

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université El-Hadj Lakhdar – Batna
Faculté des sciences
Département des sciences de la terre

MEMOIRE DE MAGISTER
En Géologie du Génie Civil et des Milieux Aquifères

Présenté par
BELLAOUEUR Abd El Aziz

Encadré par
MENANI M^{ed} Redha

Titre

Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla
Soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et
Perspectives de solutions palliatives
(Sahara Nord-Est Septentrional - Algérie)

Soutenue publiquement le 08 avril 2008 devant le jury composé de :

1 – MARMI Ramdane	Professeur	Président	Université de Constantine
2 – KHERICI Nacer Eddine	Professeur	Examineur	Université de Annaba
3 – YAHIAOUI Abdelouahab	Docteur CC	Examineur	Université de Batna
4 – MENANI M ^{ed} Redha	Maître de Conf.	Promoteur	Université de Batna

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes très vifs remerciements à tous mes enseignants de la filière géologie de la Faculté des sciences de la terre, université de Constantine, auxquels je dois beaucoup pour ma formation en géologie.

Je remercie particulièrement mon promoteur Monsieur M^{ed} Redha MENANI, qui m'a fait profiter de ses connaissances et de son soutien moral et qui n'a pas hésité un seul instant à m'encourager et pour tous les conseils et l'aide précieux qu'il m'a transmis.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à Monsieur Ramdane MARMI, Professeur à l'université de Constantine pour avoir accepté de juger ce travail et me faire l'honneur de présider mon Jury de mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Monsieur Nacer Eddine KHERICI, Professeur à l'université de Annaba pour avoir accepté d'examiner mon travail et de s'être déplacé pour faire partie du Jury de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur Abdelouahab YAHIAOUI, Docteur CC à l'université de Batna, pour son soutien et ses encouragements. Je le remercie également d'avoir accepté de juger ce travail et de faire partie du Jury de ce mémoire.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'institut de l'hydraulique, université de Ouargla et de la DHW-Ouargla, pour les services qu'ils m'ont rendus.

Par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et toutes celles dont je suis redevable se voient ici vivement remerciés.

INTRODUCTION GENERALE

Devant le développement agricole et industriel d'une part, et la croissance démographique d'autre part, les besoins en eau au Sahara algérien ont augmenté d'une manière très rapide. Ceci a conduit les gestionnaires des ressources en eau à prospecter et réaliser plus de forages, de puits et d'ouvrages hydrauliques.

Ce développement rapide a entraîné des problèmes énormes ces dernières années, relatifs principalement à la remontée et l'évacuation des eaux des nappes phréatiques, aux eaux d'assainissement, et à l'abaissement de l'artésianisme des nappes profondes.

La région de Ouargla a été touchée directement par ce problème. En effet plusieurs facteurs ont facilité la remontée et la stagnation des eaux en surface, parmi ces facteurs, on peut citer :

- Exploitation des nappes artésiennes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT) sans contrôle de manière générale dont les débits viennent recharger la nappe superficielle relevant ainsi son niveau piézométrique,

- Augmentation des rejets urbains et industriels dont l'évacuation hors des limites de la ville est problématique du fait de sa situation en fond de cuvette. Ces volumes d'eau, de surcroît non traitée, en s'infiltrant dans la nappe phréatique, contribuent au relèvement de son niveau piézométrique tout en la polluant.

Le phénomène de la remontée des eaux a pris des dimensions tel que les conséquences sont graves sur l'environnement, l'agriculture... .

L'objectif de ce travail consiste à identifier et étudier les différents paramètres qui contribuent à ce phénomène. Ainsi que de rechercher des solutions palliatives pour les rejets urbains et industriels de la ville de Ouargla.

Dans l'exposé de ce travail, l'étude géologique permettra :

- de faire ressortir les formations susceptibles de constituer des niveaux aquifères;
- de définir leurs étendues et géométries.

Sur la base des données hydro climatologiques, un essai de bilan hydrologique global sera mené à l'échelle de la cuvette.

L'étude hydrogéologique détaillée permet de localiser les couches aquifères aux différentes profondeurs, leur piézométrie et leur relation avec les eaux de surface.

Une dernière partie sera axée sur la qualité des eaux souterraines et de surface.

A l'appui de cette phase d'étude, il nous a été possible d'envisager :

- Hydro géologiquement : des actions recommandées pour contrôler le niveau de la nappe phréatique;
- Et hydro chimiquement : des observations relatives à la protection des ressources en eau.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	2
Chap.1 : CONTEXTE GENERAL	
1.1 – GEOGRAPHIE	12
1.1.1 – Localisation géographique et limites	12
1.1.2 – Géomorphologie et hydrographie	14
1.2 – GEOLOGIE	16
1.2.1 – Cadre géologique et tectonique régional	16
1.2.2 – Cadre géologique local	22
1.2.2.1 – Introduction	22
1.2.2.2 – Lithostratigraphie.....	23
1.2.3 – Paléogéographie	28
1.3 – HYDRO-CLIMATOLOGIE	30
1.3.1 – Introduction	30
1.3.2 – Analyse climatique	31
1.3.2.1 – La température.....	31
1.3.2.1.1 – La température moyenne annuelle	31
1.3.2.1.2 – La température moyenne mensuelle	31
1.3.2.1.3 – Les températures extrêmes	31
1.3.2.2 – L'humidité de l'air	33
1.3.2.3 – L'insolation	35
1.3.2.4 – Le vent	35
1.3.2.5 – La pluviométrie	36
1.3.2.5.1 – La pluviométrie moyenne annuelle	36
1.3.2.5.2 – La pluviométrie mensuelle	37
1.3.2.5.3 – La pluviométrie journalière.....	38
1.3.3 – L'évaporation et l'évapotranspiration	39
1.3.3.1 – L'évaporation	39
1.3.3.1.1 – Mesures de l'évaporation à partir d'une surface libre	39
1.3.3.1.2 – Mesures de l'évaporation à partir de surfaces poreuses	40
1.3.3.2 – L'évapotranspiration	42
1.3.3.2.1 – Estimation de l'évapotranspiration	43
1.3.3.3 – Comparaison	48
1.3.3.4 – Bilan hydrique	49
1.3.4 – Le bilan hydrologique	52
1.3.4.1 – Introduction	52
1.3.4.2 – Les éléments d'équation du bilan d'eau	52
1.3.4.3 – Le bilan.....	56
1.3.5 – Conclusion sur le climat	57

Chap.2 : HYDROGEOLOGIE

2.1 – LE SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL...	59
2.1.1 – Introduction	59
2.1.2 – Le Continental Intercalaire	60
2.1.2.1 – Géométrie du Continental Intercalaire.....	62
2.1.2.2 – Piézométrie du Continental Intercalaire.....	62
2.1.2.3 – Exploitation du Continental Intercalaire.....	64
2.1.2.4 – Conclusion	66
2.1.3 – Le Complexe Terminal	67
2.1.3.1 – Piézométrie du Complexe Terminal	69
2.1.3.2 – Exploitation du Complexe Terminal.....	71
2.1.3.3 – Conclusion.....	73
2.2 – LA NAPPE PHREATIQUE	74
2.2.1 – Introduction	74
2.2.2 – Etude géophysique.....	75
2.2.2.1 – Introduction	75
2.2.2.2 – Interprétation des coupes géo électriques.....	77
2.2.3 – Etude piézométrique de la nappe phréatique.....	81
2.2.3.1 – La piézométrie avant 1956.....	81
2.2.3.2 – La piézométrie après 1956.....	81
2.2.3.2.1 – La piézométrie en 1968.....	82
2.2.3.2.2 – La piézométrie entre 1992 et 2002.....	84
2.2.3.2.3 – La piézométrie entre 2002 et 2003.....	86
2.2.3.2.4 – La piézométrie en 2003.....	88
2.2.3.2.5 – La piézométrie en 2007.....	90
2.2.3.2.6 – Profondeur de la nappe en 2007.....	91
2.2.4 – Essai de pompage.....	94
2.2.4.1 – Introduction.....	94
2.2.4.2 – Résultats et interprétations.....	94
2.2.5 – Etude isotopique du "CDTN".....	96
2.2.6 – Conclusion	97
2.3 – ACTIONS RECOMMANDÉES POUR CONTROLER LE NIVEAU DE LA NAPPE PHREATIQUE	98
2.3.1 – Introduction	98
2.3.2 – Actions pour limiter les apports d'eau.....	98
2.3.3 – Actions pour augmenter les évacuations d'eau.....	99

Chap.3 : HYDROCHIMIE

3.1 – INTRODUCTION	102
3.2 – ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	102
3.2.1 – La nappe du Continental Intercalaire	102
3.2.1.1 – Représentation graphique des eaux du Continental Intercalaire	104
3.2.2 – La nappe du Complexe Terminal	105
3.2.2.1 – Représentation graphique des eaux du Complexe Terminal.....	108
3.2.3 – La nappe phréatique	109
3.2.3.1 – Représentation graphique des eaux de la nappe phréatique.....	113
3.3 – OBSERVATION RELATIVE À LA PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU	114
3.3.1 – La nappe phréatique	114
3.3.2 – Les nappes profondes "CT et CI"	116
3.3.2.1 – La nappe du Continental Intercalaire.....	116
3.3.2.2 – La nappe du Complexe Terminal	117
CONCLUSION GENERALE	119
BIBLIOGRAPHIE	124
ANNEXES	127
Annexe.1.....	128
Annexe.2	130
Annexe.3	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. 1-1 : Températures moyennes mensuelles	31
Tableau. 1-2 : Températures extrêmes.....	32
Tableau. 1-3 : Valeurs caractéristiques de la température... ..	33
Tableau. 1-4 : Humidité moyenne mensuelle.....	33
Tableau. 1-5 : Insolation moyenne mensuelle.....	35
Tableau. 1-6 : Vitesse moyenne mensuelle du vent	35
Tableau. 1-7 : Pluviométrie mensuelle	37
Tableau. 1-8 : Périodes de retour des pluies journalières	39
Tableau. 1-9 : Evaporation Piche et Bac classe A	42
Tableau. 1-10 : Etp selon Turc	44
Tableau. 1-11 : Etp selon Thornthwaite	45
Tableau. 1-12 : Etp selon Blanney-Criddle et Penman	47
Tableau. 1-13 : Bilan hydrique avec l'Etp de Thornthwaite.....	51
Tableau. 1-14 : Classification des surfaces de la cuvette.....	52
Tableau. 1-15 : Evaporation bac corrigée.....	55
Tableau. 1-16 : Bilan d'eau de la cuvette.....	56
Tableau. 2-1 : Résultats des essais de pompage.....	94
Tableau. 3-1 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe du Continental Intercalaire, Ouargla.....	103
Tableau. 3-2 : Classification des eaux selon Stabler, nappe du Continental Intercalaire, Ouargla 2007.....	104
Tableau. 3-3 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe du Complexe Terminal, Ouargla 2007.....	106
Tableau. 3-4 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe du Complexe Terminal, Ouargla 2005.....	107
Tableau. 3-5 : Classification des eaux selon Stabler, nappe du Complexe Terminal, Ouargla 2007.....	109
Tableau. 3-6 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe phréatique, Ouargla nord 2007.....	109
Tableau. 3-7 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe phréatique, Ouargla sud 2007.....	110
Tableau. 3-8 : Classification des eaux selon Stabler, nappe phréatique, Ouargla 2007.....	114

LISTE DES FIGURES

Fig. 1-1 : Carte de situation géographique.....	12
Fig. 1-2 : Délimitation de la cuvette de Ouargla	13
Fig. 1-3 : Coupe géomorphologique schématique de la vallée de Ouargla.....	14
Fig. 1-4 : Relief de la région de Ouargla	16
Fig. 1-5 : Origine des sables du Continental Intercalaire	18
Fig. 1-6 : Carte géologique régionale	21
Fig. 1-7 : Colonne stratigraphique synthétique	22
Fig. 1-8 : Colonne stratigraphique du sondage J.10-580.....	25
Fig. 1-9 : Colonne stratigraphique du sondage J.10-816.....	27
Fig. 1-10 : Carte géologique locale	28
Fig. 1-11 : Variation des températures moyennes mensuelles.....	32
Fig. 1-12 : Variations de l'humidité	34
Fig. 1-13 : Carte en isohyètes moyennes annuelles du Sahara algérien	37
Fig. 1-14 : Hauteurs moyennes mensuelles de la précipitation.....	38
Fig. 1-15 : Bac classe A	40
Fig. 1-16 : Le Piche	41
Fig. 1-17 : Variation de l'évaporation	42
Fig. 1-18 : Variations de l' Etp	48
Fig. 2-1 : Délimitation du Système Aquifère du Sahara Septentrional	60
Fig. 2-2 : Coupe hydrogéologique transversale du Continental Intercalaire	62
Fig. 2-3 : Carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire	64
Fig. 2-4 : Rabattements 2000-2050 au Continental Intercalaire	66
Fig. 2-5 : Coupe hydrogéologique transversale du Complexe Terminal	68
Fig. 2-6 : Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal.....	70
Fig. 2-7 : Carte piézométrique du Complexe Terminal dans la cuvette de Ouargla	71
Fig. 2-8 : Rabattements 2000-2050 au Complexe Terminal.....	73
Fig. 3-1 : Plan de situation des sondages électriques.....	76
Fig. 3-2 : Coupe géo électrique selon le profil V.....	77
Fig. 3-3 : Coupe géo électrique selon le profil R.....	77
Fig. 3-4 : Coupe géo électrique selon le profil N.....	78
Fig. 3-5 : Coupe géo électrique selon le profil D.....	78
Fig. 3-6 : Carte iso résistivité.....	79
Fig. 3-7 : Carte isobathe du mur de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla.....	80
Fig. 3-8 : Coupe hydrogéologique de la nappe phréatique en 1968	82
Fig. 3-9 : Carte piézométrique de la nappe phréatique en 1968.....	83
Fig. 3-10 : Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla , période 1992-2002.....	85
Fig. 3-11 : Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla, période 2002-003.....	87
Fig. 3-12 : Carte piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla en 2003.....	89
Fig. 3-13 : Carte piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla en 2007.....	91

Fig. 3-14 : Carte de profondeur de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla en 2007.....	93
Fig. 3-15 : Répartition de la transmissivité de la nappe phréatique, Ouargla 2003.....	95
Fig. 4-1 : Carte de minéralisation totale des eaux, nappe du Continental Intercalaire, Ouargla 2007.....	103
Fig. 4-2 : Diagramme Schoeller-Berkaloff d'analyse des eaux, nappe du Continental Intercalaire, Ouargla 2007.....	105
Fig. 4-3 : Carte de minéralisation totale des eaux, nappe du Complexe Terminal, Ouargla 2007.....	107
Fig. 4-4 : Diagramme Schoeller-Berkaloff d'analyse des eaux, nappe du Complexe Terminal, Ouargla 2007.....	108
Fig. 4-5 : Carte de minéralisation totale des eaux, nappe phréatique, Ouargla 2007.....	111
Fig. 4-6 : Carte des teneurs en nitrates des eaux, nappe phréatique, Ouargla 2003.....	112
Fig. 4-7 : Diagramme Schoeller-Berkaloff d'analyse des eaux, nappe phréatique, Ouargla 2007.....	113
Fig. 4-8 : Profil schématique d'une culture traditionnelle en ghout.....	115
Fig. 4-9 : Profil schématique d'une culture irriguée à partir de la nappe phréatique.....	115
Fig. 4-10 : Profil schématique d'une culture irriguée à partir de nappes profondes.....	116

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ABHS	Agence de Bassin Hydrographique – Sahara
AEP	Alimentation en Eau Potable
AGEP	Agence Nationale de l'Eau Potable et Industrielle et de l'Assainissement
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
CDARS	Commissariat au Développement Agricole des Régions Sahariennes
CDTN	Centre de Développement des Techniques Nucléaires
CI	Continental Intercalaire
CT	Complexe Terminal
DHW	Direction de l'Hydraulique de la Wilaya
DSA	Direction des Services Agricoles
Etp	Evapotranspiration potentielle
Etr	Evapotranspiration réelle
ENA.GEO	Entreprise Nationale de Géophysique
ERESS	Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional – Unesco 1972
FAO	Food & Agriculture Organization – Rome
INSID	Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage
ITAS	Institut Technologique d'Agronomie Saharienne (Ouargla)
ITDAS	Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne
LTPS	Laboratoire des Travaux Publics de Sud
ONA	Office National de l'Assainissement
ONM	Office National de la Météorologie
OSS	Observation du Sahara et du Sahel
PDGDRS	Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes
RNS	Régions Naturelles Sahariennes
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional

Chap.1 :

CONTEXTE GENERAL

- GEOGRAPHIE
- GEOLOGIE
- HYDRO-CLIMATOLOGIE

CONTEXTE GENERAL

1.1 – GEOGRAPHIE :

1.1.1 – Localisation géographique et limites :

La région de Ouargla de par sa position géographique centrale et de sa proximité avec les bassins pétroliers et gaziers s'installe progressivement comme le centre administratif, technique et industriel du territoire saharien (fig.1-1).

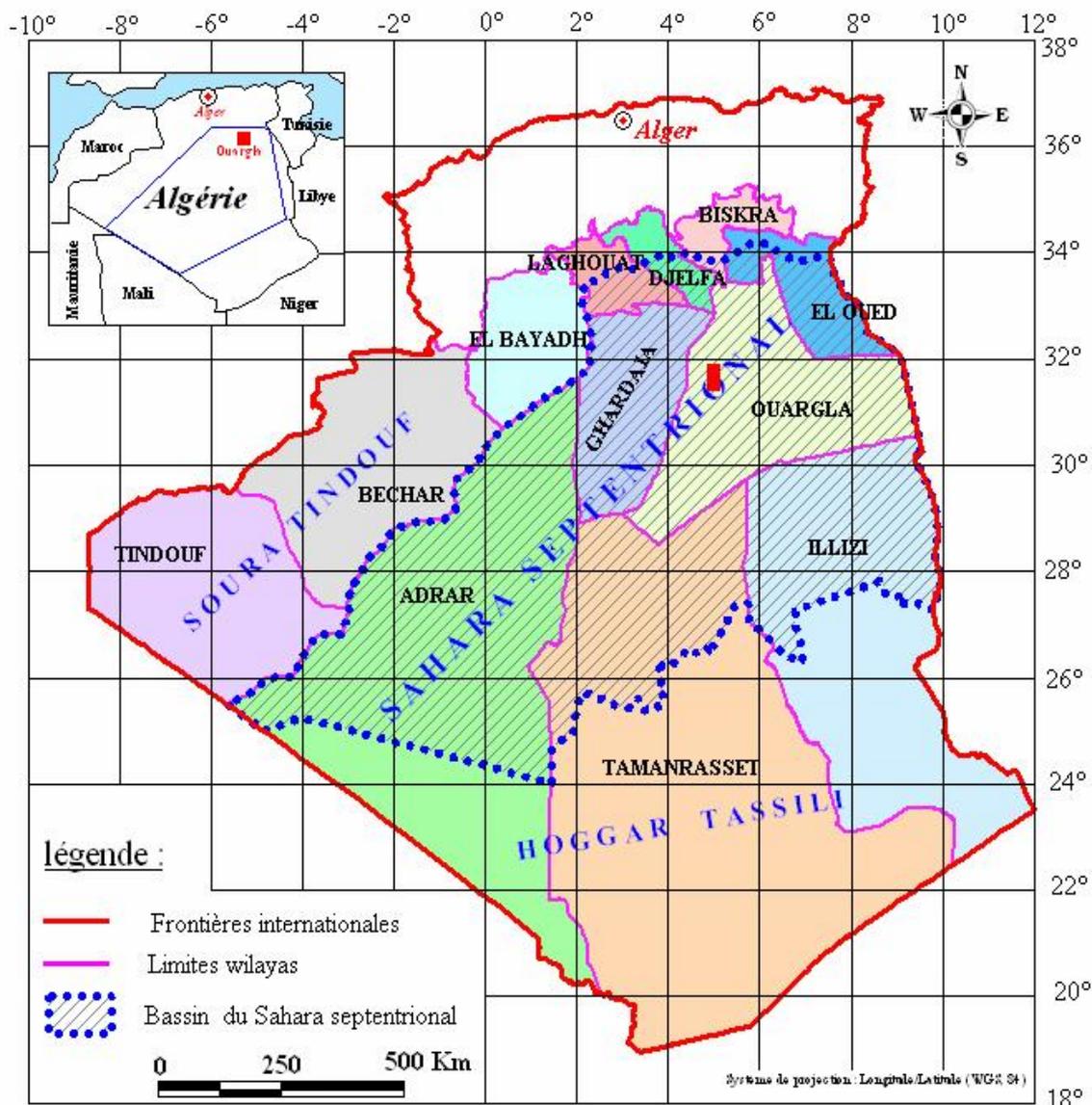


Fig. 1-1 : Carte de situation géographique

La ville de Ouargla est située dans une dépression (cuvette) qui inclut les agglomérations de Ouargla, N'Goussa, Rouissat, Aïn El Beïda et Sidi Khouïled.

Cette dépression ou cuvette s'étend entre les coordonnées (UTM, Clarke 1880) : X = 710 000 ; Y = 3 530 000 et
X = 730 000 ; Y = 3 600 000.

Elle présente une superficie totale de l'ordre de 95 000 ha qui s'étale sur une longueur d'environ 55 km orientée sud-ouest / nord-est et limitée :

- Au Nord par Sebket Safioune;
- À l'Est par les ergs de Touil et Arifdji;
- Au Sud par les dunes de Sedrata;
- À l'Ouest par le versant est de la dorsale du M'Zab (fig.1-2).

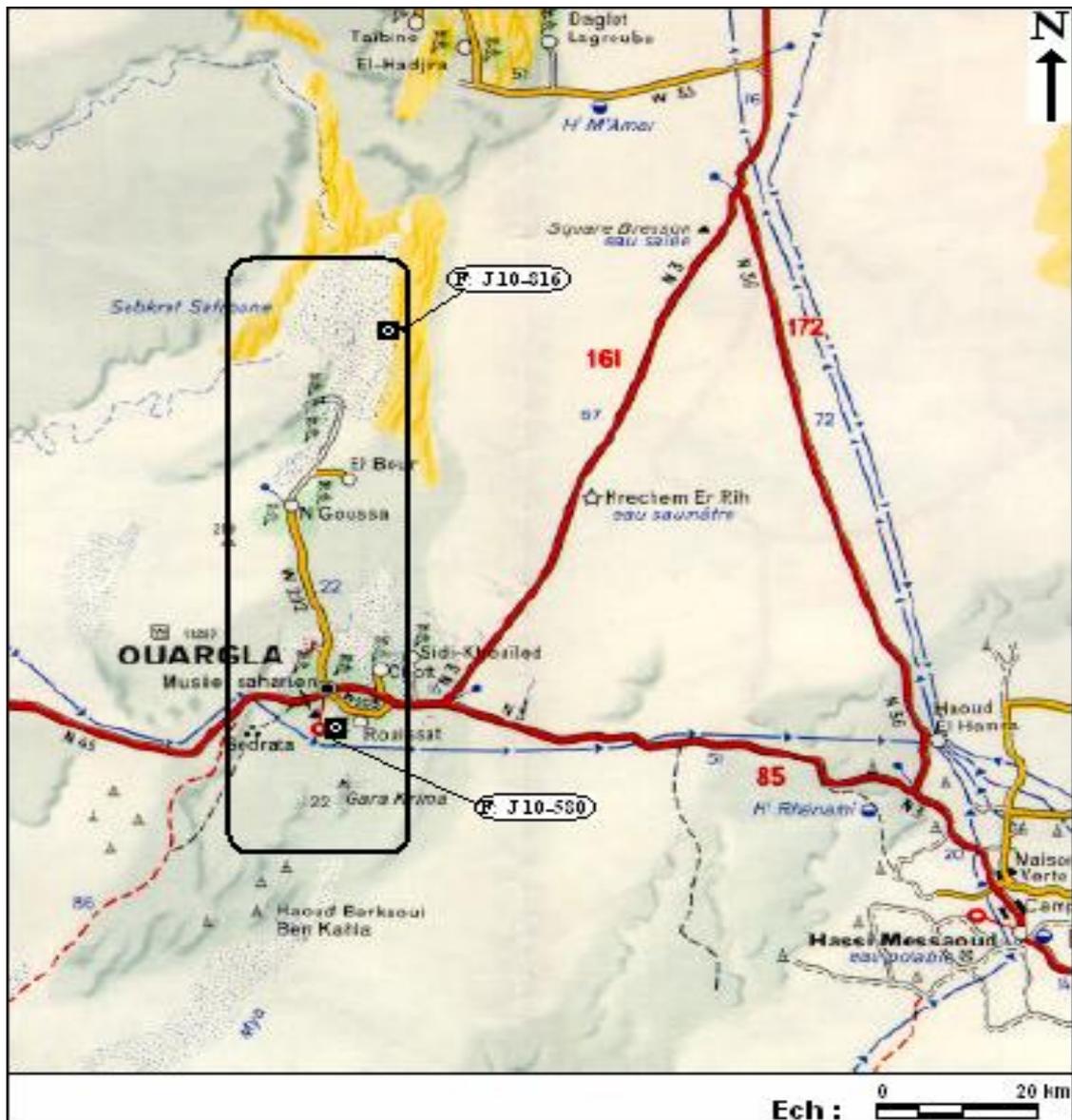


Fig.1-2 : Délimitation de la cuvette de Ouargla

1.1.2 – Géomorphologie et hydrographie :

L'étude géomorphologique de la région fait apparaître les éléments suivants (fig.1-3 et 4) :

- La *hamada Mio-Plio-Quaternaire* (plateau où affleurent de grandes dalles rocheuses) : C'est une formation continentale détritique qui forme un plateau dont l'altitude moyenne est de 200 m. Ce plateau s'abaisse légèrement d'Ouest en Est où il est très fortement érodé et ne laissant que quelques buttes témoins appelées « goure ».

- Les *glacis* sur les versants ouest de la cuvette s'étagent du plus ancien au plus récent, d'Ouest en Est sur quatre niveaux de 200 à 140 m d'altitude. Les glacis situés à 180 et 160 m se caractérisent par des affleurements du substrat gréseux du Mio-Pliocène. L'Est de la cuvette est un vaste glacis alluvial à sable grossier situé à 150 m d'altitude.

- Les *sebkhas* : marécages salés, le plus souvent asséchés, occupant le fond d'une dépression. Le *chott* (ou *sebkha*) constitue le point le plus bas. Il est constitué de sable siliceux et/ou gypseux à croûte gypseuse de surface et de subsurface. Le bas fond se caractérise par une nappe phréatique permanente très peu profonde de 1 à 5 m. En aval de Ouargla, diverses *sebkhas* alternent avec des massifs dunaires jusqu'à Sebkheth Safioune qui est à 103 m d'altitude point le plus bas de la région.

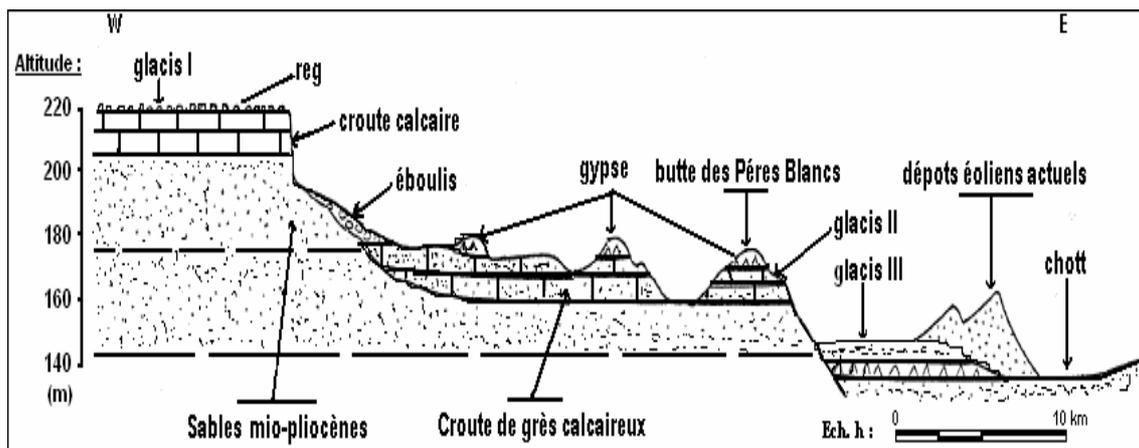


Fig. 1-3 : Coupe géomorphologique schématique de la vallée de Ouargla

Le sous-sol est formé de sables dunaires reposant sur des alluvions de l'oued avec localement des formations gréseuses indurées.

Dans la région de Ouargla, seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent. Ils sont recouverts par endroits de formations de dépôts datant du Quaternaire composés des ergs et des dunes.

La cuvette est creusée dans les formations continentales du Mio-Pliocène. Il s'agit de sables rouges et de grès tendres à stratifications entrecroisées, avec nodules calcaires, entrecoupés de niveaux calcaires ou gypseux que l'on voit affleurer sur ses bords est et ouest.

Après son creusement, la cuvette a été occupée par un lac au fond duquel se sont déposés des sédiments fins argileux ou d'origine chimique, craies, calcédoine et évaporites. Des oueds, descendant de la dorsale "mzabite" à l'Ouest (oueds M'Zab, N'Sa et Z'Gag) ou du Tademaït (O. Mya) au Sud, se déversaient dans ce lac en abandonnant leurs alluvions en larges cônes (Ank Djemel pour l'Oued M'Zab) ou barrant la vallée (O. N'Sa et Z'Gag au Nord de Sebkhet Safioune).

Avec la fin de la dernière grande période pluviale, le lac s'est retiré. L'O. Mya n'a pu qu'épisodiquement couler de sebkha en sebkha sans beaucoup de vigueur, son cours étant complètement coupé par les reliefs situés à l'aval de Sebkhet Safioune où un lac se formait à nouveau à chaque période un peu pluvieuse.

Les alluvions de O. N'Sa ferment la vallée au Nord de Sebkhet Safioune, empêchant un écoulement vers l'aval. Cette fermeture s'est rompue dans sa partie est et les eaux du lac ont pu s'échapper vers le N-E, en direction de Touggourt et du Chott Melrhir.

Actuellement, les plus grandes crues de l'O. Mya s'arrêtent à 200 km à l'amont de Ouargla. Celles de l'O. M'Zab atteignent Sebkhet Safioune deux fois par siècle, alors que celles de l'O. N'Sa semblent plus fréquentes.

Les travaux des archéologues confirment que la dépression de l'O. Mya 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.

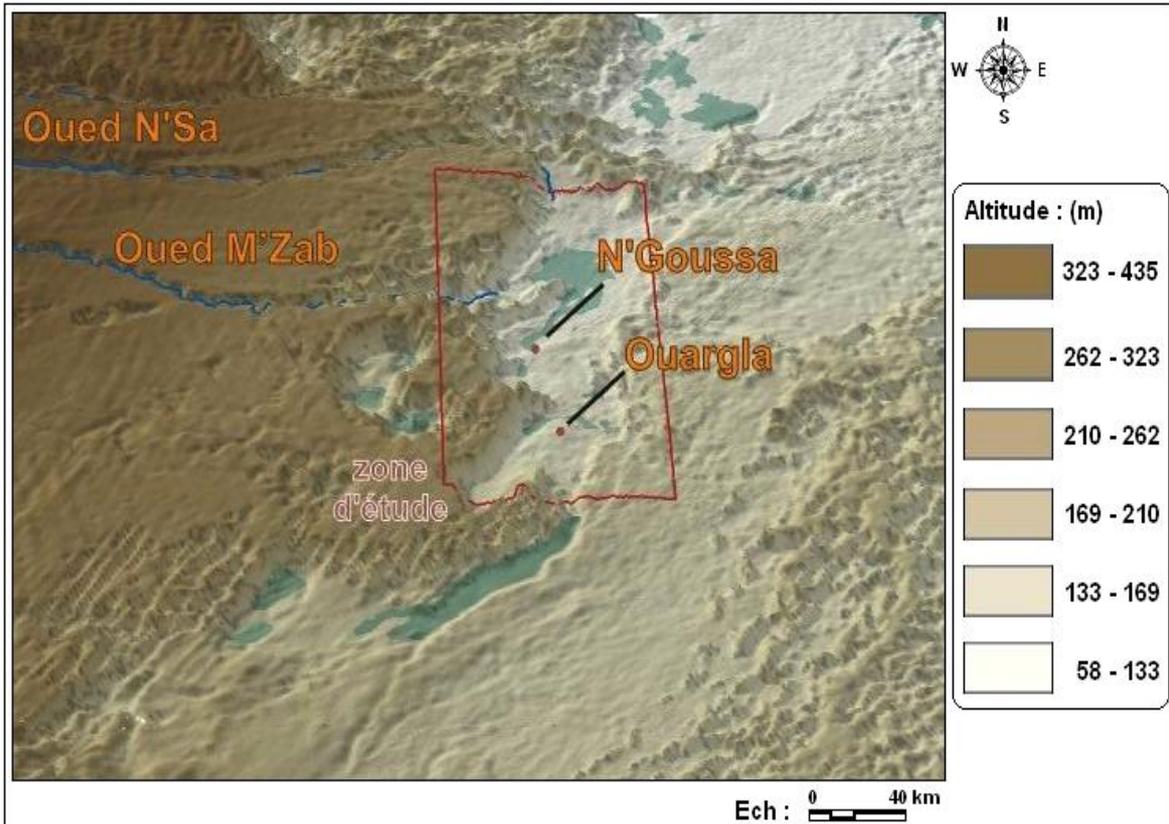


Fig. 1-4 : Relief de la région de Ouargla (BG, 2004)

1.2 – GEOLOGIE :

1.2.1 – Cadre géologique et tectonique régional : (Fig. 1-6)

De nombreux auteurs ont travaillé et publié des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Sahara Septentrional, aussi bien dans le cadre de la géologie pétrolière, que par des chercheurs universitaires, parmi eux nous citons les plus connus : G. Busson, 1970; G. Conrad, 1969; Dubief, 1959.

La région de Ouargla fait partie du bassin sédimentaire du Sahara Nord-Est Septentrional, dont les grands traits de la géologie sont :

- a- Au sud de l'accident Sud atlasique qui sépare la zone mobile maghrébine du reste de l'Afrique occidentale, le bouclier rigide est formé de terrains sédimentaires et éruptifs, plissés et métamorphisés.
- b- Le *Paléozoïque* du sahara correspond à des dépôts de climat désertique périglaciaire.

Autour des affleurements du socle, s'étagent des couches gréseuses et schisteuses des Tassilis. Les mouvements hercyniens du Permo-Carbonifère, vont provoquer l'érosion du bouclier. Il s'installe alors une grande période continentale avec pénéplation post-hercynienne pendant le Trias et le Jurassique et formation d'un manteau de grès, de sable et d'argile, qui va constituer le "*Continental Intercalaire*".

c- Le *Trias* : Busson (1970) souligne la grande variabilité de faciès et d'épaisseur du Trias. Il est divisé en grandes unités lithologiques distinctes qui peuvent être : salifères, argileuses, argilo-gréseuses ou carbonatées. L'épaisseur de ces différentes formations varie principalement là où s'intercalent des bancs salifères. L'épaisseur du Trias argilo-gréseux inférieur augmente vers le Nord-Ouest (150-180 m). Elle diminue dans les zones de hauts-fonds (Hassi Messaoud et R. El Baguel). Le Trias salifère présente une grande épaisseur (700 m au N-E de Ghadamès), il atteint 1300 m à H. Messaoud.

d- Le *Jurassique* :

* Le *Jurassique inférieur et moyen* (Lias-Dogger) comprend principalement des couches évaporitiques constituées essentiellement de sel, d'anhydrite et d'argiles auxquelles se superposent des couches franchement marines et qui se présentent sous forme de calcaires et argiles avec des bancs d'anhydrite.

* Le *Jurassique moyen* caractérisé par une transgression couvrant tout le bassin du Grand Erg Oriental et les dépôts y sont épais.

* Le *Jurassique supérieur* est caractérisé par une permanence relative du régime marin avec des sédiments de milieux confinés. Dans la partie occidentale du bassin, le régime marin accuse une certaine régression à l'image de ce qui se passe plus à l'Ouest et vers le Sud.

Le passage du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur se caractérise par des apports terrigènes ayant pour origine les reliefs nourriciers situés au Sud du bassin saharien (Hoggar) (Fig.1-5) (Busson, 1970).

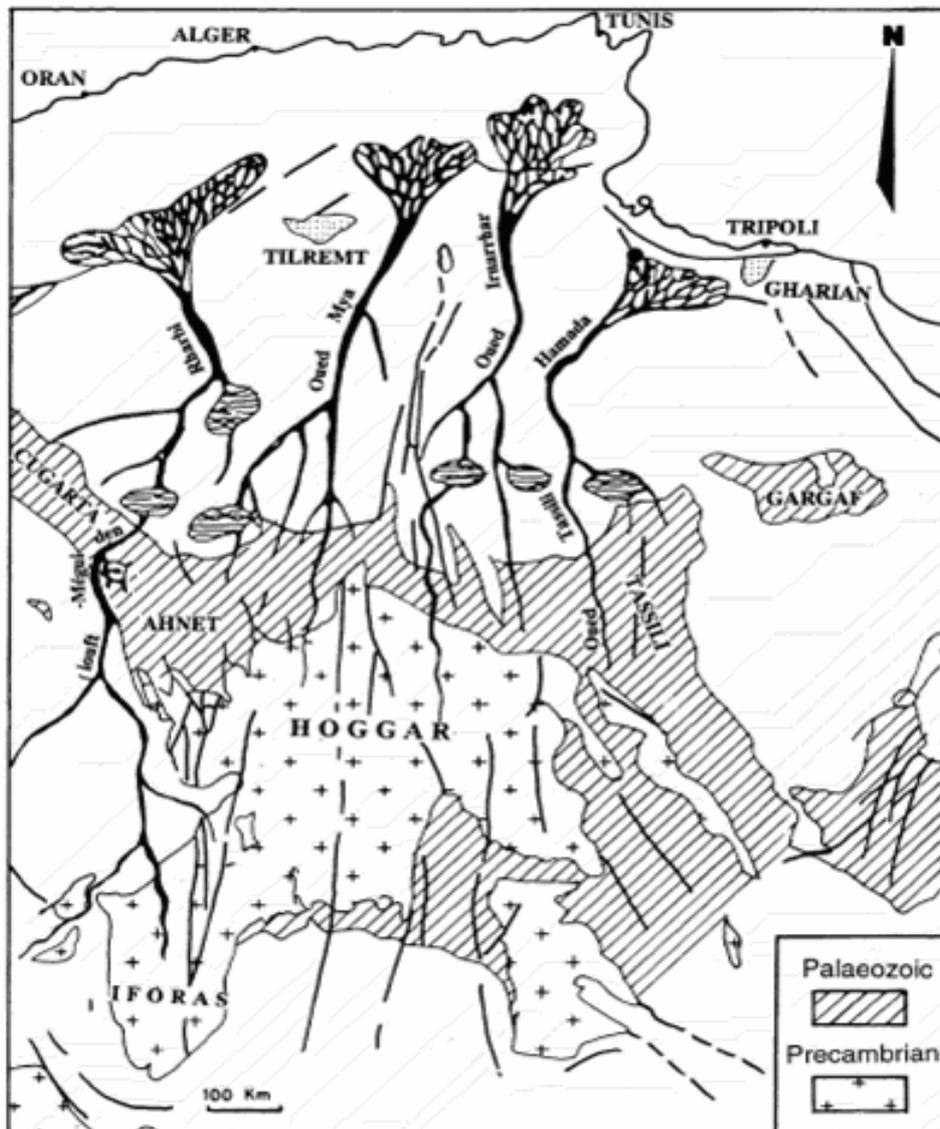


Fig. 1-5 : Origine des sables du "CI" (Ouaja, 2003)

e- Le *Crétacé inférieur* : L'étude des données de sondages (Busson, 1970) a permis de préciser la succession des paléogéographies au cours du Crétacé inférieur. Il est constitué par des couches terrigènes fluvi-délaïques qui sont en contraste lithologique et sédimentaire avec les formations marines du Jurassique supérieur. Il comprend, en partant des formations les plus anciennes :

-- Le Néocomien : comprenant dans le Bas-Sahara des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base. Elles sont surmontées par une alternance de dolomies et d'argiles;

-- Le Barrémien : est caractérisé par un épandage généralisé des formations détritiques du Crétacé inférieur jusque dans le Bas-Sahara. Ces formations se présentent sous forme de grès fins ou grossiers et d'argiles provenant apparemment du Sud (Hoggar) (Fig.1-5). Les intercalations carbonatées sont peu nombreuses et cantonnées au Nord-Est du Sahara algérien;

-- L'Aptien : est un bon repère lithologique dans les sondages. Il est représenté dans la grande partie du Bas-Sahara, par 20 à 30 m en moyenne, de dolomies alternant avec des lits d'anhydrite, d'argiles et de lignite (sédimentation lagunaire);

-- L'Albien : est caractérisé par un remarquable retour de la sédimentation terrigène. Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sus-jacent attribué au Cénomaniens.

On remarque que le changement du régime sédimentaire et l'arrivée en masse de sédiments détritiques s'est produit entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de L'Albien (Fabre, 1976).

f- Le *Cénomaniens* : est formé par une alternance de bancs de dolomie, de calcaire dolomitique, d'argiles et d'évaporites (anhydrite ou sel). Son faciès varie :

-- Au Sud d'Ouargla, les argiles et les évaporites dominent;

-- Au Nord, au contraire, les bancs de calcaire et de dolomie sont majoritaires;

-- De plus, l'épaisseur augmente du Sud vers le Nord (de 50 m dans le Tademaït à 350 m dans le Bas-Sahara).

La présence de nombreux bancs d'évaporites et d'argiles rendent le Cénomaniens imperméable (Bel et Cuche, 1969).

Le *Cénomaniens inférieur à moyen* : est argileux dans le Tinrhert et le Bas-Sahara;

Le *Cénomaniens supérieur* y est calcaire (Busson, 1970).

g- Le *Turonien* : Il se présente sous trois faciès différents, du Sud au Nord :

-- Au Sud du parallèle d'El Goléa, il est calcaro-marneux;

-- Entre El Goléa et Djamaâ, il est essentiellement calcaire;

-- Au Nord de Djamaâ, il est à nouveau calcaro-marneux.

Son épaisseur moyenne varie entre 50 et 100 m. Elle augmente cependant dans la région des chotts où elle dépasse 300 m (Bel et Cuche, 1969).

h- Le *Sénonien* : Il s'individualise en deux faciès :

-- Le *Sénonien inférieur* à sédimentation lagunaire caractérisé par des formations argileuses et salifères à anhydrite, il est très peu perméable (Busson, 1970);

-- Le *Sénonien supérieur* (Sénonien carbonaté) : formation carbonatée perméable.

i- *L'Eocène* : On distingue deux ensembles différents du point de vue lithologique :

À la base :

-- *L'Eocène carbonaté* est formé essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marnes, d'argiles et même d'anhydrite et de marnes. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500 m, l'épaisseur maximum se situant dans la zone du Bas-Sahara.

Au sommet :

-- *L'Eocène évaporitique* est formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les Chotts (Bel et Cuche, 1969).

L'Eocène constitue le dernier épisode marin du Sahara algérien (Busson, 1970).

j- Le *Mio-Plio-Quaternaire* : Le Tertiaire continental du Sahara peut être relativement épais (150 m). Il se présente sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse. Dans le Bas-Sahara, la sédimentation lacustre se présente sous forme de séries sableuses et argileuses connues sous le nom du Continental Terminal (Mio-Pliocène) dont l'épaisseur peut atteindre, dans la région des Chotts algéro-tunisiens, quelques centaines de mètres. On y identifie, dans la région d'O. Rhir, deux niveaux aquifères au sein des sables qui sont séparés par une couche argileuse au milieu (première et deuxième nappe d'O. Rhir). L'ensemble est surmonté par le Plio-Quaternaire argilo-sableux et gypseux qui résulte de la sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes des chotts (Busson, 1970).

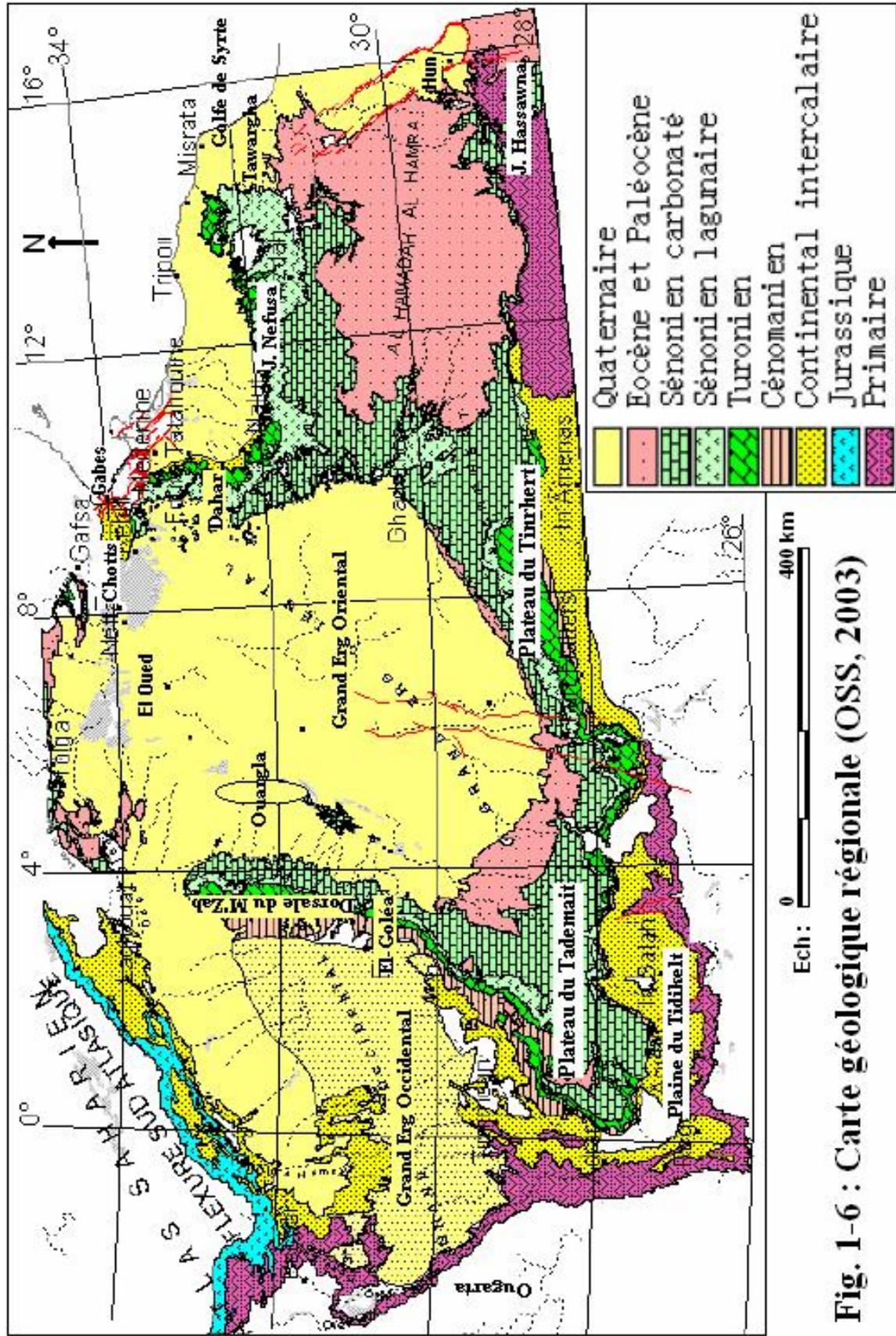


Fig. 1-6 : Carte géologique régionale (OSS, 2003)

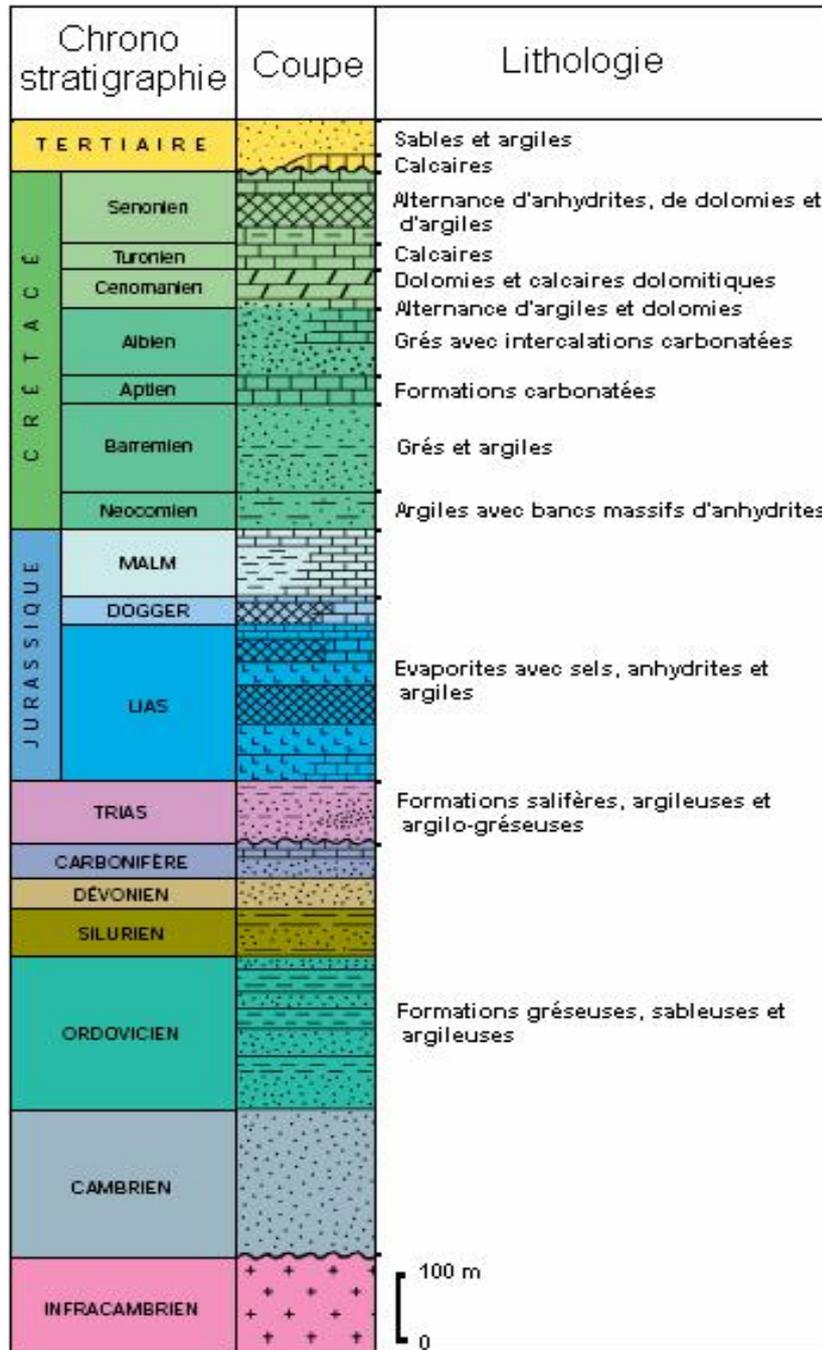


Fig. 1-7 : Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est Septentrional

1.2.2 – Cadre géologique local : (Fig. 1-10)

1.2.2.1 – Introduction : Dans la région de Ouargla seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent, ils sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires (Ergs et Dunes).

1.2.2.2 – Lithostratigraphie :

a- Le *Barrémien* : Capté à partir de 1500 m. Il présente une alternance de grès et d'argiles, avec des intercalations calcaro-dolomitiques ;

b- L'*Aptien* : Il est constitué par la "barre aptienne" dans la région de Ouargla, qui est formée de marnes dolomitiques, gris, verte, brunes ou blanches et de dolomies cristallines. Son épaisseur est variable, généralement inférieure à 50 m;

c- L'*Albien* : Il correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire; Ce sont des grès, argiles et sables (Fig. 1-8). L'épaisseur de ces formations est variable (>400 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 des intercalations de sables grossiers à limons argileux ou carbonatés. On note des passées d'argiles brun-rougeâtres, elles sont même pélitiques et sableuses dans les puits les plus septentrionaux;

d- Le *Vraconien* : L'intercalation albo-cénomaniennne caractérise un épisode dolomitique remarquable entre les grès de l'Albien et les argiles du Cénomanienn, il est formé de :

-- Dolomies et quelques fois de calcaires dolomitiques parfois argileux contenant de rares débris de mollusques, les épaisseurs y sont de 50 à 100 m;

-- Argiles et marnes dolomitiques et des éléments détritiques;

e- Le *Cénomanienn* : 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-rougeâtres ou gris-verdâtres, son épaisseur varie entre 60 et 80 m. On note aussi quelques passées de calcaires dolomitiques en particulier 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 et de quelques intercalations dolomitiques, son épaisseur est de l'ordre de 70 m;

f- Le Turonien : Il se présente sous la forme d'une dalle "*barre Turonienne*" ayant une épaisseur régulière de l'ordre de 70 m. Il s'agit d'une formation essentiellement calcaire : calcaire poreux blanc, parfois grisâtre, pulvérulent, quelquefois dolomitique, de calcaire beige dolomitique et de calcaire fin légèrement dolomitique;

g- Le *Sénonien* : Il est constitué de deux formations lithologiques superposées : (Fig. 1-8)

-- Le *Sénonien lagunaire* à la base qui est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel. Les proportions des ces formations varient d'un point à un autre :

--- L'anhydrite forme des bancs dont l'épaisseur peut atteindre 250 m;

--- La dolomie constitue parfois des barres plus importantes (≈ 60 m);

--- Les niveaux d'argile et de marne ne dépassant généralement pas 120 m d'épaisseur;

-- Le *Sénonien carbonaté* au sommet (200 m environ) : Calcaire blanc, tendre à moyennement dure, par fois crayeux à vacuolaire et passées de marne gris tendre à pâteuse dolomitique;

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

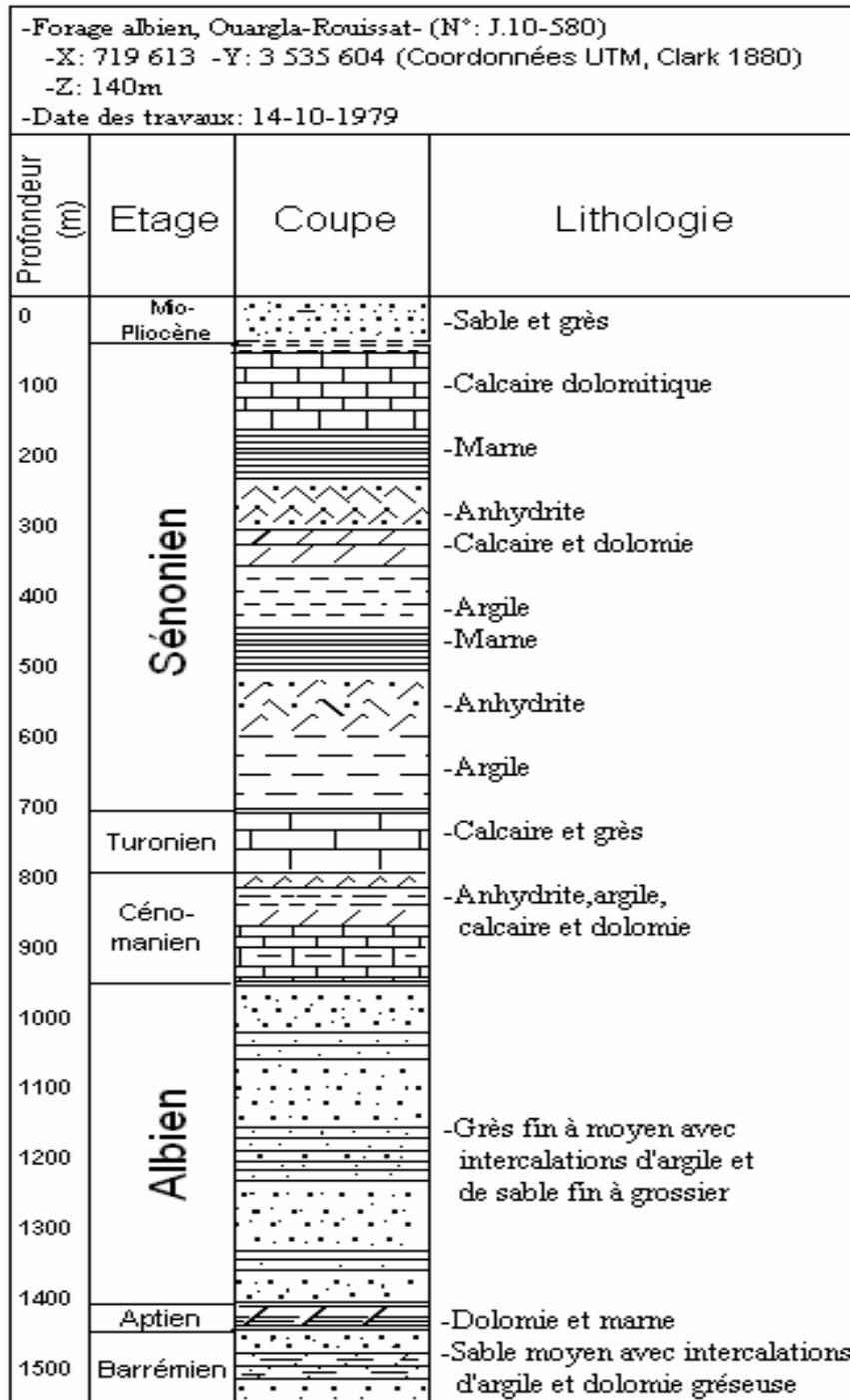


Fig. 1-8 : Colonne stratigraphique du sondage J.10-580

i- Le *Mio-Pliocène* "MP" : Il correspond au Continental Terminal tel qu'il a été défini par C.Kilian (1931). C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles, qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénono-Eocène.

On distingue quatre niveaux différents dans le "MP" à Ouargla qui sont de bas en haut : (Fig. 1-9)

-- Un dépôt argileux peu épais (<10 m) recouvrant dans la partie centrale de la cuvette et suivant une bande Nord-Sud, le Sénono-Eocène;

-- Un niveau grésosableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais (>30 m) et le plus constant;

-- Un niveau argilo-sableux dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Cette couche n'apparaît que dans certains endroits;

-- Un niveau très épais (\approx 30 m) dans la zone des chotts, à sommet affleurant sur de grandes surfaces et souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne);

j- Le *Quaternaire* : À la base, il existe un niveau argilo-gréseux qui se présente comme une croûte ancienne. Le niveau le plus superficiel est constitué de sable éolien parfois gypseux et de produits de remaniement des terrains du "MP".

Les sondages superficiels 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 "MP", c'est le sol le plus pauvre en gypse dans la région. À 10 m de profondeur, il ne présente aucun niveau d'encroûtement. En surface, entre 20 et 70 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, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux et de nebkas associés à une végétation gypsohalophiles. De 10 à 20 cm de profondeur 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. Plus en dessous un tuf présente une teneur de gypse décroissante.

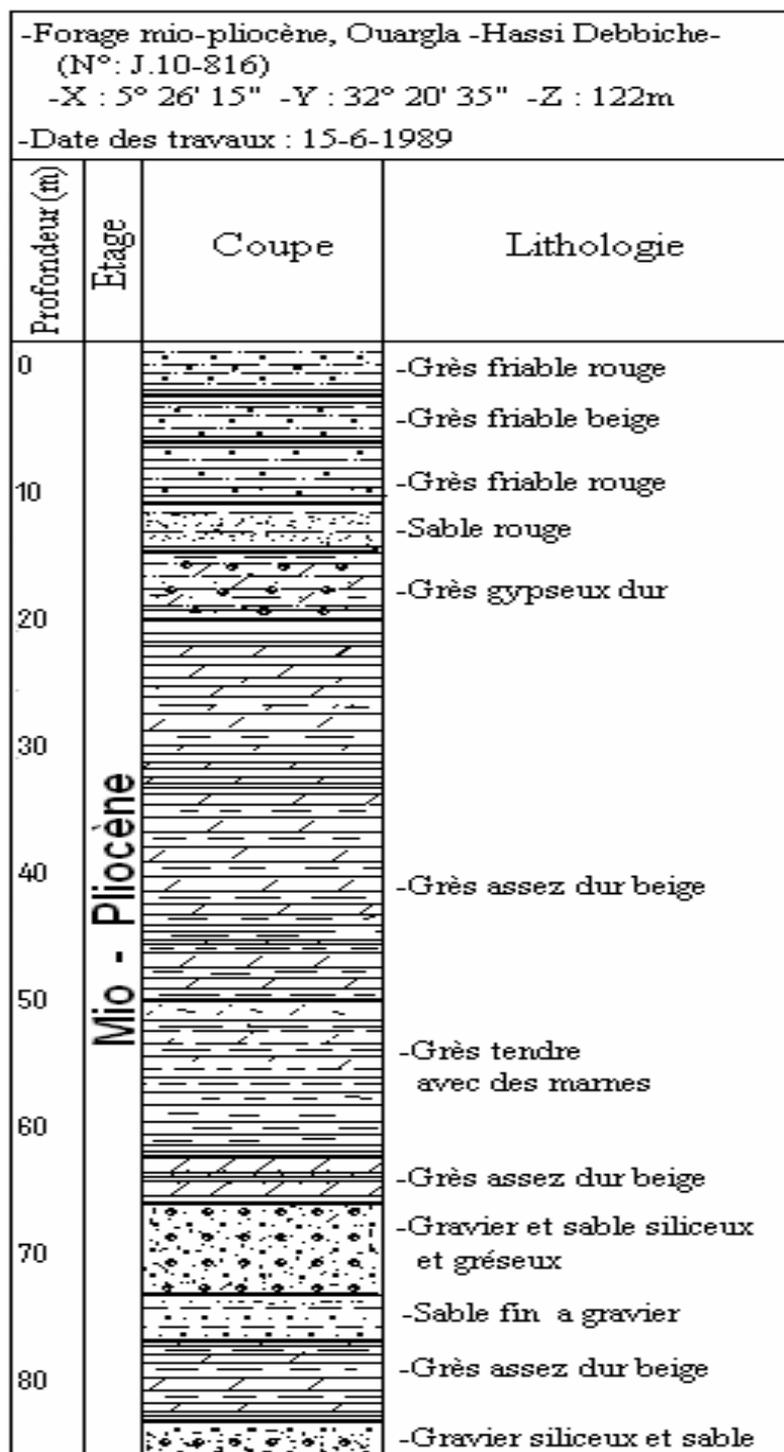


Fig. 1-9 : Colonne stratigraphique du sondage J.10-816

Les Sebkhass sont caractérisées par une salure extrêmement élevée, ces croûtes salines reposent sur des matériaux limono-sableux.

Les dunes sont du sable éolien d'origine gréseux provenant de la Hamada Mio-Pliocène. Elles existent dans les talwegs, sur les bordures des Sebkhass et sur les versants rocheux.

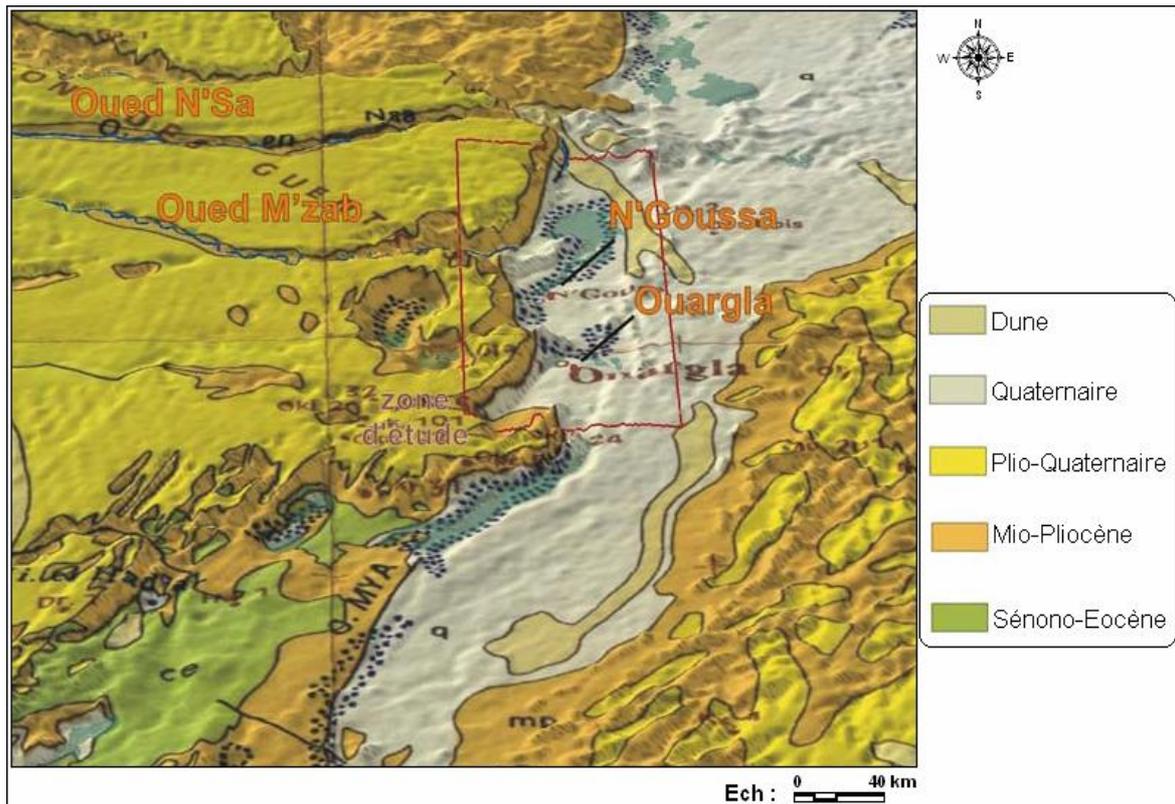


Fig. 1-10 : Carte géologique locale (BG, 2004)

1.2.3 – Paléogéographie :

La vallée de l'O. Mya s'inscrit dans une vaste cuvette sédimentaire occupant, dès le Secondaire, l'emplacement de l'actuel Sahara nord-oriental.

En effet, des mouvements verticaux d'ensemble ont affecté le socle précambrien et primaire et provoqué notamment "l'effondrement progressif de sa partie centrale, suivant un axe passant sensiblement par la tronçon supérieur de la vallée de l'O. Mya ". La base est formée de dépôts marins du Primaire et le toit d'argiles marines du Cénomanién. En effet, au Crétacé supérieur, la mer a envahi le Nord du Sahara dont le lent affaissement se poursuivait.

Les dépôts du Sénonien supérieur, constitués à Ouargla par des calcaires et des marnes, atteignent une épaisseur de 200 m.

Cette puissante série avait été d'abord attribuée au Turonien car on estimait à l'époque que la région de Ouargla, exhaussée à l'Oligocène post-lutécien, avait subi une érosion active faisant disparaître la couche des calcaires éocènes et que le Sénonien se réduisait à des bancs de calcaires épais de 160 à 200 m recouverts en discordance par les dépôts continentaux du Pontien.

C'est à cette même époque que le mouvement de subsidence continu depuis le début de Secondaire, marque un arrêt qui permet le comblement définitif de la cuvette, c'est-à-dire : sur les calcaires et les marnes du Sénonien supérieur ou de l'Éocène moyen, s'est déposée une formation continentale formée principalement de sables qui se sont "déposés et consolidés sous climat semi-aride chaud au Pontien ou au Pliocène inférieur".

Que ce soit par érosion fluviale ou par déflation éolienne, les couches supérieures de la série tertiaire ont disparu du fossé et le remblaiement quaternaire de sables éoliens vient reposer en discordance et irrégulièrement dans la cuvette sur les séries moyennes du Continental Terminal.

1.3 – HYDRO-CLIMATOLOGIE :

1.3.1 – Introduction :

Le climat de la région de Ouargla est un climat 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.

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

La zone d'étude appartient au grand bassin d'Oued Mya, qui est caractérisé par un climat désertique.

Pour cette étude, les séries des données, qui sont à la base de la détermination de différents paramètres climatiques, ont été enregistrées à la station pluviométrique de Ouargla.

Station	Coordonnées		Altitude en m
	X	Y	
Ouargla	05° 19' 22"	31° 57' 17"	136

La température est très élevée en été, avec une moyenne mensuelle du mois le plus chaud (Juillet) qui dépasse 34°C et celle du mois le plus froid (Janvier) est de 11°C;

Les vents sont de vitesse moyenne de l'ordre de 3,8 m/s, cette vitesse est plus élevée aux mois d'Avril, Mai, Juin et Juillet avec plus de 4 m/s et moins élevée durant les mois d'Hiver (2,7 m/s). La direction dominante des vents est SSW-NNE;

La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 35 mm, Mars est le mois le plus pluvieux (7 mm) et Juillet le plus sec (<1 mm);

L'évaporation est très élevée, elle est en moyenne de 114 mm au mois de Décembre et de 403 mm au mois de Juillet, soit de 2884 mm/an.

1.3.2 – Analyse climatique :

1.3.2.1 – La température :

C'est un facteur principal qui conditionne le climat de la région. L'analyse des températures sera faite à partir des données recueillies de l'ONM-Ouargla période (1990-2006).

1.3.2.1.1 – La température moyenne annuelle :

La température moyenne annuelle pour un climat aride comme celui de Ouargla, n'a pas une grande signification. Les plus intéressantes sont les températures moyennes mensuelles et les amplitudes thermiques.

Les valeurs moyennes enregistrées pendant les 16 dernières années, présentent une légère constance de 23°C. Cependant, ces valeurs cachent des valeurs mensuelles "dispersées", (ex : de 11°C en Janvier à 34°C en Juillet, soit 23°C de différence thermique entre les deux mois).

1.3.2.1.2 – La température moyenne mensuelle :

Le tableau ci-dessous récapitule les températures moyennes mensuelles, qui ont été reportées dans la figure 1-11.

Tableau. 1-1 : Températures moyennes mensuelles
(station de Ouargla, 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
T moy (°C)	30	24	16,5	12,5	11,5	14	17,5	21,5	26,5	32	34,5	34	23

On remarque que les températures estivales sont très élevées, avec une moyenne comprise entre 32 et 34°C. Le maximum se situe en Juillet. Pour la température hivernale, elle varie entre 11 et 14°C et le mois de Janvier est le plus froid. Ceci nous amène à dire que la région de Ouargla a un Hiver doux et un Été très chaud.

1.3.2.1.3 – Les températures extrêmes :

Nous indiquons ci-dessous la moyenne mensuelle des maximas et des minimas.

"Les moyennes mensuelles sont considérées par les statisticiens, en tant que données à tendance centrale, c'est-à-dire qu'elles ne donnent qu'une idée sur la situation moyenne des températures".

C'est pourquoi l'étude des températures extrêmes est très importante dans notre région, elle nous renseigne sur le caractère de "dispersion" de ces données.

Tableau. 1-2 : Températures extrêmes (station de Ouargla, 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
T moy max (°C)	37	31	23	19	18	21	25	29	34	39	42,5	42	30
T moy min (°C)	23	17	10	6	5	7	10	14	19	25	26,5	26	16
Ecart (°C)	14	14	13	13	13	14	15	15	15	14	16	16	14

Sur la figure ci-dessous, nous avons tracé les courbes des températures maxima et minima extrêmes.

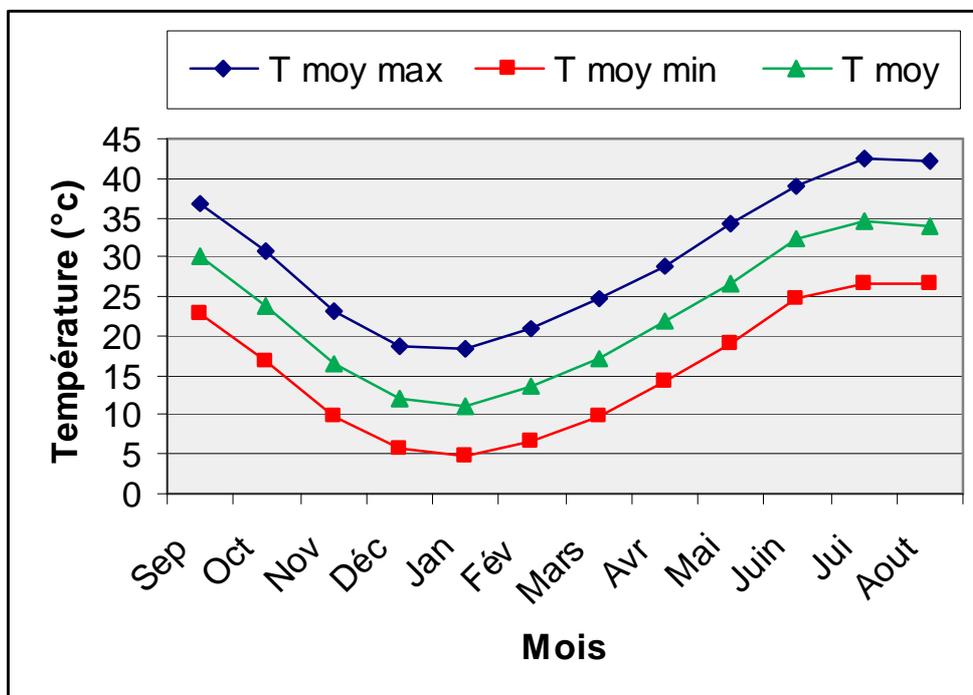


Fig. 1-11 : Variation des températures moyennes mensuelles (station de Ouargla, 1990-2006)

De l'étude de ces courbes, il ressort que :

- Les valeurs de ces températures, sont plus élevées aux mois de Juillet et Août (42°C);
- Pour les températures moyennes des minimas extrêmes, une valeur de 5°C a été signalée. On pourra dire que les plus faibles valeurs se rencontrent en Décembre et Janvier (6-5°C), alors que les plus hautes apparaissent en Juillet et Août (26°C). Ceci est caractéristique de toute la zone septentrionale du Sahara Continental;
- Les écarts de température sont également assez élevés, comme dans tout le Sahara. Au mois de Juillet les variations des valeurs extrêmes ont l'amplitude la plus forte : 26 et 42°C, soit 16°C de différence thermique. Ces variations sont évidemment beaucoup plus fortes lorsque l'on considère non plus la température de l'air mais celle du sol.

Nous disposons sur le tableau ci-dessous les valeurs caractéristiques de la température.

Tableau. 1-3 : Valeurs caractéristiques de la température
(1990-2006)

Température Station	Maximum (Juillet)	Minimum (Janvier)	Moyenne annuelle
Ouargla	42,5°C	5°C	23°C

1.3.2.2 – L'humidité de l'air :

Le degré hygrométrique de l'air (ou humidité relative) c'est le rapport de la tension de vapeur effective à la tension de vapeur saturante dans les mêmes conditions de température et de pression.

Nous avons indiqué dans le tableau 1-4 ci-dessous la moyenne mensuelle de l'humidité mesurée à Ouargla (période 1990 - 2006).

Tableau. 1-4 : Humidité moyenne mensuelle
(station de Ouargla, 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
H (%)	38	50	59	63	63	55	49	41	36	30	27	29	45

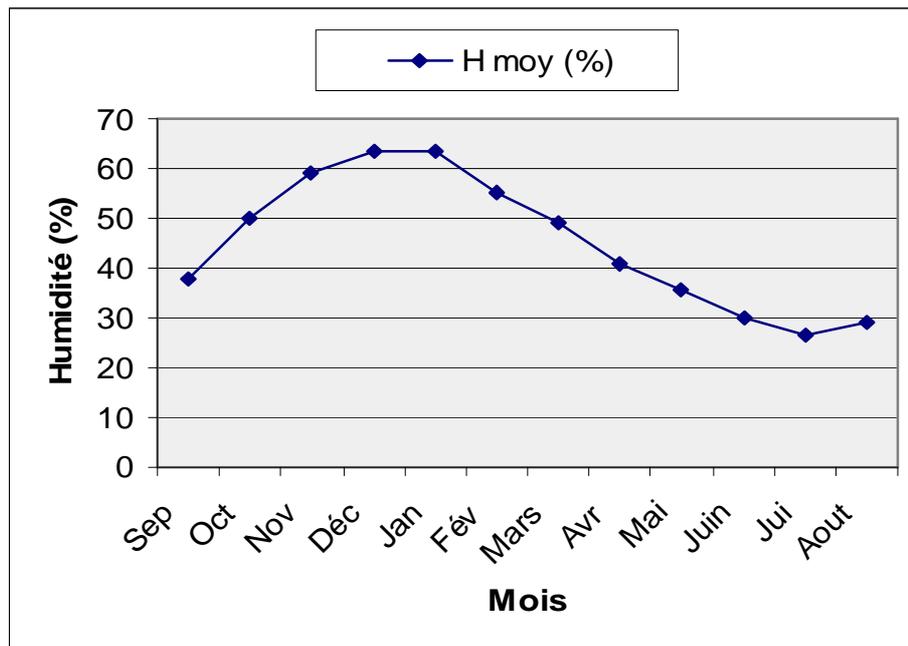


Fig. 1-12 : Variations de l'humidité
(station de Ouargla, 1990-2006)

On relève que l'humidité est faible dans l'ensemble de l'ère d'étude. Ceci est dû notamment au fait que la température de l'air en augmentant suite à l'importance de l'insolation, fait accroître la capacité de contenance en eau de l'air.

Les valeurs -non homogènes- enregistrées ont une variation mensuelle inversement proportionnelle à la température car on observe des valeurs maximales pendant la période de Novembre à Janvier et des valeurs minimales durant la période de Juin à Août. Toute fois, il peut arriver que cette règle ne soit pas respectée notamment lors de pluies, d'un temps couvert ou de vent fort.

Nous pouvons résumer les choses en disant que l'humidité relative dépend dans une large mesure de la température qui elle aussi dépend de la quantité de rayonnement reçue sur le sol, il demeure que celle-ci n'est pas la seule, car d'autres facteurs interviennent aussi, notamment les vents, les nuages et l'ensoleillement.

L'humidité moyenne annuelle est de 45 %.

1.3.2.3 – L'insolation :

Il s'agit de l'insolation effective c'est-à-dire de la période en heures durant laquelle le soleil a brillé.

Tableau. 1-5 : Insolation moyenne mensuelle
(station de Ouargla, 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
INSO moy (heur)	233,5	236,4	209	176	206,2	197	237,4	273	280,8	300,8	340,2	317,7	3008

La variation annuelle de l'insolation concorde avec celle de la nébulosité, elle est de type méditerranéen présentant un maximum estival. Cependant, il existe plusieurs variations annuelles dues aux petits accidents provoqués par des ponts nuageux.

Selon les valeurs mentionnées au tableau 1-5, on estime que la durée moyenne d'ensoleillement journalière est supérieur à 8 h/j, elle peut dépasser légèrement 12 h/j en Été, tandis qu'elle ne dépasse pas 8 h en Hiver, alors que l'insolation mensuelle, la plus grande, correspondant aux mois les plus chauds "Juin-Août". Le minimum en Novembre à Février correspondant à une durée d'ensoleillement plus basse de 176 h.

D'une manière générale, la durée moyenne est de l'ordre de 3008 h/an, soit 125 jours de soleil par an.

1.3.2.4 – Le vent :

Nous pouvons dire que le vent c'est le paramètre climatique le plus régulier dans la région de Ouargla. Il est déterminé par sa direction et sa vitesse.

Tableau. 1-6 : Vitesse moyenne mensuelle du vent
(station de Ouargla, 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
Vitesse moy (m/s)	3,9	3,4	2,7	2,7	3	3,2	3,9	4,5	5	4,8	4,5	3,8	3,8

On remarque que les vents les plus forts se produisent durant les mois d'Avril à Juillet avec un maximum de 5 m/s en Mai, tandis que le reste des mois on a une vitesse faible (2 m/s).

Généralement, les vents les plus fréquents sont ceux qui ont une direction S-N et SW-NE, tandis que les vents dirigés vers le Sud et le Sud-Ouest ne dominent qu'au mois de Janvier. On peut penser que l'orientation grossièrement N-S de la vallée joue un rôle dans la direction des vents.

La vitesse moyenne annuelle du vent est de 3,8 m/s.

1.3.2.5 – La pluviométrie :

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental du climat saharien.

1.3.2.5.1 – La pluviométrie moyenne annuelle :

Les valeurs moyennes annuelles enregistrées depuis 1990 jusqu'à 2006 varient de 5 à 117 mm, ce qui explique l'irrégularité des précipitations d'une année à l'autre. Durant cette période, la valeur moyenne enregistrée est de l'ordre de 35 mm/an.

La carte de la répartition spatiale des pluies (Fig. 1-13), indique une diminution de la pluviométrie du Nord au Sud, notre région se trouve dans la gamme 30 à 50 mm/an.

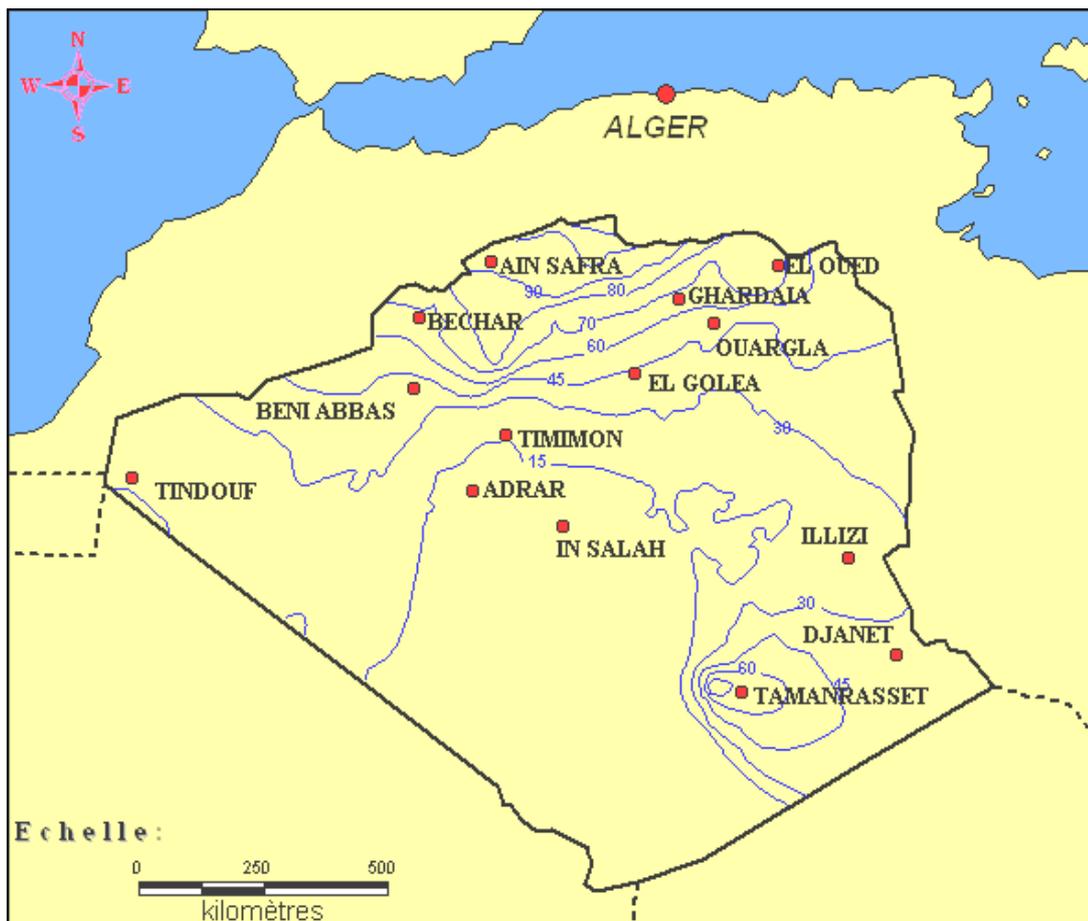


Fig. 1-13 : Carte en isohyètes moyennes annuelles du Sahara algérien
 -[Source : Cahiers de sécheresse, N°: 1/98 (Internet)]-

1.3.2.5.2 – La pluviométrie mensuelle :

Le tableau 1-7 et la figure 1-14 ci-dessous montrent la répartition des hauteurs moyennes mensuelles de la précipitation.

Tableau. 1-7 : Pluviométrie mensuelle
 (station de Ouargla, 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
P moy (mm)	2	5	6	3	5	2	7	2	2	0	0	0	35

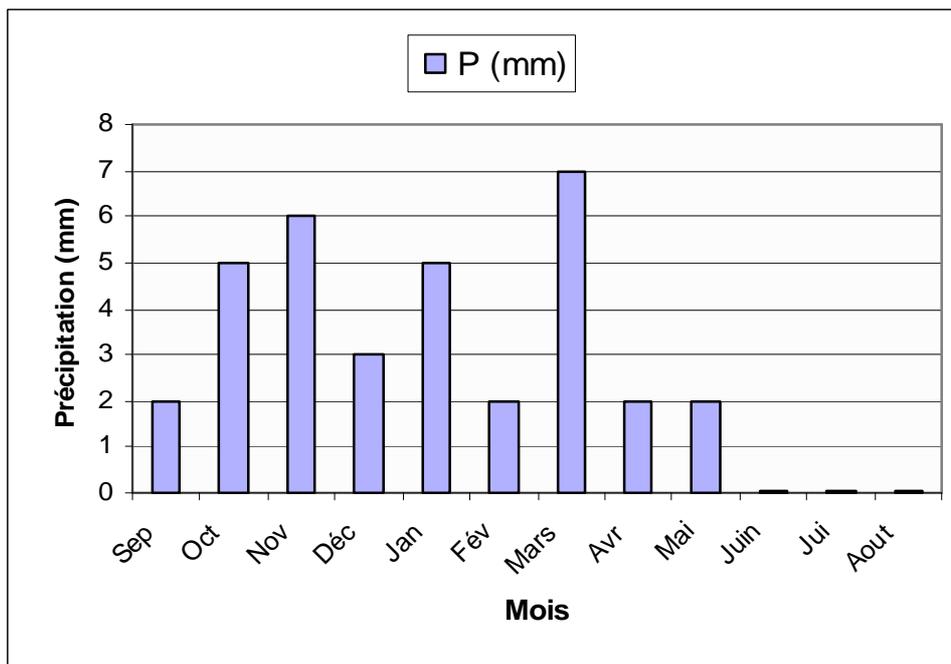


Fig. 1-14 : Hauteurs moyennes mensuelles de la précipitation
(station de Ouargla, 1990-2006)

On remarque une grande irrégularité de la pluie; faible pendant l'Hiver et presque nulle en Été. Leur provenance en Hiver est due aux dépressions accompagnants la migration vers le Sud des fronts polaires, en Été elles sont dues aux dépressions de mousson, alors que pendant la période intermédiaire, ces précipitations sont due aux dépressions Soudano-Sahariennes du Sud vers le Nord (Dubief, 1963).

En règle générale les pluies sont d'intensité plutôt faible pour la région.

1.3.2.5.3 – La pluviométrie journalière :

Une analyse statistique sur une série de pluies maximales journalières qui comprend 89 valeurs (Période : 1909-1998), a été réalisée à l'aide d'un programme informatique (ALED) qui ajuste les lois statistiques sur les échantillons hydro-pluviométriques (C. Ouled Belkhir, 2002).

Les meilleurs critères d'ajustement sont donnés par la loi de Gumbel. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 1-8 ci-dessous :

Tableau. 1-8 : Périodes de retour des pluies journalières

Période de retour (années)	10	100	500
Pluie (mm/j)	27	46	59
Intensités moyennes journalières (mm/h)	1,125	1,9	2,45

1.3.3 – L'évaporation et l'évapotranspiration :

Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, etc.), soit le plus souvent à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration.

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.

1.3.3.1 – L'évaporation :

Les mesures de "l'évaporation" peuvent se faire de différentes façons selon les buts poursuivis : estimation de l'évaporation à partir d'un réservoir, estimation de l'évaporation potentielle... .

1.3.3.1.1 – Mesures de l'évaporation à partir d'une surface libre :

Différents types d'appareils ont été conçus mais avec leurs défauts et leurs qualités. Les plus utilisés sont :

- Bac Colorado et Bac ORSTOM;
- Bac CGI 30;
- **Bac classe A** : (du Weather Bureau, U.S.A.)(Fig. 1-15) Ce bac est constitué d'un cylindre métallique de 121,9 cm de diamètre et de 25,4 cm de hauteur. Dans ce cylindre, on maintient une épaisseur d'eau de 17,5 à 20 cm.

Le cylindre est supporté par un caillebotis à 15 cm du sol. Le caillebotis doit permettre une bonne aération sous le bac.

Ce bac universellement répandu ne satisfait que très partiellement l'hydrologue car, du fait de sa disposition par rapport au sol, il est très sensible aux variations de température, son inertie thermique étant faible.

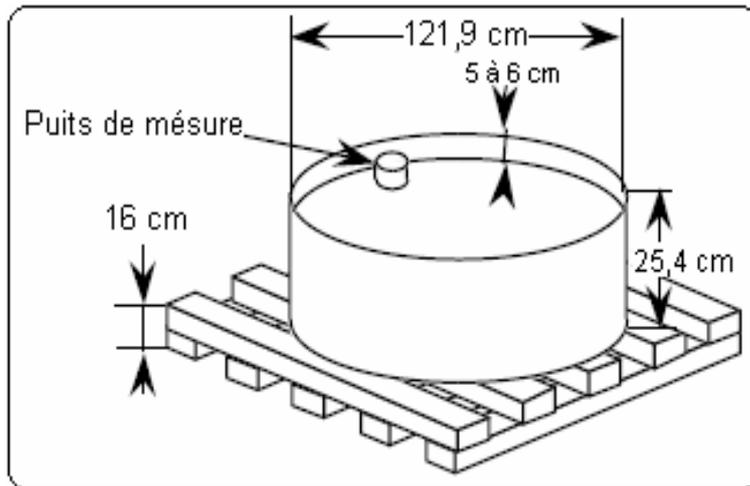


Fig. 1-15 : Bac classe A

1.3.3.1.2 – Mesures de l'évaporation à partir de surfaces poreuses :

-- **Les atmomètres** : Ces appareils sont destinés à mesurer une grande caractéristique du pouvoir évaporant de l'air ambiant. Ces appareils devraient donc avoir les qualités suivantes : faible inertie thermique, surface évaporante, plane, horizontale et à comportement de corps noir, faible perturbation du champ des vitesses du vent, ne pas modifier l'humidité relative de l'air ambiant au voisinage de l'appareil.

Le Piche : Parmi un grand nombre d'autres atmomètres, nous signalerons l'atmomètre de Piche (Fig. 1-16), bien qu'il ne réponde qu'imparfaitement aux qualités exigibles d'un appareil de mesure. Il est utilisé très fréquemment par les agronomes. Son emploi se justifie par la simplicité et le faible coût de l'appareil.

La surface évaporante est constituée par un film de papier buvard blanc, fixé à l'extrémité du tube en verre en forme de U. Ce tube sert à la fois à l'alimentation et à la mesure de l'évaporation. La feuille de buvard est changée chaque jour après lecture de l'appareil.

Le Piche est disposé à l'intérieur de l'abri météorologique; aussi la mesure dépend-elle beaucoup des conditions d'aération.

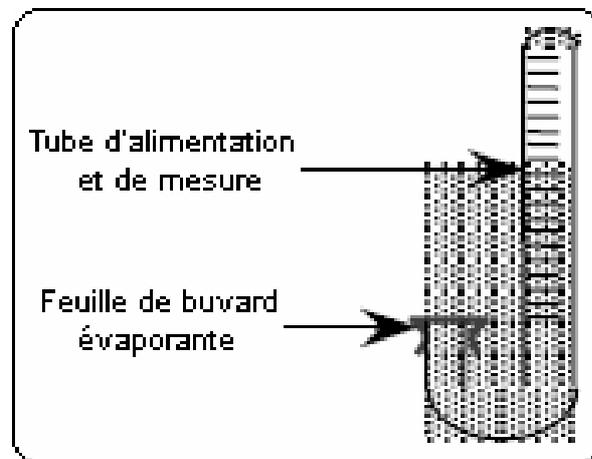


Fig. 1-16 : Le Piche

Les mesures d'évaporation Piche obtenus, sont celles de la station de l'ONM (Période : 1990-2006).

Pour les mesures d'évaporation sur Bac, elles, sont disponibles sur la station de "l'Aérodrome de Ouargla" durant la période 1990-2006.

Les courbes de la figure 1-17 montre une légère différence entre les valeurs au Piche qui sont supérieures aux valeurs du Bac classe A durant presque tous les mois. Le maximum se situe en Juillet (400 mm), comme pour les températures c'est le mois le plus chaud avec 34°C.

L'analyse des conditions climatiques dans notre région a montré que l'intensité de l'évaporation dépend de l'importance du déficit de saturation de l'air, par suite des très hautes températures qui règnent pendant une longue période estivale. Cependant, d'autres phénomènes, tels que le vent peuvent avoir une incidence sur l'évaporation.

Le vent est un élément éminemment variable. Il n'agit jamais indépendamment des autres facteurs, il a un effet très différent selon sa direction soit qu'il souffle par temps humide ou par temps sec.

Tableau. 1-9 : Evaporation Piche et Bac classe A (valeurs en mm)
(période : 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	∑ an
Piche (station de Ouargla)	272	218	143	115	116,5	144	192,5	246,5	285,5	365	403	383	2884
Bac classe A (station de l'Aérodrom, Ouargla)	285	169	138	84	87	128	156	240	309	354	372	357	2679

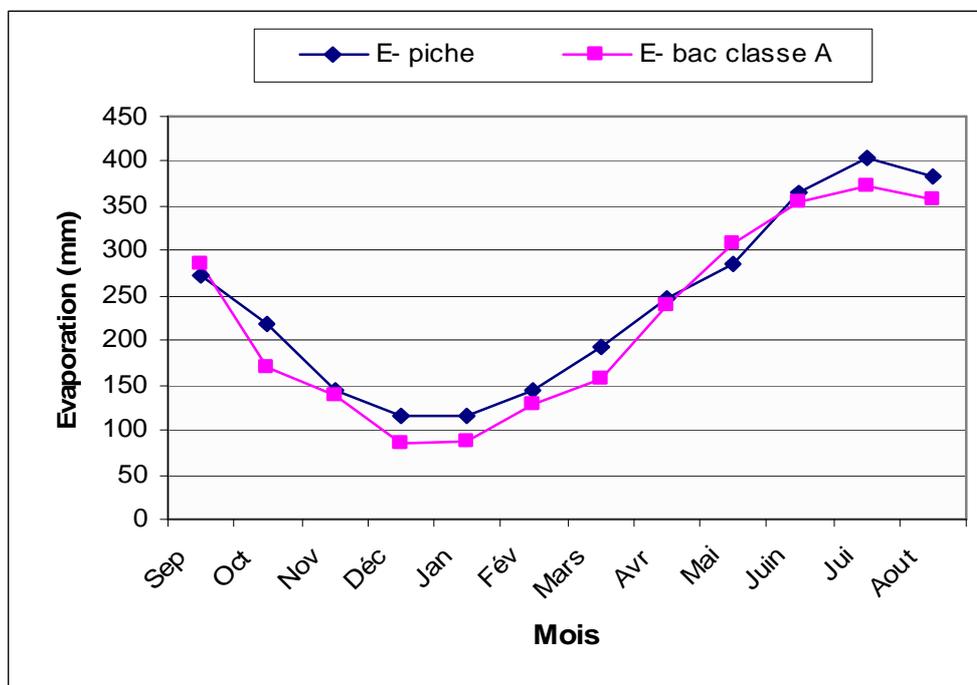


Fig. 1-17 : Variation de l'évaporation

1.3.3.2 – L'évapotranspiration :

La transpiration est commandée par les conditions climatiques, liées au rayonnement et à la turbulence de l'air, qui concourent à la définition de ce que les bioclimatologistes appellent l'évapotranspiration potentielle (notée Etp).

Par définition l'Etp : c'est la quantité d'eau, généralement exprimée en (mm), qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

Pour l'évapotranspiration réelle (notée Etr) : elle correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

En agriculture saharienne (irriguée), on apporte aux plantes l'eau nécessaire pour compenser l'Etr. L'Etr d'un certain couvert végétal dense en plaine activité est, par définition, égale à l'Etp (Dubost, 1992).

Concernant les études consacrées au Sahara algérien, jusqu'à présent la plupart des documents techniques utilisent les données empiriques.

1.3.3.2.1 – Estimation de l'évapotranspiration :

L'estimation de l'Etp ne peut s'effectuer qu'en utilisant diverses formules de calcul utilisant les données d'observation météorologique. Plusieurs de ces formules sont à caractère empirique : les formules de Turc, de Thornthwaite, de Blannet-Cridde et de Penman.

a) - Formule de Turc :

La formule de Turc ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$E_{tp} = 0,4 \times [t/(t+15)] \times [I_g + 50] \times K$$

Avec :

- Etp : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau);
- t : température moyenne mensuelle de l'air (en °C);
- I_g : radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour);
- K : un coefficient égal à 1 si l'humidité relative "hr" est supérieure ou égale à 50 %.
Sinon : $K = 1 + [(50 - hr)/70]$

Si la radiation globale "I_g" n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation "h" par la formule :

$$I_g = I_{gA} \times [0,18 + 0,62 (h/H)]$$

Avec :

- I_{gA} : radiation globale théorique (en cal/cm²/jour);
- H : durée astronomique du jour (en heure).

La phase de calcul de l'Etp selon Turc est consignée dans le tableau 1-10 suivant :

Tableau. 1-10 : Etp selon Turc
(station de Ouargla, période : 1990-2006)

Mois Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
t moy (°C)	30	24	16,5	12,5	11,5	14	17,5	21,5	26,5	32	34,5	34	23
IgA (cal/cm ² /j)	839,22	700,77	562,32	499,48	541,02	664,56	813,66	937,2	1011,75	1035,18	1017,07	948,91	***
h (heur/jour)	7,78	7,62	6,97	5,68	6,65	7,04	7,66	9,10	9,06	10,02	10,97	10,25	***
H (heur/jour)	12,2	11,2	10,4	9,9	10,2	10,9	11,8	12,8	13,6	14,1	13,9	13,2	***
Ig (cal/cm ² /j)	482,86	421,74	334,87	267,58	316,07	365,44	473,94	581,8	463	642,43	680,73	627,65	***
Etp (mm)	142	116	81	58	63,5	80	113	115	131	188,5	204	188	1480
Hr (%)	38	50	59	63	63	55	49	41	36	30	27	29	45
Etp corr (mm)	166	116	81	58	63,5	80	115	130	157	242	271	244	1723,5

Avec :

- t : température moyenne mensuelle mesurée, station de Ouargla : 1990-2006;
- hr : humidité relative moyenne mensuelle mesurée, station de Ouargla : 1990-2006;
- h : durée d'insolation mesurée à la station de Ouargla : 1990-2006;
- H : durée astronomique du jour mesurée, station de Ouargla : 1990-2006;
- Ig : radiation globale moyenne mensuelle calculée, période : 1990-2006;
- IgA : radiation globale théorique calculée;
- Etp : évapotranspiration potentielle mensuelle calculée, station de Ouargla : 1990-2006.

b) - Formule de Thornthwaite :

Thornthwaite a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$Etp = 16 \times [10(t/I)]^a \times K$$

Avec :

- Etp : évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau);
- t : température moyenne mensuelle du mois considéré (en °C);
- K : coefficient d'ajustement mensuel;
- a : indice lié à la température : $a = I \times [1,6/100] + 0,5$
- I : indice thermique annuel : $I = \sum i$
- i : indice thermique mensuel : $i = [t/5]^{1,5}$

Le tableau 1-11 porte les résultats de calcul de l'Etp mensuelle par cette formule.

Tableau. 1-11: Etp selon Thornthwaite
(station de Ouargla, période : 1990-2006)

Mois Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
t moy (°C)	30	24	16,5	12,5	11,5	14	17,5	21,5	26,5	32	34,5	34	23
i	7,9	6,11	3,96	2,87	2,61	3,28	4,24	5,38	6,85	8,51	9,29	9,13	$I = \sum i = 70,13$
Etp (mm)	168,5	117	64	41	36	49	70	98	138	187	211	206	1358,5
K	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	***
Etp corr (mm)	173,5	115	56	36	32	42	72	106	164	222,5	255	237	1511

Avec :

- t : température moyenne mensuelle mesurée à la station de Ouargla : 1990-2006;
- Etp: évapotranspiration potentielle mensuelle calculée, station de Ouargla : 1990- 2006.

En ce qui concerne la formule de Blanney-Criddle et celle de Penman, nous avons utilisé un logiciel pour le calcul de l'Etp, cette tâche a été effectuée à l'institut d'agronomie saharienne de Ouargla (ITAS).

c) - Formule de Blanney-Criddle :

La formule de H. Blanney et W. Criddle (1931-1945) appliquée pour déterminer l'Etp, s'écrit :

$$\text{Etp (par mois)} = \mathbf{K} \times \mathbf{F}$$

Où :

- Etp : évapotranspiration mensuelle (en mm);
- K : coefficient culturel, qui varie entre 0,5 à 0,2 pour différentes cultures et diverses zones climatiques;
- F : pouvoir évaporant qui dépend de la température moyenne mensuelle et du rapport d'éclairement h/H, défini comme pour la formule de Turc mais exprimé en %.

Les recherches menées pour la "FAO" ont permis de modifier cette formule et de la suggérer pour les zones arides et semi-arides. Cette formulation s'effectue en deux temps, le premier, concerne uniquement le terme climatique de l'Etp tandis que le second, introduit les coefficients cultureux pour aboutir à l'Etp culture (BNEDER, 1992).

La formulation de l'Etp climatique s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Etp} = aF + b$$

Où :

- F : pouvoir évaporant de Blanney-Criddle (en mm/mois), qui s'obtient par la relation suivante : $F = P \times (0,46 t + 8)$

Avec :

- P : rapport de la durée d'éclairement mensuelle en %;
- t : température moyenne mensuelle (en °C);
- a et b : coefficients de correction en fonction des trois paramètres climatiques : humidité relative, vitesse du vent et insolation effective moyenne (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique du jour).

L'Etp calculée (tabl. 1-12), est considérée de référence, car elle varie pour chaque type de culture et exige un grand nombre de mesures expérimentales sur le terrain pour la détermination des coefficients cultureux.

d) - Formule de Penman :

H. L. Penman (1948) considère que l'évapotranspiration dépend du rayonnement net et du déficit de saturation, qui est lié à la vitesse du vent. Il exprime l'Etp par la formule suivante :

$$\mathbf{Etp = (H\Delta + \gamma Ea)/(\Delta + \gamma)}$$

Où :

- Etp : évapotranspiration journalière (en mm);
 - H : lame d'eau correspondant à la consommation de 60 calories d'énergie radiative pour une tranche de 1 mm d'eau sur 1 cm², elle revient à s'exprimer par : H (mm) = Rn / 60; Rn : étant la radiation nette (en Cal/cm²).

- Δ : variation de la tension de vapeur d'eau saturante (en mm de Mercure);

- γ : constante psychométrique : $\gamma = 0,00163 \times (P/\lambda)$

Où :

- P : pression atmosphérique (en Kpa);

- λ : chaleur latente de vapeur (en j/kg).

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-9}) \times T$$

- Ea : valeur donnée par une formule établie par l'auteur après plusieurs années d'expériences; elle est fonction du déficit de saturation et de la vitesse du vent. Elle s'exprime ainsi :

$$Ea \text{ (mm/jour)} = 0,35 \times (1 + 0,01 U) \times (e_w - e_d)$$

Avec :

- U : vitesse du vent (en miles/jour);

- e_w : tension de vapeur saturante (en mm Hg);

- e_d : tension de vapeur au point de rosée (en mm Hg).

Le tableau (1-12) ci-dessous porte les résultats de ce calcul :

Tableau. 1-12 : Etp selon Blanney-Criddle et Penman (valeurs en mm)
(station de Ouargla, 1990-2006)

Mois Méthode	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Σ an
	Blanney-Criddle	183	149	112,4	95,4	95	106	133	157	189,4	217	232	219
Penman	202,2	135,2	82	62	60,7	91,5	139	184	238	261	285	268	2009

L'Etp obtenue par ces différentes formules empiriques, est particulièrement contraignante pendant l'Été, près de 50 % du total annuel est enregistré entre les mois de Mai et d'Août. Une part (>50 %) de cette Etp est due aux turbulences de l'air.

Parler de l'aridité du Sahara et rappelons tout de même que les précipitations moyennes inférieures à 50 mm/an dans la région d'étude, la comparaison de cette valeur avec l'Etp calculée plus haut nous confirme que seule l'irrigation peut viabiliser l'agriculture saharienne.

1.3.3.3 – Comparaison :

La comparaison entre les valeurs d'évaporation (Piche et Bac classe A) et d'Etp (obtenus par les méthodes empiriques), s'illustre par la superposition graphique des courbes d'évaporation et d'Etp (Fig. 1-18); cette comparaison permet la distinction entre les différents régimes d'évapotranspiration pour obtenir le modèle qui concorde le mieux avec la réalité.

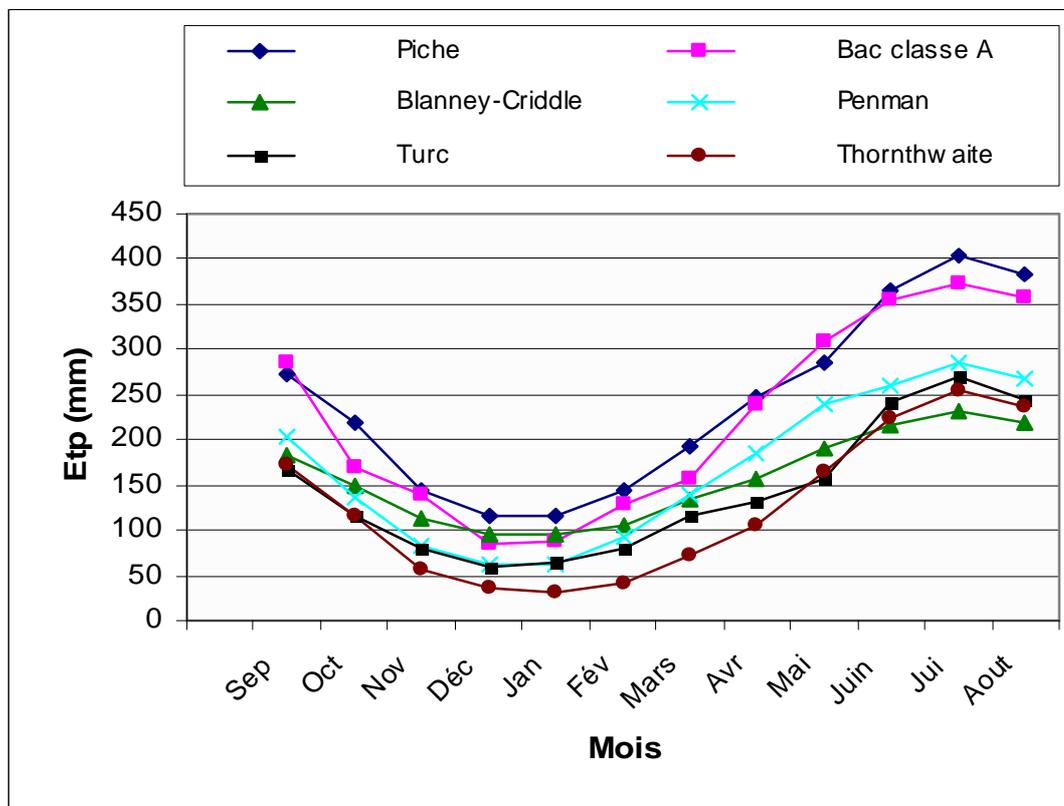


Fig. 1-18 : Variations de l' Etp

L'examen de la figure (1-18) ci-dessus permet de tirer les remarques suivantes :

- Toutes les méthodes suivent un modèle type méditerranéen : maxima estival et minima hivernal;
- Les mesures de Piche (station de Ouargla, 1990-2006) et celle du Bac classe A (station de l'Aérodrome de Ouargla, 1990-2006), donnent des valeurs inégales, du fait que chacune d'elles correspond à une station différente;
- De même, des différences significatives existent dans les valeurs estimées des Etp suivant chaque méthode, du fait que chacune d'elles a été établie et testée sous des climats différents de celui de notre région. A part celle de Turc qui a un caractère presque universel, celle de Thornthwaite et notamment celle de Penman, conviennent aux régions sub-humides; alors que pour celle de Blannay-Criddle, elle convient aux régions semi-arides;
- L'écart entre les valeurs mesurées et calculées diffère d'une saison à l'autre, il est très accusé aux solstices d'Été, moins élevé aux équinoxes et faible aux solstices d'Hiver;
- Les méthodes empiriques présentent des valeurs très proches entre elles, celles de Turc semblent constituer la moyenne entre les valeurs d'Etp obtenues par les différentes formules;
- L'Etp obtenue par la méthode de Blannay-Criddle, présente une bonne concordance (en Hiver) avec l'évaporation mesurée par bac, mais avec un écart estival important.

Des mesures expérimentales effectuées à l'ITAS-Ouargla et inscrites dans le même ordre, appliquent cette dernière méthode (de Blannay-Criddle) pour estimer l'Etp dans la région de Ouargla, ce qui est moins précise par rapport à la situation observée aujourd'hui (où il existe une certaine variabilité de l'Etp, notamment au niveau des différents sites envisagés : palmeraie traditionnelle et extensions hors palmeraie).

1.3.3.4 – Bilan hydrique :

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 $\text{Apport} \geq \text{Etp}$ on pose que $\text{Etr} = \text{Etp}$, la quantité d'eau qui reste ($\text{Apport} - \text{Etr}$) 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 $\text{Apport} < \text{Etp}$, la valeur de $\text{Etr} = \text{Apport} + \text{Ru}$, jusqu'à égalisation avec Etp. Si la Ru est nulle, il va se produire un déficit agricole $\text{Da} = \text{Etp} - \text{Etr}$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

- Le même calcul pour la Rfu dans le cas minimum.

Le calcul de ces paramètres est présenté dans le tableau 1-13 :

Tableau. 1-13 : Bilan hydrique avec l'Etp de Thornthwaite

Mois Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
Etp (mm)	173,5	115	56	36	32	42	72	106	164	222,5	255	237	
Apport (mm)	185	187,6	189	186,3	187,6	185	190	185	185	183	183	183,4	
Exc/ Défic (mm)	11,5	72,6	133	150,3	155,6	143	118	79	21	-39,5	-72	-53,6	
Ru (Fin du mois) (mm)	11,5	85	100	100	100	100	100	100	100	60,5	0	0	
Exc/RU (mm)			118	150,3	155,6	143	118	79	21				785
Défic/RU (mm)	88,5	15								39,5	100	100	343
Exc/Rfu (mm)		35	168	200,3	205,6	193	168	129	71	10,5			1180
Défic/Rfu (mm)	38,5										50	50	138,5

On voit que ce bilan hydrique cultural établi en tenant compte l'Etp de Thornthwaite, permet de se faire une idée sur l'étendue des périodes excédentaires (huit mois), avec un surplus d'eau de (≈ 110 mm/mois) qui va produire une recharge supplémentaire de la nappe phréatique.

Par contre, une évapotranspiration maximale a été observée pendant les mois de Juillet et d'Août avec des valeurs (≈ 70 mm/mois), ce qui viabilise la nécessité d'irrigation.

Le bilan hydrique cultural établi en tenant compte l'Etp de Blanney-Criddle, est toujours déficitaire; ce qui n'a pas de conformité à la réalité.

1.3.4 – Le bilan hydrologique :

1.3.4.1 – Introduction :

L'établissement d'un bilan d'une nappe phréatique exige la connaissance précise de son alimentation et de ses pertes. Or celles-ci sont multiples, directes ou indirectes, superficielles ou profondes.

Le bilan hydrologique global a pour but d'étudier la balance entre les apports et les pertes et ainsi d'étudier la variation des réserves en eau.

1.3.4.2 – Les éléments d'équation du bilan d'eau :

L'expression du bilan correspond à la différence entre les entrées dans la nappe phréatique et les sorties.

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

Les différentes surfaces planimétrées, sujettes à la détermination des éléments de ce bilan, sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau. 1-14: Classification des surfaces de la cuvette

Classe	Classification détaillée	Surface totale (ha)
1	Sable et sols nus	75 461 → (80 %)
2	Zones humides	12 011 → (13 %)
3	Zone bâtie	3 183 → (3 %)
4	Végétation	3 214 → (3 %)
5	Plans d'eau	1 105 → (1 %)
La cuvette		94 974 → (100 %)

A] – Les entrées :

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

a) - Les eaux provenant du CT et CI par artésianisme et par pompage. Deux types d'utilisation seront différenciés : usage agricole (Irr) et AEP (annexe.1 : tableau.A₁-1 et 2).

Les données recueillées sont les suivantes :

* Volume total extrait :

$$Q_{F\text{-Total}} = 100\,389\,600 \text{ m}^3/\text{an} \text{ (DHW Ouargla, 2006).}$$

* Volume prélevé destiné à l'irrigation :

$$Q_{F\text{-Irr}} = 69\,847\,860 \text{ m}^3/\text{an} \text{ (DHW Ouargla, 2006).}$$

En se référant au bilan hydrique obtenu avec l'Etp de Thornthwaite, qui semble le plus proche de la réalité, la hauteur d'eau infiltrée dans la nappe phréatique est estimée à 37 mm/mois ($\approx 0,4$ m/an); alors que, pour une surface totale du couvert végétal de 3 214 ha (tabl. 1-14), la lame d'eau infiltrée est de l'ordre de :

$$\rightarrow Q_{F\text{-Irr-Inf}} = 0,4 \text{ m/an} \times 32\,140\,000 \text{ m}^2 \approx \underline{\underline{14\,300\,000 \text{ m}^3/\text{an}}}$$

* Volume prélevé destiné à l'usage domestiques :

$$Q_{F\text{-AEP}} = 30\,541\,740 \text{ m}^3/\text{an} \text{ (EDEMIAO, 2006).}$$

-- Les fuites d'AEP ($Q_{AEP\text{-Fuit}}$) retournant au sous-sol sont estimées à :

$$\underline{\underline{4\,560\,000 \text{ m}^3/\text{an}}} \text{ (EDEMIAO, 2006).}$$

-- Pour les rejets totaux, un volume (Q_{Rejet}) de **8 400 000 m³/an** rejoint la nappe, est estimé (ONA, 2007).

b) - Les eaux de pluies rejoignant effectivement la nappe phréatique par infiltration : $Q_{P\text{-Inf}}$

Le processus d'infiltration des eaux météoriques ou de surface a fait l'objet de nombreux travaux en zone aride. Parmi les auteurs qui ont abordé ce processus, nous pouvons citer : C. Samie - P. Dutil (1960) et M.A. Roche (1973). Il s'agit d'études ponctuelles sur les sols nus, qui indiquent qu'en gros l'infiltration peut être assez favorable dans plusieurs endroits de sites étudiés.

Les facteurs qui tendent à favoriser l'infiltration des eaux dans les sols (Roche, 1973) sont :

- Dimension des sables;
- Morphologie du site;
- L'humidité à faible profondeur;
- Les gradients de température... .

Nous exposons dans ce qui suit les résultats de certaines études réalisées pour l'évaluations du taux d'infiltration au Sahara septentrional.

M.A. Roche (1973), adopte les valeurs suivantes :

- Pour une pluviométrie moyenne annuelle de 40 mm, le coefficient d'infiltration est de 5 à 10 %;
- Pour des pluies ponctuelles de 5 à 20 mm, le coefficient d'infiltration est de 40 %.

A la lumière de ces résultats nous pouvons adopter pour notre cas, un coefficient d'infiltration de 7 %. Donc, pour une pluviométrie de 35 mm/an (station de Ouargla, 1990-2006) et une surface de 87 472 ha (tabl. 1-14: classe N⁰: 1+2), la lame d'eau rejoignant effectivement la nappe phréatique est de l'ordre de :

$$\rightarrow Q_{P-Inf} = 0,035 \text{ m/an} \times 0,07 \times 874\,720\,000 \text{ m}^2 \approx \underline{\underline{2\,000\,000 \text{ m}^3/\text{an}}}$$

c) - Les eaux de surface : Q_{P-Cru}

Elles sont représentées par les apports d'Oued M'Zab et N'Sa, qui débouchent sur la partie nord de la cuvette (Sebkhet Safioune) et participent à l'alimentation de la nappe phréatique en période de crues. Pour une période de 15 ans (1990 -2005), le volume d'eau qui atteint Sebkhet Safioune et participe à l'alimentation de la nappe est estimé à environ :

- 1 500 000 m³/an pour l'Oued N'Sa (SIDAT, 2006) et;
- 1 000 000 m³/an pour l'Oued M'Zab (SIDAT, 2006).

$$\text{Soit un total de : } Q_{P-Cru} = \underline{\underline{2\,500\,000 \text{ m}^3/\text{an}}}$$

B] – Les sorties : Il s'agit de :

- L'évaporation : En zones arides, l'évaporation et l'évapotranspiration sont les mécanismes majeurs de pertes en eau. Dans des bassins arides fermés, ils sont les seuls modes de perte en eau (hors pompage) (Ullman, 1985).

Les surfaces sujettes à la détermination de ce paramètre sont (classes N⁰: 2 et 5) reportées sur le tableau 1-14.

a) - Evaporation à partir des plans d'eau libres (classe N⁰: 5) :

L'estimation de l'évaporation à partir des plans d'eau libres a été faite à partir des données relevées sur bac. Nous disposons d'une série de mesures allant de 1990 à 2006. Cependant, en zones arides et semi-arides, il faut tenir compte de certains facteurs qui influent sur le taux d'évaporation, parmi eux nous pouvons citer :

- La salinité :

Il est connu que la salinité a pour effet de diminuer l'évaporation. Les expériences menées au Etats-Unis en zones arides et semi-arides, permettent d'introduire des coefficients de correction. A partir de ces expériences, Sami et Dutil (1960) suggèrent un coefficient de correction $r = 0,80$ pour les chotts de Ouargla.

Dans ce qui suit, nous représentons les données et les étapes d'évaluation du volume d'eau évaporé :

Tableau. 1-15: Evaporation bac corrigée
(station aérodrome-Ouargla, 1990-2006)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Σ an
Evaporation bac (mm)	285	169	138	84	87	128	156	240	309	354	372	357	2 679
Evaporation corrigée (mm) (r = 0,80)	228	135,2	110,4	67,2	69,6	102,4	124,8	192	247,2	283,2	297,6	285,6	2 143

Concernant une surface totale des plans d'eau libres de 1 105 ha, le volume d'eau évaporé est estimé à :

$$\rightarrow Q_{E-P1} = 2 \text{ m/an} \times 11\,050\,000 \text{ m}^2 = \underline{\underline{22\,100\,000 \text{ m}^3/\text{an}}}$$

b) - Evaporation à partir des zones humides (classe N⁰: 2) :

La formule d'évaporation en climat aride de Coudrain et Ribstein $E = 72 \times Z^{-1,5}$ a été vérifiée dans la zone de Ouargla (BG, 2004).

Où :

- E : évaporation moyenne (en mm/an);
- Z : profondeur moyenne de l'eau (en m).

A une profondeur $Z = 0,9$ m, l'évaporation moyenne étant de 80 mm/an. Donc, pour une superficie totale de 12 011 ha correspondant aux zones humides, le volume évaporé est de l'ordre de :

$$\rightarrow Q_{E-Zh} = 0,08 \text{ m/an} \times 120\,110\,000 \text{ m}^2 = \underline{\underline{9\,608\,800 \text{ m}^3/\text{an}}}$$

1.3.4.3 – Le bilan :

Tableau. 1-16: Bilan d'eau de la cuvette

Entrées	m³/an	m³/an
Q _{F-Irr-Inf} : Eau d'irrigation	14 300 000	
Q _{AEP-Fuit} : Fuite d'AEP	4 560 000	
Q _{Rejet} : Rejet	8 400 000	
Q _{P-Inf} : Précipitation	2 000 000	
Q _{P-Cru} : Eaux de surface	2 500 000	
Sorties		
Q _{E-Pl} : Evaporation des plans d'eau libres		22 100 000
Q _{E-Zh} : Evaporation des zones humides		9 608 800
Totaux	31 760 000	31 708 800

$$\underline{\Delta Q = + 51\,200 \text{ m}^3/\text{an.}}$$

L'examen de ce bilan permet de formuler les remarques suivantes :

- L'eau, aussi bien dans les agglomérations, dans les palmeraies et dans les sebkhas se trouve proche de la surface du sol, ce qui est reflété convenablement par le solde positive de la réserve (ΔQ).

L'élévation du niveau d'eau (surtout en hiver) dans ces zones basses, peut être due :

- aux quantités excédentaires des eaux d'irrigation (cas des palmeraies);
- aux fuites du réseaux d'AEP et assainissement autonome (cas des agglomérations de Ouargla, Aïn-baïda et N'goussa);
- aux rejets totaux (cas de sebkhet Oum-raneb et Bamendil).

- La nappe phréatique ne peut pas jouer de rôle tampon important, car les stations de pompage et les canaux de drainage, en état de bon fonctionnement, peuvent régler le niveau d'eau dans ces zones inondées.

- Le terme évaporation totale constitue l'élément fondamental de déficit à travers les Chotts.

1.3.5 – Conclusion sur le climat :

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 thermiques et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par une forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région.

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-NE.

L'exploitation des données disponibles a permis d'établir un bilan hydrologique global semble refléter convenablement le phénomène de la remontée des eaux. Ce sont les eaux d'irrigation mal drainées qui favorisent l'élévation du niveau d'eau dans la nappe phréatique.

Chap.2 :

HYDROGEOLOGIE

- **LE SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL**
- **LA NAPPE PHREATIQUE DANS LA CUVETTE DE OUARGLA**
- **ACTIONS RECOMMANDÉES POUR CONTROLER LE NIVEAU DE LA NAPPE PHREATIQUE**

ANALYSE HYDROGEOLOGIQUE

2.1– LE SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL :

2.1.1 – Introduction :

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye.

Ce bassin renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Le domaine du SASS couvre une superficie d'environ 1 000 000 km² dont 70 % se trouvent en Algérie, 24 % en Libye et 6 % en Tunisie (Fig. 2-1) et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tinrhert et d'Ouest en Est depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye.

Ce bassin se subdivise en trois sous-entités : les deux sous-bassins du Grand Erg Occidental et du Grand Erg Oriental qui sont des cuvettes à écoulement endoréique aboutissant dans des dépressions fermées « chotts et sebkhas » et le plateau de la Hamada El Hamra.

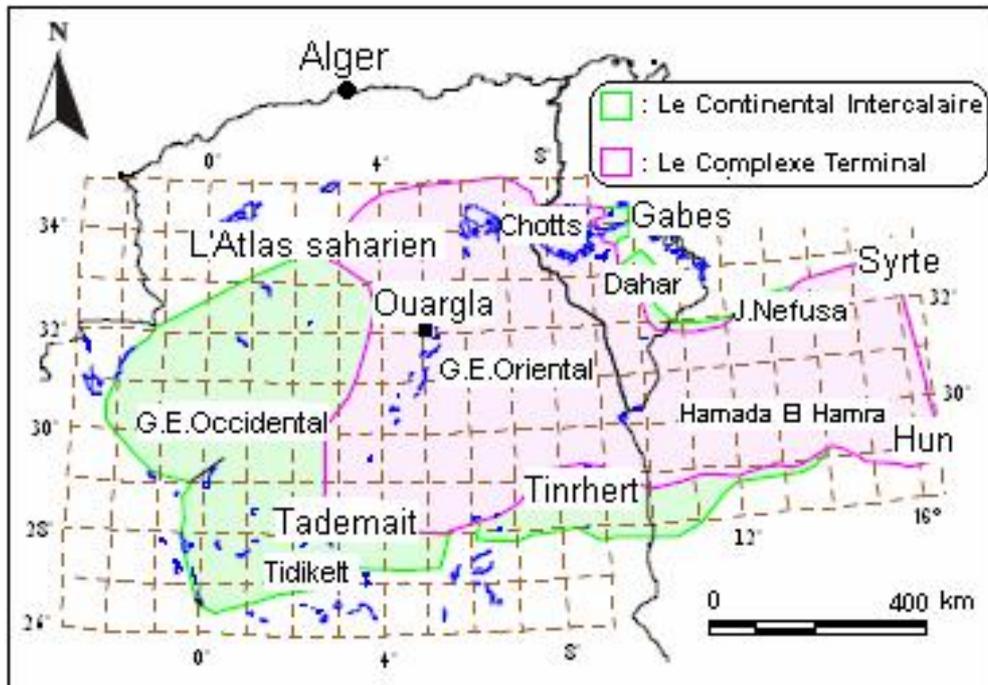


Fig. 2-1 : Délimitation du "SASS" (OSS, 2003)

Nous rappelons ci-dessous les définitions des nappes du "CI" et du "CT".

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

- À la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne;
- Au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultat de la transgression cénomanienne.

Le Complexe Terminal est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire, principalement du Miocène (Busson, 1970; Fabre, 1976).

2.1.2 – Le Continental Intercalaire "CI" :

Directement surmontées par les argiles et carbonates du Céno-manien, les formations du "CI" s'étendent jusqu'en bordure de la plate-forme, en une auréole continue d'El Goléa jusqu'à la limite sud de la Hamada El Hamra.

Au Nord-Ouest du bassin, le "CI" affleure tout au long de l'Atlas saharien et au Nord-Est au pied de la falaise du Dahar. Plus au Sud, le "CI" repose directement sur les formations marines du Paléozoïque, lequel forme en affleurement une ceinture continue allant de la frontière marocaine, à la limite N-W du bassin, jusqu'à la ville de Hun à l'extrême S-E de la région.

L'examen de la carte des affleurements géologiques (Fig.1-6) permet donc de définir le "CI" comme l'ensemble continental compris entre les plissements hercyniens, qui ont chassé la mer de la plate-forme saharienne et l'invasion marine du Crétacé supérieur. Cet ensemble comprend majoritairement les formations continentales grés-argileuses du Crétacé inférieur, auxquelles l'étude des coupes de forages a permis d'associer des sédiments marins ou lagunaires, post-paléozoïques et antécénomaniens intercalés au sein du "CI".

Cette définition du "CI", qui constitue la formation aquifère la plus étendue de la région, détermine les limites du Système Aquifère du Sahara Septentrional "SASS". Ces limites, fondées à la fois sur l'étude des affleurements géologiques et sur l'étude des sondages, sont :

- Au Nord-Ouest, le versant Sud de l'Atlas saharien, marqué en affleurement par le contact Albien-Cénomaniens;
- Au Sud-Ouest, la limite des affleurements paléozoïques de l'Ougarta, marqués par le cours des oueds Zousfana et Saoura;
- Au Sud, la limite des affleurements du "CI" sur le Paléozoïque, allant en continuité d'Adrar à Hun, décrivant les limites septentrionales des Tassilis;
- Au Nord, l'accident sud Atlasique au Nord des Chotts, relayé vers le golfe de Gabès par la faille d'EL Hamma – Médenine;
- Au Nord-Est, les affleurements du "CI" au pied de la falaise du Dahar;
- À l'Est, les formations aquifères du Crétacé inférieur se prolongent bien au-delà du graben de Hun, mais à l'Est du méridien 16° et en passant au bassin de Syrte, les eaux du "CI" deviennent saumâtres : c'est ce passage qui a été adopté comme limite de la zone d'étude de la nappe d'eau douce du "CI" (OSS, 2003b).

2.1.2.1 – Géométrie du "CI" : (Fig.2-2)

L'épaisseur utile totale de ce réservoir (épaisseur des dépôts perméables à eau douce) dépasse 250 m dans la plus grande partie du système étudié. Elle atteint 1000 m au Nord-Ouest (Ouest de Ghardaïa) et au Centre (Ouest de la dorsale primaire d'Amguid). Elle tombe à une centaine de mètres au Nord, dans le secteur du Chott EL Gharsa, localement sous le Grand Erg Oriental (Ouest d'El Borma), et en Libye sous J. Nefusa.

La nappe du "CI" est libre dans les zones d'affleurement, captive non jaillissante sous le Grand Erg Occidental, le M'Zab, le Tademaït, le Grand Sud Tunisien et la Hamada El Hamra; fortement artésienne jaillissante (avec des températures élevées) sur tout le domaine Oued Rhir, Souf, Djérid, Grand Erg Oriental et Chott Fedjaj.

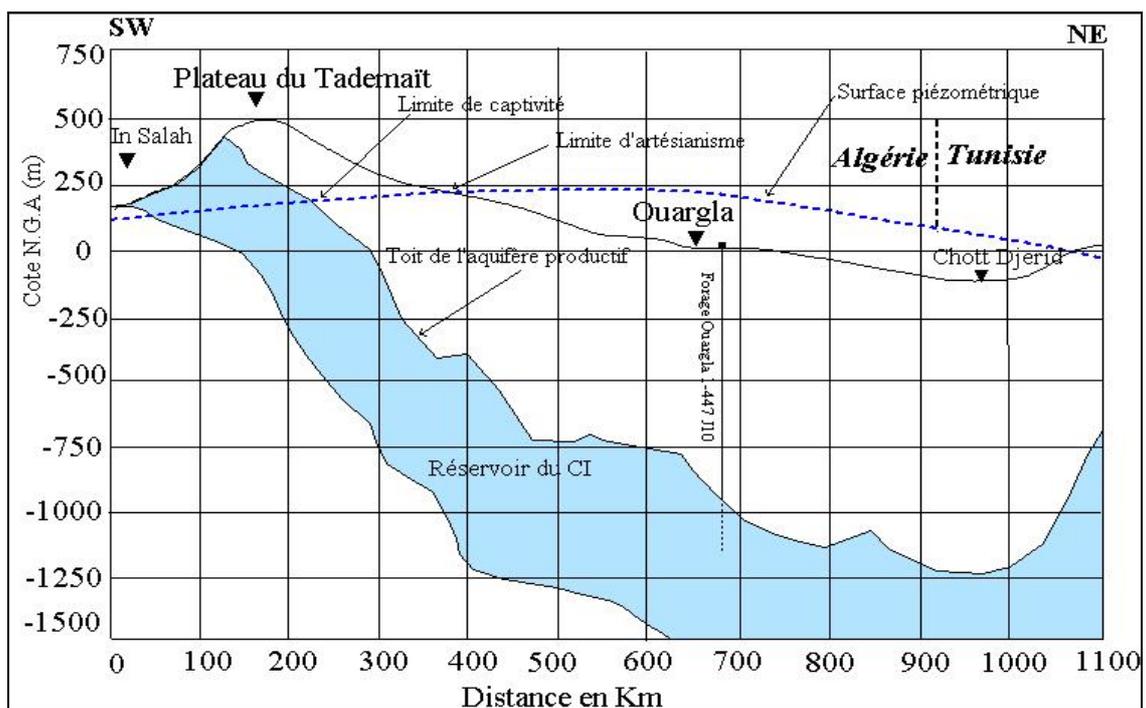


Fig. 2-2 : Coupe hydrogéologique transversale du "CI" (UNESCO, 1972)

2.1.2.2 – Piézométrie du "CI" : (Fig.2-3)

Pour élaborer la carte piézométrique du "CI", les données publiées dans les études précédentes (ex : ERESS, 1972), ont été mises à contribution. Nous utiliserons la carte piézométrique du "CI", élaborée dans le cadre du projet SASS (OSS, 2003a et b).

Cette carte définit l'écoulement de la nappe à l'état « naturel », peu ou pas influencé par pompage.

L'examen de cette carte met en évidence les zones d'alimentation, indiquées par les directions d'écoulement.

Il s'agit :

- Du piémont sud atlasique au Nord et Nord-Ouest;
- Du Tinrhert au Sud;
- Du Dahar à l'Est.

L'essentiel des réserves de cet énorme réservoir correspond à de l'eau infiltrée au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire. Toutefois, une recharge actuelle, estimée globalement à 400 hm³/an, s'effectue :

- De façon directe par infiltration des ruissellements qui se produisent sur les zones périphériques d'affleurements, notamment aux piedmonts de l'Atlas Saharien (au Nord-Ouest), dans le massif du Dahar (Tunisie), éventuellement sur les rebords ouest (Touat et Gourara) et au Sud du plateau du Tademaït (Tidikelt), ainsi que sur le rebord sud du plateau du Tinrhert et sa prolongation en Libye;

- De façon indirecte dans le Grand Erg Occidental à travers les sables dunaires et du Complexe Terminal, dans la région où il n'existe pas de séparation imperméable entre les deux réservoirs, ainsi que par apport latéral ou drainance en provenance du puissant aquifère paléozoïque dans la partie libyenne du réservoir.

L'écoulement de cette nappe se produit :

-- Dans le sens Nord-Sud (concernant le sous-bassin du Grand Erg Occidental), c'est-à-dire : du piedmont de l'Atlas Saharien vers les zones d'affleurement (et d'exutoire) des rebords du plateau de Tademaït à l'Ouest;

-- Dans le sens Sud-Nord (concernant le sous-bassin du Grand Erg Oriental), c'est-à-dire : du rebord sud du plateau du Tinrhert vers les golfes de Syrte et de Gabès;

-- Dans le sens Ouest-Est, où les eaux en provenance de l'Atlas Saharien, se convergent vers l'exutoire tunisien (golfe de Gabès).

C'est la dorsale du M'Zab ((l'axe N-S)) qui sépare l'écoulement dans les sous-bassins Occidental et Oriental en ces deux directions distinctes précitées (N-S et S-N).

Les zones exutoires, suggérées par les points d'aboutissement des lignes de courant dessinées sur la carte piézométrique sont :

- Les rebords occidentaux et méridionaux du Tademaït qui constituent une zone d'exutoire naturel importante, probablement jalonnée anciennement par des sources, dont les foggaras ont pris la relève. L'eau non captée s'évapore dans un chapelet de sebkhas qui occupent le fond des dépressions du Gourara, du Touat et du Tidikelt;
- Les remontées verticales à la faveur de la faille d'El Hamma dans la zone du Chott Fedjaj;
- L'exutoire libyen du Golfe de Syrte, qui se manifeste en surface par les sources de Aïn Tawargha.

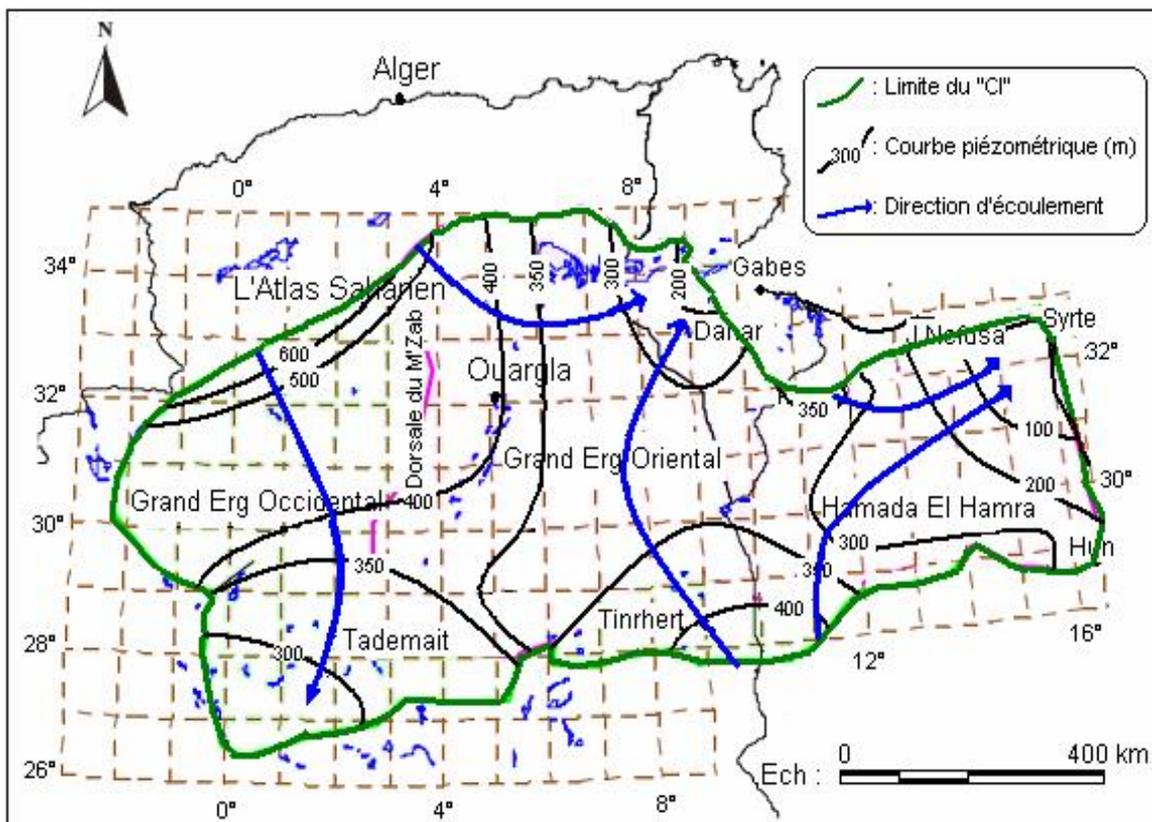


Fig. 2-3 : Carte piézométrique de référence du "CI" (OSS, 2003)

2.1.2.3 – Exploitation du "CI" :

L'exploitation du "CI" s'est d'abord effectuée, depuis de longs siècles, par le système traditionnel des foggaras, introduit sur les rebords occidentaux et méridionaux du Tademaït dès le vingtième siècle. Leur débit total, connu au travers des campagnes de mesures effectuées en 1932, 1950 et 1960, est resté invariable jusqu'aux années 1970, il est de l'ordre de $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les premiers forages artésiens ont été d'autre part réalisés vers la fin du siècle dernier (El Golea et Ain Salah), mais leur débit est resté faible (250-300 l/s) jusqu'aux années 1950. La réalisation des premiers grands forages (Zelfana, Guerrara, Ouargla et O. Rhir) a ensuite rapidement porté le débit exhauré à 3 m³/s (1970).

Actuellement, le débit total exploité (Algérie et Tunisie) au travers de quelques 1 200 forages, atteint 19 m³/s, soit 600 hm³/an.

L'artésianisme a régressé dans les régions fortement exploitées (10 à 50 m de baisse entre 1950 et l'actuel, peut-être jusqu'à 100 m à Touggourt) mais reste important dans tout le secteur central du bassin, où il dépasse 150 m, et atteint encore 200 m localement (BRL, 1999).

La simulation Zéro du SASS (Fig.2-4), basée sur la poursuite des prélèvements actuels, sans aucune augmentation, indique que les rabattements augmenteront d'une cinquantaine de mètres en 2050 à Ouargla par rapport à l'état en 2000. Ces rabattements supplémentaires produiront une diminution des débits artésiens de l'ordre de 25 % sur les forages existants.

L'hypothèse faible d'augmentation des prélèvements, c'est-à-dire : *"Répartition allégeant l'augmentation des prélèvements dans les zones sensibles (ex : 3 m³/s à O. Rhir) et les reportant sur des zones moins sensibles (ex : 5,15 m³/s à Touat)"*, provoquerait des rabattements très importants, faisant disparaître l'artésianisme de tout le Bas Sahara et les profondeurs de pompage y seraient de l'ordre de 100 m en 2050.

D'après ces simulations et pour éviter un tel scénario catastrophique, le développement des prélèvements devrait s'effectuer hors du bassin artésien, dans les zones de nappe libre encore peu exploitées et peu connues, notamment le Grand Erg Occidental. Des champs captants de l'ordre du 1 m³/s pourraient y être développés.

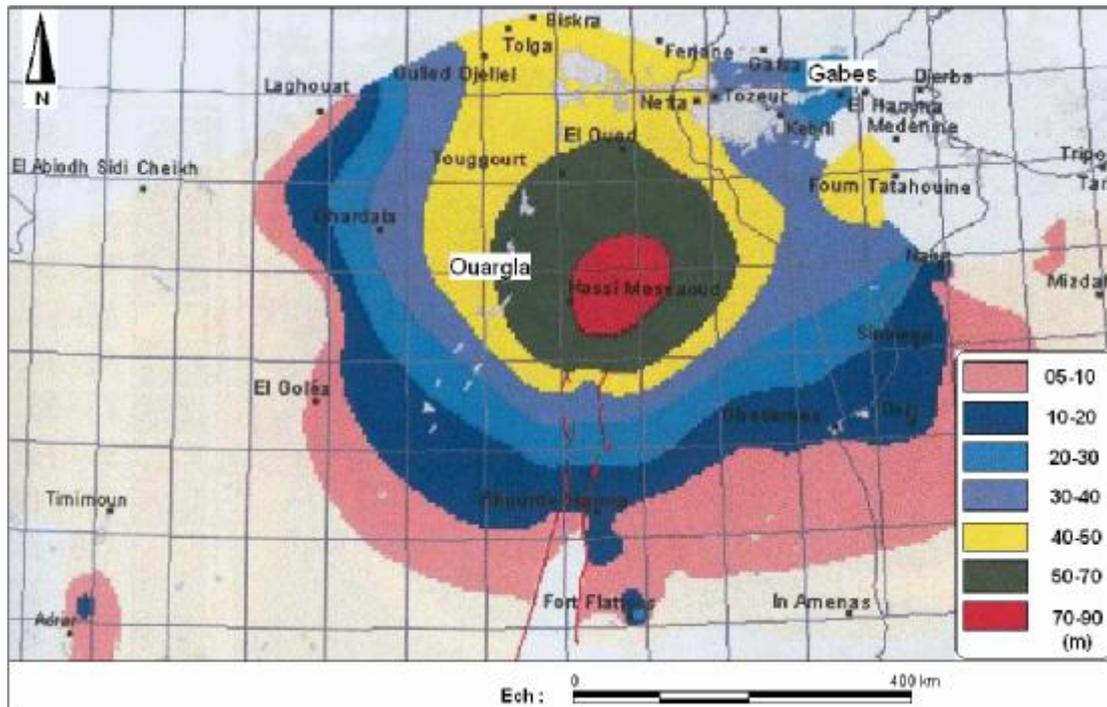


Fig. 2-4 : Rabattements 2000-2050 au "CI" (OSS, 2003)

2.1.2.4 – Conclusion :

La formation du "CI" est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur. C'est un système aquifère multicouche dont la profondeur atteint localement 2000 m et dont la puissance varie entre 200 et 400 m, à Ouargla, il est exploité entre 1 150 m et 1 350 m de profondeur.

Les paramètres hydrodynamiques ont été mesurés par des pompages d'essais puis homogénéisés et complétés par le calage des modèles de simulation hydrodynamique (ERESS, 1985). Une valeur de $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ a été définie pour la transmissivité et 10^{-3} pour le coefficient d'emmagasinement (ANRH-Ouargla, 2001).

La recharge actuelle de la nappe du "CI" estimée à $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le territoire Algérien s'effectue par infiltration des précipitations sur les bordures du bassin, tout au long des oueds qui descendent des massifs montagneux, notamment de l'Atlas Saharien au N-W et du Dahar à l'Est. Des ruissellements en bordure de plateaux peuvent également participer à l'alimentation de la nappe sur les bords de Tademaït et de Tinrhert, de même que l'infiltration des pluies sur le Grand Erg Occidental.

Les prélèvements s'élevaient en 1998 à 25 m³/s. Ils s'effectuent principalement aux dépens des réserves. La nappe déstocke à raison de 16,5 m³/s, ce qui provoque une baisse des niveaux piézométriques, de l'artésianisme et une réduction du débit aux exutoires.

Il est recommandé, à l'échelle de la cuvette de Ouargla, de limiter les prélèvements pour ménager la ressource et de remplacer, pour l'irrigation des palmeraies, les eaux de cette nappe par des eaux d'assainissement traitées.

Les observations recommandées pour suivre l'évolution de cette ressource sont :

- Installation et relevé de compteurs sur les deux forages opérationnels de la zone d'étude (El H'deb 1 et 2);
- Installation et relevé de manomètre sur un ou plusieurs forages abandonnés pour suivre l'évolution de l'artésianisme.

Une baisse de l'artésianisme provoque une baisse de débit des forages artésiens. Il peut être utile de connaître cette baisse non seulement dans un but scientifique, mais aussi pour éviter de l'attribuer à tort à un colmatage des forages.

2.1.3 – Le Complexe Terminal (CT) :

Il est noté dans l'étude OSS (2003b) que classiquement, et selon la définition de Kilian (1931), le terme « *Continental Terminal* » désignait les formations continentales, sableuses et argileuses du Mio-Pliocène. Mais d'après Bel et Demargne (1966) : « *La nappe du Continental Terminal contenue dans les sables du Mio-Pliocène est plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut considérer que ces différents niveaux forment une seule et même nappe - la nappe du Continental Terminal - par opposition au Continental Intercalaire* ».

C'est avec le projet ERESS que l'on verra apparaître la notion de « Complexe Terminal », appellation publiée pour la première fois par Bel et Cuhe (1969).

Le terme de « nappes du Complexe Terminal » qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes, a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même ensemble hydraulique.

Les intercommunications entre Sénonien, Eocène et Mio-Pliocène sont évidentes sur l'ensemble du Bassin, à l'exception de la région des chotts où l'Eocène moyen et supérieur imperméable vient s'intercaler.

La nappe turonienne est plus individualisée par suite de la couverture imperméable du Sénonien inférieur. Cependant, ses niveaux concordent avec ceux du Sénonien ou du Mio-Pliocène sur la bordure du bassin.

La profondeur du "CT" est comprise entre 100 et 600 m et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m (Fig.2-5).

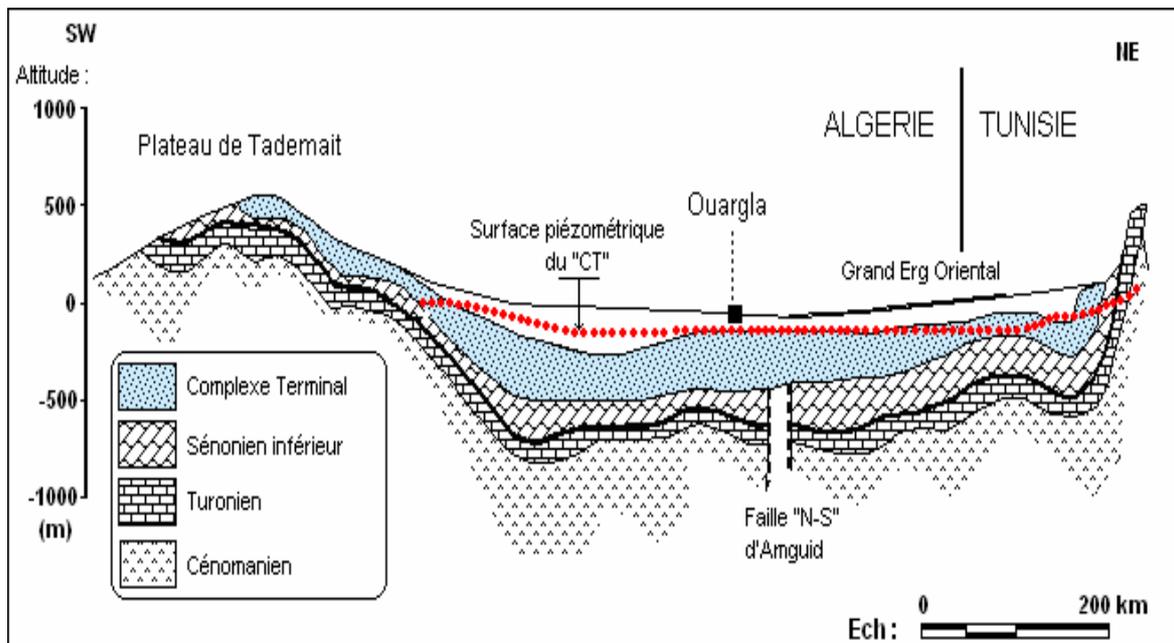


Fig. 2-5 : Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (UNESCO, 1972)

Le Complexe Terminal affleure aux endroits suivants :

- Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens;
- À l'Est, le long du flanc oriental du Dahar;
- Au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït;
- À l'Ouest, sur la dorsale du M'Zab.

2.1.3.1 – Piézométrie du "CT" :

Comme pour le "CI", la construction de la carte piézométrique du "CT" est le résultat de l'accumulation des contributions successives élaborées depuis quarante ans, depuis la publication par Cornet (1964) de la première carte piézométrique couvrant tout le « Continental Terminal » du Sahara. Parmi les contributions les plus significatives, on peut citer notamment Bel et Cuche (1969) et le Projet ERESS (1972).

L'ensemble de ces travaux a permis de dresser une carte piézométrique « initiale » ou encore peu influencée par pompage, à l'échelle du bassin du Sahara Septentrional (Fig.2-6).

Cette piézométrie a concerné les formations calcaires sénoniennes et éocènes ainsi que les sables du Pontien (O. Rhir et Djérid) assez souvent en relais hydrogéologiques. Elle se raccorde parfaitement et permet d'avoir la continuité de l'écoulement souterrain en passant d'une zone à l'autre (OSS, 2003).

L'examen de la carte piézométrique met en évidence les zones d'alimentation, à savoir :

- L'Atlas Saharien au Nord-Ouest;
- Le Dahar à l'Est;
- Le Tinrhert au Sud;
- Les monts du M'Zab.

La permanence d'une alimentation actuelle (équivalente à 750 hm³/an «M. Baba sy, 2005») du réservoir est vraisemblable en plusieurs régions :

-- Sur les bordures relativement arrosées du bassin, par infiltration directe sur les affleurements calcaires (Sénonien, Eocène inférieur et Turonien), ou au travers des nappes d'inféro-flux des oueds : bordure Sud-Atlasique, M'Zab et Dahar;

-- Dans les deux grands Ergs (Occidental et Oriental), par infiltration de pluies exceptionnelles au travers des formations dunaires perméables.

L'écoulement de cette nappe se produit :

-- À partir de la dorsale du M'Zab, où l'ensemble de l'écoulement converge vers la zone des Chotts (c'est-à-dire qu'il se renverse et s'effectue du Sud vers le Nord sous le Grand Erg Oriental);

- Dans le sens Ouest-Est, où les eaux en provenance de l'Atlas Saharien, se convergent vers la zone des Chotts.
- Dans le sens Sud-Nord, du plateau du Tinhert vers la zone des Chotts et le Golfe de Syrte.

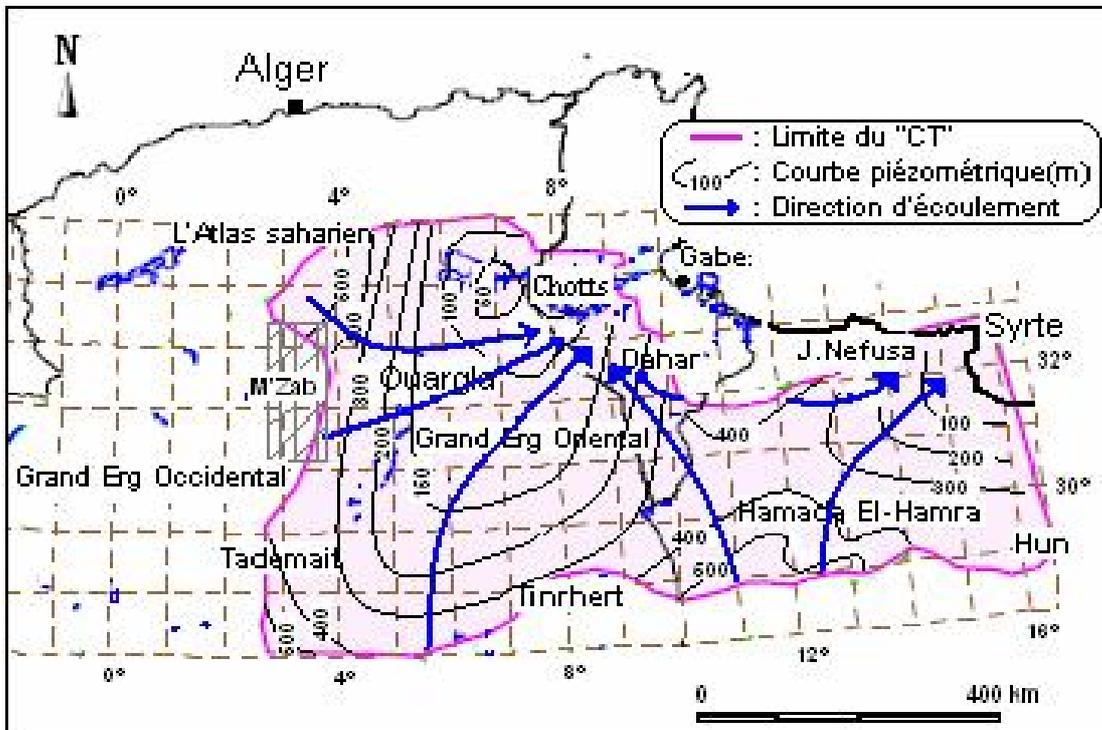


Fig. 2-6 : Carte piézométrique de référence du "CT" (OSS, 2003)

La carte piézométrique (Fig. 2-7) dressée à l'échelle locale (cuvette de Ouargla), montre un écoulement qui se produit :

- Dans le sens Sud-Nord, du centre ville de Ouargla -Rouissat vers la zone de N'Goussa;
- Dans le sens SW-NE, de la ville de Ouargla vers la zone des Chotts (Oum-Raneb).

Généralement, la nappe présente un sens d'écoulement vers le Nord-Est, c'est-à-dire : qu'il coïncide avec cel précité (Fig. 2-6), du M'Zab vers la zone des Chotts algéro-tunisiens.

Les paramètres hydrodynamiques au niveau de la zone d'étude sont définis comme ce suit :

- 8.10^{-3} à 9.10^{-2} m^2/s pour la transmissivité;
- 5.10^{-3} à 3.10^{-2} pour le coefficient d'emmagasinement.

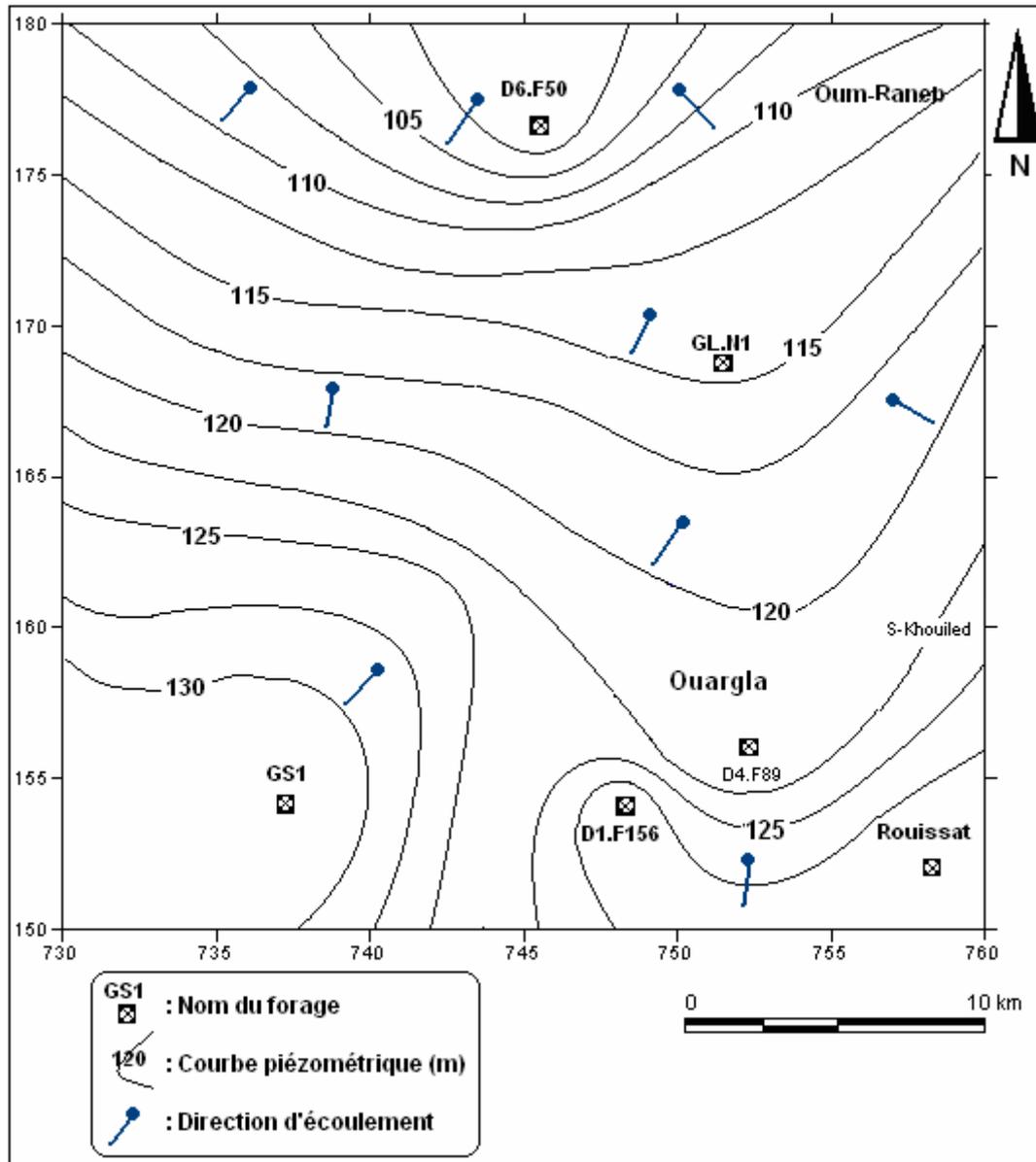


Fig. 2-7 : Carte piézométrique du "CT" dans la cuvette de Ouargla

Les zones exutoires sont principalement centrées sur les Chotts algéro-tunisiens (Chotts Melrhir et Merouane en Algérie et Djérid et El-Gharsa en Tunisie) et sur le Golfe de Syrte.

2.1.3.2 – Exploitation du "CT" :

Le débit exploité était de l'ordre de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1900 dans l'O.Rhir, la cuvette de Ouargla, les sources du Djérid et Aïn Tawargha. Ce débit n'a pas cessé de croître, pour atteindre $44,5 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $1\,400 \text{ hm}^3/\text{an}$ en 2000.

Par contre, la diminution de la fraction artésienne du débit exploité est spectaculaire, de 100 % en 1900, elle est tombée à 58 % en 1970 et à près de 3 % en 2005 (M. Babasy, 2005).

Les simulations effectuées sur le modèle du SASS sont tout aussi alarmistes : (Fig. 2-8)

« Le secteur le plus exposé est celui des chotts algéro-tunisiens au "CT". C'est sans aucun doute la région où la nappe est la plus vulnérable. C'est là où se trouvent les plus fortes densités de population, et c'est là où la pression sur la ressource sera la plus forte... . La simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 m...sur l'O.Rhir... le Souf....

Une telle situation serait inacceptable... : le risque de percolation du chott vers la nappe serait fatal pour cette dernière en terme de salinité. La simple poursuite de l'existant, du moins dans le "CT", serait donc tout à fait inacceptable pour la région des Chotts. Là il faudra sérieusement envisager la réduction des prélèvements comme un scénario plausible et s'y préparer d'ores et déjà... . La simple poursuite des rythmes de prélèvements actuels y constitue un danger potentiel majeur » (OSS, 2003).

Ces baisses ont pour conséquence que de nouvelles ressources devront être substituées à celles actuellement exploitées et que pour le moins le niveau des pompes devra être abaissé dans les forages, lorsque cela sera possible, sinon de nouveaux forages plus profonds devront être réalisés. Les hauteurs de refoulement et les coûts de production vont augmenter autant pour l'AEP que pour l'irrigation.

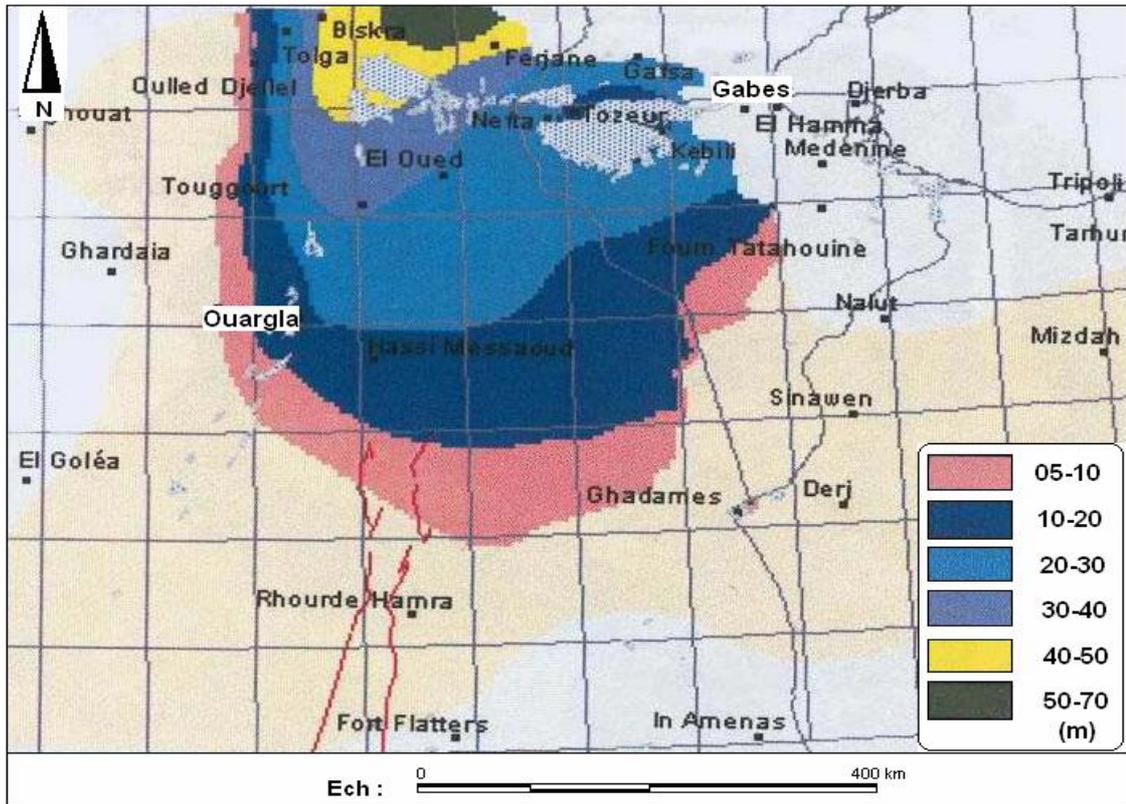


Fig. 2-8 : Rabattements 2000-2050 au "CT" (OSS, 2003)

2.1.3.3 – Conclusion :

Les formations du "CT" sont très hétérogènes, elles englobent localement les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène. La profondeur est comprise entre 100 et 600 m et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m.

Les prélèvements dans le "CT" étaient de $16,3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le territoire algérien en 1998. Le niveau piézométrique est en baisse générale, cette baisse deviendra catastrophique dans une trentaine d'années dans les zones les plus exploitées où elle pourrait dépasser 200 m.

À l'échelle de la cuvette de Ouargla, les forages du "CT" sont rarement équipés de débitmètres ou de sécurités de niveau bas. Sur plus de 20 % de ces forages, des perturbations sont produites par des entrées d'air au niveau des crépines, signe d'une pompe surdimensionnée, placée trop haut ou d'un rabattement de l'aquifère trop important.

Il est à prévoir que ce phénomène s'amplifiera avec les années à cause de la baisse générale du niveau de cette nappe.

Il est recommandé, comme pour le "CI", de limiter les prélèvements pour ménager cette ressource et de remplacer, pour l'irrigation des palmeraies, les eaux de cette nappe par des eaux d'assainissement traitées.

De plus, il faut protéger les équipements des forages par :

- Installation de tableaux de contrôle avec sécurité de niveau bas;
- Installation de pompes de débit inférieur à une profondeur plus grande selon les possibilités et les besoins, en prenant garde de ne pas installer la pompe au niveau des crépines, ce qui risquerait de créer des venues de sable;
- Pose de débitmètres.

2.2 - LA NAPPE PHREATIQUE :

2.2.1 - Introduction : La documentation existante a été collectée, analysée, interprétée et synthétisée.

La nappe phréatique est contenue dans les formations perméables sablo-gypseuses du Quaternaire. Les sondages carottés effectués par "LTPS", en plus des logs des piézomètres effectués par l'ENA.GEO, ont permis de relever la présence de trois classes de profils géologiques :

* **Classe A :** C'est la classe la plus répandue, elle représente ≈ 75 % des terrains. On distingue :

- Une première couche dont l'épaisseur varie de 1 à 2 m, constituée de sable fin à moyen légèrement gypseux avec une consistance de moyenne compacité;
- Une deuxième couche constituée de sable argileux compacté, dont l'épaisseur varie entre 5 et 15 m.

* **Classe B :** Elle caractérise les chotts et les sebkhas où on distingue :

- Des encroûtements gypseux très salés dont l'épaisseur varie de 1 à 2 m;
- Des sables limoneux avec un passage tuffeux.

* **Classe C :** Elle caractérise les versants de la cuvette et le plateau Mio-Pliocène. On distingue :

- Un matériau détritique constitué de grès consolidé (glacis) et de sable limoneux pauvre en gypse dont l'épaisseur est supérieure de 10 m;
- Du sable grossier compacté.

2.2.2 – Etude géophysique :

2.2.2.1 – Introduction :

La géophysique est un outil indispensable pour toutes études hydrogéologiques, parmi les méthodes utilisées, on a la méthode électrique qui détermine par sondages électriques, la répartition des résistivités des terrains en profondeur. Cette résistivité "électrique apparente" est fonction de la nature minéralogique et de la granulométrie des constituants de ces terrains, de sa porosité, de la saturation et des caractéristiques électriques du fluide d'imbibition.

ENA.GEO a effectué entre 1988 et 1992 des profils de sondages électriques A à V en travers de la vallée comportant au total plus de 120 SE (Fig. 3-1).

- Le profil A est situé à 5 km au Nord de Hassi Debiche;
- Le profil V à 2 km au Sud de Rouissat;
- Les profils intermédiaires sont répartis régulièrement tous les 50 km séparant ces deux profils.

Les résultats de cette prospection géophysique ont permis d'établir des corrélations avec les coupes lithologiques des sondages effectuées. Ainsi des coupes géophysiques ont été établies de façon à couvrir l'ensemble de la cuvette.

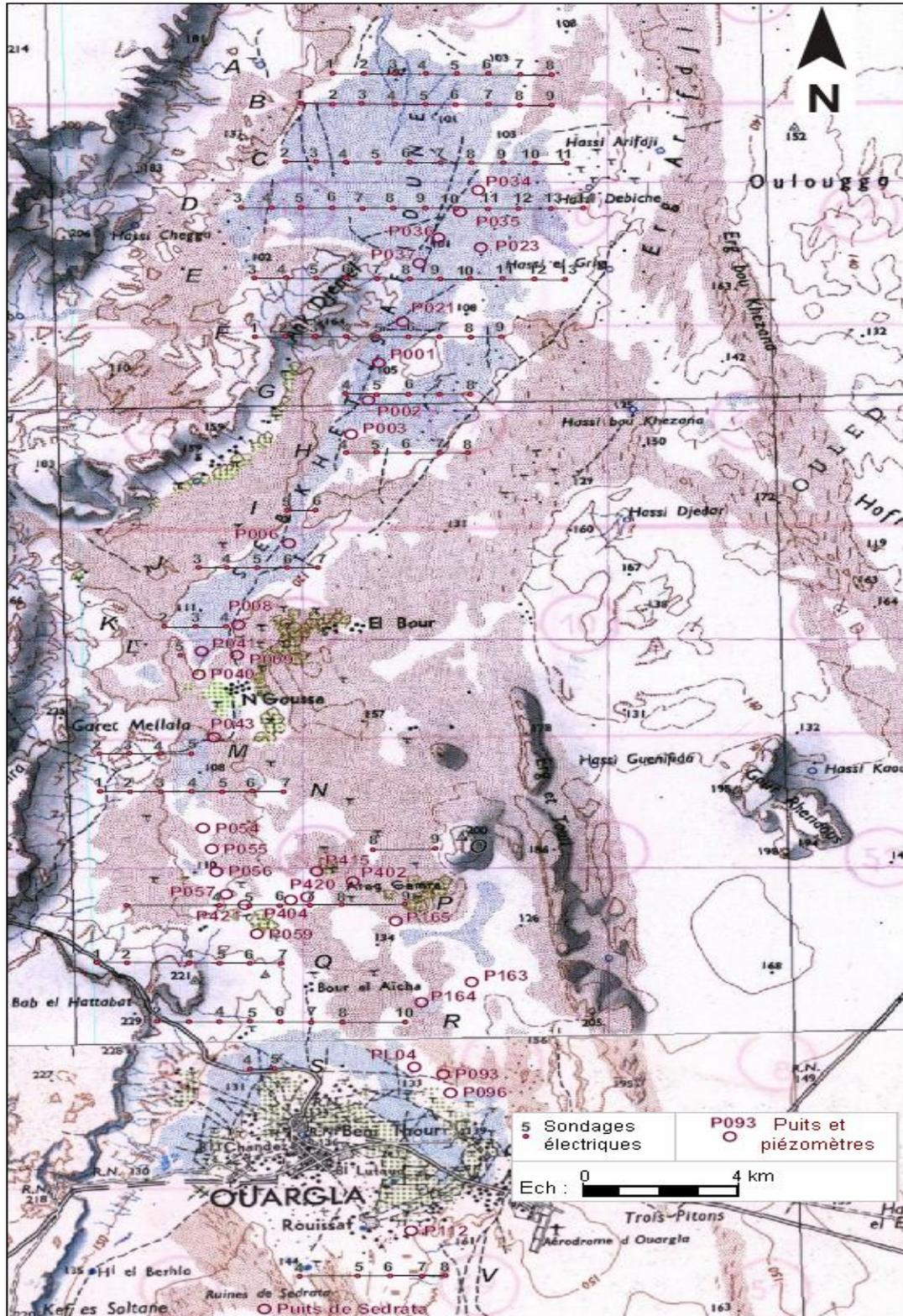


Fig. 3-1 : Plan de situation des sondages électriques (BG, 2004)

2.2.2.2 – Interprétation des coupes géo-électriques :

Les terrains situés au Sud de Rouissat ont une résistivité comprise entre 5 et 30 Ohm.m jusqu'à une profondeur de 70 m. Ce sont essentiellement les sables et les sables tufeux qui surmontent les formations imperméables sablo-argileuses (Fig. 3-2).

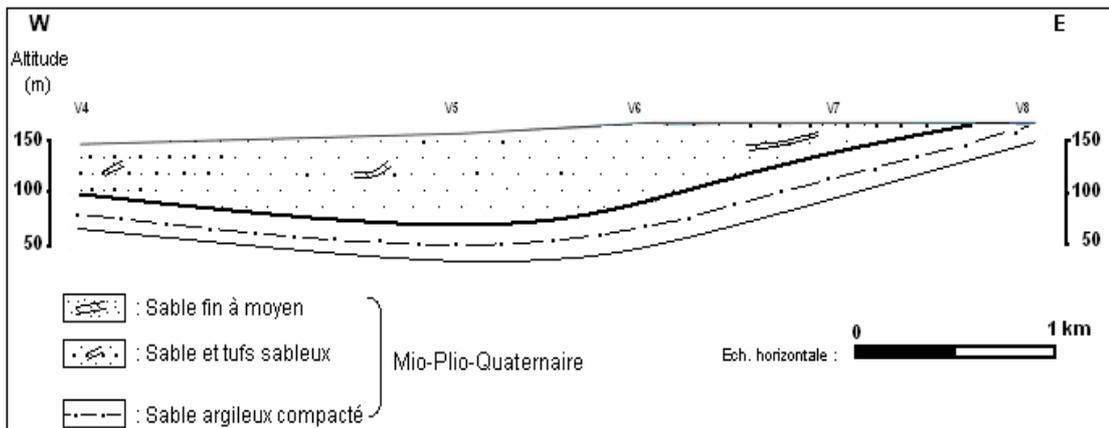


Fig. 3-2 : Coupe géo-électrique selon le profil V (ENA.GEO, 1992)

Entre Ouargla et Bour El Haïcha, les terrains ont une résistivité faible de 0,2 à 1,2 Ohm.m correspondant aux dépôts sableux de la nappe phréatique dont la profondeur peut atteindre 30 m (Fig. 3-3).

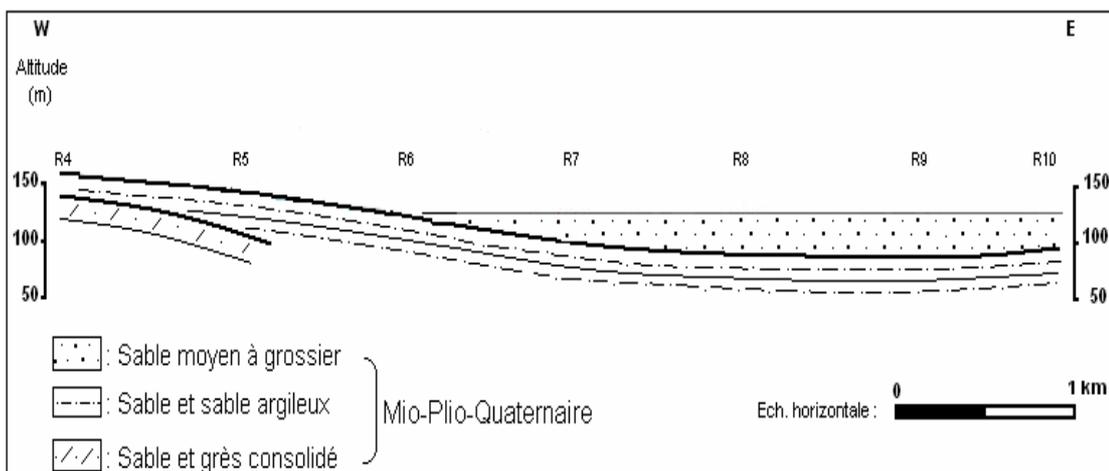


Fig. 3-3 : Coupe géo-électrique selon le profil R (ENA.GEO, 1992)

Au Nord de Bour El Haïcha jusqu'à N'Goussa, la résistivité du terrain n'est jamais inférieure à 6 Ohm.m, quelle que soit la profondeur d'investigation considérée (Fig. 3-4). C'est le domaine de palmiers bours et de palmeraies irriguées.

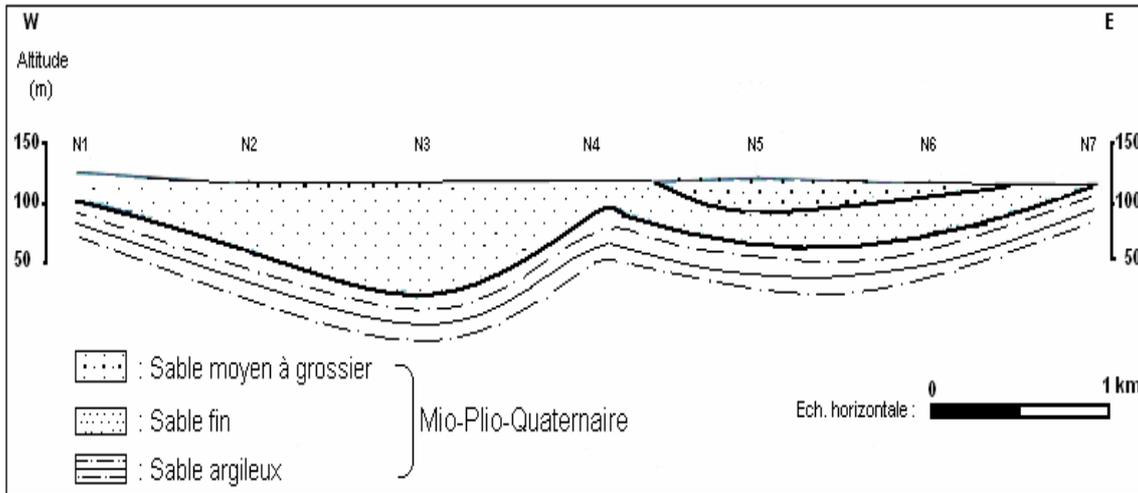


Fig. 3-4 : Coupe géo-électrique selon le profil N (ENA.GEO, 1992)

Au Nord de N'Goussa, les sondages électriques qui sont dans la partie basse de la vallée ont une résistivité comprise entre 0,2 et 1 Ohm.m. C'est le domaine de Sebket Safioune où les formations de recouvrement sont essentiellement de sable fin argileux (Fig. 3-5).

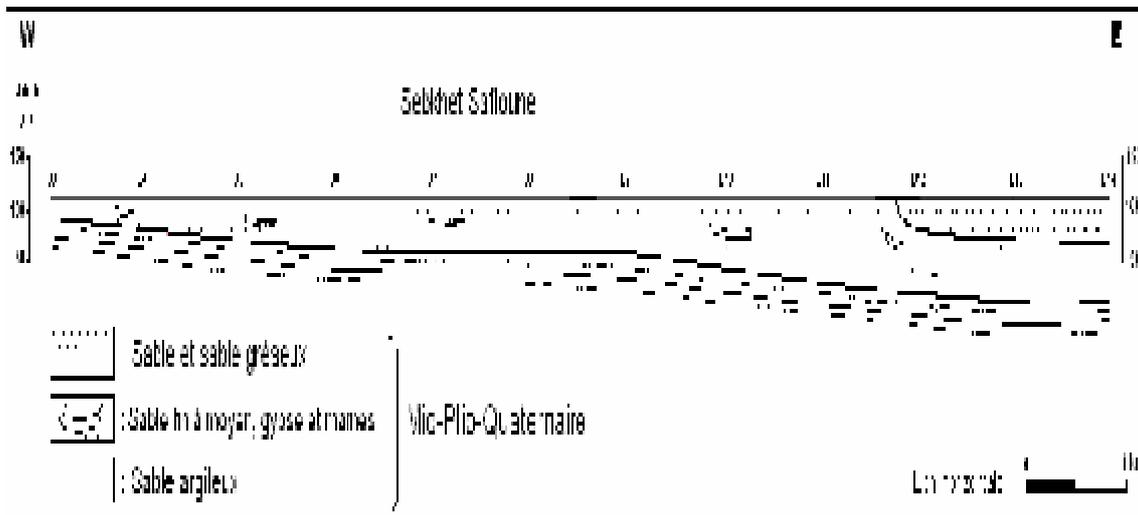


Fig. 3-5 : Coupe géo-électrique selon le profil D (ENA.GEO, 1992)

L'interprétation de l'ensemble des sondages électriques ainsi que leur répartition le long de la zone d'étude, a permis l'établissement d'une carte en isorésistivité (Fig. 3-6).

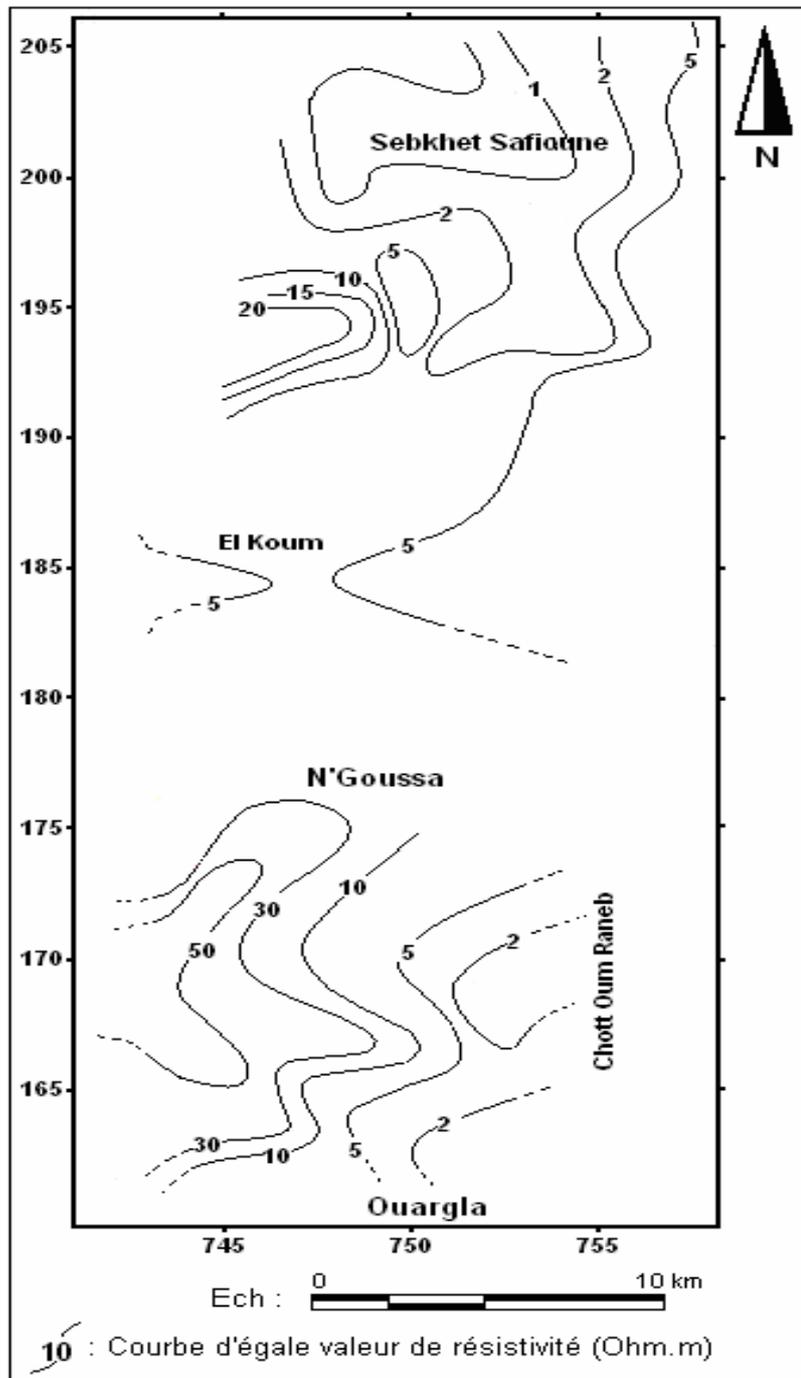


Fig. 3-6 : Carte en isorésistivité

Cette carte montre que les différents terrains rencontrés ont une résistivité inférieure à 50 Ohm.m. Par corrélation avec les données géologiques, on constate que ces terrains correspondent essentiellement à des formations sablo-argileuses, argilo-gypseuses et argileuses dont l'épaisseur peut dépasser 100 m.

Grâce aux données des forages au niveau de la cuvette de Ouargla, nous avons réalisé une carte d'égal profondeur (isobathe) du mur de la nappe phréatique (Fig. 3-7).

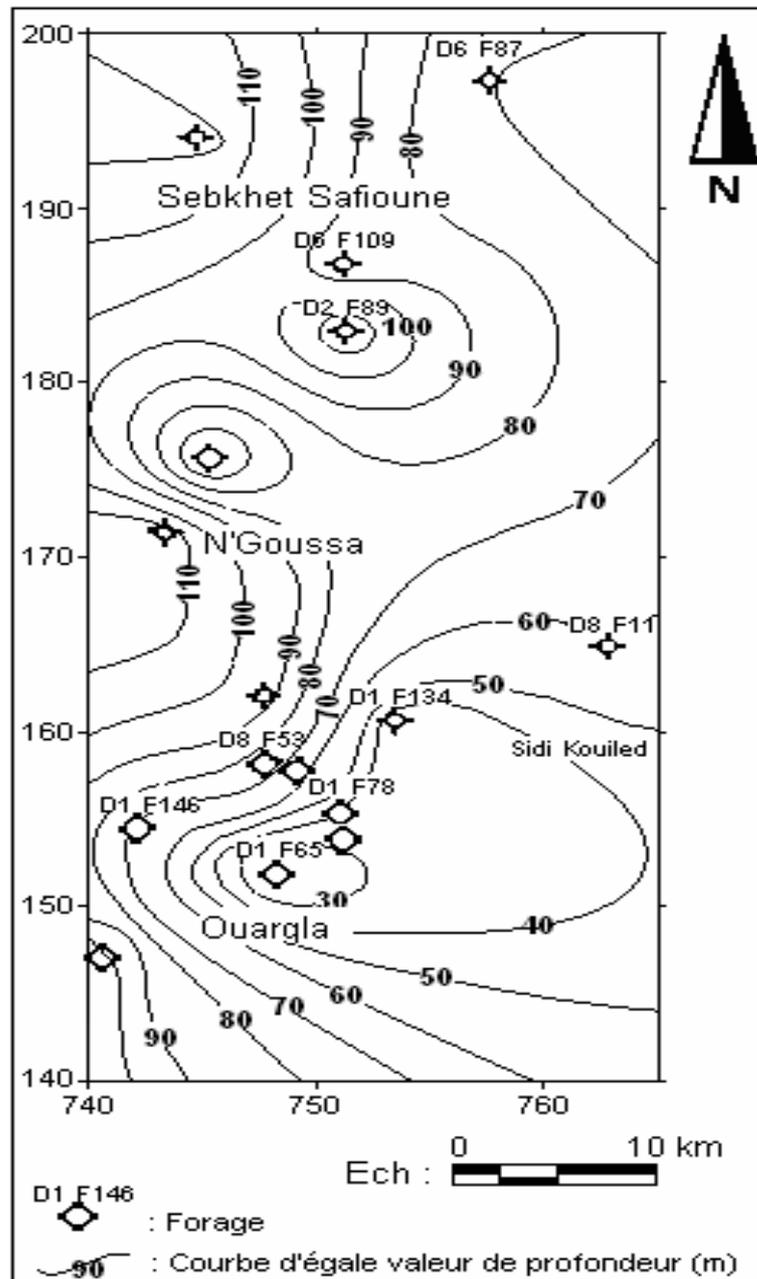


Fig. 3-7 : Carte en isobathe du mur de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla

Tenant compte cette carte isobathe, on remarque que les courbes semblent s'organiser en une suite des structures fermées correspondant à une série de dépressions et de bombements qui traduit la variation du profondeur du mur (substratum) d'une zone à une autre.

Dans la partie sud, la profondeur n'est qu'à 30 m, il atteint sa valeur maximale qui est de l'ordre de 120 m au niveau de Sebket Safioune au Nord.

Enfin les résultats obtenus par cette campagne géophysique, nous a permis de constater que la cuvette de Ouargla présente une géologie monotone, il n'y a pas de structures majeures.

2.2.3 – Etude piézométrique de la nappe phréatique :

Le phénomène de remontée de la nappe phréatique, son origine, ses causes et son évolution ont été analysés au cours de l'histoire récente ainsi que les remèdes appliqués pour tenter de le maîtriser.

Les données collectées ont été comparées entre elles et avec des données plus anciennes, qui ont été validées avant d'être utilisées pour suivre l'évolution de la nappe phréatique.

[Le réseau et plan de surveillance sont consignés en annexe A₂].

2.2.3.1 – La piézométrie avant 1956 :

Les fluctuations du niveau de la nappe phréatique sont étroitement liées à l'histoire des palmeraies, à l'exploitation des ressources en eau artésienne et aux efforts d'assainissement consentis pour lutter contre les nuisances qui en ont résulté.

Les chroniques rapportent qu'en 1881, les fossés entourant le Ksar sont comblés pour lutter contre le paludisme, ce qui indique qu'à cette époque ils étaient remplis d'eau stagnante et que la nappe phréatique était proche de la surface du sol.

En 1949, le réseau de drainage est rénové, 20 km de drains nouveaux sont réalisés ainsi que 5 grands collecteurs. Ces travaux se poursuivent en 1950 et fin 1951, grâce à 30 km de drainages nouveaux, le niveau de la nappe phréatique a baissé de plus de 1 m.

2.2.3.2 – La piézométrie après 1956 :

En 1956, le forage "Albien I" au Sud-Est du Ksar a servi à la revivification des palmeraies anciennes et à la création de nouvelles plantations. Parallèlement, l'exploitation de la nappe du Complexe Terminal est développée, le réseau de drainage étendu et rénové.

Les eaux de drainage qui se déversent dans le Chott provoquent une élévation sensible du niveau de l'eau en saison froide. En même temps, le développement de la ville et l'évacuation des eaux urbaines provoquent une augmentation du niveau de la nappe phréatique.

Le problème est d'abaisser le niveau du Chott et celui de la nappe phréatique de façon à mieux drainer les palmeraies tout en permettant la mise en place d'un réseau d'assainissement efficace.

Il a commencé par l'installation, en 1956, d'une éolienne d'exhaure qui permettait d'évacuer l'eau vers Sebkhet Oum Raneb. Le débit de $120 \text{ m}^3/\text{h}$ s'est révélé insuffisant et deux groupes motopompes ont été adjoints à l'éolienne portant le débit total à $255 \text{ m}^3/\text{h}$ (DHW-Ouargla, 2006). Ce débit étant toujours insuffisant, d'autres solutions sont envisagées :

- Bassin évaporatoire dans les chotts et sebkhas;
- Pompage et évacuation vers Sebkhet Oum Raneb.

2.2.3.2.1 – La piézométrie en 1968 :

La nappe phréatique dessine nettement un dôme sous la ville de Ouargla, sa cote est plus élevée que celle de la nappe du "CT" (Fig.3-8).

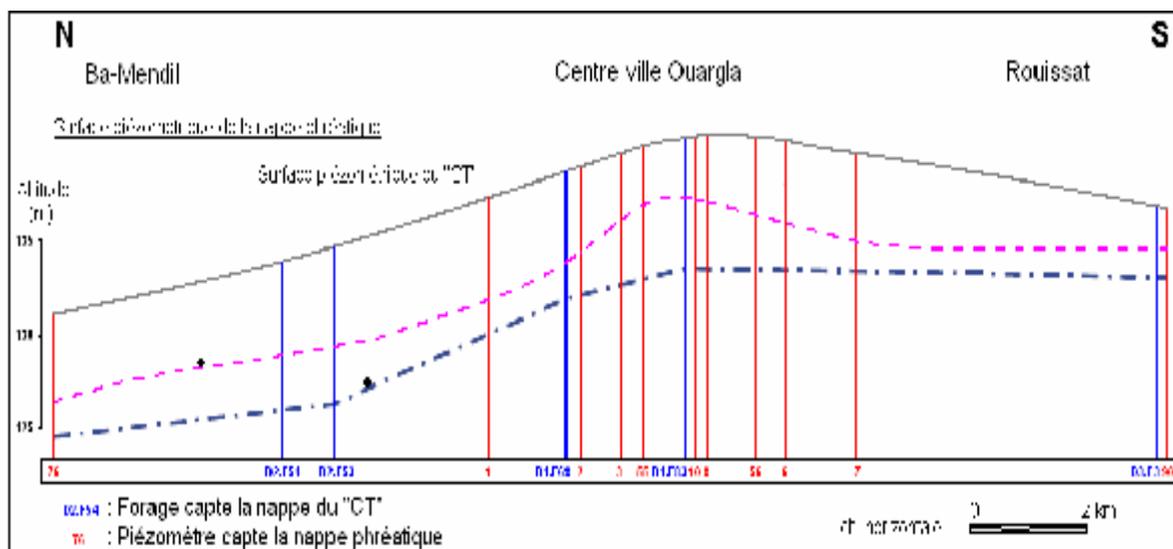


Fig. 3-8 : Coupe hydrogéologique de la nappe phréatique en 1968
(DHW-Ouargla, 1968)

On pourrait envisager la nappe du Continental Intercalaire "CI" qui présente un niveau piézométrique nettement plus élevé d'environ 200 m, mais pour alimenter la nappe phréatique, les eaux devraient traverser la nappe du "CT" et donc se mélanger, ce qui n'est pas le cas.

L'alimentation de la nappe phréatique ne peut provenir que d'une cause anthropique : irrigation des palmeraies et eaux urbaines.

2.2.3.2.2 – La piézométrie entre 1992 et 2002 :

Entre Février 1992 et Avril 2002, sur une période de 10 ans, une baisse générale de niveau est constatée. Seuls 6 piézomètres présentent une montée du niveau égale ou supérieure à 10 cm. Ils sont situés au Nord et au Sud de N'Goussa ainsi qu'à l'Est et l'Ouest de Ouargla (Fig. 3-10).

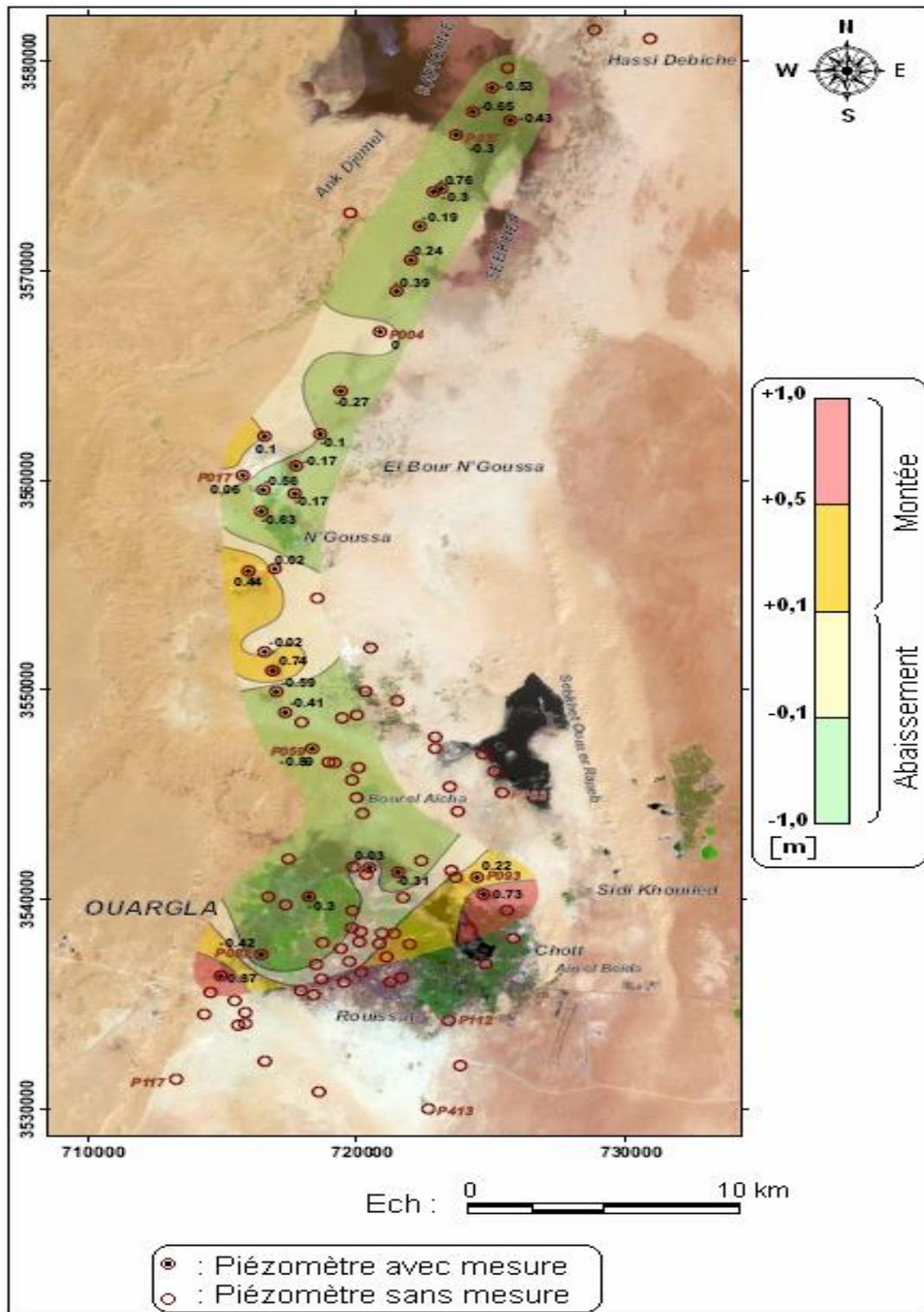


Fig. 3-10 : Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla, période 1992-2002 (BG, 2004)

2.2.3.2.3 – La piézométrie entre 2002 et 2003 :

La carte de la figure (3-11) ci-dessous montre l'évolution de niveau piézométrique d'une année à l'autre. Elle concerne la fin de période estivale de deux années successives.

On constate que hors de la palmeraie nord de Ouargla où il y a une légère montée de la nappe, les niveaux sont plutôt stables, avec toutefois des points en baisse au Sud d'Oum Raneb, ville de Ouargla et Bour El Haïcha.

D'une année à la suivante et en considérant la même saison, on constate que les variations de niveau s'équilibrent et qu'elles sont généralement faibles. Les variations les plus importantes sont observées sur des puits exploités ou anciennement exploités, elles sont dues à l'activité humaine.

Dans la région de Ouargla, les variations de niveau sont plus importantes et contrastées que dans le reste de la vallée.

Au niveau de la palmeraie nord, la montée semble être généralisée, entre 0,10 m et 0,50 m.

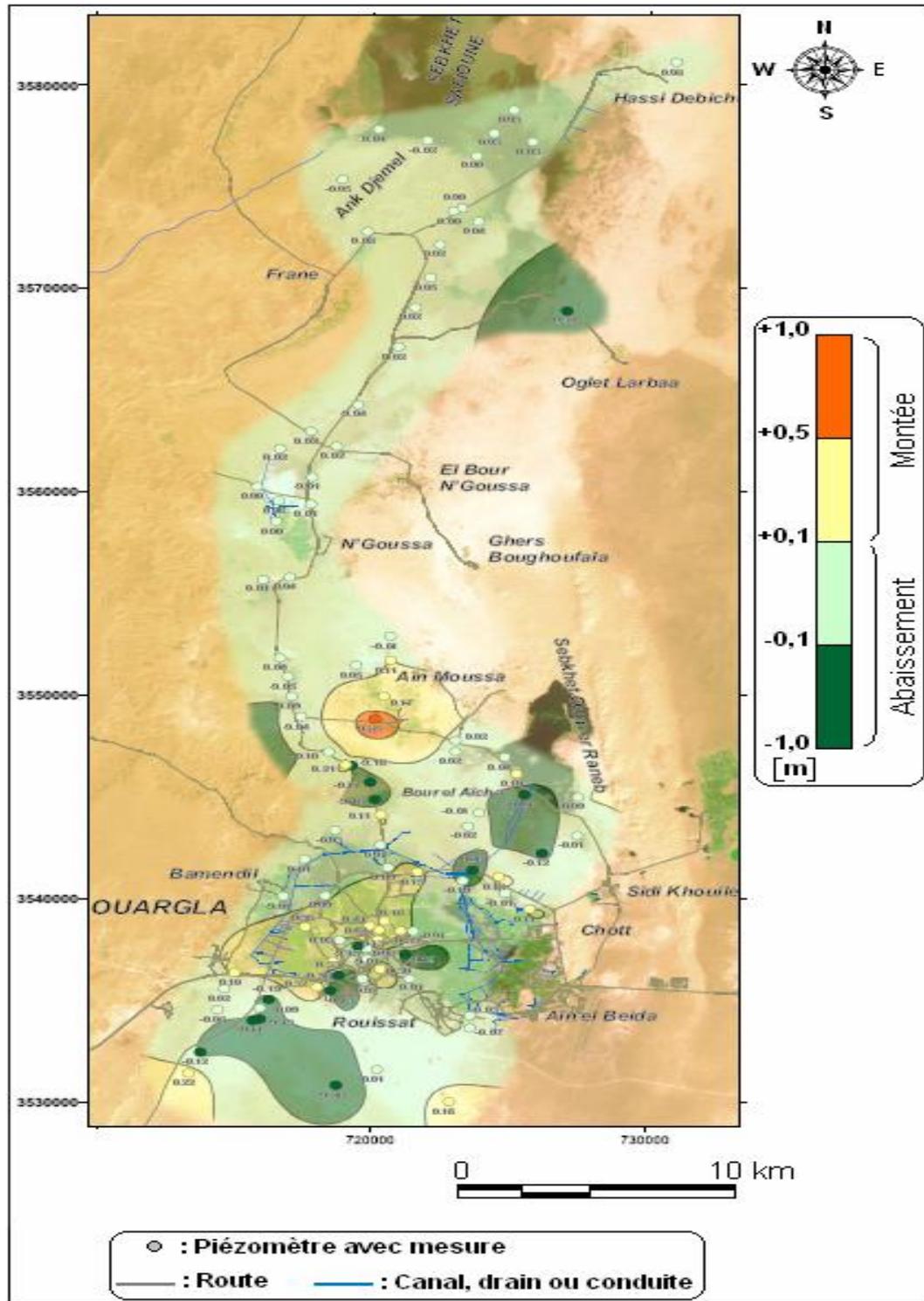


Fig. 3-11 : Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla, période 2002-2003 (BG, 2004)

2.2.3.2.4 – La piézométrie en 2003 : (Fig. 3-12)

Le point le plus haut de la nappe est situé sous la ville de Ouargla, de là, la nappe présente des pentes de :

- 2 ‰ vers Sebkhet Ba-Mendil au Nord;
- 1,5 ‰ vers le Chott à l'Est et
- 1 ‰ vers le Sud.

En limite Sud-Est de la région d'étude, il existe un deuxième point haut, sous une plantation irriguée à partir de la nappe du "CT".

Une faible pente (0,4 ‰) existe entre les piézomètres situés au bord de Sebkhet Ba-Mendil et ceux d'Oum Raneb. Cette pente passe à 1 ‰ d'Oum Raneb en direction de N'Goussa.

À N'Goussa, l'irrigation des plantations crée un point haut d'où les eaux s'écoulent aussi bien vers le Nord que vers le Sud où la nappe est à une cote plus basse.

De N'Goussa, la nappe présente une pente de 0,6 à 1 ‰ vers Sebkhet Safioune, point bas de toute la zone.

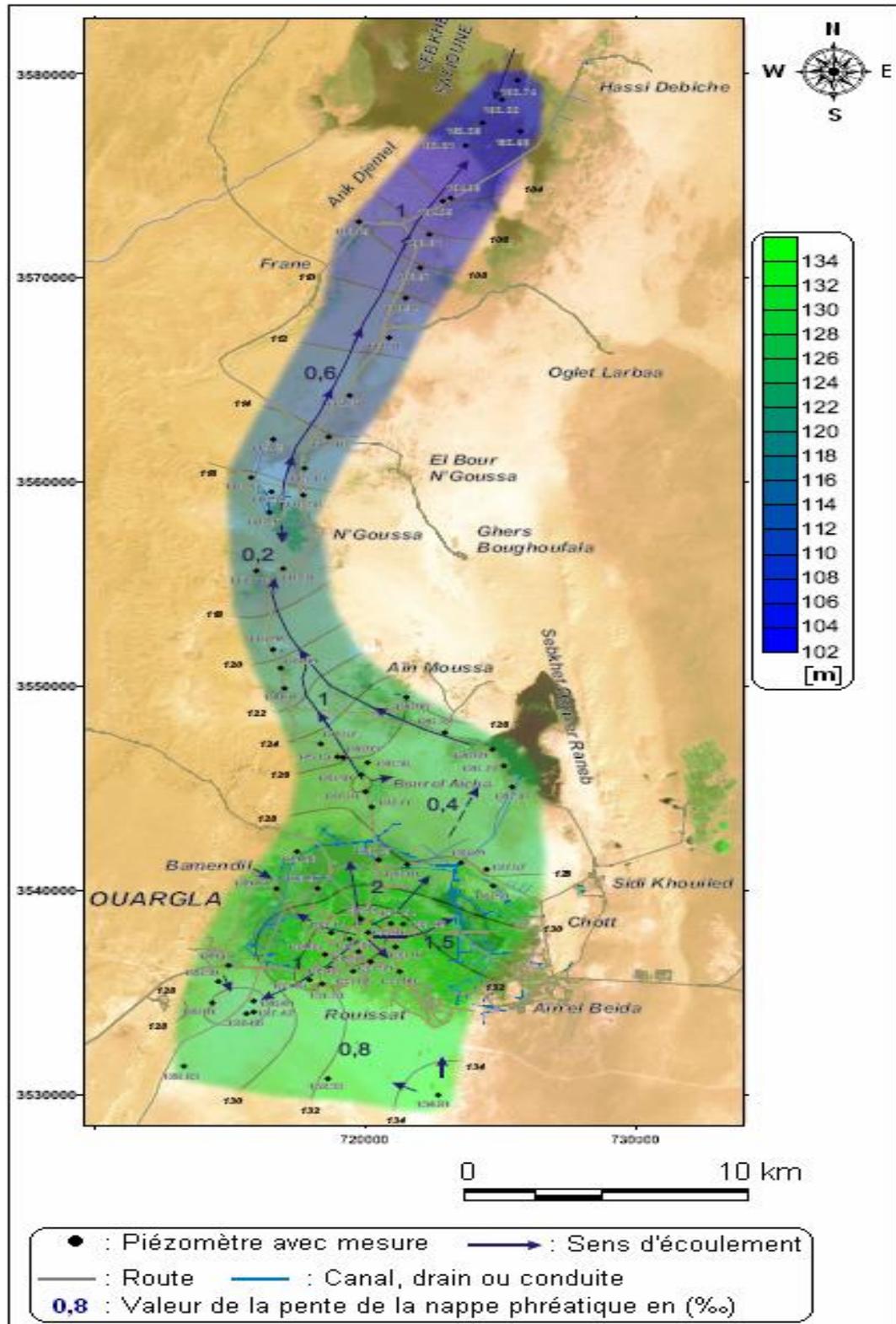


Fig. 3-12 : Carte piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla en 2003 (BG, 2004)

2.2.3.2.5 – La piézométrie en 2007 : (Fig. 3-13)

Dans la partie sud de la cuvette, la nappe s'écoule du point le plus haut (130 m d'altitude) situé sous la ville de Ouargla vers les différents Chotts environnant :

- Ba-Mendil au Nord-Ouest;
- Oum Raneb au Nord-Est.

Entre la zone des Chotts et N'Goussa, la nappe présente une faible pente (<1 ‰) en direction de N'Goussa.

Dans la partie nord de la cuvette (N'Goussa et ses environs), les eaux de la nappe s'écoulent aussi bien vers le Nord que vers le Sud où la nappe est à une cote plus basse.

- 100 à 105 m d'altitude à Sebkhet Safioune toute au Nord;
- 108 m d'altitude aux environs sud de N'Goussa (Garet Mellala).

La nappe présente une direction d'écoulement générale du Sud vers le Nord Nord-Est avec une pente faible ne dépassant pas 2 ‰.

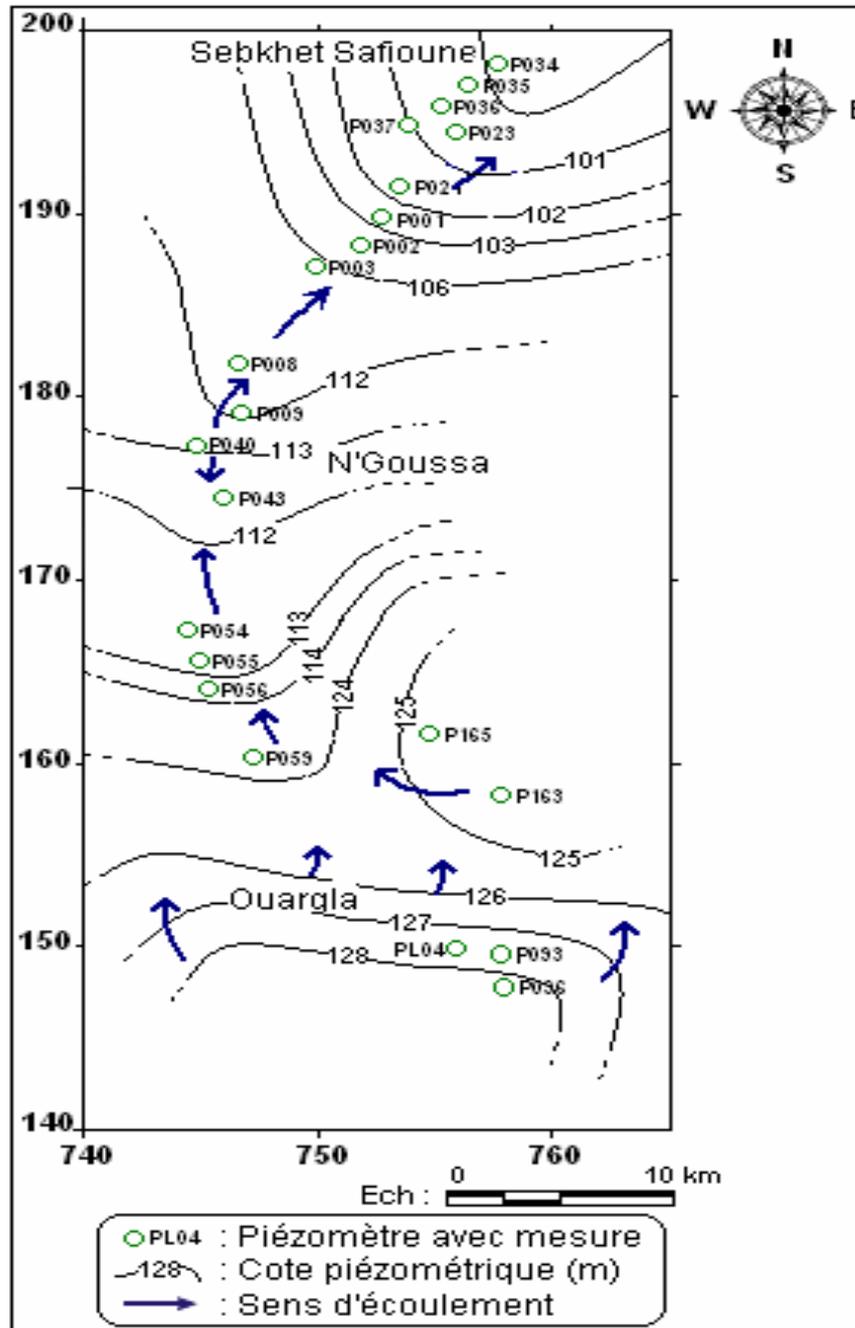


Fig. 3-13 : Carte piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla en 2007

2.2.3.2.6 – Profondeur de la nappe en 2007 : (Fig. 3-14)

Les régions dans lesquelles la nappe phréatique est la plus profonde sont situées au Sud de Ouargla, au Sud-Ouest d'Oum Raneb, dans la région de Bour El Haïcha, dans les collines de Ank Djemel et dans les versants au Nord-Ouest de N'Goussa. Ces zones où la nappe est profonde ne correspondent pas à des dépressions du niveau piézométrique, mais à des points hauts de la topographie (dans les conditions naturelles).

Les zones dans lesquelles la nappe phréatique est moins profonde sont situées à proximité de palmeraies irriguées (Ouargla et N'Goussa) ou de zone de rejet des eaux (à proximité de Sebkhet Oum Raneb).

Les zones où la nappe est moins profonde sont situées dans des points bas topographiques. Ils forment un alignement depuis le pourtour de Ouargla jusqu'à Sebkhet Safioune. Le point où la nappe se trouve le plus près de la surface du sol dans la région de Sebkhet Safioune se trouve au Sud de la Sebkha.

Dans l'agglomération de Ouargla, la profondeur moyenne de la nappe phréatique est de l'ordre de 2 m. Dans la palmeraie nord, la profondeur est inférieure à 1 m, alors que dans la palmeraie de Chott Aïn Baïda, dans des palmeraies abandonnées ou en périphérie de palmeraie, l'on trouve de l'eau à moins de 0,5 m de la surface du sol.

Au niveau du Chott et de Sebkhet Ba-Mendil, l'eau est entre 0,5 et 1 m excepté près de la cité universitaire où l'on trouve de l'eau stagnante.

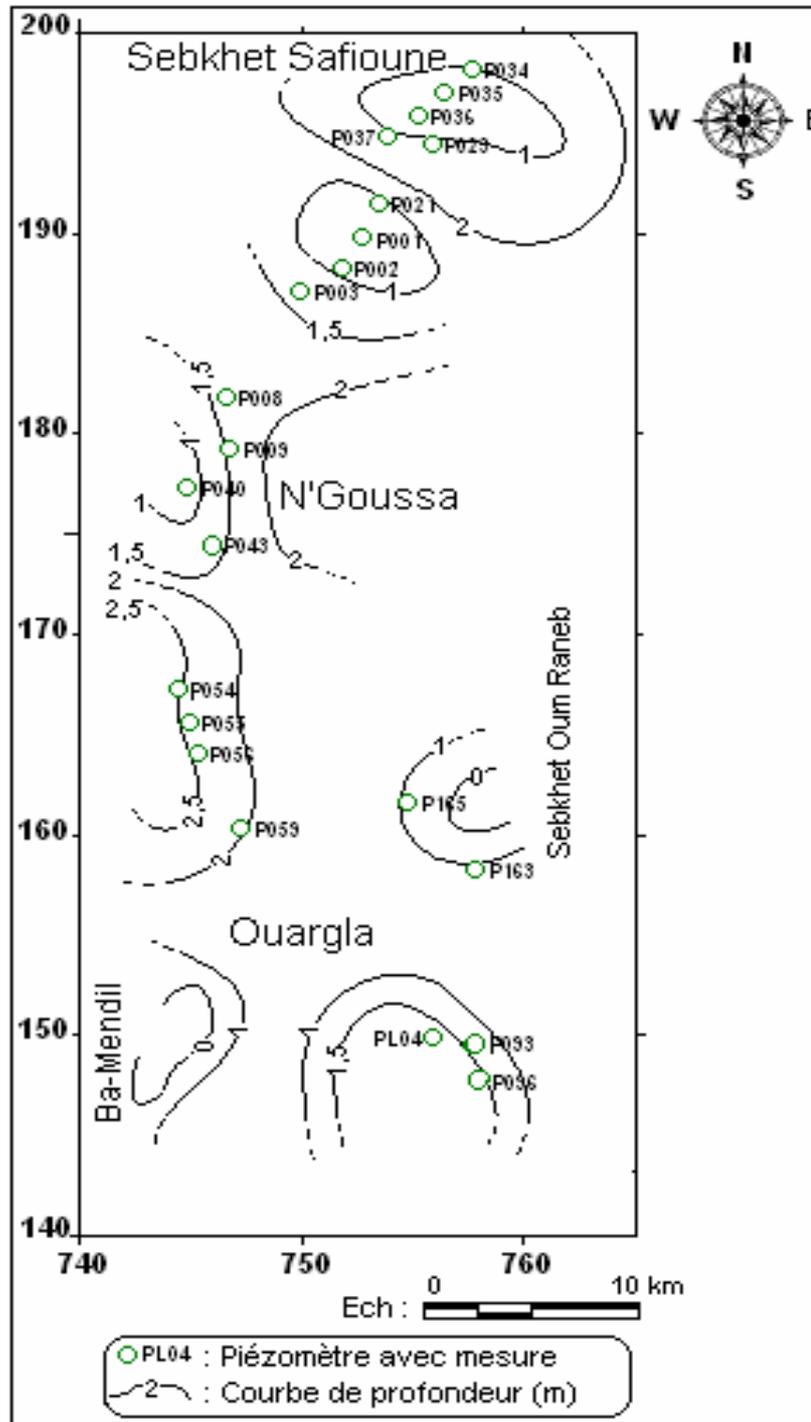


Fig. 3-14 : Carte de profondeur de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla en 2007

2.2.4 – Essais de pompage :

2.2.4.1 – Introduction :

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). Les données être sûres, précises et utilisables (Genetier, 1984).

2.2.4.2 – 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 : (Fig. 3-15)

- Dans la ville de Ouargla (trois essais);
- Au Sud (un essai dans la plantation de Krima);
- À 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. 2-1 : Résultats des essais de pompage
(ONA-BG, 2003)

N°	Situation	X (UTM WGS 84)	Y (UTM WGS 84)	T (m ² /s)	S (%)
P402	Aïn Moussa	721456	3549807	9,37.10 ⁻³	7,11
P415	Aïn Moussa	720284	3550248	3,29.10 ⁻⁴	/
P408	Bour El Haïcha	719954	3545181	5,85.10 ⁻⁴	/
P426	Ba-Mendil	716564	3540169	1,86.10 ⁻²	5,89
P427	Ville de Ouargla	/	/	9,09.10 ⁻⁴	/
P428	Ville de Ouargla	719474	3538552	1,46.10 ⁻⁴	11
P434	Ville de Ouargla	719624	3537984	2,63.10 ⁻⁴	/
P413	Krime	722629	3530328	3,19.10 ⁻⁴	/

À partir de résultats obtenus (tabl. 2-1), on constate que les valeurs de transmissivité présentent une homogénéité pour chaque essai. Elles sont semblables, que ce soit en pompage ou après l'arrêt de celui-ci (à la remontée), tant pour les mesures effectuées dans le puits de pompage que dans les piézomètres.

On peut toutefois grouper les transmissivités en deux classes :

- D'une part des transmissivités élevées, proche de 10^{-2} m²/s, représentées par deux sites;
- D'autre part des transmissivités faibles, dont la moyenne est proche de 3.10^{-4} m²/s, représentées par les six autres sites d'essais.

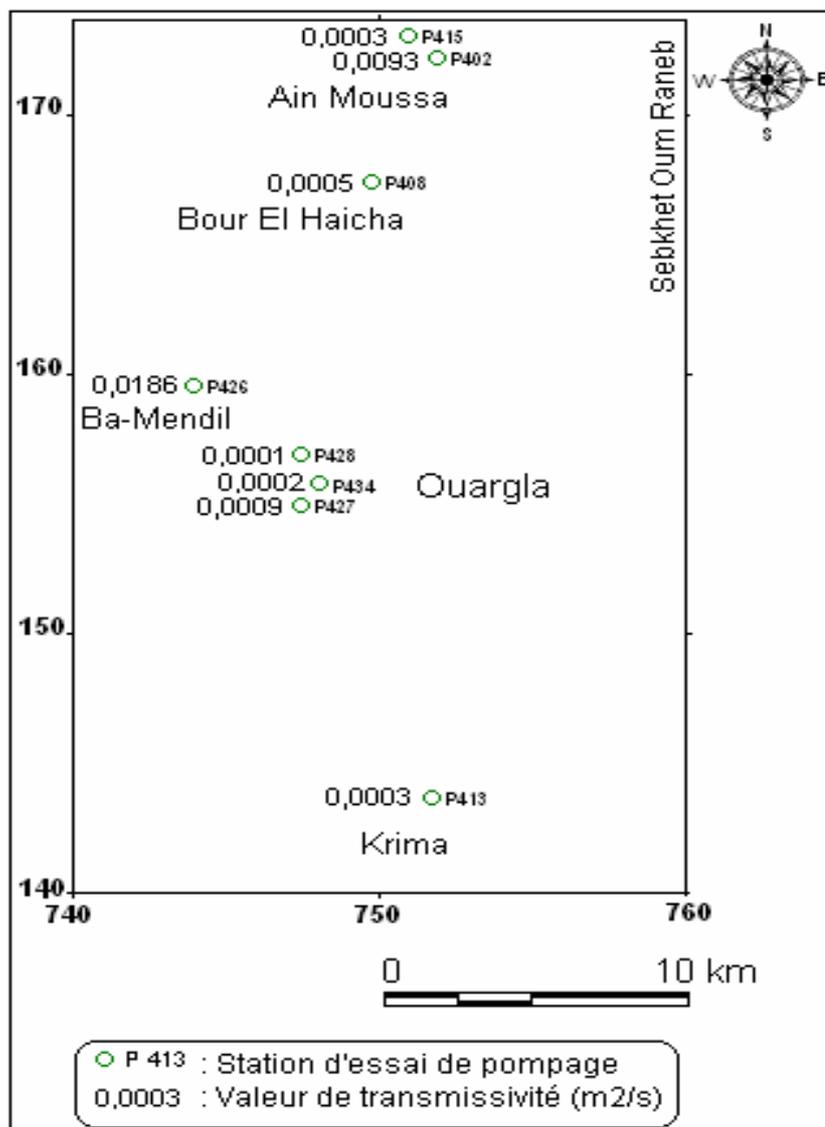


Fig. 3-15 : Répartition de la transmissivité dans la nappe phréatique Ouargla, 2003

Les transmissivités élevées ont été observées sur deux stations d'essais comprenant chacune un puits de pompage peu profond servant usuellement à l'irrigation et trois piézomètres.

Il s'agit du :

- P426 à Ba-Mendil où la valeur de "T" égale à $1,86.10^{-2}$ m²/s est la plus élevée mesurée;
- P402 à Aïn Moussa où une transmissivité de $9,37.10^{-3}$ m²/s a été déterminée.

Les faibles transmissivités sont plus largement réparties.

Au sud de Ouargla, une transmissivité de $3,19.10^{-4}$ m²/s a été mesurée dans un puits de la plantation de Krime, dans l'axe de la vallée d'Oued Mya. Dans la ville de Ouargla, des transmissivités de $1,4.10^{-4}$ (P428), $9,09.10^{-4}$ (P427) et $2,63.10^{-4}$ m²/s (P434) ont été déterminées. Ces trois puits servent à l'irrigation. Au Nord de Ouargla, une transmissivité de $5,85.10^{-4}$ 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.

2.2.5 – Etude isotopique du "CDTN" :

Le Centre de Développement des Techniques Nucléaires "CDTN" a fait une importante étude isotopique portant sur les eaux du "CI", du "CT" et de la nappe phréatique.

Toutes les études confirment que les eaux du "CI" et du "CT" sont des eaux anciennes, alors que les eaux de la nappe phréatique montrent de grandes variations :

- Dans les chotts et sebkhas, elles présentent des caractéristiques évaporées;
- Dans les autres points, elles présentent un mélange d'eaux profondes, d'une fraction d'eaux évaporées et d'eaux récentes provenant des précipitations.

Cela semble évident, la nappe phréatique recueille les différentes eaux infiltrées :

- Eaux de pluies récentes et toutes les eaux anciennes provenant du "CI" et du "CT";

- Eaux d'irrigation, depuis le premier puits artésien de Sedrata il y a mille ans jusqu'à celles des forages actuels ainsi que les eaux d'AEP, les fuites du réseau d'assainissement et l'assainissement individuel.

2.2.6 – Conclusion :

La nappe phréatique circule dans les sables dunaires et les alluvions d'O. Mya. Elle est en moyenne à 2 m de profondeur par rapport au sol. Elle forme un dôme sous la ville de Ouargla.

Les profondeurs les plus faibles (0,5 m) ont été mesurées à proximité de Sebket Oum Raneb et en bordure des palmeraies.

En considérant l'ensemble de la cuvette, il semblerait que le niveau piézométrique est en une légère baisse d'une année à l'autre à l'exception des points suivants :

- Zones irriguées proches de Sebket Oum Raneb;
- Agglomération de Ouargla.

L'évolution de la profondeur de la nappe est jugée anarchique et dépendant largement des fuites du réseau d'AEP, du réseau d'assainissement et de drainage de la palmeraie.

En fin de saison hivernale, la nappe au niveau de Sebket Safioune est à 1 m de profondeur. En Été le niveau baisse de 10 à 20 cm par ascension capillaire et évaporation.

La nappe s'écoule généralement du point le plus haut situé sous la ville de Ouargla vers le point le plus bas situé à Safioune.

Les écoulements souterrains sont faibles et estimés à environ 1,5 hm³/an soit un débit de 4 000 à 5 000 m³/jour (BG, 2004).

2.3 - ACTIONS RECOMMANDÉES POUR CONTROLER LE NIVEAU DE LA NAPPE PHREATIQUE :

2.3.1 - Introduction :

La pente générale de la nappe phréatique ainsi que les transmissivités sont faibles dans l'agglomération de Ouargla et les palmeraies qui l'entourent.

Les quantités d'eau qui s'écoulent sont peu importantes. Les apports d'eau extérieurs (CI, CT ou précipitations) restent pratiquement sur le site et ont fait monter le niveau de la nappe en remplissant les pores du terrain, créant un dôme sous la région.

Les réseaux de drainage et de collecte des eaux usées permettent un écoulement vers les points bas qui étaient autrefois ennoyés en hiver quand l'évaporation était faible. En Été l'évaporation importante réduisait l'importance des zones inondées.

Pour contrôler le niveau de la nappe phréatique, il faut limiter les apports et augmenter les sorties.

2.3.2 - Actions pour limiter les apports d'eau :

a - Réduction des fuites AEP :

Dans les cinq dernières années, un taux de fuites AEP de l'ordre de 50 % est estimé (EDEMIAO-Ouargla, 2007), ce qu'est énorme.

Pour faire descendre ce pourcentage de fuites, il faut procéder un programme de recherche diagnostiquer le réseau AEP et contrôler (ex : pose de compteurs) la distribution et les projets de réparation des fuites.

b - Réduction de la consommation :

La consommation est relativement importante. L'arrosage des zones vertes et jardins dans les zones urbanisées se fait régulièrement avec l'eau de l'AEP. Elle serait plus judicieuse avec une irrigation à partir des eaux de la nappe phréatique dont la qualité est généralement acceptable sous agglomération.

De même, il faut :

- Sensibiliser la population;
- Interdire l'irrigation à partir du réseau AEP, ou instaurer une tarification progressive.

c - Limitation des palmeraies :

Certaines palmeraies sont peut-être surirriguées, pour tenter de lutter contre une salinisation due à un mauvais drainage. Cette procédure est mal orientée, pour cela, il faut :

- Sensibiliser les irriguants;
- Créer un organisme d'irrigation;
- Réfléchir sur la dimension souhaitable de la palmeraie dans les zones urbanisées (Ouargla et N'Goussa).

2.3.3 - Actions pour augmenter les évacuations d'eau :

a - Réseau d'eaux usées :

Les systèmes de fosses septiques et puits perdus réinfiltrent l'eau usée localement et participent à la remontée de la nappe phréatique. De plus, le réseau de collecte et d'évacuation des eaux usées est mal fonctionné, donc il faut :

- Optimiser et assurer le bon fonctionnement de ce réseau.

b - Réseaux de drainage urbain et d'irrigation :

En l'absence de pente, seul un réseau de drainage permet de déplacer l'eau infiltrée dans la nappe et ainsi de contrôler sa hauteur.

Avec les faibles transmissivités au niveau de l'agglomération de Ouargla, seul des drains horizontaux sont envisageables. Donc, il faut réaliser un réseau de drainage urbain et améliorer le réseau de drainage agricole.

c - Développement d'espaces verts irrigués à partir de la nappe phréatique :

L'arrosage de ces espaces verts ne doit pas être réalisé à partir du réseau d'AEP mais à partir de puits captant la nappe phréatique.

Si la nappe phréatique se trouve à moins de 5 m de profondeur les racines puiseront directement dans la nappe, lorsque les plantations seront suffisamment développées.

d - Maintien de zones d'évaporation :

Pour éviter que le chott ne se transforme en cloaque, il est important que seule l'eau de drainage y entre et pour éviter une sursalinisation il faut qu'il y ait un renouvellement de l'eau.

Pour que l'évaporation reste importante, il faut que la profondeur de l'eau soit faible. Donc, une réflexion sur le rôle des chotts et sebkhas (Ba-Mendil, Oum Raneb et Safioune) doit être nécessaire.

e - Conduite d'évacuation vers Sebket Safioune :

Le surplus d'eau dans la zone de Ouargla doit être évacué. Sebket Oum Raneb située à proximité de la ville de Ouargla étant de superficie insuffisante et de rôle environnemental dégradé, donc il faut chercher d'un autre site favorable pour les rejets.

Les critères suivants rendent Sebket Safioune de constituer le site le mieux adopté pour évacuer ces rejets :

- Superficie disponible d'environ 8 000 ha;
- Pas de zone urbanisée à proximité;
- Absence de potentiel agricole développé;
- Milieu très pauvre sur le plan de la biodiversité.

Chap.3 :

HYDROCHIMIE

- ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES
- OBSERVATION RELATIVE À LA PROTECTION DES RESSOURCES EN
EAU

ANALYSE HYDROCHIMIQUE

3.1 - INTRODUCTION :

Dans le cadre de cette étude, on a effectué un échantillonnage au niveau de quelques forages hydrauliques à savoir que le temps et les moyens qui nous sont impartis ne nous permettent pas d'effectuer des analyses sur l'ensemble des forages de la cuvette de Ouargla et pour cela le choix des lieux de prélèvement basé sur la répartition spatiale des points d'eau de façon à couvrir tout le secteur étudié.

L'analyse chimique a été faite sur treize échantillons d'eau : (annexe.3)

- Deux échantillons pour la nappe du Continental Intercalaire;
- Quatre échantillons pour la nappe du Complexe Terminal ;
- Sept échantillons pour la nappe phréatique.

Les paramètres physico-chimiques caractéristiques mesurés pour tous les prélèvements sont les suivants :

- Température (T), Potentiel d'Hydrogène (PH), Conductivité (C);
- Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+);
- Bicarbonates (HCO_3^-), Chlorures (Cl), Sulfate (SO_4^{2-});
- Nitrates (NO_3^-).

3.2 - ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES :

3.2.1 - La nappe du Continental Intercalaire "CI" :

Depuis la mise en exploitation à l'échelle de la région de Ouargla, les forages captant le "CI" ont fait l'objet de plusieurs prélèvements et d'analyses chimiques afin de suivre l'évolution de la qualité chimique des eaux. Nous présentons dans le tableau (3-1) ci-dessous les résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques caractéristiques, effectuée sur les eaux du "CI".

Tableau. 3-1 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe du "CI", Ouargla

Paramètres	Forage	El H'deb2 (2005)	El H'deb2 (2007)	El H'deb1 (2007)
		Valeurs moyennes		
Température in situ (°C)		45	42	49
PH		7,1	7,8	7,9
Conductivité (µs/cm)		2100	2400	2500
Calcium (mg/l)		152	172,3	208,4
Magnésium (mg/l)		64,6	131,2	121,5
Bicarbonates (mg/l)		113,5	184,15	161,1
Sodium + Potassium (mg/l)		280	262	K ⁺ = 23
Chlorures (mg/l)		312,5	300	456
Sulfates (mg/l)		482	480,6	613,3
Minéralisation totale (mg/l)		1400	1500	1500

La nappe du "CI", plus ou moins isolées des nappes supérieures ou inférieures, présente des caractéristiques à peu près constante malgré l'augmentation de la concentration en ions : Ca²⁺, Mg²⁺ et HCO₃⁻.

Sur l'ensemble de la région de Ouargla, la minéralisation totale de l'eau du "CI" est assez souvent à moins de 1,5 g/l, sa plus forte concentration correspond à la partie la plus profonde et la plus exploitée de la nappe (surtout autour des champs pétroliers : Guellala)(Fig. 4-1).

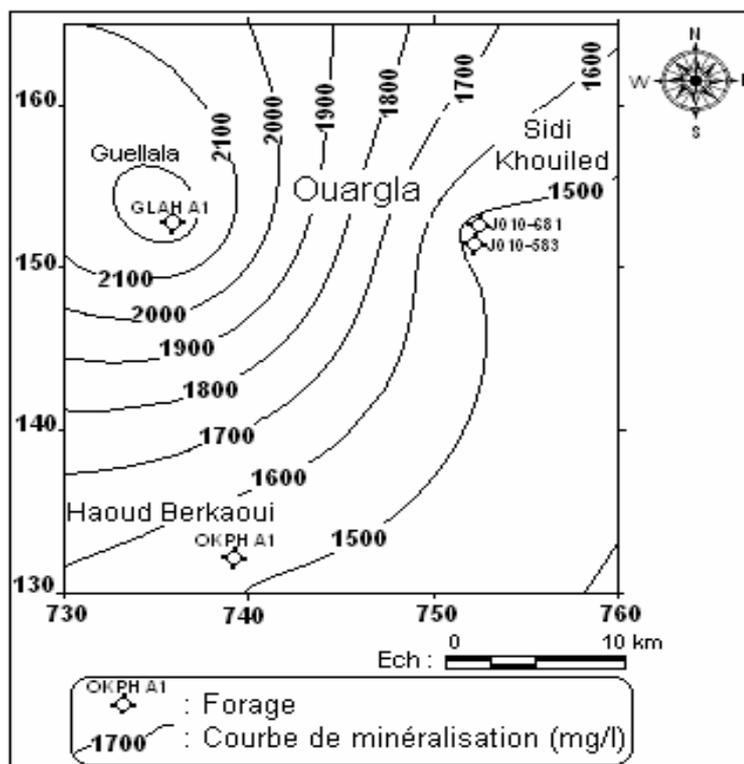


Fig. 4-1 : Carte de minéralisation totale des eaux, nappe du "CI", Ouargla 2007

3.2.1.1 - Représentation graphique des eaux du "CI" :

L'objectif principal d'une représentation graphique est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique. Parmi les représentations graphiques les plus courantes, on a :

- Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Ce diagramme est une représentation graphique semi-logarithmique, sur l'axe des abscisses sont représentés les différents ions. Pour chacun de ces ions (ou des groupements $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ et $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) la teneur réelle en (mg/l) est reportée sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique obtenu permet de visualiser le faciès de l'eau concernée.

Le report des résultats d'analyse sur diagramme de Schoeller-Berkaloff met en évidence la même variation des caractères chimiques qui existent entre les eaux des deux forages captant le "CI" (El H'deb1 et 2) (Fig. 4-2).

Tableau. 3-2 : Classification des eaux selon Stabler, nappe du "CI", Ouargla 2007

Forage	Anions	Cations
El H'deb 1	$r\%(\text{SO}_4^{2-}) > r\%(\text{Cl}^-) > r\%(\text{HCO}_3^-)$	$r\%(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\%(\text{Ca}^{2+}) > r\%(\text{Mg}^{2+})$
El H'deb 2	$r\%(\text{SO}_4^{2-}) > r\%(\text{Cl}^-) > r\%(\text{HCO}_3^-)$	$r\%(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\%(\text{Ca}^{2+}) > r\%(\text{Mg}^{2+})$

Selon Stabler (tabl. 3-2), ces eaux présentent généralement un faciès sulfaté sodique avec des teneurs en ions supérieures aux normes de potabilité fixées par l'OMS. Elles sont cependant utilisables, moyennant un certain nombre de précautions.

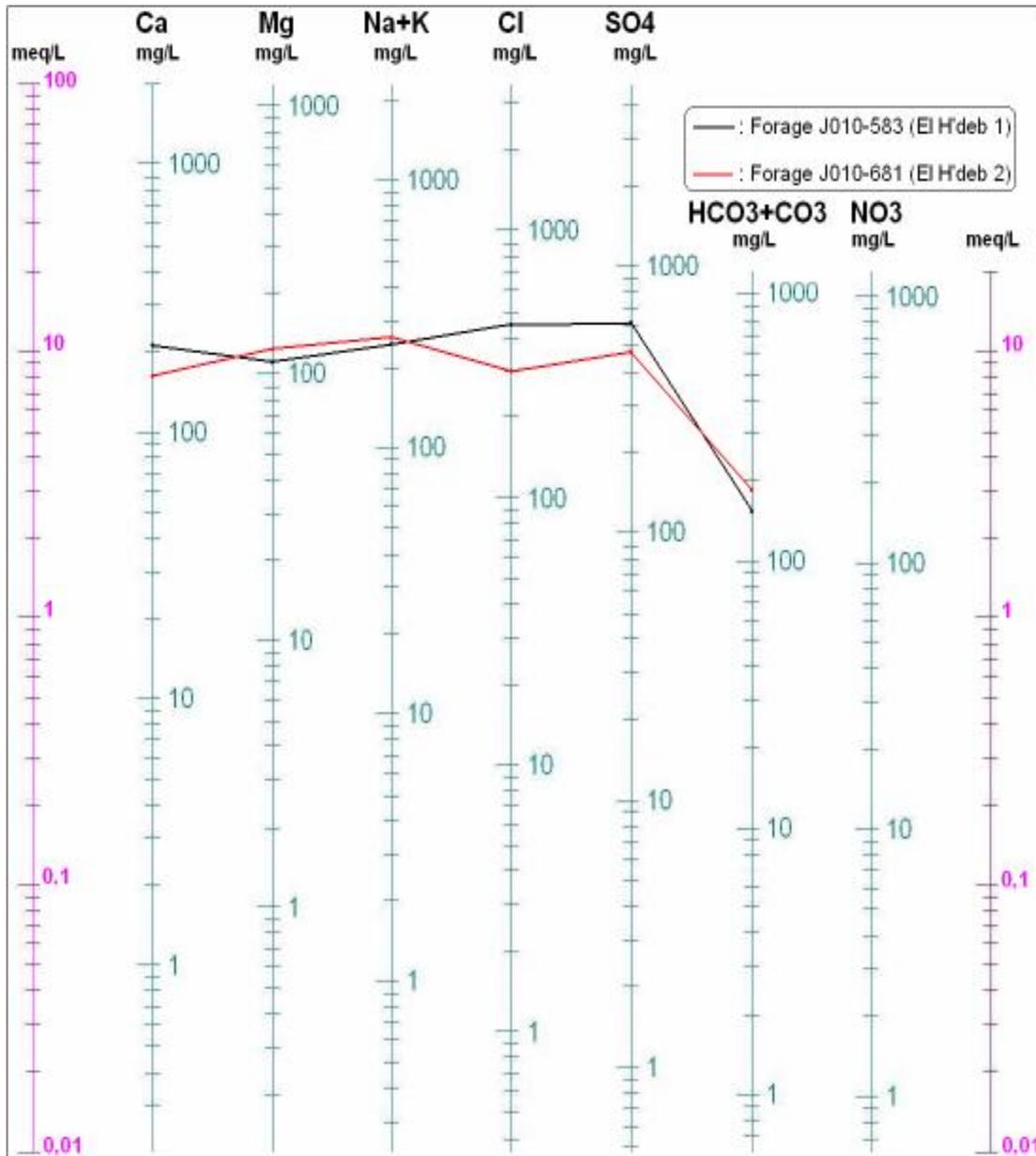


Fig. 4-2 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff d'analyse des eaux, nappe du "CI", Ouargla 2007

3.2.2 - La nappe du Complexe Terminal "CT" :

Les résultats d'analyses effectuées sur les différents forages captant le "CT", ont permis d'identifier les caractéristiques suivantes : (tabl. 3-3)

Tableau. 3-3 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe du "CT", Ouargla 2007

Paramètres	Forage	Lala Mimouna	Ifri	Bahmid 1	Oum Raneb
		Valeurs moyennes			
Température in situ	(°C)	20	21	19	19
PH		7,8	7,9	7,9	7,7
Conductivité	µs/cm	2200	2300	4400	4310
Calcium	mg/l	172	188,3	236,2	333,4
Magnésium	mg/l	97,2	209	143	237,2
Bicarbonates	mg/l	136	105,8	186,5	119,7
Sodium + Potassium	mg/l	184	453	282	418
Chlorures	mg/l	324	323,7	399,2	430,4
Sulfates	mg/l	596,4	452	865,6	630,6
Minéralisation totale	mg/l	1660	1730	3180	3240

Les échantillons Oum Raneb et Bahmid 1 présentent des eaux fortement minéralisées (3 g/l) que les échantillons Ifri et Lala Mimouna (1,6 g/l).

Les échantillons Oum Raneb et Bahmid 1 : eaux très dures, à dominante sulfato-chloruro- sodique;

Les échantillons Ifri et Lala Mimouna : eau dure, à dominante sulfato-chloruro- sodique.

La carte ci-dessous (Fig. 4-3), fait ressortir deux zones à peu près distinctes :

- Une zone moins minéralisée (1,6 g/l) au Sud correspond à la partie la plus profonde et moins exploitée de la nappe (Ouargla ville);

- Une zone plus minéralisée (3 g/l) que la précédente, correspond à la partie moins profonde et plus exploitée de la nappe située au Nord-Est de la zone de Ouargla (champs irrigués d'Oum Raneb).

L'accroissement de la minéralisation vers la zone d'Oum Raneb, traduit la convergence des écoulements souterrains de la nappe vers ces zones agricoles fortement exploitées (constituent localement, exutoires artificiels).

Sur l'ensemble de la région de Ouargla, la minéralisation totale de l'eau du "CT" est assez souvent de 2 à 3 g/l.

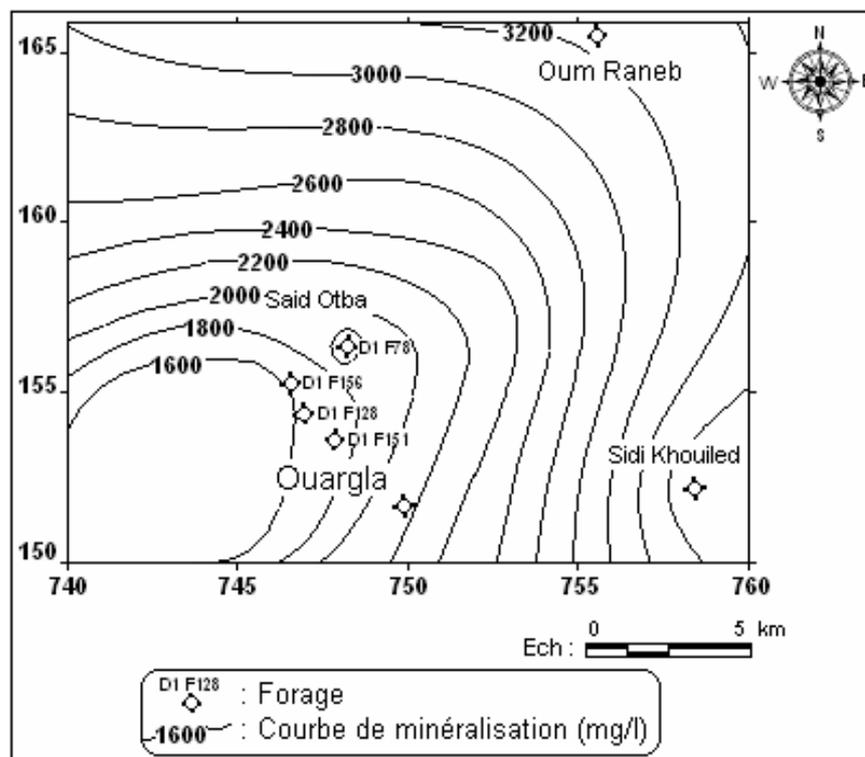


Fig. 4-3 : Carte de minéralisation totale des eaux, nappe du "CT", Ouargla 2007

Comparativement avec les analyses effectuées en 2005 (tabl. 3-4), une augmentation de la minéralisation a été constatée.

Tableau. 3-4 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe du "CT", Ouargla 2005

Paramètres	Forage	Lala Mimouna	Ifri	Bahmid 1
		Valeurs moyennes		
Température in situ (°C)		/	/	/
PH		7,6	7,3	7
Conductivité (µs/cm)		2200	2500	3920
Calcium (mg/l)		185	208,4	240,4
Magnésium (mg/l)		74,6	77,5	125,4
Bicarbonates (mg/l)		152,5	164,7	207,4
Sodium + Potassium (mg/l)		182	459	280
Chlorures (mg/l)		337,2	312,4	323
Sulfates (mg/l)		534	468	836
Minéralisation totale (mg/l)		1750	1930	3100

3.2.2.1 - Représentation graphique des eaux du "CT" :

- Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le report des résultats d'analyse sur diagramme de Schoeller-Berkaloff met en évidence la même variation des caractères chimiques qui existent entre les eaux du "CT". (Fig. 4-4)

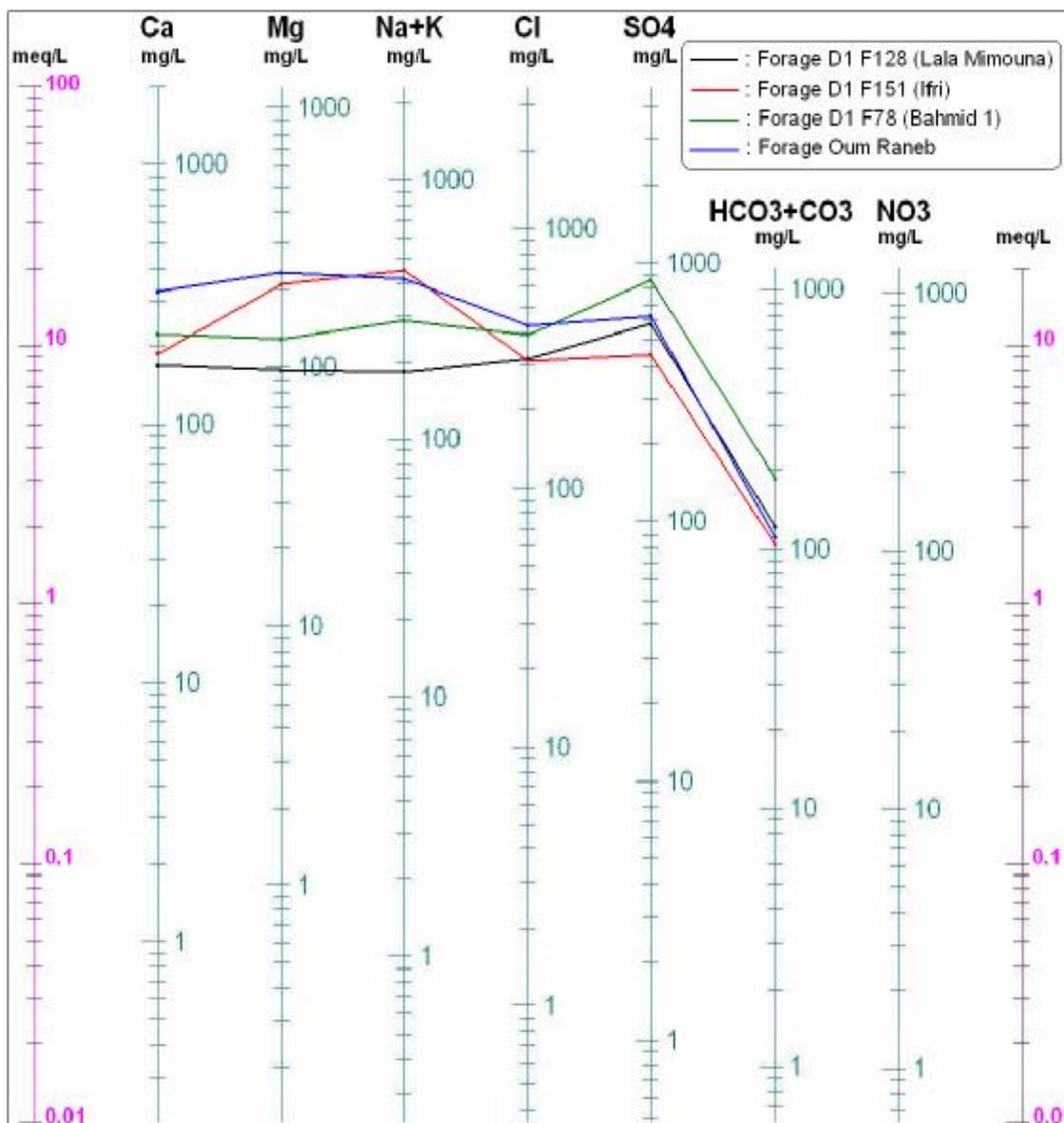


Fig. 4-4 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff d'analyse des eaux, nappe du "CT", Ouargla (2007)

Selon *Stabler* (tabl. 3-5), ces eaux présentent généralement un faciès sulfaté sodique avec des teneurs en ions supérieures aux normes de potabilité fixées par l'OMS. Elles sont cependant utilisables, moyennant un certain nombre de précautions.

Tableau. 3-5 : Classification des eaux selon Stabler, nappe du "CT", Ouargla 2007

Forage	Anions	Cations
Lala Mimouna	$r\%(\text{SO}_4^{2-}) > r\%(\text{Cl}^-) > r\%(\text{HCO}_3^-)$	$r\%(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\%(\text{Ca}^{2+}) > r\%(\text{Mg}^{2+})$
Ifri	$r\%(\text{SO}_4^{2-}) > r\%(\text{Cl}^-) > r\%(\text{HCO}_3^-)$	$r\%(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\%(\text{Mg}^{2+}) > r\%(\text{Ca}^{2+})$
Bahmid 1	$r\%(\text{SO}_4^{2-}) > r\%(\text{Cl}^-) > r\%(\text{HCO}_3^-)$	$r\%(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\%(\text{Ca}^{2+}) > r\%(\text{Mg}^{2+})$
Oum Raneb	$r\%(\text{SO}_4^{2-}) > r\%(\text{Cl}^-) > r\%(\text{HCO}_3^-)$	$r\%(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\%(\text{Ca}^{2+}) > r\%(\text{Mg}^{2+})$

3.2.3 - La nappe phréatique :

Nous présentons dans les tableaux (3-6 et 7) ci-dessous les résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques, effectuée sur les eaux de la nappe phréatique (parties nord et sud de la cuvette de Ouargla).

Tableau. 3-6 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe phréatique, Ouargla nord 2007

Paramètres	Forage	N'Goussa 1	N'Goussa 2	N'Goussa 3
		Valeurs moyennes		
Température in situ	(°C)	24	18	18
PH		7,4	7,6	7,2
Conductivité	$\mu\text{s}/\text{cm}$	6 700	8 400	6 700
Calcium	mg/l	681,3	881,7	841,6
Magnésium	mg/l	133,6	170,1	594,3
Bicarbonates	mg/l	351,9	920,7	586,5
Sodium + Potassium	mg/l	57,4	27,4	203,6
Chlorures	mg/l	520	17 440	14 677,5
Sulfates	mg/l	395,6	1 203,9	2 286,1
Minéralisation totale	mg/l	2 300	20 800	19 300

Pour la répartition de la conductivité, les valeurs élevées sont localisées dans les sebkhas et dans les régions basses où la nappe est peu profonde et l'évaporation importante :

- Sebkhet Oum Raneb (Saïd 1) au Sud, avec des valeurs de conductivité atteignant 40 000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et;
- Sebkhet Ba-Mendil au Sud, avec des valeurs atteignant 20 000 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Le centre ville de Ouargla et N'Goussa, est souligné par des valeurs faibles, s'étendant de 5 000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Rouissat) à 8 400 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (N'Goussa 2) avec une auréole de valeurs plus élevées lorsque l'on s'approche en bordures nord des agglomérations.

Tableau. 3-7 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux, nappe phréatique, Ouargla sud 2007

Paramètres	Forage	Ba-Mendil	Rouissat	Adjadja	Saïd 1
		Valeurs moyennes			
Température in situ	(°C)	18	18	23	18
PH		7,8	7,9	7,5	7,3
Conductivité	µs/cm	20 000	5 000	6 000	40 000
Calcium	mg/l	1 202	641,28	601,2	1 162,3
Magnésium	mg/l	89,9	77,7	658,2	651,37
Bicarbonates	mg/l	703,84	0	114,4	230,2
Sodium + Potassium	mg/l	177,2	36,2	92,8	100
Chlorures	mg/l	2 700	940	20 560	6 320
Sulfates	mg/l	673,4	744,7	3 606,3	1 250,5
Minéralisation totale	mg/l	5 700	2 800	26 100	10 000

L'interpolation des données ponctuelles a permis de tracer des courbes d'égale minéralisation des eaux de la nappe phréatique (Fig. 4-5). La carte montre une augmentation progressive de la minéralisation le long des directions d'écoulement. Ainsi elle fait ressortir deux zones distinctes localisées de part et d'autre de la ligne de partage des eaux (déterminée par la piézométrie) aux environs sud de N'Goussa.

* La première zone sera celle qui correspond à toute la partie nord qui s'étend de la ligne de partage jusqu'à Sebket Safioune avec cependant les zonalités locales suivantes :

-- une zone faiblement minéralisée (<10 g/l) caractérise l'entourage de N'Goussa et Hassi Miloud. Cette faiblesse de minéralisation peut être due à une dilution des eaux en provenance des nappes profondes "CT" (eaux d'irrigation);

-- une zone fortement minéralisée (> 20 g/l) au niveau de Sebket Safioune.

* La deuxième zone est celle qui correspond à la partie sud de la cuvette et qui concerne tous les chotts de Ouargla et les autres agglomérations (Ouargla et Aïn Baïda). L'examen de la carte au niveau de cette zone montre que les courbes iso-minéralisation convergent vers les chotts de Ouargla et de ses zones environnantes (Ba-Mendil et Aïn Baïda), ce qui traduit l'accroissement de la minéralisation depuis les zones sud (de Rouissat et Aïn Baïda) où elle prend des valeurs inférieures à 10 g/l, pour atteindre 10 g/l aux environs de Sebket Oum Raneb (Saïd 1) et 30 g/l, aux environs de Chott Aïn Baïda (Adjadja).

Par ailleurs, pour ces deux zones, la minéralisation totale indique que les chotts et sebkhas sont les principales zones de perte (par évaporation) de la nappe phréatique.

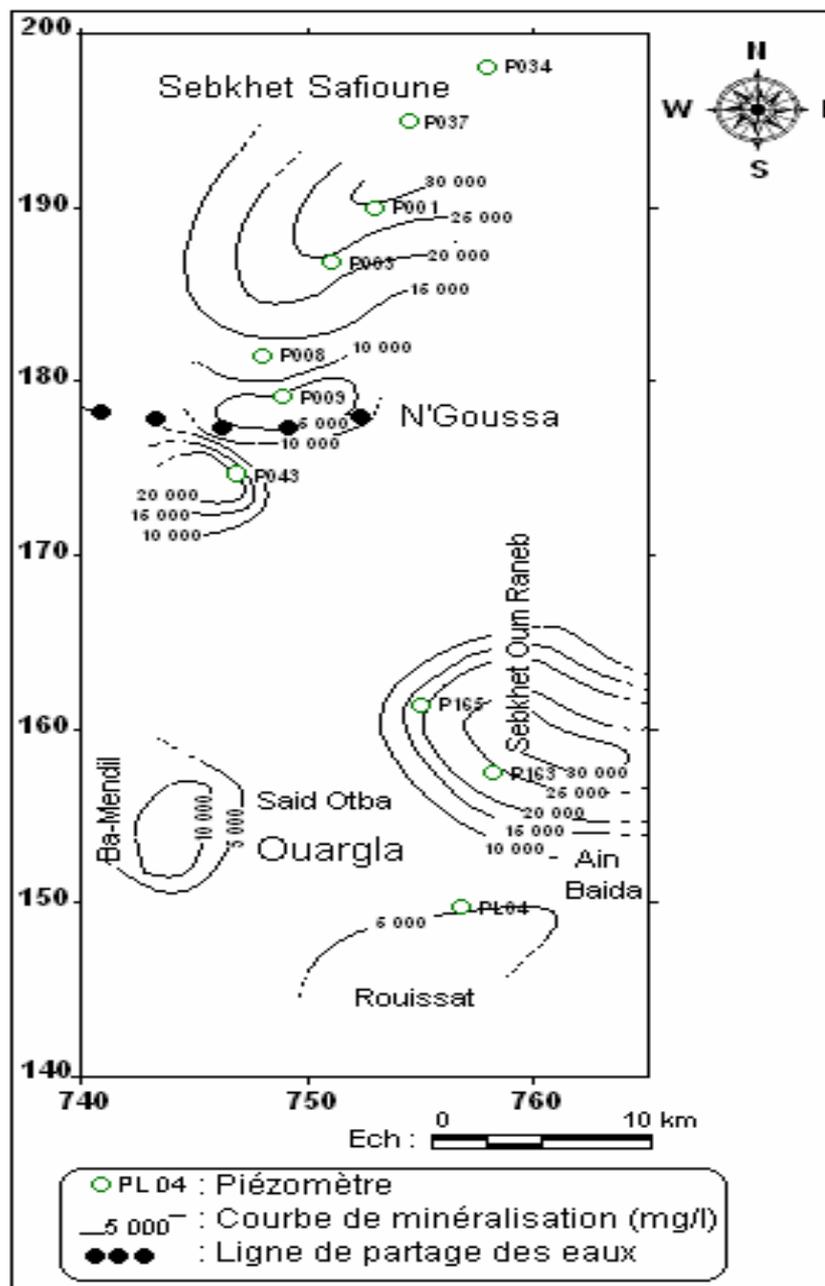


Fig. 4-5 : Carte de minéralisation totale des eaux, nappe phréatique, Ouargla 2007

Concernant les teneurs en nitrates des eaux et par manque de données de l'année 2007, nous avons obligé d'utiliser les données du bureau d'étude BG regroupant les données archives de la DHW et de l'ONA-Ouargla de l'année 2003 ; donc, la carte ci-dessous montre que les fortes teneurs en nitrates (>100 mg/l) sont situées au Nord (au niveau de Sebket Safioune), puis à l'Est de Frane dans des Sebktas loin de zones exploitées.

Elles correspondent à des zones d'évaporation où les eaux se concentrent en sels (pas de lessivage). Les faibles teneurs (< 20 mg/l) sont situées à l'Ouest de N'Goussa et au Sud-Est au niveau de Sebket Oum Raneb et aux palmeraies de Ouargla excepté les palmeraies de Ba-Mendil et de Chott (Aïn Baïda) où les concentrations de nitrates sont comprises entre 40 et 140 mg/l.

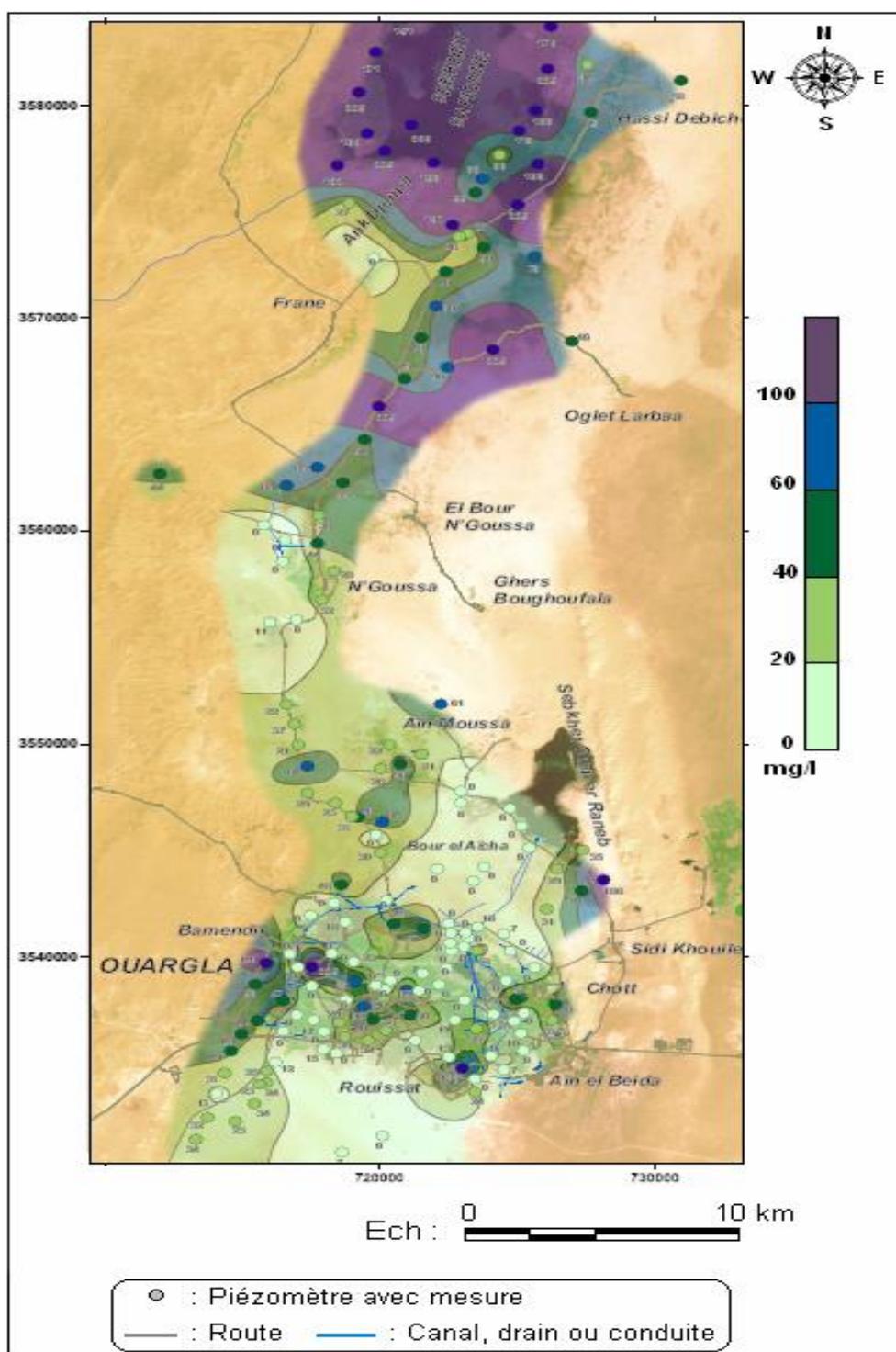


Fig. 4-6 : Carte des teneurs en nitrates des eaux, nappe phréatique, Ouargla (BG, 2003)

3.2.3.1 - Représentation graphique des eaux de la nappe phréatique :

- Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le report des résultats d'analyse sur diagramme de Schoeller-Berkaloff met en évidence la nette différence des caractères chimiques qui existent entre les eaux de chotts et sebkhas et celles au niveau des agglomérations (Rouissat et N'Goussa 1) surtout pour les anions (Chlorures et Sulfates) (Fig. 4-7).

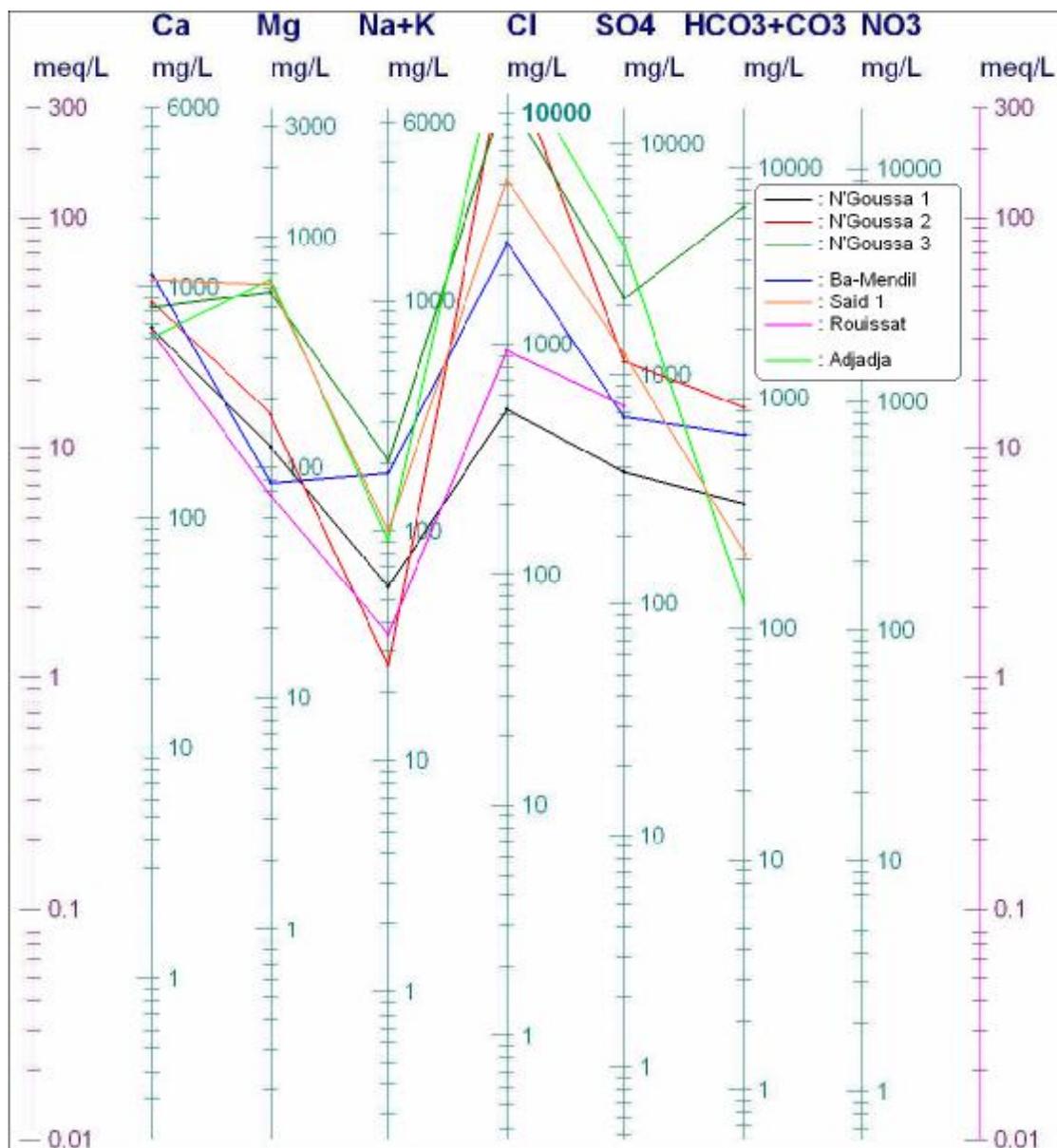


Fig. 4-7 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff d'analyse des eaux, nappe phréatique , Ouargla (2007)

Selon Stabler (tabl. 3-8), ces eaux présentent généralement un faciès chloruré calcique avec des teneurs en ions très élevées par rapport aux normes de potabilité fixées par l'OMS. Elles sont souvent de qualité très dégradée.

Tableau. 3-8 : Classification des eaux selon Stabler, nappe phréatique, Ouargla 2007

Zone	Anions	Cations
N'Goussa 1	$R\%(Cl) > r\%(SO_4^{2-}) > r\%(HCO_3^-)$	$r\%(Ca^{2+}) > r\%(Mg^{2+}) > r\%(Na^+ + K^+)$
N'Goussa 2	$R\%(Cl) > r\%(SO_4^{2-}) > r\%(HCO_3^-)$	$r\%(Ca^{2+}) > r\%(Mg^{2+}) > r\%(Na^+ + K^+)$
N'Goussa 3	$R\%(Cl) > r\%(SO_4^{2-}) > r\%(HCO_3^-)$	$r\%(Ca^{2+}) > r\%(Mg^{2+}) > r\%(Na^+ + K^+)$
Ba-Mendil	$R\%(Cl) > r\%(HCO_3^-) > r\%(SO_4^{2-})$	$r\%(Ca^{2+}) > r\%(Na^+ + K^+) > r\%(Mg^{2+})$
Rouissat	$R\%(Cl) > r\%(SO_4^{2-}) > r\%(HCO_3^-)$	$r\%(Ca^{2+}) > r\%(Mg^{2+}) > r\%(Na^+ + K^+)$
Adjadja	$R\%(Cl) > r\%(SO_4^{2-}) > r\%(HCO_3^-)$	$r\%(Mg^{2+}) > r\%(Ca^{2+}) > r\%(Na^+ + K^+)$
Saïd 1	$R\%(Cl) > r\%(SO_4^{2-}) > r\%(HCO_3^-)$	$r\%(Ca^{2+}) > r\%(Mg^{2+}) > r\%(Na^+ + K^+)$

3.3 – OBSERVATION RELATIVE À LA PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU :

3.3.1 – La nappe phréatique :

En zone urbaine, il s'agit des eaux provenant de fuites des réseaux d'assainissement et de l'assainissement autonome. L'eau y est relativement "peu" minéralisée et peut servir à l'irrigation de zones vertes.

En zone agricole localisée sur les versants de la vallée au Nord de Ouargla, dans les ghouts de la région de Frane ainsi que les palmiers bours au Nord de Bour El Haïcha, il s'agit de l'infiltration des eaux de lessivage. La végétation puisant de l'eau pratiquement pure pour prospérer et laissant les sels qu'elle contient dans le sol (Fig. 4-8).

Dans ces conditions, les cultures traditionnelles en ghouts ou palmiers bours peuvent perdurer. Toutefois, elles sont très sensibles aux variations de niveau de la nappe, qu'il faut prévenir et contrebalancer.

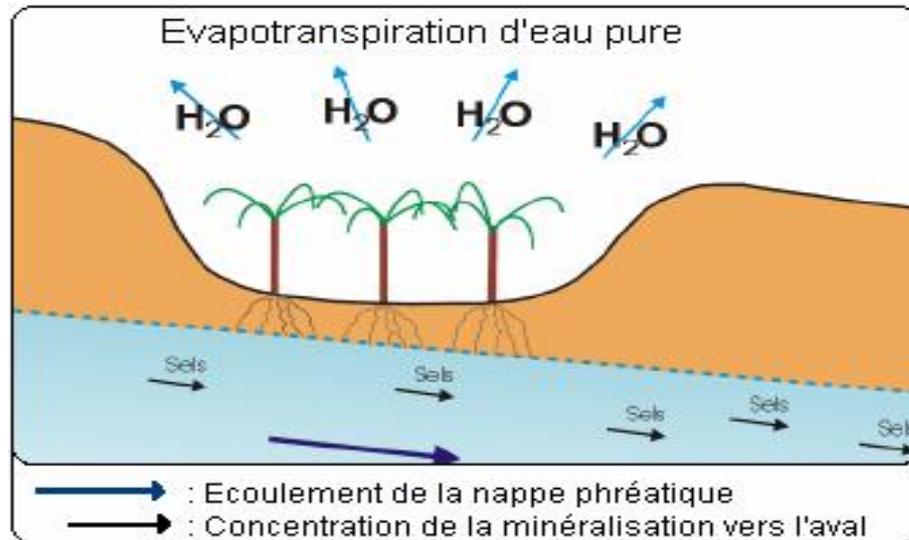


Fig. 4-8 : Profil schématique d'une culture traditionnelle en ghout, nappe phréatique de Ouargla

Tant que les cultures en ghouts sont relativement dispersées, l'augmentation de salinité vers l'aval est peu sensible.

Si les prélèvements sont trop importants, une dépression se crée sous la plantation, empêchant la dispersion des sels par écoulement naturel.

Les eaux de lessivage des sols retournent verticalement à la nappe où elles sont reprises par le pompage. Le phénomène est cumulatif, au début peu sensible, il peut ensuite augmenter rapidement (Fig. 4-9).

Les eaux d'assainissement épurées sont à envisager en cas d'augmentation de la salinité.

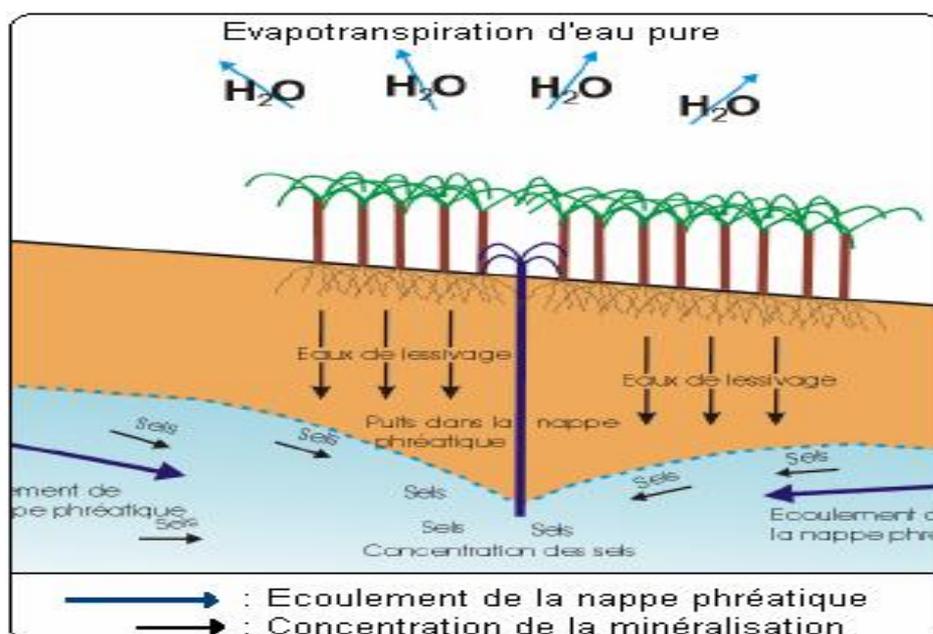


Fig. 4-9 : Profil schématique d'une culture irriguée à partir de la nappe phréatique

Les eaux de lessivage des sols s'infiltrent et rejoignent la nappe dont elles font monter le niveau et augmenter la salinité. La nappe montant jusqu'au niveau des racines des cultures, il est nécessaire de les drainer et de pomper l'eau de drainage vers des étangs d'évaporation où elle sera éliminée (Fig. 4-10).

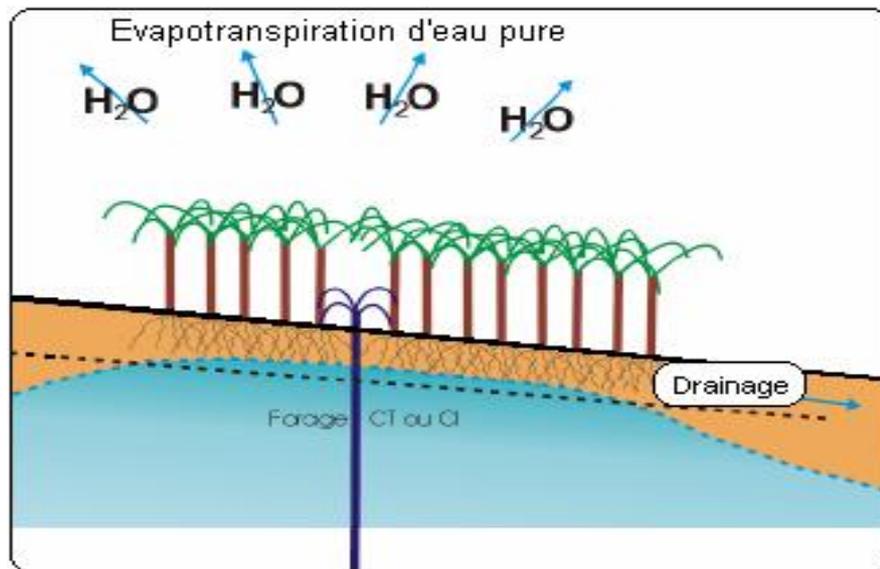


Fig. 4-10 : Profil schématique d'une culture irriguée à partir de nappes profondes

La réutilisation d'eau de drainage pour l'irrigation de cultures n'est pas envisageable, car l'on ne ferait qu'augmenter la salinité des terres agricoles.

3.3.2 – Les nappes profondes "CI" et "CT" :

Les mesures de protection des ressources en eau sont basées sur un programme de gestion de ces dernières. La délimitation de zones de protection qui vise à assurer la qualité des eaux au niveau des puits et forages ne se justifie pas pour les nappes profondes de "CT" et "CI" qui sont protégées par d'épaisses couches imperméables, le principal danger provient de leur surexploitation ; la disparition de l'artésianisme dans les nappes supérieures les rendra vulnérables à une contamination par les eaux salées des chotts Melrhir et Merouane.

3.3.2.1 – La nappe du Continental Intercalaire :

Le "CI" est actuellement artésien, son artésianisme le protège contre toute pollution venant de la surface par percolation.

Le danger provient d'un tubage mal cimenté qui permettrait à l'eau de circuler entre le tubage et le terrain, de dissoudre une formation salifère et de contaminer les eaux, il faut suivre les caractéristiques physico-chimiques de l'eau aux alentours des forages d'observation ou en activité dans la nappe du Complexe Terminal et la nappe phréatique.

3.3.2.2 – La nappe du Complexe Terminal :

Dans la zone d'étude, la nappe du "CT" est artésienne, jaillissante dans la région de Sebket Safioune et non jaillissante dans le reste de la zone d'étude. Une argile plastique est présente partout, avec une épaisseur suffisante pour assurer une couverture imperméable.

Dans la région de Chott (Aïn Baïda), la nappe du "CT" se trouve à une trentaine de mètres de profondeur. Les ouvrages opérationnels sont surveillés et entretenus, Il existe donc un faible risque de contamination de cette nappe par les eaux superficielles.

Les anciens puits dans le "CT", notamment dans les palmeraies, devraient être recensés et les ouvrages protégés ou rebouchés.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au cours de la dernière décennie, les habitants de la cuvette de Ouargla souffrent des problèmes de la remontée des eaux de la nappe phréatique. Cette remontée est observée dans les zones à *basses altitudes*, là où nous pouvons constater l'apparition des plans d'eau en surface.

La ville de Ouargla est située dans une cuvette dépourvue de tout exutoire naturel, où toute eau qui atteint la cuvette peut participer à l'alimentation de la nappe phréatique, entraînant ainsi la remontée des eaux en surface.

Cet état de fait pose de graves problèmes écologiques dans les zones urbaines et agricoles. L'eau stagnante ou affleurante, dont la salinité est très élevée, menace les palmeraies et l'ensemble de la végétation.

Les eaux usées collectées à travers un réseau en mauvais état général, sont évacuées vers la dépression d'Oum Raneb au Nord-Est de la ville de Ouargla sans traitement et constituent ainsi un facteur grave de pollution.

De l'ensemble des travaux réalisés, nous avons abouti à un certain nombre de résultats que nous rappelons brièvement :

- L'analyse climatologique, basée sur les données disponibles, a permis d'aboutir à des résultats très probants :
 - L'évapotranspiration potentielle de la région est l'un des traits marquants du climat, elle est très importante. Plus de 50 % du total de l'Etp annuelle est enregistré entre les mois de Mai et d'Août;
 - Parler de l'aridité, est une expression qualifiant la sécheresse qualitative ou quantitative de la région. Rappelons tout de même que les précipitations moyennes sont de l'ordre de 35 mm/an;
 - Un autre aspect contraignant du climat est la très forte amplitude thermique aussi bien entre le jour et la nuit (amplitude thermique journalière) que celle enregistrée sur l'année (amplitude thermique annuelle). Les très faibles températures enregistrées durant les trois premiers mois de l'année provoquent des gelées qui constituent un facteur limitant à prendre en considération (5 jours de gelées par an);
 - L'exploitation des données disponibles a permis d'établir un bilan hydrologique à l'échelle de la cuvette semble refléter convenablement le phénomène de la remontée des eaux.

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

1- Continental Intercalaire : C'est un réservoir contenu dans les formations continentales gréso-argileuses du Crétacé inférieur.

L'essentiel des réserves de cet énorme réservoir correspond à de l'eau infiltrée au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire. Cette réserve d'eau doit être gérée comme une ressource minière épuisable.

Dans la région de Ouargla le toit de la nappe est situé à – 850 m (par rapport au niveau 0) et donc par rapport au sol à – 1 000 m. L'épaisseur utile totale de ce réservoir dépasse 250 m.

Actuellement, deux forages sont implantés dans le "CI" pour assurer l'alimentation en eau potable de la région de Ouargla.

- Forage El H'deb 1 : de profondeur de 1335 m et de débit de 141 l/s;
- Forage El H'deb 2 : de profondeur de 1400 m et de débit de 68 l/s.

2- Complexe Terminal : C'est un réservoir englobe localement les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène sableux. Il est exploité dans la cuvette de Ouargla à des profondeurs comprises entre 30 et 200 m par les puits artésiens jaillissants qui autrefois irriguaient les palmeraies de Ouargla.

L'exploitation de cette nappe par les puits artésiens date de 1883.

Actuellement la situation a fondamentalement changé ; l'artésianisme a baissé au point que dans les palmeraies de Ouargla, la nappe n'est plus jaillissante, elle est exploitée par pompage dans des forages. Au niveau de Sebket Safioune, elle est encore artésienne avec une profondeur de 130 m.

Cette nappe est actuellement utilisée pour l'alimentation en eau potable de la ville de Ouargla avec 23 forages avec pompages. Au total, 274 forages assurent une production annuelle de 50 hm³ d'eau pour l'alimentation domestique et agricole.

3- Nappe phréatique : Formation très récente, constituée par des sables et des argiles évaporitiques gypseuses.

Piézométriquement, d'une année à la suivante, on constate que les variations sont généralement faibles et qu'en moyenne elles s'équilibrent. Dans l'agglomération de Ouargla, des variations journalières ont été observées, elles sont à mettre en relation avec les variations de niveau dans le réseau d'assainissement. Quand une station de pompage est arrêtée, l'eau reflue non seulement dans le réseau mais aussi dans le chevelu des branchements particuliers et se répand dans la nappe, faisant monter son niveau. Le phénomène inverse se produit à la remise en route de la station.

La pente de la nappe est extrêmement faible, de 2 ‰ au maximum et inférieure à 1 ‰ en moyenne, entre le point le plus haut situé sous l'agglomération de Ouargla et Sebkhet Safioune point le plus bas, à 40 km au Nord de la cuvette. La nappe présente des contre-pentes au Sud de N'Goussa.

Sous l'agglomération de Ouargla, les quantités d'eau qui peuvent s'écouler naturellement en direction des sebkhas, sont de quelques (l/s) ce qui est négligeable comparativement aux fuites des réseaux, sans parler des rejets de l'assainissement autonome.

Il ressort de ces observations que l'eau qui est apportée depuis les nappes profondes ne pouvant pratiquement pas s'écouler naturellement reste sur place et fait rapidement monter le niveau de la nappe si elle n'est pas évacuée par un réseau d'assainissement ou de drainage.

Parmi les recommandations proposées, pour lutter contre le phénomène de la remontée des eaux de la nappe phréatique, on peut citer :

- Réflexion sur la dimension souhaitable de la palmeraie dans les zones urbanisées (Ouargla et N'Goussa);
- Maintien de zones d'évaporation;
- Réalisation d'une conduite d'évacuation vers Sebkhet Safioune.

- Dans un stade ultime, l'étude hydrochimique, basée sur les résultats d'analyses effectuées en 2007, a permis de caractériser les eaux des trois nappes aquifères :

La minéralisation totale est assez souvent à moins de 1,5 g/l pour les eaux du "CI" et de 2 à 3 g/l pour celles du "CT". Ces eaux présentent généralement un faciès sulfaté sodique avec des teneurs en ions supérieures aux normes de potabilité fixées par l'OMS, elles sont cependant utilisables, moyennant un certain nombre de précautions.

Concernant les eaux de la nappe phréatique, elles sont généralement de qualité très dégradée.

A fin de protéger les eaux contre la pollution, il faut faire cultiver traditionnellement en ghouts, utiliser les eaux d'assainissement traitées pour l'irrigation et de suivre les caractéristiques physico- chimiques des eaux.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

ABIDI S. & BELLAOUEUR A. (2005) : Etude hydrogéologique du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal dans la cuvette de Ouargla. Mémoire Ing en hydrogéologie. Univ, Constantine, Algérie, 100p.

ANRH (2001) : Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya de Ouargla. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Ouargla, Algérie.

AUMASSIP G., LEFÈVRE P. et ROUVILLOIS M. (1972) : Aperçu sur l'évolution du paysage quaternaire et le peuplement de la région de Ouargla, p 205-257.

BABA SY M. (2005) : Recharge et paléorecharge du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Thèse Doct, Univ, Tunis El Manar, 271p.

BEL F. & CUCHE D. (1969) : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie, 20p.

BEL F. & DEMARGNE F. (1966) : Etude géologique du Continental Terminal, ANRH, Alger, Algérie, 22p.

BNEDER (1992) : Hydrogéologie, Mission n°2. TIPAZA, 25p.

BONNARD & GARDEL. (2004) : Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission II, rapport final, 110p.

BRL ingénierie (1999) : Etude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, Lot I. France, 94p.

BUSSON G. (1970) : Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse Paris, 464p.

CDTN (1991) : Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Algérie.

CONRAD G. (1969) : L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, CNRS, Paris, 527p.

DUBIEF J. (1963) : Le climat du Sahara. Institut des recherches sahariennes. Mémoire hors série, tome 1 et 2. Alger, 275p.

DUBOST D. (1992) : « Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis algériennes » in sécheresse n° 2, vol. 3, Juin 92.

- DUTIL P. & SAMI C. (1960)** : Essai de bilan hydrologique du chott de Ouargla. VI^e journée de l'hydraulique, pp. 309-314, Grenoble 1960.
- ENA.GEO (1992)** : Rapport interne de la prospection piézométrique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. Algérie.
- FABRE J. (1976)** : Introduction à la géologie du Sahara algérien. SNED, Alger, Algérie, 422p.
- GUENDOUIZ A. (1985)** : Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est Septentrional (Algérie). Thèse 3^e cycle, Univ. Paris-Sud, 243p.
- GENETIER B. (1984)** : La pratique des pompages d'essai en hydrogéologie, Manuels et méthodes du B.R.G.M., n^o 9, pp.13-31, France.
- ITAS (1998)** : Bulletin des données agroclimatologiques de la région de Ouargla. Algérie.
- KILIAN C. (1931)** : Les principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. Géol. Fr. Paris.
- LABORDE J.P. (2000)** : Eléments d'hydrologie de surface, 204p.
- MAMOU A. (1990)** : Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du Sud tunisien. Thèse Doctorat es-Sciences. Univ. Paris-Sud, 426p.
- ONM (2007)** : Bulletin climatologique de la station de Ouargla. Service archives. Ouargla, Algérie.
- OSS (2002)** : Système Aquifère du Sahara Septentrional : De la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière. Projet SASS. Rapport interne. Tunis, Tunisie, 58p.
- OSS (2003a et b)** : Système Aquifère du Sahara Septentrional, Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie, 229p.
- OUAJA M. (2003)** : Etude sédimentologique et paléobotanique du Jurassique moyen- Crétacé inférieur du bassin de Tataouine. PhD, Univ. Claude Bernard. Lyon 1, 164p.
- ROCHE M.A (1973)** : L'hydrogéologie de la haute Saoura et l'erg occidental. Travaux de collaboration bult N^o47, 240p.
- ROUVILLOIS & BRIGOL N. (1975)** : Le pays de Ouargla variation et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Univ. Sorbone, Paris.

SONATRACH : Géologie de l'Algérie. Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement, 93p.

ULLMAN W. J. (1985) : Evaporation rate from a salt pan : Estimate from chemical profiles in nearsurface groundwater. J. Hydrol, Vol. 79, pp.365-373.

UNESCO (1972) : Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, Rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris (1972).

ANNEXES

Annexe.1 :

Tableau. A₁- 1 : Débits des forages captant le "CT"

Nom simple	N° DHW	Commune	Usage	Q exp (l/s)
El Bakrat jeune	D5F110	Ain_Beida	Irr	30
A.Adjaddja	D5F73	//	//	20
A.cadi djedida	D4F75	//	//	6
A.Kaddour	D4F104	//	//	20
A.Rbâa	D4F102	//	//	5
A.Zgag	D5F75	//	//	10
St. pompage chott	D5F80	//	//	10
A.Freha	D5F81	//	//	20
Khaled I	D5F92	//	//	15
A.Chott village	D5F71	//	//	10
Chott Palmeraie	D5F77	//	//	15
A.Aérogare	D4F99	//	//	20
A.Zoubeidi	D4F100	//	//	10
A.Koubania III	D4F97	//	//	20
A.Khanafiss	D4F66	//	//	2
A.Koubania	D4F83	//	//	6
A.Toula	D4F77	//	//	15
20 Aout I	D5F118	//	//	25
El Foudil	D5F114	//	//	30
Mokadem	D5F113	//	//	25
Sidi Slimane	D5F112	//	//	25
A.El Assen	D5F12	//	//	25
Allali Med	D5F122	//	//	15
A.Tlili	D5F124	//	//	15
Khouiled Med	D5F127	//	//	20
A.Briss	D5F132	//	//	16
A.Sakta	D5F76	//	//	40
Ghers Bough.	D6F63	N'Goussa	Irr/AEP	20
Baalouche	D6F41	//	Irr	20
Galloussen	D6F44	//	//	11
Ain N'sara	D6F50	//	//	15
Hassi-Echtta 2	D6F59	//	//	1
A.Moussa I	D6F68	//	//	35
Oum Raneb	D6F69	//	AEP	20
Frane jeune	D6F62	//	Irr	25
El Koum	D6F67	//	//	10

A.Laarab	D6F49	//	//	20
A.Moussa AEP	D6F86	//	AEP	20
Hassi Echta AEP	/	//	//	20
Bamendil II Cofor	D7F2	Ouargla	Irrig	20
Chateau d'eau	D1F112	//	AEP	30
Garet Chemia	D1F113	//	Irrig	20
Mekhadma AEP I	D1F123	//	AEP	37
Lala Mimouna	D1F128	//	//	20
Matmoura AEP	D1F110	//	//	20
A.Louise	D4F73	//	//	25
Sidi Amrane	D1F132	//	//	20
Bouameur	D1F133	//	//	20
Bahmid I	D1F78	//	//	15
Gherbouz I AEP	D1F124	//	//	30
SAR Mekhadma II	D1F126	//	//	25
Jardin Communal	D1F137	//	//	30
Hopital	D1F143	//	Irr	6
Bour El Haicha	D1F139	//	//	20
Gherbouz II AEP	D1F142	//	AEP	30
Mekhadma AEPIII	D1F144	//	//	37
Cité universitaire	D1F146	//	//	12
ITAS	D1F150	//	Irr	10
Ifri	D1F151	//	AEP	20
Said otba I	D2F61	//	//	15
Rouissat III	D3F10	//	//	25
Sokra II AEP	D3F22	//	//	17
Abattoir	D3F24	//	IND	20

(Continuation du tableau. A₁- 1)

Tableau. A₁- 2 : Débits des forages captant le "CI"

Nom simple	N° ANRH	Commune	Usage	Q exp (l/s)
El H'deb 1 (Bousmaha saci)	J010-583	Rouissat	Irr/AEP	120
El H'deb 2 (Hmidi Hocine)	J010-681	Rouissat	//	120

Annexe.2 :

2.1 - Piézomètres opérationnels en 2001 :

68 piézomètres opérationnels sont répartis comme suit :

- 19 piézomètres du réseau LTPS encore opérationnels;
- 46 piézomètres réalisés par ENA.GEO (Certains faisaient partie du réseau de surveillance ANRH);
- 3 puits "traditionnels".

2.2 - Etat du réseau de surveillance en 2003 :

77 nouveaux piézomètres ont été réalisés par BG : série des P500.

- 24 dans et autour de Sebket Safioune (implantés en collaboration avec l'ANRH qui a en projet la réalisation de 50 piézomètres dans cette région);
- 07 dans la zone de la station de lagunage projetée de Ouargla;
- 46 dans les palmeraies de Ouargla et ses alentours.

De plus:

- 42 piézomètres ENA.GEO trouvés détruits ont été restaurés;
- 25 autres points de mesures ont été intégrés au réseau de surveillance (série des P400);
- 16 piézomètres ENA.GEO situés dans des lieux peu accessibles ont été retrouvés opérationnels.

Ces 160 points de mesure s'ajoutent aux 68 piézomètres opérationnels pour constituer un total de 228 dont 184 étaient opérationnels à la fin de Novembre 2003 (Tableau. A₂- 3).

Tableau. A2- 1 : Forages captant le CT classés par N° DHW

Nom simple	N° DHW	Commune	X_WGS84	Y_WGS84	Z (m)	Prof (m)	Année Real
A.cadi djedida	D4F75	Ain_Beida	724258	3536920	135	70	1968
Chott Palmeraie	D5F77	//	725566	3538224	138	220	1980
Baalouche	D6F41	N'Goussa	717638	3558310	119	85	1957
El Koum	D6F67	//	721650	3573704	111	135	1986
Houadh Djeneine 2	D6F78	//	715424	3556572	120	80	1987
Debiche Jeune	D6F87	//	728798	3581817	122	108	1989
Bir Djeneine H'mim	D6F52	//	715402	3555038	172	86	1980
A.Moussa AEP	D6F86	//	720172	3550061	128.26	114	1988
Bamendil II Cofor	D7F2	Ouargla	716471	3540534	136.67	86.47	1987
Garet Chemia	D1F113	//	716817	3535924	132.169	188.48	1970
Matmoura AEP	D1F110	//	719406	3537975	138.265	70	1988
Bamendil AEP	D7F4	//	715835	3540943	153	131	1982
Transat sillis	D2F51	//	720843	3538721	136	45	1958
Bouroubia	D2F59	//	721391	3540075	132	94.47	1966
A.Louise	D4F73	//	721923	3537529	132.4	285.5	1966
Kouchane	D1F106	//	718886	3540688	129.9	82.11	1966
A.Banounou	D2F54	//	719749	3541089	131.82	80	1966
Belguettaif	D1F131	//	717707	3536708	130	62	1984
Sidi Amrane	D1F132	//	717177	3537402	130	62	1984
Baba youcef	D1F111	//	719260	3538953	132.20	79	1969
Ain El Kheir	D1F96	//	718482	3537841	136.139	58.5	1960
Belabes	D1F100	//	719194	3540561	129.8	80	1963
Gherbouz I AEP	D1F124	//	718706	3538417	137.441	180.6	1978
Bab Sbaa	D1F125	//	719626	3540066	131	68	1978
SAR Mekhadma II	D1F126	//	718387	3537217	133	69.1	1979
Bey bib	D1F129	//	719323	3539435	131	70	1982
Nanouidi	D1F130	//	719395	3539828	131	72	1982

Tableau. A2- 2 : Forages captant le CI classés par N° ANRH

Nom simple	N° ANRH	Commune	X_WGS84	Y_WGS84	Z (m)	Prof (m)	Année réel
El H'deb 1 (Bousmaha saci)	J010-583	Rouissat	723986	3534750	130	1335	1974
El H'deb 2 (Hmidi Hocine)	J010-681	//	724290	3534310	155	1403	1987

**Tableau. A₂- 3 : Etat du réseau de surveillance en 2003
nappe phréatique de Ouargla (BG, 2003)**

Piézomètre	Etat ouvrage	Altitude (m)	Coordonnées UTM Clarke		Profondeur de l'eau (m)
			X	Y	
P001	Opérationnel	105	722366	3572148	1,73
P002	//	107	722028	3570523	2,15
P003	//	108,5	721496	3569043	2,58
P006	//	110	719421	3564272	2,12
P008	//	113,78	717758	3560710	1,6
P009	//	114	717707	3559388	1,77
P017	//	117,62	715781	3560256	1,34
P018	//	116,99	716590	3562122	1,76
P021	//	105,64	723161	3573943	1,61
P023	//	102,5	725726	3577198	2,22
P034	//	104,37	725633	3579698	1,63
P035	//	102	725047	3578749	2,48
P036	//	102	724337	3577608	2,46
P037	//	104,27	723704	3576502	2,06
P040	//	114	716460	3558539	1,63
P041	//	/	716543	3559563	1,31
P043	//	113,5	716960	3555801	1,56
P054	//	125,5	716592	3551834	3,08
P055	//	115	716879	3550928	1,85
P056	//	116,5	717022	3549933	3,5
P059	//	126	718358	3547216	12,19
P067	//	130,34	720492	3541539	1,91
P068	//	130,01	721554	3541316	1,91
P093	//	128,07	724488	3541080	1,2
P096	//	129,5	724729	3540265	1,43
P113	//	132,9	714576	3535586	4,6
P114	//	135,51	714347	3534542	7,5
P117	//	139,09	713298	3531435	10,46
P121	//	136,94	715877	3534087	9,47
P153	//	132,88	720087	3546308	6,52
P163	//	126,15	725428	3545111	1,79
P165	//	126,15	722932	3547773	1,93
PL04	//	129,5	723542	3541399	1,85

**Tableau. A₂- 4 : Piézométrie de la nappe phréatique,
Ouargla, 2007**

Piézomètre	Etat ouvrage	Altitude (m)	Coordonnées UTM Clarke		Profondeur de l'eau (m)
			X	Y	
P001	Opérationnel	105	722366	3572148	1
P002	//	107	722028	3570523	1
P003	//	108,5	721496	3569043	1,5
P006	//	110	719421	3564272	1
P008	//	113,78	717758	3560710	1,5
P009	//	114	717707	3559388	2
P021	//	105,64	723161	3573943	1
P023	//	102,5	725726	3577198	1,5
P034	//	104,37	725633	3579698	2
P035	//	102	725047	3578749	1
P036	//	102	724337	3577608	1
P037	//	104,27	723704	3576502	2
P040	//	114	716460	3558539	1
P041	//	/	716543	3559563	0,5
P043	//	113,5	716960	3555801	1,5
P054	//	115,5	716592	3551834	2,5
P055	//	115	716879	3550928	2
P056	//	116,5	717022	3549933	2,5
P059	//	126	718358	3547216	2
P096	//	129,5	724729	3540265	1,5
P093	//	128,07	724488	3541080	1
P163	//	126,15	725428	3545111	1
P165	//	126,15	722932	3547773	1
PL04	//	129,5	723542	3541399	1,5

Annexe.3 :

3.1 - Paramètres physico-chimiques :

3.1.1 - Température de l'eau :

La température des eaux des nappes aquifères souterraines est essentiellement liée au gradient géothermique dont la valeur moyenne est de l'ordre de 3°C tous les 100 m.

Néanmoins, certaines réactions chimiques exothermiques peuvent contribuer à élever la température des eaux souterraines. Pour pouvoir, prévoir la température de l'eau en un site pour lequel on connaît l'épaisseur des terrains à forer et la température annuelle moyenne, on peut utiliser la formule suivante :

$$T = P \times (3/100) + T_m$$

Où :

- T : Température de l'eau souterraine (°C);
- P : Profondeur du forage (m);
- T_m : Température moyenne annuelle (°C).

3.1.2 - Potentiel d'Hydrogène : (PH)

Il constitue la concentration en ions [H⁺] d'une solution, C'est-à-dire : l'acidité ou basicité du milieu.

$$PH = \log [1/ [H^+]]$$

- Pour un PH = 7 => solution neutre;
- Pour un PH > 7 => solution basique;
- Pour un PH < 7 => solution acide.

3.1.3 - Conductivité électrique de l'eau :

Elle permet (globalement) d'évaluer la teneur ou la concentration des ions présents dans l'eau. L'eau douce est évidemment résistante, 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.

3.1.4 - Résidu sec : (RS)

Il exprime la totalité des sels dissous dans l'eau et des suspensions organiques et minérales obtenue par pesées (évaporation à 110°C/24h), c'est donc la minéralisation totale de l'eau.

3.1.5 - Dureté totale : (Δ HT)

Elle exprime la quantité des sels de Calcium et de Magnésium dissous dans l'eau.

- Δ HT = (r Ca + r Mg) mé/l
- Δ HT = (r Ca + r Mg) \times 5 °F

La dureté acceptable pour une eau de bonne qualité chimique selon l'OMS est comprise entre 15°F et 50°F.

3.1.6 - Cations :

3.1.6.1 - Calcium : (Ca^{2+})

Il résulte de la dissolution des roches carbonatées en présence du CO_2 dans l'eau : $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3$
Comme il peut être provenir des terrains gypseux (CaSO_4).

3.1.6.2 - Magnésium : (Mg^{2+})

Il peut être provenir de la dissolution des calcaires dolomitiques en présence du CO_2 ou de la dissolution des dolomies (MgSO_4) dans les terrains gypsifères.

3.1.6.3 - Sodium et potassium : (Na^+ , K^+)

Pour le sodium, il est présent 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.

3.1.7 – Anions :

3.1.7.1 – Chlorures : (Cl⁻)

On les rencontre en grande quantité dans les eaux souterraines proviennent de la dissolution du sel par lessivage des terrains salifères et du rejet des eaux d'origine industrielle.

3.1.7.2 – Sulfates : (SO₄²⁻)

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles, leur présence dans l'eau provient soit :

- De la légère solubilité des sulfates de calcium (CaSO₄) dans les formations gypseuses;
- Du lessivage des terrains argileux et marneux;
- Des eaux usées contenant de l'acide sulfurique.

Leur teneur admissible fixée par l'OMS est de 250 mg/l.

3.1.7.3 – Bicarbonates : (HCO₃⁻)

Ils proviennent de la dissolution des roches carbonatées dont l'eau est fonction de la tension en CO₂, de la température, du PH et de la nature lithologique des terrains traversés.

Ce sont les résultats de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le CO₂ selon l'équation suivante :



3.1.7.4 – Nitrates : (NO₃⁻)

Ils sont rarement présents dans les eaux souterraines.

Sa présence est généralement associée à l'agriculture; c'est le meilleur signe de pollution d'origine agricole.

Ils proviennent également de l'azote organique du sol (par l'intermédiaire des bactéries) ainsi que des eaux usées domestiques non traitées.

Leur teneur admissible fixée par l'OMS est de 45 mg/l.

Forage : El H'deb 2

Daira : Ouargla

Commune : Rouissat

Localité : El H'deb

Nappe captée : Continental Intercalaire

Débit : 200 L/S. Débit exploité : 68 L/S

Profondeur : 1400 m

Analyses effectuées à l'ANRH et au laboratoire de l'EDEMIAO Ouargla

Potabilité de l'eau : Passable à médiocre

Tableau. A3-1 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre	1998	2002	2005	2007
PH	8,76	7,62	7,1	7,86
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	1900	1810	2100	2400
Température in situ ($^{\circ}\text{C}$)	/	/	45	42
Minéralisation totale mg/l	1596	1700	1400	1500
Calcium mg/l	73	150	152,3	172,34
Magnésium mg/l	197	113	64,62	131,24
Sodium mg/l	175	217	263	239
Potassium mg/l	30	9	27	23
Chlorures mg/l	400	680	312,5	300
Sulfates mg/l	580	669	482	480,6
Bicarbonates mg/l	67	95	113,5	184,15
Dureté totale $^{\circ}\text{F}$	99	84	65	70
TAC $^{\circ}\text{F}$	/	/	/	15,1
Nitrate mg/l	37	/	/	/
Fer mg/l	/	/	/	9,2
Zinc mg/l	/	/	/	TRC

Forage : El H'deb 1
 Daira : Ouargla
 Commune : Rouissat
 Localité : El H'deb
 Nappe captée : Continental Intercalaire
 Débit : 200 L/S. Débit exploité : 141 L/S
 Profondeur : 1335 m
 Analyses effectuées à l'ANRH et au laboratoire de l'EDEMIAO Ouargla
 Potabilité de l'eau : Passable à médiocre

Tableau. A₃-2 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre	1998	2002	2003	2007
PH	7,75	7,42	8,22	7,95
Conductivité μs/cm	1970	1880	2420	2500
Température in situ (°C)	/	/	/	49
Minéralisation totale mg/l	1664	1768	1798	1500
Calcium mg/l	75	158	100	208,41
Magnésium mg/l	210	125	213	121,52
Sodium mg/l	180	217	223	/
Potassium mg/l	29	7	34	23
Chlorures mg/l	435	420	592	456
Sulfates mg/l	610	680	673	613,3
Bicarbonates mg/l	125	114	/	161,13
Dureté totale °F	105	91	113	77
TAC °F	/	/	/	13,2
Nitrate mg/l	39	/	/	/
Fer mg/l	/	/	/	2,3
Zinc mg/l	/	/	/	18,1

Forage : Lala Mimouna

Daira : Ouargla

Commune : Ouargla

Localité : Ouargla

Nappe captée : Complexe Terminal

Débit : 30 L/S. Débit exploité : 26 L/S

Profondeur : 172 m

Analyses effectuées à l'ANRH et au laboratoire de l'EDEMIAO Ouargla

Potabilité de l'eau : Passable à médiocre

Tableau. A3-3 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre		1998	2005	2007
PH		7,8	7,63	7,86
Conductivité	μs/cm	1900	2200	2200
Température in situ	°C	/	/	20
Minéralisation totale	mg/l	1682	1750	1660
Calcium	mg/l	88	185	172
Magnésium	mg/l	148	74,64	97,2
Sodium	mg/l	205	171	163
Potassium	mg/l	13	11	21
Chlorures	mg/l	360	337,25	324
Sulfates	mg/l	620	534	596,4
Bicarbonates	mg/l	85	152,5	136
Dureté totale	°F	83	72,6	68
TAC	°F	/	/	/
Nitrate	mg/l	27	/	/
Fer	mg/l	/	/	2,3
Zinc	mg/l	/	/	17,4

Forage : Ifri
 Daira : Ouargla
 Commune : Ouargla
 Localité : Ouargla
 Nappe captée : Complexe Terminal
 Débit: 23 L/S. Débit exploité : 14 L/S
 Profondeur : 176 m
 Analyses effectuées à l'ANRH et au laboratoire de l'EDEMIAO Ouargla
 Potabilité de l'eau : Passable à médiocre

Tableau. A₃-4 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre		1998	2003	2005	2007
PH		7,7	7,76	7,3	7,98
Conductivité	μs/cm	1980	2400	2500	2300
Température in situ	°C	/	/	/	21
Minéralisation totale	mg/l	1832	1722	1930	1730
Calcium	mg/l	95	98	208,4	188,37
Magnésium	mg/l	152	156	77,51	209,02
Sodium	mg/l	195	334	443	432
Potassium	mg/l	12	20	16	21
Chlorures	mg/l	400	538	312,4	323,7
Sulfates	mg/l	686	707	468	452
Bicarbonates	mg/l	79	69	164,7	105,88
Dureté totale	°F	86	89	84,4	70
TAC	°F	/	/	/	15
Nitrate	mg/l	44	36	/	/
Fer	mg/l	/	/	/	2,4
Zinc	mg/l	/	/	/	17,6

Forage : Bahmid
 Daira : Ouargla
 Commune : Ouargla
 Localité : Ouargla
 Nappe captée : Complexe Terminal
 Débit : 19 L/S. Débit exploité : 19 L/S
 Profondeur : 67 m
 Analyses effectuées à l'ANRH et au laboratoire de l'EDEMIAO Ouargla
 Potabilité de l'eau : Médiocre

Tableau. A3-5 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre	2002	2005	2007
PH	7,95	7	7,89
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	4220	3920	4400
Température in situ $^{\circ}\text{C}$	/	/	19
Minéralisation totale mg/l	3474	3100	3180
Calcium mg/l	145	240,48	236,24
Magnésium mg/l	223	125,47	143
Sodium mg/l	480	263	256
Potassium mg/l	25	17	26
Chlorures mg/l	740	323,05	399,2
Sulfates mg/l	1215	836	865,68
Bicarbonates mg/l	170	207,4	186,53
Dureté totale $^{\circ}\text{F}$	128	112,4	117
TAC $^{\circ}\text{F}$	/	/	48
Nitrate mg/l	9	/	/
Fer mg/l	/	/	7,2
Zinc mg/l	/	/	TRC

Forage : Oum Raneb
 Daira : Sidi Khouiled
 Commune : Sidi Khouiled
 Localité : Oum Raneb
 Nappe captée : Complexe Terminal
 Débit : 30 L/S. Débit exploité : 14 L/S
 Profondeur : 69 m
 Analyses effectuées à l'ANRH et au laboratoire de l'EDEMIAO Ouargla
 Potabilité de l'eau : Passable à médiocre

Tableau. A₃-6 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre	1998	2002	2007
PH	8,1	/	7,75
Conductivité μs/cm	2370	/	4310
Température in situ °C	/	/	19
Minéralisation totale mg/l	2000	/	3240
Calcium mg/l	218	218	333,46
Magnésium mg/l	130	133	237,2
Sodium mg/l	245	440	394
Potassium mg/l	17	34	24
Chlorures mg/l	525	762	430,4
Sulfates mg/l	600	/	630,63
Bicarbonates mg/l	88	/	119,69
Dureté totale °F	80	109	132
TAC °F	/	/	43
Nitrate mg/l	50	/	/
Fer mg/l	/	/	2,3
Zinc mg/l	/	/	17,8

La nappe phréatique
 Daira : N'Goussa
 Commune : N'Goussa
 Localité : N'Goussa
 Nappe captée : Phréatique
 Profondeur : 1 à 2 m
 Date d'analyse : Juin 2007

Tableau. A₃-7 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre		N'Goussa 1	N'Goussa 2	N'Goussa 3
PH		7,4	7,6	7,2
Conductivité	μs/cm	6 700	8 400	6 700
Température in situ	°C	24	18	18
Minéralisation totale	mg/l	2 300	20 800	19 300
Calcium	mg/l	681,3	881,7	841,6
Magnésium	mg/l	133,6	170,1	594,3
Sodium + Potassium	mg/l	57,4	27,4	203,6
Chlorures	mg/l	520	17 440	14 677,5
Sulfates	mg/l	395,6	1 203,9	2 286,1
Bicarbonates	mg/l	351,9	920,7	586,5
TAC	°F	28,8	75,4	48
Fer	mg/l	14,2	4,8	12,6
Zinc	mg/l	TRC	3,5	TRC

La nappe phréatique

Daira : Ouargla

Localité : Ouargla, Rouissat et Aïn Baïda

Profondeur : 1 à 2 m

Date d'analyse : Juin 2007

Tableau. A₃-8 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Paramètre	Ba-Mendil (Ouargla)	Saïd 1 (Ouargla)	Rouissat	Adjadja (Aïn Baïda)
PH	7,8	7,3	7,9	7,5
Conductivité $\mu\text{s/cm}$	20 000	40 000	5 000	6 000
Température in situ $^{\circ}\text{C}$	18	18	18	23
Minéralisation totale mg/l	5 700	10 000	2 800	26 100
Calcium mg/l	1 202	1 162,3	641,28	601,2
Magnésium mg/l	89,9	651,37	77,7	658,2
Sodium + Potassium mg/l	177,2	100	36,2	92,8
Chlorures mg/l	2 700	6 320	940	20 560
Sulfates mg/l	673,4	1 250,5	744,7	3 606,3
Bicarbonates mg/l	703,84	230,2	0	114,4
TAC $^{\circ}\text{F}$	57,6	18,8	0	91,3
Fer mg/l	14,4	12,4	11,4	15,2
Zinc mg/l	TRC	TRC	0,2	TRC

Tableau. A3-9 : Teneurs en NO₃ des eaux, nappe phréatique de Ouargla (BG, 2003)

Piézomètre	NO ₃ mg/l
P001	40
P002	60
P003	48
P004	46
P006	54
P007	55
P008	38
P009	44
P018	69
P021	27
P023	103
P034	166
P035	110
P036	36
P037	68
P039	26
P044	11
P054	22
P055	37
P056	21
P059	23
P067	45
P068	57
P093	7
P113	41
P114	35
P117	34
P121	24
P153	64
P402	21
P405	46
P406	35
P408	30
P410	25
P411	23
P412	7
P413	10
PL04	16
PL10	40
PL13	26
PL15	6
PL17	29
PL18	50
PL22	15
PL23	65
PL31	26
PLSN1	92

ملخص:

في إطار هذه المذكرة تمثل هذه الدراسة مساهمة في تحليل ظاهرة صعود مياه الطبقة السطحية (الفيزيائية) على مستوى منخفض ورقلة ووصف لبعض الحلول الممكنة للسيطرة على هذه الظاهرة. تركز هذه المساهمة على دراسة ثلاثة محاور أساسية:

- تشكيل حوصلة مائية عامة لهذه الطبقة (تحديد كميات الماء المساهمة في تغذية هذه الطبقة والكميات الضائعة منها);

- دراسة تغيرات مستوى سطح مياه هذه الطبقة;

- دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية لهذه المياه.

يقع منخفض ورقلة في الشمال الشرقي للصحراء الجزائرية ويتربع على مساحة 95 000 هكتار، المناخ فيه صحراوي جاف (تساقط نادر وغير منتظم، شدة تبخر عالية مع فوارق حرارية معتبرة).

الحوصلة المائية المشكلة تعكس تماما الحالة السائدة لهذه الظاهرة، فالتجمعات السكنية، الغابات والشطوط (مناطق تتميز فيها الطبقة الفيزيائية بميل يكاد ينعدم: متوسط عام أقل من 1%) هي المناطق الأكثر تضررا من هذه الظاهرة، حيث أن مياه الصرف الصحي والفلاحي تمثل العامل الرئيسي المتسبب في ظهور مياه الطبقة على السطح. في حالة ضخ هذه المياه عن طريق تفعيل شبكتي الصرف الصحي والفلاحي فان حدة الظاهرة تخف نوعا ما وعليه نستطيع القول بان العامل البشري له دور إيجابي أو سلبي (وهو الغالب) تجاه هذه الظاهرة.

الدراسة الفيزيوكيميائية لمياه هذه الطبقة تبين رداءة هذه المياه وعدم صلاحيتها للشرب وحتى للسقي في بعض الأحيان مع ظهور لعلاوات تلوث خاصة على مستوى الشطوط.

من بين الحلول المقترحة (على المدى المتوسط على الأقل)، صرف مياه الإرجاع عموما باتجاه سبخة سفيون والعدول أو التخفيف من استغلال مياه الطبقات الباطنية والتعويض عنها بالمياه المعالجة للطبقة السطحية ذاتها.

RESUME :

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire, représente une contribution à l'étude du phénomène de la remontée des eaux dans la nappe phréatique à l'échelle de la cuvette de Ouargla. Cette contribution s'appuie sur trois principaux outils :

- L'établissement d'un bilan hydrologique global pour étudier les apports et les pertes de la nappe phréatique;

- L'étude piézométrique de la nappe phréatique;

- Les caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique.

La cuvette de Ouargla est située au Nord-Est du Sahara algérien. Elle présente une superficie de l'ordre de 95 000 ha et un climat aride (précipitations très faibles, évaporation très élevée et amplitudes thermiques élevées).

Le bilan hydrologique établi, semble refléter convenablement le phénomène de la remontée des eaux. L'eau, aussi bien dans les agglomérations, dans les palmeraies et dans les sebkhas (zones à basses altitudes et de pente extrêmement faible : <1% en moyenne), se trouve proche de la surface du sol. Ce sont les eaux d'origine profonde (eaux d'irrigation mal drainées, eaux d'assainissement...) qui favorisent l'élévation de ce niveau d'eau. Il ressort que la nappe phréatique ne peut pas jouer de rôle tampon important, car les stations de pompage et les canaux de drainage, en état de bon fonctionnement, peuvent régler le niveau d'eau dans ces zones inondées.

Hydro chimiquement, les eaux de cette nappe, ont une qualité très dégradée.

Parmi les recommandations proposées, à l'échelle de la cuvette de Ouargla, c'est de limiter les prélèvements à partir des nappes profondes et les remplacer par les eaux traitées de la nappe phréatique elle-même et l'évacuation des rejets vers "Sebkhet Safioune".