fig.63 - Profil 4 (E - W) de la nappe superficielle passant par la plantation Dhaouia et El-Oued.

Le long de ce profil (reliant Oued Tourk à El-Ogla), le niveau piézométrique de la nappe s'approche de la surface du sol, au niveau des agglomérations, mais sans l'atteindre (Fig.64)

Profil : 5

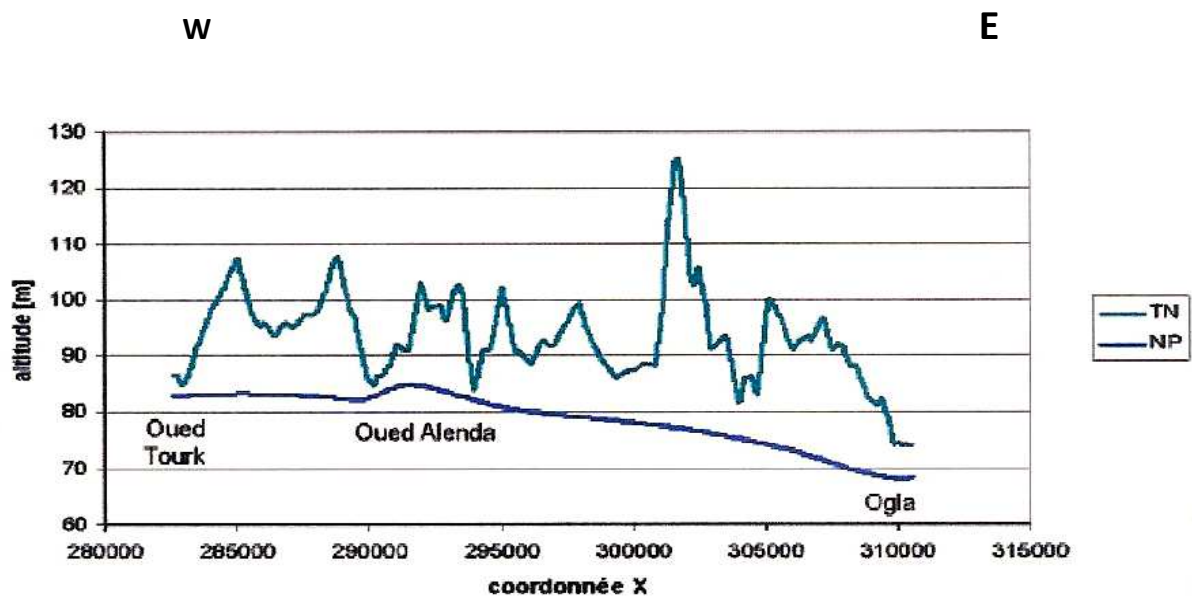


Fig.64 - Profil 5 (E - W) de la nappe superficielle passant par Oued Alenda

2.4- Détermination des paramètres Hydrodynamiques

Du 24/02/2003 au 07/04/2003 une campagne de pompage, par palier et de longue durée, a été réalisée par le bureau d'étude BG et HPO. C'est la campagne la plus fiable et la plus complète dans la région, dans le but du suivi du phénomène de la remontée des eaux et du niveau piézométrique de la nappe superficielle.

Les essais de pompage ont été réalisés sur les six localités suivantes : Mih-Ouensa, Nakhla, Ouermes, El-Oued, Kouinine et Foulia appartenant à la zone d'étude de la vallée d'El-Oued.

Tous les points d'essai sont constitués d'un puits de pompage et de trois piézomètres complets (pour observation), ces derniers sont distants de 5, 15 et 45 m du puits de pompage.

Les puits de pompage sont des puits existants avec des caractéristiques différentes, alors que tous les piézomètres réalisés pour ces essais de pompage sont identiques.

Les rejets des eaux de pompage sont situés à environ 100 mètres des sites des essais de pompage : Mih-Ouensa, Nakhla, Ouermes, El-Oued, Kouinine, alors qu'à Foulia les eaux de pompage ont été utilisées pour l'irrigation de la palmeraie et d'un pivot d'irrigation de 0,75 ha.

Quatre limnigraphes ont été utilisés pour l'enregistrement des niveaux à intervalle de 30 secondes, pendant toute la durée de l'essai.

Ceux-ci ont portés, pour chaque site, un essai par paliers non enchainés est un essai de longue durée à débit constant.

Chaque essais par paliers est composé de trois paliers de 6 heures, chacun un à débit constant (mais différent des autres) séparés par un intervalle d'au moins 12 h.

L'essai de longue durée a consisté en un pompage à débit constant de 72h suivi de 24 h de remontée.

L'interprétation est réalisée grâce à l'utilisation du logiciel aquifère-test.

Localisation et coordonnées UTM des sites d'essais

Les coordonnées UTM des sites sont mentionnées dans le tableau suivant

Site	X	Y	Z (m)
El-Oued	303415	3700685	59,51
Kouinine	299433	3700173	61,05
Ouermes	293505	3694899	70,72
Foulia	288292	3728108	31,42
Mih-Ouensa	285729	3674357	87,39
Nakhla	309854	3685801	66,09

Tab.27 - Coordonnées UTM des six sites d'essais

2.4 .1- Présentation des résultats de débits spécifiques

Après l'interprétation des essais de pompage par paliers (logiciel: Aquifer-test), les débits spécifiques sont représentés par les graphes **débits-rabattements** et tableaux suivants :

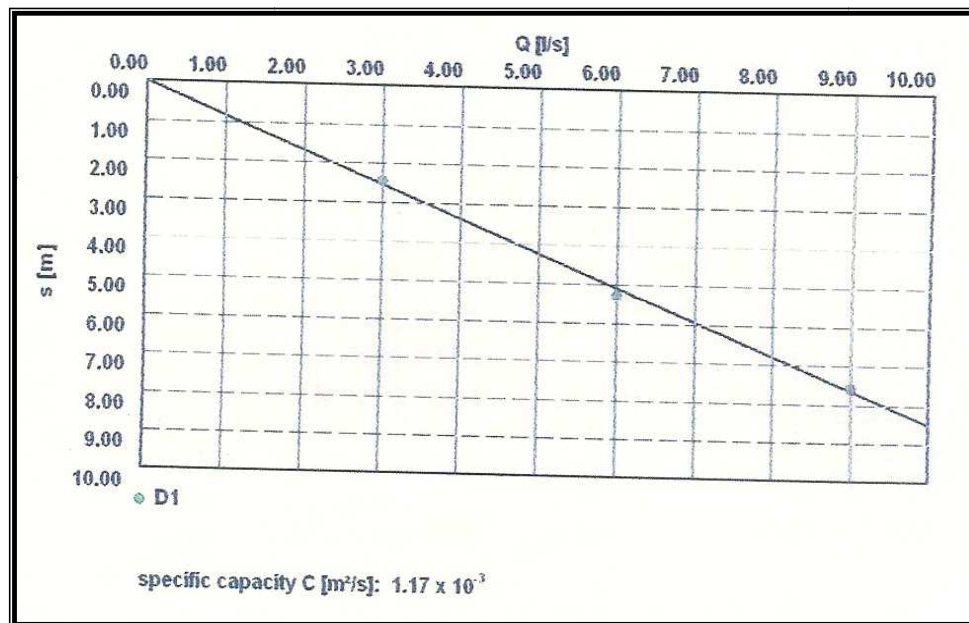


Fig.65 - Graphique : débit-rabatement du forage D1

Le débit spécifique du forage D1 est $1,17. 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Débites spécifiques des forages : D 02 à D 11

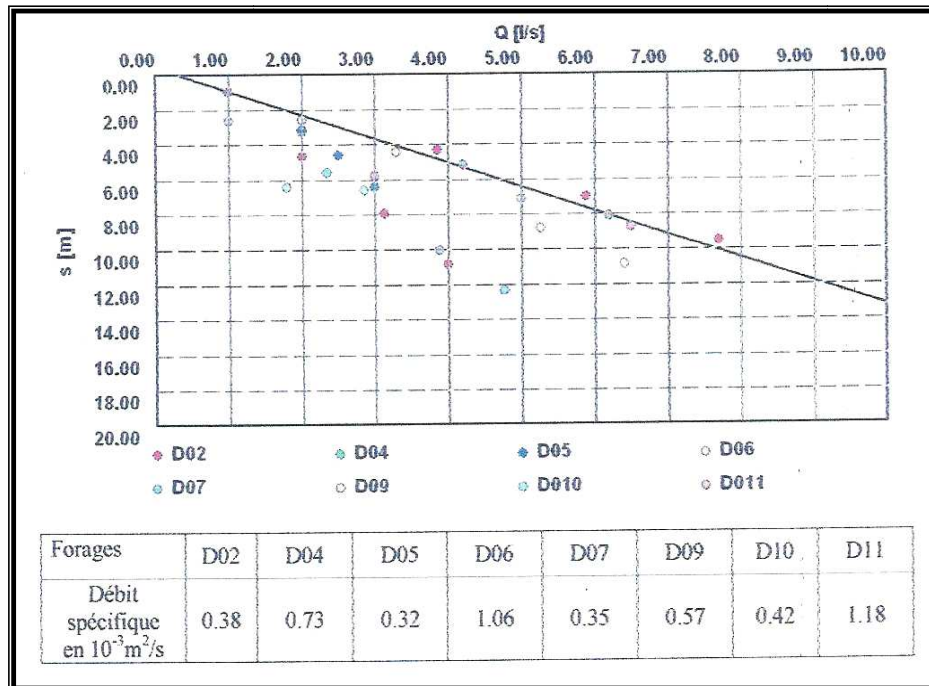


Fig.66 - Graphe : débit-rabatement des forages D 02 à D 11

Débites spécifiques des forages : D 15 à D 24

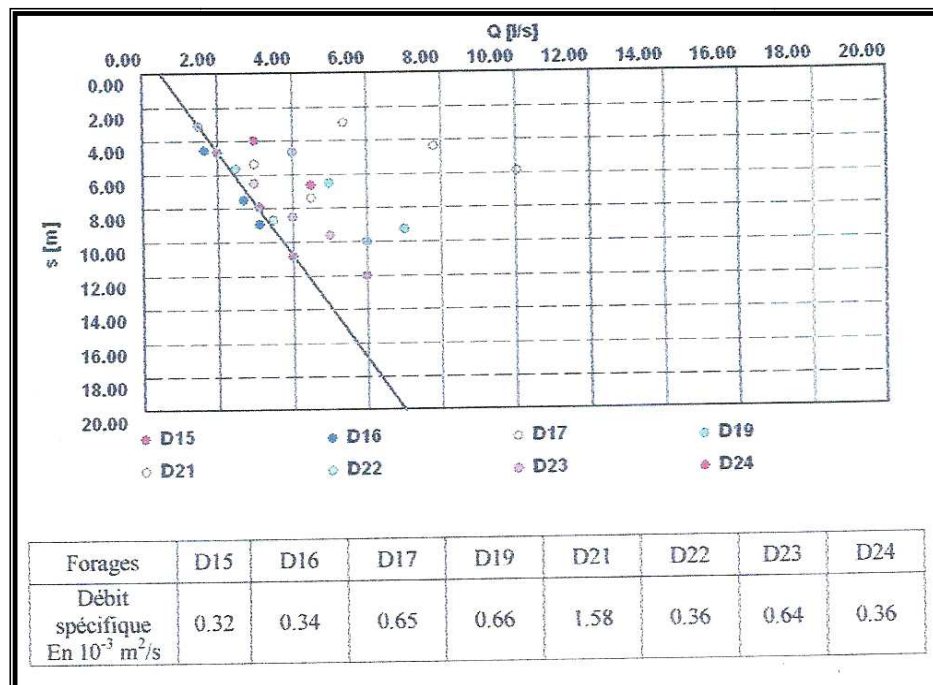


Fig.67 - Graphe : débit-rabatement des forages : D 15 à D 24

Débites spécifiques des forages : D 25 à D 32

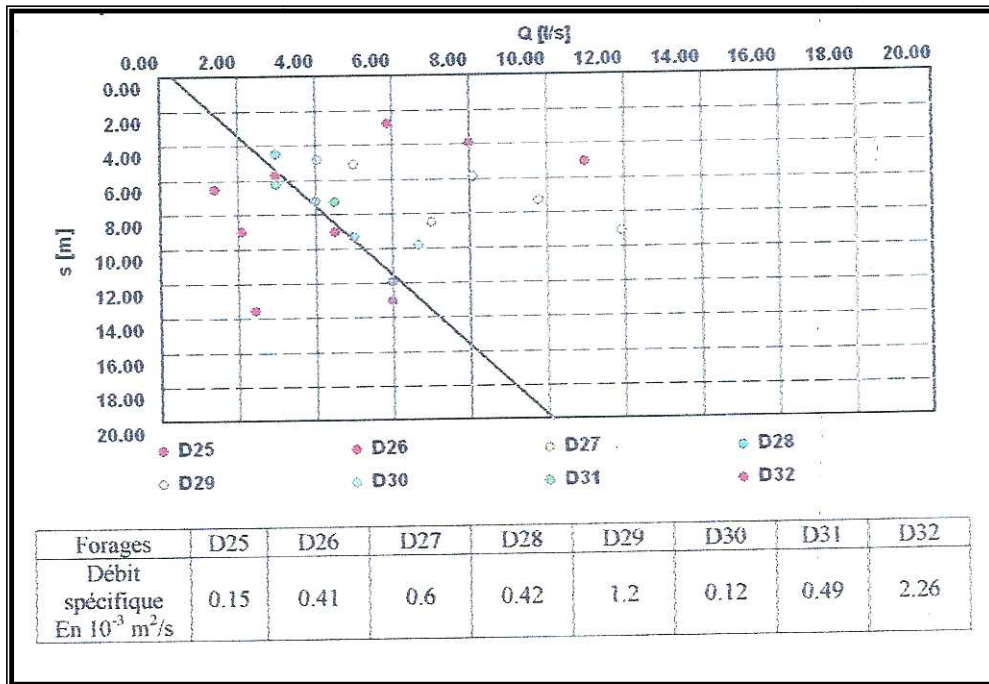


Fig.68 - Graphe : débit-rabatement des forages: D 25 à D 32

Débites spécifiques des forages : D 33 à D 42

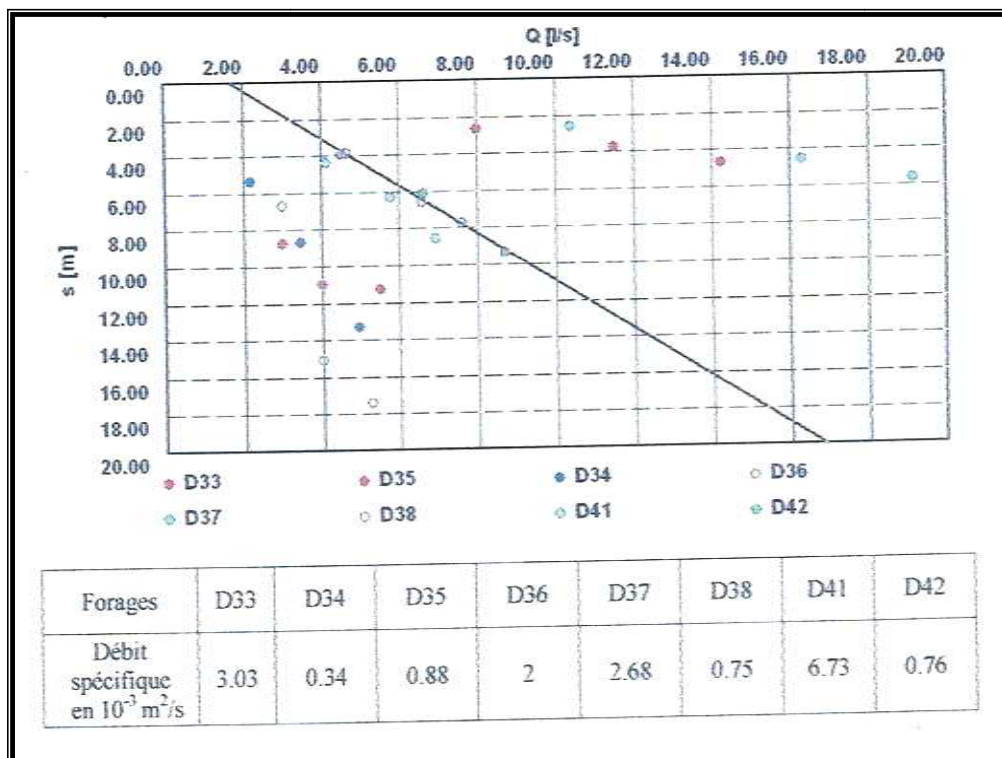


Fig.69 - Graphe : débit-rabatement des forages : D 33 à D 42

Débites spécifiques des forages : D 44 à D 51

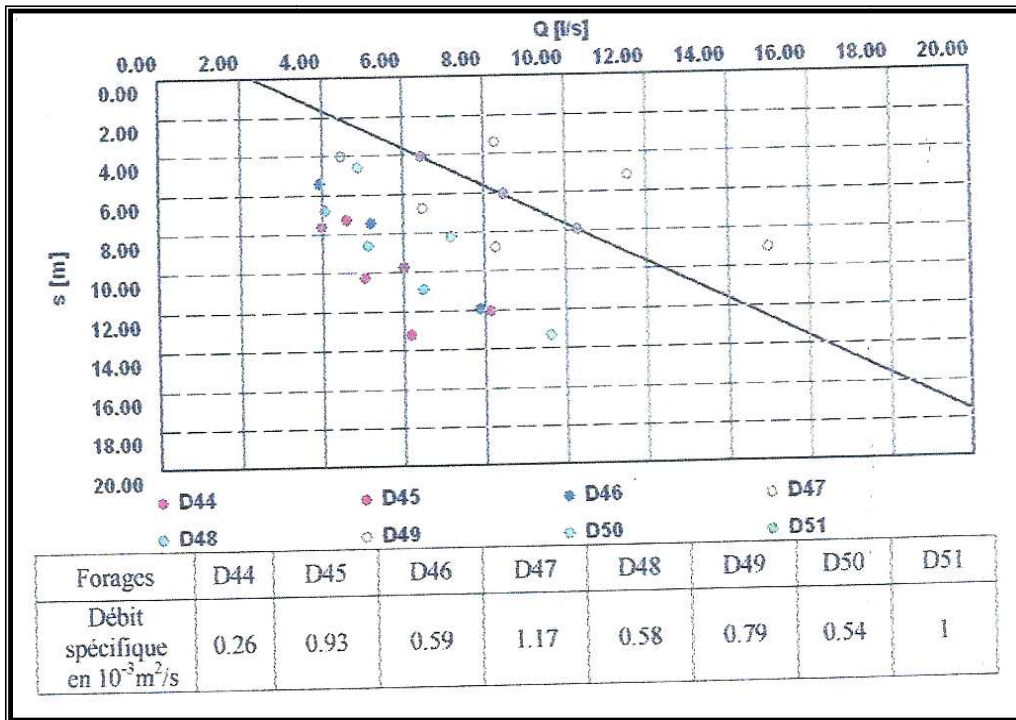


Fig.70 - Graphe : débit-rabattement des forages : D 44 à D 51

Débites spécifiques des forages : D 52 à D 58

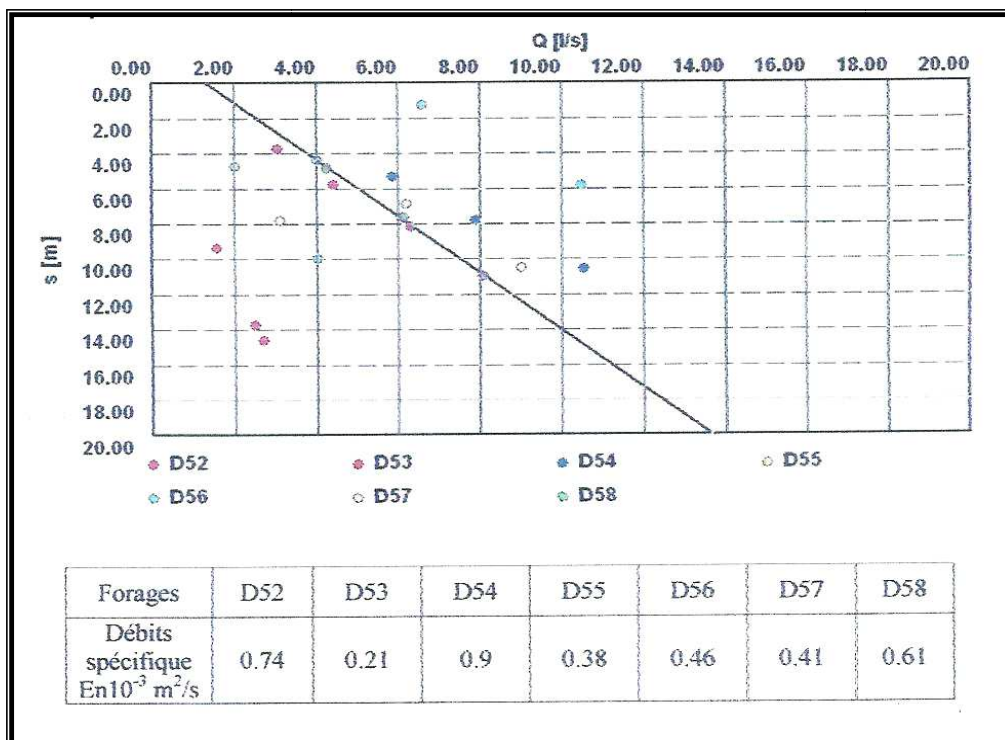


Fig.71 - Graphe : débit-rabattement des forages : D 52 à D 58

Les coordonnées des forages, leurs niveaux statiques (pour janvier-février 2007 et mai 2008), leur débits d'exploitation et les débits spécifiques sont illustrés dans le tableau suivant :

N° de forage	X	Y	Niveau.Statique jan/Fév 2007 m	Niveau.Statique mai-08 m	débit d'exploitation m ³ /s	débit spécifique en 10 ⁻³ m ² /s
D.01	302006.355	3696555.641	4,92	4,95	0.010	1.17
D.02	301733.169	3696131.344	5,74	5,62	0.003	0.38
D.04	299227.000	3695700.000	6,34	6,94	0.008	0.73
D.05	301868.619	3695710.673	9,2	9,15	0.004	0.32
D.06	299503.460	3695415.650	5,12	4,62	0.008	1.06
D.07	299407.635	3695094.858	4,43	4,51	0.005	0.35
D.09	298939.310	3694850.670	6,35	6,37	0.008	0.57
D.10	299803.900	3694674.570	3,53	3,55	0.003	0.42
D.11	300259.410	3694719.180	2,53	2,22	0.008	1.18
D.12	299250.090	3694674.150	4,11	3,85	0.011	0.74
D.15	299621.100	3694205.770	5,31	5,35	0.006	0.32
D.16	299443.480	3694205.680	1,90	1,82	0.005	0.34
D.17	301085.665	3694108.354	2,19	1,62	0.005	0.65
D.19	300657.201	3694003.180	0,35	0,74	0.008	0.66
D.21	301614.011	3693782.901	6,05	6,05	0.013	1.58
D.22	299569.570	3693771.280	4,82	4,81	0.0058	0.36
D.23	299322.300	3693745.350	1,84	1,82	0.007	0.64
D.24	301216.420	3693680.200	5,5	5,46	0.006	0.36
D.25	300683.305	3693511.990	8,26	7,25	0.003	0.15
D.26	299985.100	3693704.020	5,8	5,83	0.007	0.41
D.27	300265.860	3693473.520	4,62	4,65	0.011	0.6
D.28	299458.670	3693394.190	2,19	2,3	0.007	0.42
D.29	301688.578	3693356.448	5,86	5,35	0.013	1.20
D.30	300634.770	3693299.964	5,33	5,18	0.009	0.12
D.31	300121.384	3693419.814	0,74	0,43	0.008	0.49
D.32	302378.465	3693285.850	7,62	7,7	0.014	2.26
D.33	301429.434	3693106.751	6,22	6,56	0.015	3.03
D.34	300940.781	3693170.567	2,46	2,5	0.005	0.34
D.35	299617.990	3693153.970	3,38	3,5	0.006	0.88
D.36	300608.227	3692963.506	5,35	5,26	0.005	2
D.37	301093.650	3692780.876	4,02	3,89	0.015	2.68
D.38	302327.699	3692632.310	7,4	6,45	0.008	0.75
D.41	301654.935	3692665.428	8,15	7,55	0.008	6.73
D.42	300827.583	3692571.423	12,4	12,68	0.011	0.76
D.44	300460.729	3692403.212	11,08	10,72	0.008	0.26
D.45	302018.144	3692209.245	5,77	5,55	0.009	0.93
D.46	300676.194	3692148.167	11,02	11,00	0.009	0.59
D.47	301319.536	3692206.562	8,48	8,5	0.015	1.17
D.48	301459.313	3691779.629	4,63	2,9	0.009	0.58
D.49	300500.686	3691766.953	14,25	4,65	0.010	0.79
D.50	301948.401	3691704.979	3,54	3,60	0.010	0.54
D.51	302338.147	3691647.244	6,23	5,92	0.014	1
D.52	300762.060	3691450.000	15,23	15,30	0.010	0.74
D.53	301927.281	3691220.614	4,68	4,50	0.003	0.21
D.54	302475.577	3691120.034	4,32	4,48	0.013	0.9
D.55	302040.849	3690862.759	4,84	4,30	0.05	0.38
D.56	302653.430	3690698.260	5	5,32	0.011	0.46
D.57	303214.335	3690502.620	6,69	6,42	0.010	0.81
D.58	302460.075	3690346.140	4,42	4,88	0.009	0.61

Tab.28 - Niveaux statiques, débits d'exploitation et débits spécifiques des 58 forages,

El-Oued

2.5- Essais de pompage longue durée et interprétation

2.5.1- Essais de pompage à El Oued

Dans ce site, ont été réalisés 4 essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée(temps minimal entre les essais) et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée (essai longue durée)

Cette opération a été effectuée durant la semaine du 03/03/2003 au 10/ 03/2003 sur un puits amélioré, non exploité, dans la commune d'El-Oued, sur la route en direction de Hassani Abdelkrim, portant les coordonnées UTM Clarke 1880 :

X = 303415, Y = 3700685.

Les 3 piézomètres sont distants, respectivement, de 5 m, 10 m et 15 m du puits de pompage.

L'aquifère est constitué de sables fins, plus ou moins induré, contenant une importante proportion de gypse.

Détermination du débit spécifique

Les débits de pompage par palier (pour les trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée) sont de 4 l/s, 8 l/s et 13 l/s. Les rabattements du niveau piézométrique dans le puits de pompage sont représentés sur le même graphe, temps/rabattement.

Le débit spécifique, pour un temps de 21600 secondes, est calculé à partir de la droite : débits – rabattement.

Les rabattements mesurés pour chaque débit(palier) sont donnés au tableau suivant

Débit (l/s)	Rabattement (m)
4	1,71
8	3,64
13	5,8

Le débit spécifique est de : $2,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. (HPO-BG).

Interprétation de l'essai de pompage longue durée

L'essai de pompage longue durée : (72 h, 17 min et 30s) est à débit constant de 15,4 l/s, suivi de 24 h de remontée après l'arrêt du pompage. Les rabattements en fonction du temps ont été mesurés dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres.

Les résultats de mesures dans le puits de pompage et dans les 3 piézomètres sont représentés sur le même graphe : **temps/rabattement** (Fig.72).

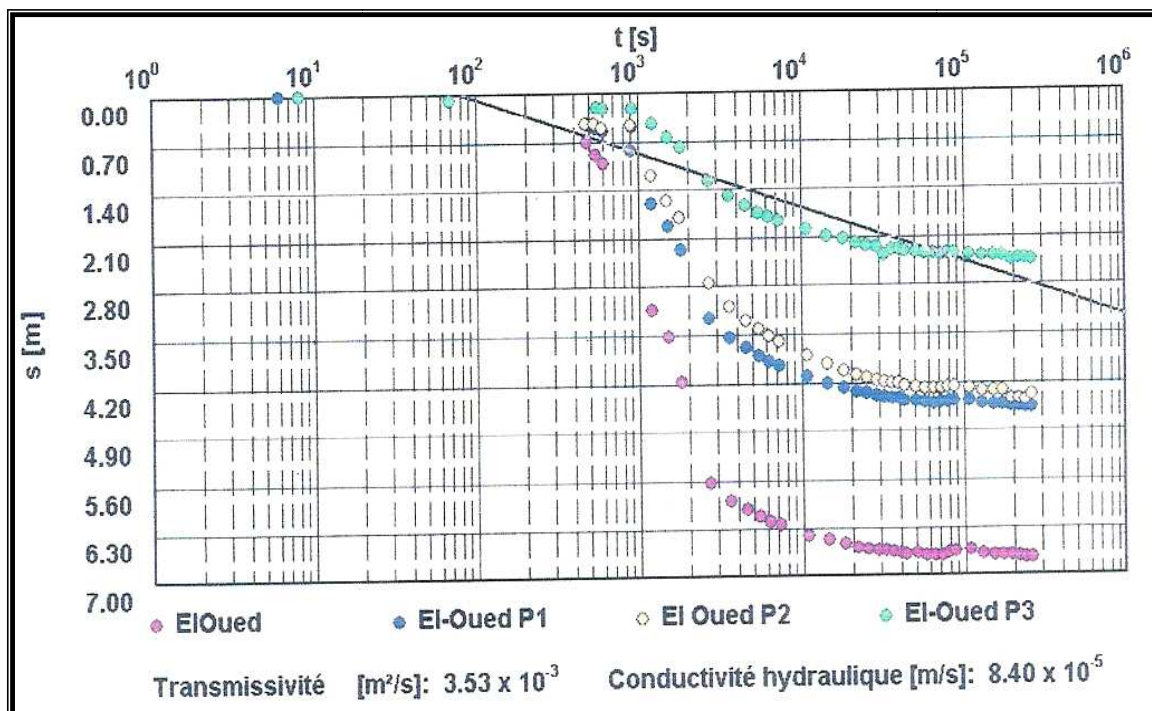


Fig.72 - Essai de pompage longue durée à El-Oued (Méthode : Cooper-Jacob)

Les caractéristiques hydrodynamiques du puits sont les suivants :

Débit spécifique (m²/s)	2,15. 10 ⁻³
Transmissivité (m²/s)	3,53. 10 ⁻³
Perméabilité (m/s)	8,40. 10 ⁻⁵
Porosité efficace (%)	7,05. 10 ⁻² (HPO-BG)

Tab.29 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à El-Oued

2.5.2- Essais de pompage à Kouinine

A Kouinine, ont été réalisés 4 essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée(temps minimal entre les essais) et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée (essai longue durée)

Les essais ont été effectués durant la semaine du 10/03/2003 au 17/ 03/2003 sur un puits amélioré, non exploité, dans un périmètre agricole abandonné de la commune de Kouinine, portant les coordonnées UTM Clarke 1880 :

$$X = 299433, \quad Y = 3700173.$$

Les 3 piézomètres sont distants, respectivement, de 5 m, 10 m et 15 m du puits de pompage.

Détermination du débit spécifique

Les débits de pompage par palier (pour les trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée) sont de 4 l/s, 8,2 l/s et 13 l/s. Les rabattements du niveau piézométrique dans le puits de pompage sont représentés sur le même graphe, temps/rabattement.

Le débit spécifique, pour un temps de 21600 secondes, est calculé à partir de la droite : débits – rabattement.

Les rabattements mesurés pour chaque débit (palier) sont donnés au tableau suivant :

Débit (l/s)	Rabattement (m)
4	6,53
8,2	12,81
13	21

Le débit spécifique est de : $6,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. (HPO-BG).

Interprétation de l'essai de pompage longue durée

L'essai de pompage longue durée : (72 h, 21 min et 30s) est à débit constant de 10,9 l/s, suivi de 24 h de remontée après l'arrêt du pompage. Les rabattements en fonction du temps ont été mesurés dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres

Les résultats de mesures dans le puits de pompage et dans les 3 piézomètres sont représentés sur le même graphique : **temps/rabattement**. (Fig.73)

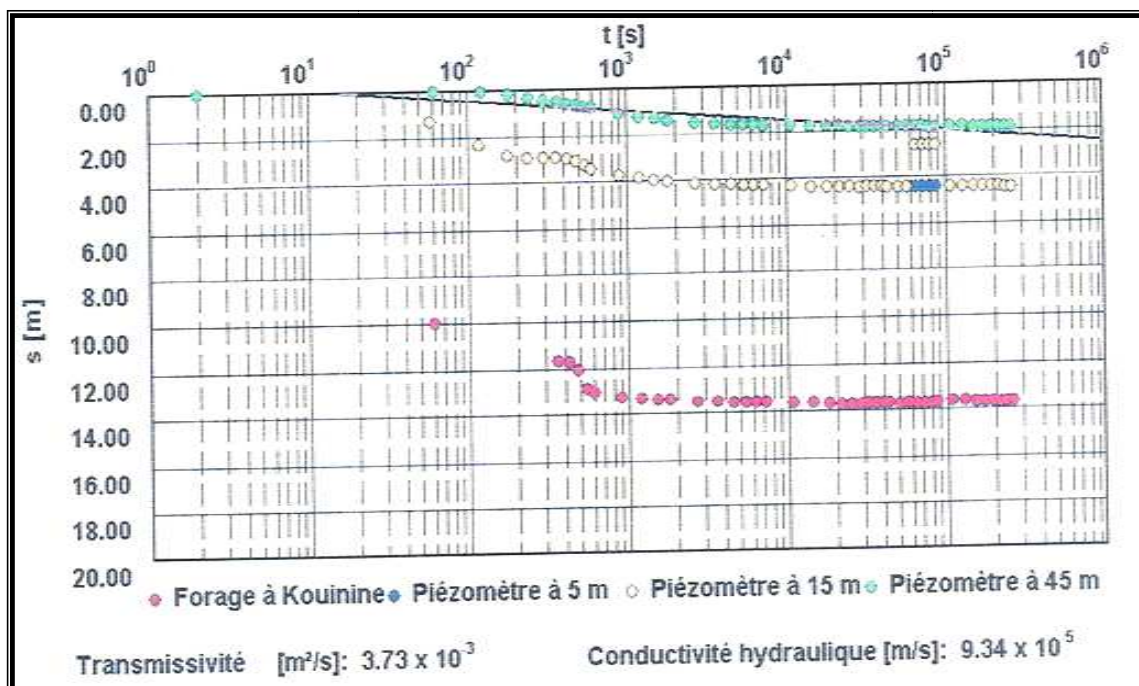


Fig.73 - Essai de pompage longue durée à Kouinine (Méthode : Cooper-Jacob)

Les caractéristiques hydrodynamiques du puits sont les suivantes :

Débit spécifique (m²/s)	6,29. 10 ⁻⁴
Transmissivité (m²/s)	3,73. 10 ⁻³
Perméabilité (m/s)	9,34. 10 ⁻⁵
Porosité efficace (%)	5,6. 10 ⁻² (HPO-BG)

Tab.30 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Kouinine

2.5.3- Essais de pompage à Ouermès

A Ouermas aussi, ont été réalisés 4 essais de pompage, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée(temps minimal entre les essais) et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée (essai longue durée).

Les essais ont été effectués durant la semaine du 17/03/2003 au 24/03/2003 sur un puits amélioré exploité dans la commune de Ouermas, portant les coordonnées UTM Clarke 1880 : X = 293505, Y = 3694899.

Les 3 piézomètres sont distants, respectivement, de 5 m, 10 m et 15 m du puits de pompage.

Détermination du débit spécifique

Les débits de pompage par palier (pour les trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée) sont de 4,2 l/s, 7,9 l/s et 11,8 l/s.

Les rabattements du niveau piézométrique dans le puits de pompage sont représentés sur le même graphe, temps/rabattement.

Le débit spécifique, pour un temps de 21600 secondes, est calculé à partir de la droite : débits – rabattement.

Les rabattements mesurés pour chaque débit (palier) sont donnés au tableau suivant :

Débit (l/s)	Rabattement (m)
4,2	4,48
7,9	8,68
11,8	13,27

Le débit spécifique est de : $8,63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. (HPO-BG).

Interprétation de l'essai de pompage longue durée

L'essai de pompage longue durée : (72 h, 05 min et 30s) est à débit constant de 13,3 l/s, suivi de 24 h de remontée après l'arrêt du pompage. Les rabattements en fonction du temps ont été mesurés dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres.

Les résultats de mesures dans le puits de pompage et dans les 3 piézomètres sont représentés sur le même graphe : **temps/rabattement** (Fig.74).

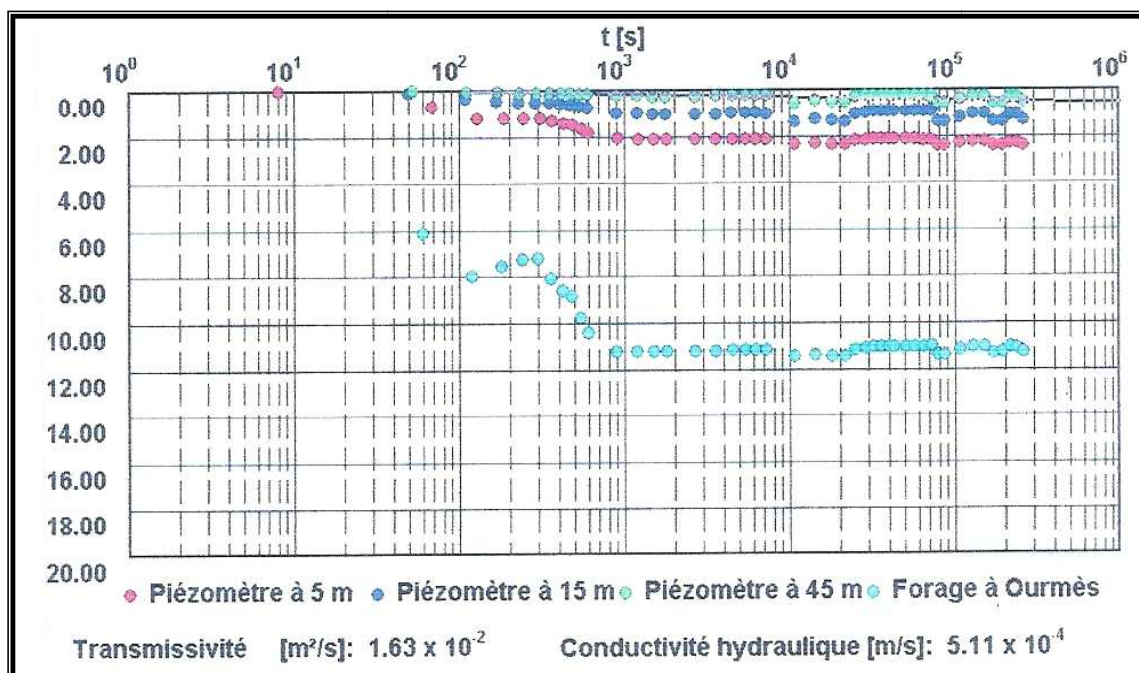


Fig.74 - Essai de pompage longue durée à Ouermès (Méthode : Cooper-Jacob)

Les caractéristiques hydrodynamiques du puits sont les suivantes :

Débit spécifique (m²/s)	8,63. 10 ⁻⁴
Transmissivité (m²/s)	1,63. 10 ⁻²
Perméabilité (m/s)	5,11. 10 ⁻⁴
Porosité efficace (%)	16. 10 ⁻² (HPO-BG)

Tab.31 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Ouermès

2.5.4- Essais de pompage à Foulia

Dans la commune de Foulia, 4 essais de pompage ont été réalisés, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée (temps minimal entre les essais) et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée (essai longue durée).

Les essais ont été effectués durant la semaine du 02/04/2003 au 09/04/2003 sur un puits exploité, appartenant au réseau de surveillance de l'ANRH de Ouargla au delà de la commune de Foulia, en direction de Biskra, portant les coordonnées UTM Clarke 1880 : X = 288292, Y = 3728108.

Les 3 piézomètres sont distants, respectivement, de 5 m, 10 m et 15 m du puits de pompage.

L'aquifère contient des niveaux peu perméables, constitués par des sables limonogypseux peu argileux et du sable fin, plus ou moins induré, renfermant une forte proportion de gypse.

Détermination du débit spécifique

Les débits de pompage par palier (pour les trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée) sont de 4,2 l/s, 5,1 l/s et 6,2 l/s.

Les rabattements du niveau piézométrique dans le puits de pompage sont représentés sur le même graphe, temps/rabattement.

Le débit spécifique, pour un temps de 10800 secondes, est calculé à partir de la droite : débits – rabattement.

Les rabattements mesurés pour chaque débit (palier) sont donnés au tableau suivant :

Débit (l/s)	Rabattement (m)
4,2	0,93
5,1	1,85
6,2	0,98

Le débit spécifique est de : $2,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. (HPO-BG).

Interprétation de l'essai de pompage longue durée

L'essai de pompage longue durée : (72 h, 9 min et 2s) est à débit constant de 4,8 l/s, suivi de 24 h de remontée après l'arrêt du pompage. Les rabattements en fonction du temps ont été mesurés dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres .

Les résultats de mesures dans le puits de pompage et dans les 3 piézomètres sont représentés sur le même graphe : **temps/rabattement** (Fig.75).

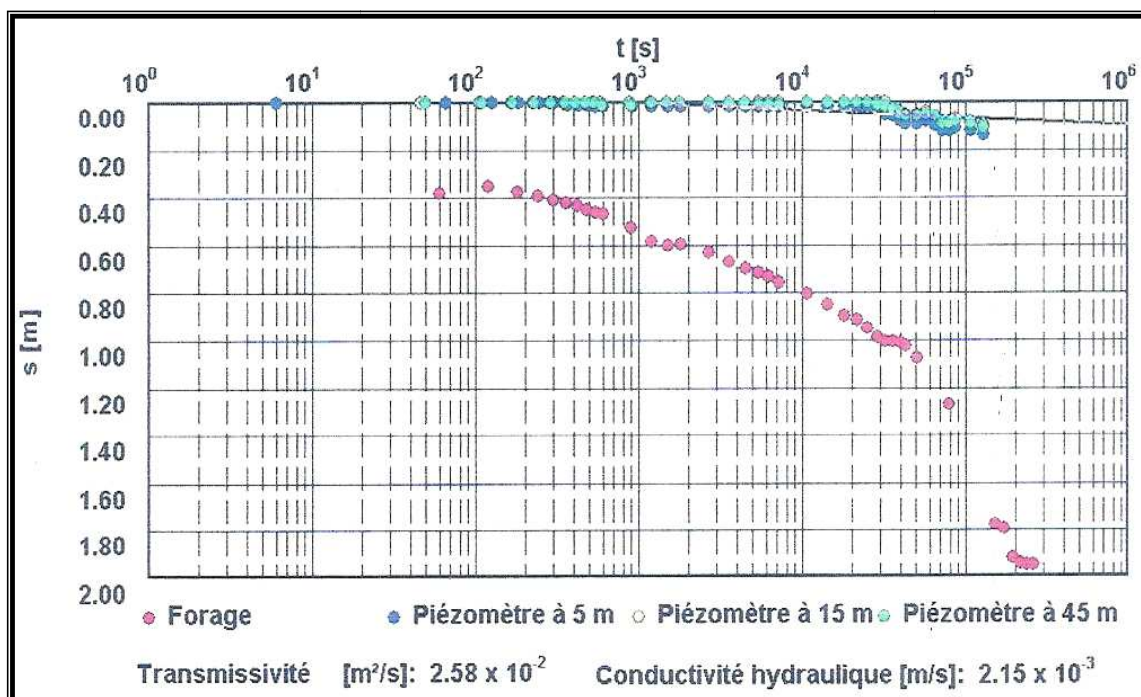


Fig.75 - Essai de pompage longue durée à Foulia (Méthode : Cooper-Jacob)

Les caractéristiques hydrodynamiques du puits sont les suivantes :

Débit spécifique (m ² /s)	2,89. 10 ⁻³
Transmissivité (m ² /s)	2,58. 10 ⁻²
Perméabilité (m/s)	2,15. 10 ⁻³
Porosité efficace (%)	/

Tab.32 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Foulia

2.5.5- Essais de pompage à Mih Ouensa

Dans cette commune située au SE de la zone d'étude, 4 essais de pompage ont été réalisés, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée (temps minimal entre les essais) et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée (essai longue durée).

Les essais ont été effectués durant la semaine du 27/03/2003 au 01/04/2003 sur un puits amélioré non exploité, situé dans un périmètre agricole exploité par la commune de Mih Ouensa, portant les coordonnées UTM Clarke 1880 :

X = 285729, Y = 3674357.

Les 3 piézomètres sont distants, respectivement, de 5 m, 10 m et 15 m du puits de pompage.

L'aquifère contient deux niveaux peu perméables, constitués par des sables limonogypseux peu argileux.

Détermination du débit spécifique

Les débits de pompage par palier (pour les trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée) sont de 3 l/s, 4,2 l/s et 4,9 l/s.

Les rabattements du niveau piézométrique dans le puits de pompage sont représentés sur le même graphe, temps/rabattement.

Le débit spécifique, pour un temps de 21600 secondes, est calculé à partir de la droite : débits – rabattement.

Les rabattements mesurés pour chaque débit (palier) sont donnés au tableau suivant :

Débit (l/s)	Rabattement (m)
3	9,52
4,2	12,59
4,9	15,5

Le débit spécifique est de : $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. (HPO-BG).

Interprétation de l'essai de pompage longue durée

L'essai de pompage longue durée : (72 h, 15 min et 30s) est à débit constant de 4,7 l/s, suivi de 24 h de remontée après l'arrêt du pompage. Les rabattements en fonction du temps ont été mesurés dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres.

Les résultats de mesures dans le puits de pompage et dans les 3 piézomètres sont représentés sur le même graphe : **temps/rabattement** (Fig.76).

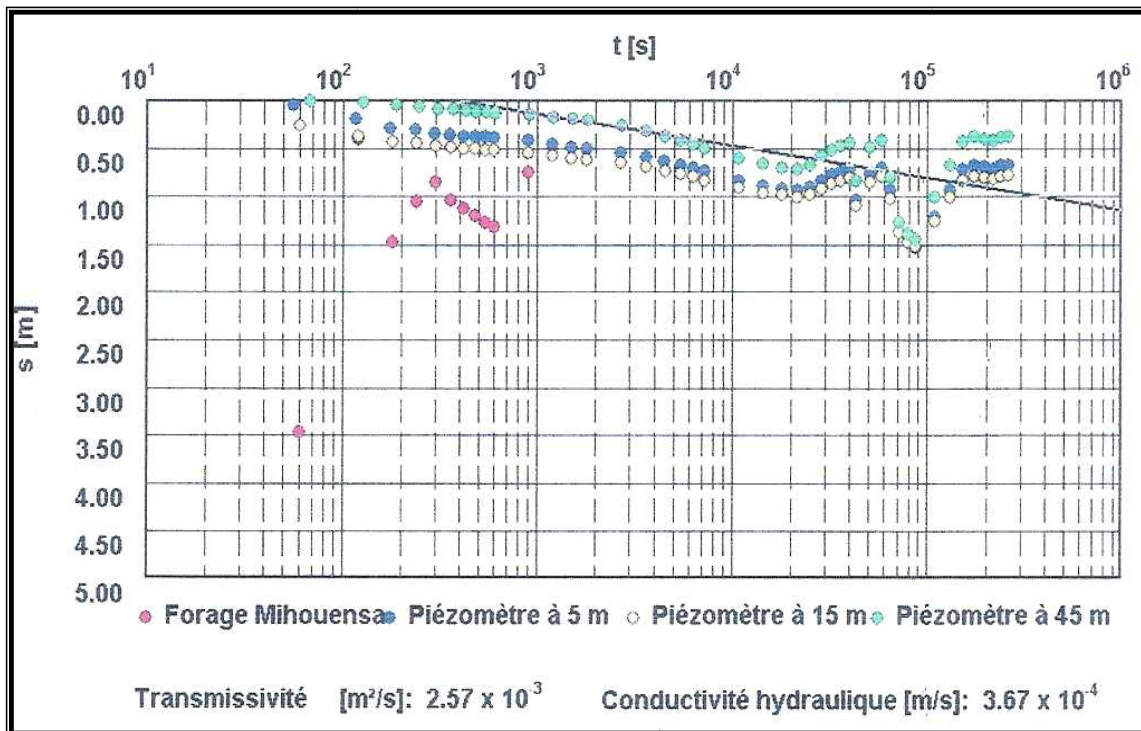


Fig. 76 - Essai de pompage longue durée à Mih-Ouensa (Méthode : Cooper-Jacob)

Les caractéristiques hydrodynamiques du puits sont les suivantes :

Débit spécifique (m ² /s)	3,7. 10 ⁻⁴
Transmissivité (m ² /s)	2,57. 10 ⁻³
Perméabilité (m/s)	3,67. 10 ⁻⁴
Porosité efficace (%)	10,8. 10 ⁻²

Tab.33 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Mih Ouensa

2.5.6- Essais de pompage à Nakhla

Le sixième essai de pompage est située dans la commune de Nakhla, où 4 essais de pompage ont été réalisés, trois de 6 heures avec 12 heures de remontée (temps minimal entre les essais) et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée (essai longue durée).

Les essais ont été effectuées durant la semaine du 25/02/2003 au 03/03/2003 sur un puits amélioré non exploité, situé dans un périmètre agricole qui n'est pas encore exploité par la commune de Nakhla, portant les coordonnées UTM Clarke 1880 :

X = 309854, Y = 3685801.

Les 3 piézomètres sont distants, respectivement, de 5 m, 10 m et 15 m du puits de pompage.

Détermination du débit spécifique

Les débits de pompage par palier (pour les trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée) sont de 4 l/s, 8 l/s et 11,6 l/s.

Les rabattements du niveau piézométrique dans le puits de pompage sont représentés sur le même graphe, temps/rabattement.

Le débit spécifique, pour un temps de 21600 secondes, est calculé à partir de la droite : débits – rabattement.

Les rabattements mesurés pour chaque débit (palier) sont donnés au tableau suivant :

Débit (l/s)	Rabattement (m)
4	2,36
8	5,5
11,6	8

Le débit spécifique est de : $1,83 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. (HPO-BG).

Interprétation de l'essai de pompage longue durée

L'essai de pompage longue durée : (72 h et 30s) est à débit constant de 14,4 l/s, suivi de 24 h de remontée après l'arrêt du pompage. Les rabattements en fonction du temps ont été mesurés dans le puits de pompage ainsi que dans les trois piézomètres.

Les résultats de mesures dans le puits de pompage et dans les 3 piézomètres sont représentés sur le même graphe : **temps/rabattement** (Fig.77).

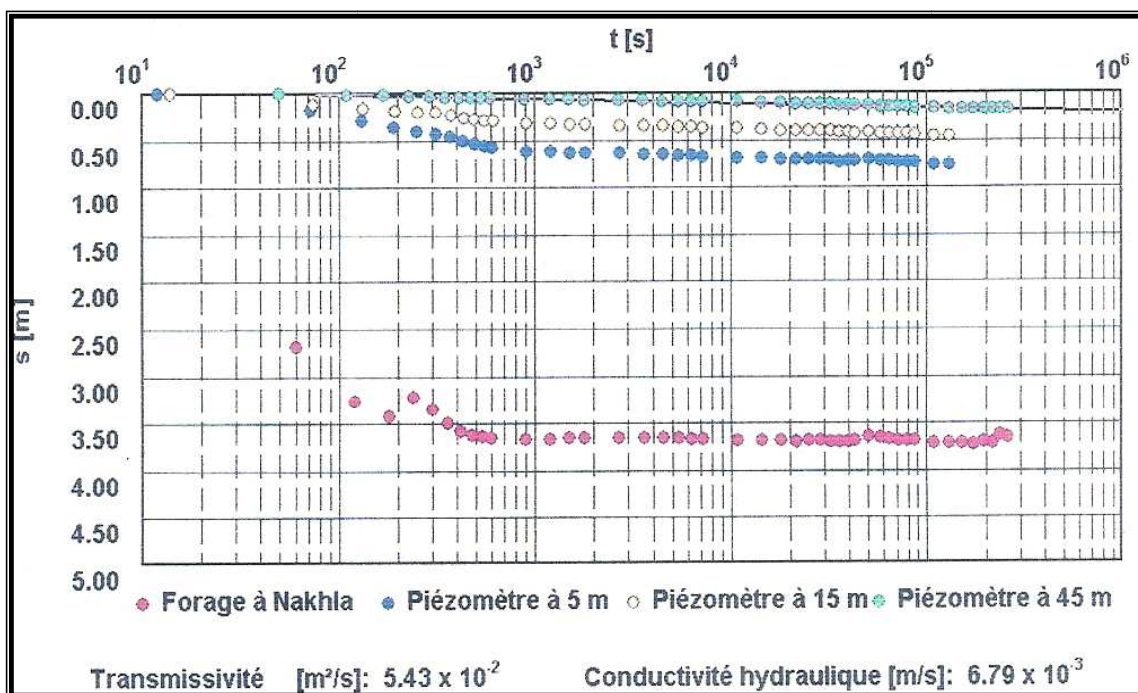


Fig.77 - Essai de pompage longue durée à Nakhla (Méthode : Cooper-Jacob)

Les caractéristiques hydrodynamiques du puits sont les suivantes :

Débit spécifique (m ² /s)	1,83. 10 ⁻²
Transmissivité (m ² /s)	5,43. 10 ⁻²
Perméabilité (m/s)	6,79. 10 ⁻³
Porosité efficace (%)	22,9. 10 ⁻²

Tab.34 - Résultats de l'essai de pompage longue durée à Nakhla

Pour récapituler nous allons dresser le tableau suivant :

Localité	Débit spécifique Q/s (m ² /s)	Transmissivité T (m ² /s)	Perméabilité K (m)	Porosité efficace Sy	Epaisseur (m)
L'Oued	2,15 .10 ⁻³	3,53. 10 ⁻³	8,4.10 ⁻⁵	7,05.10 ⁻²	42
Kouinine	6 ,29.10 ⁻⁴	3,73.10 ⁻³	9,34.10 ⁻⁵	5,6.10 ⁻²	40
Ouermes	8,63.10 ⁻⁴	1,63.10 ⁻²	5,1.10 ⁻⁴	16.10 ⁻²	32
Foulia	1,89.10 ⁻³	2 ,58.10 ⁻²	2,15.10 ⁻³	/	12
Mih-Ouensa	3,7.10 ⁻⁴	2,57.10 ⁻³	3,67.10 ⁻⁴	10,8.10 ⁻²	07
Nakhla	1,83.10 ⁻⁴	5,43.10 ⁻²	6,7.10 ⁻³	22,9.10 ⁻²	8

Tab.35 - Résultats des paramètres hydrodynamiques des essais de pompage longue

2.5.7- Coefficient de porosité efficace(ne)

Le coefficient de porosité efficace de la nappe libre est estimé à 10% dans la zone d'étude (d'après la DHW d'El-Oued).

2.5.8- Interprétation des paramètres de Perméabilité et de Transmissivité

Les valeurs de perméabilité et de Transmissivité sont obtenus lors d'un essai de longue durée à débit constant de 72 heures suivi de 24h de remontée sur les 6 sites.

L'examen des résultats de (T,K) montre que :

Les fortes perméabilités et les bonnes Transmissivité se trouvent au centre de la zone.

Les faibles valeurs des 2 paramètres au Sud.

2.6- Conclusion

Cette nappe superficielle est constituée de dépôts sableux et sablo-argileux avec des intercalations d'argiles et de gypse.

Le substratum de cette nappe superficielle est constitué d'une formation argileuse imperméable.

Les cartes des variations de niveaux piézométrique de la nappe phréatique entre les périodes allant de : Mars-Avril 1993 jusqu'au Avril 2002 montrent que :

Le phénomène de la remontée de la nappe phréatique amorcé dans les années 1975 -1980 et ayant eu comme conséquence l'envolement de près d'un millier de ghouts, la mort de 100000 palmier et la menace de 200000 autres. L'eau stagnante en ville menaçant la santé de la population et les fondations des habitations.

Les remontée de la nappe sont observées autour des centres Urbains d'El-Oued, Nakhla, Guemmar, Z'gom, Oued Alanda et Oued Tork, près des exploitations agricoles irriguées par des nappes profondes et au niveau du rejet de la ville d'El-Oued. Les baisses de niveau sont produites par une forte activité agricole, avec l'irrigation à partir de la nappe phréatique.

Si les essais par palier ont permis de déterminer les débits spécifiques, interprétation réalisée par le HPO et Bonnard et Gardell en Mai 2003, ces valeurs montrent que la

réalisation technique des forages a été bien menée. Nous avons repris les essais de long du durée de 72 heures et le résultats de l'interprétation de la descente et de la remontée sont presque équivalentes avec une faible marge d'erreur sur les transmissivités. Nous avons jugés utile de ne représenter que les graphes de descente. Les valeurs de la perméabilité ont été déduites grâce aux valeurs de l'épaisseur effective de l'aquifère au niveau de chaque site et correspondent bien à la lithologie de la nappe.

Le débit spécifique est élevé à Nakhla, il est moyen à El-Oued et Foulia, alors qu'il est faible à Kouinine, Ourmes et Mih Ouansa.

3- Etude du Système Aquifère du Sahara Septentrionale (SASS)

Le système aquifère profond de la zone d'étude (El-Oued), fait partie du grand Système Aquifère du Sahara Septentrionale (SASS).

C'est l'un des plus grandes réserves d'eau au monde. Il s'étend de Béchar, à Biskra en passant par Laghouat sur le versant sud de l'atlas saharien, renfermant une vaste contrée d'eau souterraine, allant jusqu'à l'extrême sud, à la limite de Reggane, In-Salah, In-Amenas et enjambant une bonne partie de la Libye et le sud de la Tunisie (Fig.79).

Les ressources colossales d'eau du SASS sont estimées à 30.000 milliards de m³ et couvre une surface totale de près de 1 million de km², dont 700.000 se trouvent en Algérie, 80.000 en Tunisie, et 250.000 en Libye.

En fait, l'aquifère du Sahara septentrional, qui s'étend sur plus de un million de kilomètres carrés sous l'Algérie, la Tunisie et la Libye, recélant environ 31 000 milliards de mètres cubes d'eau, dont les 2/3 se trouvent en Algérie. Plus de 20 000 milliards de mètres cubes se trouvent enfermé à l'intérieur des frontières algériennes.

Etant donnée les conditions du climat saharien, ces aquifères sont faiblement alimentés : environ 1 Milliard m³/an au total, infiltrés essentiellement aux piedmonts de l'Atlas Saharien en Algérie, ainsi que sur le Dahar et le Dj. Nefoussa en Tunisie et Libye. Cependant, l'extension du système et l'épaisseur des couches ont favorisé l'accumulation de réserves considérables.

Selon, le chercheur français en hydraulique souterraine, Jean Margat, les nappes aquifères du Sahara septentrional est un réservoir fossile. Il s'est constitué il y a plus de 10 000 ans,

lorsque la région était soumise à un climat plus humide. Pendant des dizaines de milliers d'années, les eaux de pluies se sont infiltrées dans le sous-sol et accumulées dans différentes couches géologiques.

Le Système Aquifère Saharien désigne la superposition de deux aquifères profonds :

- a) Le Complexe Terminal : CT.
- b) Le Continental Intercalaire : CI, (plus profonde) (Fig.78).

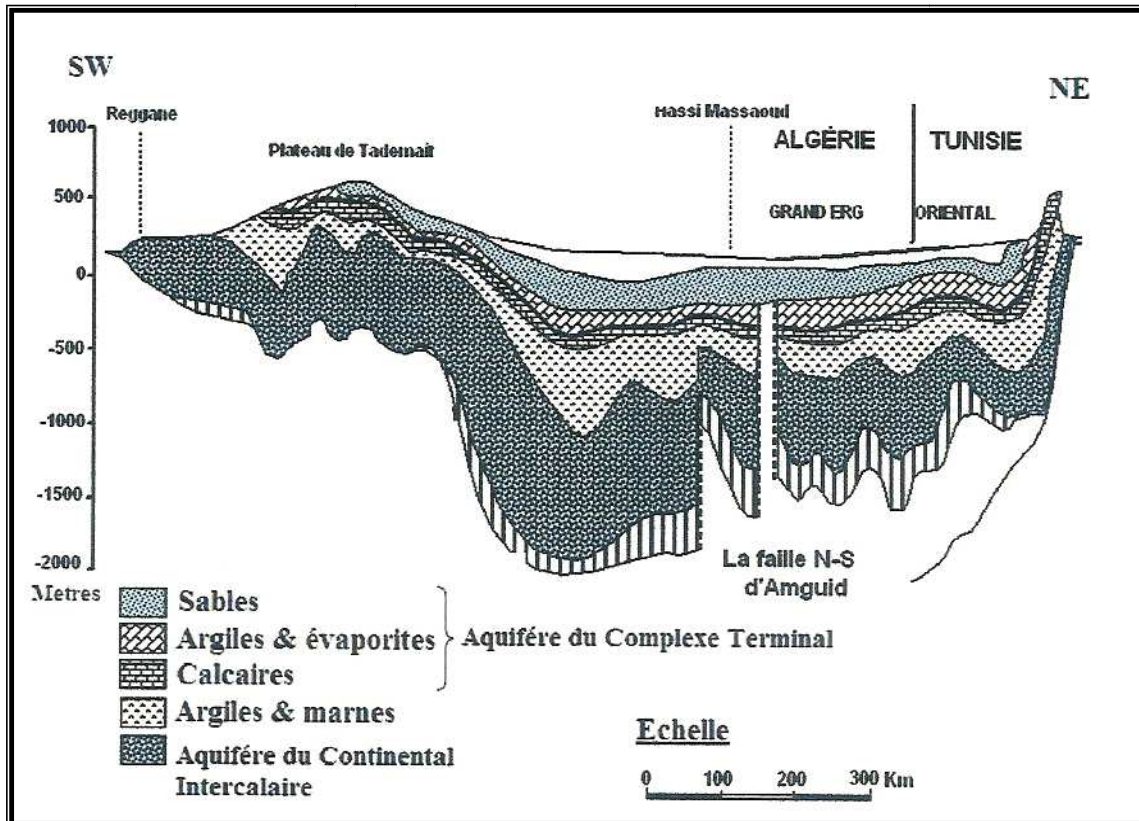


Fig.78 - Coupe hydrogéologique du SASS (CT et CI). OSS (2003b)

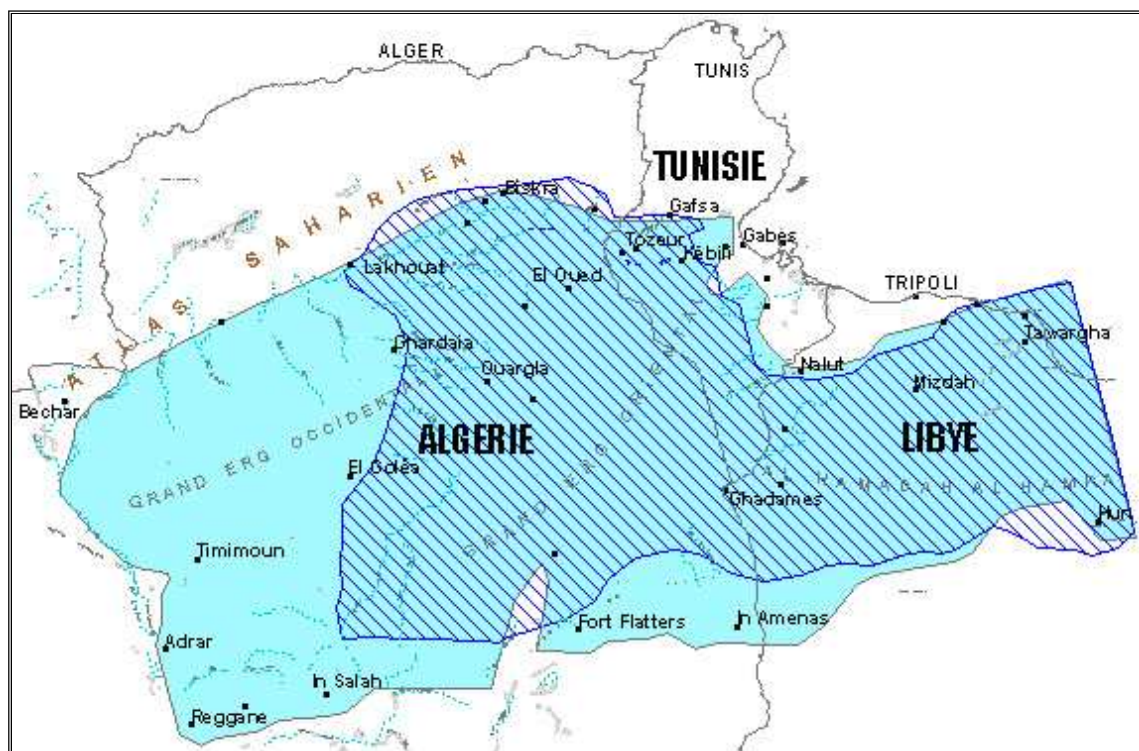


Fig.79 - Extension et limites du SASS (sans échelle)

3.1- Le complexe terminal

Il est constitué de formations continentales sableuses et sablo-argileuses avec des intercalations gypseuses et de passées de grès qui reposent en discordance sur les formations calcaires érodées de l'Eocène inférieur, il s'étend sur une superficie de 350000 Km² et affleure au nord dans le sillon des chotts au sud sur les plateaux de Tinheret et Tademaït, à l'est sur le flanc oriental du Dahar et Nafuza, à l'ouest sur la dorsale du M'zab (Fig.79).

En 1931 le terme continentale terminal désignait les formations continentales, sableuses et argileuses du Mio-pliocène, d'après KILIAN.

En 1966, BEL et DEMARGNE considèrent que la nappe du continental terminal qui est contenue dans les sables du Mio-Pliocène, et plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, ces différents niveaux forment la même nappe.

Le terme (complexe terminal), appellation publiée pour la première fois par BEL et CUCHE (1969), ensuite au cours du projet ERESS (1972).

Cette dénomination regroupe tous les aquifères situés dans les formations géologiques différentes, car ces nappes représentent un même ensemble hydraulique.

Le complexe terminal est constitué de trois aquifères superposés, de bas en haut :

3.1.1- La première nappe des sables

Appelée aussi nappe des sables, contenue dans les formations sableuses et sablo-argileuse avec intercalations de gypses du Pliocène. Il s'agit d'un réseau de nappes communicantes. C'est la nappe la moins profonde, elle est de type captive.

3.1.2- La deuxième nappe des sables

Cette nappe est séparée par la précédente (première nappe des sables) par une formation d'argiles-gypseuse imperméable formant son toit. Elle est contenue dans les sables du Pontien (Miocène supérieur), plus perméable et plus continue que la première, elle est captive, son substratum est constitué d'argiles et d'argiles-sableuses.

3.1.3- L'aquifère des calcaires Sénonien-Eocène

Appelé *nappe des calcaires*, situé dans les calcaires fissurés du Sénonien carbonaté et de l'Eocène inférieur. Le Sénonien lagunaire forme son substratum et les argiles lagunaires et marnes de l'Eocène moyen forment le toit imperméable de cette nappe (Tab.26).

La profondeur du complexe terminal est comprise entre 100 et 600 m, sa puissance moyenne est de 300m. Elle est captive sur toute la région d'El-Oued, les zones d'alimentations sont situées au sud et au sud-est surtout le grand Erg oriental où la nappe devient moins profonde et libre (niveau statique entre 30 et 40 m).

Exploitée par 129 forages dans toute la wilaya avec 102 forages dans la zone d'étude (BG 2002).

Les zones d'alimentations : au Nord : l'atlas saharien, au Sud : le Tinherth, à l'Est le Dahar, et au Nord-Est le Nafusa, les exutoires de cette nappe sont les chotts algéro-tunisien et le golfe de Syrte.

3.1.4- Piézométrie et direction des écoulements

Les contributions successives élaborées depuis 40 ans, ont permis l'établissement de la carte piézométrique du complexe terminal (Fig.81).

La première publication faite par Cornet(1964), suivit par les travaux de Bel et Cuhe (1969), ERESS (1972), Levassor (1975), Gefli(1978), Idrotenco(1982), Armines (1984), Mamou (1990), Geomat (1994) et OSS (2003a et b).

Le fonctionnement Hydrodynamique compliqué de cet aquifère est la cause de la complexité de ses formations et sa structure.

Le niveau piézométrique de cette nappe est généralement inférieur à celui de nappe du complexe intercalaire. Les deux tiers des eaux de l'aquifère sont jaillissantes et fournissent 6 m³/s dans les années 1970 (ERESS :1972). L'artésianisme est plus développé dans la partie Nord du terrain que dans la partie Sud (Fig.80).

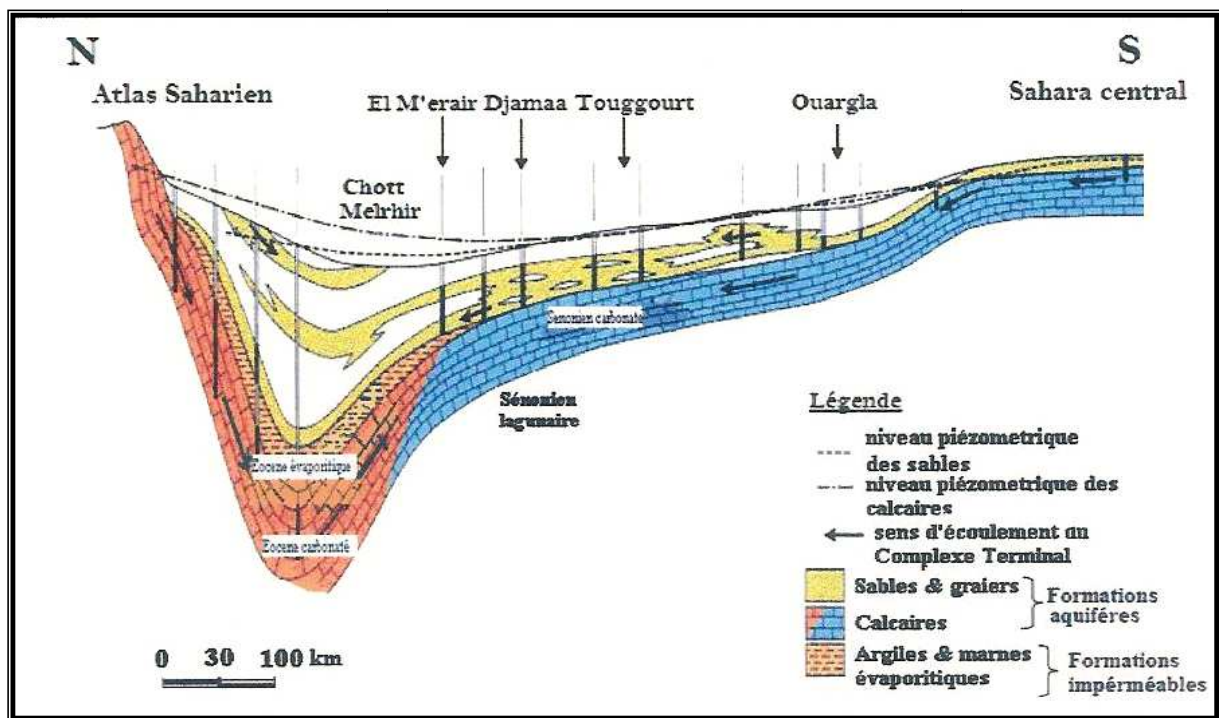


Fig.80 - Coupe hydrogéologique schématique (N –S) du Complexe Terminal(UNESCO)

La profondeur de cet aquifère varie entre 100 et 600 m, la température des eaux est peu élevée allant de 25 à 30° C. La transmissivité varie de 4 à 300 . 10⁻³ m²/s. et le coefficient d'emmagasinement de 0,5 à 150. 10⁻³ (TESCO, 1986). La porosité moyenne est : pour les calcaires 20 %, pour les sables 30 %.

Le nombre de forages implanté dans cette nappe a causé une baisse importante du niveau de la nappe, donc de l'artésianisme.

Mis à part la partie Est du complexe terminal où les eaux convergent vers le golf de Syrte en Libye, tous les sens des écoulements des eaux de cette nappe se dirigent vers la zone des chotts Mérouane, Melghir, Gharsa et Djerid, qui forment l'exutoire naturel et principal de la nappe.

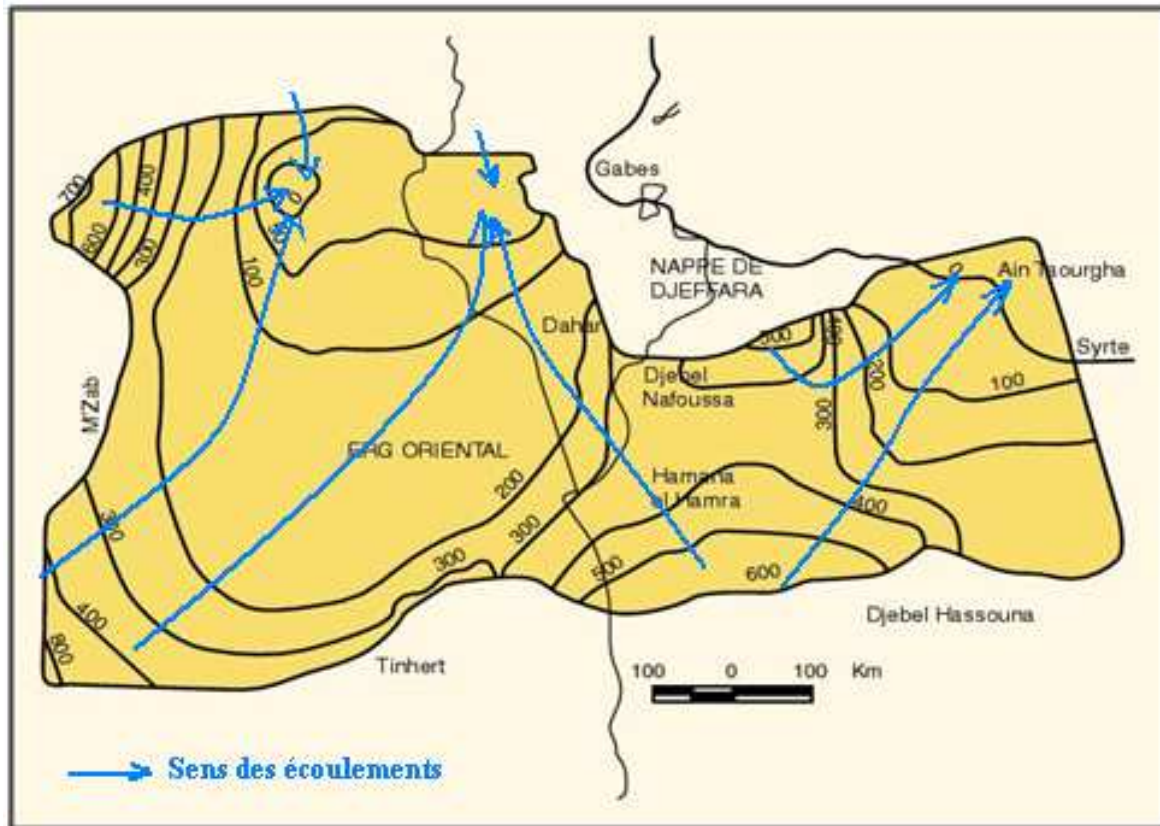


Fig.81 - Piézométrie du Complexe Terminal (OSS, 2003)

3.2- Le continental Intercalaire

Le Continental Intercalaire comprend les formations continentales du Crétacé inférieur Saharien (Néocomien, Barrémien, Aptien, Albien). Il est représenté par des dépôts sablo-gréseux et sablo-argileux, formant un système aquifère multicouches, dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 400 m.

L'aquifère est continu du nord au sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili du Hoggar, et d'ouest en est, depuis la vallée du Guir et de la Saoura jusqu'au désert libyen.

Une structure N-S majeure, la dorsale du M'Zab, divise le bassin en deux sous-bassins, occidental et oriental.

3.2.1- Les ressources en eaux du Continental Intercalaire

La nappe du Continental Intercalaire est alimentée par les eaux des précipitations tombées sur les bordures du bassin, tout au long des oueds qui descendent des massifs montagneux, notamment de l'Atlas saharien au Nord-Ouest et du Dahar à l'Est.

Des ruissellements en bordure de plateaux peuvent également participer à l'alimentation de la nappe sur le bord du Tademaït et du Tinrherh.

Elle est exploitée par trois forages artésiens, d'une profondeur de 1850 m. La pression en tête de forage est de 22 à 23 bars et le débit artésien de 222 l/s.

La température et la pression des eaux sont élevées, elles sont estimées respectivement à 60° et 26 bars à la sortie du forage.

L'extension géographique de la formation aquifère dépasse beaucoup, en effet, la dépression du bas Sahara, elle dépasse 600 000 km² (CASTANY, 1968).

Cette nappe est limitée à l'Ouest par la vallée de oued Saoura-Messaoud, au Sud par une ligne Est-Ouest de Reggan-Fort-Flatters, au Nord par la chaîne de l'atlas, vers l'Est elle dépasse les frontières de l'Algérie et s'étend dans le Sud tunisien et le Nord libyen. La formation affleure largement au Nord, dans les régions montagneuses de l'atlas et au Sud-Ouest autour de Tadmait, d'El-Goléa et à l'Est de Ain-Salah.

Au cours des 50 dernières années, les prélèvements d'eaux souterraines, en particulier sur les zones algériennes et tunisiennes du SASS ont rapidement augmenté. En effet, en 2000, on a estimé les taux de prélèvements à 550 millions de m³/an en Tunisie, 1 500 millions de m³/an en Algérie, et 450 millions de m³/an en Libye.

Surface	1.000.000 km²		
Réserves théoriques	60.000 milliards de m³ dont 10 000 milliards/m³ exploitables		
Recharge	1 milliard de m³/an		
Besoins (m³/an)	1970	2000	2030
	600 millions	2,2 milliards	8 milliards
Population (en millions)	1,0	4.0	8
Surfaces irriguées prévisionnelles	50 000 ha	170 000 ha	400 000 ha
Pays	Algérie + Libye + Tunisie		

Tab.36 - Présentation du Bassin (SASS). OSS,2003

Même s'il s'agisse d'une eau principalement fossile, emmagasinée au cours des périodes pluvieuses du quaternaire, l'alimentation se poursuit encore dans les zones d'affleurement : Atlas saharien, Grand Erg Occidental.

L'agriculture consomme environ 80 % du volume d'eau prélevé et il faut s'attendre à ce que les trois pays augmentent leurs prélèvements durant les prochaines années. De 0,6 milliard de m³ environ en 1950, le volume d'eau prélevé annuellement est passé à 2,5 milliards de m³ en 2000 (et ce, à partir de 8 800 points d'eau).

Les réserves de cette nappe peuvent permettre l'irrigation de 100 000 hectares pendant 200 000 ans ; les prélèvements actuels sont de l'ordre de 5 m³/s.

Les eaux de l'Albien contiennent généralement moins de 2 g de résidu sec par litre, cependant, elles restent généralement moins salées que celles du Complexe Terminal.

Minéraux (mg/l)	Robbah	El-Oued	Guemar
Chlorure de sodium	3262	506.9	828.6
Chlorure de K	91	242.4	121
Chlorure de Mg	85.3	352	318.6
Sulfate de chaux	2129.3	2427.3	2366.3
Sulfate de Mg	289.3	294.1	586
Sulfate de soude	/	/	742
Azote	236.5	660	/
Carbonate de chaux	44	80	20
Carbonate de Mg	30	15	11
Silice	30	13	50
Oxyde de fer	45	53	20

Tab.37 - Quantité des minéraux contenus dans 1litre d'eau de l'albien

Source : La monographie d'El-Oued

Débits et usage des forages du CI

Nom du forage	Commune	Coord X	Coord Y	Pompage h/jours	Débit m ³ / h	Usage
ElOued DHW101	El-Oued	298723	3692992	24	747	AEP
Chouhada DHW102	El-Oued	302329	3690504	24	461	AEP
Sahan-Berry	H Khalifa	322252	3717180	-	-	IRR+AEP

Tab.38 - Débits et usage des forages du CI. Source : DHW. El-Oued

3.2.2- Piézométrie et direction des écoulements

Les travaux de Cornet(1964), ERESS (1972), Pallas(1978), Idroteneo(1982), Geomat (1994) et OSS (2003a et b), ont participé à l'élaboration de la carte piézométrique du CI. Le niveau piézométrique de cette nappe est généralement supérieur à celui de la nappe du complexe intercalaire.

Les circulations d'eau souterraine du CI dans le Grand Erg Oriental convergent vers un seul exutoire : la région du Golfe de Gabès en Tunisie. La direction majeure d'écoulement, W-E, vient de l'Atlas Saharien et de la dorsale du M'Zab. Une autre direction vient du Sud et du Sud-Est.

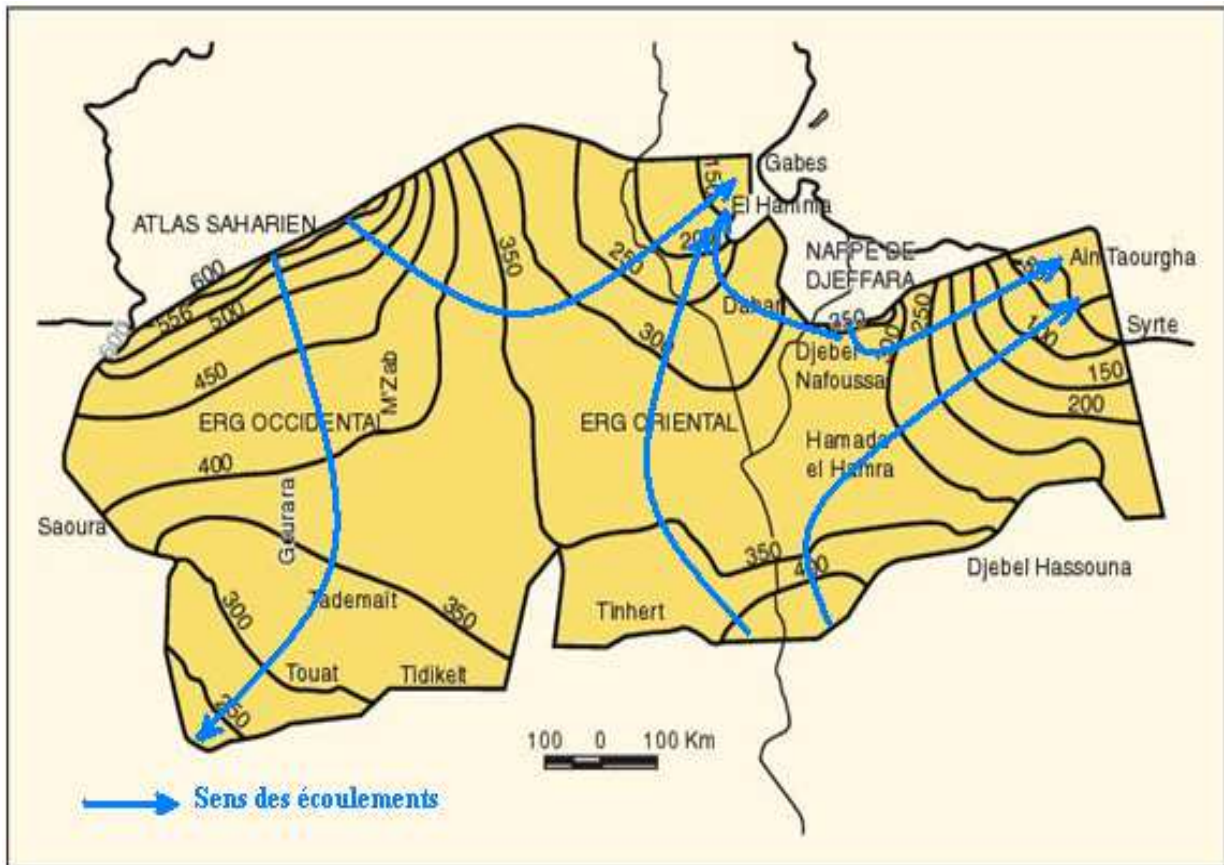


Fig. 82 - Piézométrie du Continental Intercalaire. (OSS, 2003)

Le sens des écoulements du Complexe terminal et celui du Continental intercalaire sont représentés sur la carte géologique (Fig.83).

4- Remontée des eaux de la nappe superficielle

La vallée d'El Oued s'étend sur 3000 km² dans une configuration géographique caractérisée par une topographie plane et sans exutoire.

L'économie de la région est essentiellement basée sur la phoeniculture dont une grande partie localisée dans les ghouts qui avoisinent le nombre de 10 000.

Le système d'irrigation traditionnel qui reposait sur les ressources de la nappe phréatique, assurait un équilibre entre les besoins et les ressources en eau.

Le développement économique de la région a induit une forte croissance démographique.

Pour faire face aux besoins en eau domestique, l'Administration a eu recours aux ressources des nappes profondes (nappe du Complexe terminal et du Continental intercalaire).

4.1- Origine du phénomène

- Exploitation intensive des ressources en eau des nappes souterraines profondes (CI-CT) ;
- Fuites des réseaux d'AEP et d'assainissement ; Insuffisance de réseaux d'évacuation des eaux usées ;
- Absence d'exutoire ;
- Rejet dans la nappe phréatique des débits prélevés sur les nappes du complexe terminal et du continental intercalaire (albien).
- Insuffisance de drainage des eaux d'irrigation ;

4.2- Mesures prises pour limiter le phénomène

Les mesures concrètes qu'ont été appliquées, au début au niveau de la commune de Guemar puis exécutées surtout le territoire de la wilaya, parmi ces mesures :

- La réduction des horaires d'allocations d'AEP (02 heures/24 heures au lieu de 24 heures/24 heures pour chaque cité) ;
- La création de nouveaux puits améliorés dans la nappe phréatique pour l'agriculture ;
- L'arrêt d'exécution des nouveaux forages pour l'irrigation dans le CT et le CI remplacés par des puits dans la nappe phréatique ;
- Développement de zones agricoles irriguées depuis la nappe phréatique :Le développement d'exploitations agricoles irriguées depuis la nappe phréatique dans ou aux alentours des zones touchées joue un rôle important pour stabiliser ou inverser la tendance à la remontée, ces exploitations rejetant dans l'atmosphère 10 000 à 15 000 m³ d'eau/ha par an.
- Remblayage des Ghouts : Le remblayage des Ghouts ennoyés n'est pas une mesure pour inverser le phénomène, mais permet de limiter la prolifération de moustiques et de décharges en milieu urbain. Il évite que l'eau de la nappe se charge en sels par évaporation.

Pour faire face aux besoins en eau domestique, l'Administration a eu recours aux ressources des nappes profondes (nappe du Complexe terminal et du Continental intercalaire). La comparaison de ces données avec celles relatives à la situation de l'an 2000 permet de mieux voir la destination des eaux mobilisées, ainsi que la demande en eau marquée par

l'augmentation du nombre des forages : Le nombre des puits réalisés dans la nappe phréatique est de 10012. Ces derniers sont destinés à l'irrigation, et rarement pour l'alimentation en eau potable dans les zones rurales. Parmi les 96 forages réalisés dans les deux nappes profondes (CT et CI), seulement 86 sont exploités ; 71 sont destinés à l'alimentation en eau potable et 15 à l'irrigation.

· La quantité totale d'eau mobilisée quotidiennement pour l'alimentation en eau potable est de 140000 m³/jour qui correspond à une dotation moyenne journalière de 360 l/j/habitant (Le nombre d'habitation est estimé de 385677 en 2000).

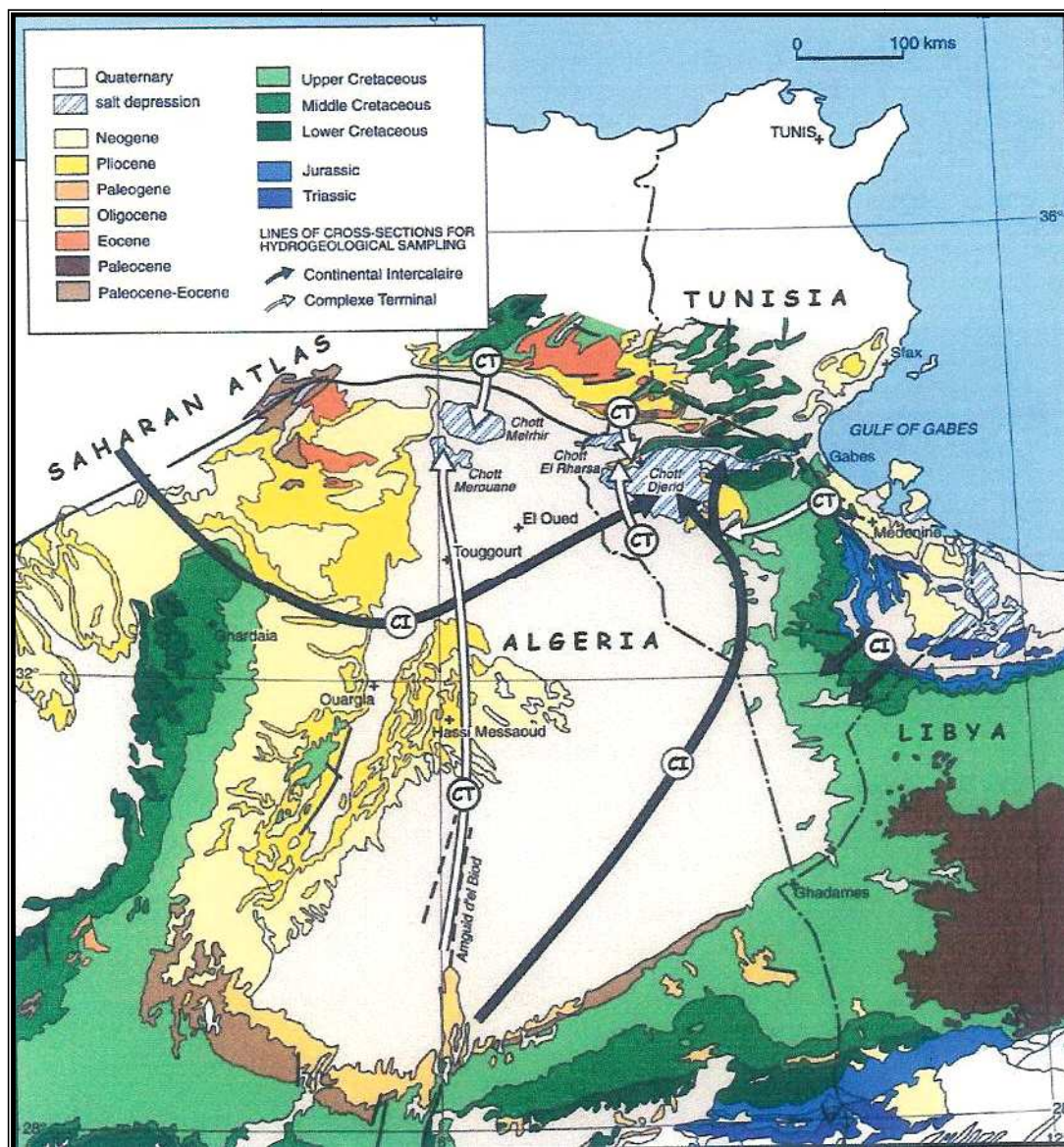


Fig.83 - Carte géologique du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement du CT et CI. ERESS modifiée par Guendouz et Al, 2003

5- Age des eaux et vitesse moyenne d'écoulement (chlore-36)

Le carbone-14(^{14}C) ne peut être utilisé pour la datation des eaux du CI : les teneurs sont trop proches de la limite de détection, ou même inférieures. En revanche, le chlore-36(^{36}Cl), avec sa longue période (301 000 ans), est un bon candidat pour essayer d'obtenir des informations sur le temps de résidence des eaux du CI.

Quelques mesures ont été réalisées dans les années 1980 (Fontes et al., 1985 ; Guendouz, 1985 ; Michelot et al., 1989). Plus récemment, des mesures complémentaires ont permis de mieux couvrir le bassin. Parmi ces mesures, six concernent des forages captant l'Albien, alignés selon la direction principale d'écoulement W-E. La nette décroissance des teneurs en (^{36}Cl) qui apparaît dans le sens de l'écoulement permet de proposer des âges (Fig.84).

La prise en compte des autres phénomènes susceptibles d'affecter l'évolution des teneurs en chlore-36 dans l'aquifère (dissolution de minéraux chlorurés et production in situ de ^{36}Cl) conduit à des incertitudes très élevées sur les «âges» estimés. Toutefois, il est probable que la vitesse moyenne de circulation des eaux dans ce grand système n'excède pas 1 à 2 m par an.

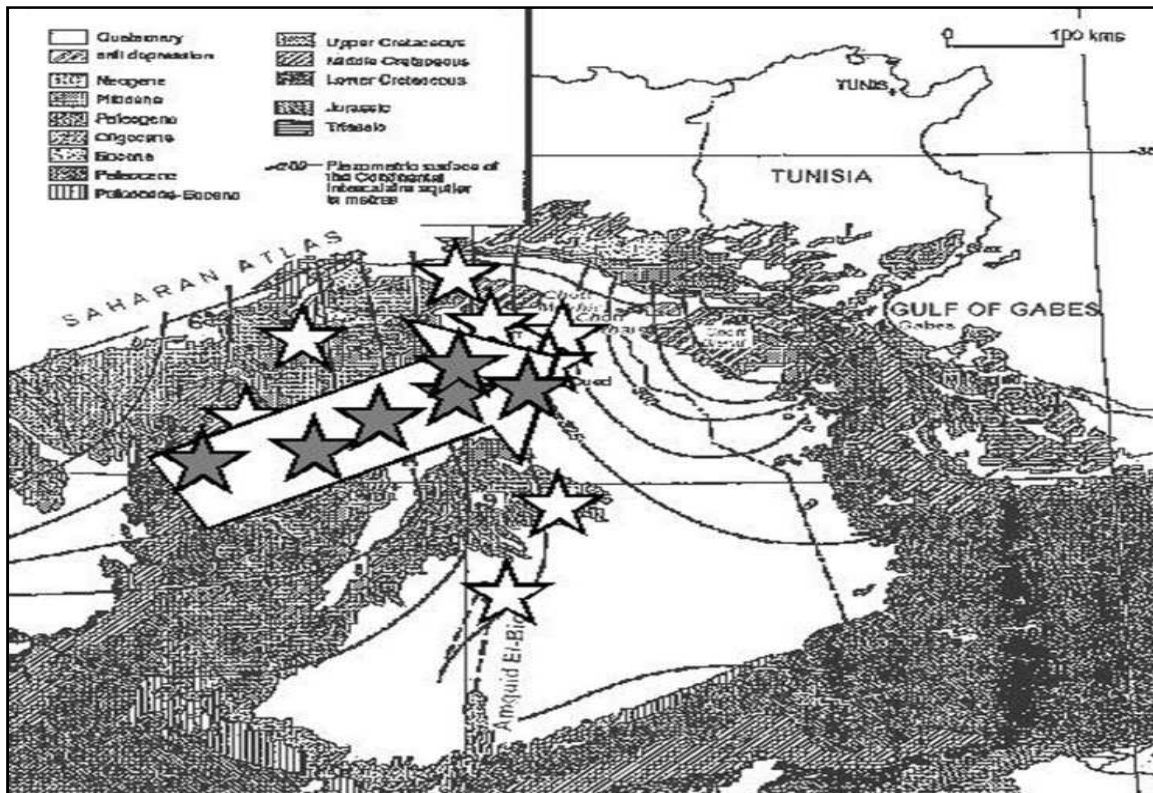


Fig. 84 - Points de prélèvements (anciens, récents), pour analyse du ^{36}Cl (Guendouz et Michelot)

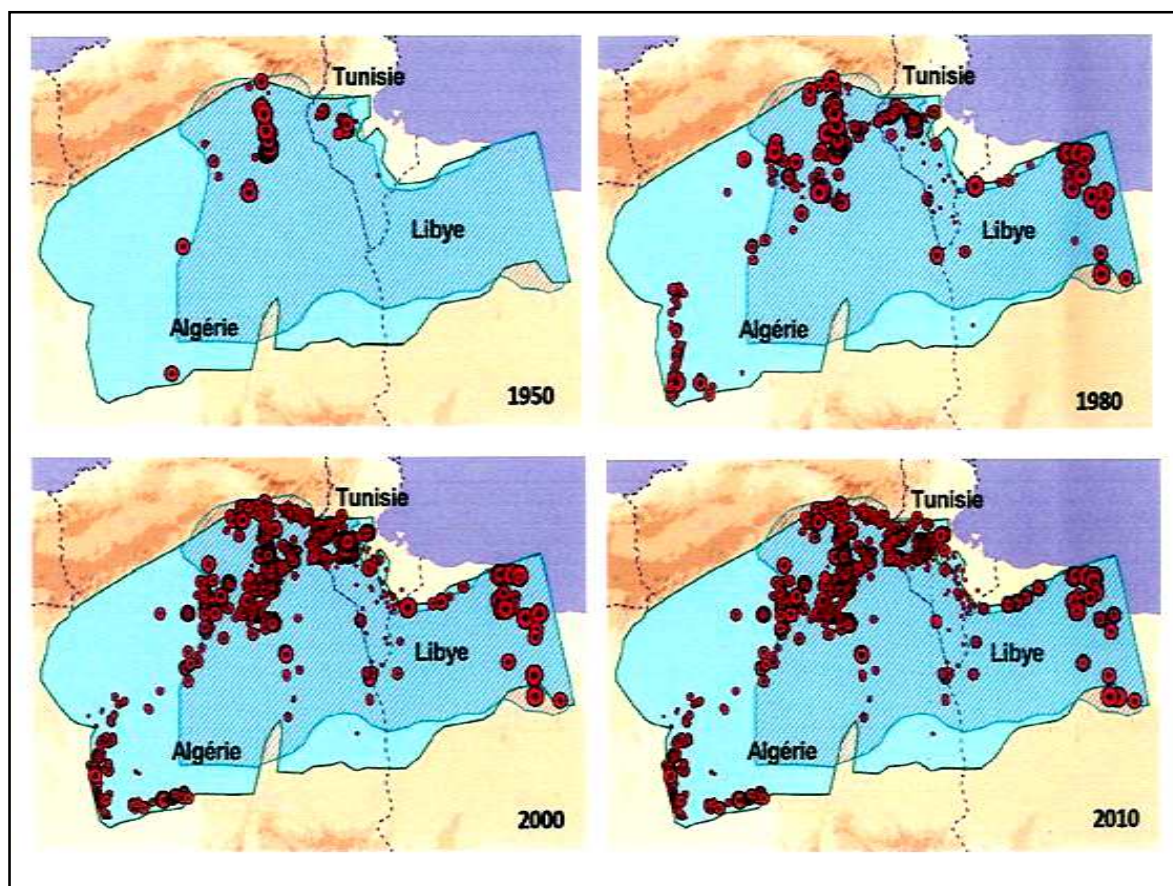
6- Les prélèvements dans le Bassin du Sahara Septentrional

Depuis plus de quatre décennies, le bassin du Sahara Septentrional connaît un important accroissement des prélèvements, passant de 300 Millions de m³ /an en 1950, à 600 Millions de m³ /an en 1970 et à 2 150 Millions de m³ /an en l'an 2000.

On constate ainsi que les prélèvements sur le CT et CI ont, en gros, doublé dans les années 1980.

Les données d'exploitation recueillies pour 2008 indiquent une légère stabilisation de ces prélèvements à 2134 Millions de m³/an.

On doit donc chercher ensemble une certaine forme de gestion concertée pour garder cette stabilisation et pour l'avenir de ce système.



● Point de prélèvement et son volume

Fig.85 - Evolution des prélèvements et répartition des Forages dans le SASS. (OSS, 2008)

L'évolution du nombre de forages et de leur régime d'exploitation indique des croissances vertigineuses en matière de qualité d'eau au cours des 20 dernières années.

Cette exploitation atteint aujourd'hui 2,2 milliards de m³/an, soit 1,33 milliards de m³/an en Algérie. Si cette évolution partagée par les trois pays, devait se prolonger, il y aurait sans doute de sérieuses raisons de s'inquiéter pour l'avenir des régions sahariennes, où l'on a pu déjà enregistrer les premiers signes d'une détérioration de l'état de la ressource en eau. (Fig.85)

Ces prélèvements, dans les trois pays et leur total dans le SASS, sont représentés sur le diagramme suivant : (Fig.86)

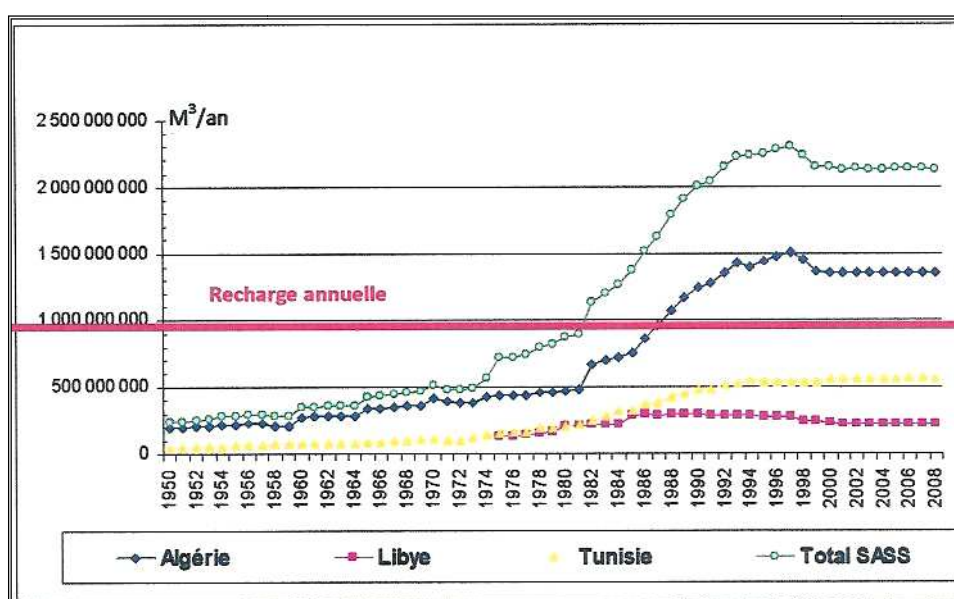


Fig.86 - Diagramme de l'évolution des prélèvements dans les trois pays

Ces prélèvements opérés à partir de plus de 18000 Forages en 2008, sont à usage essentiellement agricole, et leur volume supérieur à la recharge annuelle depuis le début des années 1980, entraîne des situations préoccupantes par rapport à :

- La baisse de l'artésianisme.
- La baisse des niveaux et l'augmentation des coûts de pompage .
- La salinisation des eaux et des sols.

En outre, ces ressources seront amenées à être de plus en plus sollicitées compte tenu

- De la croissance démographique.

- Du recours intensif aux eaux par des transferts destinés à alimenter les zones périphériques du bassin qui sont très sensibles aux changements climatiques.

L'intense évolution de l'exploitation des aquifères du SASS a causé des rabattements considérables, représentés dans les schémas suivants (Fig.87)

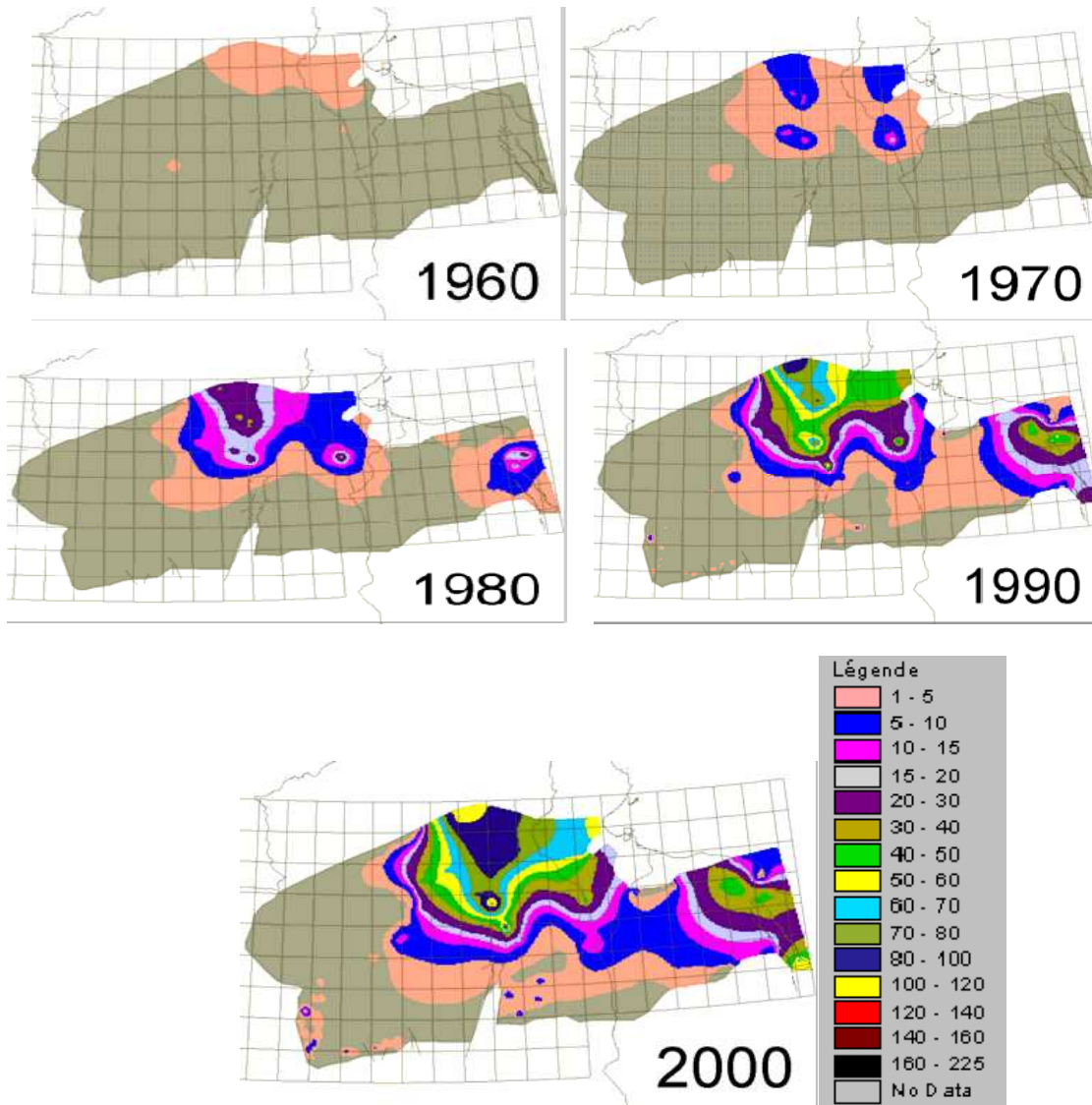


Fig.87 - Evolution des Rabattements (m) dans le SASS, 1960 – 2000. (OSS-2008)

7- Conclusion

La nappe superficielle est constituée de dépôts sableux et sablo-argileux avec des intercalations d'argiles et de gypse.

La remontée de la nappe phréatique amorcé dans les années 1975 -1980 et ayant eu comme conséquence l'enneigement de près d'un millier de ghouts la mort de 100000 palmiers

et la menace de 200000 autres. L'eau stagnante en ville menaçant la santé de la population et les fondations des habitations.

Ce phénomène est observé autour des centres Urbains d'El-Oued, Nakhla, Guemmar, Z'gom, Oued Alanda et Oued Turk, pré des exploitation agricole irriguées par des nappes profondes et au niveau du rejet de la ville d'El-Oued. Les baisses de niveau sont produites par une forte activité agricole.

Les deux autres aquifères profonds sont :

Le Complexe Terminal, CT.

Le Continental Intercalaire, CI, (plus profonde).

Le Complexe Terminal est constitué de formations continentales sableuses et sablo-argileuses avec des intercalations gypseuses et de passées de grès qui reposent en discordance sur les formations calcaires érodées de l'Eocène inférieur, il s'étend sur une superficie de 350000 Km²

Il est constitué de trois nappes superposées de haut en bas on a :

la première nappe des sables, la deuxième nappe des sables et l'aquifère des calcaires Sénonien-Eocène.

le continental intercalaire est représenté par des dépôts sablo-gréseux et sablo-argileux, formant un système aquifère multicouches, dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 400 m.

La température et la pression des eaux sont élevées, elles sont estimées respectivement à 60° et 26 bars à la sortie du forage. Elle est exploitée par trois forages artésiens, d'une profondeur de 1850 m. La pression en tête de forage est de 22 à 23 bars et le débit artésien de 222 l/s. Les eaux du continental intercalaire contiennent généralement moins de 2 g de résidu sec par litre et es réserves peuvent permettre l'irrigation de 100 000 hectares pendant 200 000 ans ; les prélèvements actuels sont de l'ordre de 5 m³/s.

CHAPITRE VI

Hydrogéochimie et environnement

Hydrogéochimie de l'aquifère Mio-Pliocène

Hydrogéochimie de la nappe des sables Quaternaires

Incidences de l'activité humaine sur l'évolution chimique des eaux de
la nappe phréatique

CHAPITRE : VI. Hydrogéochimie et environnement

1- Introduction

La ressource des nappes du système multicouche d'El-Oued est très sollicitée pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable. Cependant, l'aridité du climat associée à l'artésianisme des nombreux forages d'exploitation ont affecté la qualité chimique de la nappe phréatique déjà marquée par la mise en solution des minéraux évaporitiques des argiles.

L'étude hydrogéochimique est basée sur les méthodes classiques et récentes de traitement des données hydrochimiques. A travers les échanges les différents échanges de type eau-roche et entre les solutions aqueuses, elle vise à apporter des informations complémentaires sur les circulations d'eau de l'hydrosystème.

Les échantillons d'eau prélevés des forages exploitant l'aquifère du complexe terminal et ceux prélevés des sources et des puits de l'aquifère des sables quaternaires, ont été analysés au laboratoire de l'ANRH d'El-Oued.

Les ions calcium et magnésium ont été dosés par spectrométrie à flux continu auto-analyseur. Les alcalis (sodium et le potassium) ont été dosés par photométrie de flamme. Les bicarbonates ont été analysés par volumétrie, les sulfates par dosage turbidimétrique, et les chlorures ainsi que les nitrates ont été dosés par colorimétrie auto-analyseur à flux continu.

Les caractéristiques physico-chimiques et chimiques des eaux échantillonnées sont exposées en annexe. Le traitement des données chimiques fondamentales a été effectué à l'aide du logiciel DIAGRAMMES 5.6.

Avant de procéder à l'interprétation géochimique, il est essentiel de procéder à la validation des données hydrochimiques et celle des paramètres physicochimiques. Cette étape revêt une grande importance pour la suite de ce travail.

2- Hydrogéochimie de l'aquifère Mio-Pliocène

Une campagne de prélèvement d'eau de forages exploitant la nappe mio-pliocène a été réalisée en mars 2008 au niveau de 14 forages. Les données hydrochimiques et celles des variables calculées sont exposées en annexe.

- Balance ionique

Les solutions devant être électriquement équilibrées, l'écart relatif entre les cations et les anions sert de critère principal pour l'évaluation de la qualité des résultats de l'analyse.

Les données analytiques présentant une balance ionique entre 0 et 1, sont globalement de très bonne précision (Annexe).

On considère que la mesure de conductivité est fiable si l'écart entre la conductivité mesurée sur le terrain est proche de la minéralité calculée à partir des masses analysées. Dans le cas contraire, l'écart traduit une mesure erronée liée au calage du conductivimètre.

- Cohérence entre la composition chimique en éléments majeurs et la conductivité électrique

La conductivité électrique mesurée aux différents points d'eau est comprise entre 3670 et 4780 $\mu\text{S/cm}$. Ces mesures comparées aux valeurs calculées montrent un écart assez important révélé par la droite de régression et le coefficient de détermination (Fig.88).

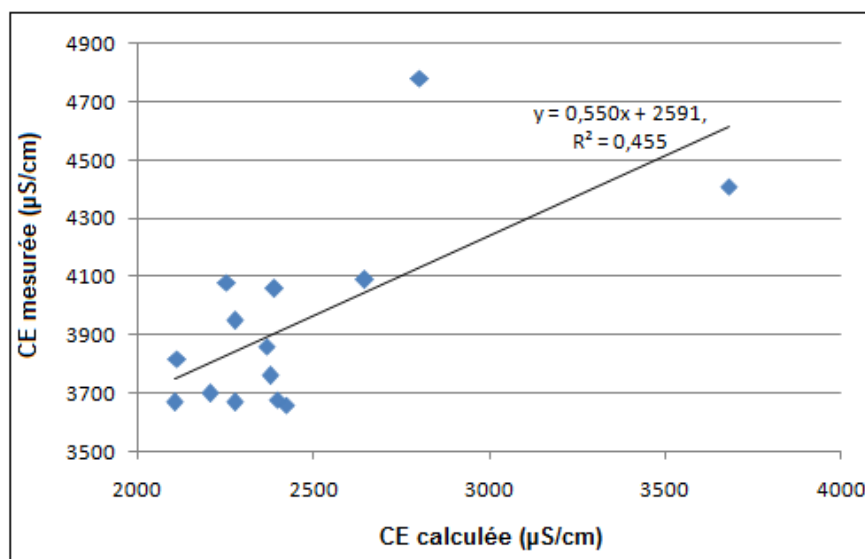


Fig.88 - Corrélation entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée

2.1- Paramètres physicochimiques

2.1.1- Température

La température des eaux varie très peu (entre 15,3 et 15,7°C).

2.1.2- pH

Mises à part l'eau des forages 9 et 12 indiquant une augmentation de l'alcalinité, le pH des autres eaux est très proche de la neutralité. L'alcalinité étant fonction des bicarbonates, ces données sont en conformité avec les faibles teneurs de cette substance.

2.2- Variables calculées

A partir des variables pCO₂, l'état géochimique et la minéralisation des eaux, il est possible de retracer le parcours de l'eau.

2.2.1- Pression partielle en CO₂

La pCO₂ équilibrante des eaux varie de 0,33 10⁻² et 1,03.10⁻² atm.

Ces faibles teneurs renvoient à une origine atmosphérique et biogénique.

2.2.2- Etat géochimique vis-à-vis du gypse et de la calcite

L'état de sous saturation vis-à-vis du gypse (I_{sg}<0) et vis-à-vis de la calcite (-0,06<I_{sc}<0,1) de l'ensemble des eaux signale soit un mélange avec des eaux peu chargées en sels, ou des eaux ayant précipité le CaSO₄.

2.2.3- Minéralisation ou TDS

Les teneurs entre 1530 et 3009 mg/L en total de solides dissous témoignent d'une forte dissolution de minéraux. Ces variations sont liées aux circulations d'eau locales.

2.2.4- Dureté [°THf]

Toutes les eaux sont très dures (107 à 205) et dépassent largement le seuil toléré (50). Ces valeurs sont en regard des très fortes concentrations en calcium, magnésium, liées à la mise en solution des dépôts d'évaporites.

2.2.5- Conductivité électrique

Nous l'avons vu précédemment, la conductivité électrique mesurée (3660 à 4780 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est peu fiable. Aussi nous prendrons en compte la conductivité calculée à partir du contenu chimique des eaux, celle-ci varie de 2114 à 3680 $\mu\text{S}/\text{cm}$ signifiant une charge élevée.

2.3- Les ions majeurs

Les concentrations en anions et en cations majeurs des aquifères des zones hyper arides et arides sont nettement plus élevées que celles des aquifères des zones climatiques et des zones semi-arides et humides. Parmi les ions majeur, la nappe mio-pliocène est très chargée en SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Cet état de fait est à annexé aux évaporites du système aquifère sable-argiles gypseuses.

2.4- Faciès géochimiques

2.4.1- Rapports molaires $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$

Appliqué aux eaux très minéralisées, ce diagramme permet de visualiser l'évolution géochimique spatiale des eaux (Nezli et al, 2006).

La projection des rapports molaires des substances Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} et Cl^- (Fig.89), scinde les eaux en trois groupes :

- chlorurée sodique
- chloruré magnésien
- sulfaté sodique.

Le groupe d'eau chloruré magnésien est prédominant.

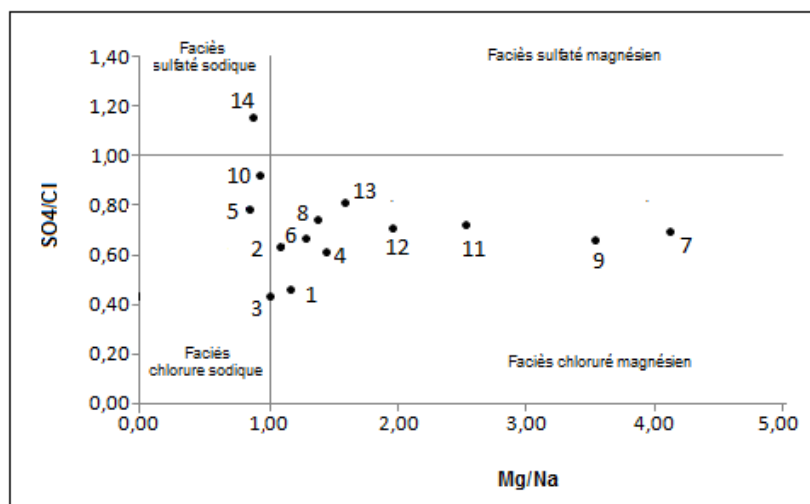


Fig.89 - Faciès géochimiques des eaux par les rapports molaires SO_4^{2-}/Cl vs Mg^{2+}/Na^+

La prédominance du faciès chloruré magnésien indique un échange cationique entre le Na^+ et le Mg^{2+} . Au contact des argiles, l'eau échange facilement le Na^+ avec le Ca^{2+} ou Mg^{2+} lorsque celle-ci est saturée en Ca^{2+} . Ce processus expliquerait la charge en Mg^{2+} des eaux. Par ailleurs, les eaux étant particulièrement riches en Cl^- et Mg^{2+} suggèrent la présence de carnallite parmi les évaporites.

2.4.2- Diagramme de Piper

La projection des quantités en réaction des substances majeures sur le diagramme de Piper permettra d'affiner l'interprétation des données hydrochimiques.

Le triangle des cations montre que la moitié des eaux est très chargée en calcium. Le reste des eaux ne présente pas de cations dominants. Le triangle des anions révèle une très nette dominance des sulfates pour toutes les eaux (Fig.90).

Etant données les caractéristiques des concentrations en Ca^{2+} et SO_4^{2-} , il est à considérer que le diagramme de Piper a essentiellement mis en évidence la mise en solution des niveaux importants de gypse contenus dans les argiles.

Le diagramme global distingue dans l'ensemble deux types d'eau (Fig.91) : hyper sulfatée calcique et sulfatée calcique.

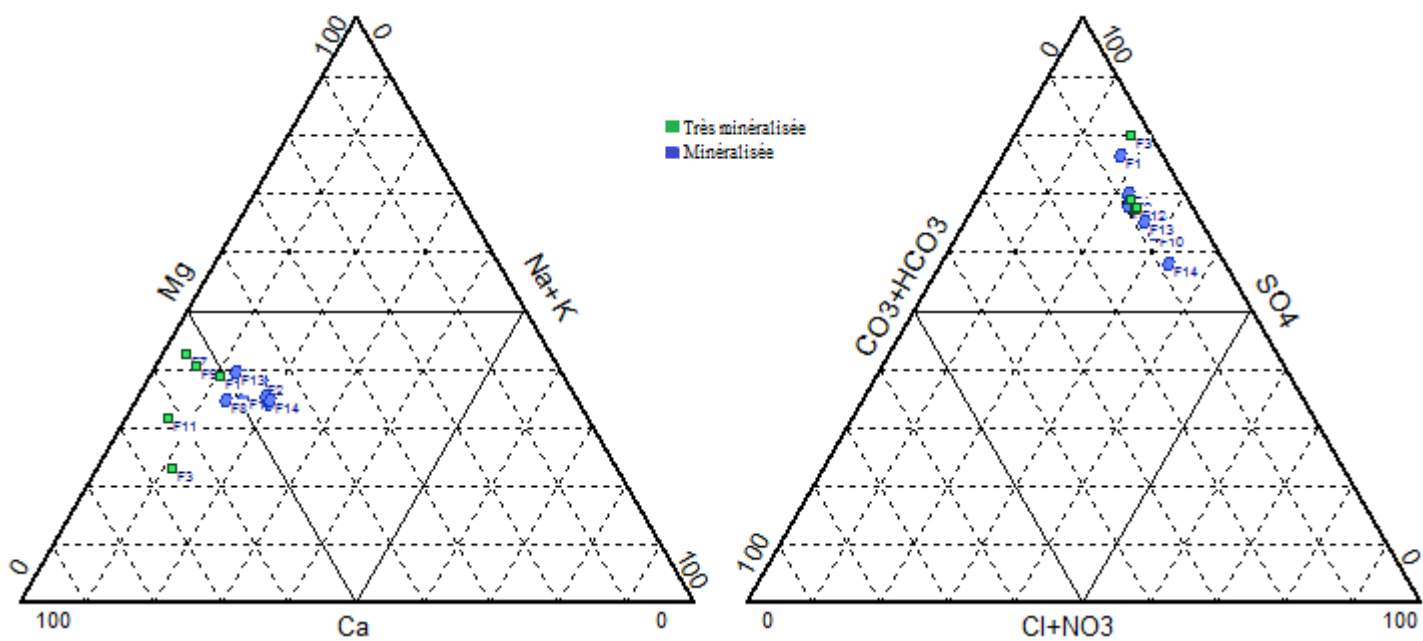


Fig.90 - Diagrammes triangulaires de Piper

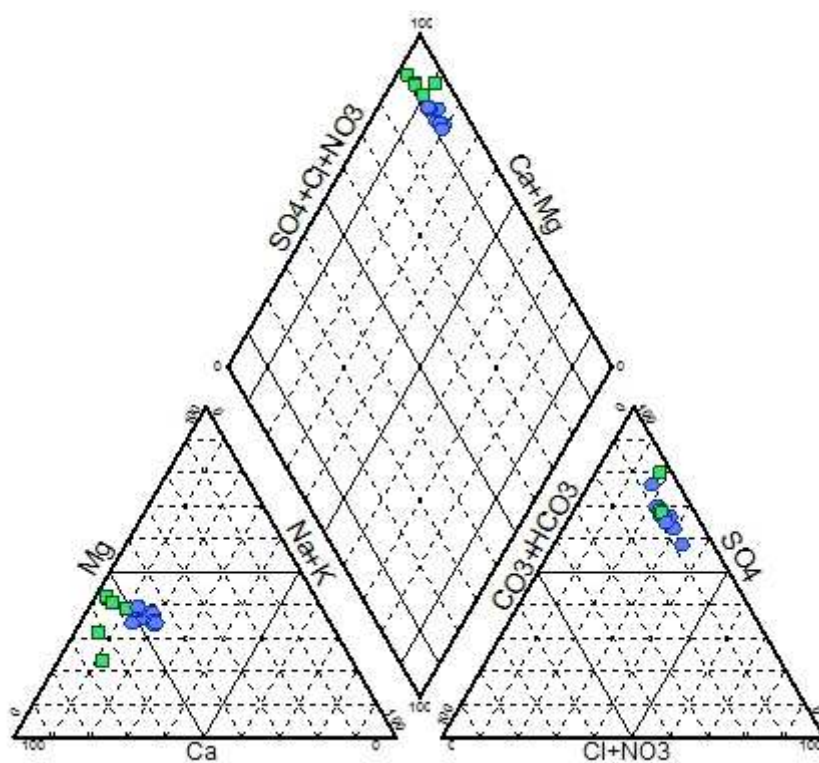


Fig.91 - Diagramme global de Piper

2.4.3- Profils hydrogéochimiques Schöeller-Berkaloff

Les profils hydrogéochimiques montrent une seule famille chimique d'eau, contenant des alcalins et des sulfates en proportions différentes (Fig.92).

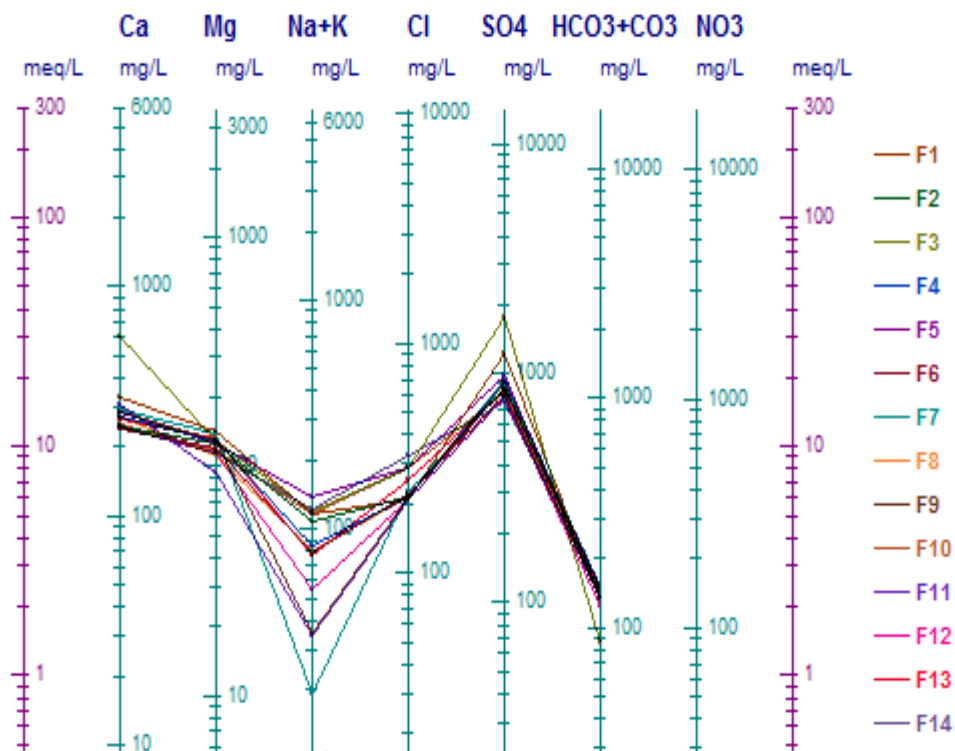


Fig.92 - Profils hydrogéochimiques des eaux de forage de la nappe mio-pliocène

3- Hydrogéochimie de la nappe des sables quaternaires

Parmi les campagnes d'échantillonnage, nous avons retenu les données hydrochimiques datant de 1992 pour lesquelles nous disposons de données complètes pour un grand nombre d'échantillons (53), prélevé des puits et piézomètres au cours du mois de mars 1992. Les données hydrochimiques sont exposées en annexe.

- Balance ionique

La balance ionique des cinquante trois échantillons, entre 5 et 10%, indique que les analyses sont globalement acceptables.

- Conductivité électrique mesurée et la conductivité électrique calculée

La conductivité électrique mesurée aux différents points d'eau est comprise entre 2540 et 10450 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La conductivité mesurée est très fiable du fait de la valeur 0,958 du coefficient de détermination R^2 de valeur 0,958 (Fig.93).

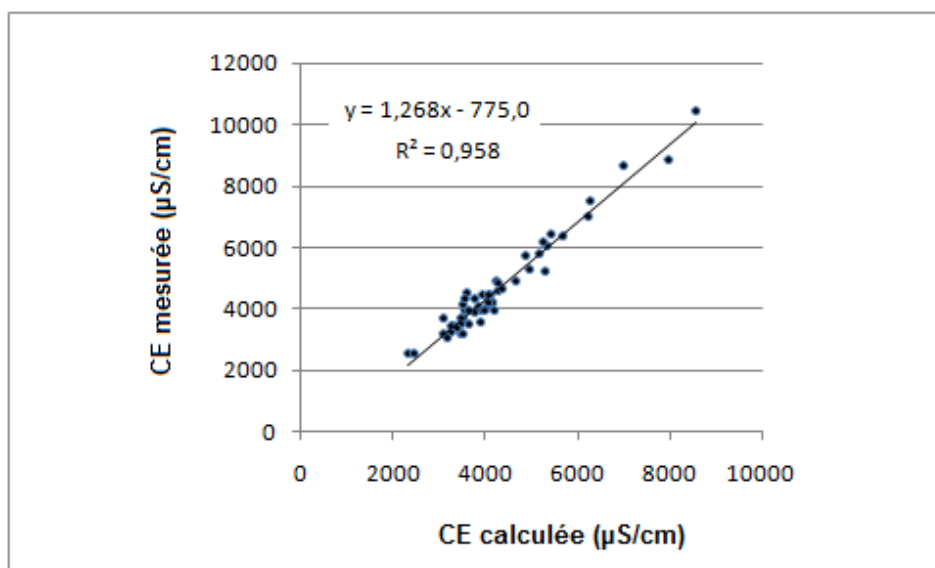


Fig.93 - Corrélation entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée

3.1- Paramètres physicochimiques

La variabilité de la température et de la conductivité électrique entre les différents points de mesures fournit une première appréciation des modalités d'alimentation de l'aquifère.

3.1.1- Température

La température des eaux prélevées dans les puits et sources varie entre 14,2 et 28,8°C. Les eaux libellées, 42 et 53, prélevées des puits possèdent les plus hautes températures (respectivement 25 et 28,8°C). Celle des autres eaux présente varie entre 14,2 et 22,6°C.

La diversité de la température de la nappe superficielle est à rapporter aux apports d'eaux conséquents aux nombreux forages implantés dans les aquifères du Complexe terminal et très probablement du Continental intercalaire dont la ressource en eau thermique constitue une immense réserve d'eaux fossiles datant du Pléistocène d'après des traçages isotopiques (Moulla et Gendouz, 2003).

3.1.2- pH

Le pH des eaux de la nappe phréatique de Oued Souf est neutre ou alcalin. Avec des valeurs supérieures à 7,4, plus de la moitié des eaux ont un pH alcalin. L'équilibre entre diverses composantes de l'alcalinité, OH^- et HCO_3^- , dépend de la pression partielle en CO_2 :

$\text{OH}^- + \text{CO}_2 \text{ aq.} = \text{HCO}_3^-$, S'il y a peu de CO_2 dans le milieu, OH^- devient la forme prédominante.

3.1.3- Corrélation entre le pH et le potentiel redox

La corrélation entre les paramètres pH et potentiel redox (Eh) des eaux, de coefficient de détermination 0,94, traduit une relation linéaire entre le pH et Eh (Fig.94).

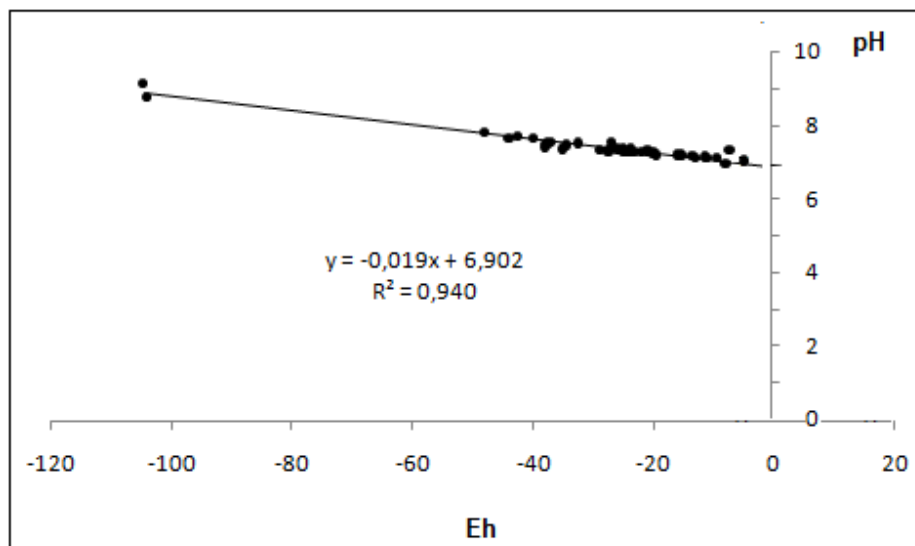


Fig.94 - pH vs Eh

Le pouvoir oxydo-réducteur est lié à la constance des teneurs en $\text{O}_{2\text{aq}}$ dans les eaux salines au seuil max de 5 à 8 g/L de NaCl (Annexe) ; au-delà de ces valeurs la solubilité de O_2 diminue. Ainsi, l'alcalinité non carbonatée observée dans la majeure partie des eaux est due à l'autoprotolyse de l'eau (dissociation de l'eau) libérant les OH^- .

Les valeurs négatives du potentiel redox observées dans toutes les eaux traduisent un milieu réducteur. La réduction et la solubilisation par l'activité biologique, des oxydes de Fe II et III, Mn, ainsi que les chlorures et certains dérivés du soufre, crée des conditions suffisamment réductrices ainsi qu'une augmentation de l'alcalinité.

3.1.4- Corrélation entre le pH et l'alcalinité carbonatée

La distribution des points et le coefficient de détermination (Fig.95) montrent que le $\text{CO}_{2\text{aq}}$ et HCO_3^- libre et complexe n'expliquent que 14% du pH alcalin.

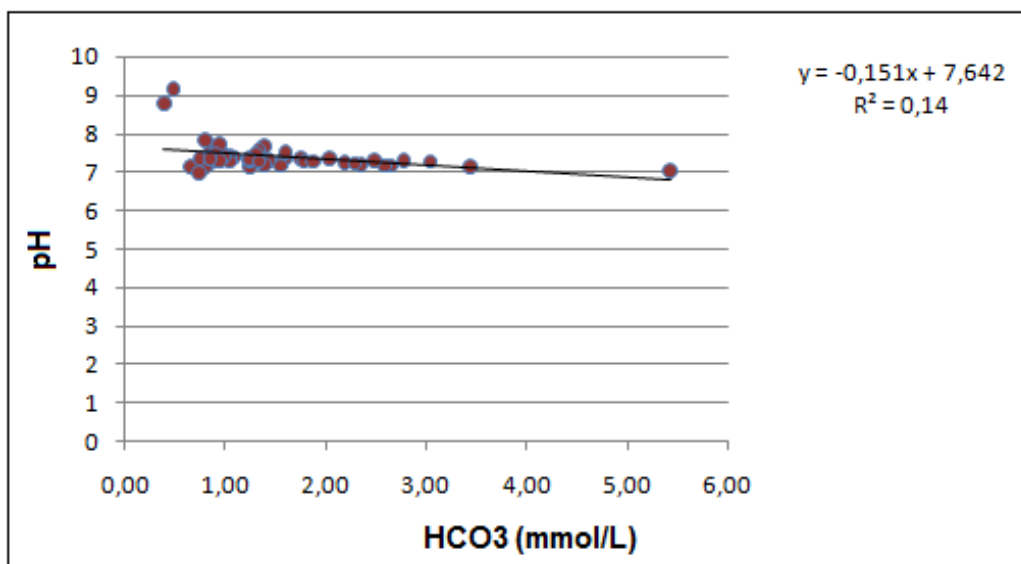


Fig.95 - pH vs HCO3

Du fait de leurs origines, la majeure partie des eaux présente un déficit en CO₂ gazeux ou aqueux, et par voie de conséquence des teneurs faibles en HCO₃⁻ (Annexe).

3.2- Variables calculées

3.2.1- Pression partielle en CO2

La pCO₂ équilibrante des eaux varie de 2.10⁻⁵ à 2,9.10⁻¹ bar. Ces fortes variations sont à rapporter à des origines différentes, notamment, atmosphérique biogénique.

3.2.2- Etat géochimique vis-à-vis du gypse et de la calcite

Le calcul de la saturation vis-à-vis du gypse indique que la majorité des prélèvements d'eau est saturée à sursaturée (Isg > 0) ; les eaux en état de sous saturation (Isg < 0) signalent un mélange avec des eaux peu chargées en sels.

Les eaux présentant un indice de saturation vis-à-vis de la calcite supérieur à 0,25 sont susceptibles de précipiter du CaSO₄, ce cas est fréquent dans les zones arides.

3.2.3- Minéralisation ou TDS

Dans les zones arides, les terrains riches en sels d'évaporites sont marqués par une prédominance des SO₄²⁻ et Cl⁻ et des alcalins Na⁺ et K⁺. La concentration en chlore augmente avec le pouvoir évaporant du fait des pluies chargées donc en Cl⁻. Les sulfates sont généralement annexés à la mise en solution des évaporites acquis conduisent à des précipitations de CaCO₃ ou CaSO₄ ; celle du sodium et du potassium n'étant pas adsorbées par les plantes augmentent également.

Les teneurs très variables du total de solides dissous, entre 1761 et 6635 mg/L, sont indicatrices à la fois d'eau très minéralisée à extrêmement minéralisée. Ces variations sont liées à une locale mise en solution des évaporites, et/ou à un apport d'eau très minéralisée, notamment de l'aquifère du continental intercalaire.

3.2.4- Dureté [°THf]

Les eaux d'Oued Souf extrêmement dures, 111 à 210 [°THf]. Pour la grande majorité des eaux, le calcium et le magnésium contribuent le plus à l'augmentation de la dureté et de la conductivité. Ces ions sont directement liés à la mise en solution des carbonates ainsi que celle des dépôts d'évaporites riches en chlorures et en sulfates alcalins.

3.2.5- Conductivité électrique

La conductivité électrique de l'ensemble des eaux extrêmement élevée (2319 à 8573 μ S/cm) traduit les notables concentrations des espèces dissoutes des évaporites et éventuellement du mélange d'eaux par drainance des aquifères captifs sous jacents exploités, auxquels s'ajoute les conditions climatiques hyperarides à pouvoir très évaporant.

Les espèces déterminantes de la conductivité sont Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} et SO_4^{2-} .

3.3- Les ions majeurs

Dans l'ensemble, la nappe phréatique d'Oued Souf est très chargée en ions majeurs, tout particulièrement et par ordre d'importance, en SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et Cl^- .

Les concentrations en anions et en cations traduisent l'effet des caractéristiques climatiques de la région et celui de drainance par l'exploitation des aquifères très chargés en ces substances.

3.4- Faciès géochimiques

Ils sont analysés à travers différentes méthodes de classification, classique et relativement récentes appropriées aux eaux très minéralisées des zones semi-arides et arides.

3.4.1- Rapports molaires $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$

La projection des rapports molaires des substances Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} et Cl^- , montre que la majorité des eaux se place dans le cadran représentant le faciès sulfaté magnésien. Très peu d'eau se situe dans le faciès chloruré sodique, tandis que le reste des eaux est de type sulfaté sodique (Fig.96).

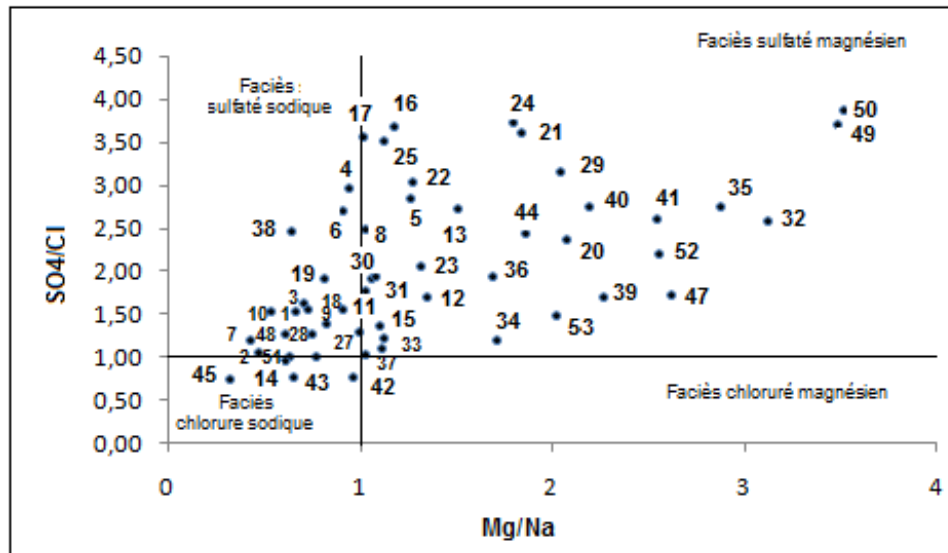


Fig.96 - Faciès géochimiques des eaux par les rapports molaires SO_4^{2-}/Cl^- vs Mg^{2+}/Na^+

La prédominance du faciès sulfaté magnésien des eaux riches en Mg^{2+} et en SO_4^{2-} , indiquerait la présence de carnallite ($KMgCl_2 \cdot 2H_2O$) accompagnant le gypse et la halite.

3.4.2- Diagramme de Piper

Outre la détermination du faciès prédominant d'un aquifère, le diagramme de Piper présente l'avantage de déceler l'évolution spatiale et-temporelle du chimisme d'un aquifère grâce à l'analyse des triangles des spéciations en cations et anions, et de la représentation globale.

Dans le cadre de cette étude le manque de suivi du chimisme de tous les prélèvements d'eau de la nappe phréatique, saisonnier ne nous a pas permis d'analyser l'évolution chimique des eaux. Néanmoins, les données hydrochimiques dont nous disposons permettra l'identification du faciès géochimique caractérisant l'aquifère de la nappe phréatique.

Par ailleurs, étant donnée la forte variation de la température nous avons lié

Le triangle des cations montre le caractère calcique et plus ou moins magnésien de la plupart des eaux. Le triangle des anions révèle une très nette dominance des sulfates pour toutes les eaux (Fig.97).

La répartition synthétique distingue dans l'ensemble un faciès géochimique dominant et d'autres faciès pour quelques eaux (Fig.98).

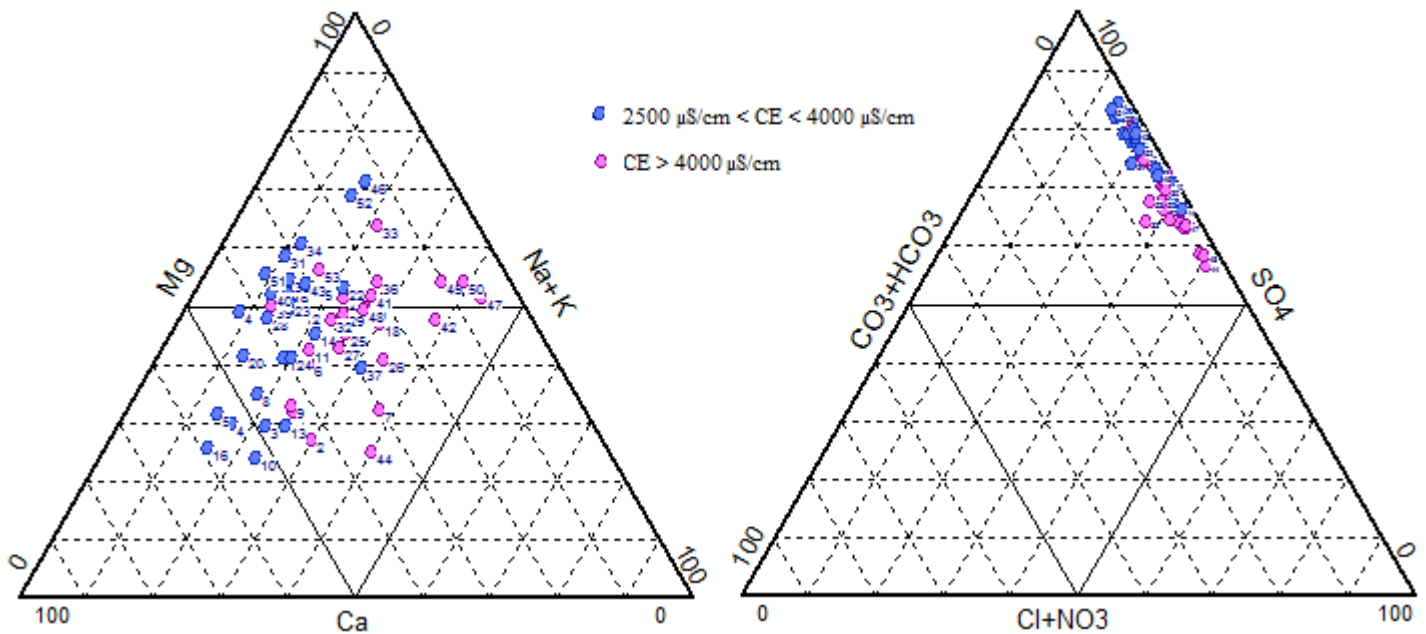


Fig.97 - Diagrammes triangulaires de Piper

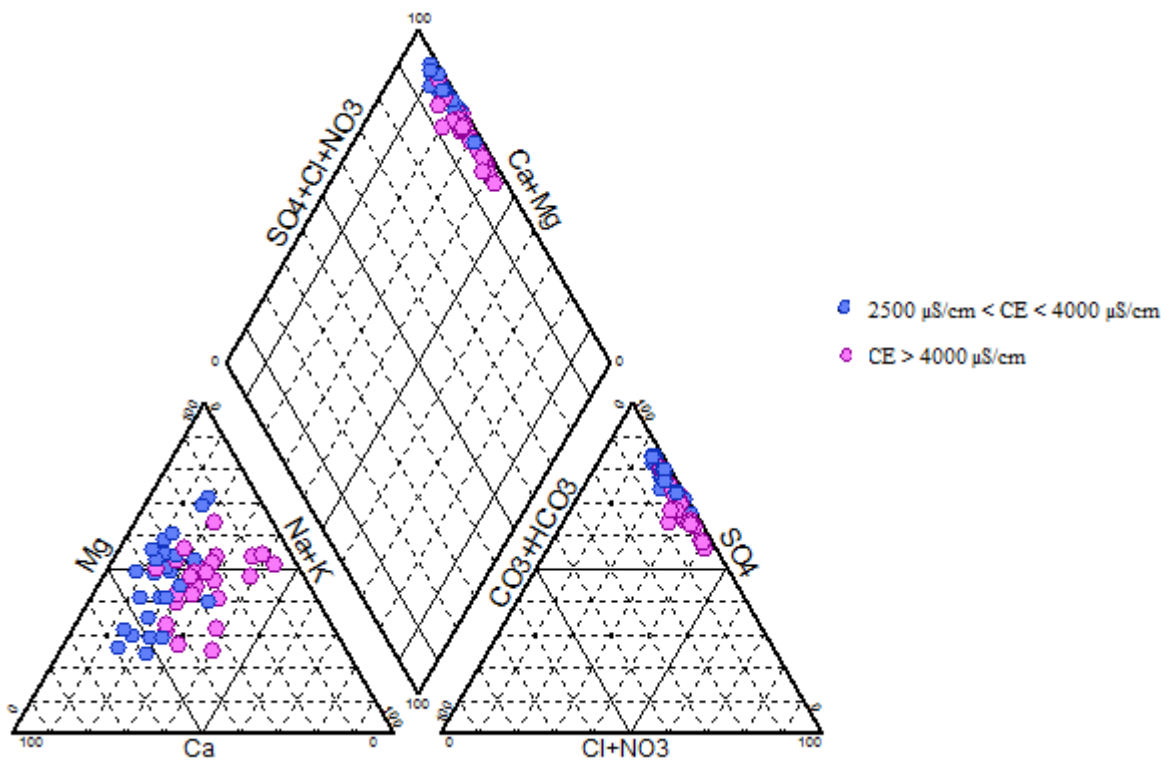


Fig.98 - Diagramme global de Piper

A l'exception de quelques eaux de type hyper sulfaté calcique et sulfaté magnésien, le faciès dominant est sulfaté calcique, indiquant la nette influence du gypse.

L'ion Cl⁻ est également bon marqueur des évaporites. L'analyse de la corrélation entre les concentrations en Cl⁻ et celles en SO₄²⁻, montre que ces deux variables sont dépendantes. L'équation de la droite de régression étant :

$$C_{(Cl)} = 0,61 * C_{(SO_4)} + 671,3 \text{ avec un coefficient de détermination } R^2 = 0,70 \text{ (Fig.99).}$$

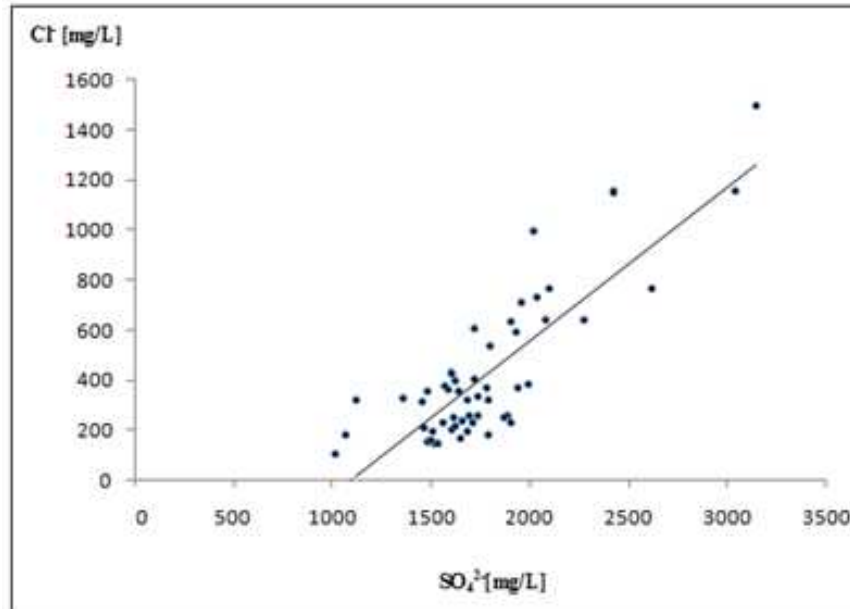


Fig.99 - Correlation Cl vs SO₄²⁻

Le coefficient de détermination indique que la concentration en SO₄²⁻ explique 70% de la variance de la concentration en Cl⁻. En effet, quelques eaux présentent des concentrations en chlorures acceptables (entre 105 et 259 mg/L), mais pour plus de la moitié d'entre elles les teneurs en cette substance sont largement supérieures à 300 mg/L, jusqu'à atteindre exceptionnellement 1495 mg/l.

En outre, tenant compte des teneurs, les sources des chlorures sont assez variées. Lorsqu'ils ne sont pas associés aux minéraux évaporitiques, les chlorures peuvent avoir une origine anthropique ; cette substance peut aussi provenir des précipitations ou encore d'une re-concentration par évaporation.

Par ailleurs, le rapport molaire Cl/Na étant en moyenne supérieur à 1 ou proche de l'unité est significatif d'une précipitation du sel de sodium (annexe). Cet état de fait n'a pas permis d'utiliser l'ion Cl⁻ comme traceur des écoulements à travers le diagramme des concentrations.

3.4.3- Profils hydrogéochimiques Schöeller-Berkaloff

Les profils des eaux montrent principalement trois familles d'eau (Fig.100 à 103) :

- sulfatée sodique,
- sulfatée calcique et magnésienne,
- chlorurée sodique.

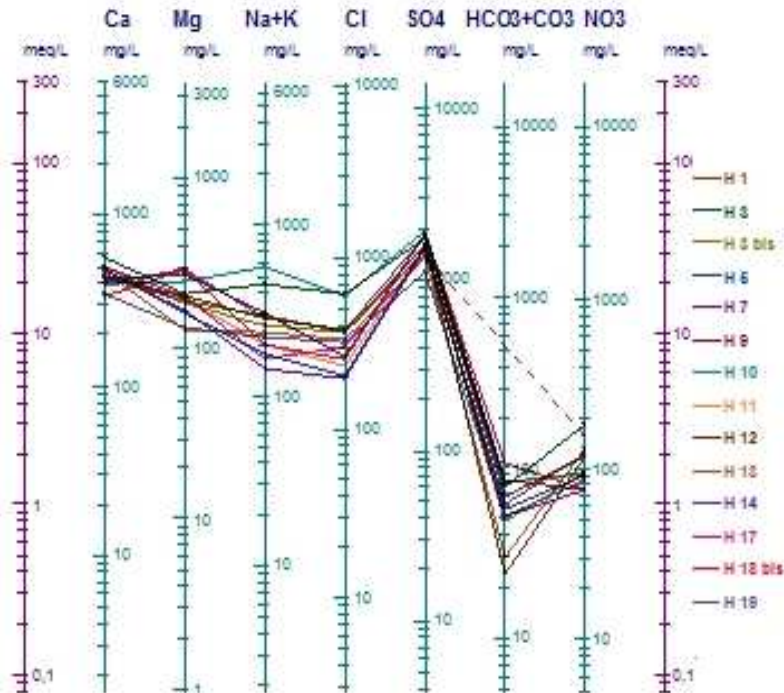


Fig.100 - a- Profil hydrogéochimique 1 (Échantillons d'eau 1 à 1)

Il est à noter que certaines eaux montrent une allure opposée par rapport aux substances $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ et Mg^{2+} . Cette opposition marque un mélange d'eaux ayant circulé dans des aquifères différents.

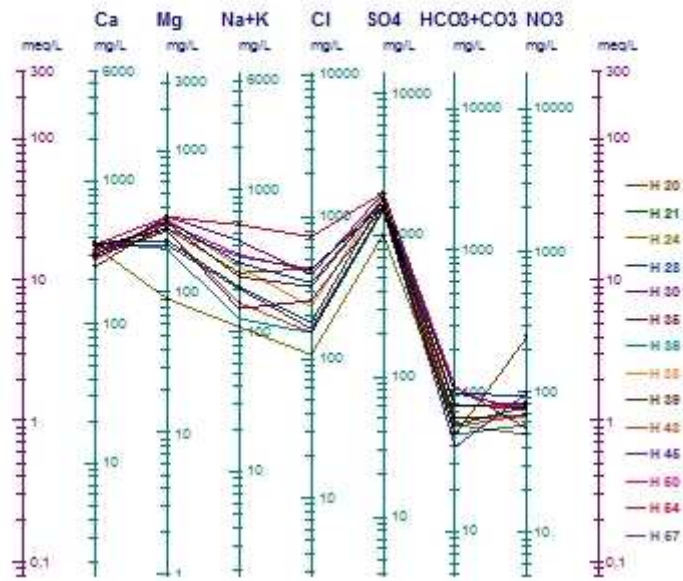


Fig.101 - b- Profil hydrogéochimique 2 (Échantillons d'eau 15 à 29)

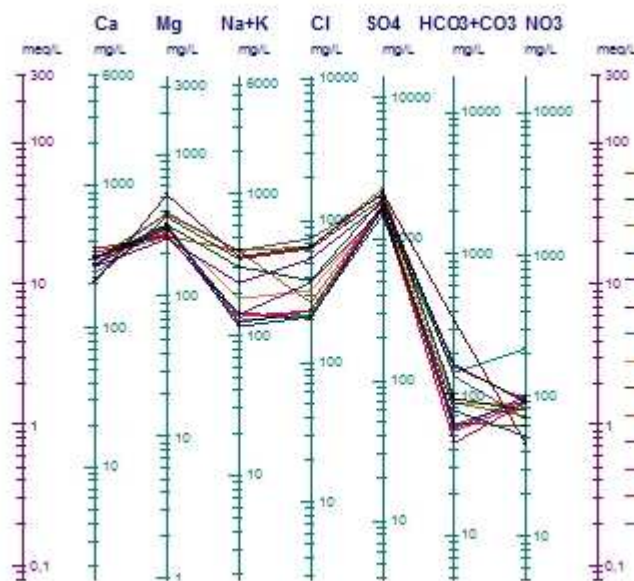


Fig.102 - Profile hydrogéochimique 3 (Échantillons d'eau 30 à 44)

En outre, tenant compte du climat, les teneurs des nitrates nettement supérieures au seuil recommandé (maximum 50 mg/L), dosées dans la majorité des eaux (entre 60 et 240 mg/L), indiquent une pollution de la ressource en eau affectée au retour d'eau d'irrigation et aux eaux usées mal canalisées.

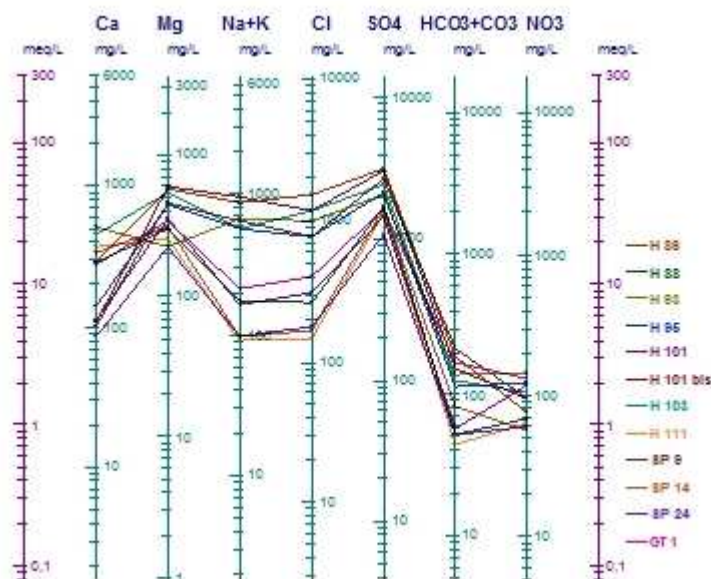


Fig.103 - Profile hydrogéochimique 4 (Échantillons d'eau 45 à 53)

Dans ce système multicouche très complexe un traçage isotopique, des éléments chlore, strontium, carbone, et de la molécule d'eau, est très nécessaire pour distinguer les aquifères des différentes familles d'eau.

3.5- Analyse multidimensionnelle

Afin d'affiner l'interprétation des données, une analyse en composantes principales a été effectuée. Cette analyse statistique multidimensionnelle est un outil puissant d'aide à l'interprétation des données hydrogéochimiques, permettant d'extraire du tableau de données les principaux facteurs déterminant la structure de l'ensemble. Ces facteurs sont ensuite interprétés à partir des relations qui les lient aux différentes variables et aux échantillons.

Pour obtenir la meilleure structure, plusieurs analyses ont été réalisées successivement, en éliminant telle variable ou tel échantillon. Dans l'analyse retenue pour l'interprétation finale, tous les échantillons ont été considérés (matrice des corrélations, valeurs propres et vecteurs propres, et corrélations entre variables et facteurs principaux, exposés en annexe).

Les variables suivantes ont été prises en compte : Ca^{2+} , Mg^{2+} , $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CE, T°C, pH, Eh, pCO₂, ISg, TDS, SAR, et TH°f.

Les trois plans principaux F1-F2 (Fig.), F1-F3 (Fig.), et F2-F3 (Fig.), expliquant 74% de la variance totale, ont été retenus.

L'espace des variables rend compte d'une forte organisation, avec le facteur F1 exprimant 46% de la variance, F2 18% et F3 10%.

F1 est déterminé par K^+ , HCO_3^- , Mg^{2+} , TH^o , CE, SAR, SO_4^{2-} , Cl^- , et T^oC .

F2 est défini par ISg, NO_3^- , Ca^{2+} , pH, pCO₂, et Eh.

F3 est déterminé par ISg, Ca^{2+} , pH et Eh.

3.5.1- Plan F1-F2

Dans l'espace des variables, l'axe 1 montre la nette influence de la charge minérale des eaux sur la structure. Les ions influençant la conductivité opposés à K^+ , HCO_3^- , Mg^{2+} semble marquer un mélange avec des eaux issues de l'aquifère mio-pliocène. L'axe 2 oppose la pCO₂ et Eh aux variables indiquant ainsi que la pCO₂ est biogénique (activités micro-organique et agricole). La distribution des individus montre clairement que le tiers des échantillons d'eau a influencé cette structure (Fig.104).

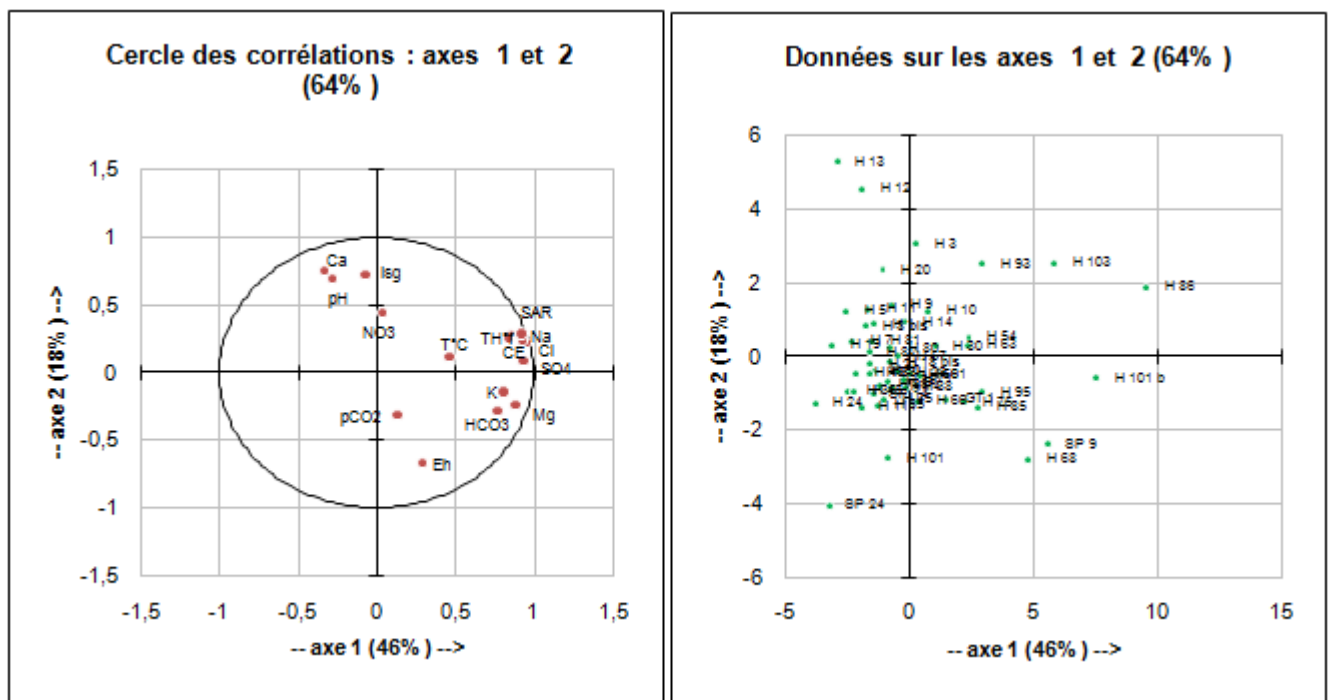


Fig.104 - Plan F1-F2 de l'ACP des eaux de puits de la nappe phréatique.

3.5.2- Plan F1-F3

La distribution des variables et des unités statistiques met en évidence deux types d'eau de deux aquifères distincts (Fig.105).

Notons que dans les deux plans la température distingue les substances issues exclusivement du sol des substances minérales altérées par la remontée d'eaux déchargées par les aquifères sous jacents exploités.

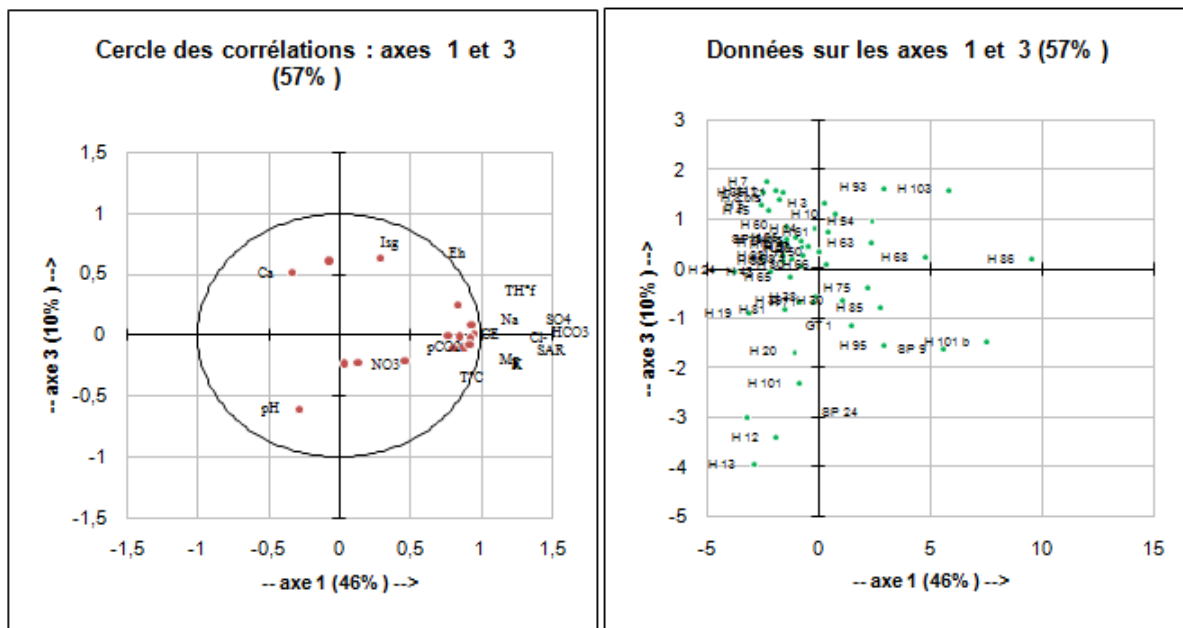


Fig.105 - Plan F1-F3 de l'ACP des eaux de puits de la nappe phréatique.

3.5.3- Plan F2-F3

Cette représentation fait ressortir les réactions chimiques au niveau du sol impliquant les espèces de l'anhydrite, les réactions d'oxydoréduction réputées lentes et souvent hors équilibre thermodynamique (Fig.106). Ceci est exprimé par l'opposition de ISg et Ca au pH par rapport à F1 et à Eh par rapport F1 et F2.

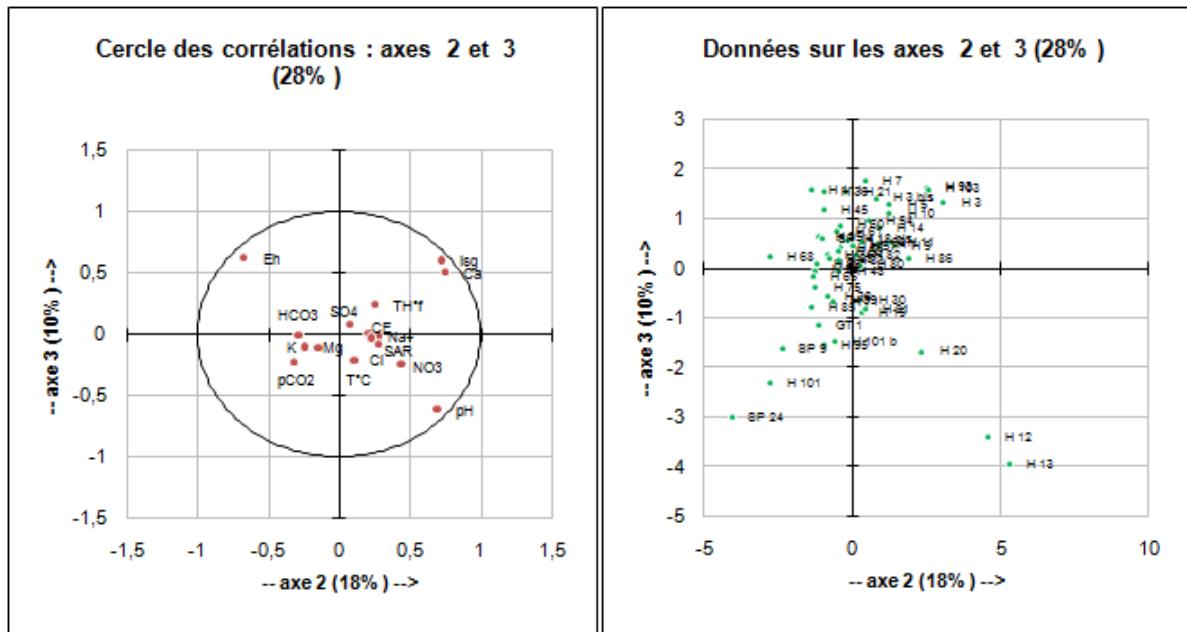


Fig.106 - Plan F2-F3 de l'ACP des eaux de puits de la nappe phréatique.

4- Incidences de l'activité humaine sur l'évolution chimique des eaux de la nappe phréatique

L'évolution chimique des eaux est liée au surplus d'eau chargée en sels déchargée par le complexe terminal et le continental intercalaire de plus en plus exploités pour les besoins en eaux des agglomérations, et aux retours d'eau d'irrigation.

Les conséquences des ouvrages d'exploitation intensive des aquifères sur la charge chimique de la nappe phréatique sont étudiées à travers l'évolution temporelle du chimisme.

Parmi les points d'eau échantillonnés et analysés, nous disposons de données hydrochimiques homogènes réalisées en 1980, 1993, et 2002 au niveau de cinq puits représentatifs répartis du Nord au Sud dans le bassin. Cependant les paramètres physicochimiques comportent des lacunes de données de température et de pH (annexe).

Les fluctuations de la charge chimique de l'eau sont donc étudiées à partir de la conductivité électrique de l'eau. L'influence de l'irrigation des cultures sur la salinité des eaux est traitée à partir de la corrélation entre la conductivité et le SAR.

4.1- Evolution spatio-temporelle de la charge minérale

La corrélation entre les éléments chimiques et la conductivité montre l'évidente relation entre la large contribution d'eaux chargées en sels évaporitiques dissous marqués par les concentrations excessives en sulfates, calcium, magnésium.

En effet, la représentation graphique de la conductivité, permet de constater que la conductivité électrique a augmenté progressivement entre 1980, 1993 et 2002, le long de la direction globale d'écoulement, du Sud vers le Nord, de manière quasiment uniformément (Fig.107).

Cependant on note une relative anomalie dans la partie nord-est du bassin où la conductivité électrique atteint le maximum en 1993(échantillon H101).

Le graphique des substances majeures révèle une nette diminution des sulfates et une relative croissance du sodium ainsi que des chlorures en 1993 ; on obtient donc une tendance renversée entre Cl^- et SO_4^{2-} par rapport à celle des eaux de 1980 et 2002.

La séquence étant : $r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^-$

Compte tenu des conditions climatiques, cette évolution traduirait l'influence conjointe de la pluviométrie et de l'évaporation. En effet, l'évaporation concentre les eaux imbibant le sol, conduisant à une précipitation de CaSO_4 dans le sol dans les régions arides ; l'état de saturation vis-à-vis de l'anhydrite, et le rapport molaire Cl^-/Na^+ , expliquerait cet état de fait.

Par ailleurs, le pH alcalin, la quantité de CO_2aq (H_2CO_3), suggèrent la réduction des sulfates sous l'action de l'activité micro-organique des sulfato-réductrices.

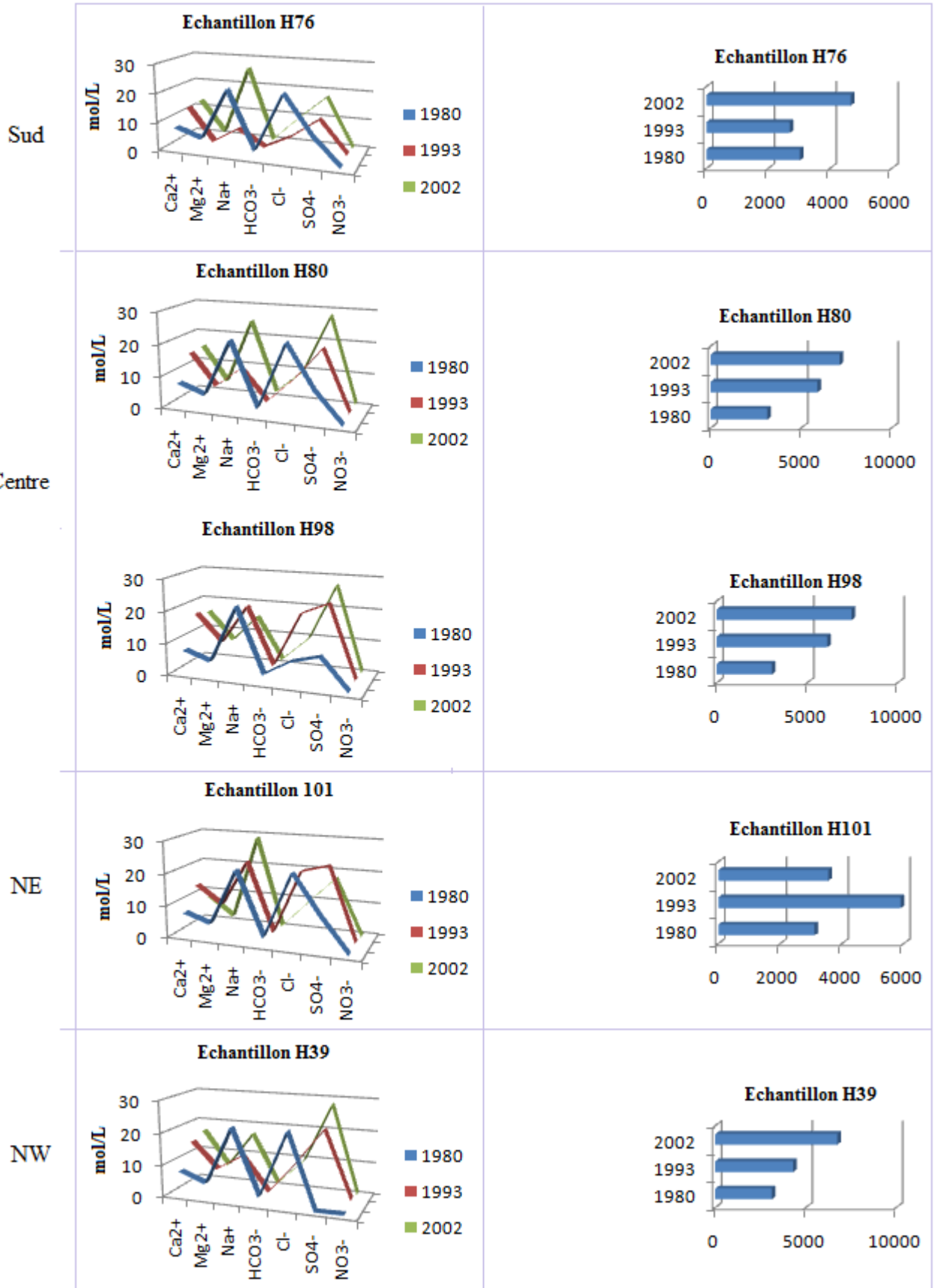


Fig.107 - Evolution spatiale et temporelle des substances ioniques et de la conductivité

4.2- Influence de l'irrigation sur la salinité des eaux

L'arboriculture d'Oued Souf est basée sur le palmier dattier constituant la principale ressource économique. L'irrigation des palmiers, couvrant une étendue de 9500 ha, est assurée par les ressources de la nappe phréatique (Messekher, 2010).

Pour décrire l'impact de l'irrigation sur la salinité des eaux souterraines, nous avons procédé à une comparaison de la conductivité électrique des eaux de la nappe phréatique et le SAR entre la période 1993 (Fig.108) et 2002 (Fig.109).

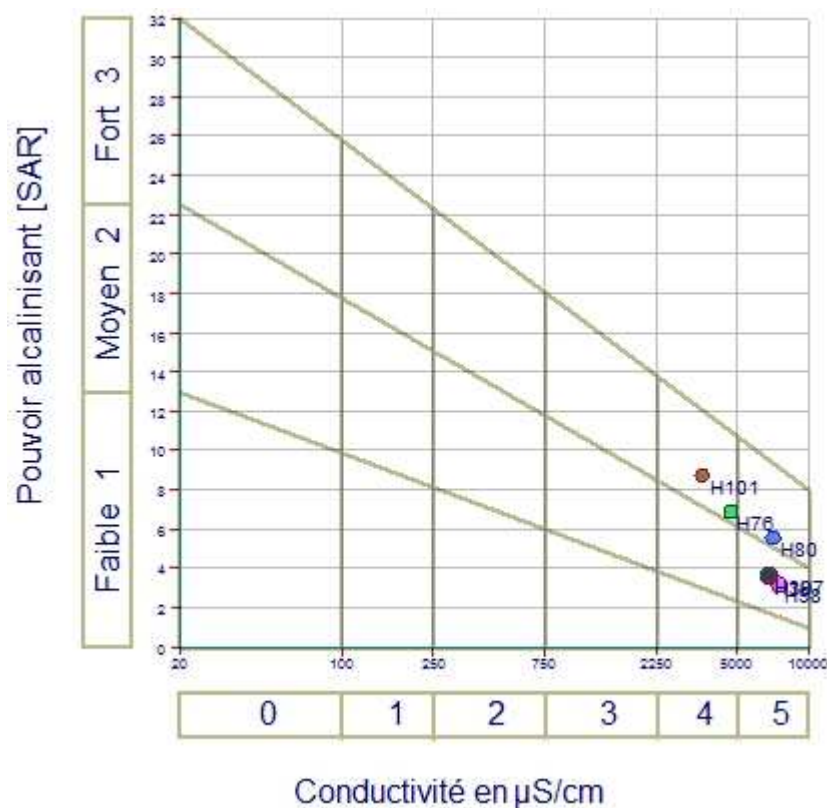


Fig.108 - Diagramme de Riverside (Prélèvements en 1993)

La corrélation entre le pouvoir alcalinisant et la conductivité montre l'effet de la charge minérale des eaux d'irrigation provenant des puits et des forages, déjà très élevée, et accentuée pendant la saison estivale par l'évaporation d'eau de la nappe phréatique.

De plus, la saison hivernale ne connaît pas une période de dilution des eaux d'irrigation du fait des très faibles précipitations.

Par ailleurs le retour d'eau des périmètres irrigués contribue fortement à l'augmentation de la salinité des eaux caractérisées à priori par des concentrations extrêmement élevées de sulfates, et d'importantes concentrations de calcium, sodium, de chlorures et de nitrates.

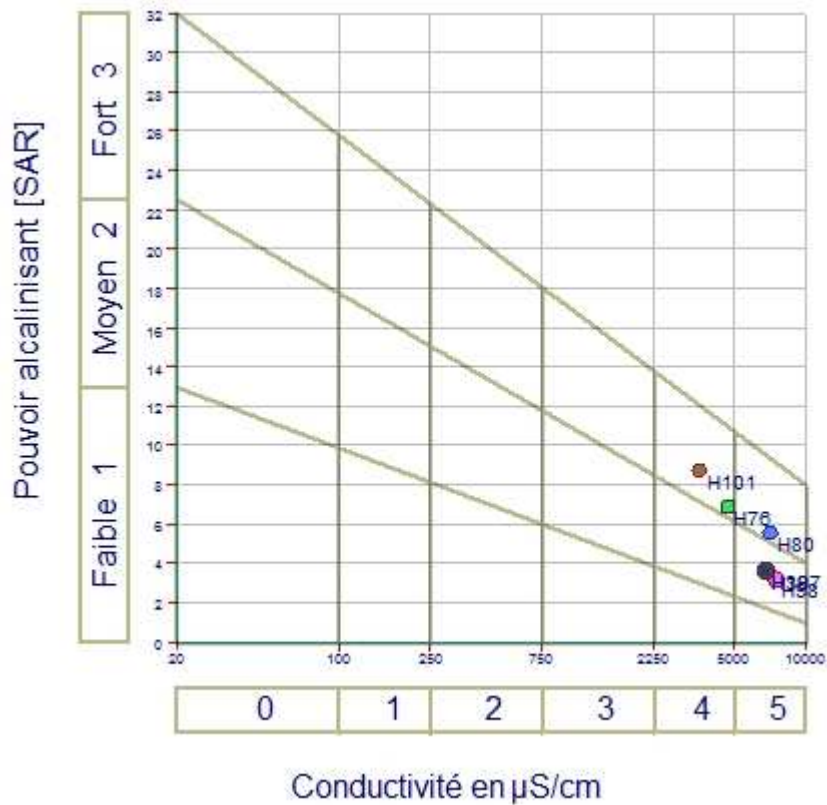


Fig.109 - Diagramme de Riverside (Prélèvements en 2002)

5- Conclusion

Depuis ces dernières décennies, avec le développement économique et urbain, les besoins en eau ont perturbé le cycle de la ressource hydrologique par l'implantation des ouvrages d'exploitation dans la nappe phréatique, celle du complexe terminal et du continental intercalaire. En effet, les volumes d'eau à salinité très élevée déchargés dans la nappe phréatique et les conditions climatiques ont eu pour conséquence une recrudescence de la salinité.

Par ailleurs, le mécanisme de recyclage des eaux souterraines par irrigation et le lessivage du sol sablo-limoneux par ces eaux des sels favorise davantage l'augmentation de la salinité des eaux.

Enfin, il est à mentionner l'impact économique entre le coût de drainage du surplus d'eau constituant un sérieux inconvénient pour les terres culturales et celui des réseaux de canalisation urbain et rural endommagés par le phénomène de corrosion du fait des teneurs extrêmement élevées en sulfates et en chlorures.

Annexe : partie hydrogéochimie et environnement

Méthode de calcul de l'état de saturation vis-à-vis d'un minéral

$$Q = [A^+].[B^-]$$

A et B = composés du minéral

Q = produit ionique \leftrightarrow produit de solubilité $K_s(T,P)$

$Q > K_s(T,P)$: la solution est sursaturée

$Q < K_s(T,P)$: la solution est sous saturée

L'équilibre induit une relation entre les activités de A et de B. Leur produit étant constant, ces activités ne peuvent croître simultanément. Si l'une d'elle augmente, l'autre doit diminuer afin que le produit reste constant.

Méthode de calcul de la conductivité électrique

Formule de Logan:

$$B = 0.5 * \Sigma (\text{anions} + \text{cations}) \text{ Avec } B \text{ en meq/L}$$

CE sera évaluée en fonction de l'anion ayant fortement contribué à la minéralité de l'eau :

$$\text{Dans le cas d'Oued Souf, } SO_4^{2-} \text{ dominant : } CE = 101 * B^{0.949}$$

Méthode de calcul du SAR

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}]}{2} \times \frac{[Mg^{2+}]}{2}}}$$

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

El-Oued forme un massif dunaire qui se trouve à environ 700 Km au Sud – Est d'Alger et 350 Km à l'Ouest de Gabes (Tunisie) avec une largeur d'environ 160 km

L'altitude moyenne d'El-Oued est de 80 m, alors que celle des Chotts du Nord, elle descend jusqu'à moins 40 m (niveau du sol) au dessous du niveau de la mer. Il couvre une superficie de 80.000 km².

La willaya d'El-Oued occupe une superficie de 11738 km², divisée administrativement en 18 communes, comptant un nombre de population de 363110 habitants. Elle constitue la partie Nord-Est du grand erg oriental (Bas Sahara).

Du point de vue géologique, les terrains quaternaires forment la couverture superficielle qui se localise au niveau des dépressions et couvrent la plus grande extension au niveau du bassin du bas Sahara,

La stratigraphie de la région est caractérisée par la formation de séries sédimentaires allant du Crétacé inférieur jusqu'au Quaternaire.

A partir de la géophysique (sondages électriques), on a pu connaître l'hétérogénéité latérale des formations géologiques, leur localisation et leurs limites. La comparaison des logs issus de l'interprétation des courbes de Diagraphie avec ceux des forages a donné de bonnes corrélations stratigraphiques.

La partie hydrogéologie nous a permis l'identification des différents aquifères, leur géométrie, l'évolution du niveau piézométrique, le sens d'écoulement des eaux, les caractéristiques hydrodynamiques et leur mode d'alimentation.

La région d'étude appartient au climat Saharien, (zone hyperaride). La pluviométrie est faible à cause du caractère d'aridité qui règne sur tout le Sahara Algérien :74,40 mm avec une moyenne de 6,20 mm. (max : 14,1 mm, min :0,46 mm), mais du nord vers le sud le gradient pluviométrique est décroissant.

Concernant la température moyenne annuelle enregistrée à la station d'El-Oued (période ancienne) elle est de : 22,91 °C. Pour la période récente elle est de : 21,58 °C

Le nombre d'heures d'ensoleillement est important, atteignant : 3394 heures /an et une moyenne dépassant les 280 heures / mois.

Pour la nappe superficielle, la carte piezométrique montre que le sens d'écoulement général des eaux souterraines est Sud-Ouest vers le Nord-Est.

L'interprétation des essais de pompage par paliers et à longue durée qui a été effectué au niveau des 06 stations nous permet de définir les différents paramètres hydrodynamiques.

Le Complexe Terminal s'étend sur une superficie de 350000 Km². Il est constitué de trois nappes superposées : la première et la deuxième nappe des sables et l'aquifère des calcaires du Sénonien-Eocène. Le Continental Intercalaire est représenté par des dépôts sablo-gréseux et sablo-argileux, formant un système aquifère multicouches, dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 400 m.

La température et la pression des eaux de cet aquifère sont élevées, elles sont estimées respectivement à 60° et 26 bars à la sortie du forage.

La remontée de la nappe phréatique amorcé dans les années 1975 -1980 et ayant eu comme conséquence l'enneigement de près d'un millier de ghouts la mort de 100000 palmier et la menace de 200000 autres. L'eau stagnante en ville menaçant la santé de la population et les fondations des habitations.

Les volumes d'eau à salinité très élevée déchargés dans la nappe phréatique et les conditions climatiques ont eu pour conséquence une recrudescence de la salinité.

Le mécanisme de recyclage des eaux souterraines par irrigation et le lessivage du sol sablo-limoneux par ces eaux des sels favorise davantage l'augmentation de la salinité des eaux.

Enfin, il est à mentionner l'impact économique entre le coût de drainage du surplus d'eau constituant un sérieux inconvénient pour les terres culturales et celui des réseaux de canalisation urbain et rural endommagés par le phénomène de corrosion du fait des teneurs extrêmement élevées en sulfates et en chlorures.

Pour remédier à ça, quelques recommandations peuvent être envisagées.

Dans les mêmes perspectives, et afin d'optimiser de manière équitable le mode de vie des habitations, il faut prendre en compte les tenants et les aboutissants du développement durable par la compréhension des enjeux économiques, sociaux et culturels.

Organiser des campagnes d'analyses chimiques et bactériologiques des eaux des différentes nappes, permettant l'identification d'une éventuelle contamination ou pollution.

Faire introduire les nouvelles techniques d'irrigation (goutte à goutte, aspersion, capillarité..etc..).

Interdire l'irrigation à partir des nappes profondes et la limiter seulement à la nappe phréatique, ce qui conduit à un contrôle sévère et régulier du débit d'exploitation des forages destinés à l'AEP et l'irrigation.

Installation de limnigraphes sur les piézomètres, permettant le suivi des fluctuations de la nappe superficielle.

Faire une sensibilisation continue aux citoyens sur les risques néfastes et multiples de la remontée des eaux, sur les conséquences qui peuvent entraîner le gaspillage de l'eau et sur les avantages d'appliquer le concept de la GIRE.

Financement des études, travaux, matériels, équipements, suivi et toutes dépenses envisagées, par l'assurance de budgets favorables.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ABHS (Agence du Bassin Hydrographique Sahara Wilaya d'Ouargla). Rapports et bilans sur les missions et les campagnes réalisées par l'ABHS,
- ADE (Algérienne Des Eaux Wilaya d'El-Oued). Rapports sur l'alimentation en eau potable(AEP), 10 p.
- ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de la Wilaya d'Ouargla). Rapportset campagne des mesures.
- Algerian Journal of Technology (2005) : De l'eau pour le développement durable dans le bassin méditerranéen.
- Busson. G (1970) : Le mésozoïque Saharien. 2eme partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, «Centre Rech. Zones Arides », Géol., 11, Ed. C.N.R.S. 811 P
- Busson.G (1971) : Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque Saharien. Thèse es Sciences. Paris, 464 P
- CASTANY G (1968) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition Dunod (1982). Université Pierre et Marie-Curie Paris VII.
- Cornet. A & Rognon. P (1961) : Les débits circulant dans la nappe du CI Sahara alg.Pub.57 AISH (coII. Athènes) et Chron. D'hydrog. n°11,1967.
- Cornet. A (1964) : Introduction a l'hydrogéologie saharienne ; volume. VI, fasc.1 ; 5-72.
- Cornet. A (1961) : Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Hydraulique et équipement rural. Service des études scientifiques. Rapport, Alger, Algérie. 108 P.
- D.E. (Direction de l'Environnement d'El-Oued). Rapport sur les dégâts de la remontée des eaux dans la wilaya d'Oued Souf. 13 p.
- D.H.W de la Wilaya d'El-Oued, Enquête sur les exploitations et les besoins en AEP dans la wilaya d'El-Oued.
- D.S.A.(Direction des Services Agricoles) : Rapports et canevas (1999 – 2006). 7 p.
- Dob M. L. (2005) : Répartition traditionnelle et évolution des débits et son impact sur la nappe phréatique. 26 P
- Dob M. L.(2003) : Utilisation de l'eau de l'Albien avantages et inconvénients. 13 P
- EPDGDRS (1998) : Volume II ; modélisation du Continental Intercalaire. 50 P

- EPDGDRS (1998). Volume : III. Modélisation du Complexe Terminal. 145 p
- EPDGDRS (1998). Tome : 1. Vision d'ensemble du sahara.
- ERESS (1972a) : Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport final, 78 P.
- ERESS (1972b) : Nappe du Continental intercalaire. Plaquette 2, Tunisie. 46 P
- ERESS (1972c) : Nappe du Complexe terminal. Appendices, Tunisie. 59 P
- Etude de Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes (Juin 1998) : Tome 1 ; vision d'ensemble du sahara.
- Guendouz, A. (1985). Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du sahara nord-est septentrional (Algérie). Thèse 3^{ème} cycle, Paris-Sud, 243 p.
- Guendouz, A., Moulla, A. S. & Reghis, Z. (1993). Etude de la remontée des eaux de la nappe phréatique de la région de Oued-Souf (Erg Oriental, Sahara nord-est septentrional) par les méthodes isotopiques et hydrochimiques. En: Actes du séminaire des deuxièmes journées de géologie appliquée (Sfax, Tunisie, Mai 1993), 289-299.
- Guendouz, A., Moulla, A. S., Edmunds W. M, Zouarik, Shands. P. and Mamou A.(2003) : Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complex Terminal aquifer in Algerian sahara. Hydrogeology journal.11. 483-495.
- HPO-BG (2002) : Vallée du Souf Etudes d'assainissement des eaux résiduares, pluviales et d'irrigation. 411 P.
- Labord J.P (2003) : Hydrologie de surface (Eléments d'hydrologie de surface), Université de Nice.
- Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 06, Décembre 2007, pp. 121-134-Sophia Antipolis.
- Margat et K. F. Saad (1984) : les nappes souterraines profondes : des mines d'eau sous le désert.UNESCO . Nature et ressources, vol. XX, n° 2, 1984.
- Margat. J (1985) : Hydrologie et ressources en eau des zones arides. Bull. Soc. Géol. France (8), t. 1, n°7, p 1009-1020.
- Margat. J (1992) : les eaux fossiles. Afrique contemporaine, N°161 (Spécial) 1^{er} trimestre.
- Moulla A S., Guendouz, A. & Reghis, Z. (1997). Hydrochemical and isotopic investigation of rising piezometric levels of saharan phreatic aquifers in the Oued-Souf region (Grand Erg Oriental basin, Algeria). In: Water in the Mediterranean.

- Collaborative Euro-Mediterranean Research: State of the Art, Results and Future Priorities (Proc. Int. conf., Istanbul, Turkey).
- Moulla A S., et Gendouz A .(2003). Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier. IAHS Publ. 278: 35-42.
- MOULLA S. Adnane.et al (2005):Un aperçu de quelque résultats d'hydrologie isotopique important obtenu au Sahara algérien 37 P.
- Nesson. C (1978) : L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas – Sahara Algérien. 85 p
- Nezli I. E., Achour s., Djabri L. (2007). Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla). Larhyss Journal, 6 : 121-134.
- O.N.M. (Office National de Météorologie). Données climatiques des stations de Guemar, Touggourt et Biskra.
- OSS. (2002). Une conscience de bassin : Hydrogéologie. Vol : 2. Projet SASS, 284p
- OSS. (2002). Une conscience de bassin : Base de données et SIG.Vol : 3. Projet SASS, 147 p
- OUELD BABA SY. M (2005) : Recharge et paléo du système aquifère du Sahara septentrional. 250 P.
- SONATRACH : C.R.D. et D.P.E. Géologie de l'Algérie. 93 p.
- Tesco – Viziterv (1986). Etude de réaménagement et de l'extension des Palmeraies de l'Oued Righ.
- UNESCO (1972) Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Projet ERESS, Rapport final sur les résultats du projet. Paris, France. 78 p, 7 Plaquettes.

ANNEXE

ANNEXE

Méthode de calcul de l'état de saturation vis-à-vis d'un minéral

$$Q = [A^+].[B^-]$$

A et B = composés du minéral

Q = produit ionique ↔ produit de solubilité $K_s(T,P)$

$Q > K_s(T,P)$: la solution est sursaturée

$Q < K_s(T,P)$: la solution est sous saturée

L'équilibre induit une relation entre les activités de A et de B. Leur produit étant constant, ces activités ne peuvent croître simultanément. Si l'une d'elle augmente, l'autre doit diminuer afin que le produit reste constant.

Méthode de calcul de la conductivité électrique

Formule de Logan:

$$B = 0.5 * \Sigma (\text{anions} + \text{cations}) \text{ Avec } B \text{ en meq/L}$$

CE sera évaluée en fonction de l'anion ayant fortement contribué à la minéralité de l'eau :

$$\text{Dans le cas d'Oued Souf, } SO_4^{2-} \text{ dominant : } CE = 101 * B^{0.949}$$

Méthode de calcul du SAR

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}]}{2} \times \frac{[Mg^{2+}]}{2}}}$$

**Hydrochimie des eaux prélevées aux forages
de la nappe mio-pliocène du complexe terminal (2008)**

Nom	T°C	PH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻
F1	15,7	7,17	4780	324,6	142,4	118,22	130,54	209,45	1233,8
F2	15,6	7,27	3760	248,5	124,6	107,12	146,4	213	915
F3	15,4	7,1	4410	609,2	128,9	121,44	85,4	284	1780
F4	15,4	7,14	4060	268,5	129,4	85,33	150,06	213	933,75
F5	15,4	7,2	4090	280,6	124,8	140,53	134,2	284	975
F6	15,6	7,14	3700	240,5	117,6	79,35	132,98	220,1	810
F7	15,5	7,1	3950	292,6	139	19,34	150,06	223,65	877,5
F8	15,3	7,2	3670	272,5	110,2	80,73	146,4	213	860
F9	15,5	7,47	4080	284,6	129,4	35,19	137,86	213	877,5
F10	15,7	7,2	3660	252,5	117,4	118,45	135,48	284	832,5
F11	15,5	7,1	3820	304,6	93,24	34,27	134,2	209,45	787,5
F12	15,4	7,55	3670	246,1	114	54,97	122	205,9	787,5
F13	15,6	7,3	3860	262,1	130,8	78,43	146,4	255,6	855
F14	15,4	7,2	3680	244,5	112,6	122,36	140,3	319,5	750

CE : conductivité électrique en $\mu\text{S}/\text{cm}$, concentration des ions en mg/L

**Variables hydrogéochimiques calculées à partir des prélèvements d'eau
des forages de la nappe mio-pliocène du complexe terminal (2008)**

Nom	CEc	TDS	TH ^f	Mg/Ca	Cl/SO4	Isc	Isg	pCO ₂ (10 ⁻² atm)
F1	2804	2159	140	0,723	1,149	-0,02	-0,03	0,84
F2	2378	1755	113	0,827	1,289	0,05	-0,18	0,75
F3	3680	3009	205	0,349	1,516	-0,06	0,4	0,64
F4	2391	1780	120	0,795	1,619	-0,05	-0,14	1,03
F5	2647	1939	121	0,733	1,31	-0,02	-0,12	0,80
F6	2206	1601	108	0,806	1,799	-0,13	-0,23	0,91
F7	2278	1702	130	0,783	7,499	-0,04	-0,13	1,13
F8	2278	1683	113	0,667	1,711	0,02	-0,16	0,87
F9	2255	1678	124	0,75	3,925	0,28	-0,14	0,44
F10	2425	1740	111	0,767	1,555	-0,04	-0,21	0,81
F11	2114	1563	114	0,505	3,963	-0,06	-0,14	1,01
F12	2108	1530	108	0,764	2,429	0,26	-0,23	0,33
F13	2367	1728	119	0,823	2,113	0,1	-0,19	0,70
F14	2397	1689	107	0,759	1,693	-0,04	-0,26	0,84

Hydrochimie des eaux de la nappe des sables quaternaires (1992)

Nom	Libellé	T°C	CE	pH	Eh	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
H 1	1	18,8	4070	7,45	-27	436	191	268	22	61	354	1484	124
H 3	2	17,5	5300	7,4	-35	556	211	418	33	76	605	1721	183
H 3 bis	3	17,8	3940	7,35	-24	492	180	238	21	49	359	1585	97
H 5	4	18,4	3200	7,57	-27	480	162	162	14	58	200	1607	93
H 7	5	18,5	3440	7,25	-20	468	164	123	21	52	195	1509	76
H 9	6	19,1	4220	7,7	-40	412	269	280	21	85	257	1889	76
H 10	7	17,2	5790	7,32	-25	391	247	536	21	82	594	1933	97
H 11	8	20,5	3920	7,58	-37	444	199	182	17	82	231	1562	91
H 12	9	21,5	4440	8,8	-104	440	202	260	25	24	374	1572	118
H 13	10	21,5	3670	9,18	-104,7	456	127	221	17	30	327	1361	131
H 14	11	18,2	4930	7,4	-25	392	283	260	25	67	372	1784	118
H 18 bis	12	20,2	3590	7,39	-26	332	290	182	17	107	252	1866	77
H 19	13	16,5	3700	7,7	-44	340	131	201	15	52	323	1117	86
H 20	14	20,8	3950	7,85	-48	344	282	241	17	49	432	1600	247
H 21	15	17,5	3510	7,38	-7,38	372	228	182	23	58	179	1789	79
H 24	16	20	2540	7,3	-27,5	340	90	83	23	58	105	1013	49
H 28	17	14,8	4430	7,37	-23,8	300	314	280	19	97	335	1740	93
H 30	18	22,5	4900	7,55	-37,5	280	343	398	33	98	386	1995	73
H 35	19	22,2	3650	7,16	-9,5	296	271	123	22	76	252	1613	83
H 36	20	16,2	3200	7,15	-13	368	201	103	19	49	152	1485	58
H 38	21	16,3	4000	7,45	-38	272	324	241	46	64	231	1906	64
H 39	22	16	3960	7,5	-38	248	309	221	23	80	322	1790	77
H 43	23	16,5	3260	7,55	-32,5	308	273	143	17	55	150	1519	70
H 45	24	14,2	3410	7,15	-11	340	216	182	21	40	158	1500	99
H 50	25	18,2	4600	7,3	-22	328	310	320	23	76	406	1720	78
H 54	26	18,5	6460	7,3	-22	356	344	516	38	109	712	1958	55
H 57	27	22	4200	7,37	-21	340	282	320	15	64	428	1603	68
H 60	28	22	3200	7,3	-21	356	265	123	19	64	197	1687	60
H 61	29	21	4620	7,2	-16	300	321	281	22	95	370	1936	79
H 63	30	21,5	6030	7,32	-22	304	377	359	38	88	642	2274	71
H 65	31	21,2	3460	7,35	-25	276	317	96	19	76	209	1467	51
H 66	32	21,1	4850	7,2	-13,5	260	251	212	22	162	538	1800	88
H 68	33	22,6	5200	7,07	-5	200	519	286	67	332	642	2082	46

Hydrochimie des eaux de la nappe des sables quaternaires (1992)

(suite)

Nom	Libellé	T°C	CE	pH	Eh	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
H 71	34	21,1	4520	7,23	-15,5	244	322	106	19	144	217	1621	217
H 74	35	19,8	4330	7,23	-19,5	276	293	164	17	85	321	1683	88
H 76	36	21,6	5760	7,2	-15,3	220	363	307	38	158	630	1902	93
H 80	37	21,6	4210	7,42	-26,4	316	260	380	13	61	259	1735	92
H 81	38	18	3870	7,75	-42,5	300	302	126	13	58	356	1640	100
H 82	39	14,4	4300	7,5	-34,5	332	271	117	17	55	230	1713	89
H 83	40	17,5	3700	7,36	-29	316	275	102	19	46	234	1657	88
H 85	41	21,2	6180	7,28	-20	272	389	359	30	134	733	2034	68
H 86	42	28,8	10450	7,3	-20,2	280	568	824	57	186	1495	3149	76
H 88	43	18	3930	7,35	-25	280	299	152	22	52	257	1696	68
H 93	44	21	7000	7,25	-16	509	218	637	38	140	994	2020	149
H 98	45	21	6340	7,3	-23,5	138	437	532	25	115	767	2103	122
H 101	46	18,8	3480	7,34	-24	109	355	128	34	58	312	1456	119
H 101 b	47	18,2	8840	7,32	-23	105	585	900	51	152	1157	3047	97
H 103	48	18,8	8650	7,39	-23,7	448	545	532	38	125	1151	2423	106
H 111	4	18,5	3020	7	-8	366	253	68	22	45	146	1531	65
SP 9	50	19,9	7500	7,18	-11,5	101	456	572	67	210	764	2623	97
SP 14	51	18	3350	7,3	-24,5	334	313	85	13	82	165	1652	56
SP 24	52	17,8	2570	7,38	-27,5	85	219	81	15	52	179	1070	60
GT 1	53	25,5	4480	7,33	-22	276	344	161	53	170	399	1620	132

**Variables hydrogéochimiques calculées à partir des prélèvements d'eau
de la nappe des sables quaternaires (1992)**

Nom	Libellé	CEc	TH ^{°f}	TDS	Mg/Ca	Cl/Na	Cl/SO4	Isc	Isg	SAR	pCO ₂ (10 ⁻² atm)
H 1	1	3852	187	2940	0,67	0,857	1,55	0,07	0,19	2	0,214
H 3	2	4963	226	3803	0,47	0,939	1,05	0,16	0,32	2,63	0,294
H 3 bis	3	3902	197	3021	0,71	0,978	1,63	-0,1	0,27	1,39	0,214
H 5	4	3475	186	2776	0,94	0,801	2,97	0,21	0,27	1,57	0,153
H 7	5	3290	184	2608	1,26	1,028	2,86	-0,16	0,24	1,69	0,288
H 9	6	4147	213	3289	0,91	0,595	2,71	0,42	0,25	2,07	0,168
H 10	7	5149	199	3901	0,43	0,719	1,20	-0,04	0,22	2,86	0,380
H 11	8	3562	193	2808	1,03	0,823	2,49	0,37	0,23	2	0,218
H 12	9	3949	193	3015	0,73	0,933	1,55	1,06	0,22	2,18	0,004
H 13	10	3511	166	2670	0,54	0,959	1,54	1,57	0,2	2,79	0,002
H 14	11	4241	214	3301	1,03	0,928	1,77	-0,02	0,2	2,42	0,262
H 18 bis	12	3531	206	2704	1,35	0,898	1,71	0,15	0,16	1,79	0,44
H 19	13	3906	202	3123	1,51	1,042	2,73	0,15	0	1,8	0,099
H 20	14	3091	139	2265	0,61	1,162	1,28	0,29	0,11	1,97	0,07
H 21	15	4188	202	3212	1,1	0,638	1,37	-0,12	0,2	1,72	0,235
H 24	16	3640	187	2910	1,18	0,82	3,69	-0,12	0	1,23	0,292
H 28	17	2319	122	1761	1,02	0,776	3,56	-0,06	0,07	2,2	0,388
H 30	18	4122	204	3178	1,06	0,629	1,92	0,22	0,1	2,4	0,287
H 35	19	4671	211	3606	0,81	1,329	1,91	-0,23	0,07	1,77	0,546
H 36	20	3500	185	2736	2,08	0,957	2,36	-0,42	0,14	1,58	0,332
H 38	21	3097	175	2435	1,84	0,622	3,60	-0,17	0,07	1,96	0,217
H 39	22	4016	201	3148	1,27	0,945	3,04	-0,07	0,01	1,97	0,241
H 43	23	3962	189	3070	1,32	0,68	2,05	-0,06	0,06	1,62	0,149
H 45	24	3267	189	2535	1,8	0,563	3,74	-0,59	0,1	1,7	0,264
H 50	25	3296	174	2556	1,12	0,823	3,50	-0,14	0,11	2,24	0,374
H 54	26	4291	209	3261	0,91	0,895	1,56	0,03	0,17	3,18	0,538
H 57	27	5441	230	4088	0,63	0,867	1,01	-0,05	0,11	2,11	0,282
H 60	28	4162	201	3120	0,83	1,039	1,38	-0,09	0,17	1,55	0,332
H 61	29	3495	198	2771	2,04	0,854	3,16	-0,14	0,12	2,26	0,612
H 63	30	4357	207	3404	1,08	1,16	1,93	-0,06	0,17	2,96	0,433
H 65	31	5332	231	4153	0,99	1,412	1,31	-0,08	0	1,69	0,347
H 66	32	3269	199	2511	3,12	1,646	2,59	0,05	0,05	2,34	1,044
H 68	33	4284	168	3333	1,12	1,456	1,23	0,1	-0,05	2,53	2,95

**Variables hydrogéochimiques calculées à partir des prélèvements d'eau
de la nappe des sables quaternaires (1992)**

(Suite)

Nom	Libellé	CEc	TH°f	TDS	Mg/Ca	Cl/Na	Cl/SO4	Isc	Isg	SAR	pCO₂ (10⁻² atm)
H 71	34	5316	263	4174	1,72	1,328	1,20	0,01	-0,02	2,16	0,866
H 74	35	3611	193	2890	2,87	1,269	2,76	-0,19	0,05	2,11	0,502
H 76	36	3768	189	2927	1,69	1,331	1,94	-0,05	-0,02	2,84	1,026
H 80	37	4856	204	3711	1,12	0,442	1,11	-0,06	0,12	2,04	0,238
H 81	38	4071	186	3116	0,65	1,832	2,47	0,17	0,07	1,79	0,101
H 82	39	3745	199	2895	2,27	1,275	1,70	-0,12	0,13	2,1	0,162
H 83	40	3566	194	2824	2,19	1,488	2,75	-0,3	0,1	1,85	0,195
H 85	41	3482	192	2737	2,55	1,324	2,61	0,03	0,08	3,03	0,719
H 86	42	5269	228	4019	1,02	1,177	1,02	0,27	0,23	5,2	1,066
H 88	43	8573	304	6635	0,65	1,096	0,78	-0,31	0,05	1,9	0,227
H 93	44	3637	193	2826	1,86	1,012	2,44	0,28	0,34	3,45	0,803
H 98	45	6214	217	4705	0,32	0,935	0,75	-0,31	-0,2	3,05	0,588
H 101	46	5668	214	4239	0,78	1,581	1,01	-0,65	-0,4	1,7	0,262
H 101 b	47	3453	173	2571	2,62	0,834	1,72	-0,39	-0,23	4,4	0,714
H 103	48	7958	267	6094	0,61	1,403	0,97	0,24	0,31	4,3	0,504
H 111	4	6987	336	5368	0,97	1,392	0,78	-0,58	0,14	1,45	0,444
SP 9	50	3159	195	2496	3,52	0,866	3,87	-0,34	-0,26	3,69	1,394
SP 14	51	6277	213	4890	0,75	1,259	1,27	-0,08	0,12	1,67	0,402
SP 24	52	3396	212	2700	3,48	1,433	3,70	-0,72	-0,58	1,29	0,212
GT 1	53	2429	111	1761	2,56	1,607	2,21	0,3	0,04	2,17	0,865

Corrélations et Analyse en Composantes Principales (ACP) Données de la nappe phréatique (1992)

Matrice des corrélations

	T°C	CE	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Eh	SAR	TH°f	Isg	pCO2
T°C	1	0,380	0,053	-0,125	0,344	0,291	0,390	0,479	0,422	0,089	0,340	-0,010	0,3950	0,3262	0,0392	0,0716
CE	0,380	1	-0,141	-0,159	0,757	0,918	0,684	0,604	0,969	0,128	0,902	0,146	0,9801	0,8037	0,0603	0,0737
pH	0,053	-0,141	1,000	0,307	-0,319	-0,065	-0,233	-0,374	-0,108	0,270	-0,221	-0,970	-0,0170	-0,1631	0,1873	-0,1136
Ca ²⁺	-0,125	-0,159	0,307	1,000	-0,566	-0,100	-0,343	-0,404	-0,135	0,184	-0,256	-0,287	-0,1396	0,0410	0,8980	-0,2461
Mg ²⁺	0,344	0,757	-0,319	-0,566	1,000	0,612	0,690	0,692	0,714	-0,063	0,837	0,318	0,7219	0,8005	-0,2851	0,1938
Na ⁺	0,291	0,918	-0,065	-0,100	0,612	1,000	0,599	0,471	0,905	0,125	0,838	0,068	0,9063	0,6704	0,0585	-0,0201
K ⁺	0,390	0,684	-0,233	-0,343	0,690	0,599	1,000	0,771	0,667	-0,028	0,689	0,232	0,6621	0,5873	-0,1837	0,1800
HCO ₃ ⁻	0,479	0,604	-0,374	-0,404	0,692	0,471	0,771	1,000	0,601	-0,028	0,611	0,410	0,5737	0,5443	-0,1979	0,1446
Cl ⁻	0,422	0,969	-0,108	-0,135	0,714	0,905	0,667	0,601	1,000	0,146	0,837	0,118	0,9535	0,7683	0,0380	0,0791
NO ₃ ⁻	0,089	0,128	0,270	0,184	-0,063	0,125	-0,028	-0,028	0,146	1,000	-0,018	-0,252	0,1457	0,0586	0,0975	-0,1462
SO ₄ ²⁻	0,340	0,902	-0,221	-0,256	0,837	0,838	0,689	0,611	0,837	-0,018	1,000	0,239	0,8740	0,8291	0,0488	0,0518
Eh	-0,010	0,146	-0,970	-0,287	0,318	0,068	0,232	0,410	0,118	-0,252	0,239	1,000	0,0378	0,1761	-0,1584	0,0681
SAR	0,395	0,980	-0,017	-0,140	0,722	0,906	0,662	0,574	0,954	0,146	0,874	0,038	1	0,7749	0,0665	0,0417
TH°f	0,326	0,804	-0,163	0,041	0,800	0,670	0,587	0,544	0,768	0,059	0,829	0,176	0,7749	1	0,3075	0,0556
Isg	0,039	0,060	0,187	0,898	-0,285	0,059	-0,184	-0,198	0,038	0,097	0,049	-0,158	0,0665	0,3075	1	-0,2012
pCO2	0,072	0,074	-0,114	-0,246	0,194	-0,020	0,180	0,145	0,079	-0,146	0,052	0,068	0,0417	0,0556	-0,2012	1

Type de coefficient de corrélation : Pearson

(En gras, valeurs significatives, hors diagonale, au seuil de 5% ; test bilatéral).

Valeurs propres et vecteurs propres à partir de la matrice des corrélations

Valeur propres	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Valeur	7,4178	2,8089	1,6255	0,9974	0,9326	0,7831	0,4837	0,4550	0,1933	0,1361	0,0769	0,0321	0,0299	0,0203	0,0073
% de variabilité	0,4636	0,1756	0,1016	0,0623	0,0583	0,0489	0,0302	0,0284	0,0121	0,0085	0,0048	0,0020	0,0019	0,0013	0,0005
% cumulé	0,4636	0,6392	0,7408	0,8031	0,8614	0,9103	0,9406	0,9690	0,9811	0,9896	0,9944	0,9964	0,9983	0,9995	1,0000

Corrélations entre variables et facteurs principaux

	facteur 1	facteur 2	facteur 3
T°C	0,4627	0,1118	-0,2104
CE	0,9495	0,2136	0,0065
pH	-0,2771	0,6939	-0,6070
Ca ²⁺	-0,3264	0,7502	0,5063
Mg ²⁺	0,8829	-0,2418	-0,1018
Na ⁺	0,8523	0,2784	-0,0139
K ⁺	0,8068	-0,1429	-0,1053
HCO ₃ ⁻	0,7670	-0,2835	-0,0050
Cl ⁻	0,9249	0,2287	-0,0301
NO ₃ ⁻	0,0369	0,4412	-0,2368
SO ₄ ²⁻	0,9315	0,0811	0,0778
Eh	0,2899	-0,6693	0,6240
SAR	0,9204	0,2857	-0,0757
TH°f	0,8338	0,2532	0,2444
Isg	-0,0689	0,7242	0,6045
pCO2	0,1339	-0,3131	-0,2266

Hydrochimie des eaux de puits de la nappe des sables quaternaires (1980)

Nom	CE	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻
H76	3031	7,3	308	113	515	154	798	920	14
H73	3030	7,3	306	114	513	154	798	920	14
H80	3117	7,2	306	113	513	152	810	913	13
H41	3117	7,2	306	112	522	156	800	930	12
H33	3117	7,3	298	117	525	156	820	930	13
H39	3117	7,2	314	116	520	156	810	925	12
H95	3030	7,3	298	113	500	158	818	1100	18
H98	3031	7,3	300	116	516	162	802	935	16
H101	3117	7,3	298	117	509	152	800	1020	12
H107	2944	7,4	302	114	515	152	820	1050	13

Variables hydrogéochimiques calculées à partir des prélèvements d'eau de la nappe des sables quaternaires (1980)

Nom	pH	TDS	CEc	TH ^{of}	Mg/Ca	Cl/Na	IS anhydrite	H ₂ CO ₃	BI
H76	7,3	2822	4172	123	123	1,005	-0,34	0,28	3%
H73	7,3	2819	4168	123	123	1,009	-0,34	0,28	3%
H80	7,2	2820	4177	123	123	1,024	-0,35	0,35	3%
H41	7,2	2838	4193	122	122	0,994	-0,34	0,36	3%
H33	7,3	2859	4232	122	122	1,013	-0,35	0,29	2%
H39	7,2	2853	4216	126	126	1,01	-0,33	0,36	3%
H95	7,3	3005	4338	121	121	1,061	-0,28	0,29	-3%
H98	7,3	2847	4198	123	123	1,008	-0,35	0,30	2%
H101	7,3	2908	4249	122	122	1,019	-0,31	0,28	0%
H107	7,4	2966	4321	122	122	1,032	-0,3	0,22	1%

Hydrochimie des eaux de puits de la nappe des sables quaternaires (1993)

Nom	T°C	PH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻
H76	21,6	7,5	2700	500	21	146	58	200	1200	94
H81	18	8,1	3900	605	124	265	117	350	1920	71
H45	14,2	7,8	3100	524	115	145	59	210	1750	47
H46	14,2	7,8	3600	584	130	211	65	300	2000	68
H33	22,2	7,9	9200	723	290	925	153	1370	2900	45
H39	16	7,9	4300	610	170	274	79	400	2140	110
H56	22	7,9	4700	670	81	366	59	440	2000	82
H60	22	7,8	4400	521	86	270	55	330	2100	110
H68	22,6	8,2	2800	534	176	287	136	410	2000	68
H67	21,1	7,8	4200	500	201	217	50	280	2080	148
H80	21,6	7,8	5900	603	315	485	259	700	2428	41
H86	28,8	7,7	3200	584	48	183	43	250	1600	74
H98	21	7,9	6100	688	209	476	172	700	2250	70
H101	18,8	7,8	5900	569	209	527	93	750	2250	65
H107	18,5	8,1	5000	642	131	499	143	740	2000	82

Variables hydrogéochimiques calculées à partir des prélèvements d'eau de la nappe des sables quaternaires (1993)

Nom	T°C	PH	CEc	TH ^f	Mg/Ca	Cl/Na	IS anhydrite	H ₂ CO ₃	BI
H76	21,6	7,5	2834	133	0,069	0,888	-0,01	0,058	0%
H81	18	8,1	4241	202	0,338	0,856	0,18	0,03	1%
H45	14,2	7,8	3494	178	0,362	0,939	0,09	0,033	-3%
H46	14,2	7,8	4090	199	0,367	0,922	0,17	0,036	-3%
H33	22,2	7,9	8199	300	0,661	0,96	0,36	0,056	-1%
H39	16	7,9	4621	222	0,46	0,947	0,2	0,033	-2%
H56	22	7,9	4609	200	0,199	0,78	0,26	0,023	0%
H60	22	7,8	4236	165	0,272	0,793	0,18	0,027	-10%
H68	22,6	8,2	4469	206	0,544	0,926	0,16	0,026	-3%
H67	21,1	7,8	4234	207	0,663	0,837	0,14	0,024	-3%
H80	21,6	7,8	5972	280	0,861	0,936	0,24	0,123	1%
H86	28,8	7,7	3459	165	0,136	0,886	0,19	0,025	-1%
H98	21	7,9	5700	258	0,501	0,954	0,27	0,066	1%
H101	18,8	7,8	5712	228	0,606	0,923	0,19	0,046	-1%
H107	18,5	8,1	5425	214	0,336	0,962	0,2	0,036	-1%

Hydrochimie des eaux de puits de la nappe des sables quaternaires (2002)

Nom	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻
H17	5369	600	127,2	555,9	56,1	337	720	170
H107	6739	680	148,8	391,7	102,5	348	712	58
H99	7969	640	201,6	347,1	70,7	351	720	47
H101	3560	340	60	666	58	277	715	16
H68	5332	640	72	434,8	48,8	348	720	30
P17	4435	640	67,2	463,3	30,5	341	712	87
H83	5676	640	76,8	451,2	55	326	715	72
P22	6357	500	202,8	492,2	61	348	710	76
H25	8782	600	234	400,7	131,7	348	711	44
H98	7455	640	175,2	358,6	137,8	348	630	58
H95	10137	580	420	449,8	148,8	344	711	246
H39	6363	640	120	401,5	69,5	348	700	44
H82	5201	520	168	423,6	30,5	344	700	37
H73	5054	660	64,8	397,2	24,4	348	680	70
H80	7119	620	136,8	437,2	58	348	710	78
H41	7455	660	153,6	390	97,6	344	711	51
H76	4675	520	43,2	603,6	48,8	348	720	50
H21	7035	640	136,8	425,8	64,6	344	710	84
H7	8001	640	204	484,4	64,6	348	712	57
H57	7140	662	105,6	439,8	52,4	348	710	97
G70	6044	620	108	572,6	158,6	348	710	84
P18	4727	640	72	538,1	45,1	344	710	151

**Variables hydrogéochimiques calculées à partir des prélèvements d'eau
de la nappe des sables quaternaires (2002)**

Nom	TDS	CEc	TH°f	Mg/Ca	Cl/Na	IS anhydrite	H₂CO₃	BI
H17	1809	2625	78	0,54	0,85	-0,55	0,17	-3%
H107	1761	2531	98	0,41	1,18	-0,43	0,32	1%
H99	1677	2444	102	0,70	1,55	-0,49	0,22	0%
H101	1581	2290	97	0,34	1,08	-0,4	0,18	5%
H68	1698	2454	115	0,35	1,67	-0,34	0,15	5%
P17	1781	2565	122	0,29	1,35	-0,31	0,09	9%
H83	1736	2492	116	0,37	1,40	-0,35	0,17	7%
P22	1679	2477	89	0,90	1,17	-0,59	0,19	-1%
H25	1828	2668	124	1,17	1,12	-0,53	0,40	10%
H98	1648	2375	91	0,52	1,42	-0,53	0,43	-2%
H95	1960	2680	103	0,47	1,49	-0,43	0,46	-7%
H39	1723	2484	134	0,58	1,02	-0,37	0,21	4%
H82	1623	2436	124	1,26	1,81	-0,55	0,09	9%
H73	1744	2561	116	0,30	1,14	-0,35	0,08	11%
H80	1738	2500	115	0,45	1,65	-0,38	0,18	4%
H41	1757	2552	107	0,66	1,17	-0,47	0,30	5%
H76	1634	2396	73	0,32	1,11	-0,51	0,15	-6%
H21	1774	2542	128	0,51	1,77	-0,36	0,20	7%
H7	1704	2504	101	0,73	1,22	-0,51	0,20	3%
H57	1795	2568	126	0,39	1,61	-0,33	0,16	7%
G70	1801	2622	74	1,48	0,83	-0,79	0,49	-3%
P18	1900	2741	114	0,35	0,94	-0,36	0,14	9%