

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA -
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE
LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master en Géologie

Option :Hydrogéologie

THEME

**Essai de modélisation de la nappe
phréatique de la cuvette de Ouargla**

Soutenu publiquement par :

M.DJEDIAI Abdelatif

Le : 02/07/2013

Devant le jury :

Président :	Mme MAABDI Nawel	M. A. A. Univ. Ouargla
Promoteur :	M. ZERROUKI Hicham	M. A. A. Univ. Ouargla
Examineur :	M. ZEDDOURI Aziez	M. C. A. Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2012/2013

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier avant tout notre ALLAH, le très miséricordieux, qui grâce à lui nous sommes arrivés à ce stade.

Ce travail a été dirigé par Monsieur **ZARROUKI HICHAM**, Maître Assistante à l'université d'Ouargla. Qu'elle trouve ici le témoignage de nos profondes gratitudes pour ses conseils, ses remarques et sa disponibilité tout au long de cette étude. Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance pour la patience et la bienveillance dont elle a fait preuve.

Nos remerciements vont également à Monsieur **TAHAR IDER**, Chef service à l'**STEP**, et Monsieur **BEN HAMIDA**, Chef service à l'**ANRH**.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du personnel du laboratoire des analyses physico-chimiques de l'**ANRH**.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du personnel l'**ONM**.

Nous remercions l'ensemble des enseignants qui ont constamment été d'un immense soutien tout au long de ce travail et nous adressons notre parfaite reconnaissance à Monsieur **ZEDOURIA**, chef du département des sciences de la Terre et de l'Univers.



Dédicaces

Je dédie ce travail à toute la famille DJEDJAI, grand et petit.

Je le dédie en particulier à :

Ma mère qui m'a toujours encouragé. Elle était derrière tous mes succès ET s'est sacrifiée pour moi et qui m'a enseigné les actes de civisme et du savoir-vivre ;

- À mes très chères frères et sœurs, à tous les proches et voisinage ;

- À mes amis et mes collègues et les enseignants du département des sciences de la terre et de l'univers.



Introduction Générale	P1
 Chapitre. I : Situation géographique et aperçu géologique	
I.1- Situation Géographique	P3
I.2- Etude Géologique	P6
I.2-1- Introduction	P6
I.2-2- Géologie régionale	P6
2-2-1 La sédimentation continentale post-hercynienne	P7
2-2-2 La sédimentation laguno-marine du crétacé supérieur	P7
2-2-3 L'orogénèse atlasique et ses conséquences	P8
2-2-4 La mise en place du tertiaire continental	P9
2-2-5 Les coupes stratigraphiques du bas Sahara	P10
I.2-3 Cadre Géologie locale	P13
2-3-1 Introduction	P13
2-3-2 Aptien	P13
2-3-2-1 Albien	P13
2-3-2-2 Vraconien	P13
2-3-2-3 Cénomaniens	P14
2-3-2-4 Turonien	P14
2-3-2-5 Sénonien lagunaire	P14
2-3-2-6 Sénonien et Eocène	P14
2-3-2-7 Mio-Pliocène	P15
2-3-2-8 Quaternaire	P15
I.3-Conclusion	P16

Chapitre. II : hydro-climatologie

II.1- Introduction	P17
II.2- contexte climatique	P17
II.1-1 : Pluviométrie	P17
II.1-2 : Températures	P18
II.1-3 : L'humidité relative	P19
II.1-4 : La vitesse du vent	P19
II.1-5 : Durée d'insolation	P20
II.1-6 : L'évaporation	P21
II.1-7 : Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN	P22
II.3- Calcul du bilan hydro-climatique	P23
II.4 Hydrologie	P27
II.4-1 Chotts et Sebkhass	P27
II.4-2 Réseau hydrographique	P27
II.5- Conclusion	P28

Chapitre. III : hydrogéologie

III.1- Introduction	P29
III.2- Cadre Hydrogéologique Régional	P30
III.2-1- Nappe du Continental Intercalaire (C.I)	P30
A-Alimentations	P32
B- Exutoires	P32
III.2-2 Nappe du Complexe Terminal (C.T)	P33
A-Alimentations	P33
B-Exutoires	P34
III.3- Contexte Hydrogéologique Local	P34
III.3-1- Hydrogéologie de la nappe phréatique	P35
3-1-1 Généralités sur la Nappe phréatique	P35
3-1-2 caractéristiques de la nappe phréatique	P36
Alimentations	P36
Pertes	P36
3-1-3 Piézomètre	P37
3-1-4 Paramètres Hydrodynamiques de la nappe	P40
Granulométrie	P40
Porosité	P40
Limites d'Atterberg	P40
Perméabilité	P40
3-1-5 Coefficient d'emmagasinement et transmissivité	P41
III.4 Bilan hydrique de la nappe superficielle	P43
III.4-1 Equation du bilan d'eau	P43

Sommaire

Entrées	P43
Sorties	P43
III.4-2 Estimation des termes du bilan d'eau	P45
III.4-3 Résumé du bilan d'eau	P47
III-5 CONCLUSION	P48

Chapitre. IV : hydrochimie

VI.1- Introduction	P50
VI.2-Les paramètres physico-chimiques	P50
a- Température (T)	P50
b- Le potentiel d'hydrogène (pH)	P50
c- La conductivité électrique (CE)	P50
d- Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{++} , K^{+})	P51
e- Les anions (Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{-} , CO_3^{-} , NO_3)	P51
f- Le résidu sec (R.S)	P51
g- La dureté totale (DHT)	P51
VI.3- Analyses des paramètres physico-chimiques	P52
VI.3-1- La conductivité électrique (CE)	P52
VI.3-2- Le Résidu sec (R.S)	P54
VI.3-3- Le Potentiel d'Hydrogène	P55
VI.3-4- La dureté totale (DHT)	P56
VI.3-5- Titre Alcalimétrique complet TAC	P56
VI.4- Teneurs en ions majeurs	P56
VI.5- Classification et représentation graphique des eaux	P57
VI.5-1- Etablissement de la formule caractéristique	P57
A- Calcul de la quantité en réaction	P57
B- Calcul du pourcentage d'erreur	P57
C- Détermination des formules caractéristiques	P57
VI.5-2- Représentation graphique des eaux	P58
VI.5-2-1- Diagramme semi-logarithmique	P58
VI.5-2-2 Représentation graphique sur le diagramme	P59
IV.6- Conclusion	P60

Chapitre. V : modélisation hydrodynamique

V. 1- Formulations mathématiques de l'écoulement	P61
V.2- Modèle	P65
V. 2-1 Les objectifs	P65
V. 2-2 Outils	P65
V. 2-3 limites	P66
V. 3 Conditions aux limites du modèle	P66
V. 3-1 Maillage	P66
V. 3-2 Limites géologiques	P67
V. 3-3 Le mur	P68
V. 3-4 Le toit	P68
V. 3-5 Conditions de flux	P68
V. 3-6 Conditions de flux internes	P68
V. 3-6 Conditions de flux internes	P68
V. 4 Contraintes initiales	P68
V. 4-1 Emmagasinement et porosité	P68
V. 4-2 Perméabilité	P69
V. 4-3 Recharge	P69
V. 4-4 Evapotranspiration	P69
V. 5 Calage du modèle	P69
V.6 Résultats de la modélisation	P70
V.6-1 Comparaison des piézométries	P70
V.6-2 Bilan hydrique issue du calage en régime permanent	P71
V.6-3 Calage des perméabilités	P71
V.6-4 Calage de la piézométrie	P73
V.6-5 Remontées eaux	P76
V.7 conclusion	P77
Conclusion générale	P78

Liste des figures

Fig. I-1 : Carte de situation géographique	P3
Fig. I-2 : Carte de découpage administratif de la wilaya d'Ouargla	P4
Fig. I-3 : Délimitation de la cuvette de Ouargla	P5
Fig. I-4 : carte géologie régionale (OSS, 2003)	P7
Fig. I-5 : Colonne stratigraphique synthétique de la zone de Ouargla	P12
Fig. II-1 : Répartition annuelle des pluies à Ouargla sur la période 1990-2011(ONM)	P18
Fig. II-2 : Température moyenne mensuelle à Ouargla (Période 1990 – 2011) (ONM)	P18
Fig. II-3 : Humidité moyenne en (%) (1990-2011)	P19
Fig. II-4 : La vitesse du vent en (m/s) à Ouargla (1990-2011)	P20
Fig. II-5 : Durée moyenne mensuelle d'insolation en heures. Station d'Ouargla	P21
Fig. II-6 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) Station d'Ouargla	P22
Fig. II-8-1 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques	P25
Fig. II-8-2 : RFU, Excédent et Déficit en mm	P26
Fig. II-9 : Reliefs et hydrographie de la région d'Ouargla	P27
Fig. III-1 : Le découpage de l'espace saharien (Brule et al, 2003)	P29
Fig. III-2 : Coupe hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)	P31
Fig. III-3 : Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)	P31
Fig. III-4 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003)	P32
Fig. III-5 : Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal	P34
Fig. III-6 : Schéma de la Chronolithostratigraphie de la zone de Ouargla	P35
Fig. III-7 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	P39
Fig. III-8 : Essais de pompage au P402, Diagramme rabattements/temps	P42
Fig. III-9 : Zone d'Ouargla	P44
Fig. IV-1 : Carte D'égales valeurs de conductivité électrique des eaux de la nappe	P53
Fig. IV-2 : Carte D'égales valeurs de résidu sec des eaux de la nappe phréatique	P54
Fig. IV-3 : Variation spatiale de pH des eaux de la nappe phréatique	P55
Fig. IV-4 : Représentation graphique des eaux de la nappe phréatique	P58
Fig. IV-5 : Représentation graphique des eaux de la nappe phréatique	P59
Fig. V-1 : prisme élémentaire de nappe libre	P61
Fig. V-2 : maillage de la nappe dans la région de Ouargla	P67
Fig. V-3 : comparaison des piézométries calculés et observés en 2010	P70
Fig. V-4 : Répartition des perméabilités après le calage	P72
Fig. V-5 : Piézométrie calculée et observée 2010	P74
Fig. V-6 : Profil piézométrique Sud-Nord calculé par le modèle	P75
Fig. V-7 : Profil piézométrique Ouest -Est calculé par le modèle	P75
Fig. V-8 : Modèle 3D du domaine modélisé	P76

Liste des tableaux

Tableau. I-01 : Communes et localités de la cuvette d'Ouargla	P4
Tableau. I.02 : Classes retenues pour la description des faciès géologiques	P11
Tableau. II-01 : Précipitations moyenne mensuelle 1/10mm, période	P17
Tableau. II-02 : Température moyenne mensuelle (°c) 1/10, période (1990-2011)	P18
Tableau. II-03 : Humidité moyenne mensuelle (%) (1990-2011)	P19
Tableau. II-04 : La vitesse du vent en (m/s) de la période (1990-2011)	P20
Tableau. II-05 : Durée moyenne mensuelle d'insolation en heures, de la période	P20
Tableau. II-06 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) Période (1990-2011)	P21
Tableau II-07 - 1 : Classification des climats en fonction Demartonne	P23
Tableau II-07 - 2 : Indice d'Aridité de DEMARTONE. (ONM, Ouargla 2011)	P23
Tableau. II-08 : ETP moyenne mensuelle et annuelle	P24
Tableau. III-01 : résultats des essais de pompage de la nappe phréatique de Ouargla	P41
Tableau III-02 : Bilan d'eau de la zone d'Ouargla	P47
Tableau. IV-01 : Potabilité des eaux en fonction de la dureté degré français	P56
Tableau. IV-02 : Statistique élémentaire des résultats d'analyse des eaux	P56
Tableau. IV-03 :Faciès des eauxde la nappe phréatique d'Ouargla	P57
Tableau. V-01 : Budget d'écoulement journalier moyen en m ³ /j	P71

Introduction Générale

Les calculs qui sont appliqués pour obtenir le bilan hydrique de la nappe phréatique de Ouargla ont donné des résultats qui se diffèrent d'une étude à l'autre et ce, est lié à plusieurs causes, et la principale est la détermination précise des volumes d'eau qui entrent ou sortent dans la nappe, ce qui nécessite un travail fastidieux et une enquête minutieuse qui doit se faire sur le terrain.

Notre étude est une contribution à la modélisation de l'écoulement souterrain et au calcul du bilan hydrique de la nappe phréatique dans la région d'Ouargla, où on s'y limite car c'est la partie où on dispose de maximum de données.

Notre travail vise essentiellement à étudier et à expliquer le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère et les écoulements souterrains des eaux et de justifier les éléments du bilan hydrique de la nappe en régime permanent à l'aide du logiciel MODFLOW pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons développé notre travail en 05 chapitres:

Le premier chapitre : Dans cette partie, nous avons essayé d'identifier les formations géologiques par l'étude géologique. L'étude géophysique nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques des terrains constitutifs et la nature lithologique du remplissage quaternaire de la cuvette.

Le deuxième chapitre : comprend pour sa part un commentaire succinct des principaux paramètres hydro-climatologique avec une estimation des paramètres essentiels du bilan, et des aperçus hydrologique.

Le troisième chapitre : Dans cette partie nous avons essayé d'identifier les différentes nappes aquifères de la région d'étude et de déterminer les différents paramètres hydrodynamiques. Pour la piézométrie. Nous allons exploiter les mesures de niveaux statiques effectuées par l'ANRH.

Le quatrième chapitre : qui permettra d'une part d'apprécier la qualité des eaux, et d'autre part l'élaboration de cartes de physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique. Les résultats chimiques exploités sont ceux des campagnes d'échantillonnage réalisées par les services de l'ANRH(Campagne de 2012).

Le cinquième chapitre : nous allons construire le modèle hydrodynamique de la nappe, qui renferme 502 mailles carrées de 650 m de côté, sur lequel seront répartie les caractéristiques hydrodynamiques, la recharge, l'évapotranspiration. Puis on passera aux étapes de calage et de validation du modèle. Afin de caractériser les écoulements souterrains et estimer le bilan hydrique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla.

I.1-Situation Géographique

Ouargla est une ville de l'Algérie et chef-lieu de la Wilaya de Ouargla. Elle est située au Nord-Est du Grand Sahara Algérien ; elle est distante de 850 Km de la capitale Alger.

La grande cuvette de Ouargla s'étend sur une superficie de 99 000 hectares ; avec une longueur de 45 Km dans la direction Sud-Ouest, Nord-Est, et une largeur de 2 à 5 Km.

La cuvette de Ouargla est repérée par les coordonnées (UTM, Clark 1880) suivantes :

$$X \text{ min} = 710000 \quad ; \quad Y \text{ min} = 3530000,$$

et

$$X \text{ max} = 730000 \quad ; \quad Y \text{ max} = 3600000$$

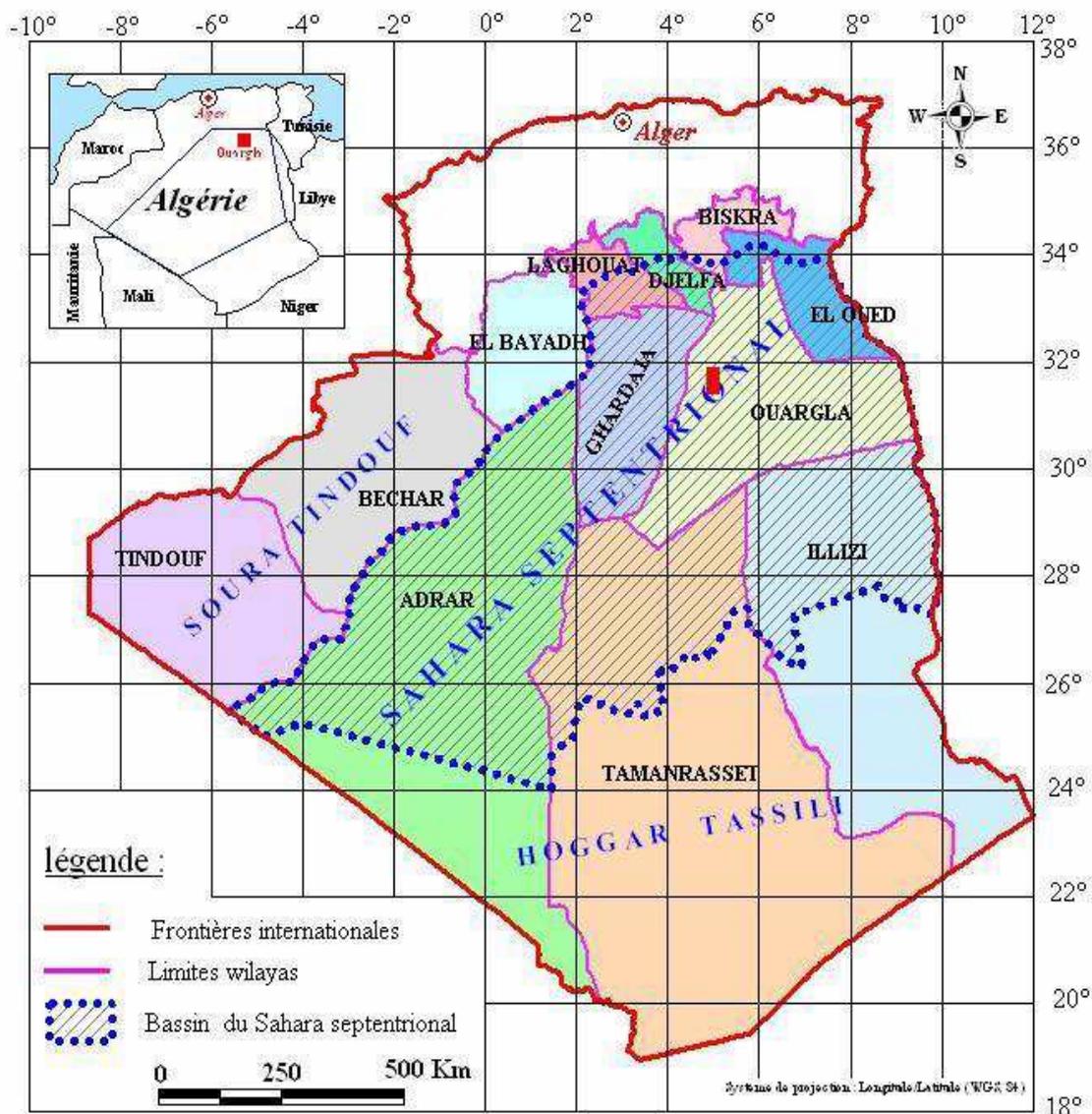


Fig. I-1: Carte de situation géographique

Elle est limitée au Nord par les Wilaya de Djelfa ; au Sud par les Wilaya d'Illizi et Tamanrasset à l'Ouest par la Wilaya de Ghardaïa et à l'Est par la Tunisie.

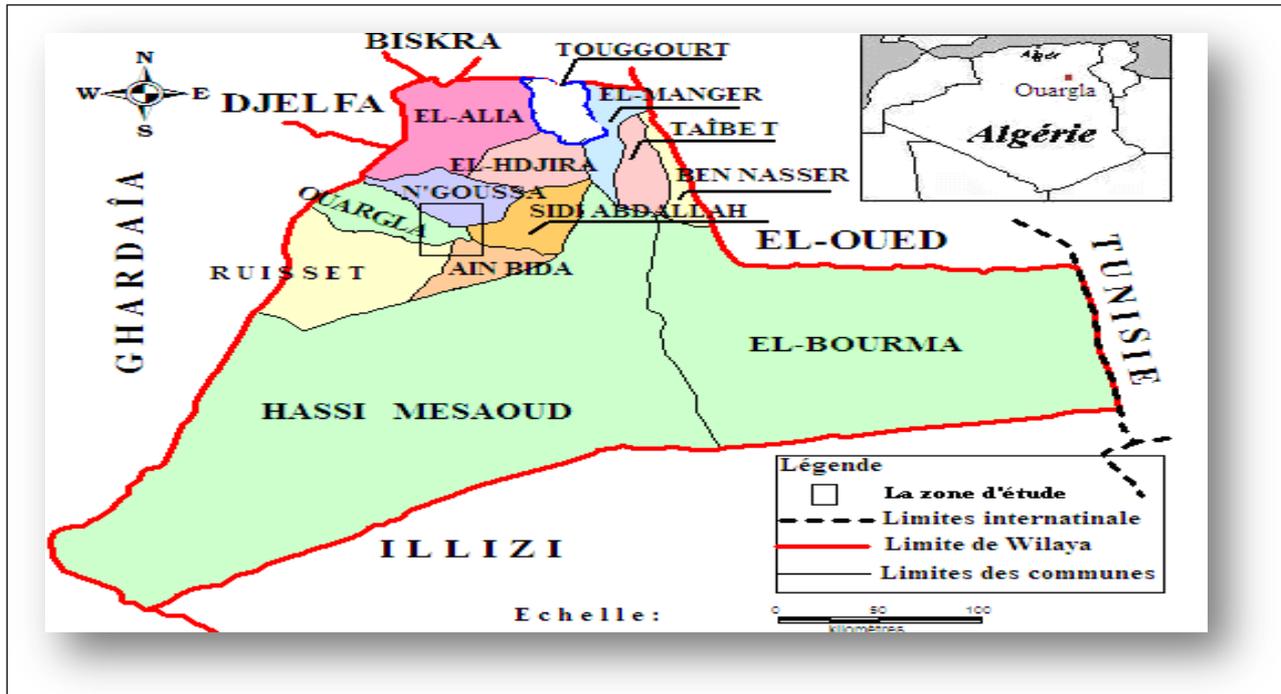


Fig.I-2 : Carte de découpage administratif de la wilaya d'Ouargla

En 2004, la population est estimée à 415.000 habitants, répartis à travers 05 Communes.

Tableau I-01 : Communes et localités de la cuvette d'Ouargla.

Communes	Localités
Ouargla	Hassi-Miloud, Said-Otba, Bamendil, MeKhadma, Bour El-Aicha, Centre Ksar, Beni Thour, EL-Koum et Ghers.
N'Goussa	Larbàa, Boughoufala, El- Bour, El-Koum et Ghers.
Rouissat	Rouissat, El-Hadeb et SouKra.
Ain El-Beida	Ain El-Beida, Chott et Adjadja.
Sidi Khouiled	Oum Raneb et Aouinet Moussa.

Source : Direction de la Planification/ouargla

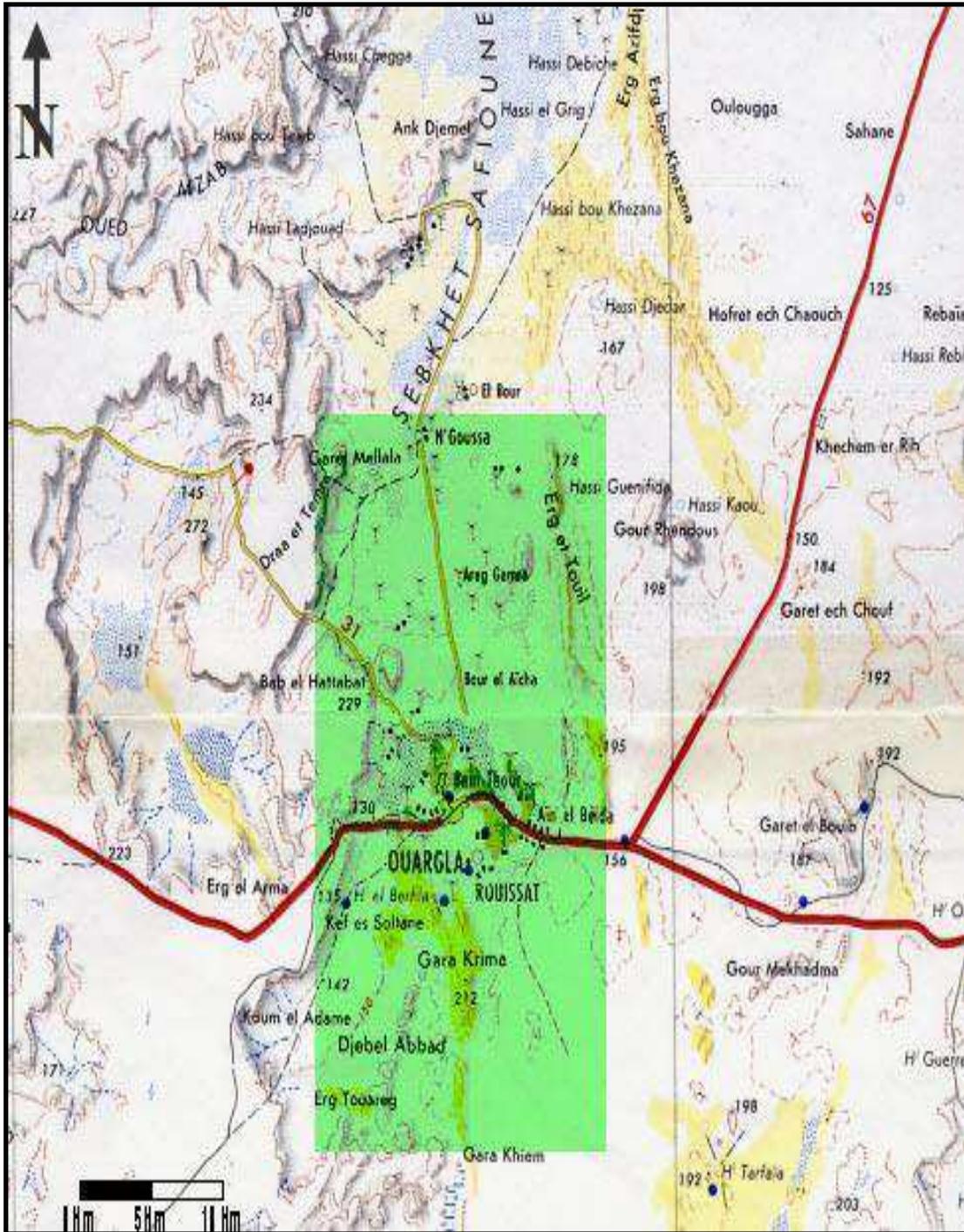


Fig. I-3 : Délimitation de la cuvette de Ouargla

I.2- Etude Géologique

I.2-1- Introduction

Lorsqu'on aborde le Sahara par le Nord on est surpris par la rapidité avec laquelle on passe des montagnes et plateaux de l'Atlas à la plate-forme désertique saharienne. Ce passage souligné par des affleurements de calcaires blancs sub-verticaux correspond à l'accident sud-atlasique, qui est selon les endroits un pli, un pli-faille, ou une flexure. Au sud de cet accident, qui va d'Aghadir au Golfe de Gabès, s'étend le bouclier africain qui a résisté aux plissements et sur lequel la mer s'est parfois étendue mais sans jamais atteindre de grandes profondeurs. C'est sur ce bouclier formé de roches éruptives et métamorphiques que se sont déposés plusieurs milliers de mètres de terrains sédimentaires allant du Cambrien au Quaternaire (Cornet, 1964). On y subdivise en deux (02) sous domaines : le bassin occidental et le bassin oriental, séparés par l'anticlinal du M'Zab. Ouargla ou Vallée de l'Oued M'ya (fig.8), s'inscrit dans cette vaste cuvette sédimentaire occupant dès le Secondaire l'emplacement de l'actuel Sahara nord-oriental (septentrional) (Gouscov, 1952).

I.2-2- Géologie régionale

La région a connue au cours de son histoire géologique de longues phases de sédimentation alternativement marines et continentales (Fig. I-1). Les dépôts résultants, ont été d'autant plus importants qu'un immense bassin est apparu très tôt en cette partie du Sahara, et qu'il a été presque constamment affecté ensuite, par des mouvements de subsidence.

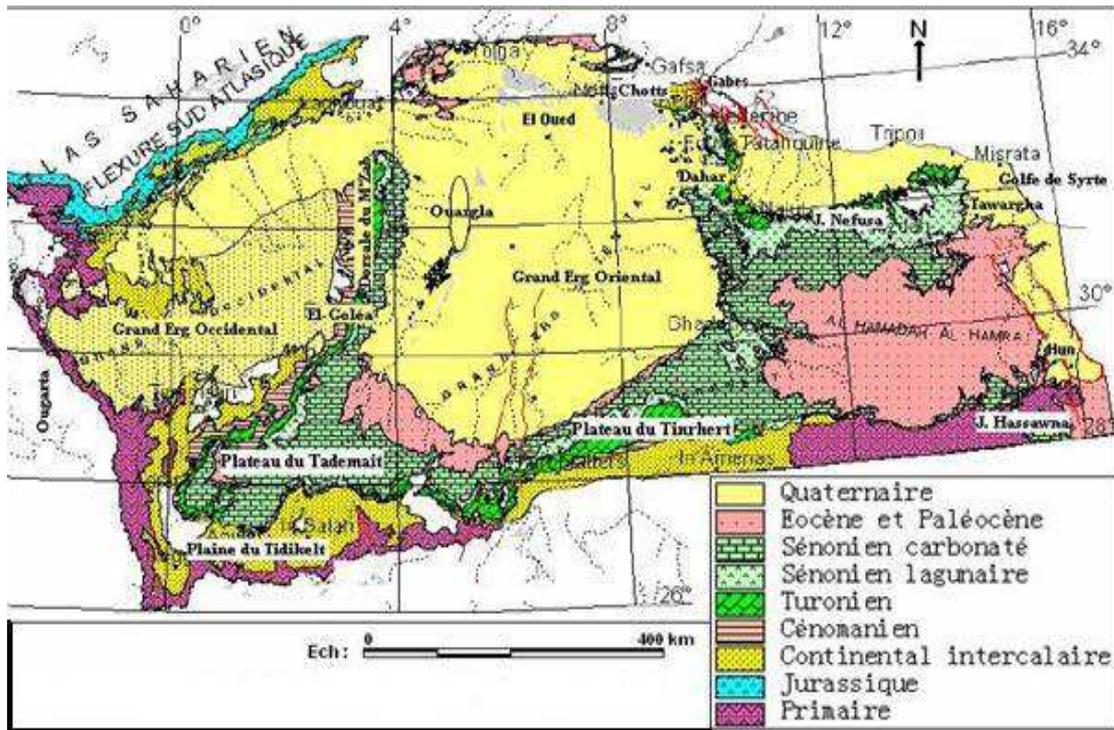


Fig. I-4 : carte géologie régionale (OSS, 2003)

2-2-1 La sédimentation continentale post-hercynienne

Bordure septentrionale du socle africain. Depuis cette région, se produisent à plusieurs reprises des transgressions marines, par exemple au Jurassique et au Crétacé inférieur. Ces dernières sont courtes, et l'essentiel des sédiments accumulés à cette époque sont des sables éoliens et fluviatiles et argiles continentales. L'ensemble de ces dépôts dont les sables ont été transformés en grès poreux, est appelé (Continental intercalaire) parce qu'il apparaît dans l'échelle stratigraphique entre les formations marines primaires et les formations résultant d'une transgression marine d'époque cénomaniennes.

2-2-2 La sédimentation laguno-marine du crétacé supérieur et de l'éocène

Sur les alluvions uniformément épanchées du Continental intercalaires apparaît, au Craconien, un régime de lacs et de lagunes ; dû à l'amaigrissement des écoulements du Continental intercalaire, il engendre des dépôts alternés d'argile, de dolomie, d'argiles sableuses, de grès à ciment calcaire. Durant le Cénomaniens inférieur, une mer peu profonde s'avance vers le Sud, jusqu'aux Tassili, mais elle connaît plusieurs phases de régression. Ses dépôts se composent ainsi d'une alternance d'argile et d'anhydrite. Le Cénomaniens supérieur est plus franchement marin avec des dépôts de dolomie et de calcaire dolomitique disposés en bancs de quelques mètres d'épaisseur entre lesquels apparaissent encore de l'anhydrite et de

l'argile gypsifère. Faciès et épaisseur des dépôts varient vers le Nord-est: les carbonates deviennent plus importants et la puissance des bancs s'accroît [03, 07]; ils indiquent l'origine vraisemblable de la transgression cénomaniennne.

Le Turonien voit s'établir un régime marin franc responsable du dépôt de calcaires et de dolomies sur l'ensemble du Sahara algérien. Le banc carbonaté homogène sur toute son étendue présente une grande épaisseur pouvant atteindre, par endroits, plus de 100 mètres. Cependant, des variations de faciès peuvent être observées. Légèrement lagunaire au Sud (présence de marnes vertes à anhydrite dans les régions du Tademaït et du Tinghert) le Turonien devient plus franchement marin au centre (présence exclusive de calcaires et de dolomies) et au Nord (prédominance des marnes) [03]. Ce changement de faciès s'accompagne d'un épaissement des sédiments qui montrent que le rebord de la plate-forme est toujours affecté de mouvements de subsidence.

2-2-3 L'orogénèse atlasique et ses conséquences

Un évènement capital intervient alors; la région septentrionale occupée jusque-là par la fosse de Berbérie, voit se former les chaînes atlasiques par surrection de sédiments subissant des poussées venant du Nord. Le ploiement brutal entraîne à l'extrémité du socle africain un accident longitudinal dont l'emplacement était déjà indiqué par la zone de subsidence septentrionale du Bas-Sahara. Ce dernier est désormais fermé au Nord par la puissante barrière de l'Atlas saharien (Monts des Ouled Nail, Massif de l'Aurès et Monts des Nememcha) et sa position, jusqu'alors en relief par rapport à la fosse de Berbérie, est devenue une position déprimée.

Le contrecoup de l'orogénèse atlasique sur le socle saharien est à l'origine de l'apparition de déformations à grand rayon de courbure. Les calcaires crétacés du Mzab sont transformés en dorsale, ceux du Tademaït en cuvette. Au Sud, l'axe Amguid-El Biod s'effondre pour faire place à un axe synclinal méridien qui se poursuit jusqu'à l'Aurès. Des axes secondaires apparaissent çà et là: citons la ride anticlinale, NW-SE, Messad-Touggourt et au Sud, une ride parallèle passant au Nord de Guerrara et semblant se prolonger vers l'Est par la ride Hassi Messaoud-frontière tunisienne, la ride anticlinale, EW, de Tozeur prolongée vers l'Ouest par plusieurs branches, la ride de Sidi Rached et celle de Sidi Khelil dans l'Oued Righ, l'ondulation de Stil au Nord-Ouest du chott Mérouane. Ainsi, le choc de la surrection atlasique semble avoir fait naître des ondes concentriques sur la couverture sédimentaire du socle saharien autour de la fosse créée au pied de l'Aurès.

2-2-4 La mise en place du tertiaire continental

Les hautes montagnes de l'Atlas subissent, à partir du Miocène surtout, une érosion intense qui permet la construction d'un vaste glacis de piémont composé de sables et d'argiles rouges reposant, en discordance, sur des terrains variés allant du Primaire à l'Ouest à l'Eocène à l'Est. Ces terrains fluvio-lacustres recouvrent d'immenses étendues de part et d'autre de la dorsale mozabite émergée et s'étalent très loin vers le Sud où ils forment aujourd'hui le substratum des grands ergs. Leur épaisseur varie de quelques mètres à plus de 2 000 mètres dans la fosse sud-aurasienne toujours affectée par la subsidence. Grâce à la présence, dans l'Aurès, de Miocène inférieur marin daté par des fossiles, on peut attribuer aux formations continentales supérieures un âge Pontien. Par analogie de faciès on peut, vers le Sud, reconnaître le Pontien, lorsque le Miocène marin est absent. Dans la région d'El Oued, des foraminifères remaniés d'âge Miocène inférieur ont été découverts lors de forages récents. Amenés depuis l'Aurès par les eaux courantes, ils témoignent l'âge Pontien des alluvions qui les contiennent. Ailleurs, les formations continentales, seules représentées, correspondent, au moins en partie, au Pontien du Souf et des Ziban. Le reste des dépôts peut appartenir au Miocène inférieur et même peut-être, localement, à l'Oligocène; le Sahara alors entièrement émergé ne pouvait fournir de sédiments continentaux bien différents de ceux étalés plus tard, d'où une grande difficulté à les distinguer. Quel que soit l'âge exact de ces formations du Tertiaire continental, il importe de savoir quelle est leur nature car leurs possibilités aquifères en dépendent essentiellement.

Malgré de grandes difficultés de différenciation de strates homogènes alternativement sableuses et argileuses dans un épais empilement de formations lenticulaires et d'extension limitée, quatre niveaux ont pu être distingués dans le Tertiaire continental du Bas-Sahara. A la base, un dépôt argileux peu épais recouvre, dans la partie centrale de la cuvette, suivant une bande Nord-Sud, les formations du Sénonien et de l'Eocène carbonatés et de l'Eocène évaporitique. Il est recouvert par un dépôt grésosableux relativement constant étendu à tout le Sahara oriental et dont l'épaisseur peut atteindre 400 mètres. Chargé de graviers à la base, il devient peu à peu argileux vers le sommet, à proximité du niveau supérieur. Ce dernier est formé d'argiles et de sables à limites mal définies et il n'existe pas partout. Dans la région des chotts au Nord, il devient plus épais et plus constant. A sa partie supérieure, un deuxième niveau sableux apparaît. Lorsque le niveau trois est absent, il repose directement sur le niveau deux et s'en distingue très mal. Son extension est limitée à quelques régions du Bas-Sahara, dont la partie Nord, où son épaisseur s'accroît jusqu'à 400 mètres au pied de l'Aurès.

2-2-5 Les coupes stratigraphiques du bas Sahara

➤ L'échelle stratigraphique de base

En vue de procéder aux corrélations géologiques, il a été nécessaire de définir au préalable la succession des formations stratigraphiques (et lithologiques) présentes dans la région. L'analyse des données de forages a permis de répertorier une vingtaine d'étages stratigraphiques traversés. Certains ont été regroupés pour permettre une corrélation plus aisée des formations géologiques dans le bassin. C'est ainsi que les formations du Crétacé inférieur datées du Berriasien à l'Albien ont été regroupées sous le terme « Continental intercalaire ». Le terme « Continental terminal » désigne les formations datées du Sénonien au Mio-pliocène. Les séries datées du Lias au Malm ont été regroupées sous le Jurassique. Les étages datés du Primaire et les formations du socle sont regroupés sous le nom de Paléozoïque. Les données brutes des coupes de forages ont été réorganisées selon cette échelle qui se présente de haut en bas comme suit : Quaternaire, Continental terminal, Turonien, Cénomanién,

Continental intercalaire, Jurassique, Trias, et Paléozoïque

➤ Les classes lithologiques et les faciès

Les données lithologiques ont elles aussi été soumises à un traitement qui a consisté à simplifier les descriptions des faciès géologiques. Les descriptions détaillées de faciès sur les logs de forages ont été regroupées en huit classes répertoriées sur le tableau ci-dessous.

Tableau I.02 :Classes retenues pour la description des faciès géologiques

Classes	Faciès géologiques	Classes	Faciès géologiques
1- Sables	sables fins	5 - Argiles sableuses	argiles gréseuses
	sables moyens		argiles et sables
	sables grossiers		argiles, sables et calcaires
	grès et conglomérats		marnes gréseuses
	sables et graviers	6 - Alluvions	limons, sables, galets
	sables et conglomérats		poudingues
	sables et galets		galets et argiles
2 - Argiles	schistes argilo-sableux	7 - Calcaires	dolomie
	Schistes		croûte calcaire
	argiles marneuses		calcaire compact
3 Marnes	Marne		calcaire fissuré
	marno-calcaire		calcaire dolomitiques
	marne argileuse		8 - Anhydrites
4 - Sables argileux	sable et argile		
	sable limoneux	argiles gypseuses	
	sable marneux	calcaires gypseux	
	grès argileux	argile anhydritique et gypseuse	
	calcaires, sables et argiles	marnes et gypses	

Source : E.R.E.S.S.

A ces huit classes, nous avons ajouté une neuvième catégorie : les « quartzites », dans laquelle nous avons rangé toutes les formations du Paléozoïque qui n'avaient pas fait l'objet d'une description.

Ere	Etage	Prof	Chronostratigraphie	Lithologie			
CÉNOZOÏQUE	Mio-pliocène	10m	Sable	[Sable]			
			Argile	[Argile]			
			Évaporite	[Évaporite]			
			Sable	[Sable]			
			Argile	[Argile]			
			Gravie	[Gravie]			
			Grès	[Grès]			
			Argile	[Argile]			
			ÉOCÈNE	Moyen	180m	Argile Lagunaire	[Argile Lagunaire]
				Inférieur		Dolomie	[Dolomie]
MÉSOZOÏQUE	CRÉTACE	280m	Sénonien Calcaire	[Calcaire]			
			500m	Sénonien Lagunaire	[Évaporite]		
		Anhydrite		[Anhydrite]			
		Sel massif		[Sel massif]			
		Argile		[Argile]			
		1100m 1160m	Turonien	Calcaire marneux	[Calcaire marneux]		
			Cénomanién	Dolomie Argile Anhydrite Marne	[Dolomie, Argile, Anhydrite, Marne]		
		1320m		Vraconien	Argile et dolomie	[Argile et dolomie]	
		1450m	Albien	Sable	[Sable]		
				Grès	[Grès]		
Argile sableuse	[Argile sableuse]						
1660m 1680m	Aptien	Dolomie	[Dolomie]				
	Barrémien	Sable	[Sable]				
			Et Grès	[Et, Grès]			

Fig. I-5: Colonne stratigraphique synthétique de la zone de Ouargla

I.2-3 Cadre Géologie locale

2-3-1 Introduction

Sur la région d'Ouargla seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent, ils sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires [08]. A partir des données de forages pétroliers et celles des forages hydrauliques, nous avons établi des coupes géologiques et un log synthétique des formations lithologiques (Fig. II-5). La description des différentes formations a pu être effectuée.

Litho-stratigraphie

2-3-2 Aptien :

Il est constitué par la "barre aptienne " dans la région d'Ouargla, qui est formée de marnes dolomitiques, gris verte, brunes ou blanches, et dolomies cristallines, son épaisseur est variable, elle est comprise entre 20 et 26 m. L'aptien est considéré comme imperméable dans son ensemble.

2-3-2-1 Albien :

Sur la région d'Ouargla, l'albien correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire; Ce sont des grès, argiles et sables. L'épaisseur de ces formations est variable (417- 432 m). Les éléments détritiques (non argileux) sont largement prépondérants (70 à 90%) et sont représentés par des grès fins avec des passées de grès moyens et parfois d'intercalations de sables grossiers à limons argileux ou souvent carbonatés. On note des passées d'argiles brun-rougeâtre, elles sont même pélitiques et sableuses sur les puits les plus septentrionaux (OKJ 20, OKJ60). Dans son ensemble, L'Albien correspond à un horizon aquifère.

2-3-2-2 Vraconien :

L'intercalation Albo-varconienne caractérise un épisode dolomitique remarquable entre les grès Albien et les argiles Cénomaniennes, Il est formé de:

- Dolomies et quelques fois de calcaires dolomitiques parfois argileux contenant de rares débris de mollusques, les épaisseurs y sont inférieures à 100 m mais supérieures à 50 m sur Haoud-Berkaoui, sauf quelques exceptions locales en particulier dans deux puits de Haoud-Berkaoui (OKJ 60 : 40 m et OKJ 20 : 36 m).

- Argiles et marnes dolomitiques et des éléments détritiques.

2-3-2-3Cénomanién :

Il est formé de deux séries (inférieure et supérieure) :

- la série inférieure est constituée par des argiles dolomitiques et des marnes grises, avec parfois des argiles brune-rougeâtre ou gris-verdâtre, son épaisseur varie entre 65 et 80 m. On note aussi quelques passées de calcaires dolomitiques en particuliers à la partie médiane de la série.
- la série supérieure est formée d'une alternance d'argiles et de marnes dolomitiques grises, parfois d'argiles salifères, de bancs d'anhydrite, de quelques intercalations dolomitiques, et de passée de sel gemme, son épaisseur est de l'ordre de 70 m.

2-3-2-4Turonien :

Il se présente sous forme d'une dalle ayant une épaisseur régulière "barre turonienne", il est de l'ordre de 73 m. Il s'agit d'une série essentiellement calcaire : calcaire poreux blanc, parfois grisâtre, pulvérulent, quelquefois dolomitique, de calcaire beige dolomitique et de calcaire fin légèrement dolomitique.

2-3-2-5Sénonien lagunaire :

Le Sénonien lagunaire y est particulièrement épais, son épaisseur est supérieure à 400 m. Il est formé par :

- Sénonien salifère : ayant une épaisseur moyenne de 200 m ; au niveau du forage 621J10, elle diminue jusqu'à 100 m.
- Sénonien anhydritique : son épaisseur moyenne atteint 300 m.
- Sénonien carbonaté : Son épaisseur moyenne est de 150 m excepté pour le forage 581J10 où elle est de 100 m.

2-3-2-6Sénonien et Eocène :

Le Sénono-Eocène est formé essentiellement de carbonates ayant une épaisseur comprise entre 150 à 200 m. Il s'agit des calcaires dolomitiques cristallins ou micro-cristallins parfois vacuolaires ou crayeux ou plus carrément argileux.

2-3-2-7 Mio-Pliocène :

Le Mio-Pliocène correspond au Continental Terminal. C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénonien et l'Eocène. On distingue quatre niveaux différents dans le Mio-Pliocène à Ouargla [10, 08]:

- A la base, un dépôt argileux peu épais recouvrant dans la partie centrale de la cuvette, et suivant une bande Nord-Sud, le Sénonien et l'Eocène.
- Deuxième niveau : C'est un dépôt grésosableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais et le plus constant; le deuxième niveau est le principal horizon aquifère du Mio-Pliocène.
- Troisième niveau : C'est une formation argilo-sableuse dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Cette couche apparaît que dans certains endroits.
- Quatrième niveau : C'est le deuxième niveau sableux du Mio-Pliocène. On ne peut le distinguer que lorsqu'il repose sur le niveau 3 ; d'ailleurs les niveaux 2 et 4 sont confondus. Il est très épais dans la zone des chotts, le sommet du niveau 4 affleurant sur de grandes surfaces; le niveau 4 est souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne).

2-3-2-8 Quaternaire :

À la base du quaternaire, il existe un niveau argilo-gréseux qui se présente comme une croûte ancienne. Ce niveau met en charge les aquifères du Mio-Pliocène à Ouargla. Le niveau le plus superficiel est constitué de sable éolien parfois gypseux et des produits de remaniement des terrains Mio-Pliocène. Les nappes phréatiques sont généralement contenues dans ce dernier niveau. Les sondages superficiels (profondeur moins de 30 m) effectués dans différentes localités de la cuvette, ont permis de rencontrer les ensembles suivants:

- Sur le plateau, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Mio-Pliocène. C'est le sol le plus pauvre en gypse de la région; jusqu'à 8 m de profondeur il ne présente aucun niveau d'encroûtement; entre 25 et 75 cm de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers.

- Sur les chotts et les terrains intermédiaires, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux

et de sebkhas associés à une végétation gypso halophiles. De 15 à 20 cm d'épaisseur on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur. En dessous un tuf présente un teneur de gypse décroissante

- Les Sebkhas sont caractérisées par une salure extrêmement élevée, ces croûtes salines reposent sur des matériaux limono-sableux.
- Les dunes sont de sable éolien d'origine gréseux provenant de Hamada Mio-Pliocène. Il existe dans les talwegs, sur les bordures des Sebkhas, et sur les versants rocheux.

D'après la carte géologique réalisée par G. Busson, le relief d'Ouargla est constitué de roche sédimentaires et alluvions et colluvions dérivées de ces roches:

- Marne jaunâtres, plus ou moins gréseuses, salées ou gypseuses;
- Calcaires ocre, gréseux ou marneux;
- Argiles sableuses rouges à ocres salées et gypseuses;
- Grés, sables et conglomérats;
- Calcaires lacustres;
- Sables récents du quaternaire.

I.3-Conclusion:

Les données de forages et les coupes géologiques qui ont été établi, nous ont permis de décrire les formations litho-stratigraphiques qui caractérisent la région de Ouargla, il s'agit des formations du:

- Secondaire, avec les formations allant de l'Aptien jusqu'au Sénonien;
- Tertiaire, allant de l'Eocène inférieur jusqu'au Mio-Pliocène. Avec le Sénonien carbonaté, elles constituent les formations du Complexe Terminal;
- Et enfin du Quaternaire qui est constitué de matériaux détritiques et de sables éoliens.

II.1-Introduction

Le climat de la région d'Ouargla est un climat désertique particulièrement contrasté malgré la latitude relativement septentrionale. L'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air. [04]

Ces paramètres hydro climatiques ont une grande importance pour toute étude hydrogéologique car ils ont une influence sur le comportement hydraulique et surtout le bilan hydrique des aquifères.

Les séries des données, qui sont à la base de la détermination de différents paramètres climatiques, ont été enregistrées à la station pluviométrique d'Ouargla.

II.2- contexte climatique

II.1-1 : Pluviométrie

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 32,29 mm, janvier est le mois le plus

Pluvieux (7 mm) et juillet le plus sec (0,1mm en moyenne). Le tableau 01 donne les précipitations moyennes annuelles sur la période (1990-2011).

Tableau II-01 :Précipitations moyenne mensuelle 1/10mm, période (1990-20011)

Mois	Sept	Octo	Nove	Déc	Jenf	Féfri	Mars	Avril	Mai	Juin	juill	Aout
Moye	39.14	59.00	56.38	37.05	70.05	11.81	55.95	12.86	30.10	4.57	1.71	8.90

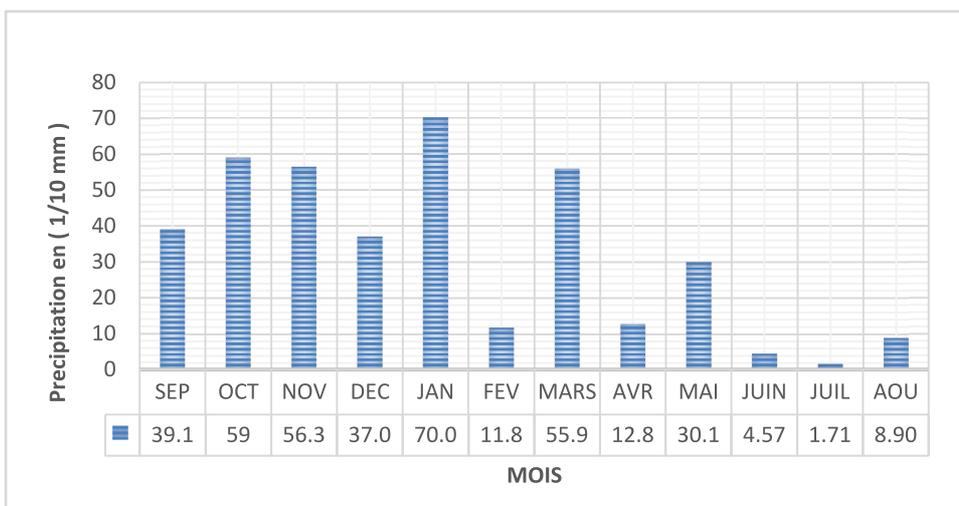


Fig. II-1: Répartition annuelle des pluies à Ouargla sur la période 1990-2011(ONM) [14]

II.1-2 : Températures

Les températures à Ouargla sont caractéristiques du climat saharien avec des valeurs très élevées en été. Où la moyennes annuelles sont de l'ordre de 24,12 °C et la moyenne mensuelle du mois le plus chaud (juillet) dépasse 30°Cet celle du mois le plus froid (janvier) est de 12,33°C.

Tableau II-02 :Température moyenne mensuelle (°c) 1/10, période (1990-2011)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juill	Aou
Moye	343	251	164	128	123	148	181	236	280	326	357	352

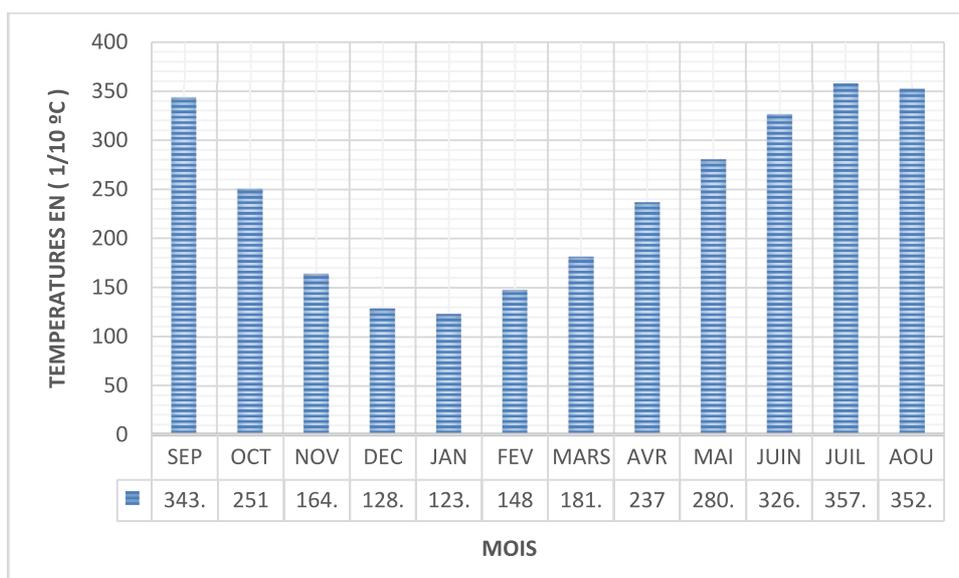


Fig. II-2 : Température moyenne mensuelle à Ouargla(Période 1990 – 2011) (ONM)

II.1-3 : L’humidité relative

Tableau II-03 : Humidité moyenne mensuelle (%) (1990-2011)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
Moye	49.14	54.31	55.64	59.00	59.88	54.02	48.95	47.62	43.31	38.48	31.71	37.90

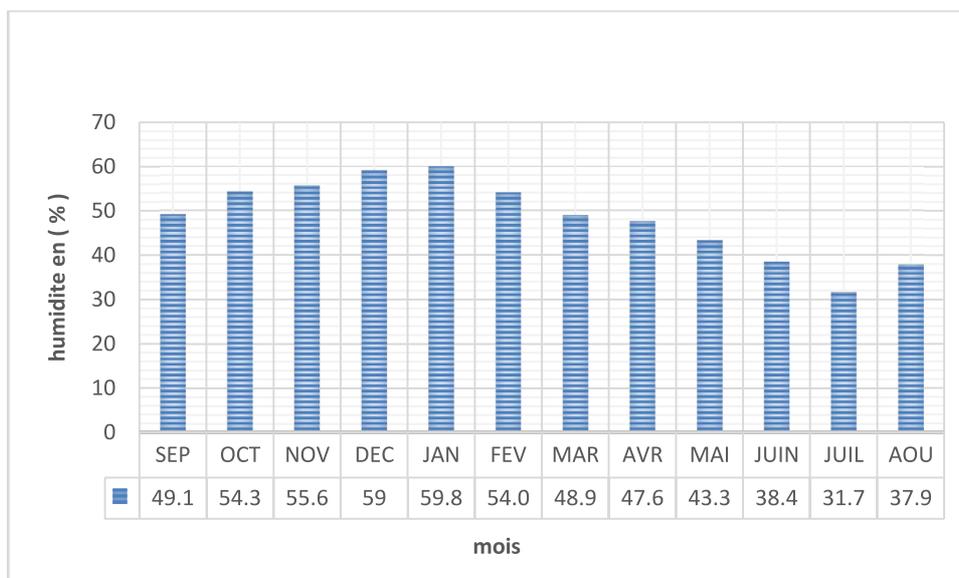


Fig. II-4 : Humidité moyenne en (%) (1990-2011)

L’humidité moyenne annuelle est de (48,33 %). On remarque que le taux maximal d’humidité est celui enregistré en mois de Janvier et Décembre (59 %). Une valeur minimale est enregistrée au mois de Juillet (31,71%).

II.1-4 : La vitesse du vent

Le vent est un phénomène continu au désert où il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense grâce aux particules sableuses qu’il transporte, et participe à la formation de dunes. Des vitesses de vent atteignent parfois 100 Km/h, l’air reste obscurci des journées par le vent de sable et les particules minérales peuvent être soulevées jusqu’à 1500 mètres de haut.

Indépendamment de l’action mécanique que le vent exerce sur les végétaux dont il déchire les parties aérienne, il agit surtout en accentuant l’évaporation.

Tableau II-04 : La vitesse du vent en (m/s) de la période (1990-2011)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
Moye	19.38	15.90	13.86	14.00	14.48	16.38	16.52	20.90	20.05	16.90	18.10	16.71

Dans la région d’Ouargla les vents soufflent du Nord-est et Sud. Les vents les plus fréquents en hiver sont les vents d’Ouest tandis qu’au Printemps les vents du Nord-est et Sud-ouest.

D’après les données de l’O.N.M (2011), pour la période (1990-2011), les vitesses de vent assez importantes sur toute la période estivale (Avril) avec un maximum entre le mois d’Avril et Mai.

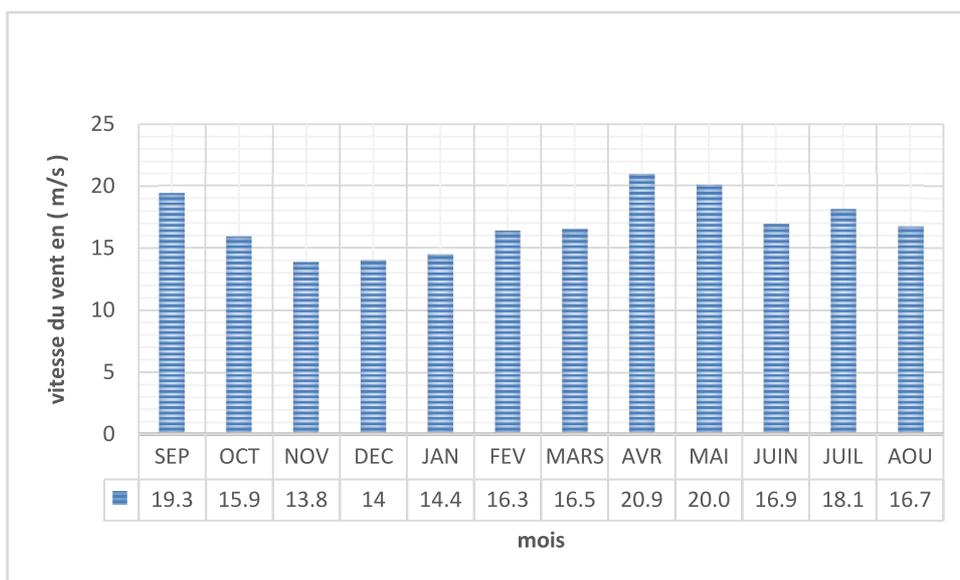


Fig. II-4 : La vitesse du vent en (m/s) à Ouargla (1990-2011)

II.1-5 : Durée d’insolation

La vallée d’Ouargla reçoit une quantité de lumière solaire très forte, le maximum est atteint au mois de Juillet avec une durée moyenne de 189.78heures, et le minimum est enregistré au mois de Décembre avec une durée moyenne de 116.00heures. [04]

Tableau II-05 : Durée moyenne mensuelle d’insolation en heures, de la période (1990-2011),

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
Moye	154	149	126	116	140	139	138	161	167	164	189	188

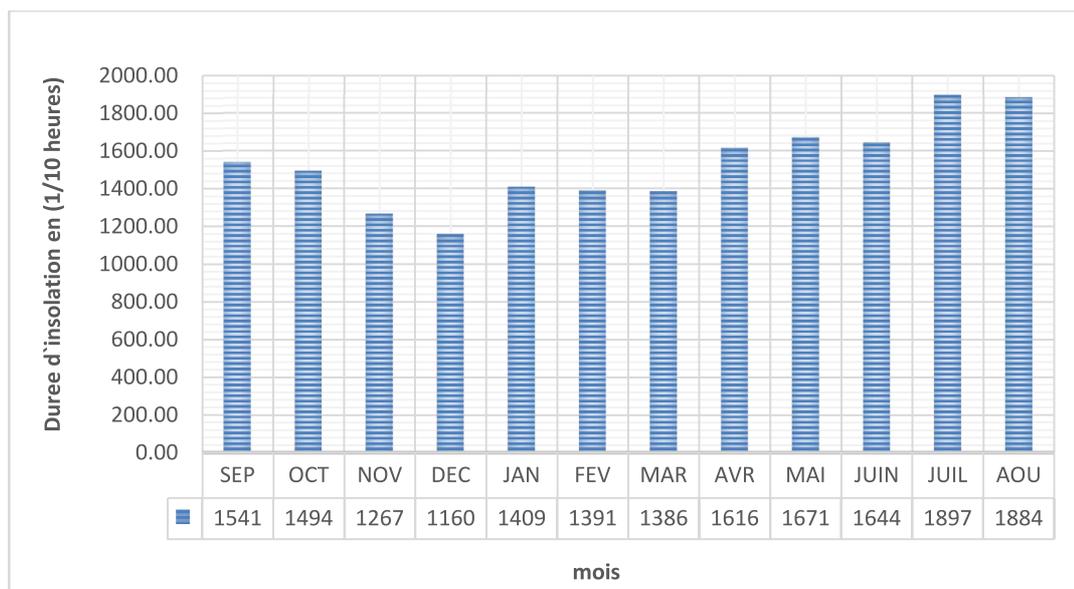


Fig. II-5 : Durée moyenne mensuelle d’insolation en heures. Station d’Ouargla (1990-2011)

II.1-6 : L’évaporation

Pour l’évaporation, la quantité d’eau qui repart dans l’atmosphère dépend uniquement des paramètres physiques tels que la température de l’air, de l’eau, de la vitesse du vent, du degré hygrométrique, de l’ensoleillement, etc.

Tableau II-06 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) Période (1990-2011)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
Moye	2801	1960	1102	889	866	1209	1742	2468	3002	3674	4176	3967

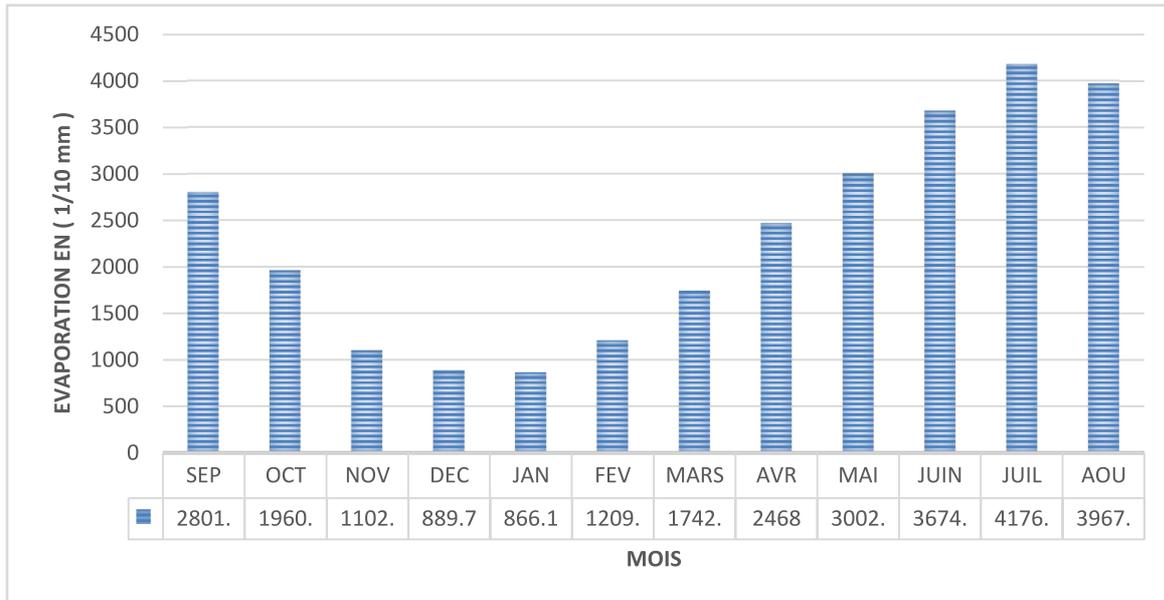


Fig. II-6 : Evaporation moyenne mensuelle en (mm) Station d’Ouargla (1990-2011) (ONM)

L'évaporation est très élevée, elle est en moyenne de 417.70 mm au mois de Juillet et de 86.61 mm au mois de Janvier, soit 278.61mm moyenne annuelle, elle est très variable suivant les années, les mois et aussi les semaines.

II.1-7 : Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN

Selon la définition de Gausсен, une période sèche est une période pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égales au double de la température du même mois.

Ce diagramme montre que pour un climat saharien (tableau.07), il n'y a pas de période humide, et que toute l'année est déficitaire.

➤ **Indice d'Aridité de DEMARTONNE**

D'après DEMARTONNE l'indice de l'aridité est exprimé comme suit :

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

Avec :

P : les précipitations moyennes annuelles.

T : la température moyenne annuelle.

Pour les valeurs de I comprises entre 0 et 5 se trouve le milieu est considéré comme Hyper-arid

$$I = \frac{3.22}{24.12 + 10} = 0.09$$

Tableau II-07 - 1 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE

Valeur de l'indice	Type de climat
0 < I < 5	Hyper-aride
5 < I < 10	Aride
10 < I < 20	Semi-aride
20 < I < 30	Semi-humide
30 < I < 55	Humide

Tableau II-07 - 2 : Indice d'Aridité de DEMARTONE.(ONM, Ouargla 1990-2011)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
P mm	3.91	5.90	5.64	3.70	7.00	1.18	5.60	1.29	3.01	0.46	0.17	0.89
T C°	34.35	25.10	16.45	12.89	12.33	14.80	18.16	23.70	28.05	32.65	35.76	35.24
I = P/T+10	0.09	0.17	0.21	0.16	0.31	0.05	0.20	0.04	0.08	0.01	0.00	0.02

II.3- Calcul du bilan hydro-climatique

Le calcul de ce bilan hydrique repose sur la détermination de la quantité d'eau rentrant dans le processus d'évapotranspiration et par conséquent, la détermination de la quantité d'eau retournant au sous-sol. Pour cet effet et corrélativement avec la situation observée aujourd'hui, surtout au niveau de la palmeraie et de la zone bâtie, nous pouvons suggérer la méthode de THORNTHWAITE qui semble la plus proche de la réalité.

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum. Au seuil, les pluies n'assurent pas le stockage permanent de l'eau dans la réserve d'eau facilement utilisable (RFU), ce qui produit un besoin des sols agricoles à l'irrigation par les eaux des nappes profondes, pour

Cela ; nous introduisons dans le calcul de ce bilan la notion apport qui constitue la somme des précipitations et des apports souterrains.

Le principe de calcul est le suivant

- Si pour un mois Apport > ETP on pose que l'ETP = ETR la quantité d'eau qui reste (Apport- ETR) va alimenter la réserve utile (RU) jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous forme du ruissellement (qui est nul dans notre cas).
- Si Apport < ETP, la valeur de ETR = Apport + Ru, jusqu'à égalisation avec ETP.
- Si la Ru est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$ ce dernier paramètre représente alors les besoin des plantes en eau d'irrigation.
- Le même calcul pour la RFU dans le cas minimum.[04]

Tableau II-08 : ETP moyenne mensuelle et annuelle calculées par la formule de THORNTHWAITE a la station d'Ouargla (1990-2011)

	Tp	IT	CL	ETP'C	Pr	BH	CH	VR	RU	ETR	Def	Exc
S	34.4	18.5	1.03	196.3	3.91	-192.4	-1.0	0.0	0.0	3.9	192.4	0.0
O	25.1	11.5	0.97	79.7	5.9	-73.8	-0.9	0.0	0.0	5.9	73.8	0.0
N	16.5	6.1	0.86	22.8	5.63	-17.1	-0.8	0.0	0.0	5.6	17.1	0.0
D	12.9	4.2	0.81	11.1	3.7	-7.4	-0.7	0.0	0.0	3.7	7.4	0.0
J	11.8	3.7	0.87	9.5	7	-2.5	-0.3	0.0	0.0	7.0	2.5	0.0
F	14.8	5.2	0.85	16.9	1.18	-15.8	-0.9	0.0	0.0	1.2	15.8	0.0
M	18.2	7.0	1.03	35.5	5.59	-29.9	-0.8	0.0	0.0	5.6	29.9	0.0
A	23.7	10.5	1.10	77.5	1.28	-76.2	-1.0	0.0	0.0	1.3	76.2	0.0
M	28.1	13.6	1.21	134.0	3	-131.0	-1.0	0.0	0.0	3.0	131.0	0.0
J	32.7	17.1	1.22	203.0	0.45	-202.5	-1.0	0.0	0.0	0.5	202.5	0.0
J	35.8	19.7	1.24	263.3	0.17	-263.1	-1.0	0.0	0.0	0.2	263.1	0.0
A	35.2	19.2	1.16	236.8	0.89	-235.9	-1.0	0.0	0.0	0.9	235.9	0.0
Annuelle	24.1	136.4		1286.5	3.225	-1247.8				38.7	1247.8	0.0

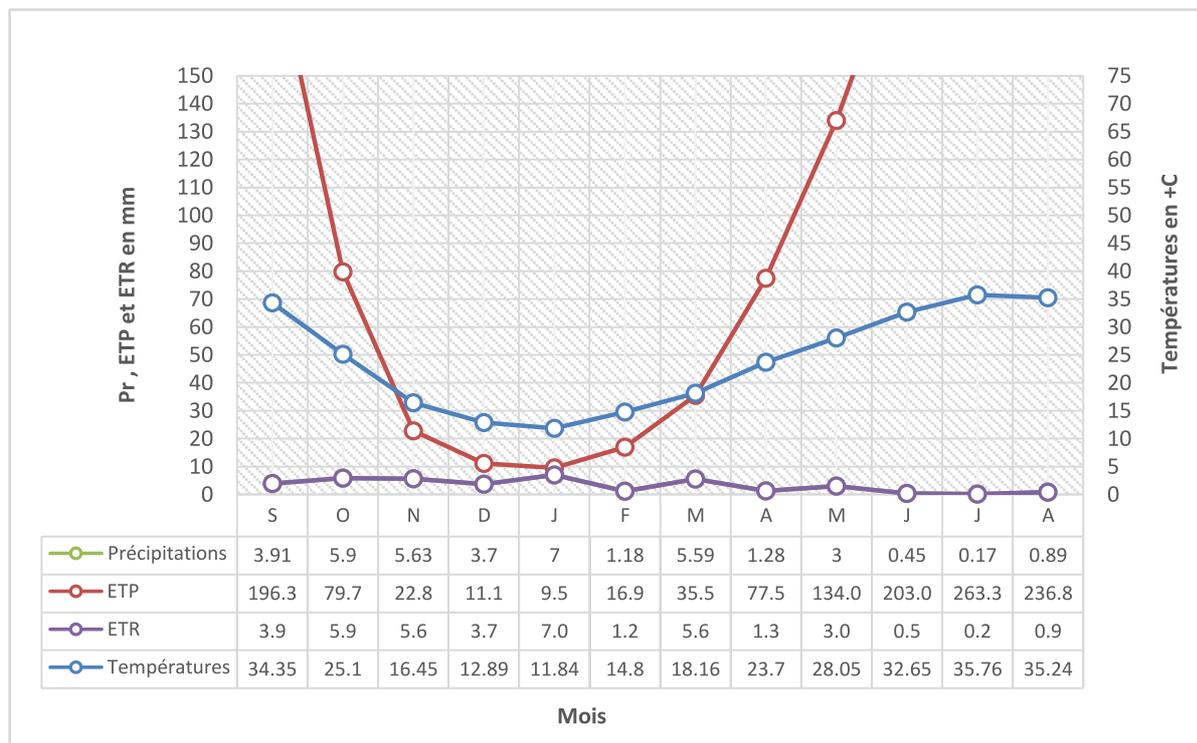


Fig. II-8-1 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques

Pour le période (1990-2011) à la station de ONM de Ouargla et d`après le graphe des moyennes pluriannuelles des éléments climatiques (Fig. II-8-1), l`évapotranspirationpotentielle (ETP) est proportionnel à la température où elle atteint le maximum au mois de Juillet et le minimum est enregistré au mois de Janvier. Donc on remarque que le bilan hydrique de la zone étudié marque toujours un déficit ce qui caractérise les zone hyperaride.

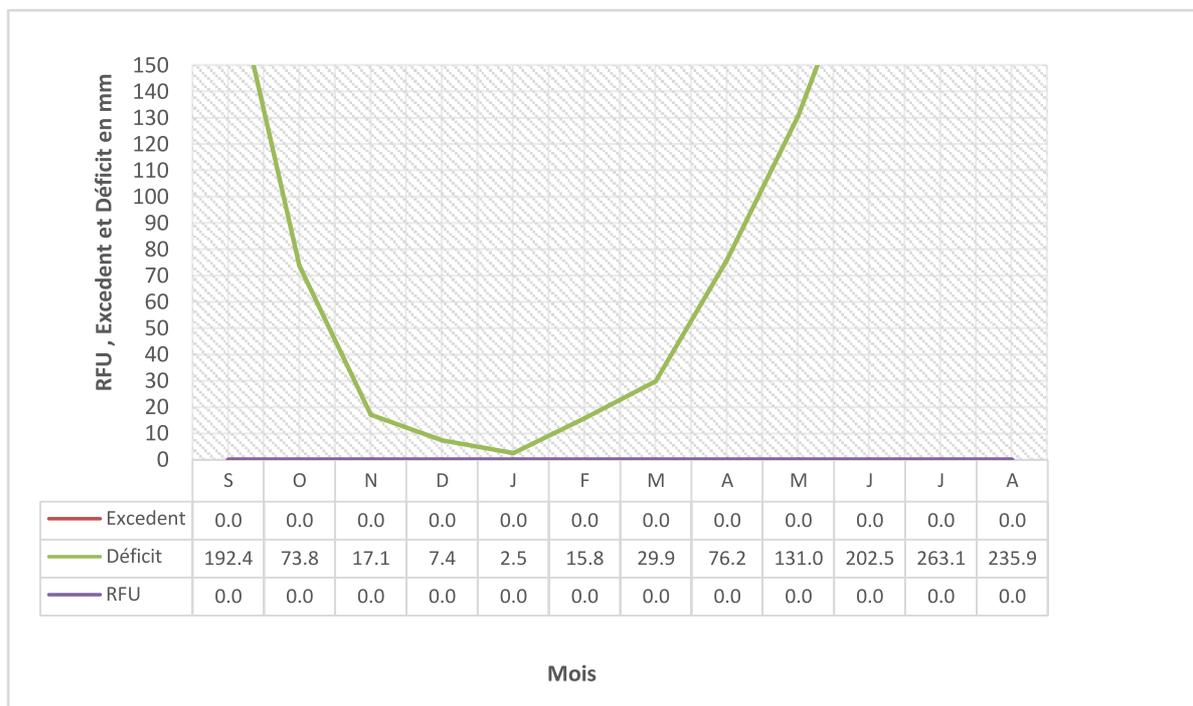


Fig. II-8-2 : RFU, Excédent et Déficit en mm

Pour la période (1990-2011) à la station de ONM de Ouargla et d'après l'histogramme(Fig. II-8-2) on remarque l'absence de stockage de volume d'eau dans les réserves d'eau facilement utilisable (RFU) car elles sont nulles sur tous les mois. Par conséquent le déficit marque le bilan hydrique et atteint son maximum au mois de Juillet avec une valeur moyenne de 202 mm, et le minimum est enregistré au mois de Janvier avec une moyenne de 2.5 mm

II.4 Hydrologie

II.4-1 Chotts et Sebkhass :

Ils sont sur le niveau le plus bas de la cuvette de Ouargla, jouent le rôle de dépression et de décantation. Le chott est constitué de sable siliceux et/ou gypseux et de sols gypseux de surface et subsurface, tandis que la présence d'une nappe phréatique permanente.

II.4-2 Réseau hydrographique :

Les grandes réseaux hydrographiques de la région d'étude sont oued M'Zab et oued N'sa qui draine leurs eaux vers la cuvette de Ouargla et par conséquent pose des problèmes de la remonté des eaux superficielles.

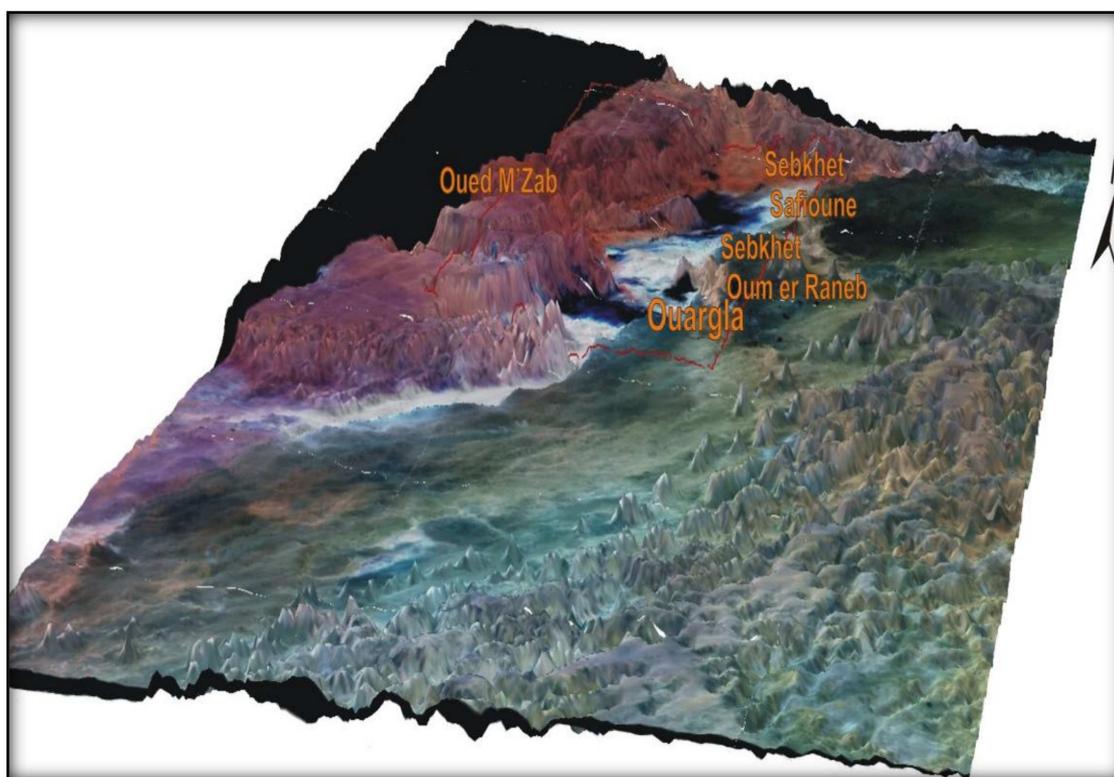


Fig. I-9 : Reliefs et hydrographie de la région d'Ouargla

(Modèle numérique de terrain – MNT – obtenu par imagerie d'interférométrie radar satellitaire)

Oued N'Sa: Il prend naissance à la région de Tilrempt (Hassi R'mel) vers 750m d'altitude et coule sur environ 240 km en direction ouest et puis sud-est pour aboutir à la Sebkhet Safioune à la côte 110m au nord de Ouargla.

Oued M'Zab: l'oued M'Zab passe par la ville de Ghardaïa, est ainsi constitué par la confluence de trois importants oueds, à savoir : El-Abiod et Ladira, et Aregudane à quelques centaines de mètres de ceux-ci et ce, à l'amont, et Noumérat à une dizaine de km en aval de Ghardaia. Il prend naissance à la région de Botma Touila (côte 750m), il coule sensiblement, d'Ouest en Est sur 225 km environ et il se termine à la Sebket Safioune (côte 110 m). [01]

Ces deux oueds se caractérisent par des crues soudaines et dévastatrices.

Oued M'ya : Les travaux des archéologues confirment que la dépression de l'oued M'ya n'a été drainée par des cours d'eau qu'à une période très ancienne du Quaternaire et que les sebkhas n'étaient pas fonctionnelles à l'époque néolithique car certains gisements reposent sur elles. Les sebkhas sont apparues au cours d'une période humide antérieure, vraisemblablement le dernier grand pluvial contemporain de la glaciation de Würm.

II.5- Conclusion

Donc on peut dire que les précipitations de la région d'Ouargla sont très faibles de l'ordre de 32.29 mm/an et le régime climatique de type Hyper-aride. La température moyenne annuelle est de 24.12°C. La distribution mensuelle des précipitations au cours des 21 ans (1990-2011), montre que la période pluvieuse correspond aux mois allant Septembre à Janvier ; et la saison sèche du mois de Février à Aout.

Le climat de la région de Ouargla est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes et les températures très élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région. Valeurs moyenne de l'évapotranspiration est 107.2 mm et l'évaporation 278.6mm

Ce climat est de type méditerranéen aride, malgré l'effet de la continentalité, il est caractérisé par un Hiver doux et une période de sécheresse prolongée dominée par des vents de direction SW-N.

Montre de grande déficit au bilan hydrique de la région de Ouargla à cause de réserve d'eau facilement utilisable (RFU) est nulle.

III.1- Introduction

Notre région d'étude fait partie du Bas Sahara qui renferme deux grands ensembles aquifères :

- les formations sablo-gréseuses du continental intercalaire.
- les accumulations sableuses fluvio-lacustres du Tertiaire continental

Dans les régions où affleure la formation, des eaux circulent dans les calcaires, en direction des parties basses de la cuvette, sous le toit imperméable des argiles du Sénonien inférieur qui peut atteindre une épaisseur de 300 mètres.

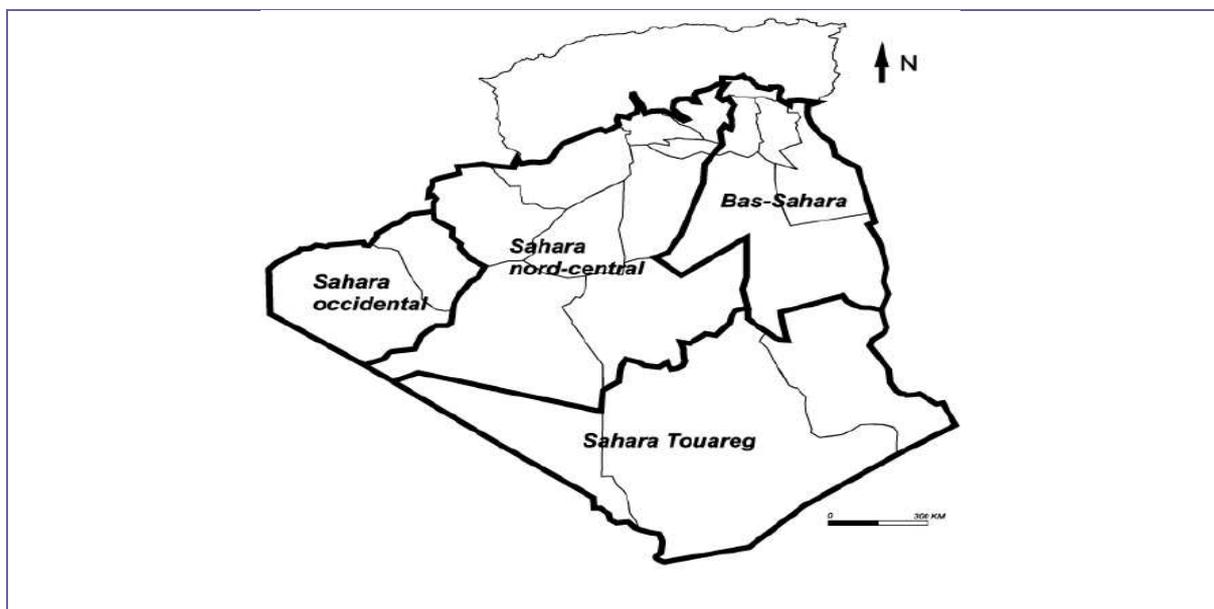


Fig. III-1: Le découpage de l'espace saharien (Brule et al, 2003).

Dans les oasis d'Ouargla, il y a des nappes souterraines captives et phréatiques. Donc on peut dire que le grand bassin sédimentaire du Sahara septentrional contient trois principaux aquifères :

- A la base, se situe la nappe du continental intercalaire qui est classée comme l'un des plus grands réservoirs captifs du monde (CI).
- Au milieu, se localise la nappe du complexe terminal (CT).
- Au sommet, s'installent les nappes phréatiques (non exploitées).

Les deux nappes, CI et CT, sont actuellement les deux principales ressources hydriques disponibles dans la région d'Ouargla, mais la nappe phréatique (nappe superficielle) peut être considérée actuellement comme ressource hydrique à forte salinité non exploitable

III.2- Cadre Hydrogéologique Régional

Le bassin du Sahara septentrional, est bien doté en formations aquifères favorables à la circulation souterraine des eaux. Il comprend le fameux système aquifère du Sahara septentrional (SASS), à savoir, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal. Il plonge sur une surface d'environ 1.000.000 Km² partagée entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, ayant de réserves estimées à 31.000×10⁹ m³, dont l'accumulation ne peut être expliquée par le climat actuel ; la recharge actuelle n'étant que de 1×10⁹ m³/an, dont, la nappe du Continental Intercalaire possède la durée de renouvellement la plus longue(Ould Baba Sy, 2005). Ils proviendraient d'un pluvial datant du Pléistocène inférieur et de l'Holocène.

En Algérie, ce système aquifère couvre une surface de 700 000 Km², et est d'une épaisseur de 4000 à 5000 mètres environ (Cornet, 1964). L'anticlinal du M'Zab, véritable passerelle structurale entre l'Atlas saharien et le plateau de Tademaït,divise ce réservoir «multicouche» en deux (02) sous bassins hydrogéologiques, l'un occidental de 280 000 Km², recouvert partiellement par le Grand Erg Occidental, et l'un oriental, le plus étendu avec 500 000 Km², occupé en grande partie par le Grand Erg Oriental.

III.2-1- Nappe du Continental Intercalaire (C.I)

La nappe est de nature gréseuse, sables et argile. C'est le plus grand réservoir dans tout le Sahara. D'âge Crétacé inférieur (Barrémien et albien), le réservoir s'étend sur une superficie environ 600 000km². Il s'étend sur tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional, de la vallée de l'Oued Saoura à l'Ouest, jusqu'au territoire tunisien et libyen à l'Est. Au Nord-est de la dorsal du M'Zab, le toit de l'aquifère est constitué d'argiles et d'évaporites du Cénomanién, et a une continuité sur tout le bassin de Ouargla. Il est d'une épaisseur de 600m environ, et d'une profondeur allant de 1200 à 1500m.

Généralement, les eaux de l'Albien sont caractérisées par une faible teneur en sel (1,7 à 2g/l au maximum), de fortes températures (de l'ordre de 55°C) et de fortes pressions.

La profondeur augmente du Sud au Nord, de 100 m au bas Sahara, à 2000 m sous les chotts, provoquant ainsi une forte charge de la nappe sur tout le bassin oriental. Le substratum est constitué de formation argilo-sableuse et argileuse ou carbonatées d'âge de plus en plus récent du Sud vers le Nord. [06]

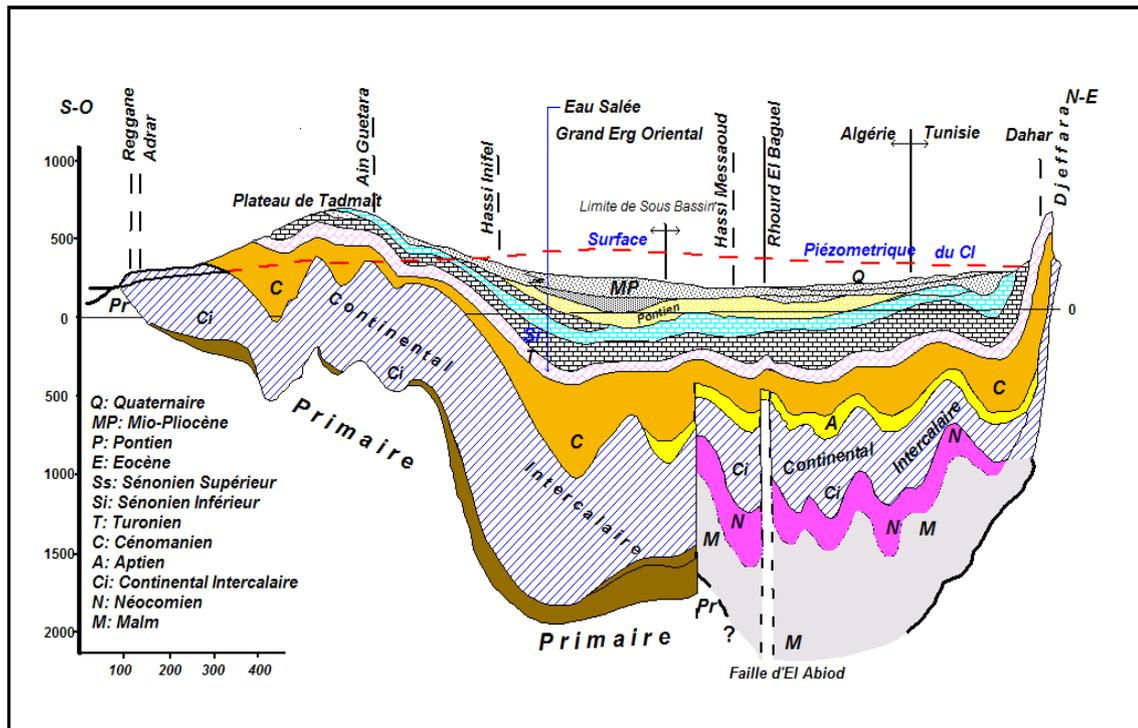


Fig. III-2 : Coupe hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)

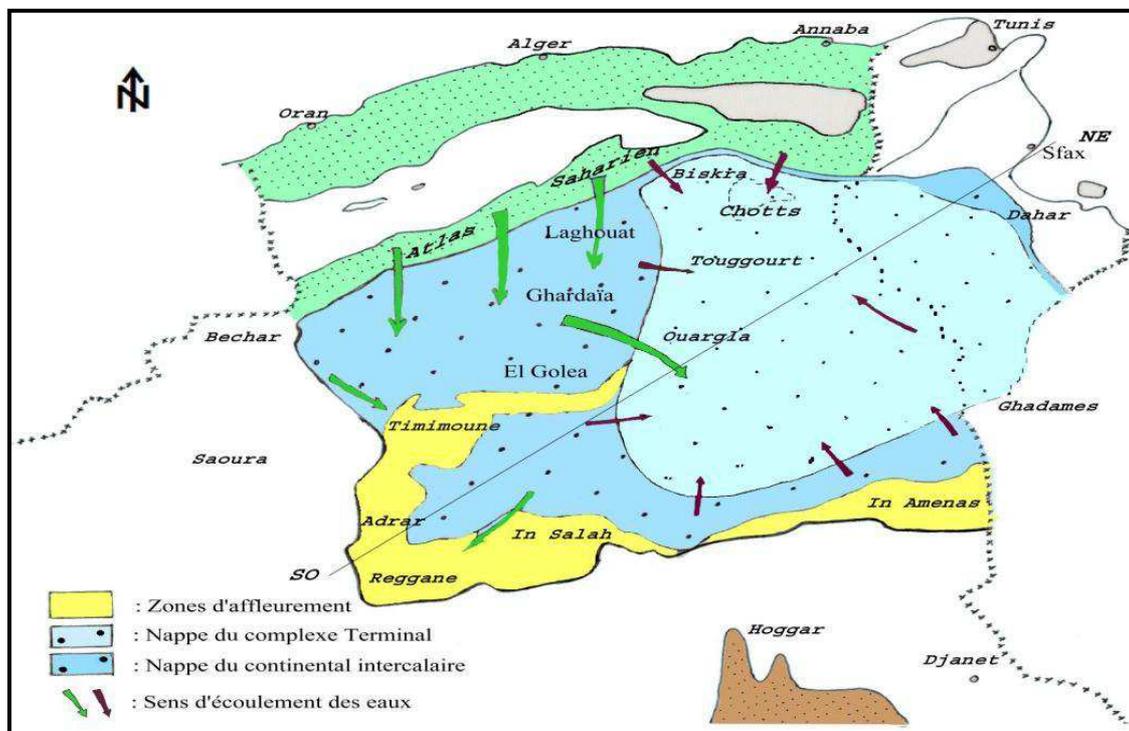


Fig. III-3: Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)

A-Alimentations (Fig. III-4)

La carte piézométrique établie lors de l'étude « ERESS » en 1972, montre que cette partie orientale de l'aquifère est alimentée par :

- Le piedmont Sud atlasique (au Nord-Ouest de Laghouat) ;
- Le plateau du Tinrhert, au Sud ;
- Le plateau du Dahar (Tunisie).

Les apports d'eau au système s'effectuent ;

-Par infiltration des eaux de ruissellement des reliefs à la périphérie du domaine et de précipitations sur les affleurements ;

-Aux piémonts de l'Atlas Saharien et du Tinrhert.

-Par transfert de l'aquifère à nappe libre du grand Erg Oriental.

B- Exutoires (Fig. III-4)

- L'exutoire principal du système est au Nord-Est et l'écoulement souterrain vers le Golf de Gabès par les foggaras. S'y ajoutent les débits des fuites à travers le toit de l'aquifère ;

La faille de la dorsale d'Amguid- El Biod (0.6 m3/s)

Les prélèvements par forage. [11]

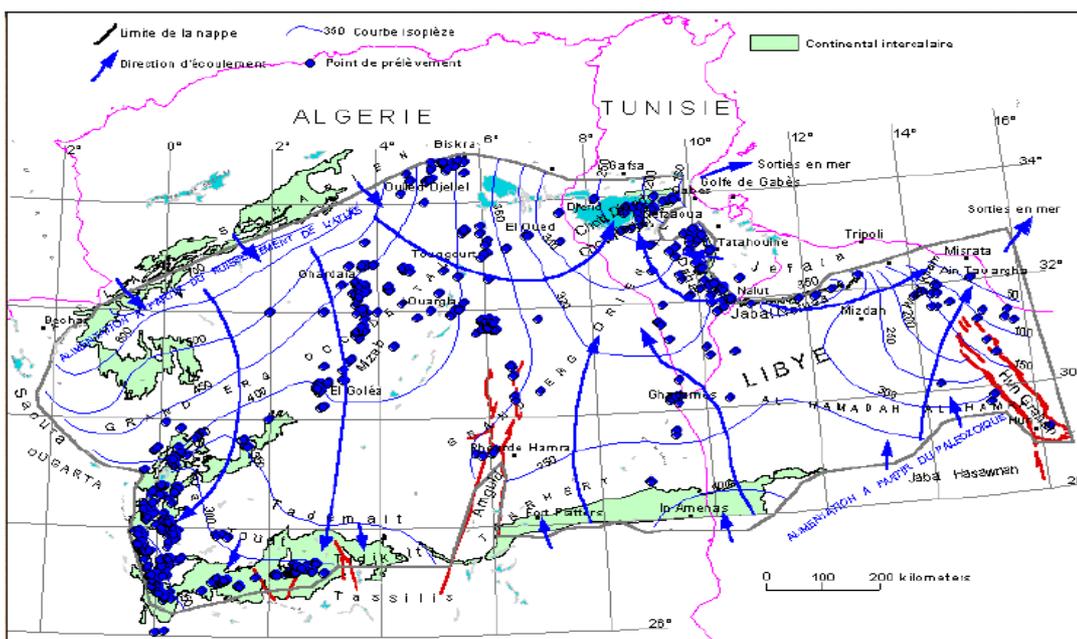


Fig. III-4 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003)

III.2-2 Nappe du Complexe Terminal (C.T)

Le système aquifère du C.T. couvre la majeure partie du bassin du Sahara septentrional sur environ 350 000 Km. Sa profondeur varie entre 100 à 400 m.

Cette nappe du C.T. est composée de trois nappes aquifères. De bas en haut, nous avons le nappe du Turonien, le nappe du Sénonien et la nappe du Mio-Pliocène. [06]

Nappe du Turonien

Elle est formée de calcaires fissurés, et constitue lui aussi un aquifère captif, reconnu, sur une épaisseur de 60 m, reposant sur un substratum imperméable du Cénomanién anhydritique et argileux.

Nappe du Sénono-Eocène

Cette nappe est séparée de la nappe Mio-Pliocène par une couche semi-perméable gypseuse-argileuse. C'est la seconde nappe artésienne du sous-sol. Elle se situe à une profondeur comprise entre 450 à 500 m en moyenne et elle est d'une épaisseur qui varie entre 120 et 280 m. Elle est formée de calcaire poreux et de silex très coquilliers, gris jaunâtre à intercalations de marnes blanches et dolomitiques. La température de ses eaux est de 30°C à la surface. Elle est peu exploitée vu son faible débit.

Nappe du Mio-Pliocène

L'exploitation de la nappe du Mio-Pliocène est extrêmement ancienne. D'une profondeur allant de 70 à 140m, constituée de sables fins à grossiers à graveleux, avec des intercalations de calcaires blancs, tendres et marnes sableuses d'argiles sableuses rosées et passées de grés et de gypse. La température de ses eaux est de l'ordre 23 à 25°C.

Elle s'écoule du Sud-Ouest vers le Nord-est en direction de chott Melghir. La salinité de cette dernière varie de 1,8 à 4,6g/l.[04]

A-Alimentations (Fig. III-5)

Les apports d'eau s'effectuent essentiellement par infiltration des eaux de ruissellement à la périphérie du bassin hydrogéologique, sur les parcours des oueds qui descendent des reliefs, pour s'écouler sur les formations perméables des affleurements. Un apport faible mais non négligeable qui provient de l'infiltration de Complexe Terminal.

B-Exutoires (Fig. III-5)

Les exutoires sont constitués principalement par les grandes cuvettes d'évaporation drainantes et ascendantes, par les sources qui y émergent et par les prélèvements par pompage à partir de forages.

[11]

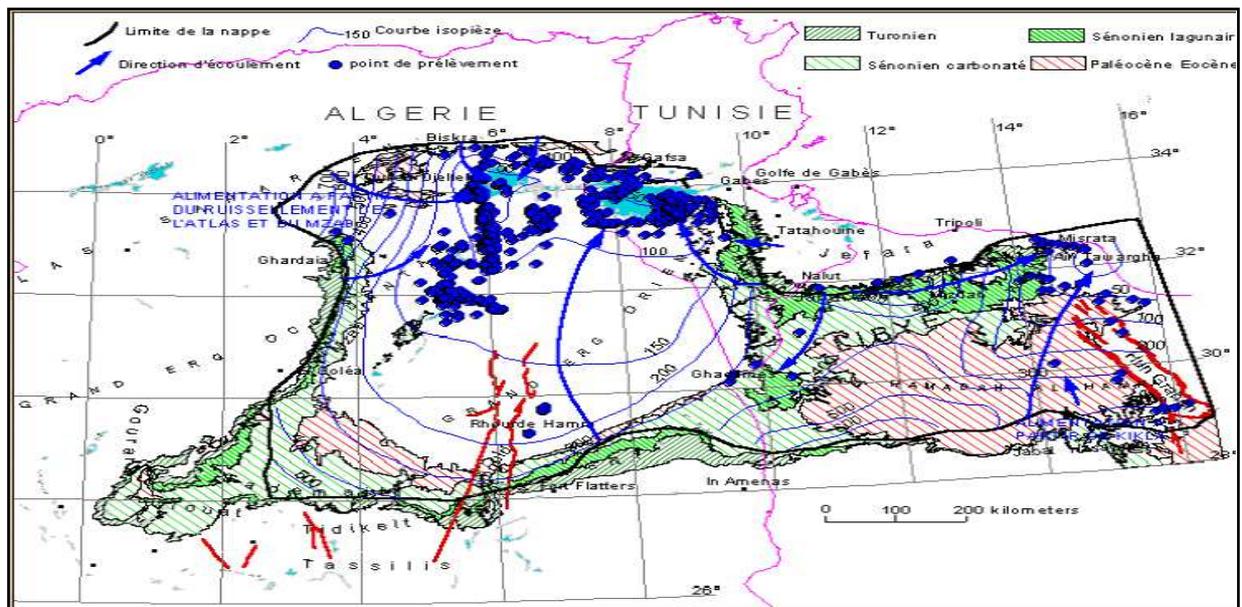


Fig. III-5 : Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003)

III.3- Contexte Hydrogéologique Local

A l'échelle de la zone d'étude, nous distinguons trois aquifères (Cornet, 1964. ANRH, 2004) utilisables à des fins urbaines et agricoles. De bas en haut nous avons :

- ❖ Les grès et argiles sableuses du CI avec la nappe dite de l'Albien ;
- ❖ Les calcaires avec la nappe du Sénon-Eocène carbonaté;
- ❖ L'ensemble détritique (sables, argiles et évaporites) des formations continentales avec la nappe du Mio-Piocène ;
- ❖ Une nappe phréatique libre(superficielle), contenue dans les sables fins argileux et gypseux du Quaternaire.

Chronostratigraphie	Unités hydrogéologiques		Prof	Lithostratigraphie	Lithologie
Quaternaire	Nappe phréatique		20m	Mio-Pliocène	
Tertiaire	Nappe du Complexe Terminal	Nappe des sables	120m	Eocène évaporitique	
		Impermeable		Eocène carbonaté	
		Nappe des calcaires (Sénono-Eocène)	520m	Sénonien carbonaté	
Secondaire	Crétacé	Impermeable	700m	Sénonien lagunaire	
		Nappe du turonien		Turonien	
		Impermeable	1100m	Cénomaniens	
		Nappe du Continental Intercalaire		Vraconien	
		Nappe de l'Albien		Albien	
		2000m	Aptien		
			Barrémien		

Fig. III-6 : Schéma de la Chronolithostratigraphie de la zone de Ouargla (ANRH, 2004)

III.3-1-Hydrogéologie de la nappe phréatique

III.3-1-1Généralités sur la Nappe phréatique de la région d’Ouargla

Au niveau de la cuvette d’Ouargla, la nappe superficielle n’est pas exploitée à cause du taux de sel que contiennent ses eaux. Elle est épaisse de 1 à 8m et repose sur un niveau imperméable étanche, qui occupe tout le fond de la vallée d’Ouargla et l’isole des nappes artésiennes sous-jacentes.

Les zones dans lesquelles la nappe phréatique est la plus profonde sont situées à des points hauts de la topographie (Sud-ouest d’Ouargla, Sud de Oum Raneb et versant Nord-est de N’Goussa). La nappe est moins profonde dans les zones à proximité des palmeraies irriguées (Ouargla, N’Goussa). Le point où la nappe se trouve le plus près du sol est au Sud de la Sebkhia Safioune à 45 km, au Nord de la ville d’Ouargla.

Cette nappe a connu une remontée du niveau d’eau ayant provoqué de graves problèmes d’ordre écologique dans les zones urbaines et agricoles. Ce phénomène a engendré des affaissements de terrain et la création d’un milieu anaérobie néfaste pour les cultures et les palmiers.

La salinité des eaux varie d’une zone à l’autre. Elle est de moins 50g/l dans la ville d’Ouargla et ses environs. La concentration en sel augmente dans le sens des écoulements des eaux ou elle peut atteindre plus de 190g/l dans les zones proches des chotts.

III.3-1-2 caractéristiques de la nappe phréatique

C'est un horizon aquifère présent au Sahara et se situe dans les formations alluvionnaires récentes des zones de dépression ou les vallées, avec un sens d'écoulement principalement du sud vers le nord, suivant la pente de la vallée, et un autre sens, moins important, d'Ouest à l'Est avec une profondeur qui varie de 1 à 8m en fonction du lieu et de la saison. Les eaux de cette nappe sont très salées ; elle n'est donc exploitable que dans quelques régions comme HassiBerahla, Bour El-Haïcha et Ain Moussa.

L'alimentation de la nappe est faite par les pluies, les crues, les eaux de drainage et aussi par les remontées naturelles (sources) en provenance des aquifères plus profondes.

Des études portant sur les comportements hydrogéologiques de cette nappe phréatique entamées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques, par la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya et l'entreprise Nationale de Géophysique ont permis de déterminer la qualité des eaux de cette nappe et leur limite de concentration ainsi que ses fluctuations saisonnières.

❖ Alimentations

La nappe est alimentée par :

- Les eaux d'irrigation et de distribution ;
- Les eaux en provenance des forages détériorés qui coulent dans la nature ;
- Les ruissellements et grandes arrivées d'eaux par la dorsale du M'Zab ;
- Les précipitations (les eaux de pluies).

❖ Pertes

Les pertes à partir de la nappe phréatique se font par :

- Evaporation des eaux de la nappe en question et par évapotranspiration dans les palmeraies (l'évaporation varie en fonction de la position de la nappe/sol) ;
- Pompage dans les chotts et rejets hors de la cuvette ;
- Perte en direction de l'aval selon l'axe général de l'Oued M'Ya.

III.3-1-3 Piézomètre

La morphologie de la surface piézométrique d'une nappe permet d'étudier les caractéristiques de l'écoulement des eaux souterraines. Ainsi, il permet de déterminer à l'échelle de la cuvette, les zones d'alimentations et de drainages, les fluctuations de la surface piézométrique dans le temps permettant aussi de déterminer la variation des réserves en eaux.

La nappe phréatique a été étudiée lors des quatre campagnes de mesures, en Octobre 2001, Avril 2002, Octobre 2002 et novembre 2003. Une équipe de topographes a nivelé 72 piézomètres opérationnels pour la campagne d'Avril 2002. Le niveau piézométrique est ainsi connu avec précision depuis le P 413 dans une plantation de Garet Krime, 8 Km au sud d'Ouargla, jusqu'à la Sebkheth Safioune, 40 Km au nord.

En octobre 2002, la surface libre de la nappe se situait à la côte 135.08 m au centre-ville d'Ouargla, dans l'enceinte du Centre Culturel et 134.65 m, tout au sud, pour les points les plus élevés. La côte était de 127.95 m entre Chott et la sebkheth d'Ouargla, 7 m plus basse que ces points. Les points les plus bas sont situés dans la Sebkheth Safioune, tout au nord, avec des côtes comprises entre 102.19 m et 102.95 m, inférieures de 32 m à celle des points les plus hauts et 25 m plus bas qu'à Chott. La nappe s'écoule librement des points hauts vers les points bas, perpendiculairement aux iso pièzes avec possibilité de remontée au niveau de la Sebkheth Safioune, Chott d'Ouargla et de la sebkheth d'Oum Raneb.

Les parties hautes de la nappe phréatique sont situées au sud et sous la ville de Ouargla. Les parties basses de la nappe phréatique sont situées au nord dans la Sebkheth Safioune.

Les côtes principales sont : 134 m au sud ; 135 m en ville de Ouargla ; 128 m à Chott et à la sebkheth ; 127 m à la sebkheth d'Oum Raneb ; 117 m à N'Goussa et 102 m à la Sebkheth Safioune. [06]

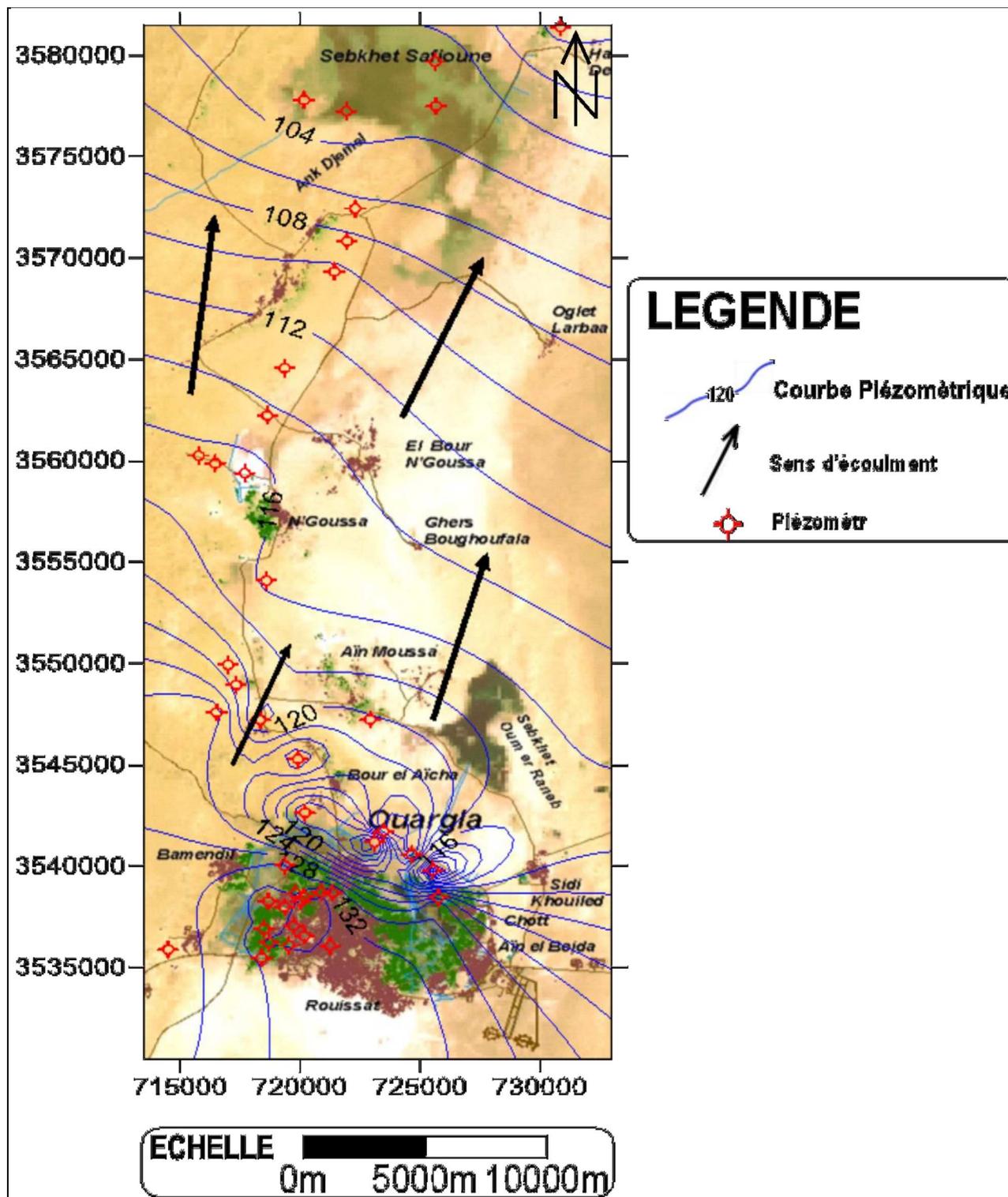
Le niveau de la nappe phréatique est réglé par un équilibre entre les entrées et les sorties. Les entrées sont principalement constituées par les eaux pour l'irrigation et l'AEP (provenant des nappes artésiennes profondes), des rares crues des oueds M'Zab et N'Sa et des arrivées d'eau provenant des flancs de la vallée. Les sorties sont essentiellement dues à l'évapotranspiration de la végétation, à l'évaporation des eaux de la nappe remontant par capillarité (lorsque la nappe phréatique est peu profonde) et par l'écoulement vers les points bas constitués par le chott et les sebkheths.

Lorsque les entrées sont supérieures aux sorties, la nappe monte et remplit dans un premier temps les pores des terrains sous-jacents (entre 10 et 40 % du volume). L'ascension capillaire est ainsi facilitée et l'évaporation augmente, ce qui tend à stabiliser son niveau.

Dans un deuxième temps, principalement lorsque l'évaporation est faible en hiver, la nappe peut affleurer dans les points bas et former des surfaces d'eau libre, dans les chotts et les sebkhas où elle s'accumule. Lorsque la température augmente, l'eau s'évapore, laissant des évaporites (gypse, sel, etc.) sur place.

La nappe phréatique est épaisse de 1 à 8 m. Elle repose sur un épais niveau imperméable, étanche, qui occupe tout le fond de la vallée de Ouargla et l'isole des nappes artésiennes

Sous-jacentes. [08], La carte piézométrique que nous avons établie montre un écoulement des eaux qui se fait du Sud vers le Nord.



III-7: Carte piézométrique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla (Novembre, 2012)

III.3-1-4 Paramètres Hydrodynamiques de la nappe

Aucune étude hydrodynamique n'a jamais été faite concernant la nappe phréatique, mise à part les essais géotechniques du laboratoire des travaux public de sud (LTPS) sur des localités dans la cuvette, ou bien les interprétations de données piézométrique effectuées par l'ANRH.

Granulométrie :

Le LTPS a effectué des analyses sur des échantillons représentatifs sur la cuvette (profondeur de 0 à 3m). L'examen des courbes granulométriques montre d'une manière générale qu'il s'agit des sables fins à moyens avec un pourcentage d'éléments argileux et limoneux qui varie de 7 à 12 %.

Porosité :

La porosité totale d'un échantillon est égale au rapport exprimé en pourcentage du volume de vides au volume total : $n = V_v/V_t$. Des mesures de la porosité ont été effectuées sur des échantillons prélevés sur des profils du sol représentatif de la cuvette [12]. Les valeurs de la porosité déterminées varient entre 10 et 30%.

Limites d'Atterberg :

Les essais de limites d'Atterberg ont été effectués sur des échantillons prélevés sur la deuxième couche (limon argileux ou argile limoneuse). Les essais révèlent des indices de plasticité (IP) varient entre 5.0 et 19% et des limites de liquidité (LL) qui varient entre 22 et 25.5%, ce qui démontre que les sols composant sont soit des limons de faible compressibilité, soit des argiles minérales de faible plasticité. [12]

Perméabilité:

La perméabilité dépend à priori du milieu solide- fluide (porosité, granularité, salinité) et également des conditions hydrogéologiques de chaque zone (zone de recharge, zone centrale, exutoire). Le coefficient moyen de la nappe phréatique varie entre $1.27 \times 10^{-1} \text{m/s}$. et $5.6 \times 10^{-3} \text{m/s}$. [02]

III.3-1-5 Coefficient d'emmagasinement et transmissivité par Essai de pompage

Un essai de pompage sert à rechercher des paramètres du système de l'aquifère, c'est-à-dire, faire un essai de nappe pour tirer des informations hydrogéologiques tels que le coefficient d'emmagasinement (S), la transmissivité (T) et la conductivité hydraulique (K).

❖ Résultats et interprétations

Des essais de pompage à débit constant ont été réalisés, en collaboration de l'ONA-Ouargla avec le bureau d'étude Suisse «BG» en 2003, sur huit puits dans la nappe phréatique. Cinq d'entre eux ont été équipés en station d'essais, comportant chacune trois piézomètres.

Ces essais sont répartis :

- Dans la ville d'Ouargla (trois essais);
- Au Sud (un essai dans la plantation de Krime);
- A l'Ouest (un essai à Ba-Mendil);
- Au Nord (un essai à Bour El Haïcha et deux essais à Aïn Moussa).

Ces essais ont été effectués avec un équipement spécialement préparé à cet effet comprenant une pompe à moteur thermique, un tuyau d'exhaure, un tuyau de refoulement et deux fûts pour le jaugeage des débits.

Tableau. III-01 : résultats des essais de pompage de la nappe phréatique de Ouargla

N°	Situation	X (UTM WGS 84)	Y (UTM WGS 84)	T(m ² /s)	S (%)
P 402	Aïn Moussa	721456	3549807	9,37 x 10 ⁻³	7,11
P 408	Bour el Aïcha	719954	3545181	5,85 x 10 ⁻⁴	
P 413	Krime	722629	3530328	3,19 x 10 ⁻⁴	
P 415	Aïn Moussa	720284	3550248	3,29 x 10 ⁻⁴	
P 426	Bamendil	716564	3540169	1,86 x 10 ⁻²	5,89
P 427	Ville de Ouargla			9,09 x 10 ⁻⁴	
P 428	Ville de Ouargla	719474	3538552	1,46 x 10 ⁻⁴	11
P 434	Ville de Ouargla	719624	3537984	2,63 x 10 ⁻⁴	

Source : Agence Nationale des Ressources Hydrique.

Les transmissivités élevées ont été observées sur deux stations d'essais

Comportant chacune un puits de pompage peu profond servant usuellement à l'irrigation et trois piézomètres.

Il s'agit du :

- P426 à Ba-Mandil où la valeur de "T" égale à $1,86 \cdot 10^{-2}$ m²/s est la plus élevée mesurée;
- P402 à Ain Moussa où une transmissivité de $9,37 \cdot 10^{-3}$ m²/s a été déterminée.

Les faibles transmissivités sont plus largement réparties. Au sud d'Ouargla, une transmissivité de $3,19 \cdot 10^{-4}$ m²/s a été mesurée dans un puits de la plantation de Krime, dans l'axe de la vallée d'Oued M'Ya. Dans la ville de Ouargla, des transmissivités de $1,4 \cdot 10^{-4}$ (P428), $9,09 \cdot 10^{-4}$ (P427) et $2,63 \cdot 10^{-4}$ m²/s (P434) ont été déterminées. Ces trois puits servent à l'irrigation. Au Nord de Ouargla, une transmissivité de $5,85 \cdot 10^{-4}$ m²/s a été mesurée à Bour El Haïcha sur un puits creusé dans les formations sablo-graveleuses du Mio-Pliocène du flanc occidental de la vallée. Ce puits exploite de petites venues d'eau alimentant une nappe libre à l'origine des palmeraies Bour de ce bord de vallée.

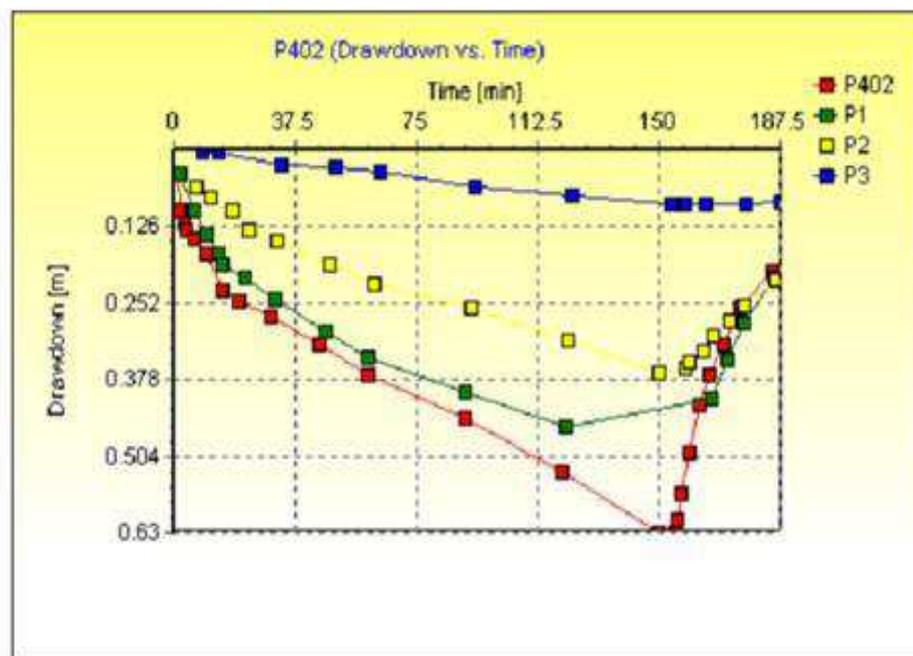


Fig. III-8 : Essais de pompage au P402, Diagramme rabattements/temps

Le Coefficient 'd'emmagasinement (S) est le volume d'eau exprimé en pour cent, que l'on peut retirer par gravité d'un prisme vertical de terrain saturé, de section unité. Les valeurs de S varient entre 10^{-2} et $2 \cdot 10^{-1}$. [02]

III.4 Bilan hydrique de la nappe superficielle

Le niveau de la nappe phréatique est réglé par la balance entre le débit des eaux entrant dans la région et celui des eaux en sortant. Un surplus aux entrées (ou un déficit aux sorties, ce qui revient au même) se traduit par une augmentation de la quantité d'eau stockée, d'où une élévation du niveau de la nappe phréatique, alors qu'un déficit aux entrées (ou un surplus aux sorties, par évaporation ou par écoulement, par exemple) se traduit par un prélèvement sur l'eau stockée dans la nappe, d'où une baisse du niveau de celle-ci. [05]

III.4-1 Equation du bilan d'eau:

L'équation des termes du bilan correspond aux entrées dans la nappe phréatique moins les sorties

$$\Delta Q = \text{entrées} - \text{sorties}$$

Entrées:

Les entrées d'eau dans la nappe phréatique responsables de la remontée du niveau piézométrique de cette nappe sont :

* les eaux provenant du CT et CI par artésianisme et par pompage. Deux types d'utilisation seront différenciés : usage agricole (Irr) et AEP : Q_{F-Irr} et Q_{F-Aep}

* les eaux de pluies rejoignant effectivement la nappe phréatique par infiltration : $Q_{Pré}^{Inf}$

Soit pour les entrées :

$$\text{Entrées} = Q_{F-Irr} + Q_{F-Aep} + Q_{Pré}^{Inf}$$

Sorties:

Les eaux sortant de la zone d'Ouargla sont responsables de la descente du niveau piézométrique de cette nappe. Il s'agit de :

- la décharge naturelle vers le sud et le nord, par écoulement souterrain : Q_P^{Ec}
- les cultures et la végétation urbaine : Q_{P-Ab}^{Etr}
- les eaux évaporées par les surfaces d'eau libres et les zones humides : Q_{P-Sb}^{Ev}
- les eaux évapotranspirées par les activités humaines : Q_{-Hum}^{Ev}
- les eaux évacuées vers Oum Raneb : Q_{-dr}^{dr}

Soit pour les sorties :

$$\text{Sorties} = Q_P^{\text{Ec}} + Q_{P-\text{Ab}}^{\text{Etr}} + Q_{P-\text{Sb}}^{\text{Ev}} + Q_{\text{Hum}}^{\text{Ev}} + Q_{\text{-dr}}^{\text{dr}}$$

Ce qui donne l'équation suivante pour le bilan d'eau de la nappe phréatique

$$\Delta Q = \text{entrées-sorties} = (Q_{F-\text{Irr}} + Q_{F-\text{Aep}} + Q_{\text{Pré}}^{\text{Inf}}) - (Q_P^{\text{Ec}} + Q_{P-\text{Ab}}^{\text{Etr}} + Q_{P-\text{Sb}}^{\text{Ev}} + Q_{\text{Hum}}^{\text{Ev}} + Q_{\text{-dr}}^{\text{dr}})$$

Ce bilan se traduit par le fait que l'eau qui entre dans la zone d'Ouargla par l'écoulement naturel, la pluviométrie ou le débit des forages profonds est évacuée vers Oum Raneb à travers la station de pompage de Chott, évaporée par la végétation, l'activité humaine ou dans la Sebkha et le Chott ou encore s'écoule vers le nord et le sud. Le solde positif ou négatif s'accumule dans la nappe ou est prélevé sur ses réserves.

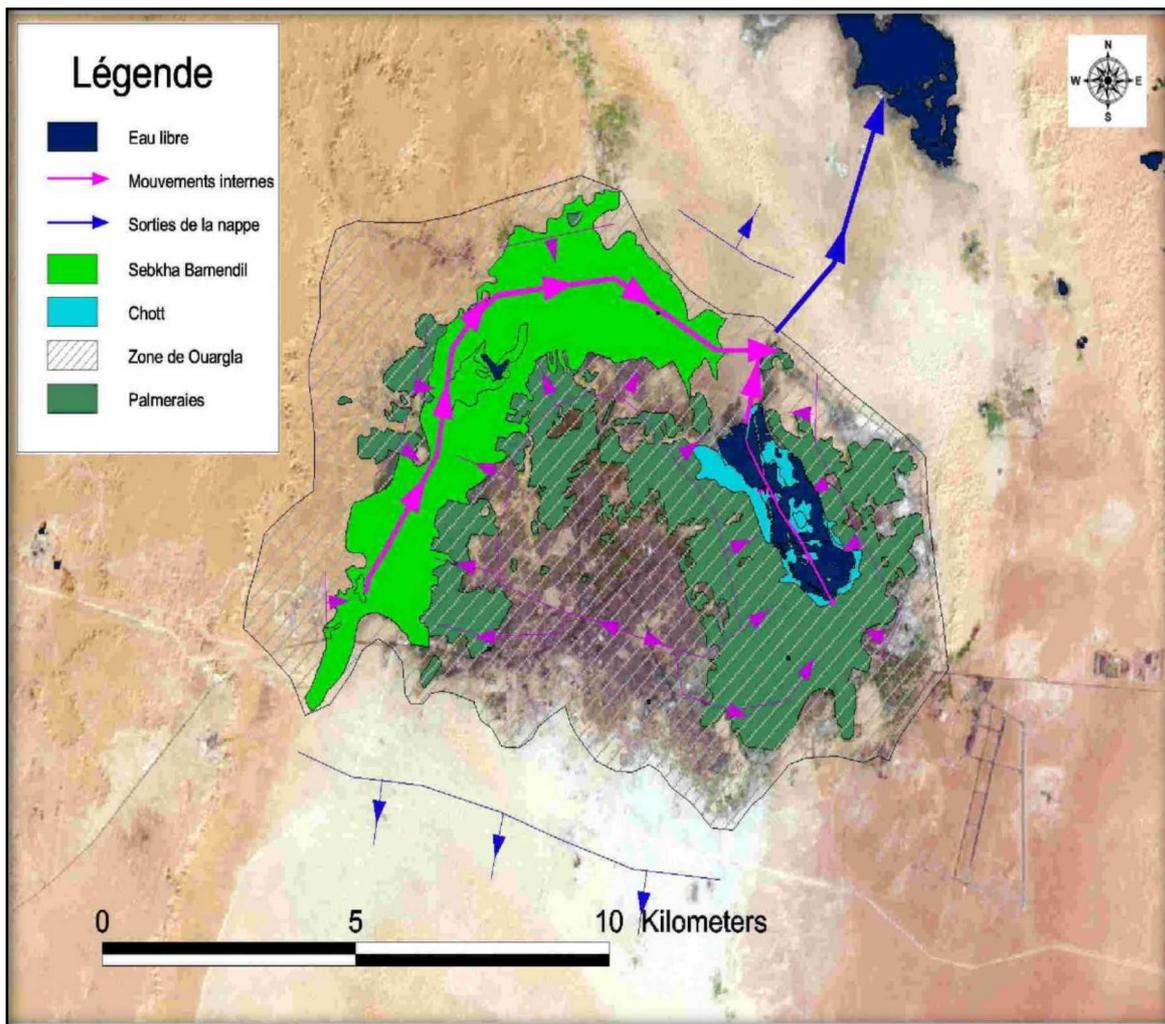


Fig. III-9 : Zone d'Ouargla

III.4-2 Estimation des termes du bilan d'eau

$$\text{Entrées} = Q_{F\text{-Irr}} + Q_{F\text{-Aep}} + Q_{\text{Pré}}^{\text{Inf}}$$

- ✓ $Q_{\text{Pré}}^{\text{Inf}}$: Quantité d'eau tombée multipliée par un coefficient d'infiltration pour l'eau de pluie.
 - 43 mm par an (moyenne de 10 ans)
 - Coefficient d'infiltration 6 %
 - Surface de la zone d'Ouargla : 10'327,5 ha

$$0,043 \text{ m} \times 103'275'000 \text{ m}^2 \times 0,06 / 365 \text{ j} = 730 \text{ m}^3/\text{j}$$

- ✓ $Q_{F\text{-Aep}}$: Débits forages destinés à l'AEP :
Selon les données EDEMIAO 2004 et la campagne de mesures de débits : 49'309 m³/j
- ✓ $Q_{F\text{-Irr}}$: Débits forages destinés à l'irrigation des palmeraies :
Selon les données de mesure des débits ANRH et la campagne de mesure des débits 2004 : 102'810 m³/j

$$\bullet \text{ Sorties} = Q_{\text{PEc}} + Q_{\text{P-AbEtr}} + Q_{\text{P-SbEv}} + Q_{\text{HumEv}} + Q_{\text{drdr}}$$

- ✓ Q_{P}^{Ec} : écoulement souterrain vers le sud et le nord dû à une anomalie piézométrique (dôme) au niveau de la ville d'Ouargla.

$$Q = T \times L \times i$$

Avec :

$$T = \text{Transmissivité} = 2,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$i : \text{Pente} = 2\text{‰},$$

$$L = 12 \text{ km}$$

Soit un débit de 539 m³/j

- ✓ $Q_{\text{P-Sb}}^{\text{Ev}}$: les eaux évaporées par les surfaces d'eau libre et les zones humides.

Superficie des surfaces d'eau libre, déterminée à partir de l'interprétation de l'image satellitaire : 243 ha.

L'évaporation d'un plan d'eau dépend des conditions atmosphériques et de la salinité de l'eau. Au niveau d'Ouargla, des mesures sur bac ont donné des évaporations variant entre 1881 mm/an pour l'année 1957-1958 et 3219 mm/an 1960-1961. Une évaporation moyenne de 2600 mm/an a été retenue. L'évaporation sur plan d'eau est estimée à 80 % de

l'évaporation mesurée sur bac. Une diminution de 7 % de l'évaporation est observée avec une eau à 100 g/l de sels en solution. Soit une évaporation pour les surfaces d'eau libre de 1,96 m par an.

Superficie des sebkhas, correspondant aux zones humides, déterminée à partir de l'interprétation de l'image satellitaire : 2023 ha

La formule d'évaporation en climat aride de Coudrain et Ribstein $Q = 72 \times Z^{-1,5}$ a été vérifiée dans la zone d'Ouargla. La profondeur moyenne de l'eau dans la sebkha autour d'Ouargla étant de 0,6 m, l'évaporation moyenne est de 0,15 m/an à 60 cm de profondeur.

- ✓ Q_{P-Sb}^{Ev} : les eaux évaporées par les surfaces d'eau libres et les zones humides.
 $2'430'000 \text{ m}^2 \times 1,93 \text{ m} / 365 \text{ j} + 20'230'000 \text{ m}^2 \times 0,15 \text{ m} / 365 \text{ j} = 12'849 + 8'314 = 21'163 \text{ m}^3/\text{j}$

- ✓ Q_{P-Ab}^{Etr} : les cultures et la végétation urbaine

L'évaporation par les palmiers et une couverture de 30% de chiendent est estimée, pour la zone d'Ouargla à 15'000 m³/année/ha.

La superficie urbaine recouverte de végétation varie d'un quartier à l'autre. La moyenne est de 7 %

Superficie des palmeraies, déterminée à partir de l'interprétation de l'image satellitaire : 2286 ha

Superficie des zones urbanisées, déterminée à partir de l'interprétation de l'image satellitaire : 2354 ha

$$(15'000 \text{ m}^3/\text{année}/\text{ha} \times 2286 \text{ ha}) + (0,07 \times 2354 \text{ ha}) / 365 = 100'717 \text{ m}^3/\text{j}$$

- ✓ Q_{-Hum}^{Ev} : les eaux évapo-transpirées par les activités humaines sont estimées à 22 l/jour/habitant

La population en 2003 est estimée à 180'000 habitants

$$180000 \text{ habitants} \times 22 \text{ l/jour/habitant} = 3960 \text{ m}^3/\text{j}$$

- ✓ Q_{-dr}^{dr} : les eaux évacuées vers Oum Raneb à travers la station de pompage ont été mesurées par des loggers placés sur les 4 pompes de la station.

- Pour l'année 2003, une moyenne de 26'470 m³/j a été évacuée

III.4-3 Résumé du bilan d'eau

Tableau III-02 : Bilan d'eau de la zone d'Ouargla

Entrées	m ³ /j	m ³ /j
Précipitations:	730	
Forages AEP	49'309	
Agriculture	102'810	
Sorties		
EVT humain		3'960
EVT palmeraie		93'945
EVT végétation ville		6'772
Eau libre		12'849
Sebkha		8'314
vers Oum Raneb		26'470
Ecoulement		539
Totaux	152'849	152'849

Source: O.N.A.

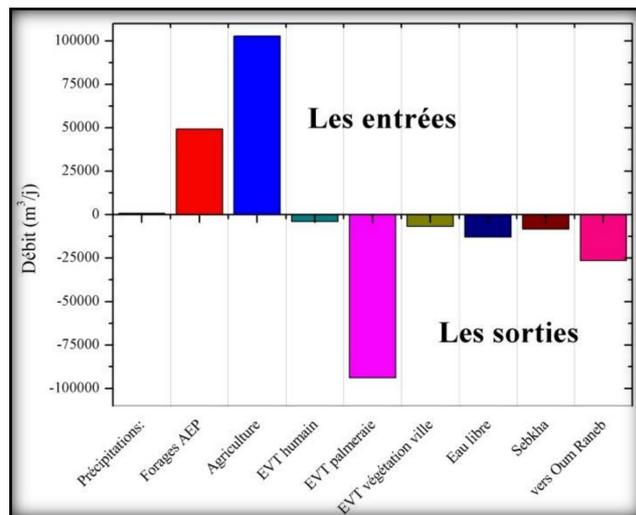


Fig. III-10: Bilan d'eau de la zone d'Ouargla

L'eau, aussi bien dans la ville, dans la palmeraie et dans la sebkha se trouve relativement proche de la surface du sol. La nappe ne peut donc pas jouer de rôle tampon important. C'est la station de pompage de Chott qui permet de régler actuellement le bilan d'eau de la zone d'Ouargla à travers le niveau d'eau dans le canal de drainage. Autrefois les habitants pouvaient être amenés à quitter, jusqu'à plusieurs fois par année, leurs maisons situées dans les zones basses qui étaient inondées par la montée des eaux qui s'élevaient en hiver en fonction des apports et du déficit d'évapotranspiration.

Les besoins pour l'agriculture dans la région d'Ouargla sont estimés à 0,71 litres/seconde/ha. Lors de la réalisation du bilan d'eau, le manque d'eau destiné à l'agriculture a été mis en évidence. Seuls 0,52 l/s/ha sont utilisés dans les palmeraies d'Ouargla.

Le déficit se traduit par une salinisation des sols au détriment de la qualité et de la productivité de la palmeraie.

Dans l'hypothèse où le réseau de drainage agricole, les pratiques d'irrigation et de lessivage seraient optimisés, il faudrait s'attendre à un apport supplémentaire de plus de 35 000 m³/j, qu'il faudrait évacuer de la zone d'Ouargla.

III-5 CONCLUSION

La région d'Ouargla dispose de trois niveaux aquifères distincts :

- La nappe du Continental Intercalaire;
- La nappe du complexe terminal avec ces deux couches : Sénonien et Mio-pliocène;
- La nappe phréatique.

La profondeur du niveau piézométrique de la nappe phréatique est très variable selon les conditions hydrogéologiques et topographiques. Il varie entre 0 et 10 m.

Les cartes piézométriques établies, ont montré que :

- La cuvette se divise en deux zones localisées de part et d'autre de l'axe Bour El Haicha-Hassi Miloud où l'on remarque l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines. La nappe présente des points hauts sous les agglomérations et les palmeraies irriguées à partir du CI ou du CT et des points bas sous les rares palmeraies irriguées à partir de la nappe phréatique, à HassiBerhla, ainsi que dans les sebkhas. Elle présente des contre-pentes au sud d'Ouargla et de N'Goussa.
- Les principales sources d'alimentation de cette nappe sont:
 - Les eaux d'irrigation provenant des nappes profondes;
 - Les fuites des réseaux de distribution et les rejets d'assainissement;
 - Les précipitations et apports des Oueds: N'sa, M'Zab;
 - Drainance verticale, et drainage latéral.
- En ce qui concerne les prélèvements, les principales nappes exploitables dans la cuvette sont la nappe du Mio-Pliocène avec 262 forages, la nappe de Sénonien avec 34 forages et le CI avec 7 forages. On estime les volumes mobilisables à 76 millions m³ par an, dont 30 % destinées pour l'AEP et l'industrie, et 70 % destinées pour l'irrigation.

- Le bilan d'eau de la zone d'Ouargla a mis en évidence un manque d'irrigation et de drainage des palmeraies. Au cas où ces derniers seraient optimisés pour que les palmiers atteignent un rendement correct, il faudrait s'attendre à une augmentation des rejets de la station Chott atteignant 1,3 fois les rejets actuels (ils passeraient de 26470 m³/jour actuels à 61470 m³/jour). Il devient évident que les eaux usées épurées devraient être utilisées pour l'irrigation des palmeraies avec un complément d'eau des nappes profondes et que la station Chott ne devrait plus évacuer que des eaux de drainage, inutilisables car trop salées.

VI.1- Introduction

L'étude de la chimie des eaux souterraines apporte à l'hydrogéologie non seulement une somme considérable de renseignements utiles à la compréhension des phénomènes se produisant dans les systèmes aquifère c'est à dire dans les échanges possibles entre l'eau et le contenant, mais elle lui permet également de préciser la répartition quantitative des différents éléments dissous et d'apprécier la qualité des eaux pour l'A.E.P et l'irrigation.

Le but de l'étude hydrochimique est d'analyser les différents paramètres physico-chimiques, de déterminer la répartition quantitative des différents éléments chimiques dans l'espace et de déterminer les principaux faciès chimiques caractérisant les eaux de nappe phréatique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons exploité les données relatives aux analyses chimiques correspondant aux points d'eau sélectionnés (Puits et forages) effectués par le service de laboratoire de l'ANRH de Ouargla.

VI.2-Les paramètres physico-chimiques

a-Température (T)

La température des eaux des nappes aquifères dépend du gradient géothermique dont la valeur moyenne est de l'ordre de 3 °c tous les 100 m.

b- Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH d'une solution vrai en fonction de la concentration d'ions $[H_3O^+]$ ou $[H^+]$, c'est-à-dire l'acidité ou basicité du milieu. Pour calculer ce PH on utilise la formule :

$$pH = -\text{Log} [H_3O^+]$$

Pour un PH = 7 solution neutre.

Pour un PH > 7 solution basique.

Pour un PH < 7 solution acide

c-La conductivité électrique (CE)

Elle permet globalement d'évaluer la teneur ou la concentration des ions présents dans l'eau.

L'eau douce est évidemment résistant, par contre, l'eau salée est conductrice.

C'est un paramètre qui dépend de la minéralisation qui est la totalité des sels dissous dans l'eau avec les matières organiques.

d-Les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{++} , K^+)

1-Le calcium (Ca^{++}) : résulte de la dissolution des carbonates en présence du CO_2 dans l'eau. Comme il peut être provenir des terrains gypseux.

2-Le magnésium (Mg^{++}) : il peut provenir de la dissolution des formations dolomitiques en présence du CO_2 ou de la dissolution des dolomies dans les terrains gypsifères.

3-Sodium et potassium (Na^{++} et K^+) : pour le sodium dans les formations évaporitiques (sel gemme), il est présent aussi dans les structures de divers minéraux des roches magmatiques, il est facilement entraîné en solution en présence de l'eau. Il est beaucoup plus abondant que le potassium qui se trouve essentiellement sous forme de chlorure dans les évaporites.

e-Les anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} , NO_3) :

1-Le chlorure (Cl^-) : on les rencontre en grande quantité dans les eaux souterraines. Ils proviennent de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères et du rejet des eaux d'origine industrielle.

2-Les bicarbonates (HCO_3^-) : ils proviennent de la dissolution des roches carbonatées dont l'eau est fonction de la tension en CO_2 , de la température, du PH et de la nature lithologique des terrains traversés.

3-Les sulfates (SO_4^{--}) : ils sont toujours présents dans les eaux naturelles, leur présence dans l'eau provient soit :

- ❖ de la légère solubilité des sulfates calcium (CaSO_4) dans les formations gypseuses.
- ❖ du lessivage des terrains argileux et marneux.
- ❖ des eaux usées contenant de l'acide sulfatique.

4-Les Nitrates (NO_3^-) : ils sont rarement présents dans les eaux souterraines, ils proviennent essentiellement de l'azote organique du sol (par l'intermédiaire des bactéries) des engrais chimiques ainsi que les eaux usées.

f-Le résidu sec (R.S) : exprime la totalité des sels dissous dans l'eau et des suspensions organiques et minérales obtenue par pesées (évaporation à 110°C / 24 h) c'est donc la minéralisation totale de l'eau.

g-La dureté totale (DHT) : elle exprime la quantité des sels de calcium et de magnésium dissous dans l'eau :

$$\text{DHT} = (r \text{ Ca} + r \text{ Mg}) \text{ méq} / \text{LDHT} = (r \text{ Ca} + r \text{ Mg}) \times 5 \text{ }^\circ\text{F} \text{ (degré Français)}$$

VI.3- Analyses des paramètres physico-chimiques

VI.3-1- La conductivité électrique (CE) :

D'après Les résultats d'analyses des eaux au service hydrogéologie (ANRH 2012 Ouargla), les valeurs obtenues sont comprises entre 3.06 et 1715 mS/cm avec une valeur minimale à Hassi Miloud (P059) et une valeur maximale à Oum Raneb (P163). Ces valeurs sont proportionnelles à celles des résidus secs.

La carte d'égalité de valeurs de conductivité de la nappe phréatique (Fig. IV-1) montre des valeurs très élevées au niveau des zones de pertes ; chott et sebkhas. Ceci est en relation avec:

- le sens d'écoulement des eaux
- les zones constituant des exutoires de la nappe Sebkha et Chott et où le taux d'évaporation est très élevé et fait croître la conductivité.
- La présence de lentilles de sels et d'évaporites intercalées dans la formation sableuse qui constitue la nappe phréatique.

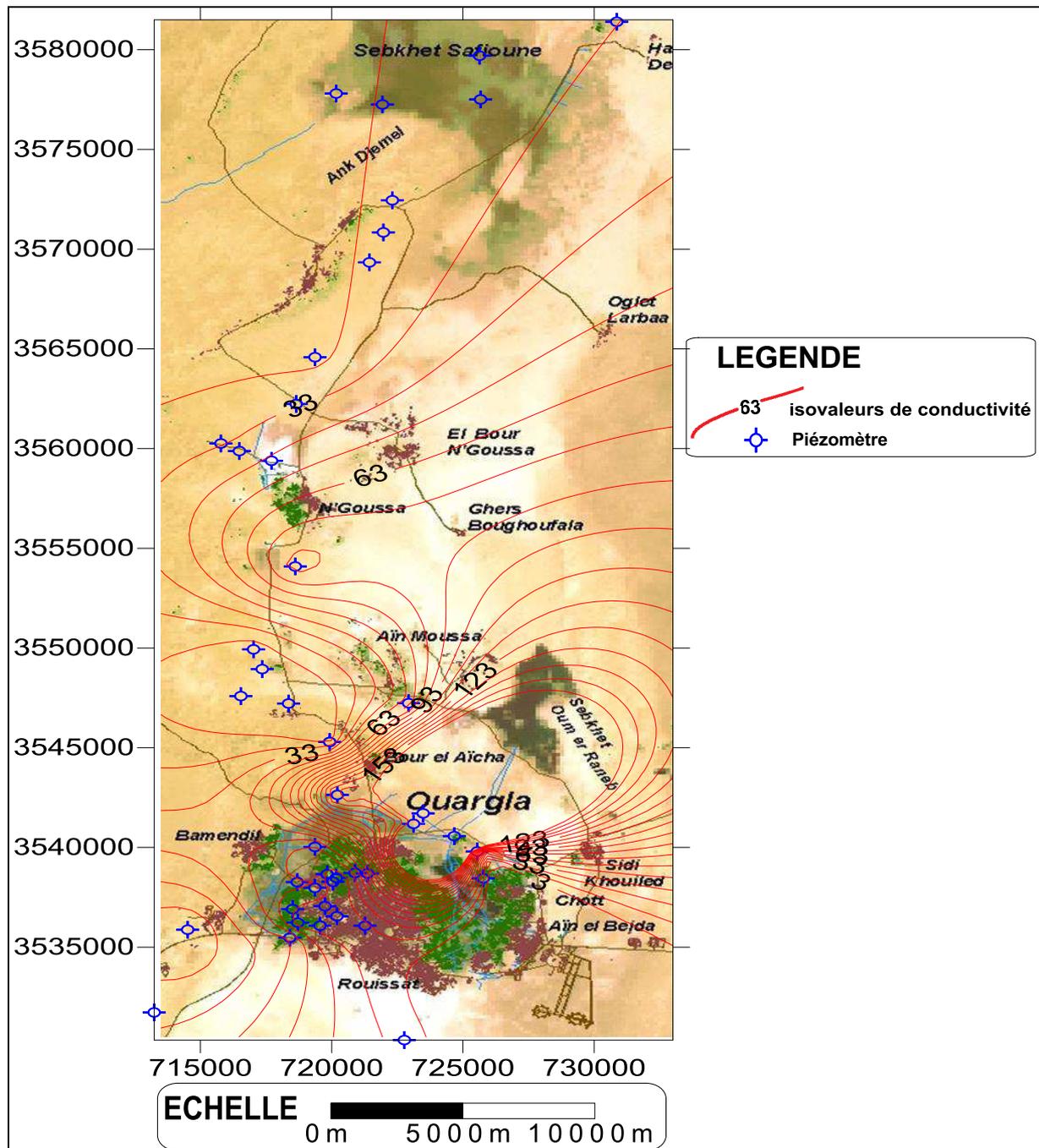


Fig. IV-1 : Carte D'égales valeurs de conductivité électrique des eaux de la nappe phréatique (2012)

VI.3-2- Le Résidu sec (R.S)

D’après Les resultats d’analyses des eaux au service hydrogéologie (ANRH 2012 Ouargla), Les valeurs obtenues oscillent entre 2166 et 486010 mg/l, avec une valeur minimale à Hassi Miloud (P059) et une valeur maximale au Chott (P423). Ces valeurs sont proportionnelles à celle des conductivitésélectriques.

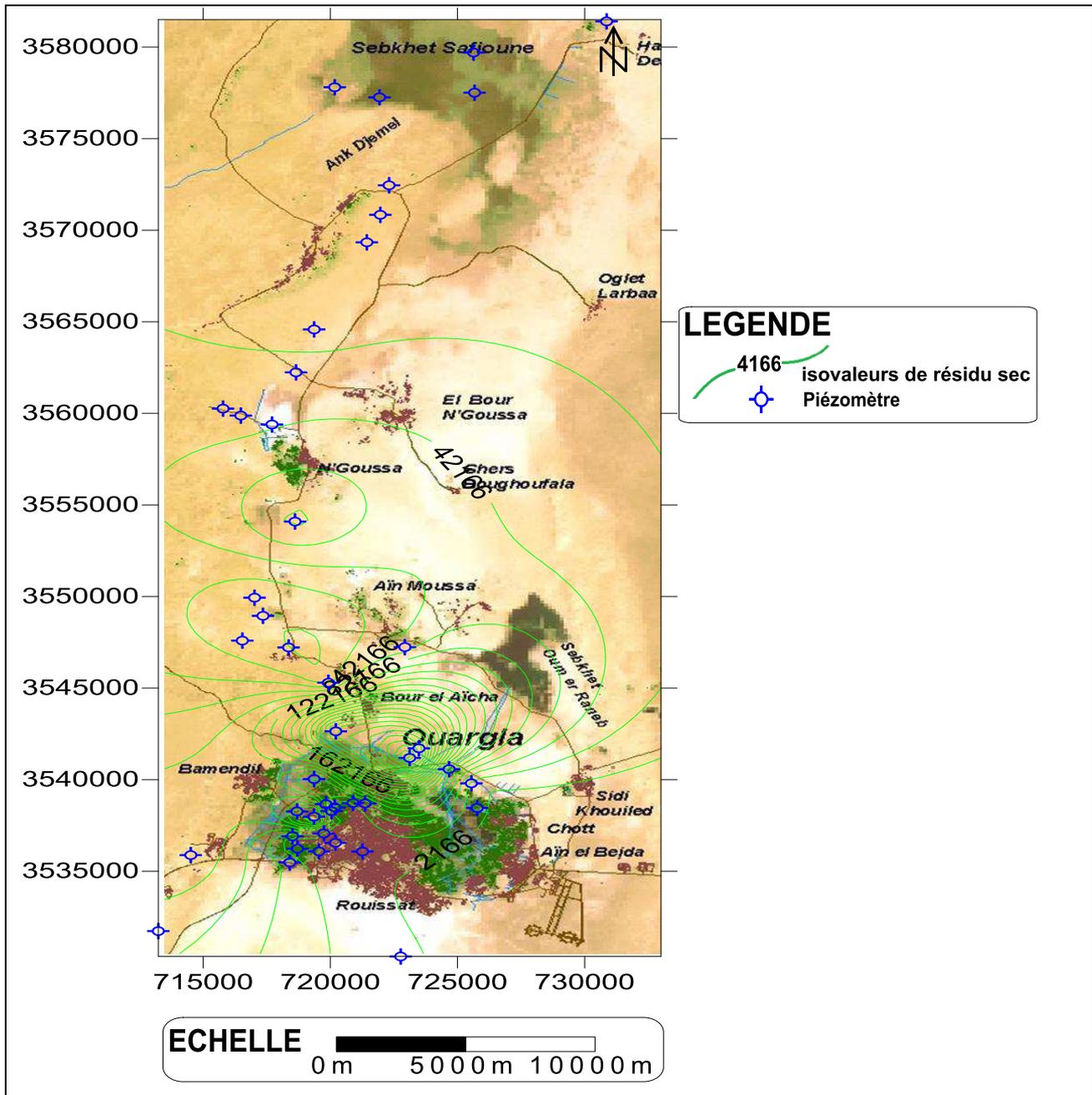


Fig. IV-2 : Carte D'égaies valeurs de résidu sec des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla (2012)

VI.3-3- Le Potentiel d’Hydrogène

D’après Les résultats d’analyses des eaux au service hydrogéologie (ANRH 2012 Ouargla), On remarque que le PH des eaux est presque neutre, la valeur maximale est de l’ordre de (10.6) au niveau du piézomètre PL X3 Route Oude N’sa, la valeur minimale est enregistrée dans la zone de avec PH de Oum Raneb, au P163 (6.1).

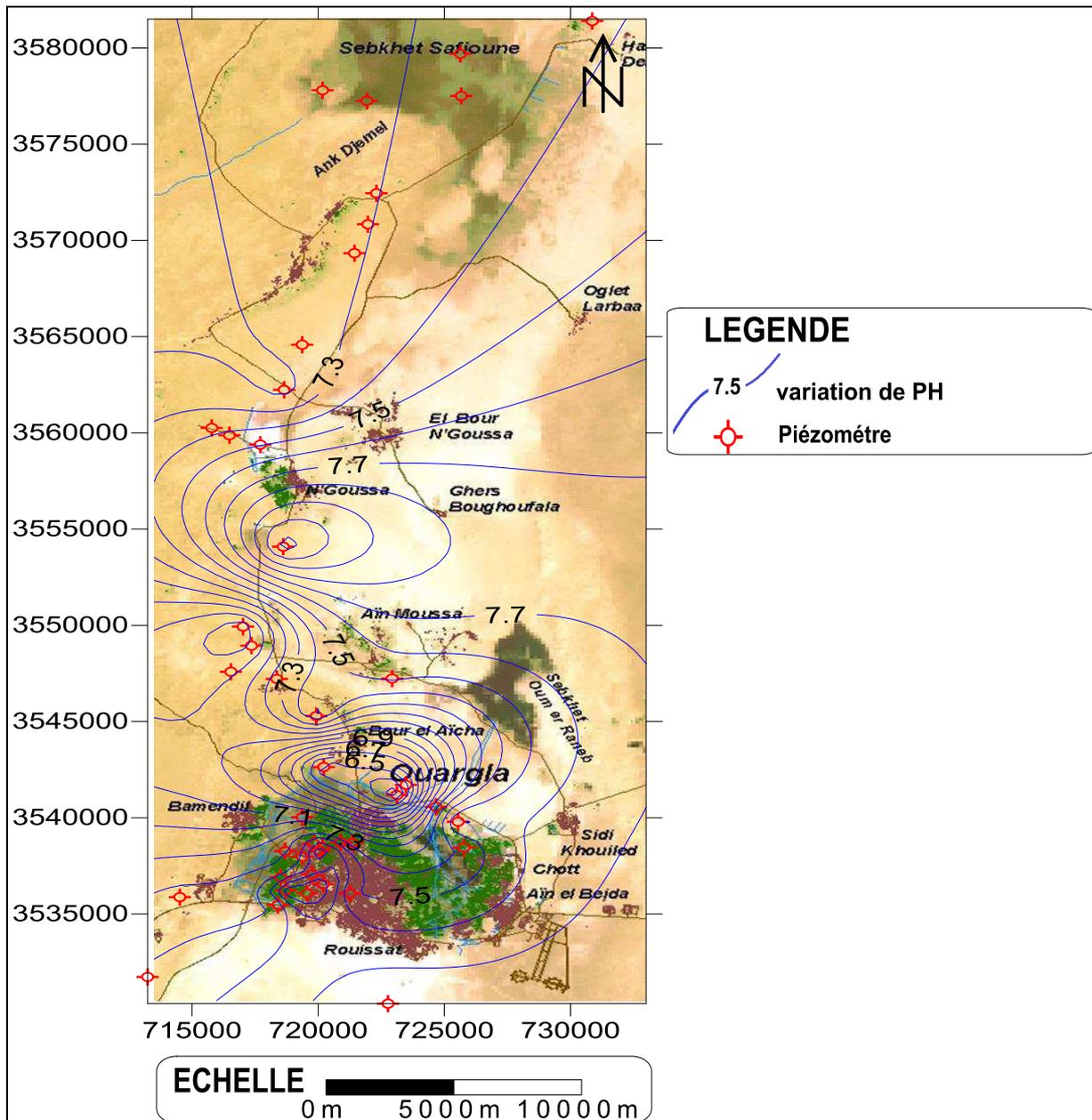


Fig. IV-3 : Variation spatiale de pH des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla (2012)

VI.3-4- La dureté totale (DHT)

La dureté est calculée en degré français (°F) par la formule suivante:

$$DHT = (rCa + rMg) \text{ méq/l}$$

$$DHT = (rCa + rMg) \text{ méq/l} \times 5(°F)$$

Tableau. IV-01 : Potabilité des eaux en fonction de la dureté degré français

Degré français	0 à 3	3 à 15	15 à 30	>30
Dureté de l'eau	Très douce	Douce	Dure	Très dure

La dureté totale calculée pour les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla varie entre 105.62 et 1994.57 °F, les eaux de la nappe phréatique sont donc très dures .

VI.3-5- Titre Alcalimétrique complet TAC :

Il donne la teneur de carbon bicarbonaté (HCO_3^-) et par (OH^-), dus aux (CO_3^-) Hydrates Alcalins contenue dans l'eau (NaOH), (KOH)

$$TAC = (rCO_3^- + rOH^- + rHCO_3^-) \text{ méq/l} \times 5(°F)$$

Pour les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, le TAC varie entre 3.16 et 29.25 °F.

VI.4- Teneurs en ions majeurs

Les analyses chimiques d'échantillons d'eau prélevés en 1996 à partir des piézomètres captant la nappe phréatiques ont été faites au laboratoire de l'ANRH d'Ouargla. Les teneurs minimales et maximales sont consignées dans le tableau suivant:

Tableau. IV-02 :Statistique élémentaire des résultats d'analyse des eaux de la napphephréatique

Les éléments chimiques	Valeurs minimales	Valeurs maximales	Valeurs moyennes
Ca^{++} (mg/l)	215	1077	646
Mg^{++} (mg/l)	75	4487	2281
Na^+ (mg/l)	238	8730	4484
K^+ (mg/l)	10	650	330
Cl^- (mg/l)	535	17250	8892.5
SO_4^- (mg/l)	763	10250	5506.5
HCO_3^- (mg/l)	38	351	194.5
NO_3^- (mg/l)	/	/	/
CE 25°c (ms/cm)	3.9	59.5	31.7
Rs (mg/l)	2750	75580	39165
PH	7.8	8.7	8.25

VI.5- Classification et représentation graphique des eaux.

VI.5-1- Etablissement de la formule caractéristique des eaux selon STABLER

Cette classification prend en considération les concentrations exprimées en meq/l (r) et qui sont ramenées par la suite à une concentration ionique de 100%. Ces concentrations sont exprimées par une formule caractéristique qui se base sur la prédominance du tel anion ou cation. Cette formule permet de faire une comparaison entre plusieurs eaux d'origine différente.

r : le poids de l'élément considéré en mg/l / équivalent chimique (e) et désigne la quantité en réaction (méq/l), avec : $e = M/V$ ou e : désigne l'équivalent chimique.

M : désigne la masse atomique de l'élément

V : désigne la valence ionique de l'élément

$r\% = r \times 100/C_T$: désigne la quantité en réaction en pourcentage

C_T : désigne la concentration totale.

A-Calcul de la quantité en réaction : $e = M/V$:

$$\sum r^+ = (rCa + rMg + rNa + rK) \text{ méq/l}$$

$$\sum r^- = (rCl + rSo_4 + rHCO_3 + rNO_3) \text{ méq/l}$$

B- Calcul du pourcentage d'erreur : il est déterminé par l'expression suivante:

$$C (\%) = ((\sum r^+ - \sum r^-) / (\sum r^+ + \sum r^-)) \times 100$$

Si ce pourcentage (%) inférieur ou égale à 6% , l'analyse est Bonne et Fiable

C-Détermination des formules caractéristiques d'après STABLER

$$\circ \quad r^+\% = (r^+ / \sum r^+) \times 100$$

$$\circ \quad r^-\% = (r^- / \sum r^-) \times 100$$

le résultat d'analyse des éléments chimiques des eaux de la nappe phréatique sont inférieurs à 6% bonne et fiable. Selon STABLER, les eaux de la nappe phréatique sont du type Chloruré sodique.

Tableau. IV-03 : Faciès des eaux de la nappe phréatique d'Ouargla d'après STABLER

Pourcentage	r%Ca	r%Mg	r%Na	r%K	r%Cl	r%So ₄	r%HCO ₃	r%NO ₃	Faciès
Valeur max	52.89%	50.48%	72.94%	2.73%	84.51%	59.39%	6.11%	2.39%	Chloruré sodique
Valeur min	4.10%	9.80%	22.20%	0.52%	35.13%	15.11%	0.34%	0%	
Valeur moy	28.49%	30.14%	47.57%	3.25%	59.82%	37.25%	3.22%	1.19%	

VI.5-2- Représentation graphique des eaux

VI.5-2-1- Diagramme semi-logarithmique SCHOLLER – BERKALOFF

les diagrammes logarithmiques verticaux sont formés de 7 échelles logarithmiques verticaux correspondant aux principaux éléments analysés et permettant la classification des données d’analyses chimiques. tous les éléments chimiques sont reportés en mg/l.Ce diagramme présente l’avantage de permettre la disposition sur le même diagramme de plusieurs analyses chimiques, se qui facilitera la comparasion entre les eaux.Pour la représentation graphique des résultats d’analyse chimique des eaux de la nappe phréatique selon le diagramme scholler – berkaloﬀ, nous les avons classé par type de faciès chimiques obtenus selon stabler, le faciès dominant est chloruré sodique (fig.iv-4)

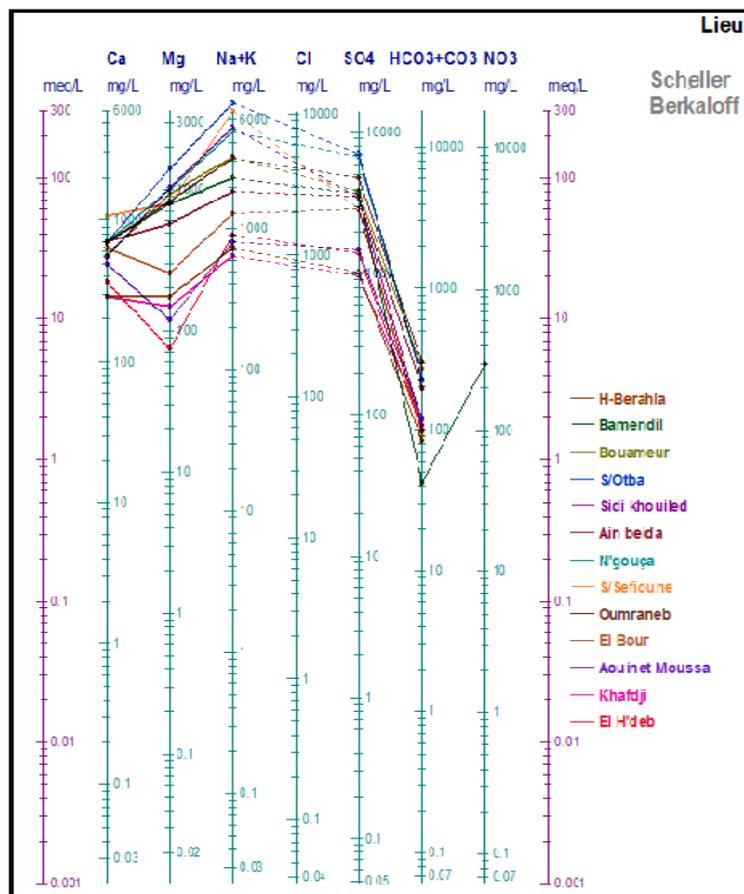


Fig.IV-4 : Représentation graphique des eaux de la nappe phréatique Sur le diagramme de SCHOLLER – BERKALOFF

VI.5-2-2 Représentation graphique sur le diagramme de PIPER

Ce diagramme comporte un losange et deux triangles dont les cotes sont subdivisées en 100 parties égales correspondants à des pourcentages par rapport à :

- un triangle destiné aux cations
- un triangle destiné aux anions

Le représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet d’avoir, une approche vraie de la composition chimique d’une eau.

La représentation sur le diagramme de Piper (Fig. IV-5) montre que les points d’eau occupent le pôle sodique pour le triangle des cations, et les pôles chloruré et sulfaté pour le triangle. Quant au faciès chimique, il regroupe une seule famille chlorurée sodique. Ceci montre bien un faciès chimique chloruré sodique dominant imposé par l’aridité du climat et un faciès secondaire sulfato-sodique provoqué en partie par la pollution anthropique.

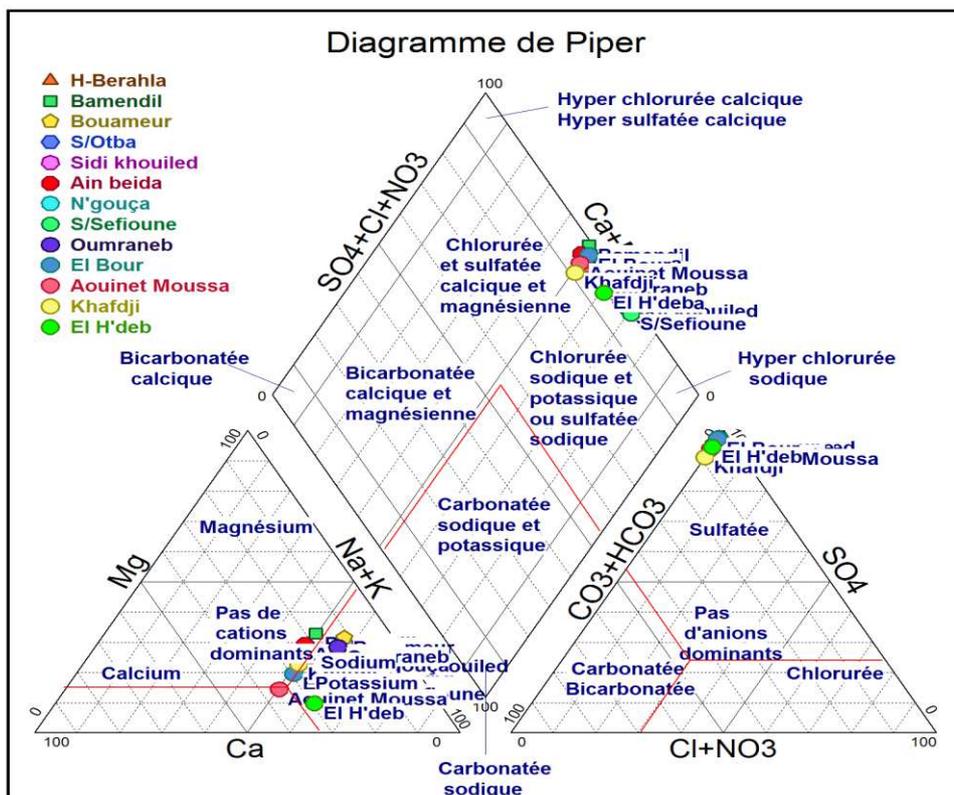


Fig. IV-5 : Représentation graphique des eaux de la nappe phréatique Sur le diagramme de PIPER.

IV.6- Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe phréatique de la région de Ouargla, nous a permis de distinguer un type de faciès chimique de type chloruré sodique. Les eaux sont caractérisées par une conductivité élevée allant de 3.06 et 1715 mS/cm ms/cm. Les résidus secs sont élevés et oscillent entre 2166 et 486010 mg/l. Le potentiel d'hydrogène (PH) varie entre 6,1 et 10,6 donc les eaux sont basiques.

Les fortes valeurs en sels et en éléments chimiques sont en relation avec:

- le sens d'écoulement des eaux
- les zones constituant des exutoires de la nappe Sebkhia et Chott et où le taux d'évaporation est très élevé et fait croître la conductivité.
- La présence de lentilles de sels et d'évaporites intercalées dans la formation sableuse qui constitue la nappe phréatique.

V. Modélisation hydrodynamique

V. 1- Formulations mathématiques de l'écoulement de la nappe phréatique

On dispose des équations suivantes :

- Les équations de diffusivité en nappe libre.

- Equation de continuité :

$$\operatorname{div}(\rho v) + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \rho q = 0 \quad (5-1)$$

Où ρ : masse volumique, V : vitesse, w : porosité efficace, q : débit prélevé

- loi de darcy :

* Dans l'hypothèse où l'on peut négliger la compressibilité de l'eau

$$\vec{v} + \bar{k} \vec{\nabla} h = 0 \quad (5-2)$$

* Et sinon

$$\vec{v} + \frac{\bar{k}}{\mu} (\vec{\nabla} p + \rho g \vec{\nabla} z) = 0 \quad (5-3)$$

Où p : pression, k : perméabilité, μ : viscosité cinématique.

- Equation d'état isotherme de l'eau :

$$\rho = \rho_0 \exp(\beta(p - p_0)) \quad (5-4)$$

Où β est la compressibilité de l'eau, P : pression, p_0 : pression initiale

Nous allons établir à partir de ce système d'équations une équation différentielle dite équation de diffusivité du 2ème ordre.

On suppose que le milieu poreux n'est saturé que sur une certaine hauteur. Dans ce cas, toute variation de charge se traduit par une variation de la cote de la surface de l'aquifère : en montant ou en descendant, de l'eau peut être stockée et déstockée « facilement » dans la matrice poreuse, sans mobiliser ni la compressibilité des vides occupés par de l'air antérieurement. On suppose donc w et ρ constants. On admet aussi (hypothèse de Dupuit).

Que l'écoulement est horizontal et que le tenseur de perméabilité est isotrope dans le plan

Horizontal $\bar{K} = \text{diag}(K, K, K_v)$. On établit ensuite (cf. figure 28) le bilan sur un prisme vertical de base $dx \cdot dy$ (entre le substratum : cote σ et la surface libre : cote h).

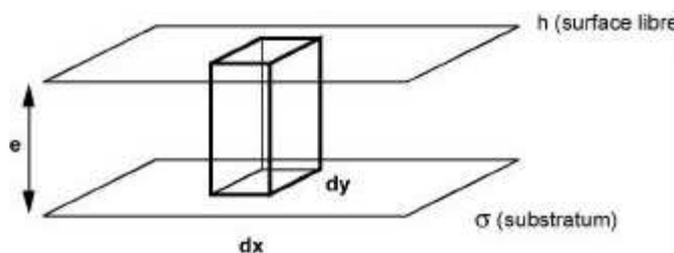


Fig.V-1: prisme élémentaire de nappe libre.

L'équation de continuité établit le bilan entre le flux massique entrant F , les flux d'échange verticaux D et la variation de masse d'eau de l'élément V :

F : flux massique entrant (par les faces verticales). Pour une unité de temps dt , on intègre la vitesse v sur chaque face :

$$F = \rho dy \left(\int_z v_x(x,y,z) dz - \int_z v_x(x+dx,y,z) dz \right) + \rho dx \left(\int_z v_y(x,y,z) dz - \int_z v_y(x,y+dy,z) dz \right) \quad (5-5)$$

On remplace v par sa valeur en utilisant la loi de Darcy :

$$F = \rho \cdot dx \cdot dy \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_z K \frac{\partial h}{\partial x} dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_z K \frac{\partial h}{\partial y} dz \right] \right\} \quad (5-6)$$

Et si K est constant sur la verticale

$$F = \rho . dx . dy \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[K \frac{\partial h}{\partial x} (h - \sigma) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K \frac{\partial h}{\partial y} (h - \sigma) \right] \right\} \quad (5-7)$$

V : variation de la masse eau de l'élément (pour l'unité de temps dt)

$$V = \rho \omega \frac{\partial h}{\partial t} dx . dy \quad (5-8)$$

D : débit d'échanges verticaux (pour l'unité de temps dt)

$$D = \rho Q . dx . dy \quad (5-9)$$

En écrivant $F = V + D$ (conservation de la masse), on obtient (simplifiant par $\rho . dx . dy$)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K . \frac{\partial h}{\partial x} (h - \sigma) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K . \frac{\partial h}{\partial y} (h - \sigma) \right] = Q + \omega . \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5-10)$$

Soit

$$\vec{\nabla} \left[K . (h - \sigma) \vec{\nabla} h \right] = Q + \omega \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5-11)$$

Cette équation n'est pas linéaire. On peut la rendre linéaire dans deux situations simples :

Le substratum est horizontal ($s = \text{cst} = 0$) et le milieu uniforme (K constant).

On a alors :

$$K \vec{\nabla} (h \vec{\nabla} h) = Q + \omega \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5-12)$$

Soit :

$$\frac{1}{2} \Delta (h^2) = \frac{\omega}{K} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{Q}{K} \quad (5-13)$$

Equation différentielle en h^2 . En régime permanent ($\frac{\partial h}{\partial t} = 0$), elle est linéaire en h^2 .

Les variations de niveau de surface libre sont faibles par rapport à l'épaisseur de la couche. C'est le cas classique d'une linéarisation. On suppose que $T = K(h-s)$ varie peu avec la charge et est uniforme dans la nappe. Cela donne alors :

$$\Delta h = \frac{Q}{T} + \frac{\omega}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5-14)$$

C'est une équation aux dérivées partielles du 2ème ordre de type parabolique, type Equation de diffusion.

Dans le cas de régime permanent, l'équation devient :

$$\Delta h = \frac{Q}{T} \quad (5-15)$$

V. 2- Modèle

V. 2-1 Les objectifs

Les objectifs de la modélisation visés par cette étude sont nombreuses, entre autres nous citons : la quantification des débits d'eau transitant dans la nappe phréatique et la connaissance de la distribution d'écoulement des eaux et ainsi pour mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système. En suite logique au schéma conceptuel de fonctionnement, un des objectifs aussi est de simuler le comportement de système selon des scénarios proposés.

Une modélisation en régime permanent sera retenue, avec pour référence la piézométrie en 2010. Puis nous allons valider le modèle en régime permanent, en se référant à l'année 2010 connue.

V. 2-2 Outils

Nous avons utilisé le programme de modélisation MODFLOW, développé en fortran par l'USGS (MacDonald et Harbaugh, 1988). Ce logiciel a pour qualités premières d'être simple, modulaire et d'avoir été rendu fiable par une utilisation mondiale massive. La version que nous utilisons fonctionne sur une interface en Visuel Basic :

Visuel Modflow (Waterloo Hydrogeologic software 1995-2003).

C'est un modèle à base physique, déterministe, capable de représenter des écoulements laminaires monophasiques tridimensionnels dans des systèmes multicouches. Il résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode des différences finies. Pour se faire l'aquifère doit être discrétisé en mailles quadrangulaires et des conditions aux limites doivent être imposées. Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources (nombre, distribution, qualité).

La piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique porosité), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique, etc....) et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, éventuels pompages).

Le modèle s'articule sur deux hypothèses fondamentales : les gradients hydrauliques doivent être faibles et la continuité hydraulique de l'aquifère respectée. Et c'est le cas pour la nappe phréatique quaternaire dans la région de Ouargla

V. 2-3 limites

Pour satisfaire nos objectifs, nous utilisons un modèle locale qui se limite à la région de Ouargla, car c'est ici où se manifeste de plus le phénomène de la remontée, et c'est là où on dispose de maximum de données, mais la médiocrité des données disponibles (fiabilité, spatialisation, densité) pour le calage du modèle induisent une incertitude inévitable sur les valeurs obtenues

V. 3 Conditions aux limites du modèle

V. 3-1 Maillage

Pour la discrétisation spatiale, nous avons placé, sur les 212 km² de la zone de Ouargla, un maillage carré uniforme de 650 m de côté (502 mailles actives) comme c'est présenté sur la figure (V-2). Vu la médiocrité des données disponibles. Nous considérons donc les caractéristiques hydrodynamiques (par exemple perméabilité, piézométrie) comme constants sur chaque maille.

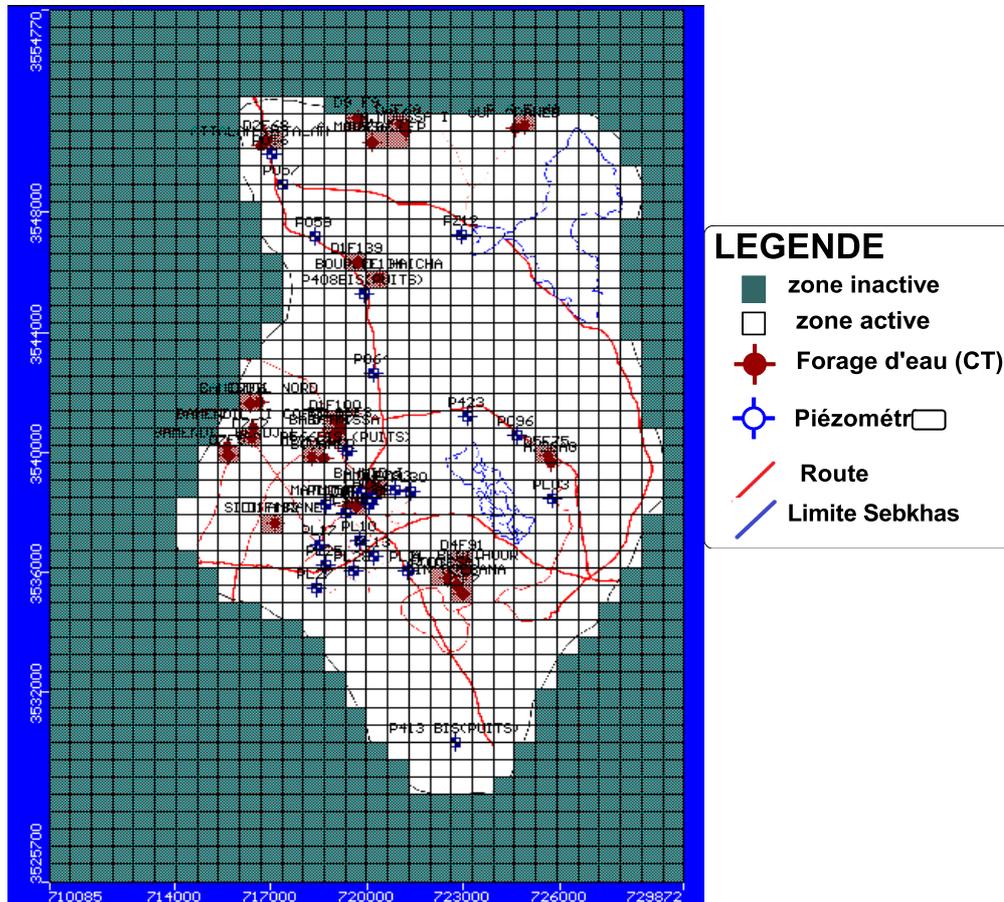


Fig.V-2 : maillage de la nappe dans la région de Ouargla.

V. 3-2 Limites géologiques

Les limites géologiques de la nappe sont constituées latéralement (EST et OUEST) par les affleurements de toit de la roche mio-pliocène. Tandis que la limite nord a été choisie suivant la ligne $Y = 3\ 554\ 770$ m, et la limite sud suivant la ligne $Y = 3\ 525\ 700$

V. 3-3 Le mur

La nappe phréatique quaternaire repose sur les argiles pliocènes (argile rouge). L'aquifère est par conséquent modélisé en système monocouche. La morphologie de cette surface a été interpolée afin d'obtenir une altitude pour chaque maille du modèle.

V. 3-4 Le toit

La nappe phréatique est considérée comme libre, par conséquent, la limite du toit de l'aquifère correspond à la surface du sol défini antérieurement

V. 3-5 Conditions de flux

L'observation des cartes piézométriques de la nappe phréatique montre qu'il existe des lignes de partage des eaux souterraines à l'EST représenté par le dorsal de MZAB et à l'OUEST représenté par les collines de SIDI KHOULED, ces limites représentent une condition de flux nul pour la nappe. Elle est représentée sous forme de cellules inactives qui n'interviennent pas dans les calculs.

V. 3-6 Conditions de flux internes

Dans le modèle, les conditions de flux internes seront exprimées en terme de recharge nette (bilan infiltration + les eaux des forages d'AEP et d'irrigation), l'évaporation nette (bilan de l'évapotranspiration).

V. 4 Contraintes initiales**V. 4-1 Emmagasinement et porosité**

D'après l'étude de BG les valeurs de l'emmagasinement varient dans un intervalle de 5,89% à 11% soit une moyenne égale à 8%

En régime permanent ce paramètre n'intervient pas.

Pour La porosité, conformément au figure 32, sa répartition est la suivante : la valeur 13 % en centre-ville, 23 % coté Bamendil, et 11 % dans la palmeraie ouest, ce qui correspond à la porosité cinématique (efficace) suivants : 9,1 % en centre-ville, 16,1 % coté Bamendil, 7,7 % dans la palmeraie et la zone chotteuse.

V. 4-2 Perméabilité

La plupart des essais de pompage ne sollicitent qu'une partie de l'aquifère ce qui empêche d'en déduire une valeur de la perméabilité moyenne de toutes les couches traversées. Les perméabilités connues ne sont donc qu'apparentes et uniquement représentatives des couches supérieures de l'aquifère

Il semble évident qu'à partir des données en notre possession, la gamme des perméabilités que nous pouvons utiliser est extrêmement étendue. Dans ces conditions nous entrerons dans le modèle, comme première base de travail, la distribution spatiale établie au chapitre III, la perméabilité est variée entre $1.27 \times 10^{-1} \text{ m/s}$. et $5.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.

V. 4-3 Recharge

Le principal élément de la recharge est la précipitation $8059610 \text{ m}^3/\text{an}$ et les forages (irrigation et AEP) au débit $27480.16 \text{ m}^3/\text{j}$ que nous avons répartie sur la surface de domaine modélisé.

V. 4-4 Evapotranspiration

L'évapotranspiration de modèle englobe est (eau évaporée par les surfaces d'eau libre (chotts), eau évaporée par les zones humides (sebkhas) et l'évapotranspiration des cultures et de la végétation urbaine avec un volume égale à $1015430 \text{ m}^3/\text{an}$

V. 5 Calage du modèle

Le premier résultat de calcul effectué sur le modèle avec les données suscitées, a donné que le bilan hydrique est déficitaire pour notre secteur d'étude, ce qui nous a fait passer à l'étape du calage du modèle, effectivement on a joué sur les paramètres hydrodynamiques, malgré ça le bilan reste toujours déficitaire, cette situation nous a fait penser à une autre source d'entrée (recharge d'une autre origine), il s'est avéré logique de prendre le phénomène de drainance ascendante depuis la nappe du Complexe Terminale comme autre source de recharge cette quantité a été estimée à $800 \text{ mm}/\text{an}$ pour que le bilan s'équilibre.

V.6 Résultats de la modélisation

V.6-1 Comparaison des piézométries

Nous avons essayé de conduire le calage du modèle en nous rapprochant le plus souvent possible des contraintes imposées déduites de la première partie de cette étude par les mesures de terrains.

Après maintes essais et combinaisons, nous avons abouti à la meilleure variante voir fig. 36, avec un coefficient de corrélation égale à 0.81, et l'RMS est 15.95%

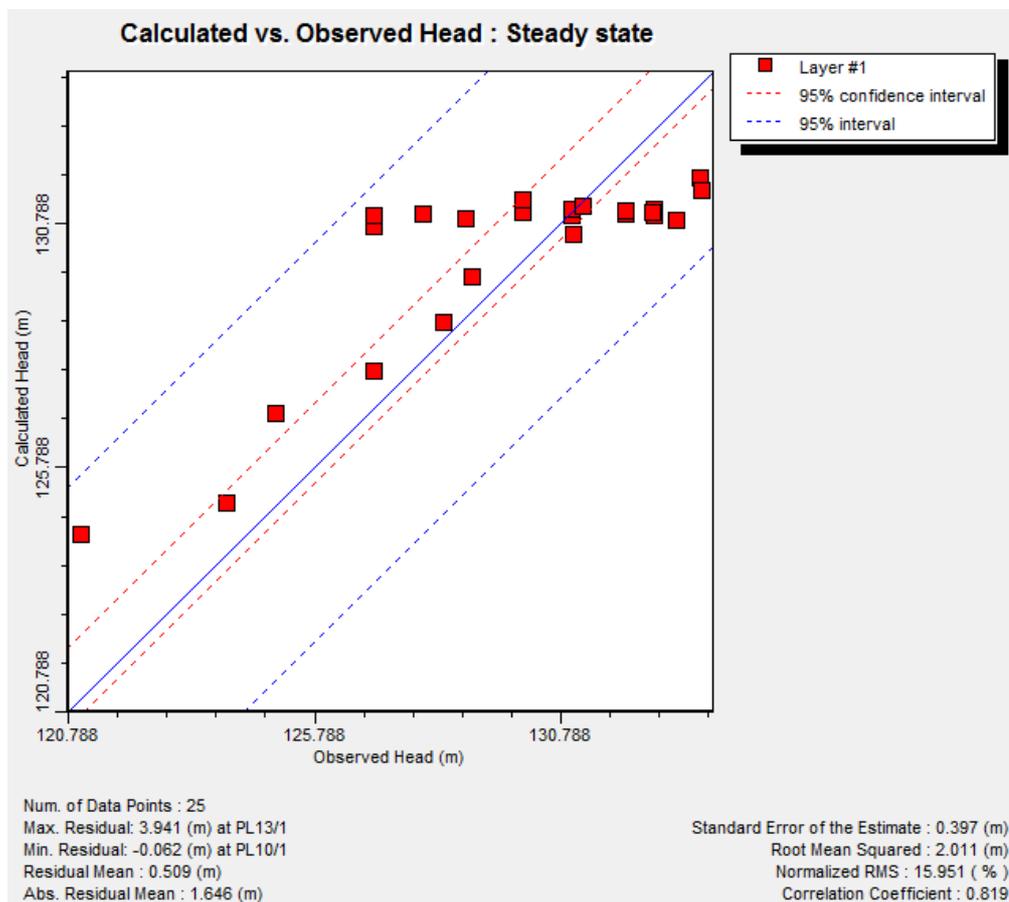


Fig. V-3: comparaison des piézométries calculés et observés en 2010 (régime permanent).

Certes si nous avons le nombre suffisant de données et leurs répartitions adéquates sur le domaine, et le temps nécessaire nous aurions obtenu un résultat meilleur.

V.6-2 Bilan hydrique issue du calage en régime permanent

Tableau.V-01 : Budget d'écoulement journalier moyen en m³/j

	Entrée (IN)	Sortie (OUT)
Stockage	0.00	0.00
Côte constante	158620.00	12683.00
Puits	47297.00	0.00
Recharge	506850.00	0.00
Evapotranspiration	0.00	645140.00
Drainage	0.00	54950.00
Total IN	712770.00	-
Total OUT	-	712770.00
Différence: IN - OUT		0.066337
Pourcentage d'anomalie		0%

V.6-3 Calage des perméabilités

Les perméabilités ajustées sont comme prévu extrêmement hétérogènes et varient de 1.10^{-3} à 1.10^{-5} m/s. alors on remarque que la zone des sebkha et les chotts est le plus perméable ce qui reflète la réalité car cette zone est la plus humide et doté de grand canal de drainage qui favorise l'écoulement souterraine, puis vient la zone urbaine et la palmeraie OUEST et NORD avec une valeur moyenne égale à 1.10^{-4} m/s, et en dernier , on trouve la palmeraie EST et la région de AIN BEIDA peu perméable avec la valeur 1.10^{-5} m/s peut être c'est sa qui explique l'inondation permanent de ses endroits.

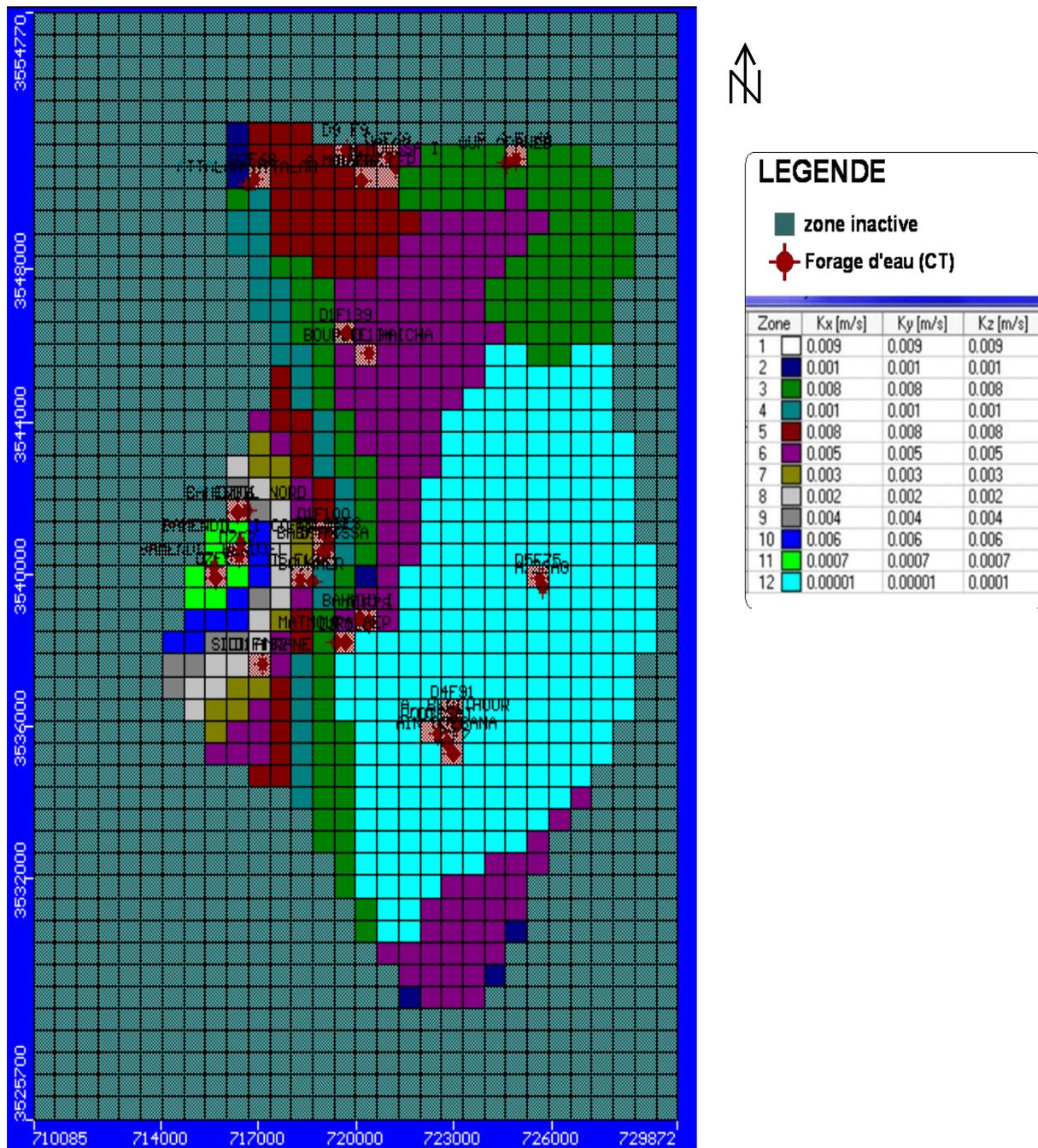


Fig. V-4 : Répartition des perméabilités après le calage

V.6-4 Calage de la piézométrie

Un premier constat de la figure (V-5), montre que la restitution de la piézométrie est assez acceptable. La corrélation entre les niveaux statiques calculés et observés accuse une erreur moyenne d'environ 1.81 m, et avec un coefficient de corrélation égale à 0.81.

Les lignes isopièzes dessinent un dôme culminant à la cote 135 m conformément à la réalité, ainsi que le sens d'écoulement de la ville vers les sebkhas se confirme, idem que l'écoulement général des eaux de la nappe de SUD vers le NORD.

Mais des singularités bizarres sont apparais à savoir : deux points de converge d'eau, le premier au NORD-EST de la STEP, la deuxième, au centre OUEST de chott

Ain Beida, peut-être cela est dû, soit à la géologie de ses endroits ou le rôle de réseau de drainage non bien pris en considération dans ce modèle, soit tout simplement à cause de manque et la fiabilité des données acquises.

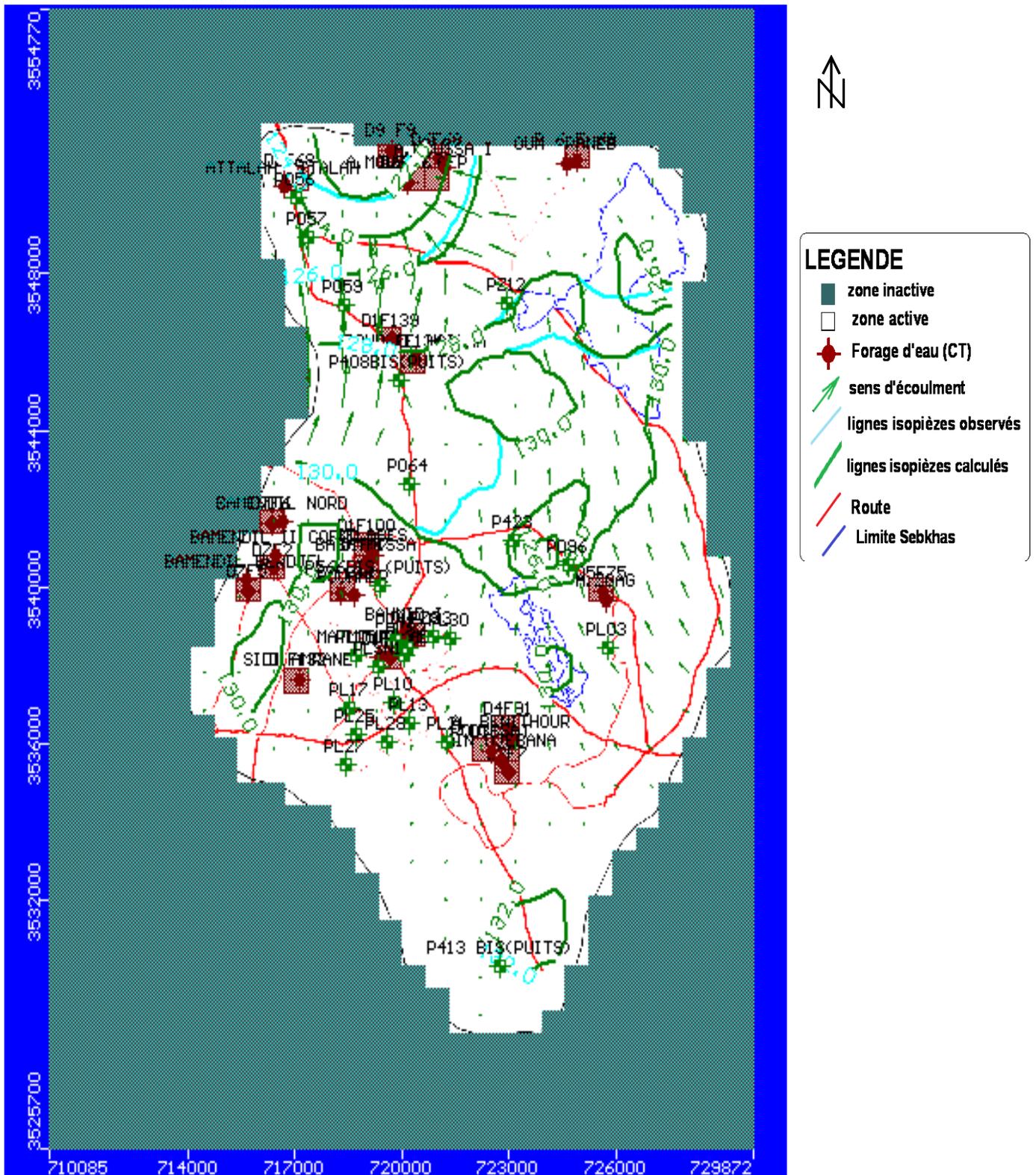


Fig. V-5 : Piézométrie calculée et observée 2010.

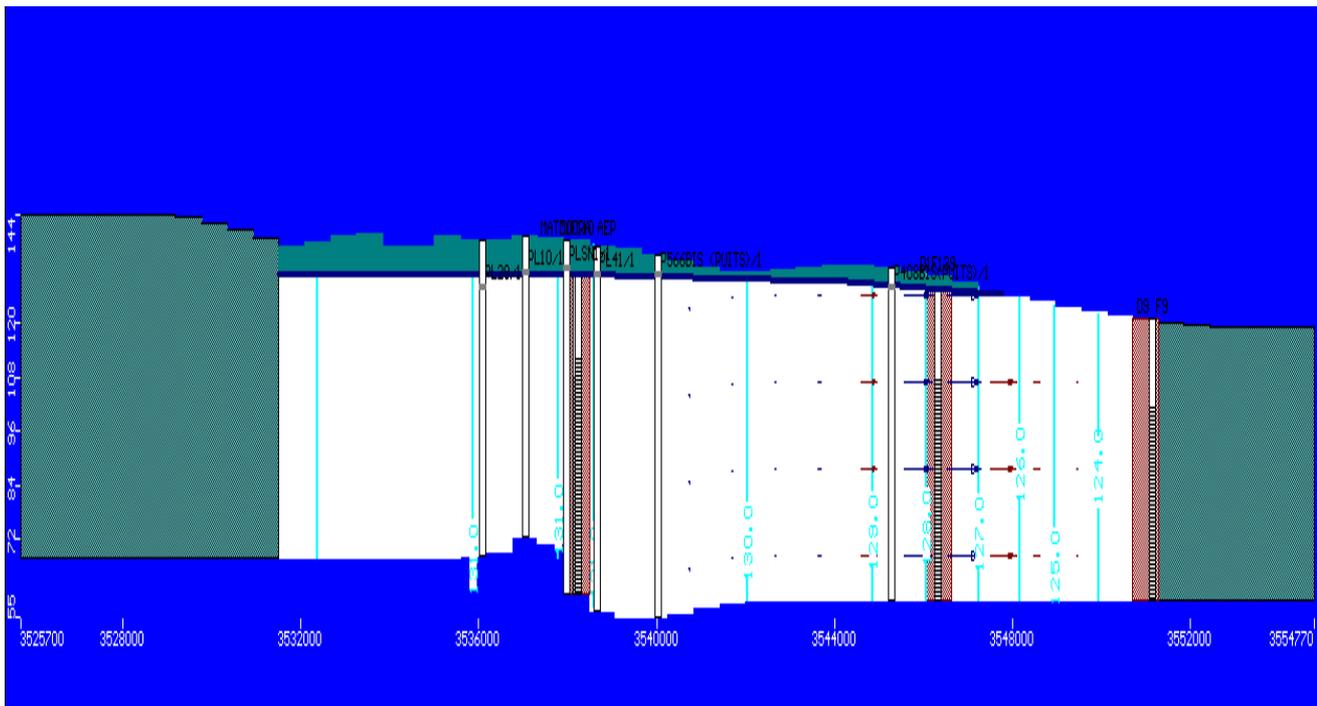


Fig. V-6 : Profil piézométrique Sud-Nord calculé par le modèle.

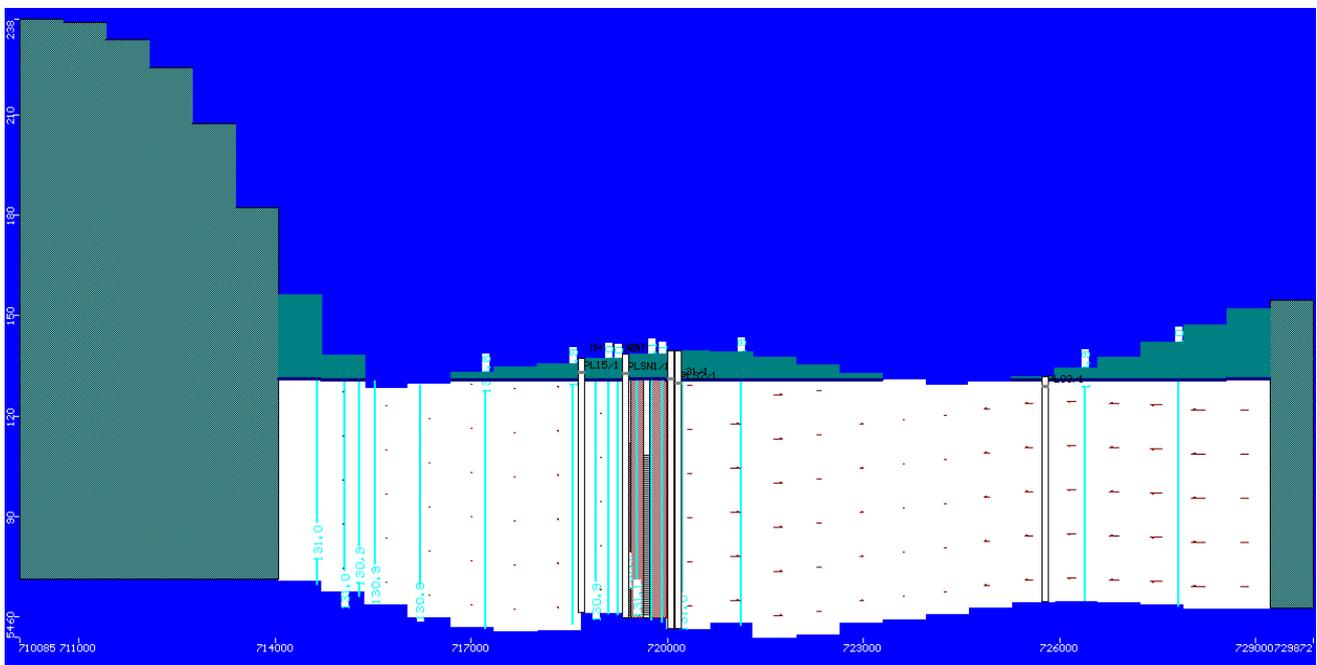


Fig. V-7 : Profil piézométrique Ouest -Est calculé par le modèle.

V.6-5 Remontées eaux

Après le calage du modèle une remontée des eaux s'est produite au niveau des zones des dépressions de la sebkha de Bamendil, Oum Raneb et Echott et ceci est due à l'affleurement du niveau piézométrique de la nappe phréatique dans les zones les plus bas voir figure (V-8)

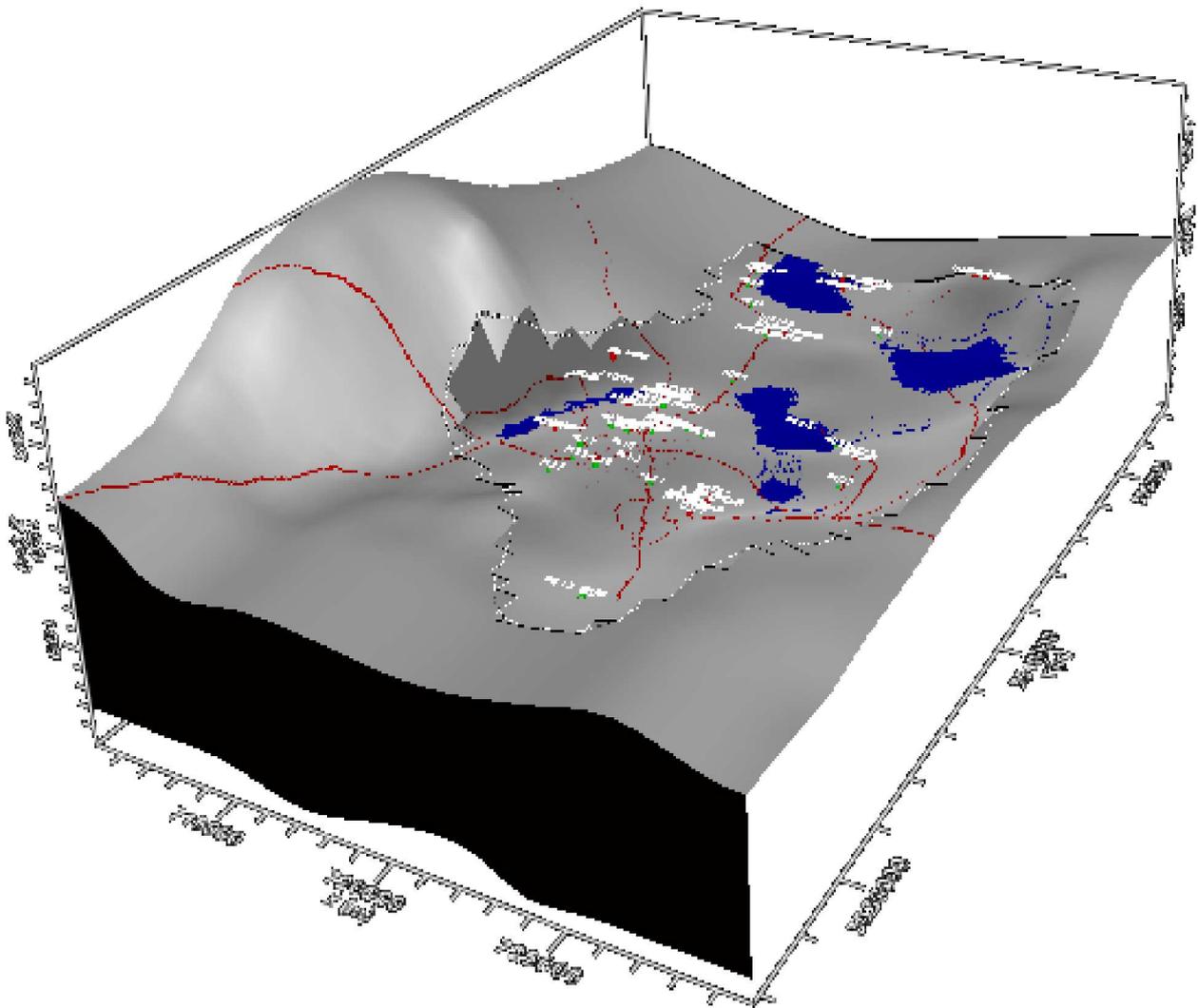


Fig. V-8 : Modèle 3D du domaine modélisé

V.7 conclusion

Malgré le manque et la non fiabilité des données recueillies, nous avons pu construire un modèle qui représente l'écoulement des eaux de la nappe phréatique dans la région de Ouargla, d'une façon assez acceptable, et qui nous a renseigné sur les facteurs régissant le phénomène de la remontée, ainsi nous avons décelé le rôle important, que joue la zone chotteuse dans l'équilibre de bilan hydrique de la nappe, alors nous avons abouti à la meilleure variante voir fig.V-3, avec un coefficient de corrélation égale à 0.81, et l'RMS est 15.95%

Le dôme piézométrique au-dessous de la zone urbaine et la palmeraie est un phénomène constant, du à la recharge, ce qui favorise l'écoulement radial de ses zones vers le Sebkhia périphérique, et qui dit écoulement dit : fluctuation permanent de la surface libre de la nappe, ce qui déstabilise les ouvrages en dessus, et vu la nature de sol (sable meuble en générale), alors nous pouvons conclure que la construction dans cette zone est un mauvais choix qu'il faut remédier en commençant par édifier les nouvelles constructions hors la cuvette.

En fin pour que le modèle devienne plus fiable, il faut compléter ce qui suit :

- Définir avec exactitude l'allure de substratum de la nappe, en réalisant des piézomètres profonds. et déterminé les caractéristiques hydrodynamiques avec beaucoup de précision.
- Revoir le nombre et la répartition des piézomètres (au moins un piézomètre par maille).
- Etudier la possibilité de contact de la nappe phréatique avec les nappes profondes. Introduire le réseau de drainage dans le modèle.

Conclusion générale

A l'issue de ce mémoire et malgré les nombreuses données incertaines initiales l'intérêt d'une modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla et les processus de la recharge.

L'étude climatologique montre que le climat de la région de Ouargla est connu par son aridité marqué notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures très élevées d'autre part. L'évaporation est très élevée et l'évapotranspiration potentielle très importante.

L'étude géologique et hydrogéologique a permis de préciser trois niveaux aquifères distincts (de bas en haut):

- 1- le continental intercalaire : c'est un réservoir contenu dans les formations continentales grés-argileuses du crétacé inférieur.
- 2- Le complexe terminal : c'est un réservoir qui englobe localement les assises perméables du sénonien calcaire et du mio-pliocène sableux.
- 3- La nappe phréatique : formation quaternaire, constituée par des sables et des argiles évaporitiques gypseuses :
 - La profondeur du niveau d'eau de la nappe phréatique est très variable selon les conditions hydrogéologique et topographique. Il varie entre 0 et 10 m ;
 - La nappe phréatique est caractérisée par des fluctuations saisonnières et annuelles ;
 - Les principales sources d'alimentation de cette nappe sont:
 - Les eaux d'irrigation provenant des nappes profondes ;
 - Les fuites à partir des réseaux de distribution et les rejets d'assainissement;
 - Des rejets d'eaux usées d'origine domestique directement dans la nature ;
 - De l'eau excédentaire liée à l'irrigation irrationnelle.
 - L'apport des eaux des anciens forages dont le tubage sont détériorés.
 - Les eaux de ruissellement venant des parties hautes et des apports de crues des trois oueds dans la cuvette (N'Sa, M' Ya, M'Zab).

Conclusion générale

Etant donné les problèmes de salinité rencontrés dans la région, nous avons fait une étude hydro chimique complète de la nappe phréatique. Cette dernière a mis en évidence un faciès chimique : chlorurésodique, qui caractérisent les eaux de cette nappe.

Les résidus secs oscillent entre 2166 et 486010mg/l. Ces eaux sont fortement salées et les eaux sont caractérisées par des conductivités variant entre 3.06 et 1715 mS/cm. Les résultats d'analyses chimiques montrent que les eaux de la nappe phréatique sont très dures.

Le cinquième chapitre présente les résultats de la modélisation hydrodynamique des écoulements souterrains, alors nous avons commencé par la construction de modèle, ainsi nous avons défini le corps de la nappe, sur lequel nous avons fait répartie : la piézométrie initiale, la recharge, l'évapotranspiration, et qui est considéré comme un forage captant la nappe phréatique, tout cela en suivant un logique qui reflète la réalité, par exemple nous avons fait concentré une recharge(800 mm/ an) sur la maille

Puis nous avons passé à l'étape pertinente; le calage de modèle en régime permanent; alors après plusieurs essais et combinaison nous avons obtenu un modèle acceptable, avec un coefficient de corrélation égale à 0.8, et l'RMS est 15.95%.

En fin nous pouvons dire qu'il reste beaucoup à faire pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent écoulements des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla,

Pour cela nous proposons en recommandation les axes de recherches suivantes :

- Estimation de bilan hydrique
- Etude hydrodynamique de l'écoulement des eaux de la nappe phréatique.

Bibliographie

- [01]- **ABDERRAZAK KHADRAOUI, (2004)** : eau et impact environnemental dans le Sahara Algérien.
- [02]- **ALIEV M. (1972)**, structure géologique et perspectives en pétrole et en gaz au Sahara algérien, tome1, sonatrach, Alger, 275 pp.
- [03]- **BEL F. ET DEMARGNE F. (1961)**. Étude géologique du continental terminal. Dossier de la direction de l'énergie et des carburants (ministère de l'industrie et de l'énergie). Alger, 22p, 24.
- [04]- **BELLAOUEUR ABD EL-AZIZ, (2008)**, " étude hydrogéologique des eaux souterraines de la de Ouargla soumises a la remontée des eaux de la nappe phréatique et perspectives de palliatives (Sahara nord-est septentrional – Algérie) ", mémoire magistère, université de Batna, 50p.
- [05]- **BONNARD & GARDEL, (2004)**. La vallée d'Ouargla. Études d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. « Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau ». Mission ii, rapport final, 110 p.
- [06]- **BONNARD & GARDEL. (2003)**. la vallée de Ouargla. Études d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Estimation du rôle des palmeraies a la montée de la nappe dans la cuvette d'Ouargla. Mission iv autres investigations volet agro pédologie, 26p.
- [07]- **CORNET A. (1961)**. Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéote aux officiers du cours préparation aux affaires sahariennes. Service des études scientifiques. birmandries, Alger, 108 p.
- [08]- **CORNET A. (1964)**. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géographie physique et géologie dynamique vol.vi. Fasc.5-72 pp.
- [09]- **DUBIUF J. (1959-1963)**, le climat du Sahara, institut des recherches sahariennes, mémoire hors-série, tome 1 et 2, Alger, 275 pp.
- [10]- **HADJ-ABDERRAHMANE (1998)**. Étude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Rapport interne ANRH, Ouargla, 65p.
- [11]- **MECHRI B., (2008)** " influence de la nappe phréatique sur les ouvrages hydrauliques et génie civil", mémoire magistère, université d'Ouargla, p. 7-9.
- [12]- **NORM M-F.,** classification des matériaux utilisable dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières- afnor, 1992, p. 11-300.

Résumé

Les essais de calculs qui sont appliquées sur la nappe phréatique de Ouargla pour obtenir le modèle des écoulements souterraines ainsi que le bilan hydrogéologique ont données des résultats qui varient d'une étude à autre, ceci est lié à plusieurs causes, et la principale est la détermination précise des volumes d'eau qui entrent ou sortent de la nappe, ce qui nécessite un travail fastidieux et une enquête minutieuse sur le terrain.

C'est dans ce mémoire que s'inscrivent une étude de modélisation de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Malgré le manque et la non fiabilité des données recueillies, nous avons pu construire un modèle qui représente l'écoulement des eaux de la nappe phréatique dans la région de Ouargla, d'une façon assez acceptable, et qui nous a renseigné sur les facteurs régissant le phénomène de la remontée, ainsi nous avons décelé le rôle important, que joue la zone chotteuse dans l'équilibre de bilan hydrique de la nappe, alors nous avons abouti à la meilleure variante, avec un coefficient de corrélation égale à 0.81, et l'RMS est 15.95%

Le dôme piézométrique au-dessous de la zone urbaine et la palmeraie est un phénomène, du à la recharge, ce qui favorise l'écoulement radial de ses zones vers le Sebkhia périphérique, et qui dit écoulement dit : fluctuation permanent de la surface libre de la nappe, ce qui déstabilise les ouvrages en dessus, et vu la nature de sol (sable meuble en générale), alors nous pouvons conclure que la construction dans cette zone est risqué.

Abstract

Testing calculations are applied to groundwater Ouargla for the groundwater flow model and the hydrogeological balance sheet data results that varied from one study to another, this is due to several causes, the main one is accurate determination of the volumes of water into or out of the water, which requires a tedious and meticulous fieldwork.

It is this memory that fit a modeling study of groundwater in the basin of Ouargla. Despite the lack and unreliability of data, we were able to build a model that shows the flow of water from the groundwater in the area of Ouargla, a fairly acceptable way, and briefed us on the factors governing the phenomenon of the rise, so we have identified the important role played by chotteuse area balance water balance of the water, so we ended up with the best alternative, with a coefficient of correlation equal to 0.81, and 'RMS is 15.95%

The piezometric dome below the urban area and the palm is a phenomenon of the charge, which favors the radial flow of its peripheral areas to the Sabkha, and said flow said permanent fluctuation of the free surface groundwater, which destabilizes the articles above, and given the nature of soil (sand furniture general). then we can conclude that the construction in this area is risky.

المخلص

يتم تطبيق العمليات الحسابية من اجل دراسة المياه الجوفية لمدينة ورقلة مع العلم من أن نتائجها تختلف من دراسة إلى أخرى وهذا بسبب صعوبة التحديد الدقيق لحجم المياه الداخلة أو الخارجة للحوض المخزن لها، و من اجل الوصول لنتائج صحيحة يتطلب الأمر عملا ميدانيا شاق. نسعى في هذه المذكرة الى نمذجة مستوى المياه الجوفية لحوض ورقلة و التي تقع على بعد أمتار من سطح الأرض و بالرغم من عدم موثوقية البيانات و قلتها استطعنا أن نبني نموذجا وهذا بمساعدة أداة (logiciel ModFlow) تظهر تغير توزع مستوى المياه و جهات جريانها الذي كان من الجنوب نحو الشمال وصولا إلى المناطق المنخفضة كالسبخات و الشطوط.

نتيجة النمذجة أعطت فارقا ضئيلا بين مستوى المياه المحدد من طرف اداتنا والمتواجد في الطبيعة حيث قدرة ب (0.81) بالنسبة لمعامل الارتباط و(15.95%) من اجل (RMS)