

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عناينة

Année 2008

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie)

Option :
Hydrogéologie

Par

DJIDEL Mohamed

(Ingénieur d'état en Hydrogéologie, Magister en Hydrochimie)

DIRECTEUR DE THESE :

Mme KHERICI -BOUSNOUBRA Houria

Maître de Conférences Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :	CHOUABBI Abdelmadjid	Maître de Conférences - Université de Annaba
EXAMINATEUR :	OUMEDDOUR Rabah	Professeur - Université de Guelma
EXAMINATEUR :	Mme SAYAD Akila	Maître de Conférences - Université de Annaba
EXAMINATEUR :	KACHI Slimane	Maître de Conférences - Université de Guelma
EXAMINATEUR :	HOUHA Belgacem	M.de Conf. - Centre universitaire Khenchela

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celui que je ne pourrais jamais remercier assez, à la mémoire de mon père.

À ma mère, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et tous mes respects pour toute son aide, son affection et son sacrifice.

À ma femme comme simple témoignage de ma reconnaissance, pour l'immense effort qu'elle a fourni le long de mes études.

À mes enfants Fatima-zohra, Ali et Rayen.

À mes frères : Kamreddine, Yassin et Issam.

À mes sœurs : Nora, Fatima, Leïla, Bessma et ses époux.

À mes neveux et nièces.

À mes amis Ridha, Lakhdar et Imed qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études.

À toute ma famille et tous mes amis.

À tous ceux qu'un jour profiteront de ce travail.

Remerciements

Arrivé au terme de ce travail, je veux remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidées dans la réalisation de ce projet.

Ce travail n'aurait pu être ce qu'il est sans le soutien et l'aide de Madame KHERICI, Maître de conférences à l'université de Annaba et Directrice de cette thèse. Elle est disponible et patiente. Son aide, son soutien et ses idées scientifiques, même dans les conditions les plus difficiles, m'ont été très précieux.

Je remercie Monsieur Nacer KHERICI, Professeur à l'université de Annaba, pour son soutien et son aide morale, qui m'a été très précieux.

Je remercie Monsieur HANI A., Maître de conférences à l'université de Annaba, Chef département de Géologie pour son aide, sa disponibilité et sa gentillesse.

Je tiens également à remercier, Monsieur CHOUABI Abdelmadjid Maître de conférences à l'université de Annaba, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse, ainsi que Messieurs, OUMEDDOUR Rabah Professeur à l'université de Guelma, Mme SAYAD Akila Maître de conférences à l'université de Annaba, KACHI Slimane Maître de conférences à l'université de Guelma et HOUHA Belgacem Maître de conférences au Centre universitaire Khenchela, trouvent mes vifs remerciements de juger ce travail,

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnels du laboratoire des analyses physico Sonatrach Haoudh Berkaoui surtout le directeur de laboratoire : Mr CHADI Bachir. Les ingénieurs : BECHICHE Hacina, BENKARA Lamia et MORDJANA Chahra.

Les techniciens : SAKHRI Rabie, HOSNI, Abdelmadjid, HATHAT Azzedine, BOUBLAL Mohiédine, DJEBBARI Rabah, KARA Mahmoud et BOUTAKOUK Ridha.

Mes remerciements vont également aux:

- Personnel de la DHW de Ouargla.
- Personnel de la ONA de Ouargla.
- Personnel de l'A.N.R.H de Ouargla.
- Personnel de l'algérienne des eaux de Ouargla.
- Personnel de l'O.N.M de Ouargla.

Pour ses aides documentaires utiles, pour leurs accueils, et pour la mise à disposition de la bibliothèque et leurs archives des travaux réalisés dans la région.

Tous mes amis m'ont constamment été d'un immense soutien tout au long de ce travail et j'adresse une pensée particulière à Ridha ZARRIT.

Je suis enfin reconnaissant envers tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu tout au long de ces études.

Résumé

La plupart des régions nord africaines se caractérisent par des zones arides et semi-arides. En Algérie, la zone aride représente près de 90% de la superficie globale dont 80% est hyperaride.

L'approvisionnement en eau potable et sa gestion sont devenus une tâche difficile à satisfaire. L'action sur les ressources souterraines ne cesse de s'accroître, où on assiste à une surexploitation des nappes profondes. Ceci est accompagné par un rejet important d'eaux usées brutes dans le milieu naturel endoréique, provoquant la remontée des eaux. Il en résulte de cette situation une pollution sévère des eaux destinées aux différentes utilisations.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, sur la région de Ouargla (Sahara septentrional, algérien) faisant état de la contamination de la nappe superficielle par les polluants anthropiques anarchiques et naturelles. Par sa géomorphologie (cuvette), son climat hyperaride et la présence de chotts, la région est soumise à un degré de vulnérabilité assez important, encouragé par les rejets des eaux usées (domestique et d'irrigation). Ces facteurs exposent les eaux de la nappe superficielle à une pollution sévère.

Afin d'évaluer cette pollution, un suivi régulier de la qualité des eaux de la nappe superficielle et des eaux de surface, a été réalisé sur deux périodes (février et juin 2007). La représentation graphique spatio-temporelle, les influences des différents facteurs (climatiques, de surface, de la profondeur et lithologique) et les calculs des indices (de pollutions, calco-carbonique et de corrosivité) des données des analyses physico-chimique et organique, a permis d'identifier la qualité des eaux. La complémentarité des résultats montrent que les eaux de la nappe superficielles sont non potables pour la consommation humaine, un risque sévère pour l'irrigation, menaçant les plantes et le sol ainsi qu'elles sont incrustantes en montrant une nette tendance à la corrosion vis-à-vis des métaux.

La situation impose des solutions envisageables dans ce sens, d'une part, une élimination de toutes sources de pollution dans un tel milieu (endoréique et perméable), d'autre part, un dessalement par le procédé membranaire, appliquant le principe de l'osmose inverse.

Mots clés : Indices de pollution, Biodégradabilité, Eutrophisation, Hyperaride, indices calco-carbonique, indices de corrosivité, Sahara, Ouargla.

Abstract

Most North African regions are characterized by arid and semi-arid climate. In Algeria, the arid zone represents nearly 90% of the total area of which 80% is hyper-arid.

Drinking water supply and management have become difficult to satisfy. The action on groundwater resources is growing, where there is a deep groundwater overexploitation. This is accompanied by a significant release of raw sewage into the endoreic environment, causing rising waters. The result of this severe pollution of water intended for different uses.

The present study is registered, on the area of Ouargla (the Sahara septentrional, Algeria) reports of the aquifer contamination by the anarchistic urban rejections. By its geomorphology (basin), its hyper-arid climate and the presence of chotts, the area is subjected to an important degree of vulnerability, encouraged by the discharges of wastewater (domestic and irrigation). These factors expose aquifer's water to a severe pollution.

In order to evaluate this pollution, a regular monitoring of the quality of aquifer's water and the surface's water, was conducted over two periods (February and June 2007). The space-time graphic representation, the influences of various factors (climate, surface, depth and lithology) and calculations of indices (pollution, calco-carbonic and corrosivity), data analysis physico-chemical and organic identified water quality. The complementarity of the results shows that aquifer's water is not potable for human consumption, a severe risk for irrigation, threatening plants and soil as they are scaled by showing a clear trend to corrosion vis-à-vis metals.

The situation imposes solutions in this direction, on the one hand, eliminating all sources of pollution in such environment (endorheic & permeable), on the other hand, a desalination membrane process, applying the principle of reverse osmosis.

Keywords : pollution indices, biodegradability, Eutrophication, hyper-arid, calco-carbonic indices, corrosive indices.

Sommaire

<u>Sommaire</u>	vi
<u>Liste des figures</u>	xiv
<u>Liste des tableaux</u>	xxii
<u>Liste des photos</u>	xxiii

<u>Introduction</u>	01
----------------------------------	----

Chapitre I : Contexte général

1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE	03
2. EVOLUTION DE L'AGGLOMÉRATION DANS UN ECOSYSTÈME FRAGILE...	04
2.1- Le glacis de Bamendil	05
2.2- La zone centrale de la cuvette	05
2.3- La zone orientale	05
2.4- Constat sur la construction á Ouargla	05
3. EVOLUTION DE LA POPULATION	06
3.1- Sédentarisation récente	06
3.2- Une évolution spectaculaire	06
4. URBANISATION	07
4.1- Processus d'évolution urbaine	07
4.1.1- La ville ksourienne	07
4.1.2- La ville coloniale: nouvelle perception de l'espace	07
4.1.3- La ville post indépendance: (Urbanisation rampante et croissance mal maîtrisée)	08
4.2- Une urbanisation sous contrainte et un cadre de vie manquant d'espaces verts	08
4.2.1- Remontée de l'eau de la nappe: un facteur négatif pour l'équilibre naturel et l'urbanisation	09
4.2.2- Effondrement de terrain. (Cas de BERKAOUI)	09
4.2.3- Offres foncière limitée et fortement concentrée dans la zone de Bamendil	10
5. LE CADRE SOCIO-ECONOMIQUE	11
5.1- La situation sociale	11
5.1.1- La santé	11
5.1.2- Le logement	11
5.2- L'activité agricole	12

5.3- L'activité économique	12
5.3.1- Le taux d'activité	12
5.3.2- Les grands secteurs d'activité	12
5.4- L'essentiel du potentiel énergétique du pays	12
5.5- Un potentiel en eau appréciable	13
6. LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT	13
6.1- Assainissement agricole	13
6.1.1- Délimitation de la palmeraie	13
6.1.2- Système du drainage de la palmeraie de la région d'Ouargla	13
6.1.3- Problèmes de la collecte des eaux de drainage	14
6.2- Assainissement urbain	14
6.2.1- Réseau d'assainissement	14
6.2.2- Diagnostic des installations d'assainissement urbain	15
❖ <u>Branchements au réseau d'égout</u>	15
❖ <u>Colmatage des collecteurs</u>	15
❖ <u>Analyse critique des pentes des collecteurs</u>	16
❖ <u>Nature des matériaux</u>	16
❖ <u>Etat des ouvrages en surface</u>	16
❖ <u>Stations de pompage</u>	17
❖ <u>Dispositifs de traitement</u>	17
❖ <u>Assainissement autonome</u>	17
❖ <u>Insuffisances organisationnelles</u>	17
6.3- Eaux de drainage	18
6.3.1- Historique des débits prélevés	18
6.3.2- Evaluation quantitative des eaux de drainage	18

Chapitre II : Cadre physique

1. LES GRANDES UNITES GEO-STRUCTURALES	20
1.1- Définition de la plate-forme saharienne	20
1.2- La cuvette du bas Sahara	20
2. LA GEOLOGIE REGIONAL	21
2.1- La sédimentation continentale post-hercynienne	21
2.2- La sédimentation laguno-marine du crétacé supérieur et de l'éocène	21
2.3- L'orogénèse atlasique et ses conséquences	23
2.4- La mise en place du tertiaire continental	23

2.5-	Les coupes stratigraphiques du bas Sahara	24
2.5.1.	<i>L'échelle stratigraphique de base</i>	24
2.5.2.	<i>Les classes lithologiques et les faciès</i>	25
3.	CADRE GÉOLOGIQUE LOCAL	25
3.1-	Introduction	25
3.2-	Litho-stratigraphie	26
3.2.1.	<i>Aptien</i>	26
3.2.2.	<i>Albien</i>	26
3.2.3.	<i>Vraconien</i>	27
3.2.4.	<i>Cénomaniens</i>	27
3.2.5.	<i>Turonien</i>	27
3.2.6.	<i>Sénonien lagunaire</i>	27
3.2.7.	<i>Sénonien et Eocène</i>	27
3.2.8.	<i>Mio-Pliocène</i>	27
3.2.9.	<i>Quaternaire</i>	29
4.	TECTONIQUE	30
5.	LA GÉOMORPHOLOGIE	31
5.1-	Hamada du Mio-Pliocène	31
5.2-	Glacis	31
5.3-	Sebkhas et chotts	31
6.	LA PÉDOLOGIE	33
6.1-	Les principaux types de sol dans le Sahara algérienne	33
6.1.1-	<i>Lithosols et régosols : des roches et des dunes</i>	33
6.1.2-	<i>Regs autochtones et allochtones : des plaines caillouteuses et sableuses</i>	34
6.1.3-	<i>Les sols peu évolués des dépressions alluviales non salées : les meilleures terres agricoles</i>	35
6.1.4-	<i>Les sols halomorphes : croûtes salées, chotts et sebkhas</i>	35
6.1.5-	<i>Les regs gypso-salin et les encroûtements anciens : bons pour le plâtre la chaux à bâtir</i>	35
6.1.6-	<i>Les solontchaks et les hypersolontchaks : du deb-deb aux salines exploitables</i>	35
6.2-	La région d'Ouargla	36
6.3-	Risque de salinisation	38
7.	L'OCCUPATION DU SOL DE LA RÉGION D'OUARGLA	39

Chapitre III : Les ressources hydriques

1. HYDRO-CLIMATOLOGIE	41
2. ETUDE DES ELEMENTS CLIMATIQUES	41
2.1- Les températures	41
2.1.1- <i>Les températures moyennes mensuelles</i>	42
2.1.2- <i>Les écarts et les extrêmes des températures</i>	42
2.2- Les précipitations	43
2.2.1. <i>Les précipitations moyennes mensuelles</i>	43
2.2.2. <i>Les précipitations moyennes annuelles</i>	44
2.3- L'humidité relative	44
2.4- La vitesse du vent	45
2.5- La durée d'insolation	45
2.6- Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN	46
2.7- Indice d'Aridité de DEMARTONNE	46
2.8- L'évapotranspiration	47
2.8.1. <i>Calcul de l'ETP</i>	48
2.8.2. <i>Calcul du bilan hydro-climatique</i>	49
2.9- CONCLUSION	49
3. HYDROGEOLOGIE	50
3.1- Nappe du continentale intercalaire (C. I.)	51
3.2- Nappe du complexe terminal (C.T.)	51
3.2.1- <i>Alimentation à partir de l'Atlas saharien</i>	51
3.2.2- <i>Alimentation par le plateau du Tademaït et Tinrhert</i>	52
3.2.3- <i>Alimentation par les monts du M'Zab</i>	52
3.3- Nappe superficielle (phréatique)	52
3.3.1- <i>Généralité sur la Nappe phréatique de la région d'Ouargla</i>	53
3.3.1.1- <i>Étude géophysique</i>	53
3.3.1.2- <i>Faciès Lithologique</i>	57
3.3.2- <i>Caractéristiques Hydrodynamique de la Nappe</i>	58
3.3.2.1. <i>Granulométrie</i>	58
3.3.2.2. <i>Porosité</i>	58
3.3.2.3. <i>Limites d'Atterberg</i>	58
3.3.2.4. <i>Perméabilité et Transmissivité</i>	58
3.3.2.5. <i>Coefficient d'emmagasinement</i>	59
3.3.3- <i>Piézométrie</i>	59

3.3.4- <i>Analyse du phénomène de remontée de la nappe phréatique</i>	61
3.3.4.1. <i>Avant 1956 (date du premier forage à l'Albien)</i>	61
3.3.4.2. <i>Après 1956</i>	61
3.3.4.3. <i>Etat en 1968:</i>	61
3.3.4.4. <i>Améliorations apportées par le réseau d'assainissement:</i>	63
3.3.4.5. <i>Travaux récents:</i>	63
3.3.5- <i>Bilan hydrique de la nappe superficielle:</i>	69
3.3.5.1. <i>Equation du bilan d'eau:</i>	69
3.3.5.2. <i>Estimation des termes du bilan d'eau</i>	70
3.3.5.3. <i>Résumé du bilan d'eau</i>	72
4. CONCLUSION:	72

Chapitre IV : Pollution minérale et organique des eaux

1. ECHANTILLONNAGE ET INVENTAIRE DES POINTS D'EAU	75
• Choix des sites expérimentaux	75
• Périodes de prélèvements	77
2. INVENTAIRE DES POINTS D'EAU	78
3. MATERIELS ET METHODES	80
3.1- Échantillonnage	80
3.2- Méthodes d'analyses	80
3.3- Méthodes de calculs	85
3.3.1- <i>Feuilles d'interprétation des données scientifiques avec le logiciel Excel.....</i>	85
3.3.2- <i>Application du tableur Excel en métrologie et microbiologie environnementale</i>	86
3.3.3- <i>EQUIL</i> :	86
3.3.4- <i>PreeqC</i> :	87
4. POLLUTION MINERALE	88
4.1- Résultats des mesures et des analyses chimiques de l'eau	88
4.1.1- <i>Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)</i>	88
a- <i>Température (T)</i> :	88
b- <i>Conductivité électrique</i> :	89
c- <i>Potentiel d'Hydrogène (pH)</i> :	89
d- <i>Potentiel d'oxydoréduction (Eh)</i> :	90
4.1.2- <i>Les éléments majeurs</i>	91

a- <u>Calcium (Ca²⁺)</u> :	91
b- <u>Magnésium (Mg²⁺)</u> :	91
c- <u>Sodium (Na⁺)</u> :	92
d- <u>Potassium (K⁺)</u> :	93
e- <u>Chlorure (Cl⁻)</u> :	93
f- <u>Sulfates (SO₄²⁻)</u> :	94
g- <u>Bicarbonates (HCO₃⁻)</u> :	94
4.2- Faciès chimiques des eaux	95
4.2.1- <i>Le diagramme de Piper</i>	95
4.2.2- <i>Evolution des faciès chimiques</i>	96
4.2.3- <i>Répartition des faciès chimiques</i>	96
4.2.4- <i>Classification des faciès chimiques</i>	97
4.3- L'influence climatique sur les eaux de la cuvette	99
4.3.1- <i>Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)</i>	99
a- <u>Température (T)</u> :	99
b- <u>Conductivité électrique</u> :	100
c- <u>Potentiel d'Hydrogène (pH)</u> :	100
d- <u>Potentiel d'oxydoréduction (Eh)</u> :	101
4.3.2- <i>Les éléments majeurs</i>	102
a- <u>Calcium (Ca²⁺)</u> :	102
b- <u>Magnésium (Mg²⁺)</u> :	102
c- <u>Sodium (Na⁺)</u> :	103
d- <u>Potassium (K⁺)</u> :	103
e- <u>Chlorure (Cl⁻)</u> :	104
f- <u>Sulfates (SO₄²⁻)</u> :	104
g- <u>Bicarbonates (HCO₃⁻)</u> :	105
4.4- Influence des eaux de surface sur les eaux souterraines	105
4.4.1- <i>Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)</i>	105
a- <u>Température (T), Conductivité électrique (CE) et Potentiel d'Hydrogène (pH)</u> ...	105
4.4.2- <i>Les éléments majeurs</i>	106
a- <u>Chott Ain Baidha</u> :	106
b- <u>Canal Bamendil</u> :	107
c- <u>Station de relevage Chott</u> :	107
d- <u>Sebkhât Oum Raneb</u> :	108
4.5- L'influence de la profondeur sur les eaux de la cuvette	109
4.5.1- <i>Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)</i>	109

a- <u>Température (T)</u> :	109
b- <u>Conductivité électrique</u> :	110
c- <u>Potentiel d'Hydrogène (pH)</u> :	111
4.5.2- Les éléments majeurs	112
a- <u>Calcium (Ca²⁺)</u> :	112
b- <u>Magnésium (Mg²⁺)</u> :	113
c- <u>Sodium (Na⁺)</u> :	113
d- <u>Potassium (K⁺)</u> :	114
e- <u>Chlorure (Cl)</u>	115
f- <u>Sulfates (SO₄²⁻)</u> :	115
g- <u>Bicarbonates (HCO₃⁻)</u> :	116
4.6- L'influence lithologique sur les eaux	116
4.6.1- Les titres de l'eau	116
a- <u>Titre alcalimétrique complet (TAC)</u>	117
b- <u>Titre en Sels d'Acides Forts (SAF)</u>	118
c- <u>Titre hydrotimétrique total (TH)</u>	118
d- <u>Dureté permanente et temporaire</u>	119
4.6.2- La dissolution et la précipitation	120
a- <u>Les carbonates</u>	120
b- <u>Les sulfates</u>	120
c- <u>Les chlorures</u>	121
d- <u>Les phosphates</u>	121
e- <u>Les gazs</u>	122
4.6.3- Les échanges de bases	122
4.6.4- Les origines de la salinité	123
a- <u>Le calcium (Ca²⁺)</u>	123
b- <u>Les chlorures et sodium (Na-Cl)</u>	123
c- <u>Les chlorures et les nitrates (Cl⁻ & NO₃⁻)</u>	124
4.6.5- L'oxydo-réduction	124
a- <u>Domaine de l'eau</u>	124
b- <u>Formes de l'azote</u>	125
c- <u>Formes du soufre</u>	125
d- <u>Formes du carbone</u>	126
e- <u>Formes du chlore</u>	126
f- <u>Formes du phosphore</u>	127

5. POLLUTION ORGANIQUE	128
5.1- Les nutriments	128
5.1.1- <i>L'oxygène dissous (O_2)</i>	128
5.1.2- <i>les nitrates NO_3^-</i>	129
5.1.3- <i>les nitrites NO_2^- ou azote nitreux,</i>	130
5.1.4- <i>l'ammonium (NH_4^+)</i>	130
5.1.5- <i>Phosphate (PO_4^{3-})</i> :	131
5.2- L'influence climatique sur les eaux de la cuvette	132
5.2.1- <i>Oxygène dissous (O_2)</i> :	132
5.2.2- <i>les nitrates NO_3^-</i>	133
5.2.3- <i>les nitrites NO_2^-</i>	134
5.2.4- <i>Phosphate (PO_4^{3-})</i> :	134
5.3- Influence des eaux de surface sur les eaux souterraines	135
5.3.1- <i>Chott Ain Baidha</i> :	135
5.3.2- <i>Canal Bamendil</i> :	136
5.3.3- <i>Station de relevage Chott</i> :	136
5.3.4- <i>Sebkat Oum Raneb</i> :	137
5.4- Influence de la profondeur sur les eaux de la cuvette	137
5.4.1- <i>Oxygène dissous (O_2)</i> :	137
5.4.2- <i>les nitrates NO_3^-</i> :	138
5.4.3- <i>les nitrites NO_2^-</i> :	139
5.4.4- <i>l'ammonium (NH_4^+)</i> :	139
5.4.5- <i>Phosphate (PO_4^{3-})</i> :	140
5.5- Les indices de pollution de l'eau	141
5.5.1- <i>L'indice de la biodégradabilité (IB)</i> :	141
5.5.2- <i>L'indice de pollution organique (IPO)</i> :	141
5.5.3- <i>L'indice d'eutrophisation (IE) et comportement des nutriments minéraux</i>	143
a- <u>Nitrates – Ammonium</u>	143
b- <u>Nitrites - phosphates</u>	143
c- <u>L'indice d'eutrophisation (IE)</u>	144
5.5.4- <i>L'IQM « indice de qualité microbiologique »</i>	145
6. CONCLUSION	146

Chapitre V : Gestion qualitative des eaux

1. QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE (AEP)	148
1.1- Les éléments mesurés in-situ	149
1.2- Les anions	149
1.3- Les cations	150
1.4- Les nutriments	151
2. QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À L'IRRIGATION (AEA)	153
2.1- Les risques du Sodium Adsorption Ratio (SAR)	153
2.2- Relation entre le SAR et l'indice de salinité	154
2.3- Les risques de la salinité	155
2.4- Risque des bicarbonates	156
2.5- Les risques des ions phytotoxiques	156
3. QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À L'INDUSTRIE (AEI)	158
3.1- Indicateurs calco-carboniques :	158
3.1.1- <i>L'indice de Ryznar (indice de stabilité)</i>	158
3.1.2- <i>L'indice de Langelier (indice de saturation)</i>	159
3.1.3- <i>Indication du CCPP (calcium carbonate precipitation potential)</i>	160
3.2- Indicateurs de corrosivité	160
3.2.1- <i>L'indice de Larson (indice de corrosivité)</i>	160
3.2.2- <i>L'indice de Leroy (indice de corrosivité)</i>	161
3.3- Répartition spatiale de la tendance agressive ou entartrante des eaux	162
4. CONCLUSION	163
 Conclusion générale	 164

Références bibliographiques

Article

Liste des figures

<i>Fig. I-01: Situation Générale (Extrait de la carte Michelin N° 953).....</i>	03
<i>Fig. I-02: Carte de découpage administratif de la Wilaya d'Ouargla</i>	04
<i>Fig. I-04: évolution du tissu urbain</i>	08
<i>Fig. I-05: Disponibilités foncières</i>	10
<i>Fig. I-06: Carte Aptitude des sols a l'urbanisation</i>	11
<i>Fig. I-07: L'ensemble des points de rejets des eaux usées de la cuvette d'Ouargla</i>	16
<i>Fig. II.01: Les Oasis du Bas-Sahara</i>	20
<i>Fig. II.02 : Coupe schématique Nord-Sud du Bas-Sahara, en partie d'après A. Cornet.</i>	22
<i>Fig. II.03 : Relief géologique de la région d'Ouargla Superposition de la carte géologique de G. Busson au MNT</i>	26
<i>Fig. II.04 : Carte d'orientation des coupes géologiques</i>	28
<i>Fig. II.05 : Coupes géologiques de la cuvette d'Ouargla</i>	29
<i>Fig. II.06 : Coupe Structurale Transversale du Bas-Sahara</i>	30
<i>Fig. II.07 : Coupe schématique des formations superficielles de la cuvette d'Ouargla</i>	31
<i>Fig. II.08 : Image satellitaire, bandes 4, 2, 1 sur MNT (Les hauteurs sont fortement exagérées)</i>	32
<i>Fig. II.09 : Relief de la région d'Ouargla (Modèle numérique de terrain – MNT – obtenu par imagerie d'interférométrie radar satellitaire)</i>	32
<i>Fig. II.10 : Carte Pédologique Simplifiée du Sahara (D'après Dubos)</i>	37
<i>Fig. II.11 : Carte des risques de salinisation</i>	38
<i>Fig. II.12 : Carte d'occupation du sol</i>	40
<i>Fig. III-1: Carte des sous bassins versants du Sahara algérien et des stations Météorologiques d'après Cahiers de Sécheresse, No : 1/98 (Internet)</i>	41
<i>Fig. III-2: Les températures moyennes mensuelles</i>	42
<i>Fig. III-3: Les températures moyennes mensuelles</i>	42
<i>Fig. III-4: Les Isohyètes de la moyenne des précipitations annuelles du Sahara de l'Algérie D'après J. DUBIEF Le climat du Sahara 12; 1963</i>	43
<i>Fig. III.5: Les précipitations moyennes mensuelles</i>	43
<i>Fig. III-6: Les précipitations moyennes annuelles</i>	44
<i>Fig. III-7: Humidité moyennes mensuelles en % (1990 – 2005)</i>	44
<i>Fig. III-8: Moyen mensuelle des vitesses de vent</i>	45
<i>Fig. III-9: Insolation moyennes mensuelles</i>	45

<i>Fig. III-10: Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN de la région d'Ouargla</i>	46
<i>Fig. III-11: Les évaporations moyennes mensuelles</i>	47
<i>Fig. III-12: Le bilan hydro-climatologique de la région de Ouargla</i>	49
<i>Fig. III.13: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)</i>	50
<i>Fig. III.14 : Carte des ressources en eau souterraines (continental intercalaire et complexe terminal), extrait de recueil des communications, 2002</i>	52
<i>Fig.III.15: Plan de situation des SE</i>	54
<i>Fig. III.16a Profils de résistivité ENAGEO</i>	55
<i>Fig. III.16b Profils de résistivité ENAGEO</i>	56
<i>Fig. III.17: Log géologiques des formations de la nappe phréatique</i>	57
<i>Fig. III.18: Carte piézométrique de la nappe phréatique en novembre 2003</i>	60
<i>Fig. III.19: Coupe hydrogéologique passant par la ville d'Ouargla (en 1968)</i>	62
<i>Fig. III.20: Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril-mai 1968</i>	62
<i>Fig. III.21: Coupe hydrogéologique au travers de la palmeraie en 1968</i>	63
<i>Fig. III.22: Profondeur de la nappe phréatique sous le sol (en mètres)</i>	63
<i>Fig. III.23: Différence des niveaux piézométrique de la nappe entre avril 2002 et février 1992</i>	65
<i>Fig. III.24: Diagramme des différences de niveaux piézométriques entre octobre 2002 et novembre 2003</i>	66
<i>Fig. III.25: Variation des niveaux piézométriques (en mètres) entre avril 2002 et octobre 2001</i>	66
<i>Fig. III.26: Différence des niveaux piézométrique de la nappe phréatique entre avril 2002 et octobre 2001.....</i>	67
<i>Fig. III.27: Piézométrie à l'abord de la station de pompage Ouled Naceur –Hamdat</i>	68
<i>Fig. III.28: Zone d'Ouargla</i>	70
<i>Fig. III.29: Bilan d'eau de la zone d'Ouargla</i>	72
<i>Fig.IV-01 : Inventaire des points d'eau de la cuvette de Ouargla</i>	79
<i>Fig.IV-02 : Variation de la température au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	88
<i>Fig.IV-03 : Variation de la température au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)...</i>	88
<i>Fig.IV-04 : Variation de la conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	89
<i>Fig.IV-05 : Variation de la conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)...</i>	89
<i>Fig.IV-06 : Variation du pH au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	90
<i>Fig.IV-07 : Variation du pH au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	90
<i>Fig.IV-08 : Variation du Eh au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	90
<i>Fig.IV-09 : Variation du Eh au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	90

<i>Fig.IV-10 : Variation du Ca^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	91
<i>Fig.IV-11 : Variation du Ca^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	91
<i>Fig.IV-12 : Variation du Mg^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	92
<i>Fig.IV-13 : Variation du Mg^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	92
<i>Fig.IV-14 : Variation du Na^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	92
<i>Fig.IV-15 : Variation du Na^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	92
<i>Fig.IV-16 : Variation du K^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	93
<i>Fig.IV-17 : Variation du K^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	93
<i>Fig.IV-18 : Variation du Cl^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	94
<i>Fig.IV-19 : Variation du Cl^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	94
<i>Fig.IV-20 : Variation du SO_4^{2-} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	94
<i>Fig.IV-21 : Variation du SO_4^{2-} au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	94
<i>Fig.IV-22 : Variation du HCO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	95
<i>Fig.IV-23 : Variation du HCO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	95
<i>Fig.IV-24 : Diagramme de Piper (Février 2007)</i>	95
<i>Fig.IV-25 : Diagramme de Piper (Juin 2007)</i>	95
<i>Fig.IV-26 : Caractérisation du faciès chimique</i>	96
<i>Fig.IV-27 : Evolution temporaire de la température au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	100
<i>Fig.IV-28 : Evolution temporaire de la conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	100
<i>Fig.IV-29 : Evolution temporaire du pH au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	101
<i>Fig.IV-30 : Evolution temporaire du Eh au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	101
<i>Fig.IV-31 : Evolution temporaire du Ca^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	102
<i>Fig.IV-32 : Evolution temporaire du Mg^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	102
<i>Fig.IV-33 : Evolution temporaire du Na^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	103
<i>Fig.IV-34 : Evolution temporaire du K^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	103
<i>Fig.IV-35 : Evolution temporaire du Cl^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	104
<i>Fig.IV-36 : Evolution temporaire du SO_4^{2-} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	104
<i>Fig.IV-37 : Evolution temporaire du HCO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	105

<i>Fig.IV-38 : Evolution de la température, pH et conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>106</i>
<i>Fig.IV-39 : Evolution des concentrations au niveau du chott Ain Baïdha</i>	<i>106</i>
<i>Fig.IV-40 : Evolution des concentrations au niveau du canal Bamendil</i>	<i>107</i>
<i>Fig.IV-41 : Evolution des concentrations au niveau de la station de relevage Chott</i>	<i>108</i>
<i>Fig.IV-42 : Evolution des concentrations au niveau de sebkhat Oum Raneb</i>	<i>108</i>
<i>Fig.IV-43 : Evolution de la température en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Février et Juin 2007)</i>	<i>109</i>
<i>Fig.IV-44 : Evolution de la conductivité en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	<i>110</i>
<i>Fig.IV-45 : Evolution de la conductivité en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>111</i>
<i>Fig.IV-46 : Evolution du pH en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>111</i>
<i>Fig.IV-47 : Evolution du Eh en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>112</i>
<i>Fig.IV-48 : Evolution du Ca^{2+} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>112</i>
<i>Fig.IV-49 : Evolution du Mg^{2+} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>113</i>
<i>Fig.IV-50 : Evolution du Na^{+} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>114</i>
<i>Fig.IV-51 : Evolution du K^{+} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>114</i>
<i>Fig.IV-52 : Evolution du Cl^{-} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>115</i>
<i>Fig.IV-53 : Evolution du SO_4^{2-} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>115</i>
<i>Fig.IV-54 : Evolution du HCO_3^{-} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>116</i>
<i>Fig.IV-55 : La représentation graphique des différents titres de l'eau</i>	<i>116</i>
<i>Fig.IV-56 : Evolution des carbonates au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)..</i>	<i>117</i>
<i>Fig.IV-57 : Evolution des carbonates au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007).....</i>	<i>117</i>
<i>Fig.IV-58 : Evolution du TAC et du SAF au niveau de la cuvette de Ouargla</i>	<i>118</i>
<i>Fig.IV-59 : Evolution de la dureté au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	<i>118</i>
<i>Fig.IV-60 : Evolution de la dureté au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>118</i>
<i>Fig.IV-61 : Evolution du rapport entre la dureté non carbonatée et carbonatée</i>	<i>119</i>
<i>Fig.IV-62 : Indice de saturation des carbonates (Février 2007)</i>	<i>120</i>
<i>Fig.IV-63 : Indice de saturation des carbonates (Juin 2007)</i>	<i>120</i>
<i>Fig.IV-64 : Indice de saturation des sulfates (Février 2007)</i>	<i>120</i>

<i>Fig.IV-65 : Indice de saturation des sulfates (Juin 2007)</i>	120
<i>Fig.IV-66 : Indice de saturation des chlorures (Février 2007)</i>	121
<i>Fig.IV-67 : Indice de saturation des chlorures (Juin 2007)</i>	121
<i>Fig.IV-68 : Indice de saturation des phosphates (Février 2007)</i>	121
<i>Fig.IV-69 : Indice de saturation des phosphates (Juin 2007)</i>	121
<i>Fig.IV-70 : Indice de saturation des gazs dissous (Février 2007)</i>	122
<i>Fig.IV-71 : Indice de saturation des gazs dissous (Juin 2007)</i>	122
<i>Fig.IV-72 : Indice d'échanges de bases</i>	123
<i>Fig.IV-73 : Indice d'échanges de déséquilibres</i>	123
<i>Fig.IV-74 : Origine du calcium</i>	123
<i>Fig.IV-75 : Origine du chlorure et du sodium</i>	124
<i>Fig.IV-76 : Origine des nitrates et des chlorures</i>	124
<i>Fig.IV-77 : Diagramme Eh-pH du domaine de stabilité de l'eau</i>	125
<i>Fig.IV-78 : Diagramme Eh-pH des formes de l'azote</i>	125
<i>Fig.IV-79 : Diagramme Eh-pH des formes du soufre</i>	126
<i>Fig.IV-80 : Diagramme Eh-pH des formes du carbone</i>	126
<i>Fig.IV-81 : Diagramme Eh-pH des formes du chlore</i>	127
<i>Fig.IV-82 : Diagramme Eh-pH des formes du phosphore</i>	127
<i>Fig.IV-83 : Variation de l'O₂ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	128
<i>Fig.IV-84 : Variation de l'O₂ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	128
<i>Fig.IV-85 : Variation du NO₃⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	129
<i>Fig.IV-86 : Variation du NO₃⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	129
<i>Fig.IV-87 : Variation du NO₂⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	130
<i>Fig.IV-88 : Variation du NO₂⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	130
<i>Fig.IV-89 : Variation du NH₄⁺ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	131
<i>Fig. IV-90 : Cycle de l'azote</i>	131
<i>Fig.IV-91 : Variation du PO₄³⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	132
<i>Fig.IV-92 : Variation du PO₄³⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	132
<i>Fig.IV-93 : Evolution temporaire de l'O₂ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	133
<i>Fig.IV-94 : Evolution temporaire du NO₃⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	133
<i>Fig.IV-95 : Evolution temporaire du NO₂⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	134
<i>Fig.IV-96 : Evolution temporaire du PO₄³⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)</i>	135
<i>Fig.IV-97 : Evolution des concentrations au niveau du chott Ain Baidha</i>	135

<i>Fig.IV-98 : Evolution des concentrations au niveau du canal Bamendil</i>	<i>136</i>
<i>Fig.IV-99 : Evolution des concentrations au niveau de la station de relevage Chott.....</i>	<i>136</i>
<i>Fig.IV-100 : Evolution des concentrations au niveau de sebkhat Oum Raneb</i>	<i>137</i>
<i>Fig.IV-101 : Evolution de l'O₂ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>138</i>
<i>Fig.IV-102 : Evolution du NO₃⁻ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>138</i>
<i>Fig.IV-103 : Evolution du NO₂⁻ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>139</i>
<i>Fig.IV-104 : Variation du NH₄⁺ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>140</i>
<i>Fig.IV-105 : Evolution du PO₄³⁻ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)</i>	<i>140</i>
<i>Fig.IV-106 : Variation spatio-temporelle de l'indice de la biodégradabilité au niveau des points de rejets</i>	<i>141</i>
<i>Fig.IV-107 : la variation spatio-temporelle de l'indice de pollution organique au niveau des points de rejets et les piézomètres</i>	<i>142</i>
<i>Fig. IV-108 : Répartition spatiale de l'indice de pollution organique (Juin 2007)</i>	<i>142</i>
<i>Fig.IV-109 : la variation spatio-temporelle des NO₃ et NH₄ au niveau des points de rejets et les piézomètres</i>	<i>143</i>
<i>Fig.IV-110 : la variation spatio-temporelle des NO₂ et PO₄ au niveau des points de rejets et les piézomètres</i>	<i>144</i>
<i>Fig.IV-111 : la variation spatio-temporelle de l'indice d'eutrophisation au niveau des points de rejets et les piézomètres</i>	<i>144</i>
<i>Fig.IV-112 : Variation spatiale de l'indice de la qualité microbiologique au niveau des points de rejets et les piézomètres</i>	<i>145</i>
<i>Fig. V-01 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité, T°, pH et O₂ (Février 2007)</i>	<i>149</i>
<i>Fig. V-02 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité, T°, pH et O₂ (Juin 2007)</i>	<i>149</i>
<i>Fig. V-03 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions (Février 2007)</i>	<i>150</i>
<i>Fig. V-04 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions (Juin 2007)</i>	<i>150</i>
<i>Fig. V-05 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations (Février 2007)</i>	<i>151</i>
<i>Fig. V-06 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations (Juin 2007)</i>	<i>151</i>
<i>Fig. V-07 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments (Février 2007)</i>	<i>152</i>
<i>Fig. V-08 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments (Juin 2007)</i>	<i>152</i>
<i>Fig. V-09 : Risques du SAR (Février 2007)</i>	<i>154</i>
<i>Fig. V-10 : Risques du SAR (Juin 2007)</i>	<i>154</i>
<i>Fig. V-11 : Diagramme de Riverside (Février 2007)</i>	<i>155</i>
<i>Fig. V-12 : Diagramme de Riverside (Juin 2007)</i>	<i>155</i>

<i>Fig. V-13 : Risques de la salinité (Février 2007)</i>	155
<i>Fig. V-14 : Risques de la salinité (Juin 2007)</i>	155
<i>Fig. V-15 : Risques des bicarbonates (Février 2007)</i>	156
<i>Fig. V-16 : Risques des bicarbonates (Juin 2007)</i>	156
<i>Fig. V-17 : Risques des chlorures (Février 2007)</i>	157
<i>Fig. V-18 : Risques des chlorures (Juin 2007)</i>	157
<i>Fig. V-19 : Risques du Sodium (Février 2007)</i>	157
<i>Fig. V-20 : Risques du Sodium (Juin 2007)</i>	157
<i>Fig. V-21 : L'indice de stabilité de Ryznar (Février 2007)</i>	159
<i>Fig. V-22 : L'indice de stabilité de Ryznar (Juin 2007)</i>	159
<i>Fig. V-23 : L'indice de saturation de Langelier (Février 2007)</i>	159
<i>Fig. V-24 : L'indice de saturation de Langelier (Juin 2007)</i>	159
<i>Fig. V-25 : Indication du CCPP (Février 2007)</i>	160
<i>Fig. V-26 : Indication du CCPP (Juin 2007)</i>	160
<i>Fig. V-27 : L'indice de corrosivité de Larson (Février 2007)</i>	161
<i>Fig. V-28 : L'indice de corrosivité de Larson (Juin 2007)</i>	161
<i>Fig. V-29 : L'indice de corrosivité de Leroy (Février 2007)</i>	161
<i>Fig. V-30 : L'indice de corrosivité de Leroy (Juin 2007)</i>	161
<i>Fig. V-31 : Carte de la tendance agressive ou entartrante des eaux de la cuvette de Ouargla (Février 2007)</i>	162

Liste des tableaux

<i>Tableau I-01: Communes et localités de la cuvette d'Ouargla (fig.02)</i>	<i>04</i>
<i>Tableau I-02 : Evolution de la population d'Ouargla et son aire métropolitaine (1966 - 1998)</i>	<i>06</i>
<i>Tableau I-03: Indices démographiques (1966 – 1998)</i>	<i>06</i>
<i>Tableau I.04: Indices démographiques (1966 – 1998)</i>	<i>08</i>
<i>Tableau I-05 : Indicateurs de logement</i>	<i>11</i>
<i>Tableau I-06 : Secteurs d'activité</i>	<i>12</i>
<i>Tableau I-07 : La répartition des longueurs des collecteurs par diamètre et matériau (Bonnard & Gardel, 2001)</i>	<i>15</i>
<i>Tableau I-08 : Débits de drainage, estimé, par secteur dans la palmeraie d'Ouargla</i>	<i>19</i>
<i>Tableau II-01 : Classes retenues pour la description des faciès géologiques</i>	<i>25</i>
<i>Tableau II-02 : Définition des classes de l'image d'occupation du sol</i>	<i>39</i>
<i>Tableau II-03 : Surfaces occupées par les classes d'occupation du sol 7, 8, 11, 15-19</i>	<i>40</i>
<i>Tableau III-01 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE</i>	<i>46</i>
<i>Tableau III-02 : Indice d'Aridité de DEMARTONE</i>	<i>47</i>
<i>Tableau III-03 : ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHWAITE a la station d'Ouargla (1988-2005)</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III-04 : ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHWAITE a la station d'Ouargla (1988-2005)</i>	<i>49</i>
<i>Tableau III-08 : Bilan d'eau de la zone d'Ouargla</i>	<i>72</i>
<i>Tableau IV.01 : La classification de la pollution organique</i>	<i>85</i>
<i>Tableau IV.02 : La qualité de l'eau en fonction du pH, de la conductivité et les MES</i>	<i>86</i>
<i>Tableau IV-03 : Répartition des faciès chimiques des eaux selon les périodes</i>	<i>97</i>
<i>Tableau IV-04 : Classification selon la concentration en chlorures.....</i>	<i>98</i>
<i>Tableau IV-05 : Classification selon la concentration en sulfates.....</i>	<i>99</i>
<i>Tableau IV-06 : Classification des titres alcalimétriques.....</i>	<i>117</i>
<i>Tableau V-01 : Normes européennes de potabilité des eaux CEE (1975)</i>	<i>148</i>
<i>Tableau V-02 : Le risque du SAR dans l'eau d'irrigation</i>	<i>153</i>
<i>Tableau V-03 : SAR/Risque de salinité pour l'eau d'irrigation</i>	<i>154</i>
<i>Tableau V-04 : Relation entre l'indice de stabilité et la tendance de l'eau</i>	<i>159</i>
<i>Tableau V-05 : Relation entre l'indice de corrosivité et la tendance de l'eau</i>	<i>161</i>

Liste des photos

<i>Photos IV-01 : Piézomètres au niveau de la ville de Ouargla.....</i>	75
<i>Photos IV-02 : Drains au niveau des la palmeraies.....</i>	75
<i>Photos IV-03 : Drains au niveau de Sebkhath Bamendil.....</i>	76
<i>Photos IV-04 : La station de relevage du Chott.....</i>	76
<i>Photos IV-05 : Chott Ain Baidha pendant la période hivernale.....</i>	76
<i>Photos IV-06 : Chott Ain Baidha pendant la période estivale.....</i>	77
<i>Photos IV-07 : Les affleurements du Mio-pliocène.....</i>	77
<i>Photo IV-08 : pH-mV-T°-mètre de terrain HI 9025.....</i>	80
<i>Photo IV-09 : pH-mètre de laboratoire BASIC 20.....</i>	80
<i>Photo IV-10 : Conductivimètre CD 4301.....</i>	81
<i>Photo IV-11 : Oxymètre type WTW de terrain.....</i>	82
<i>Photo IV-12 : Matériel de mesure par titrimétrie.....</i>	82
<i>Photo IV-13 : Photomètre de flamme Modèle IC9200.....</i>	82
<i>Photo IV-14 : Spectrophotomètre DR 2000 (HACH)</i>	83
<i>Photos V-01 : Les canalisations sont rétrécies par entartrage.....</i>	158
<i>Photos V-02 : Les canalisations sont détruits par corrosion.....</i>	160

Introduction

INTRODUCTION

La pollution affecte aussi bien les pays industrialisés que ceux en voie de développement. Le problème est particulièrement grave pour les pays dont le climat est aride. En raison d'un déficit hydrique prononcé, la concentration des polluants dans l'eau demeure élevée alors que leur capacité de recyclage est très faible.

Dans le cas de la cuvette d'Ouargla, la pollution engendrée par le rejet des eaux a atteint un seuil inquiétant en raison de la diversité des matières polluantes et de la quantité importante en eau usées (40906 m³/j pour l'année 2005). La nappe superficielle, est exploitée par des puits à des fins agricoles et domestiques, traversée par un canal collecteur à ciel ouvert, la pollution altère la qualité et limite ses utilisations.

C'est ainsi que nous faisons état de la contamination de la nappe superficielle par les rejets urbains anarchiques. Le principal facteur influent cette situation est la topographie : La dénivelée totale est de 9 m seulement, entre le point le plus haut (Ksar) et le point le plus bas (chott), pour un site qui s'étend dans ses grandes dimensions de 5 km d'Est en Ouest et de 8 km du Nord au Sud. Cette contrainte naturelle a obligé que la réalisation des collecteurs, qui pour couler gravitairement, doivent avoir de la pente et donc progresser en profondeur. Deux chiffres résumant l'ampleur des anomalies sur le réseau principal : 15 % des tronçons coulent à contre pente et 55 % ont une pente inférieure à 5 ‰. L'infiltration directe et sans aucun traitement des eaux, fortement minéralisées (urbaines et agricoles) ; en provenance des nappes profondes, du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI), à travers les sables argilo-gypseuses du Quaternaire en surface, gagnent la nappe superficielle de la Cuvette, et participent ainsi, à une remontée spectaculaire de son niveau piézométrique, dans une région, où, la topographie est plane sans exutoire (bassin endoréique).

Pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons développés les chapitres suivants :

Le premier chapitre - *Contexte général* : est consacré à la description de la cuvette de Ouargla (situation géographique, population, urbanisme, étude socio-économique ...).

Le deuxième chapitre - *Cadre physique* : bien que sous sa forme originale, l'analyse des caractéristiques physiques (forme, relief et couverture végétale), en effet l'hétérogénéité lithologique élevée, ne constituent donc qu'une première étape d'interprétation qui reste encore très difficile dans la connaissance des phénomènes hydrologiques et hydrogéologiques.

Une place plus importante est dévolue cependant aux caractéristiques des terrains constitutifs et à la nature lithologique du remplissage quaternaire de la cuvette.

Le troisième chapitre - *Ressources hydriques* : comprend pour sa part un commentaire succinct des principaux paramètres hydroclimatologique avec une estimation des paramètres essentiels du bilan, et des aperçus hydrologique et hydrogéologique pour pouvoir faire la liaison entre la ressource hydrique et la nature lithologique des aquifères.

Le quatrième chapitre - *Pollution minérale et organique* : est la principale partie dans ce travail qui est surtout consacrée pour déterminer les faciès chimiques suivant la nature lithologique des aquifères, ainsi que la relation entre les eaux usées et les eaux souterraines. Afin d'arriver à localiser les régions de fortes concentrations des polluants naturels et/ou anthropiques et l'origine de la pollution des eaux de la nappe superficielle.

Nous avons traité les données physico-chimiques et organiques en s'appuyant sur des logiciels, des diagrammes d'évolution des paramètres en fonction de la température, de la profondeur (zone non-saturée) et de la lithologie (facies géologique...).

La méthode utilisée est la détermination des différents facteurs influençant ces eaux, qui sont : l'influence climatique (température), l'influence des eaux de surface (eaux usées, irrigation ...), l'influence de la profondeur (importance de la zone non saturée) et l'influence lithologique (géologie et le temps de séjours).

Le cinquième chapitre – *Gestion qualitative des eaux* : est surtout consacrée pour déterminer la qualité des eaux de la nappe superficielle selon leurs utilisations (eau destinée à la consommation humaine, eau destinée à l'irrigation et eau destinée à l'industrie).

Nous terminons le travail par une conclusion générale et une riche bibliographie s'accordant au thème.

Chapitre I :
Contexte général

Chapitre I

Contexte général

1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

La région d'Ouargla est située au Nord-est du Grand Sahara algérien; elle est distante de 850 Km de la capitale Alger (*Fig. I-01*).

La grande cuvette d'Ouargla s'étend sur une superficie de 99 000 Hectare ; avec une longueur de 45 km dans la direction Sud-ouest, Nord-est et une largeur de 2 à 5 km. 32° de l'attitude Nord et 5° 20' de longitude Ouest.

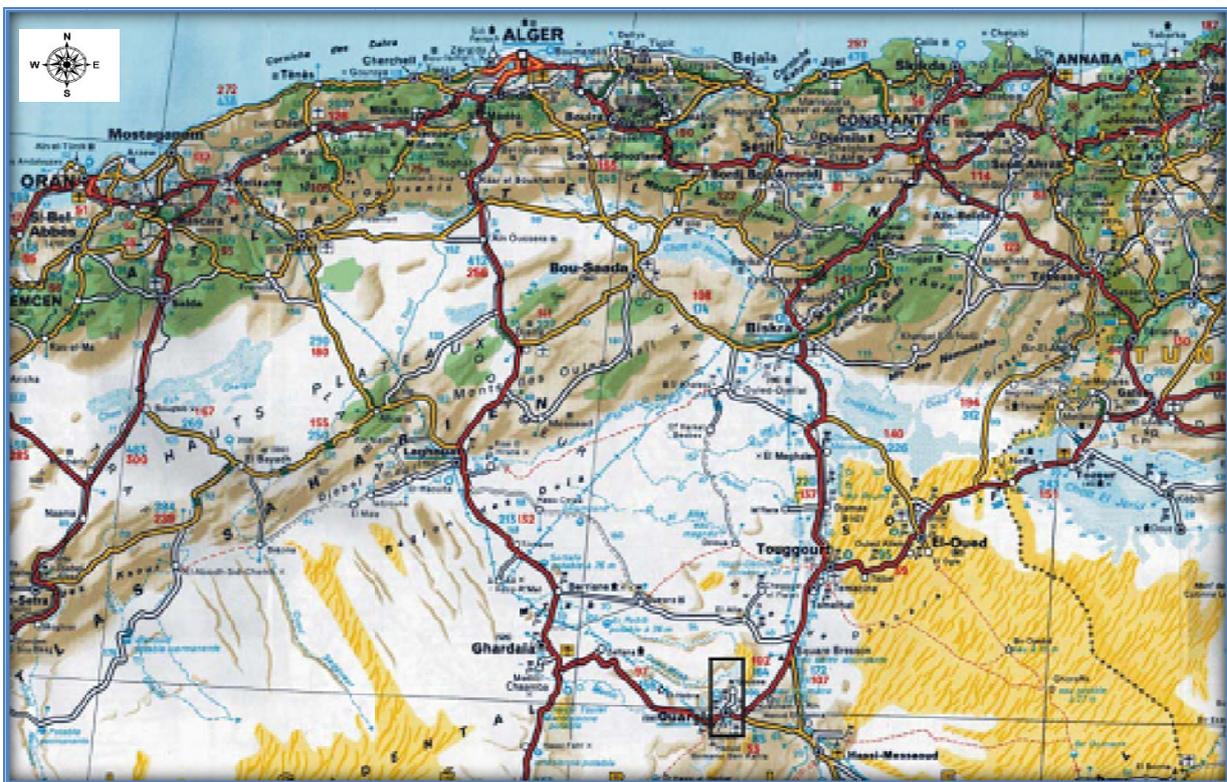


Fig. I-01: Situation Générale (Extrait de la carte Michelin N° 953)

Géographiquement ; la cuvette d'Ouargla est repérée par les coordonnées (UTM, Clarke 1880) suivantes:

$$X_{\min} = 710\ 000 ; \quad Y_{\min} = 3\ 530\ 000 \text{ et}$$

$$X_{\max} = 730\ 000 ; \quad Y_{\max} = 3\ 600\ 000$$

Elle est limitée au Nord par les wilayas de Djelfa et d'El Oued au Sud par les Wilayas d'Illizi et Tamanrasset à l'Ouest par les wilayas de Ghardaïa et à l'Est par la Tunisie (*Fig.I-02*).

En 2004; la population est estimée à 415 000 Habitants, répartie à travers 21 Communes.

Tableau I-01: Communes et localités de la cuvette d'Ouargla (Fig.I-02)

Communes	Localités
Ouargla	Hassi-Miloud, Said-Otba, Bamendil, Makhadma, Bour El-Haicha Centre Ksar, Beni Thour et la zone industrielle
N'Goussa	Larbaa, Boughoufala, El-Bour, El-Koum et Ghers
Rouissat	Rouissat, El-Hadeb et SoKra
Ain El-Baïdha	Ain El-Baida, et chott adjadja
Sidi Khouiled	Oum Raneb, et Aouinet Moussa
Hassi Ben Abdallah	La zone saharienne agriculture

Source: D.P.

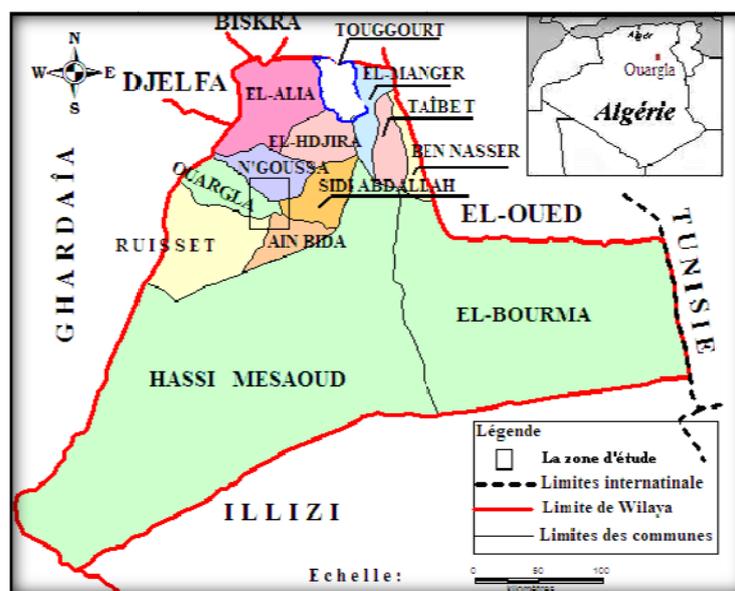


Fig. I-02: Carte de découpage administratif de la Wilaya d'Ouargla

La région d'Ouargla se trouve encaissée au fond d'une cuvette très large de la basse vallée de l'Oued M'ya. Cette dernière est caractérisée par une dissymétrie marquée par la présence d'une falaise occidentale particulièrement nette et continue, tandis que la limite orientale est imprécise.

* A l'Ouest: Un plateau calcaire surplombe la cuvette d'Ouargla à environ 230m d'Altitude en confluence avec Oued Mzab et Oued N'sa.

* A l'Est: On constate un plateau, dont les limites ne sont pas nettes, avec une altitude ne dépassant pas 160 m. les rebords de ce plateau disparaissent souvent sous les sables (Erg Touil, Erg Boukhezana, Erg Arifdji).

* Au Sud: un massif dunaire recouvre les ruines de Sedrata, son altitude dépasse 155 m.

* Au Nord: Zabret Bouaroua constitue au même temps la limite supérieure de Sebket Safioune et de la grande cuvette d'Ouargla. [32]

2. EVOLUTION DE L'AGGLOMÉRATION DANS UN ECOSYSTÈME FRAGILE

L'agglomération d'Ouargla est située dans la partie Nord-est du vaste domaine aride saharien. Son emplacement se rapporte à une zone de dépression « La cuvette d'Ouargla », orientée sensiblement au Sud-ouest – Nord-est, et correspondant au lit quaternaire d'Oued M'ya, ancien fleuve. [04]

Le territoire occupé par Ouargla et son aire métropolitaine est composé de 3 zones distinctes dont les caractéristiques sont représentées comme suit:

2.1- Le glacis de Bamendil

D'orientation sensiblement Sud-ouest – Nord-est, le glacis de Bamendil correspond au versant Ouest de la cuvette d'Ouargla qui s'étale en pente modérée depuis la bordure Ouest du chott (à la côte de 134m) jusqu'à la base des falaises du plateau (à 180m d'altitude).

Le glacis de Bamendil est constitué par des terrains gréseux, localement recouverts de sable et de gravier. De par sa position en retrait par rapport à la zone de fluctuation du niveau de la nappe phréatique (entre 135,08m en ville et 127,95m entre le chott et la Sebkhha), le glacis de Bamendil offre à priori des conditions favorables pour une extension de l'agglomération d'Ouargla.

2.2- La zone centrale de la cuvette

Elle est représentée par le bas fond limoneux et sableux du lit quaternaire de Oued M'ya, dont la pente faible (1% environ) est à l'origine de la formation d'un chapelet de Sebkhhas (*Ouargla, Oum Raneb, N'goussa, Safioune...*) qui alternent avec des accumulations de sables dunaires.

La carte topographique d'Ouargla (échelle 1/100.000e) montre que l'altitude atteinte 147 m pour descendre à 102 m a distance de 45 Kms dans la Sebkhhet Safioune où est prévue l'évacuation des rejets d'eaux de la ville d'Ouargla (*fig.03*).

Cet espace qui regroupe Ouargla, son aire métropolitaine et sa palmeraie, résume, à lui seul, toute la problématique de développement dans la cuvette du fait de la menace constituée par les remontées des eaux de la nappe phréatique sur l'agglomération d'Ouargla et la palmeraie.

2.3- La zone orientale

Sa limite Ouest avec la zone centrale, assez imprécise, est marquée par une ligne de falaises discontinues et de buttes, passe à l'Est de *Rouissat* et se prolonge vers le Nord-est en passant à l'Est de *Ain Baïdha*.

Cette ligne correspond en gros à la courbe de niveau 150m (cartes topographiques d'Ouargla et *Sidi Khouiled*).

Cette zone semble également présenter des conditions assez favorables pour l'extension de l'agglomération d'Ouargla.

2.4- Constat sur la construction à Ouargla

La vieille ville d'Ouargla comme toutes les villes sahariennes, est un ksar. Il s'agit d'une petite agglomération implantée sur la zone centrale de la cuvette. Elle est entourée par un mur délimitant la ville et assurant la sécurité du vieux ksar.

Au premier temps, la construction était traditionnelle et simple, il s'agit des constructions fondées sur des semelles superficielles sommaires. Les matériaux utilisés sont locaux, il s'agit des pierres apportées des bancs de calcaires. Le ciment correspond à la chaux préparée dans les fours traditionnels. Les troncs des palmiers sont utilisés comme poutrelles pour les planchés.

Dans la vallée, les constructions sont plus simples, les pierres utilisées dans les constructions de Ksar sont remplacées par un mélange d'argile limoneuse rougeâtre et de pailles de blé ou d'orge, qui sont cuites par la chaleur du soleil ayant les formes ressemblantes aux briques (*tobe*). Les clôtures des jardins sont marquées par ce type de matériau.

Actuellement, avec l'arrivée du béton, l'occupation du sol devient de plus en plus importante. Elle s'élargit dans la vallée d'Ouargla. Elles sont de type RDC à R+4 au maximum. Le choix de l'implantation est privilégié dans la plupart de la wilaya d'Ouargla.

Généralement, les valeurs des températures diurnes sont très élevées contrairement aux valeurs nocturnes qui sont faibles. Ceci produit un important écart thermique influant sur la désagrégation des roches.

3. EVOLUTION DE LA POPULATION:

La population d'Ouargla, d'origine nomade, s'est sédentarisée particulièrement depuis la découverte du pétrole dans la région, et la mise en œuvre du programme spécial dans l'ex-wilaya des oasis qui s'est traduit par la réalisation d'un programme d'habitat et d'équipement; mais son évolution est liée à la période post indépendance, au cours de laquelle ses effectifs ont sensiblement évolué dans les différents recensements. [24]

3.1- Sédentarisation récente

La sédentarisation de la population s'est faite, au début, à l'intérieur du Ksar d'Ouargla dont la taille de population avait atteint 8 300 habitants en 1962. Par la suite, la population s'est fixée dans d'autres quartiers de la ville, contribuant ainsi à l'évolution de sa population et à l'extension de sa configuration urbaine.

3.2- Une évolution spectaculaire

Outre sa sédentarisation récente, la population d'Ouargla et son aire métropolitaine a connu une évolution fulgurante au lendemain de l'indépendance, mais selon une croissance démographique différenciée.

Tableau I-02 : Evolution de la population d'Ouargla et son aire métropolitaine (1966 - 1998)

Communes	1966	1977	1987	1998	Apport démographique (1966-1998)
Ouargla	18 960	47 800	75 273	112 339	93 379
<i>Ain Baïdha</i>	1 701	7 100	9 684	14 500	12 799
<i>Rouissat</i>	2 615	9 400	31 814	28 414	25 799
<i>Ouargla et aire métropolitaine</i>	23 266	64 300	104 367	164 653	141 387
<i>wilaya</i>	121 391	197 300	284 454	445 619	324 228

Source: ANAT

La population d'Ouargla et son aire métropolitaine a évolué de 23 266 habitants en 1966 à 164 653 en 1998, ce qui représente un apport démographique de 141 387 dont plus de 60% est observé dans l'agglomération d'Ouargla.

C'est une évolution importante mais qui s'est faite d'une manière contrastée comme l'indique le tableau ci-après.

Tableau I-03: Indices démographiques (1966 – 1998)

Communes	1966 - 1977	1977 - 1987	1987 - 1998	1966 - 1998
Ouargla	8.9	4.65	3.62	5.7
<i>Ain Baïdha</i>	12.5	7.52	6.10	7.7
<i>Rouissat</i>	14.1	3.15	3.65	6.9
<i>Ouargla et aire métropolitaine</i>	9.8	4.46	4.35	6.1
<i>wilaya</i>	4.5	3.73	4.05	4.1

Source: A.N.A.T

Ce tableau met en évidence l'évolution différenciée qu'a connue Ouargla et son aire métropolitaine dans les différents recensements.

Après avoir connu des taux d'accroissement élevés durant la période 1966 - 1977, et à partir de la période 1977 - 1987, une baisse sensible de son indice d'accroissement mais qui demeure toutefois supérieur à la moyenne nationale et celle de la wilaya.

Ouargla et son aire métropolitaine a connu un taux d'accroissement de 8.9% entre 1966 et 1977, pour chuter à 4,35% durant la période 1987-1998.

Il s'agit d'une baisse sensible, mais l'indice démographique actuel demeure important, avec la saturation des capacités d'accueil de la wilaya.

4. URBANISATION

Comme indiqué précédemment, la population d'Ouargla et son aire métropolitaine a fortement évolué depuis 1966 à l'heure actuelle, au point où cette agglomération oasienne est devenue l'un des principaux centres urbains du pays, du point de vue de sa taille de population. [03]

Il va sans dire que cette évolution spectaculaire de la population a entraîné l'extension du tissu urbain et le développement de nouveaux quartiers.

4.1- Processus d'évolution urbaine

L'agglomération d'Ouargla, de création ancienne et d'évolution récente, a connu dans le cadre de son développement trois étapes majeures:

4.1.1- La ville ksourienne

La première phase de l'évolution du tissu urbain est liée à la création du Ksar au Xème siècle sur une superficie de 30 ha.

Sa réalisation obéit à des impératifs sécuritaires et abritait à l'époque une population de 1000 personnes et 600 constructions dont le nombre a évolué progressivement pour atteindre actuellement 2 472 habitations et une population de 8 500 habitants.

Le Ksar d'Ouargla est le noyau urbain de la ville et l'un de ses principaux repères urbains malgré le fait qu'il occupe un espace modeste par rapport à l'agglomération, mais a connu une dégradation avancée par manque d'entretien.

4.1.2- La ville coloniale: nouvelle perception de l'espace

La deuxième phase du processus d'évolution de l'agglomération correspond à la période coloniale, au cours de laquelle la ville s'est étendue au Sud du Ksar sur une superficie de 200 ha.

Outre la réalisation du Bordj de Béni Thour (Bordj-Ghandez), la colonisation a édifié à partir de 1930, un quartier de villas indépendantes parfois groupées par deux et dont la localisation n'obéit pas forcément à une orientation préférentielle.

Cette période s'est également caractérisée par la création d'une zone militaire sur une superficie de 55 ha et d'une zone industrielle sur une superficie de 60 ha dont une grande partie est séparée par la route Ghardaïa - Touggourt.

Le tissu colonial se limitait aux habitations qui ont été construites de part et d'autre de l'avenue et abritaient une population qui ne dépassait pas 1600 personnes. En plus de ce quartier, ce tissu comprenait des équipements tels que l'hôpital militaire, des bâtiments administratifs et des services de l'office commun des régions sahariennes (O.C.R.S).

4.1.3- La ville post indépendance: (Urbanisation rampante et croissance mal maîtrisée)

La troisième étape du processus d'urbanisation qu'a connu l'agglomération correspond à la période de l'indépendance au cours de laquelle l'agglomération a connu un développement rapide mais anarchique.

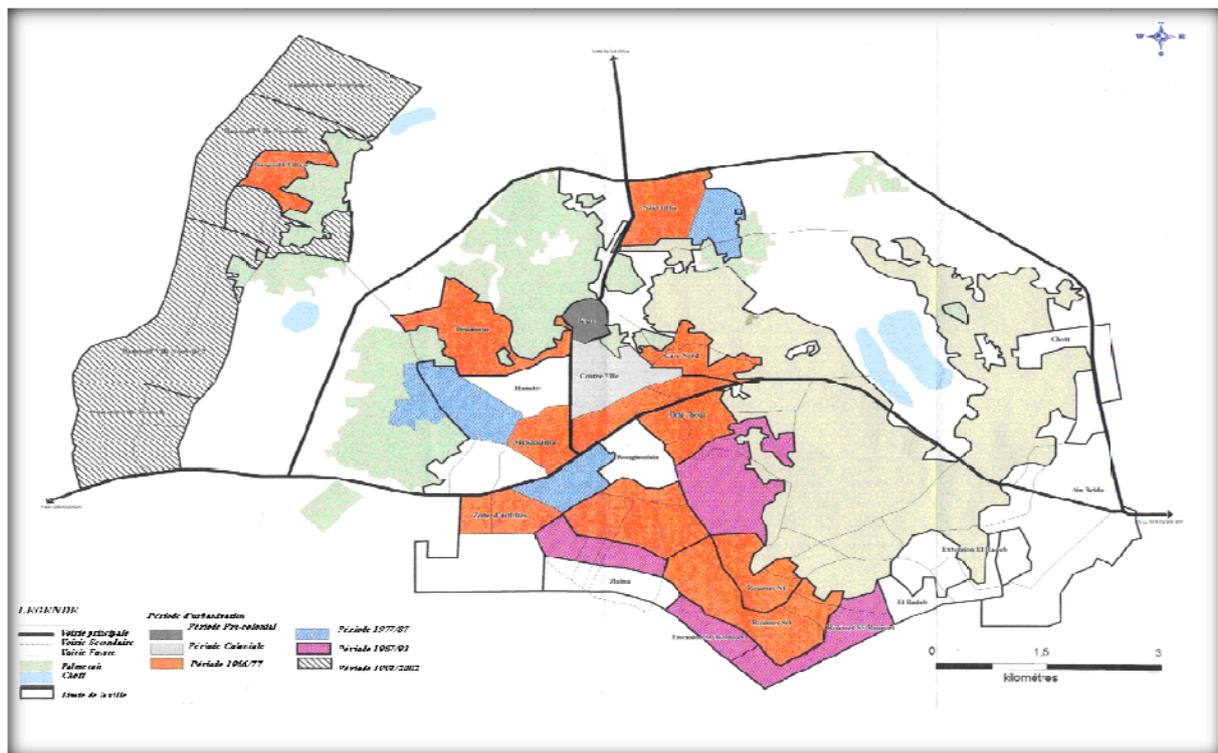
❖ **Une forte croissance urbaine**

Tableau I-04: Indices démographiques (1966 – 1998)

Catégories	1966 - 1977	1977 - 1987	1987 - 1998	1966 - 1998
Ouargla	7.88	5.65	4.85	6.13
Wilaya	7.51	5.15	6.10	6.31

Source: A.U.N.

L'agglomération d’Ouargla a connu une croissance urbaine comprise entre 4.85% et 7.88%. L'indice urbaine le plus élevé a été enregistré entre 1966/1977, période au cours de laquelle elle était le chef lieu de l'ex-wilaya des oasis qui a bénéficié en 1966 d'un programme spécial dont une grande partie des investissements était destinée à la réalisation de programmes de logements et d'équipements dans l'agglomération d’Ouargla.



Source: PDAU du groupement d’Ouargla et Enquête de terrain

Fig. I-03: évolution du tissu urbain

4.2- Une urbanisation sous contrainte et un cadre de vie manquant d'espaces verts

L'urbanisation dans la zone d’Ouargla est contrariée par l'étendue de la zone non édifiante (Sebkha, palmeraies, cimetières, casernes militaires) et par des problèmes liés à la remontée de l'eau de la nappe, au phénomène Berkaoui (effondrement de terrain) et par les limites des disponibilités foncières.

4.2.1- Remontée de l'eau de la nappe: un facteur négatif pour l'équilibre naturel et l'urbanisation

L'un des problèmes qui constitue une menace sérieuse pour l'environnement et pour le développement de l'agglomération est incontestablement *la remontée de l'eau de la nappe phréatique*.

Cette remontée est le résultat de *la mauvaise gestion de l'eau potable et d'irrigation* dans un système hydraulique dépourvu d'un réseau d'évacuation efficace, des eaux résiduelles d'une part, et de l'inexistence d'un exutoire naturel permettant l'évacuation des eaux, d'autre part.

La remontée des eaux de la nappe phréatique d'Ouargla est due à l'infiltration des eaux de drainage de la palmeraie, à la défektivité du réseau d'assainissement et à l'inefficacité du réseau de distribution de la ville. La carte piézométrique établie en octobre 2002 montre que les parties hautes des eaux de la nappe sont situées au Sud et sous la ville d'Ouargla à la cote 134m N.G.A comprenant un point, piézométrique maximal, cote à 136,08m N.G.A. Les parties basses sont situées au Nord dans la *Sebkhet Safioune*.

La remontée de l'eau est un phénomène qui concerne pratiquement toute l'agglomération et dont l'ampleur est plus conséquente en période hivernale du fait que la nappe atteint un niveau de remontée maximum.

En période estivale, par contre, la nappe connaît une baisse sensible de son niveau (baisse de 60 cm) en raison de l'intensité de l'évapotranspiration.

La topographie de la cuvette a nécessité la mise en place d'un système d'assainissement équipé de 22 stations de relevage et de refoulement.

L'évacuation des effluents se fait à partir de collecteurs qui débouchent dans sebkhet Oum-Raneb d'une superficie de 800 ha et qui connaît actuellement un état de saturation inquiétant.

La sur-utilisation de la ressource en eau, A.E.P et en irrigation a induit une remontée du niveau de la nappe phréatique constituée par des sables très perméables et qui se localisent principalement dans la cuvette. Cette situation a été aggravée par la pollution des eaux de cette nappe due aux infiltrations d'un réseau d'assainissement mal conçu et des puits perdus (assainissement autonome) dans les zones non raccordées.

La remontée de l'eau est un phénomène naturel néfaste qui se traduit par:

- ↪ La menace permanente sur l'écosystème;
- ↪ la perte de l'équilibre naturel, et l'asphyxie de la palmeraie;
- ↪ La persistance des maladies à transmission hydrique;
- ↪ Le surcoût dans la réalisation des infrastructures et des constructions, compte tenu de la fragilité des sols. (utilisation du ciment résistant au sulfate « CRS »).

4.2.2- Effondrement de terrain. (Cas de BERKAOU)

Les éléments du milieu physique de la région ont permis de relever une singularité due à la fragilité des couches géologiques constituant son sous-sol. Cette instabilité géotechnique s'est aggravée ces dernières années par la réalisation de forages pétroliers qui se sont avérés improductifs. L'abandon et la reconversion de ces forages pétroliers improductifs en forages d'irrigation sans aucune mesure de sécurité ne cessent de provoquer des dégâts qui risquent à se transformer en catastrophe écologique à grande échelle. Le phénomène dit Berkaoui a été provoqué par la détérioration au niveau des formations géologiques salifère du Sénonien, les eaux de l'albien ont alors lessivé dans leur remontée la formation du Sénonien créant ainsi un vide estimé entre 450 à 620 mètres de profondeur sous forme d'un cratère de 325m de diamètre.

Toutefois, des mesures ont été prises pour boucher ces forages mais le phénomène n'est pas totalement maîtrisé, il constitue, de ce fait, une menace permanente pour les agglomérations de la région en général et pour celle d'Ouargla en particulier.

Actuellement, il semble que ce phénomène a connu une certaine stabilisation suite aux travaux menés pour la Sonatrach avec un partenaire étranger.

Pour connaître l'aptitude des sols à l'urbanisation, nous avons établi la carte d'aptitude des sols à l'urbanisation (Fig.I-03) à partir de données recueillies auprès du laboratoire des travaux publics Sud (L.T.P.S).

4.2.3- Offres foncière limitée et fortement concentrée dans la zone de Bamendil

Le développement tout azimut qu'a connu l'agglomération d'Ouargla et de son aire métropolitaine s'est traduit par la consommation d'une grande partie des possibilités foncières.

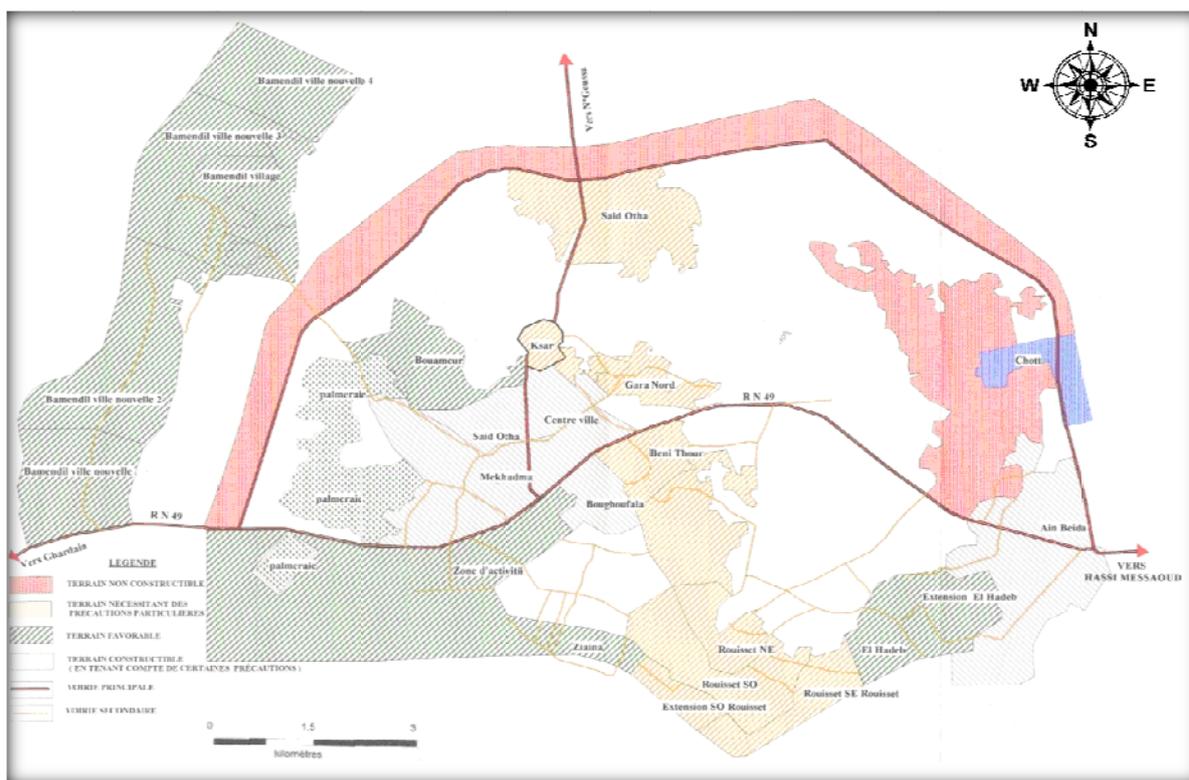
A l'intérieur de l'agglomération, il est difficile de trouver un espace vierge et mobilisable, situation qui fait que l'extension de l'agglomération se fait dans sa direction Ouest, zone prévue par le P.D.A.U pour la réalisation d'un programme d'équipements.

Il s'agit d'une zone qui dispose d'un patrimoine foncier dont la localisation est indiquée dans la Figure I-04.



Source: PDAU du groupement d'Ouargla Rouissat (1997), et DUC

Fig. I-04: Disponibilités foncières



Source: L. T. P. S.

Fig. I-05: Carte Aptitude des sols a l'urbanisation

5. LE CADRE SOCIO-ECONOMIQUE

5.1- La situation sociale

5.1.1- La santé

Avec 5 médecins pour 10 000 habitants la population de la région (1998) est plutôt bien pourvue, mais là encore les dentistes (34 au total) et les pharmaciens (16) sont en nombre très insuffisants. Il existe 2 hôpitaux dont un à Hassi Messaoud et un à Ouargla ce qui donne respectivement 30 et 60 lits pour 10 000 habitants. [12]

5.1.2- Le logement

Avec 6 habitants par logement on se trouve dans une situation à peine meilleure que pour la moyenne saharienne. Le taux d'électrification dépasse 90 % dans Ouargla et la plupart des communes, mais il semble être très insuffisant à Ain Baïdha (65 %). Le raccordement à l'eau potable n'est guère satisfaisant : 47 % à N'Goussa, 60 % à Ain Baïdha .

Tableau I-05: Indicateurs de logement [12]

Communes	95 Pop. totale	Total Logement	Hab/ Logement	Logements électrifiés %	Logements eau potable %
Ain Baïdha	12447	2308	5	65%	61%
Hassi b.Abdellah	2700	650	4	98%	97%
N'goussa	13722	2780	5	67%	47%
Ouargla	100 469	15384	7	92%	86%
Rouissat	27033	6257	4	78%	78%
Sidi Khouiled	3700	797	5	96%	96%
Total Ouargla	191153	34393	6	87%	82%

Source: B.R.L., 1999

5.2- L'activité agricole

On a compris que l'activité agricole n'est plus la ressource essentielle de la région : on a un peu moins de 8 000 agriculteurs qui se partagent les 9 000 ha irrigués répertoriés dont 6 800 sont occupés par des palmeraies qui produisent 30 000 t de dattes dont moins de 9 000 de deglet noir. Les palmeraies du Chott sont fortement dégradées par les difficultés de drainage et l'urbanisation. La nouvelle agriculture se met en place sur le plateau vers Hassi ben Abdallah et la route de Hassi Messaoud. La zone de N'Goussa voit se développer les cultures légumières.

5.3- L'activité économique

Le trait majeur de la région est son urbanisation et son industrialisation.

5.3.1- Le taux d'activité

Pour près de 95 000 actifs la région compte plus de 47 000 personnes déclarant avoir un emploi, ce qui semble indiquer que toute la population masculine trouve du travail et que cette région ne connaît pas le chômage, en réalité les zones de fixation des nomades (N'Goussa et Rouissat) montrent que le sous emploi existe pour les personnes peu qualifiées (14 % et 28 % de taux d'activité).

5.3.2- Les grands secteurs d'activité

Les deux tiers environ des personnes qui travaillent sont employés par le secteur public et seulement le cinquième des gens occupés travaillant dans l'agriculture, ce qui représente un des taux les plus bas du Sahara. Sidi Khouiled, Ain Baïdha et N'Goussa vivent essentiellement de l'agriculture. Plus étonnant Hassi Ben Abdallah périmètre agricole créé vers 1970 dans le cadre d'un programme d'Etat ne connaît que 22 % d'agriculteurs dans sa population active. Il est probable que les logements ont exercé un attrait sur des catégories de gens étrangères à l'agriculture.

Tableau I-06 : Secteurs d'activité

Communes	Sect. Public	Sect. Privé	Pop occupée	Empl. agricoles	nb exploitations	% agricole
Ain Baïdha	570	1 400	1 970	1 340	1 356	68%
Hassi b.Abdellah	200	50	250	40	40	16%
N'goussa	410	497	907	420	812	46%
Ouargla	13 498	7 776	21 274	3 527	3 527	17%
Rouissat	1 722	1 914	3 636	1 598	1 498	44%
Sidi Khouiled	300	900	1 200	741	830	62%
Total Ouargla	32 745	14 607	47 352	7 865	8 076	17%

Source: O.N.S.

5.4- L'essentiel du potentiel énergétique du pays

Le sous-sol du territoire de la wilaya renferme d'importantes potentialités en hydrocarbures, particulièrement dans la zone de Hassi Messaoud dont les premières découvertes ont eu lieu en 1958.

Les réserves de pétrole sont évaluées à plus de 900 millions de tonnes dans le bassin de Hassi Messaoud, auxquelles il faut ajouter celles qui existent dans les bassins de Gassi Touil, Berkaoui, Ghourd El Baguel qui sont évaluées à 260 000 000 tonnes.

Ce sont des ressources naturelles qui revêtent un intérêt stratégique dans le développement économique du pays, contribuent à plus de 40% dans la formation de son Produit Intérieur Brut (P.LB) et constituent 90% de ses recettes financières.

5.5- Un potentiel en eau appréciable

Outre les hydrocarbures, la wilaya dispose d'un potentiel en eau appréciable dont une grande partie provient des nappes profondes indiquées ci-après:

- ↳ La nappe phréatique de profondeur variant de 1 m à 8m, constituée de sable très perméable;
- ↳ La nappe du complexe terminal constitue de deux nappes distinctes :
 - La nappe du Mio-pliocène dite nappe des sables;
 - La nappe des calcaires du Sénonien.
- ↳ La nappe du Continental Intercalaire;

6. LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT

La ville d'Ouargla, comme certaines villes du Sahara algérien est affectée par le phénomène de la remontée de la nappe superficielle. Dans les points bas de la ville, des flaques d'eaux usées ont tendance à s'accumuler. Dans cette partie du travail nous mettrons en évidence l'origine de ces eaux rejetées.

6.1- Assainissement agricole

6.1.1- Délimitation de la palmeraie

Plus d'un millénaire que les palmeraies de la « Cuvette » existent grâce d'abord au fameux puits artésien d'Aïn Sfa de l'ancienne cité de Sedrata. Au cours de cette longue histoire ces palmeraies ont ruinées en un temps et agrandies dans d'autres au gré des vicissitudes de l'histoire.

La palmeraie d'Ouargla a connu une extension maximum vers 1958 (année de la réalisation du premier forage Albien). Ce développement s'est poursuivi avec le début du pompage de la nappe Mio-pliocène en 1962. A cette date la surface moyenne de la palmeraie était estimée à 2321,04 ha environ. Toutefois les premiers travaux de drainage se situent entre 1949 et 1952. A partir de 1971 et suite à l'exode rural et une démographie galopante urbaine (de la ville d'Ouargla), les premiers signes de destruction de la palmeraie au profit de l'urbanisation ont fait leur apparition. L'un des faits marquant, est la réalisation de certains grands projets dans la palmeraie, à savoir le projet de l'hôpital Boudiaf, la construction du stade 24 février et l'apparition de quartiers résidentiels. Les cités de Gharbouz, de Gara Nord et les lotissements Saïd Otba occupent une superficie dépassant 180 ha. Ajoutons à ce phénomène, la saturation du chott; lieu de rejet de toutes les eaux de l'agglomération qui a provoqué la destruction d'une partie de la palmeraie vers le début des années quatre-vingt [49].

On remarquera que la palmeraie a pratiquement disparu au Sud de Ouargla et s'est développé ou concentrée au Nord de la ville.

La surface totale de la palmeraie de la ville est de 232 104 ha. On signale une perte en surface d'environ 180 ha durant ces dernières décennies [49].

6.1.2- Système du drainage de la palmeraie de la région d'Ouargla

Ce n'est qu'en 1949 qu'un effort systématique d'assainissement fut entrepris pour lutter contre le paludisme, il a été construit un véritable réseau de drains aboutissant dans le chott vers la zone déprimée du pied du baten [22]. En suite, en 1950 un premier réseau de drainage important fut réalisé à Beni Brahim, long de 2100 m et profond de 1,5 m drainant 200 ha [44].

Mais depuis 1958, le niveau de la nappe phréatique ne cesse d'augmenter à cause des débits d'irrigation qui augmentent brusquement ainsi que le développement de la ville et de l'évacuation d'eau urbaine [44].

Actuellement, le réseau de drainage s'étend sur une longueur totale d'environ 80 km [09]. Un canal collecteur à ciel ouvert, d'une longueur égale à 10,5 km traverse la sebkha de Bamendil ainsi que toute la partie Nord de Ouargla. Créant une ceinture de clôture à l'ancienne palmeraie de Ouargla, ce drain n'a pas été réalisé suivant les normes requises puisque l'étude propose une largeur de drain à 12 m et non pas à 6 m, comme c'est le cas actuellement.

6.1.3- Problèmes de la collecte des eaux de drainage

Les difficultés de drainage constituent une des contraintes majeures des palmeraies de la région. L'étude menée ainsi que les observations faites sur l'état actuel des réseaux de drainage, montrent que la majeure partie des canaux sont inefficaces et à faibles capacités d'évacuation des eaux excédentaires de l'intérieur des palmeraies.

Dans les palmeraies, les drains, appelés Khandegs, quand ils existent, sont mal réalisés et leur hiérarchie est souvent aléatoire (de point de vue dimensionnement: écartements, profondeur et pente).

A cette mauvaise organisation, s'ajoute un manque flagrant d'entretien. Le réseau est totalement délaissé et livré à lui-même et les mauvaises herbes (dise, roseaux ...) ont proliféré, gênant ou obstruant parfois totalement, les écoulements. Dans beaucoup de parcelles, les drains secondaires n'aboutissent nulle part et se perdent au sein même des palmeraies où ils donnent naissance à des eaux stagnantes.

Les difficultés de drainage sont également dues à la position topographique qu'occupent certaines palmeraies par rapport aux sols de l'oasis. Les anciens agriculteurs Ouarglis, sont obligés d'installer dans les bas-fonds pour garder l'artésianisme. Ces jardins en bas-fond, n'ont pu être drainés convenablement et ont fini par s'engorger d'eau.

La mise en place du canal collecteur a effectivement permis une amélioration de la situation: un rabattement important de la nappe phréatique avoisinant ce drain a été obtenu autour des zones traversées par le canal, et la sebkha de Bamendil a été pratiquement asséchée. Mais, c'est la partie Est et Nord-est de la cuvette, recevant la quasi-totalité des eaux drainées, qui se trouve aujourd'hui totalement engorgée.

6.2- Assainissement urbain

6.2.1- Réseau d'assainissement

Le réseau d'assainissement urbain de la ville d'Ouargla est de type unitaire. Il couvre actuellement les trois communes : Ouargla, Rouissat et Ain Baïdha . Il dispose de deux systèmes de raccordement d'égout d'une part et des dispositifs d'assainissement autonomes pour le reste des habitants d'autre part.

La proportion de raccordement au réseau public pour les trois communes concernées est répartie comme suite :

- 70 % pour Ouargla,
- 50 % pour Rouissat,
- 80 % pour Ain Baïdha [09].

Le réseau d'assainissement de la ville s'étend sur une longueur de 120 km, dont les diamètres varient de 200 mm pour les canalisations secondaires à 1800 mm pour les collecteurs principaux (tableau I.07)

Tableau I-07 : La répartition des longueurs des collecteurs par diamètre et matériau [09].

Types Diamètre	CAO	PES	PVC	AC	Inconnu	Total
200	0	0	2 619	493	619	3 730
250	80	0	13 649	737	4 085	18 551
300	2 387	62	847	0	475	3 771
400	6 155	9 868	297	2 119	760	19 198
500	9 962	4 486	0	1 749	243	16 441
600	2 306	2 689	0	0	355	5 350
700	9 743	203	0	0	222	10 169
800	2 077	0	0	0	134	2 211
1100	1 341	0	0	0	0	1 341
1800	65	0	0	0	0	65
Total	34 116	17 309	17 412	5 098	6 894	80 828

Où:

- CAO : Conduite en béton armé;
- PES : Conduite fibre de verre;
- PVC : Conduite polyéthylène;
- AC : Conduite en amiante ciment.

Les contraintes topographiques rendent impossible la réalisation d'un réseau à écoulement gravitaire, puisque Ouargla se trouve dans une cuvette. Il a fallu donc mettre en place de nombreuses stations de relevage. Il existe 20 stations de pompage opérationnelles sur l'ensemble du réseau, dont 9 fonctionnent comme station de refoulement.

6.2.2- Diagnostic des installations d'assainissement urbain

Au terme du diagnostic des installations d'assainissement de l'agglomération on avait mis en évidence un certain nombre de carences et des dysfonctionnements importants qui sont rappelés ci- dessous :

❖ Branchements au réseau d'égout

Il apparaît que seulement 67 % des habitations de l'agglomération sont raccordés au réseau. Les autres habitations disposent de systèmes d'assainissement autonome [09].

❖ Colmatage des collecteurs

Toutes situations confondues et tous diamètres pris en compte, on estime que le tonnage de matières actuellement piégées dans les réseaux est évalué à 8000 m³.

Sur le réseau principal, 29 % du linéaire est colmaté à plus de 50 %. La statistique incluant la totalité des collecteurs (c'est-à-dire incluant tous les réseaux tertiaires et les branchements) porte cette proportion à plus de 40 %.

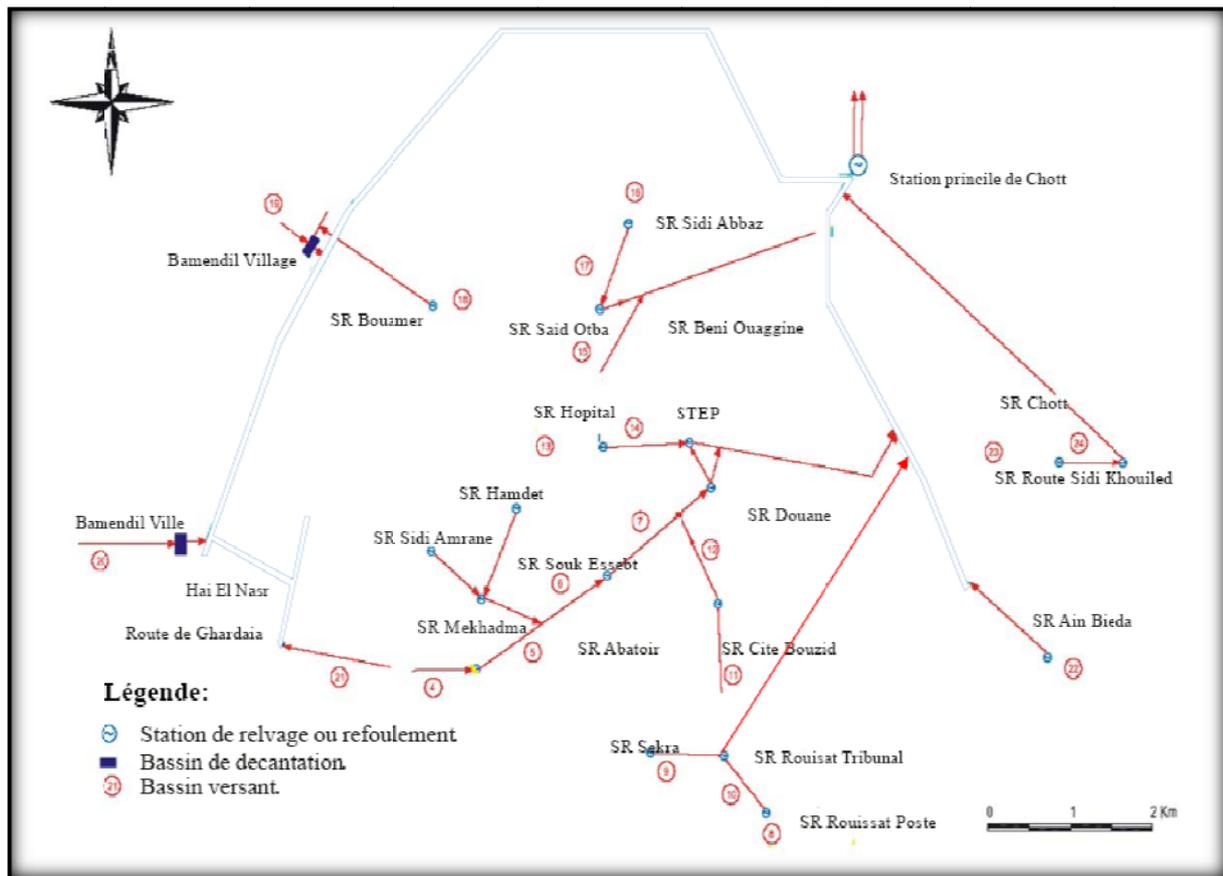


Fig. I-07: L'ensemble des points de rejets des eaux usées de la cuvette d'Ouargla.

❖ Analyse critique des pentes des collecteurs

La dénivelée totale entre le point haut du Ksar et le niveau du chott est de 9 m seulement; pour un site qui s'étend dans ses grandes dimensions de 5 km d'Est en Ouest et de 8 km du Nord au Sud. Cette contrainte naturelle a obligé que la réalisation des collecteurs, qui pour couler gravitairement, doivent avoir de la pente et donc progresser en profondeur. Deux chiffres résument l'ampleur des anomalies sur le réseau principal :

- 15 % des tronçons coulent à contre pente et
- 55 % ont une pente inférieure à 5 ‰.

❖ Nature des matériaux

Il est à souligner que 21 % des réseaux sont en PVC. Ce matériau est trop légère et ne résiste pas à des grandes pressions, comme il est instable dans un milieu humide (présence de la nappe), il faut les renforcer par le béton.

Les conduites en AC dans la majorité des cas contiennent des micro ou macro-fissures qui provoquent la contamination de la nappe phréatique par les eaux usées.

Dans les endroits où les conduites d'assainissement sont en conduite fibre de verre, on remarque l'affaissement des terrains. Car après un certain temps d'utilisation les tuyaux perdent leur dureté et deviennent friables (malgré les données de la fiche technique). Ces conduites ont une résistance mécanique très faible [09].

❖ Etat des ouvrages en surface

En matière de génie civil deux situations particulières sont à relever: le mauvais état de bon nombre de couronnements de regards (plus d'un quart sur le parc total de la zone d'étude) et la

défectuosité de ces regards (soit trop hauts soit enterrés) provoquant des nuisances en surface et dans les voies publiques.

❖ **Stations de pompage**

La situation générale des stations de pompage, est dans un état critique, que ce soit le génie civil, les équipements ou la nature très sableuse du milieu naturel (action des vents de sable sur les pompes qui sont mal protégées).

Pour les pompes, les colonnes montantes, les accessoires, les conduites de refoulement sont obstruées et/ou encrassées. Cela a entraîné des fuites entre la pompe et la colonne montante. D'une manière générale aucune station n'est convenablement entretenue, l'absence systématique de grillage ainsi que la présence de dépôts importants dans les bâches.

❖ **Dispositifs de traitement**

La station d'épuration n'est pas opérationnelle. Le constat a mis en évidence que la réhabilitation de cette station, pour traiter même une partie des effluents urbains, n'est pas une solution envisageable d'un point de vue technique et financier (fissuration des bassins, colmatage et corrosion des conduites, détérioration des pompes, transformation des lits de séchage en "pelouses", ...etc).

❖ **Assainissement autonome**

Le mauvais état de fonctionnement du réseau, et son manque d'efficacité, ont fini par inciter les usagers à abandonner le réseau et à réutiliser les systèmes d'épuration individuels. Ceux-ci se composent généralement d'une fosse septique de décantation et d'un puits perdu aménagé au sein de l'habitation, dans les jardins ou les cours intérieures.

Cependant dans un certain nombre de cas, les usagers ont eu recours à ces systèmes d'épuration individuels avant la réalisation du réseau d'assainissement. Il n'empêche que, même après la mise en place du réseau public, ces mêmes usagers ont préféré continuer à utiliser leurs propres installations.

Les usagers qui possèdent, conjointement, un système d'assainissement individuel et un branchement au réseau public, n'utilisent ce dernier que pour l'évacuation des eaux ménagères, tandis que les eaux-vannes sont traitées séparément dans les fosses individuelles. En périodes de curage, les eaux-vannes sont également dirigées vers le réseau collectif.

Il est utile de noter par ailleurs, qu'à l'exception des habitations collectives (immeubles), qui représentent au plus 30 à 40 % de l'ensemble des habitations de la ville, une grande partie des maisons individuelles est équipée de latrines traditionnelles, utilisées comme moyen accessoire d'élimination des excréta. Cette pratique connue dans la région depuis les temps les plus anciens (maisons du Ksar et celles des nomades), a été largement sauvegardée dans les nouvelles constructions. Ce mode d'élimination constitue donc, avec celui de l'assainissement autonome, un moyen d'évacuation de déchets humains. Ceci peut expliquer, d'une certaine façon, les difficultés d'adaptation de la population aux exigences de l'assainissement collectif [34].

❖ **Insuffisances organisationnelles**

Pour la seule commune de Ouargla, l'organisation du service de l'assainissement est gérée entre trois opérateurs : l'APC détentrice des ouvrages, est censée concevoir, réaliser et entretenir; la DHW intervient comme conseil et initie des opérations de grande importance; enfin l'EDMIAO au titre de l'entretien spécifique des stations de pompage fournit une assistance surtout au suivi des organes électriques et électromécaniques. Sur l'ensemble des trois communes d'Ouargla, Rouissat et Ain Baïdha, les communes prennent en charge les installations établies sur leur propre territoire. Ce désordre administratif ne peut faire fonctionner efficacement un réseau d'assainissement de cette importance.

En définitive, nous pouvons conclure que la défaillance du système de collecte est un fait incontestable dont les conséquences se font de plus en plus ressentir. Les causes réelles d'une telle situation peuvent être imputées à la carence en moyens et aux difficultés pratiques.

Face aux nuisances provoquées par les rejets de la ville, un projet est en cours de mise en place afin de mener à bien les objectifs suivants :

- Contrôler les eaux qui participent à la recharge de la nappe phréatique (limiter les fuites d'AEP, supprimer l'assainissement autonome);
- Supprimer les rejets directs d'eaux usées dans les canaux à ciel ouvert sans traitement;
- Les eaux de drainage agricole doivent progressivement être collectées et évacuées d'une manière indépendante;

Pour réaliser ces objectifs, il faut :

- Réhabiliter le réseau d'assainissement qui n'est pas étanche;
- Augmenter le taux de raccordement de la population au réseau d'assainissement;
- Le projet d'assainissement prévoit que la totalité de la population de l'agglomération de Ouargla soit raccordée à l'égout à l'horizon 2015;
- Supprimer les rejets directs dans le milieu par la mise en place d'un traitement.

La problématique de la conservation de la ressource en eau qui est un souci national et même de plus en plus international passe par la réflexion autour de la valorisation des effluents traités. Cette valorisation peut se faire à travers :

- La réutilisation agricole pour l'irrigation de palmeraies (ancienne ou nouvelle);
- La réutilisation en aquaculture;
- La valorisation du chott Ain Baïdha qui risque d'être mis à sec s'il n'y a pas de suppression des rejets directs d'eaux usées;
- La conservation d'un plan d'eau à Oum Raneb dont la superficie est à définir.

6.3- Eaux de drainage

6.3.1- Historique des débits prélevés

Les forages de Ouargla, qui captent les aquifères du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal ne sont jamais équipés de dispositifs de mesure des volumes exhaérés. Les données qui figurent dans cet historique de débits publiés jusqu'à présent représentent toujours des valeurs estimées, dont la précision, est assez variable et difficile à apprécier.

A Ouargla et N'Goussa, l'exploitation s'est faite avant 1888 par puits artésiens pour l'irrigation, mais il n'existe pas de données antérieures. En 1888, le débit exploité atteignait $460 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Ouargla et $62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à N'Goussa. A Ouargla, ce débit a augmenté sans cesse jusqu'en 1962 ($666 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) où il s'est stabilisé, les pompages ayant commencé en 1951 à N'Goussa, par contre, le débit a sans cesse diminué ($16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) jusqu'en 1969 et ceci malgré l'apparition du pompage en 1967 [14].

6.3.2- Evaluation quantitative des eaux de drainage

Dans l'état actuel des choses, il est impossible d'évaluer les volumes d'eaux de drainage par mesure directe des débits au niveau des drains, car le réseau de drainage est très mal organisé et son écoulement est souvent défectueux. En outre, les volumes d'eaux véhiculés par les drains principaux contiennent, en plus des eaux de drainage, de grandes quantités d'eau dont l'origine est difficilement identifiable.

Afin d'avoir une estimation approchée des volumes d'eau de drainage à évacuer, nous allons comparer les apports, constitués par les débits d'eau d'irrigation (I) utilisés dans chaque secteur, les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), puisque celle-ci correspond sensiblement aux besoins d'eau maxima des cultures, lorsque celles-ci sont bien alimentées. Etant donné que les apports dus aux précipitations sont négligeables, puisqu'ils ne représentent que 2,5 % environ des besoins [34].

Il est évident qu'une partie, plus ou moins importante, du débit utilisé pour l'arrosage va servir au lessivage ou sera perdue dans les canaux d'irrigation. L'excédent qui est pris en compte englobe l'ensemble des volumes liés, d'une part, à l'excédent d'arrosage, et, d'autre part, aux pertes. C'est ces deux quantités qui déterminent le volume total d'eau de drainage à évacuer (Tableau I.08).

Tableau I-08 : Débits de drainage, estimé, par secteur dans la palmeraie d'Ouargla.

Zones	Débit mobilisable par forage (m ³ .j ⁻¹)	Débit mobilisable par pompage (m ³ .j ⁻¹)	Débit consommé (m ³ .j ⁻¹)		Débit de drainage (m ³ .j ⁻¹)	
			Hiver	Été	Hiver	Été
ITAS	4752	4320	1080	1852	324	555,6
Bamendil	11232	6480	3312	3456	993,6	1036,8
Mekhadma	26784	18144	11664	12312	3499,2	3693,6
Beni Brahim	34301	23674	8010	10214	2403	3064,2
Said Otba	6480	5184	2376	2700	712,8	810
Beni Ouaguine	7085	5184	2036	2696	610,8	808,8
Beni Sessine	19526	13738	5856	6954	1756,8	2086,2
Beni Thour	14170	11146	4283	4777	1284,9	1433,1
Rouissat	45187	30240	13978	14102	4193,4	4230,6
Ain Bieda	20909	13824	6902	6902	2070,6	2070,6
Adjadja	17712	12874	8197	8197	2459,1	2459,1
Chott	40262	28512	13417	13914	4025,1	4174,2
Total	248400	173320	81111	88076	24333,3	26422,8

Il y a lieu de constater qu'il existe, à Ouargla, un important problème de gestion de la ressource. Les agriculteurs utilisent presque les mêmes débits en hiver qu'en été, ce qui est doublement dommageable : les cultures souffrent d'un manque d'eau pendant la période estivale, alors qu'elles subissent en hiver les méfaits de l'engorgement dus à la difficulté d'évacuation des excédents.

Sur l'ensemble des secteurs, il y a chaque année, près de 9,26 millions de m³ d'eau de drainage qui vont s'accumuler dans la cuvette. Ce chiffre ne tient pas compte des volumes qui proviennent des domaines de mise en valeur et qui sont certainement loin d'être négligeables, étant donné que l'on y utilise le plus souvent des forages à l'abien, donc gros producteurs d'eau.

Le volume de drainage apparaît donc considérable : non seulement il représente une dépense de la seule ressource disponible dont la réserve est basse, mais provoque aussi des conséquences désastreuses pour une région comme Ouargla. Celle-ci étant implantée au fond d'une cuvette et où les conditions naturelles ne facilitent pas l'évacuation des eaux usées.

Chapitre II :
Cadre physique

Chapitre II

Cadre physique

1 LES GRANDES UNITES GEO-STRUCTURALES

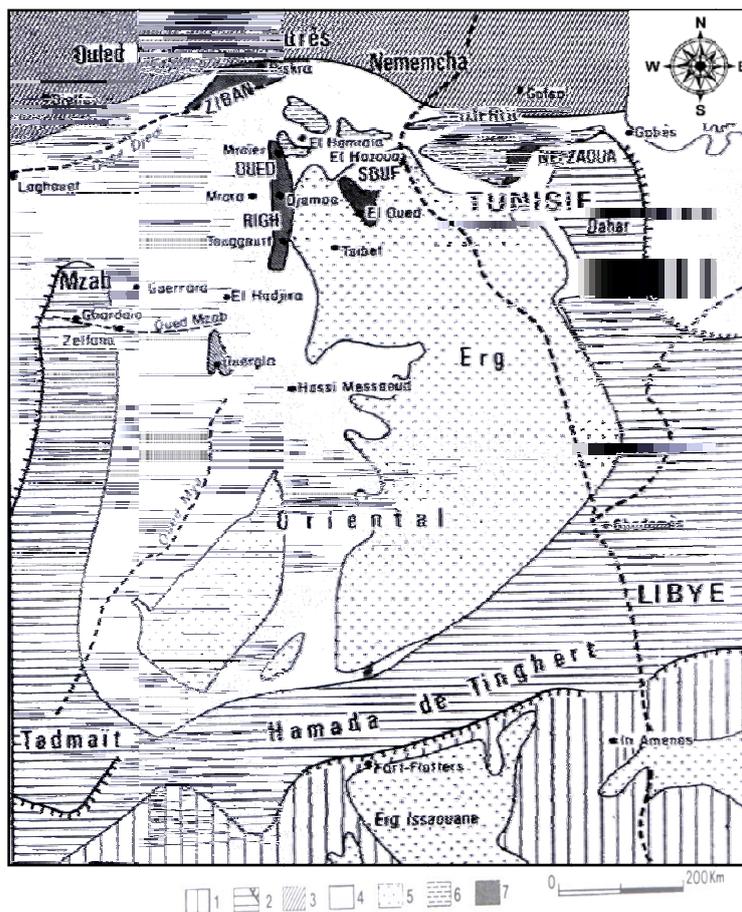
On distingue quatre sous ensembles régionaux qui correspondent aux quatre grandes unités structurales du substratum géologique du territoire (Fig. II-01):

- Le massif ancien cristallin du Hoggar et ses couronnes tassiliennes;
- La cuvette du Bas Sahara, (la Plate-forme Saharienne);
- La dorsale du M'zab;
- Le synclinal de Tindouf et la vallée de la Saoura.

1.1- Définition de la plate-forme saharienne

La plate-forme saharienne s'étend du pied de l'Atlas saharien jusqu'aux frontières des pays voisins. Elle est essentiellement reconnue par des sondages pétroliers, et est constituée d'un soubassement antécambrien métamorphique, des terrains paléozoïques plus ou moins plissés, une couverture sub-horizontale de dépôts secondaires et tertiaires auxquels s'ajoutent de vastes recouvrements superficiels : sables, argiles et cailloutis (regs) quaternaires [02].

1.2- La cuvette du bas Sahara



Légende:

1. Affleurements primaires. - 2. Plateaux crétaqués et cuestas. - 3. Reliefs atlasiques. - 4. Remblaiement du Continental terminal - 5. Ergs. - 6. Sebchas. - 7. Grandes régions d'oasis.

Fig. II-01: Les Oasis du Bas-Sahara.

La région du Bas-Sahara se présente comme une vaste cuvette limitée à l'Ouest par la dorsale du Mzab, au Sud par les hamadas du Tadmait et de Tinghert et à l'Est par les plateaux du Dahar tunisien (*Fig. II-01*). Ses bordures, de hauteur modeste, s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée matérialisée par l'axe SSW-NNE des Oueds M'ya et Righ. Vers le Nord au contraire, dressée au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par des chotts et dont le fond est inférieur au niveau de la mer. Une haute barrière composée des Monts des Ouled Nail, de l'Aurès et des Nememcha en constituant la limite.

2 LA GEOLOGIE REGIONAL

La région a connue au cours de son histoire géologique de longues phases de sédimentation alternativement marines et continentales (*Fig. II-01*). Les dépôts résultants, ont été d'autant plus importants qu'un immense bassin est apparu très tôt en cette partie du Sahara, et qu'il a été presque constamment affecté ensuite, par des mouvements de subsidence.

2.1- La sédimentation continentale post-hercynienne

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

Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis de nouveaux mouvements post-triasiques. Les massifs cristallins centraux sont alors exhaussés et la couverture sédimentaire primaire ondulée tandis que le Sahara nord-oriental s'affaisse. L'érosion devient très vive sur les parties hautes et les matériaux arrachés dans les régions du Hoggar et des tassilis sont transportés par les eaux courantes vers la fosse de Berbérie, au Nord. Avec l'abaissement des reliefs, l'érosion devient moins vive et les écoulements moins puissants; des masses considérables de sables et d'argiles sont abandonnées sur la plate-forme saharienne qu'elles recouvrent d'un manteau uniforme à l'exception des massifs cristallins et des tassilis gréseux. Peu épais au Sud, elles deviennent de plus en plus puissantes vers le Nord où elles atteignent environ 2 000 mètres. Un tel entassement de sédiments traduit l'existence d'une zone de subsidence.

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

Sur les alluvions uniformément épanchées du Continental intercalaires apparaît, au Vraconien, un régime de lacs et de lagunes; dû à l'amaigrissement des écoulements du Continental intercalaire, il engendre des dépôts alternés d'argile, de dolomie, d'argiles sableuses, de grès à ciment calcaire. Durant le Cénomanien inférieur, une mer peu profonde s'avance vers le Sud, jusqu'aux Tassili, mais elle connaît plusieurs phases de régression. Ses dépôts se composent ainsi d'une alternance d'argile et d'anhydrite. Le Cénomanien supérieur est plus franchement marin avec des dépôts de dolomie et de calcaire dolomitique disposés en bancs de quelques mètres d'épaisseur entre lesquels apparaissent encore de l'anhydrite et de l'argile gypsifère. Faciès et épaisseur des dépôts varient vers le Nord-est: les carbonates deviennent plus importants et la puissance des bancs s'accroît [06, 16]; ils indiquent l'origine vraisemblable de la transgression cénomanienne.

Le Turonien voit s'établir un régime marin franc responsable du dépôt de calcaires et de dolomies sur l'ensemble du Sahara algérien. Le banc carbonaté homogène sur toute son étendue présente une grande épaisseur pouvant atteindre, par endroits, plus de 100 mètres. Cependant, des variations de faciès peuvent être observées. Légèrement lagunaire au Sud (présence de marnes vertes à anhydrite dans les régions du Tadmait et du Tinghert) le Turonien devient plus

franchement marin au centre (présence exclusive de calcaires et de dolomies) et au Nord (prédominance des marnes) [06]. Ce changement de faciès s'accompagne d'un épaissement des sédiments qui montrent que le rebord de la plate-forme est toujours affecté de mouvements de subsidence.

Dès la fin du Turonien, la mer est remplacée par des lagunes; les eaux sont moins profondes et parfois elles disparaissent entièrement provoquant des émergences momentanées. Les dépôts présentent alors une alternance irrégulière de bancs d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel.

Les bancs ont une puissance de quelques mètres seulement. L'anhydrite et le sel peuvent cependant constituer des couches de dix mètres et plus. L'ensemble de ces dépôts dont l'épaisseur varie de 0 à 600 mètres appartient au Sénonien inférieur lagunaire. Comme les dépôts précédents, celui-ci voit sa puissance s'accroître rapidement vers le Nord.

Une nouvelle transgression marine se manifeste au Sénonien supérieur. Elle est responsable du dépôt de dolomies, de calcaires dolomitiques et d'intercalations de marnes, d'argiles et quelquefois d'anhydrite. Leur faciès varie peu, mais leur épaisseur augmente régulièrement vers le Nord. Tandis que se poursuit la subsidence nord-oriental, un mouvement d'exhaussement se manifeste au Nord-Ouest. Les formations déjà déposées dans cette région commencent à émerger et il se peut que le Sénonien marin n'ait jamais existé à l'Ouest du méridien de Laghouat. Dans le même temps, au Sud du bassin, un grand axe anticlinal NNE-SSW se forme au-dessus du haut-fond précambrien d'Amguid - El Biod jalonné aujourd'hui par des gisements pétroliers (Hamra, Rhourde Nouss, Gassi Touil et Nezla [16]. Mais la sédimentation dans le Sahara nord-oriental est peu affectée par ces mouvements. Les calcaires à silex que l'on rencontre au sommet du Sénonien se retrouvent dans l'Eocène; seule la présence de Nummulites les distingue. Pourtant les calcaires prédominent sur les dolomies et les évaporites deviennent rares. Bien que les Nummulites n'aient pas été trouvées sur toute l'étendue du Bas-Sahara, il est probable que la mer éocène s'étendait à l'ensemble du bassin. Tandis que se poursuit au Nord un mouvement de subsidence révélé par un accroissement des épaisseurs des dépôts carbonatés du Sénonien et de l'Eocène de 160 mètres près d'Ouargla à 600 mètres dans la région des chotts, un soulèvement s'opère au Nord-Ouest [06]. Il n'existe, en effet, aucune trace d'Eocène marin dans le Sahara occidental et dans la région du M'zab. D'autres régions sont probablement affectées par un soulèvement identique, en particulier l'axe Amguid-El Biod, au Sud du bassin et l'axe EW, Hassi Messaoud- frontière tunisienne. Peut-être même un exhaussement a-t-il atteint plus tard l'ensemble du Bas-Sahara.

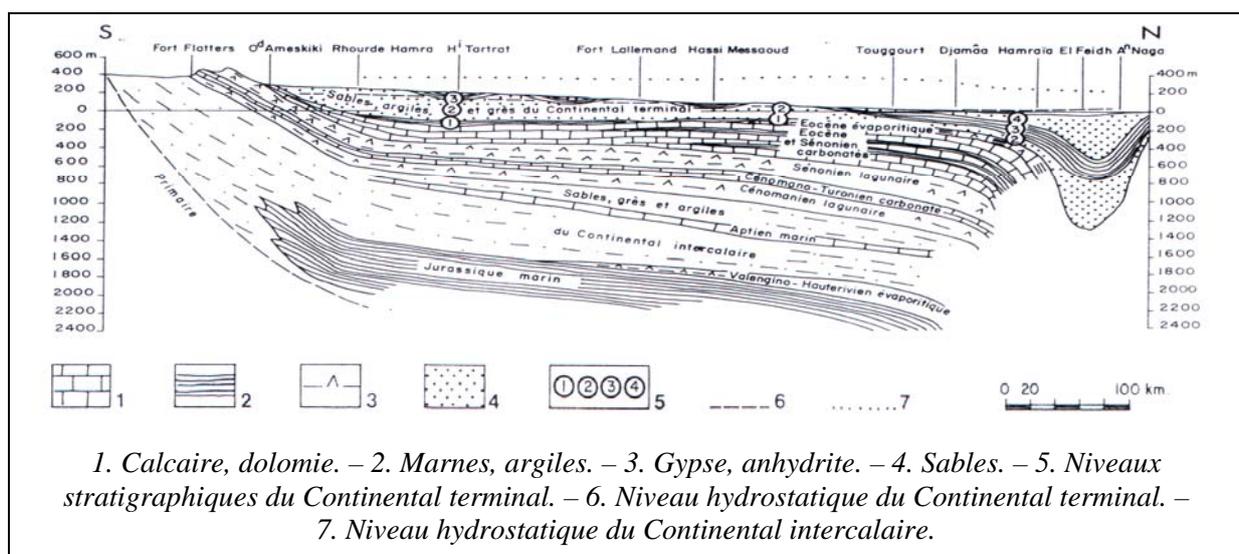


Fig. II-02 : Coupe schématique Nord-Sud du Bas-Sahara, en partie [16].

Quoi qu'il en soit, la mer n'occupe plus, après l'Eocène inférieur, qu'un golfe très réduit dans la partie septentrionale de la cuvette. Sa faible profondeur et son extension, limitée au Sud à l'embouchure de l'oued Mzab, en font une mer résiduelle, où se déposent alternativement des calcaires, des argiles, des marnes et de l'anhydrite. Cet Eocène évaporitique achève d'ailleurs sa formation à l'Eocène moyen quand la mer se retire définitivement de la plate-forme saharienne.

2.3- L'orogénèse atlasique et ses conséquences

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

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

La tectonique atlasique a également d'autres conséquences: les bancs rigides de la couverture sédimentaire saharienne, celui du Turonien et celui du Sénonien et de l'Eocène, sont affectés par des diaclases nombreuses, des fractures et même des failles. D'importantes pertes de boue ayant été constatées lors des forages, il n'est pas impossible qu'une karstification se soit développée à la faveur de ces fractures, au moins sur les affleurements des bancs sénoniens et éocènes, avant leur recouvrement par les formations du Continental terminal.

2.4- La mise en place du tertiaire continental

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

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

La sédimentation continentale s'achève, après la mise en place de formations lagunaires discordantes, par une période lacustre, vraisemblablement pliocène, assurant le dépôt d'une dalle calcaire de 2 à 10 mètres d'épaisseur sur une grande partie des affleurements antérieurs. C'est alors qu'intervient une nouvelle phase tectonique affaissant la fosse sud-aurasienne, exhaussant le M'zab et les rides anticlinales septentrionales, déprimant l'axe synclinal Tademaït - Melrhir, flexurant et faillant même la bordure de la cuvette où vont, pendant le Quaternaire, s'écouler les oueds M'ya, Igharghar et Righ et se former les grandes dunes de l'Erg Oriental.

Le Bas-Sahara a désormais atteint sa structure actuelle en cuvette synclinale dissymétrique bordée à l'Ouest, au Sud et à l'Est par des bancs à pendages faibles tandis qu'au Nord une fosse profonde se creuse au pied de l'Aurès et redresse presque à la verticale les sédiments déposés.

En conclusion : La disposition des formations sédimentaires dans la cuvette du Bas-Sahara favorise ainsi une circulation souterraine des eaux précipitées sur les affleurements en auréoles concentriques du pourtour. L'alternance de terrains perméables et imperméables assure en outre leur mise en charge à mesure qu'elles s'écoulent vers les parties déprimées. Ces conditions géologiques particulièrement favorables sont à l'origine de la formation des nappes souterraines qui alimentent les oasis [40]

2.5- Les coupes stratigraphiques du bas Sahara

2.5.1- L'échelle stratigraphique de base

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

- 1- Quaternaire
- 2- Continental terminal
- 3- Turonien
- 4- Cénomanién
- 5- Continental intercalaire

- 6- Jurassique
- 7- Trias
- 8- Paléozoïque

2.5.2- Les classes lithologiques et les faciès

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

Tableau II.01 : Classes retenues pour la description des faciès géologiques

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

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

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

3 CADRE GÉOLOGIQUE LOCAL

3.1- Introduction

Sur la région d'Ouargla seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent, ils sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires (Ergs et Dunes, Fig. II-04, II-05) [18]. A partir des données de forages pétroliers et celles des forages hydrauliques, nous avons établi des coupes géologiques et un log synthétique des formations lithologiques (Fig. II-03). La description des différentes formations a pu être effectuée.

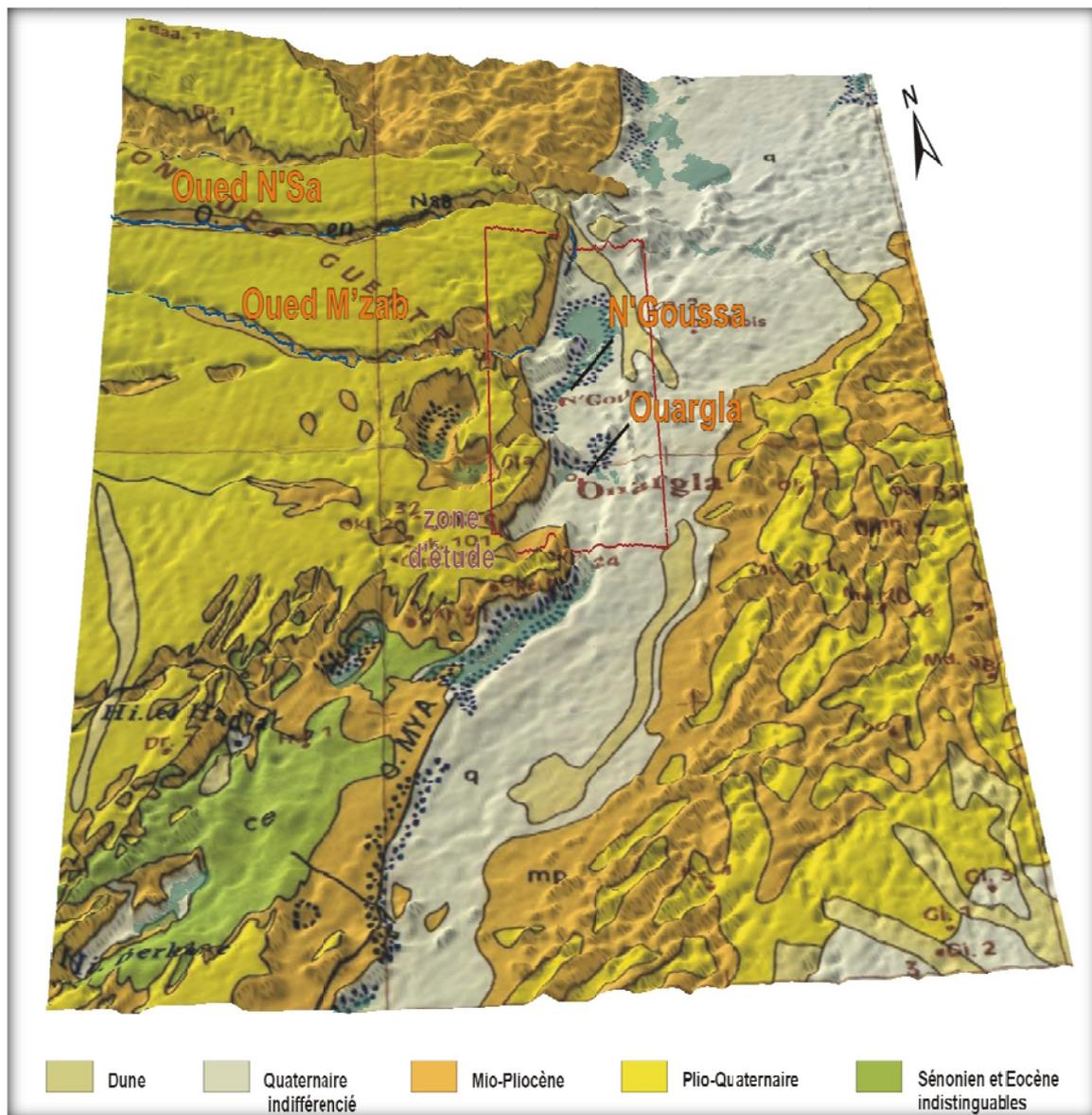


Fig. II-03: Relief géologique de la région d'Ouargla Superposition de la carte géologique de G. Busson au MNT

3.2- Litho-stratigraphie

3.2.1- Aptien :

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

3.2.2- Albien :

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

3.2.3- *Vraconien* :

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

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

3.2.4- *Cénomaniens* :

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

- la série inférieure est constituée par des argiles dolomitiques et des marnes grises, avec parfois des argiles brune-rougeâtre ou gris-verdâtre, son épaisseur varie entre 65 et 80 m. On note aussi quelques passées de calcaires dolomitiques en 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, de quelques intercalations dolomitiques, et de passées de sel gemme, son épaisseur est de l'ordre de 70 m.

3.2.5- *Turonien* :

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

3.2.6- *Sénonien lagunaire* :

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

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

3.2.7- *Sénonien et Eocène* :

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

3.2.8- *Mio-Pliocène* :

Le Mio-Pliocène correspond au Continental Terminal. C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénonien et l'Eocène. On distingue quatre niveaux différents dans le Mio-Pliocène à Ouargla [30, 18]:

- A la base, un dépôt argileux peu épais recouvrant dans la partie centrale de la cuvette, et suivant une bande Nord-Sud, le Sénonien et l'Eocène.
- Deuxième niveau : C'est un dépôt grésosableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais et le plus constant; le deuxième niveau est le principal horizon aquifère du Mio-Pliocène.

- Troisième niveau : C'est une formation argilo-sableuse dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Cette couche apparaît que dans certains endroits.
- Quatrième niveau : C'est le deuxième niveau sableux du Mio-Pliocène. On ne peut le distinguer que lorsqu'il repose sur le niveau 3 ; d'ailleurs les niveaux 2 et 4 sont confondus. Il est très épais dans la zone des chotts, le sommet du niveau 4 affleurant sur de grandes surfaces; le niveau 4 est souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne).

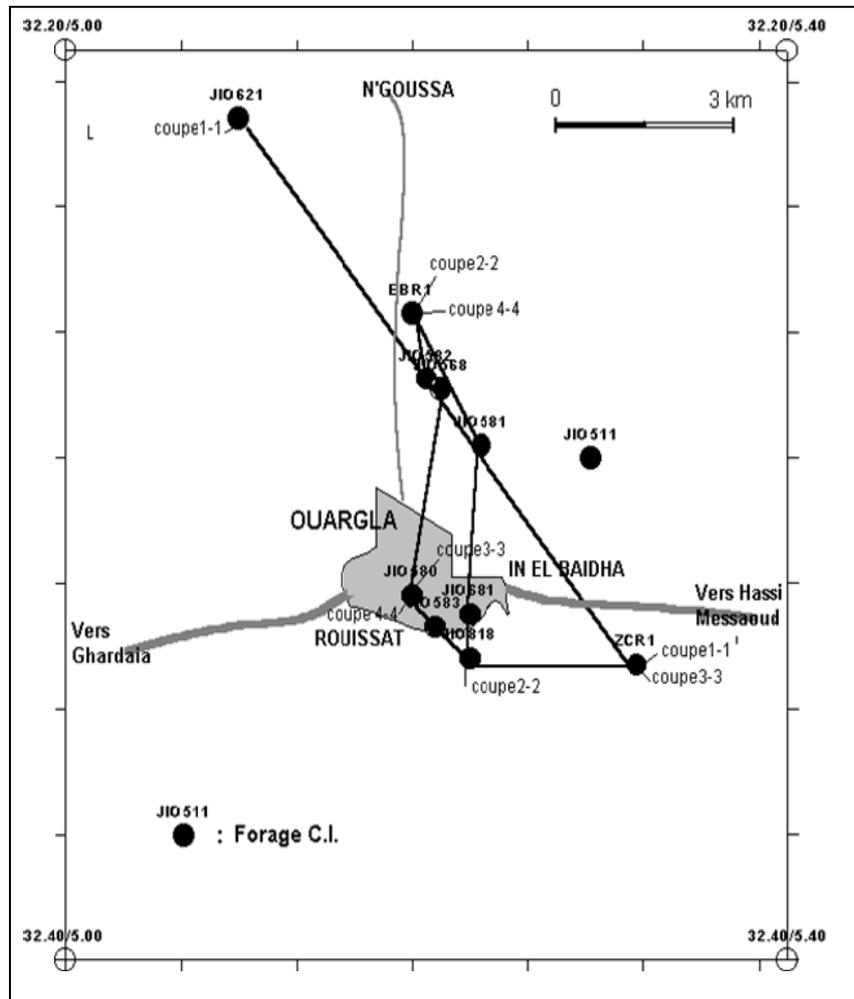
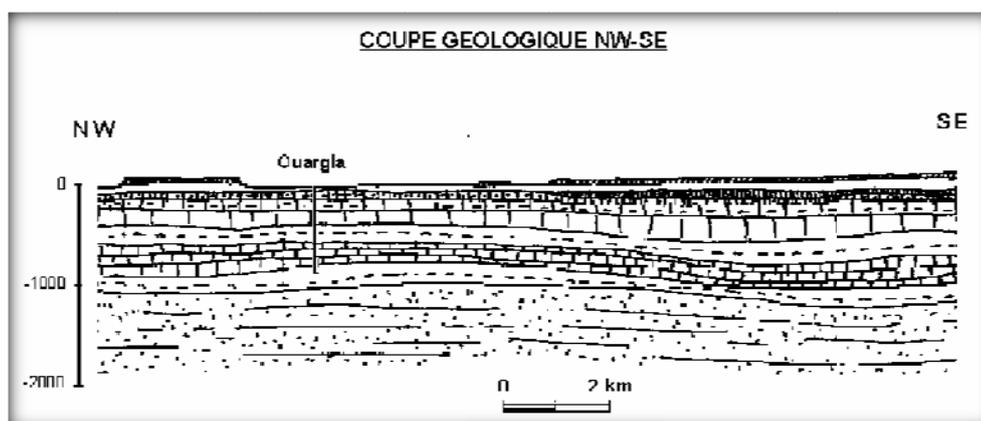


Fig. II-04: Carte d'orientation des coupes géologiques



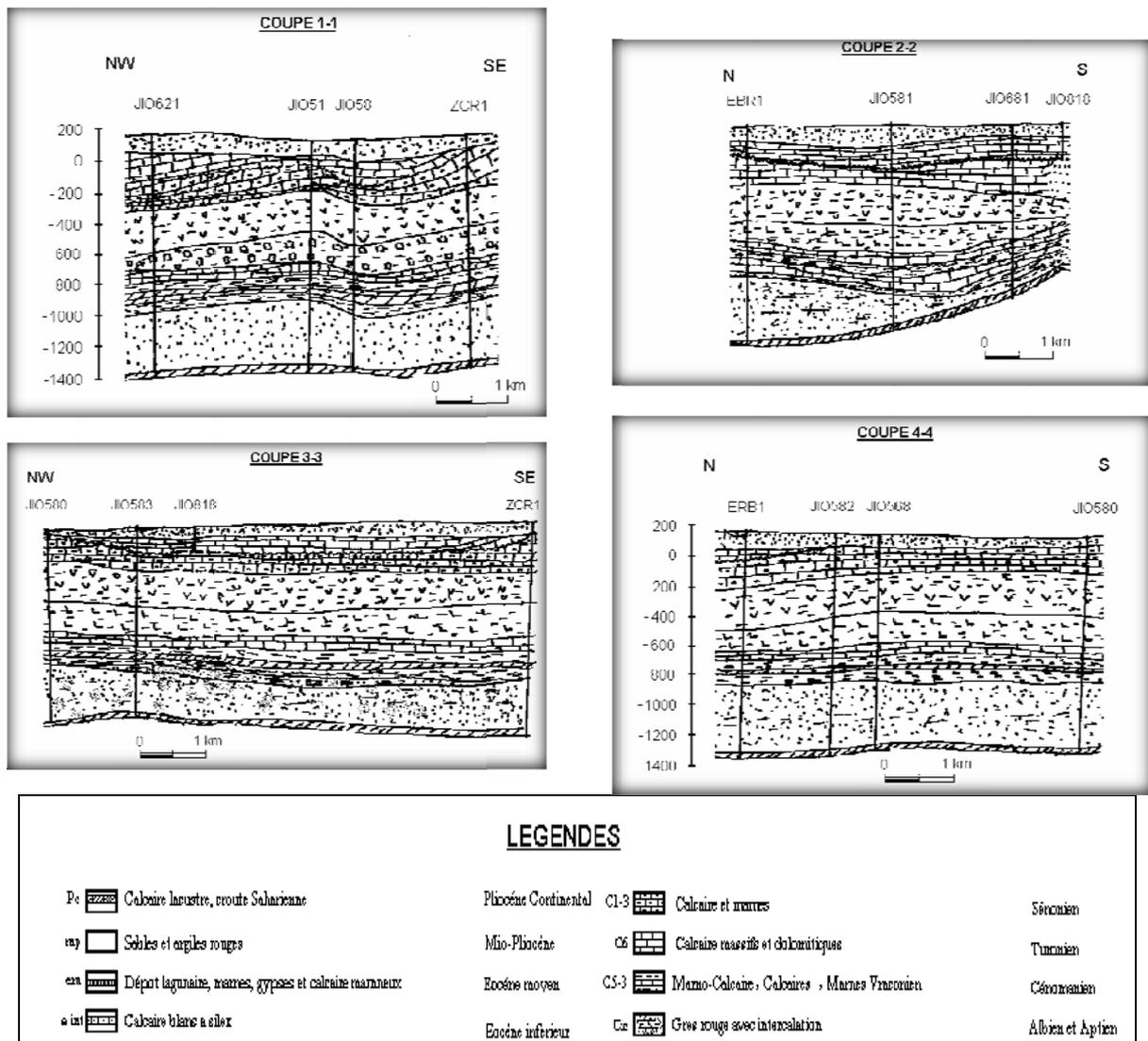


Fig. II-05: Coupes géologiques de la cuvette d'Ouargla

3.2.9- Quaternaire :

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

- Sur le plateau, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Mio-Pliocène. C'est le sol le plus pauvre en gypse de la région; jusqu'à 8 m de profondeur il ne présente aucun niveau d'encroûtement; entre 25 et 75 cm de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers.
- Sur les chotts et les terrains intermédiaires, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux et de sebkhas associés à une végétation gypso halophiles. De 15 à 20 cm d'épaisseur on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur. En dessous un tuf présente un teneur de gypse décroissante

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

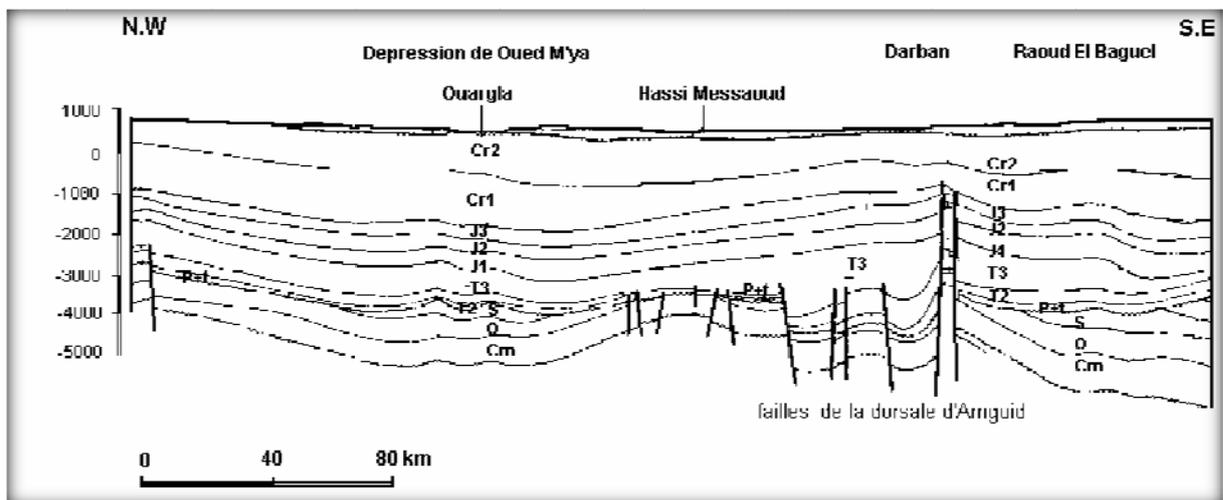
D'après la carte géologique réalisée par G. Busson, le relief d'Ouargla est constitué de roches sédimentaires et alluvions et colluvions dérivées de ces roches :

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

4 TECTONIQUE:

La cuvette d'Ouargla fait partie de la dépression d'Oued M'ya. Cette dernière, occupe la plus grande partie du bas-Sahara. L'épaisseur totale de la couverture sédimentaire atteint 400 m dans la partie Sud et la partie Ouest de la dépression, et elle augmente dans la partie Nord jusqu'à 6000 m. Dans son ensemble la dépression d'Oued M'ya est une structure dissymétrique assez plate [01].

Les données sismologiques recueillies à l'occasion des recherches pétrolières, montrent que la dépression est structurellement affectée par les failles hercyniennes du Hoggar à partir du Cambrien jusqu'au Sénonien inférieur (*Fig. II-06*). Ces failles sont orientées Sud-est Nord-Ouest et traversent la région de Ouargla par l'est. Elles seraient à l'origine des apports profonds dans cette zone [29].



Source: SONATRACH

Fig. II-06 : Coupe Structurale Transversale du Bas-Sahara

Les logs de forages, et les coupes géologiques qui ont été établis, nous ont permis de préciser les formations litho-stratigraphiques présentes sur la région de Ouargla, il s'agit :

- du secondaire, avec les formations allant de l'Aptien jusqu'au Sénonien;
- du tertiaire, allant de l'Eocène inférieur jusqu'au Mio-Pliocène constituant les formations du complexe terminal;
- Et enfin du quaternaire qui est constitué d'un matériau détritique et de sables éoliens.

5 LA GÉOMORPHOLOGIE:

La cuvette de Ouargla appartient au sous-bassin saharien de code 04, elle correspond à la basse vallée fossile de l'Oued M'ya (Figure II-08, II-09). Sur le plan géomorphologique la coupe ci-dessous (Fig. II-07) permet de distinguer les unités suivantes (CORNET, 1964)

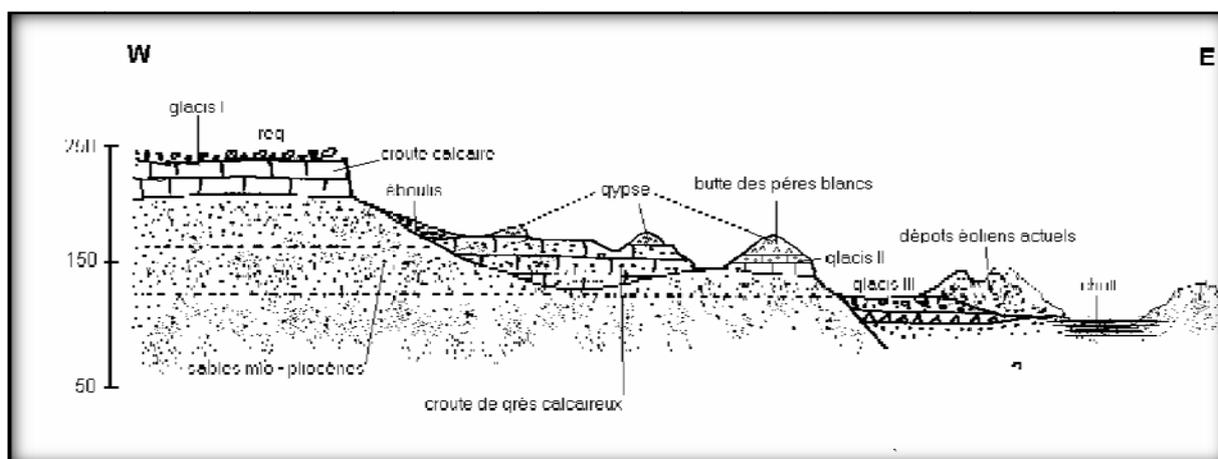


Fig. II-07 : Coupe schématique des formations superficielles de la cuvette d'Ouargla

5.1- Hamada du Mio-Pliocène :

Une formation continentale détritique située à l'Ouest de Ouargla, et s'abaisse légèrement d'Ouest en Est. Elle est fortement érodée, laissant une série de buttes témoins ou Goures.

5.2- Glacis :

Sur le versant Ouest de la cuvette, les glacis s'étagent en quatre niveaux allant de 200 m à 140 m. Les glacis dont les hauteurs varient de 180 à 160 m sont très visibles et caractérisés par l'affleurement du substrat gréseux du Mio-Pliocène. La pente de ce dernier est faible, et souvent recouverte de sables et de graviers. À l'Est de la cuvette se trouve un vaste glacis alluvial à sable grossier, de 150 m d'altitude.

5.3- Sebkhas et chotts :

Constituent le niveau le plus bas. Le chott qui correspond au centre de la sebkha est constitué des sols gypseux en surface. Souvent la nappe phréatique affleure en surface au centre de la sebkha. Au Nord de la ville d'Ouargla (136 m d'altitude), diverses sebkhas alternent avec des massifs dunaires jusqu'à Sebkhet Safioune (103 m d'altitude).

La cuvette d'Ouargla 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 d'Ouargla a été occupée par un lac au fond duquel se sont déposés des sédiments fins argileux ou d'origine chimique, craies, calcédoine et évaporites. Un niveau charbonneux a été daté de - 17 000 ans. [33] Des oueds, descendant de la dorsale mozabite à l'Ouest (oueds M'Zab, N'Sa, Z'gag) ou du Tadmaït (oued 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 (oueds N'Sa et Z'Gag au Nord de la Sebkhet Safioune).

Avec la fin du dernier grand pluvial, le lac s'est retiré. L'oued 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 la Sebkhet Safioune où un lac se formait à nouveau à chaque période un peu pluvieuse.

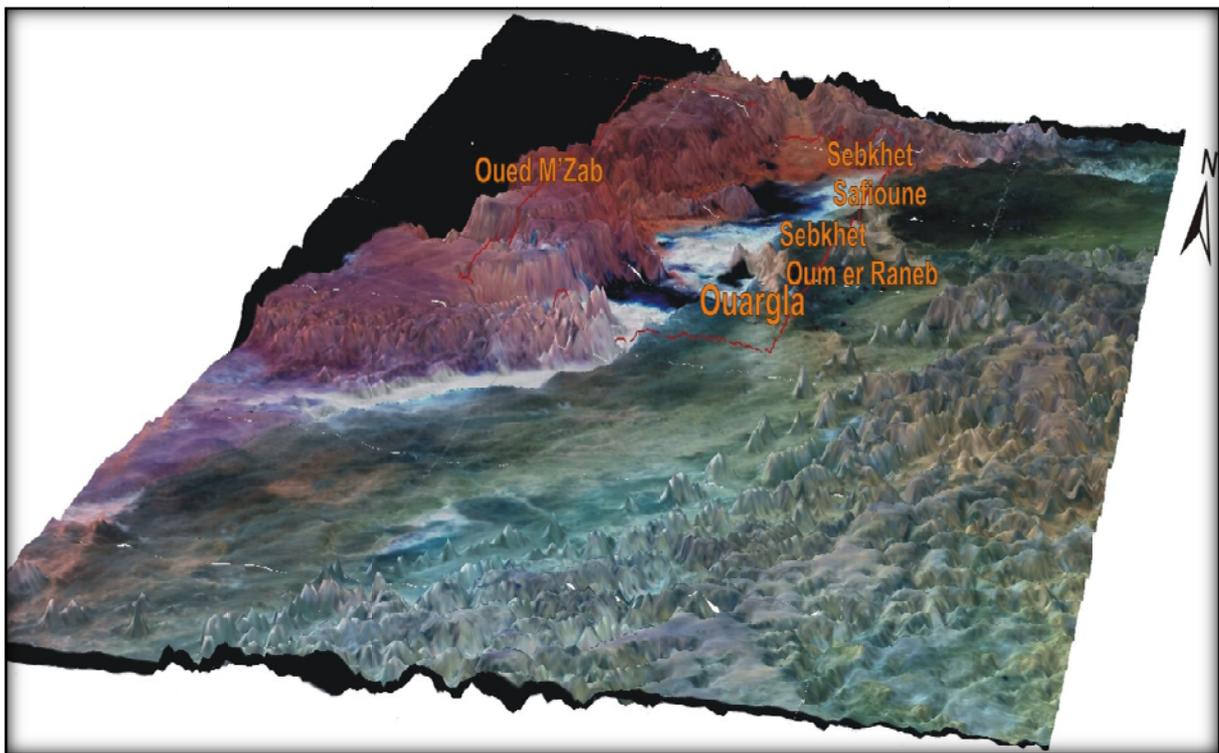


Fig. II-08 : Image satellitaire, bandes 4, 2, 1 sur MNT
(Les hauteurs sont fortement exagérées)

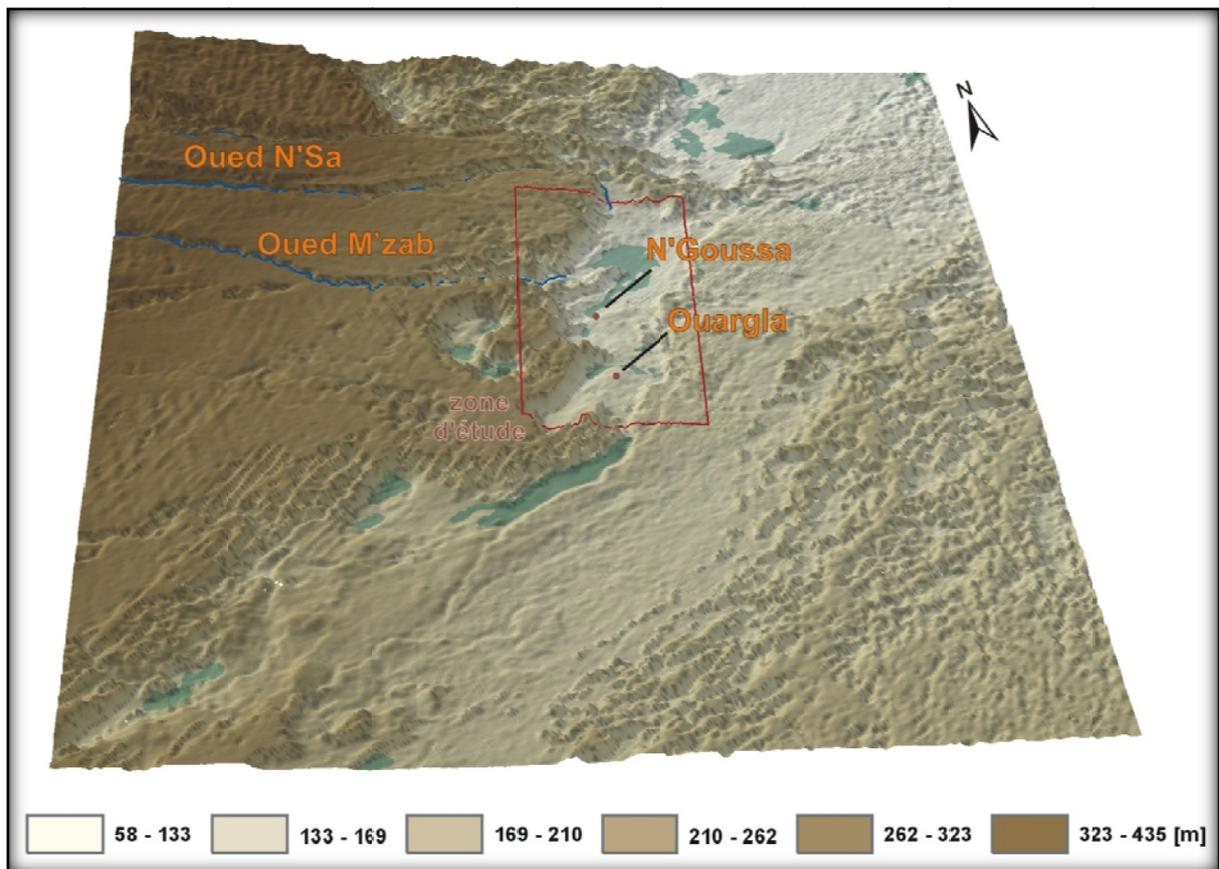


Fig. II-09 : Relief de la région d'Ouargla
(Modèle numérique de terrain – MNT – obtenu par imagerie d'interférométrie radar satellitaire)

La cuvette d'Ouargla est bien visible au centre de la zone étudiée. Les alluvions des oueds N'Sa et Z'Gag ferment la vallée au nord de la Sebket 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 nord-est, en direction de Touggourt et du Chott Melhrir.

Actuellement, les plus grandes crues de l'oued Mya s'arrêtent à 200 km à l'amont d'Ouargla. Celles de l'oued M'Zab atteignent la Sebket Safioune deux fois par siècle, alors que celles de l'oued N'Sa semblent plus fréquentes. (Lors de deux passages en février et en novembre 2002 sur l'oued N'Sa, il a été constaté un écoulement superficiel récent quoique faible dans la partie aval de son cours, dans la région de Hassi Khefif).

Les travaux des archéologues confirment que la dépression de l'oued M'ya n'a été drainée par des cours d'eau qu'à une période très ancienne du Quaternaire et que les sebkhas n'étaient pas fonctionnelles à l'époque néolithique car certains gisements reposent sur elles. Les sebkhas sont apparues au cours d'une période humide antérieure, vraisemblablement le dernier grand pluvial contemporain de la glaciation de Würm. [23]

6 LA PÉDOLOGIE

6.1- Les principaux types de sol dans le Sahara algérienne

Les conditions climatiques sont en effet telles que tous les phénomènes d'altération qui ont pour résultat de transformer la couche superficielle des terrains en une couche meuble bien individualisée, organisée en horizon dotés de leurs caractéristiques physiques propres et d'une activité géochimique ou biochimique originale, sont, au moins aujourd'hui, quasiment inexistantes dans les conditions naturelles. [22]

Faute d'humidité suffisante, les processus fondamentaux de la transformation des roches mères comme l'hydrolyse, la dissolution, l'hydratation même l'oxydation sont réduits à leur plus simple expression. L'absence de végétation ou sa rareté font également que ces sols sont dépourvus de matière organique et d'humus. Ils sont pour toutes ces raisons sensibles à l'érosion, surtout éolienne. Il convient néanmoins de préciser qu'il n'en pas toujours été ainsi qu'il existe au Sahara des paléosols [23] qui se sont constitués à des époques antérieures.

Pour mieux comprendre il nous faut rapidement rappeler le système de classification et les termes utilisés par les pédologues qui ont travaillé sur ces formations. Nous avons pour l'essentiel utilisé la classification française du Service de la carte pédologique [01].

6.1.1- *Lithosols et régosols : des roches et des dunes*

L'immense majorité des formations superficielles est constituée au Sahara par des lithosols, c'est-à-dire par l'affleurement géologique des roches dures à peine fissurées ou délitées sous l'action conjuguée des pluies soudaines et battantes, et bien sûr aussi des changements de température et du grignotage par le vent. [22]

La désagrégation mécanique des granites ou autres roches métamorphiques du Hoggar, celle des grès du Tassili ou du Continental Intercalaire autour du Tadmaït, celle des plateaux calcaires du Turonien et du Sénonien dans la M'zab et ailleurs, celle des dalles quartzites des hamada, ont donné d'immenses champs de rocaïlles et d'empierrements jonchant les plateaux ou couvrant les pentes d'éboulis, dont on peut se demander d'ailleurs si leur formation n'est pas plus ancienne qu'elle paraît. Ces surfaces pierreuses sont toujours polies par l'érosion éolienne et teintées de sombre par la patine désertique. Il faut remarquer que les vrais lithosols sont finalement assez peu répandus et limités aux reliefs, aux rebords de *cuestas* ou aux *batens*.

Dans les parties planes en effet, les roches dures ont presque toujours un léger remblaiement sableux en surface, les particules les plus fines venant colmater les fissures et les fractures [23] ; leurs donne alors le nom de regs autochtones. Ce sont des formations installées sur des surfaces géologiques anciennes, peu épaisses, formées de cailloux issus des roches dures sous-jacentes

qu'il classe dans la catégorie de plaine ou de plateau à nette prédominance sableuse qu'on oppose habituellement aux hamadas quand les dalles rocheuses et les pierres prédominent. Evidemment il existe entre la hamada sableuse et le reg pierreux tous les inter-grades qu'aucune classification n'est en mesure d'intégrer valablement.

Lorsque les roches mères sont elles mêmes tendres et friables comme les grès Mio-pliocène ou même particuliers comme les sables albiens ou les immenses accumulations sableuses des Ergs, les lithosols sont appelés des régosols. Ce sont toujours des formations superficielles non évoluées mais dans ce cas la seule transformation est éventuellement une modification du modelé (rides, barkanes) et un classement des particules par l'action éolienne.

Il se forme enfin ça et là, dans la même catégorie des sols minéraux bruts, sur les marnes et les argiles salées et/ou gypseuses, des horizons de surface pulvérulents, bien connus des camionneurs qui sont appelés *fech-fech* et qui sont dus à la dispersion et à la dessiccation de l'argile.

Quand ces mêmes roches sont soumises à l'action des inondations et des crues, l'horizon de surface d'abord très compact donne après dessiccation des polygones hexagonaux semblables « à des soucoupes retournées » que les auteurs russes ont appelés à l'irrigation. [11]

6.1.2- Regs autochtones et allochtones : des plaines caillouteuses et sableuses

On désigne ainsi les sols qui résultent d'une action de fragmentation et de redistribution mécanique beaucoup plus poussée que les précédents. Ce sont encore des sols minéraux bruts mais qui ont subi un reclassement de leur texture par ablation éolienne ou par apport alluvial et éolien.

Ils sont constitués de particules de taille variable, mais surtout des graviers, des sables le plus souvent siliceux, et des limons. Ils n'ont connu en revanche que peu ou pas d'altération chimique ou biologique.

Les regs recouvrent les immenses surfaces planes des pénéplaines du Sahara central et des plateaux sédimentaires du Tadmait, du Tinhert ou des piémonts sud atlasique. Ils sont toujours un horizon de surface composé de cailloux ou de graviers dégagés par le vent qui protègent de l'ablation éolienne la couche sous-jacente d'éléments plus fins.

Lorsque ce "pavement désertique" [11], est constitué de pierres ou de graviers anguleux, non roulés, surmontant une couche de sable mince qui recouvre la roche mère, on parle de *reg autochtone*, qui se serait donc formé sur place à partir des produits de segmentation de la roche mère.

Si au contraire le "pavement" est composé de graviers moins grossiers que précédemment, roulés par les crues ou très éolisés avec des angles arrondis, et que la couche meuble est plus épaisse avec des éléments plus fins, on considère qu'il s'agit de regs allochtones.

Ceux-ci se sont constitués sur des zones d'épandage avec des matériaux plus tendres et plus fins, d'apport alluvial [23]. Certains de ces regs recouvrent des paléosols dont les cailloux et les graviers peuvent être d'anciens horizons d'accumulation carbonatés ou ferrugineux. On les appelle alors des *regs pédochtones* ; beaucoup des regs recouvrant les piémonts nord sahariens (appelés aussi hélas, *hamadas*) sont des regs *pédochtones*.

A la surface des regs les plus évolués l'autoprotection contre l'ablation éolienne finit par atteindre un point d'équilibre pour lequel les déplacements d'éléments fins deviennent minimes, la couche sous-jacente connaît alors, grâce à sa stabilité un début d'organisation avec parfois, en présence d'une certaine couverture végétale, une légère accumulation de matière organique. [22]

6.1.3- Les sols peu évolués des dépressions alluviales non salées : les meilleures terres agricoles

Ce type de couverture pédologique est particulièrement recherché par les agronomes. Malheureusement ces sols sont beaucoup moins répandus que tous les précédents. On range dans cette catégorie les sols qui tapissent les terrasses alluviales des vallées et le fond des dépressions, petites ou grandes, mais qui sont suffisamment drainées pour éviter la salinisation. La pédogenèse est le résultat du remaniement des apports alluviaux et éoliens par les crues et les inondations. [22]

Dans les vallées ou les zones d'épandage des oueds quaternaires on trouve tous les degrés d'évolution entre le reg allochtone et les sols peu évolués qui sont caractérisés par une richesse plus grande en éléments fins, argiles et limons et en matière organique.

Un des pôles d'évolution étudié par DUTIL (1971) est celui qu'on observe dans les nebkas ou buttes à Tamarix qu'on peut rencontrer dans les vallées d'oueds lorsque des vieux arbres qui s'alimentent dans l'inféoflux se trouvent épargnés. Ces buttes constituées par la fixation des limons de crue et des apports éoliens par le système racinaire de l'arbre renferment une microfaune abondante et contiennent un taux de matière organique de l'ordre de 2 à 3%. Cette proportion est ailleurs beaucoup plus faible. Faute d'une fixation par les plantes ces sols subissent très souvent des transports et des remaniements par le vent. [23]

6.1.4- Les sols halomorphes : croûtes salées, chotts et sebkhas

Les conditions d'aridité sont particulièrement favorables à l'installation des sols halomorphes. Celle-ci suppose en effet deux conditions: d'abord la présence d'une nappe phréatique permanente ou seulement pendant quelques mois de l'année, qui crée des conditions d'hydromorphie, ensuite l'existence d'une source de sodium abondant soit de la nappe, soit de matériaux sédimentaires, soit de l'altération de roches éruptives riches en minéraux sodiques.

Dans son acceptation classique le terme de chott désigne la zone salée entourant la sebkha, qui elle est fond humide de la dépression. Dans le Bas Sahara, on emploie volontiers le seul mot de chott pour l'ensemble de la formation (ex.: les grands chotts tunisiens, le chott de Ouargla), mais dans le Gourara ou le Touat on parle seulement de sebkha: sebkha de Timimoune. [22]

6.1.5- Les regs gypso-salins et les encroûtements anciens : bons pour le plâtre la chaux à bâtir

Les regs gypso-salins sont très fréquents au Bas-Sahara, dans les vallées de l'oued Mya ou de l'oued Rhir, dans le Souf également. Au cours des périodes humides du Quaternaire le gypse a été un très mobile et il tapisse aujourd'hui de cristaux en fer de lance les bas fonds asséchés dans la cuvette de Dzioua par exemple ou dans l'oued Mya.

Il peut aussi constituer des encroûtements constitués d'un enchevêtrement de gros cristaux appelés *louz* dans le Souf et servant de pierre à bâtir. Lorsqu'ils sont particulièrement bien cristallisés ils donnent la célèbre rose des sables qui fait l'objet d'un commerce actif.

Lorsque les cristaux sont plus petits et plus compactes ces formations peuvent s'appeler *tercha* quand la roche est faible, ou encore *tafza* quand elle est plus blanche et plus résistante. Ces deux matériaux servent dans le Souf de matière première pour la préparation du plâtre. Enfin quand il s'agit de bancs très durs et continus on parle de *salsala*, qu'il faut casser à la barre à mine [05, 22]

6.1.6- Les solontchaks et les hypersolontchaks : du deb-deb aux salines exploitables

Lorsque les regs gypso-salins que nous venons de décrire sont soumis à l'action dissolvants des eaux, et c'est le cas dans la plupart des sols irrigués du Bas-Sahara, il s'opère une ségrégation des sels solubles tout à fait caractéristique en l'absence d'un lessivage et d'un drainage suffisants.

Les sels les plus mobiles, les sels sodiques en particulier, vont cristalliser en surface et recouvrir les terres irriguées d'efflorescences blanches, si communes dans les jardins sahariens.

De tels sols sont appelés des *solontchaks* calciques qui s'installent partout au Sahara dans les oasis des pays sédimentaires quand l'eau ou le sol sont salés, ce qui est le cas général.

En conclusion, La particularité des sols du Sahara est leur régime hydrique du type aride. Leur fraction minérale est constituée, dans sa quasi-totalité, de sable. La fraction organique est très faible en général très inférieur à 1 %. Ces sols squelettiques sont très peu fertiles, car leur capacité de rétention en eau est très faible. [21]

Selon G. Toutain les sols sahariens peuvent être classés en trois groupes:

- *Les sols détritiques* : reg, sol sablonneux et graveleux, dune et ergs;
- *Les sols limono-argileux* : terrasses des vallées, zones d'épandage des crues Maader;
- *Les sols salés* : nappe phréatiques salés, sebkhas et chotts.

Selon la classification Française (1956) les sols sahariens peuvent être regroupés en quatre principales classes:

- A. Classe des sols minéraux bruts;
- B. Classe des sols peu évolués;
- C. Classe des sols calci-magnésiques;
- D. Classe des sols halomorphes ou salins.

6.2- La région d'Ouargla:

Selon la carte Pédologiques Simplifiées de l'Algérie, Ouargla situé dans la zone qui est constitué des sols de regs (autochtones, allochtones) : des plaines caillouteuses et sableuses.

Le pays de Ouargla commence au sud de la sebkha du M'zab et s'étend jusqu'aux premières cuestas du plateau de Tinrhert. Le centre de la région avec la ville de Ouargla est aménagé dans la zone dépressionnaire qui borde la sebkha Safiouna vers laquelle débouchent les oueds N'Sa et M'Zab venus du nord-est et le grand oued fossile Mya venu du sud. Cette vallée traverse la région des haouds (cuvettes) dont la surface tabulaire est découpée en d'innombrables petites buttes. Le versant occidental de la vallée est particulièrement marqué formant une falaise en corniche (baten) entaillée dans les sables et les grès calcaires terminant la série continentale du Mio-Pliocène.

Au sud de cette région le Grand Erg Oriental s'étend largement, traversé du nord au sud par le long couloir du Gassi Touil qu'emprunte la route Ouargla - Hassi Messaoud - In Aménas. En dehors du Gassi Touil le Grand Erg est pratiquement impénétrable. Le Gassi Touil est le plus important des couloirs de l'Erg oriental. Il met en relation la cuvette de Hassi Messaoud au nord avec les plateaux du Tinghert au Sud. Il est limité par des alignements dunaires d'orientation Nord/Sud et Nord-ouest/Sud-est, qui dominant de 60 à 100 mètres des dépressions dont le fond est soit sableux, soit composé d'un reg avec des affleurements de croûtes calcaires soumis à une érosion éolienne intense.

Les zones dépressionnaires comme la sebkha Safiouna et surtout le chott de Ouargla sont des zones d'hydromorphie qu'il est impossible de drainer efficacement. L'irrigation et l'exploitation des nappes aquifères alimentent une nappe phréatique très salée et très gênante pour les palmeraies bordières du chott et pour les installations urbaines de Ouargla.

Des études détaillées ont été réalisées en 1993 (Gueddachi et Hassi ben Abdallah sur 6300 ha) et en 1996 (Belhirane et Gassi Touil sur 12000 ha) dans des zones où dominant des sols peu évolués d'apport éolien et des sols peu évolués subdésertiques modaux développés sur des

roches gréseuses, parfois sur des encroûtements calcaires. Ces sols, le plus souvent profonds, sont aptes à l'agriculture irriguée, sous réserve de les irriguer en contrôlant l'évolution de leur salinité liée à la qualité de l'eau utilisée.

Les sols peu évolués d'apport éolien sont des sols de texture de sable grossier. Leur teneur en matière organique est très faible, inférieure à 0.2% dans la majorité des cas. Les teneurs en calcaire sont généralement faibles dans cette région (inférieure à 10%). Les pH sont légèrement basiques. Leur salinité est beaucoup plus variable, souvent faible dans les horizons superficiels et plus importante en profondeur où des valeurs de l'ordre de 10/12 dS/m ont été mesurées sur des extraits saturés. [13]

Donc on peut dire que dans la wilaya de Ouargla on retrouve pratiquement toutes ces classes, leur répartition et localisation dépendent des conditions physiques locales :

- Géologie ;
- Morphologie, topographie ;
- Régime hydrique ;
- Proximité des grand Erg.

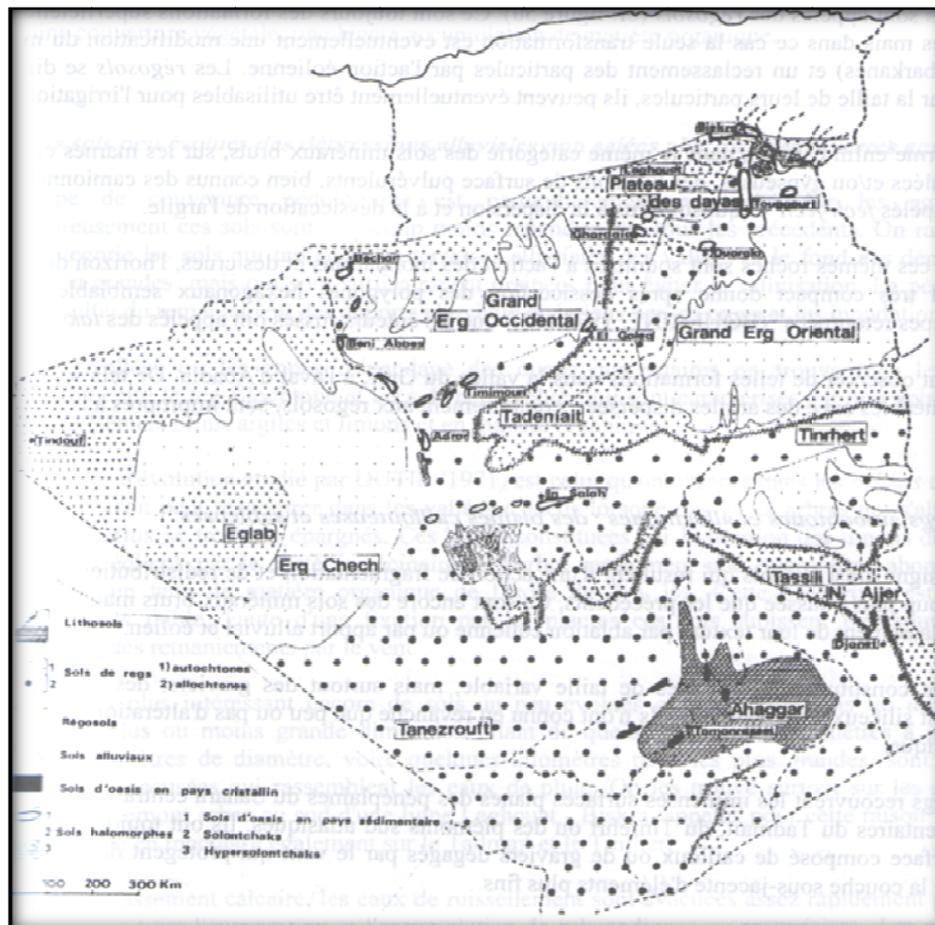


Fig. II-10 : Carte Pédologique Simplifiée du Sahara (D'après Dubos).

6.3- Risque de salinisation

A partir des résultats obtenus de l'analyse de l'image satellitaire [31], ils ont proposé une carte régionale à petite échelle (1/300 000) de risque salinisation en six unités (Fig. 38) :

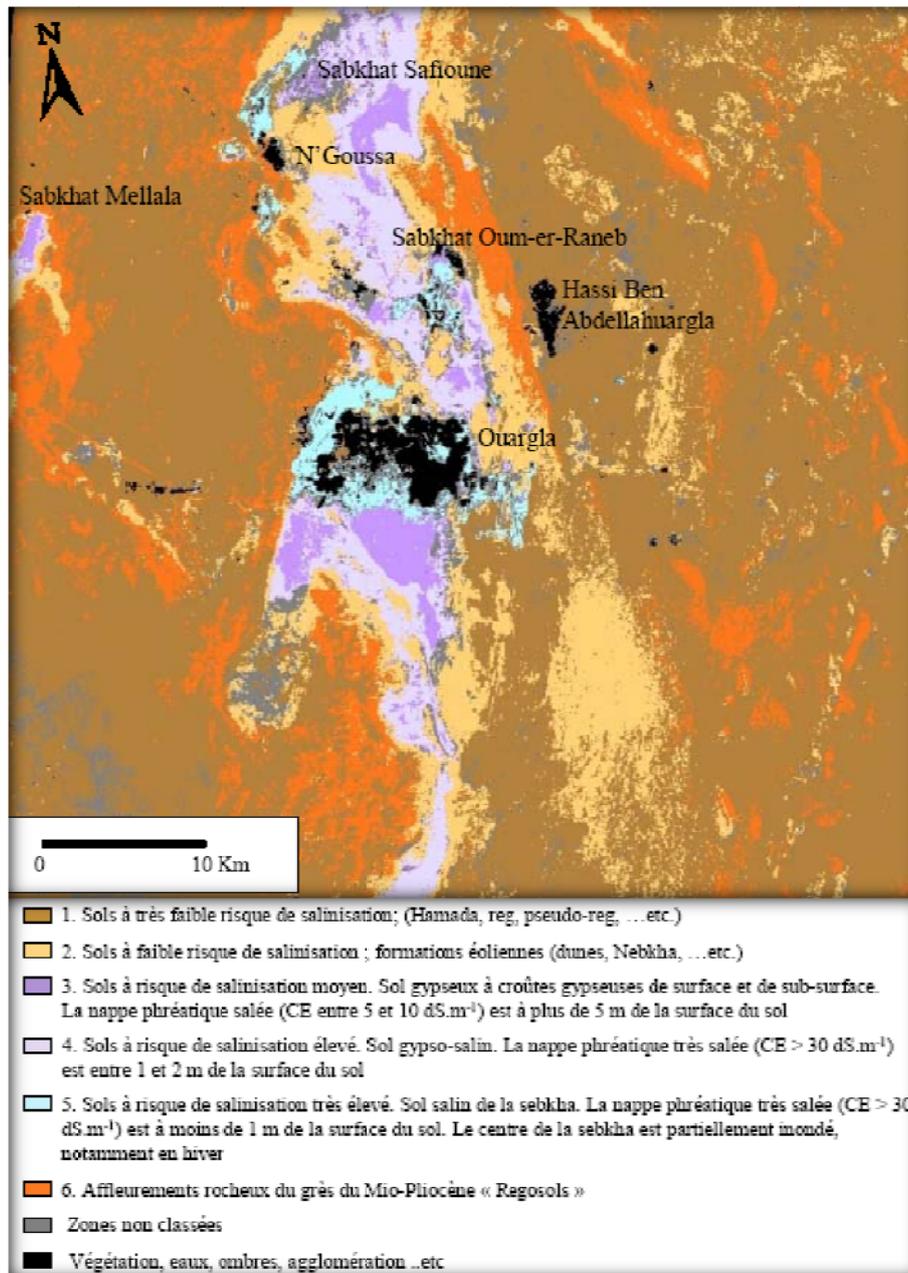


Fig. II-11 : Carte des risques de salinisation

1. Sols présentent un très faible risque de salinisation. Sols quasiment inaptes à la mise en valeurs (Hamada, Reg, pseudo-Reg, ...etc.) « Calcisols yermics ». Certains glacis (en pseudo-Reg) « Arenosols yermics » et « Calcisols calcic » à état de surface graveleux et sable grossier sont mis en culture dans les rives de la vallée de l'Oued Mya. La salinisation est secondaire, issue de l'irrigation.
2. Sols présentent un faible risque de salinisation ; ils correspondent aux formations éoliennes (dunes, Nebkha, ...etc.) « Arenosols hyposalics ».
3. Sols à risque de salinisation moyen : sols gypseux à croûtes gypseuses de surface et de sub-surface « Gypsisols petrogypsic ». La nappe phréatique salée (conductivité électrique CE entre 5 et 10 dS.m⁻¹) est à plus de 5 m de profondeur.

4. Sols à risque de salinisation élevé : Sols gypso-salins à croûte gypseuse de sub-surface « Gypsisols hypergypsic ». La nappe phréatique très salée ($CE > 30 \text{ dS.m}^{-1}$) est entre 1 et 2 m de profondeur. La salinisation secondaire issue de l'irrigation par une eau souterraine salée (nappe du Complexe Terminal à salinité $> 3 \text{ g.l}^{-1}$) s'ajoute à la salinisation primaire.
5. Sols à risque de salinisation très élevé. Sols salins de la sebkha « Solonchaks hypogypsic ». La nappe phréatique très salée ($CE > 30 \text{ dS.m}^{-1}$) est à moins de 1 m de profondeur. Le centre de la sebkha est partiellement inondé par affleurements de la nappe, notamment en hiver. La salinisation secondaire s'ajoute à la salinisation primaire.
6. Affleurements rocheux du grès du Mio-Pliocène « Regosols ».

7 L'OCCUPATION DU SOL DE LA RÉGION D'OUARGLA

Tableau II-02 : Définition des classes de l'image d'occupation du sol

Classe	Classification générale	Classification détaillée	Source
1	Limites de la vallée de Ouargla (oued Mya) Sebkhas Sable et sols nus	Limites ouest	Image satellitaire + données exogènes
2		Pitons rocheux isolés	Image satellitaire + données exogènes
3		Oued Mzab	Image satellitaire
4		Versants	Image satellitaire + données exogènes
5		Limites Est	Image satellitaire + données exogènes
6		Oued N'Sa	Image satellitaire
7		Sable et sols nus	Image satellitaire + données exogènes
8		Sebkhas	Image satellitaire + données exogènes
9		Anciens lits	Image satellitaire
10		Lits actuels	Image satellitaire
11	Zone bâtie	Zone bâtie	Image satellitaire + données exogènes
12	Transport	Routes	Image satellitaire + données exogènes
13		Aéroport	Données exogènes
14	Canalisation	Drains, canaux et conduites	Image satellitaire + données exogènes
15	Eau	Eau	Image satellitaire (+ bande 4)
16	Végétation	Palmeraies clairsemées	Image satellitaire (+ NDVI)
17		Palmeraies	Image satellitaire (+ NDVI)
18		Palmeraies denses	Image satellitaire (+ NDVI)
19		Cultures irriguées	Image satellitaire (+ NDVI)

(NDVI = image d'indice de végétation)

La classe 11 « Zone bâtie » a été tirée directement des données exogènes.

Les classes 12 à 14 « transport » et « canalisation » ont été tirées des données exogènes et complétées par photo-interprétation pour les zones non couvertes par la carte INCT au 1/25'000. Ces différentes classes peuvent être visualisées ensemble ou séparément à la vue « Interprétation SAT ». L'image satellitaire a permis de valider les routes, par contre les pistes ne sont pas suffisamment visibles.

La classe 7 « Sable et sols nus » possède la plus grande extension spatiale. Elle contient différents types de sables et sols nus (sols « clairs »).

Les classes 8, 15 à 19 « Sebkhkas » « Eau », « Palmeraies clairsemées », « Palmeraies », « Palmeraies denses » et « Cultures irriguées » ont été utilisées pour le bilan d'eau au niveau de la zone d'Ouargla

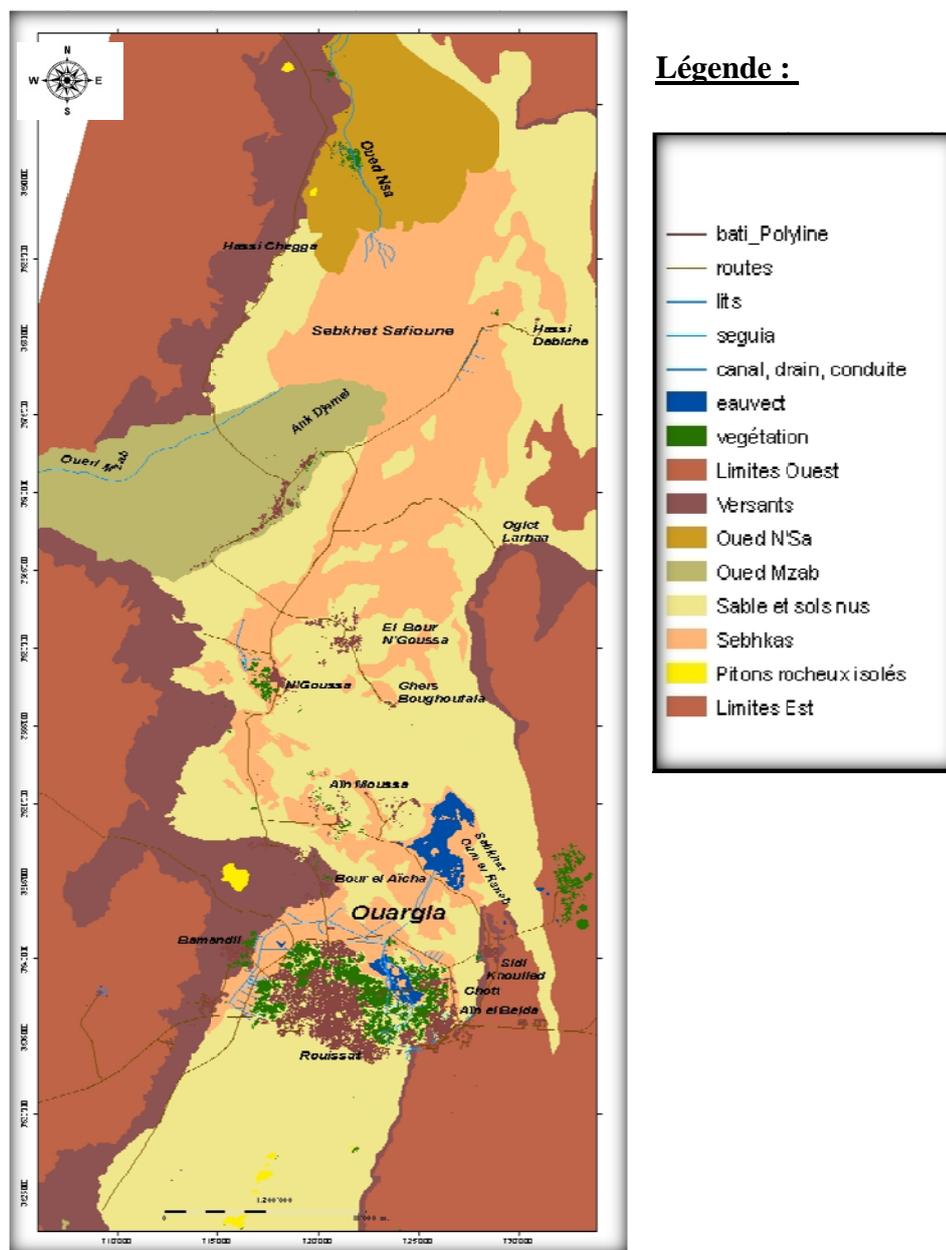


Fig. II-12 : Carte d'occupation du sol

Les superficies d'eau sont de 243 ha au niveau de la zone d'Ouargla et 1 105 ha au niveau de la vallée d'Ouargla, 843 ha correspondant à Oum Raneb.

La palmeraie de la zone d'Ouargla représente 72 % de la palmeraie totale de la vallée.

Tableau II-03 : Surfaces occupées par les classes d'occupation du sol 7, 8, 11, 15-19

Classe	Classification détaillée	Surface totale (hectares)	Surface de la zone d'Ouargla (hectares)
7	Sable et sols nus	55461	3094
8	Sebkhkas	32011	2023
11	Zone bâtie	3214	2354
15	Eau	1105	243
16 - 19	Végétation	3183	2286

Chapitre III :
Ressources hydriques

Chapitre III

Les ressources hydriques

1. HYDRO-CLIMATOLOGIE

L'étude hydro-climatologique a pour objet de ressortir les caractéristiques climatiques en se basant sur les données, mesurées depuis une vingtaine d'années à la station d'Ouargla, qui sont représentative du climat régnant sur notre zone d'étude. Nous analyserons les : températures, précipitations, humidité relative, vitesse du vent, insolation et évapotranspiration.

Les différents sous bassins versants du Sahara algérien ainsi que les principales stations météorologiques actuellement en activité selon la carte (Fig. III-1) basée sur le découpage hydrologique adopté par l'ANRH (agence nationale des ressources hydrauliques).

La zone étudiée appartient au sous bassin n° 04 (Erg Oriental) inclus du grand bassin saharien.

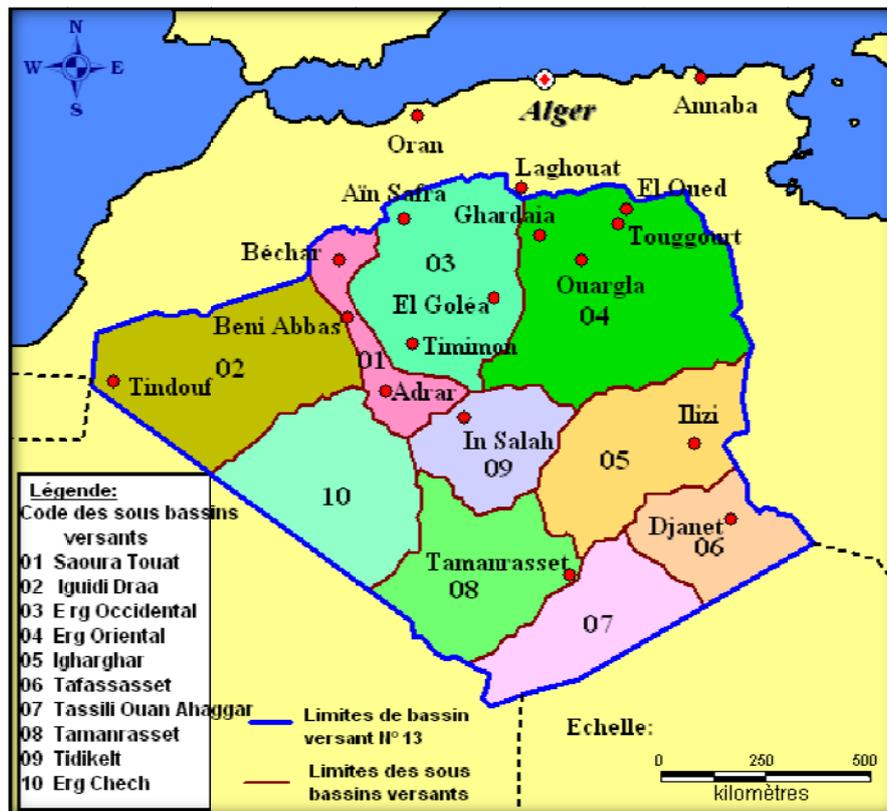


Fig. III-1: Carte des sous bassins versants du Sahara algérien et des stations Météorologiques d'après Cahiers de Sécheresse, No : 1/98 (Internet).

2. ETUDE DES ELEMENTS CLIMATIQUES

2.1- Les températures

Du fait de la pureté de leur atmosphère et souvent aussi de leur position continentale, les déserts présentent de forts maximums de température et de grands écarts thermiques.

Le sol s'échauffe beaucoup plus que l'air pendant la journée et sa température est, par la suite, nettement plus forte; sa surface est souvent à 60°C tandis que les couches d'air immédiatement voisines sont à 30°C seulement. Mais cet échauffement n'atteint pas la profondeur du sol: à 20 ou

25 cm, les variations diurnes deviennent insignifiantes et la température ne dépasse guère 30°C, ce qui permet la vie de nombreux animaux fouisseurs.

2.1.1- Les températures moyennes mensuelles

Durant les 28 ans, (1978 – 2005) on remarque que l'année hydrologique dans la région d'Ouargla est subdivisée en deux périodes:

Une période relativement froide allant du mois de novembre au mois d'Avril avec une température minimal au mois de Janvier (11.65°C), la température moyenne dans cette période est de (15.44°C). Une seconde période chaude du mois de Mai au mois d'Octobre avec un maximum au mois de Juillet (34.4°C), la température moyenne de cette période est (30.07°C).

La température de la station d'Ouargla est toujours relativement élevée que les deux autres stations (Touggourt & Ghardaïa). (Fig. III-2)

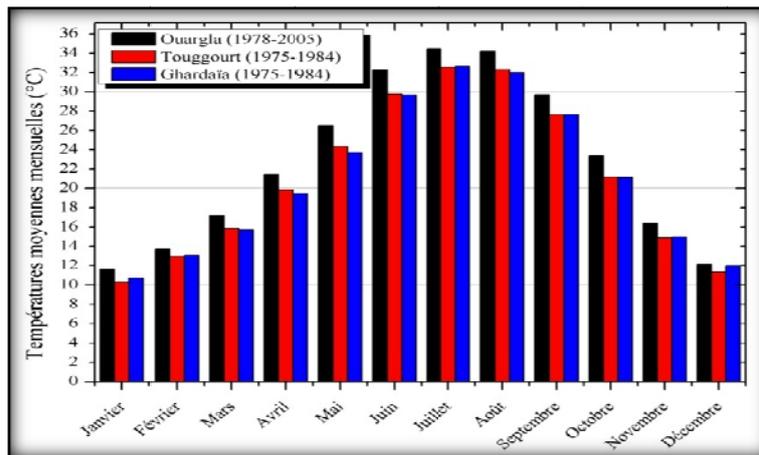


Fig. III-2: Les températures moyennes mensuelles

2.1.2- Les écarts et les extrêmes des températures

Notons que la température moyenne annuelle est de (22.75°C) avec des écarts élevés compris entre 11.69°C et 16.03°C, les plus importants se situent entre les mois de Mai et Août: 16°C – 15.82°C.

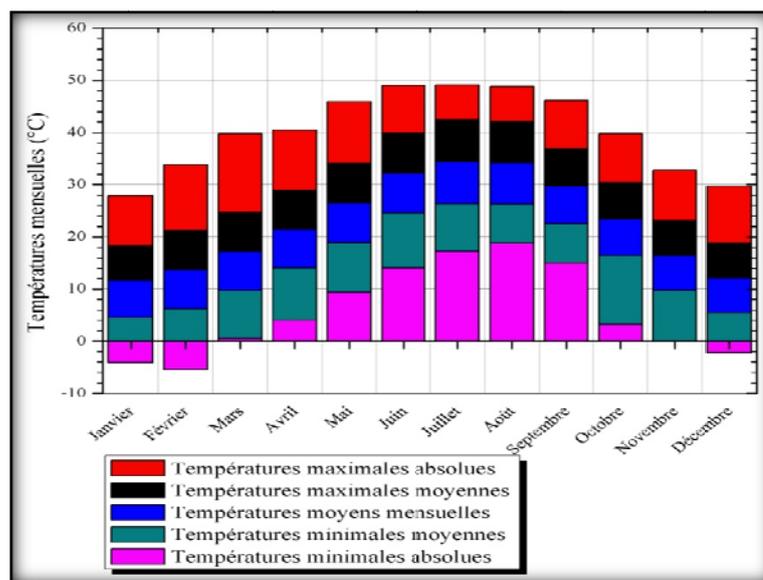


Fig. III-3: Les températures moyennes mensuelles

2.2- Les précipitations

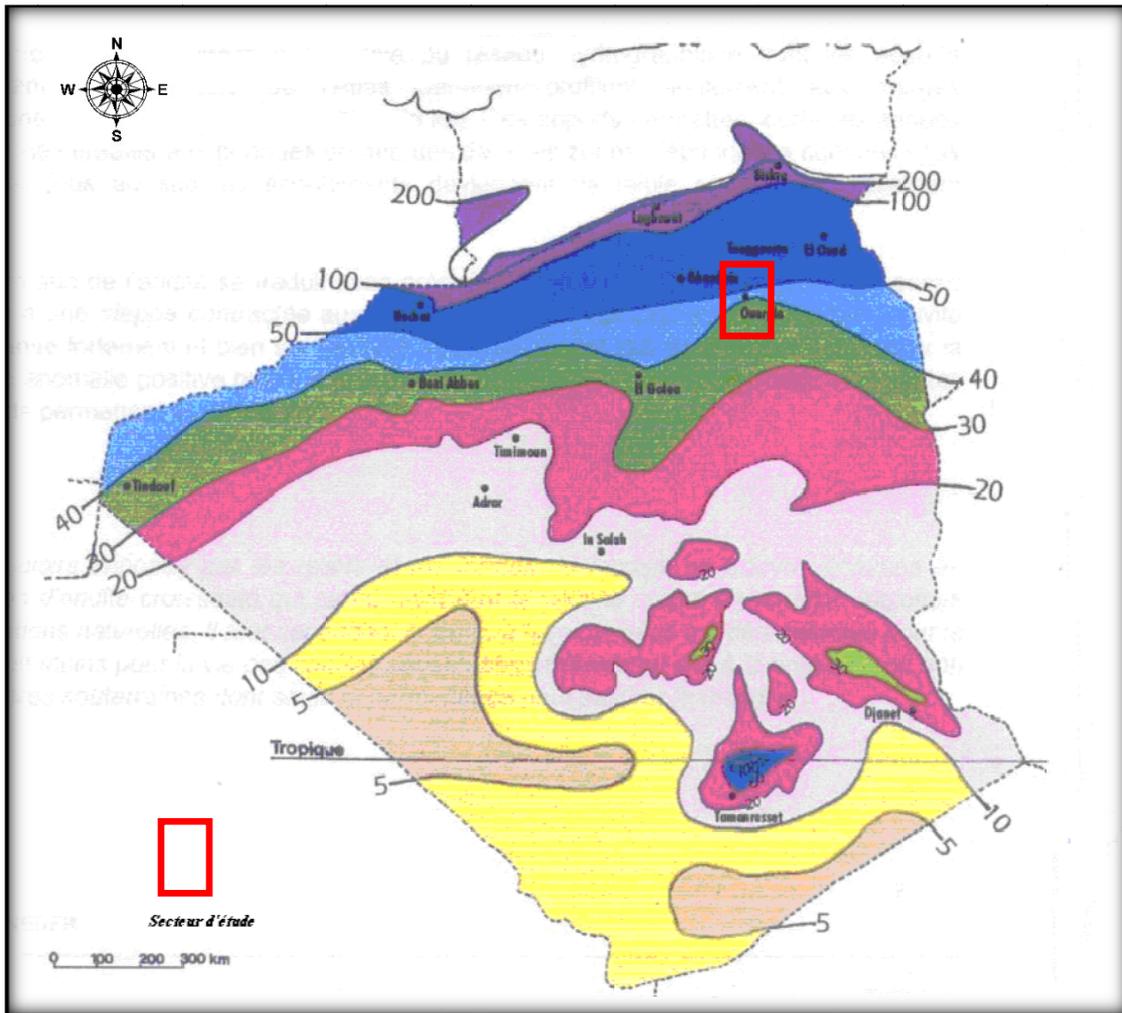


Fig. III-4: Les Isohyètes de la moyenne des précipitations annuelles du Sahara de l'Algérie D'après J. DUBIEF Le climat du Sahara 12; 1963

2.2.1. Les précipitations moyennes mensuelles

L'analyse de ces données (Fig. III-5) nous montre une période de pluies allant du mois d'Octobre au moi de Mars (Janvier: 6.6 mm, Mars: 9mm), et une période sèche sur le reste de l'année avec une absence presque totale des précipitations aux mois de Juillet et Août.

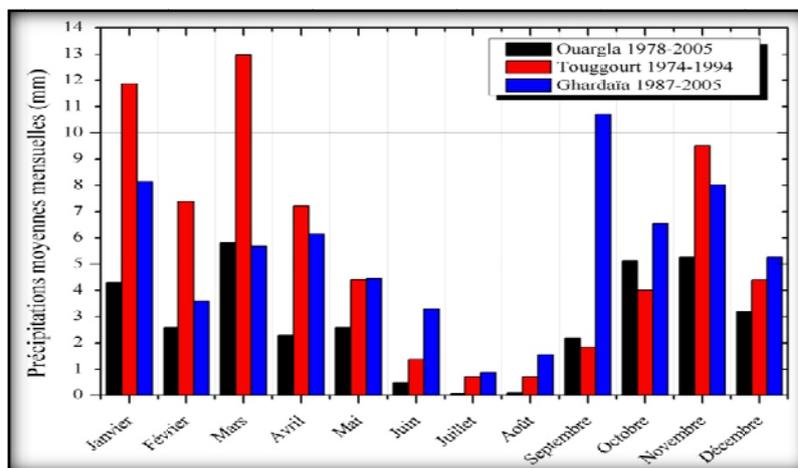


Fig. III-5: Les précipitations moyennes mensuelles

2.2.2. Les précipitations moyennes annuelles

Sur une période de 29 ans (1977 – 2005), on a calculé la moyenne annuelle des précipitations, elle est de 36.92 mm. On remarque que l'année la plus pluvieuse 2004 (117.2 mm) est précédé de l'année la plus sèche 2001 (5.9 mm). (fig. III-6).

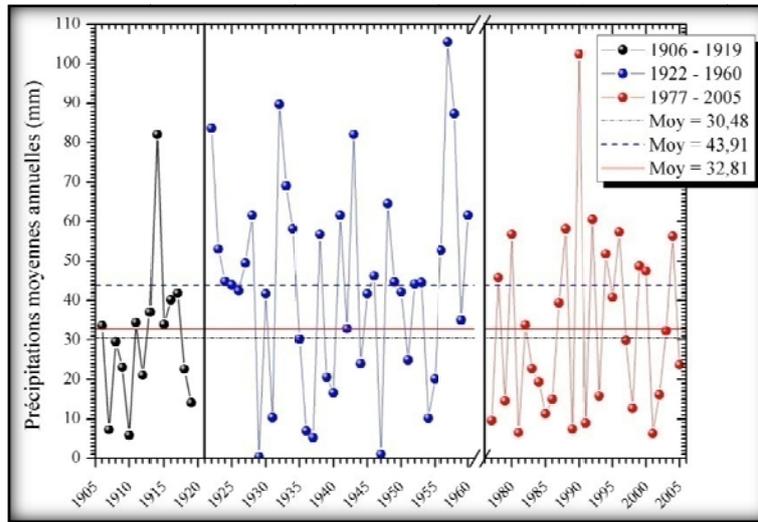


Fig. III-6: Les précipitations moyennes annuelles

2.3- L'humidité relative

L'humidité relative est le rapport entre la tension de vapeur d'eau « e » et la tension de vapeur saturant « ew » à la même température exprimé en % « $U = e / ew * 100$ ».

D'après l'humidité moyenne de chaque mois, on remarque que l'humidité maximale correspond entre les mois de Janvier et Décembre (64.50 % et 65.13%). Cette valeur est parfois les caractéristiques importantes du climat.

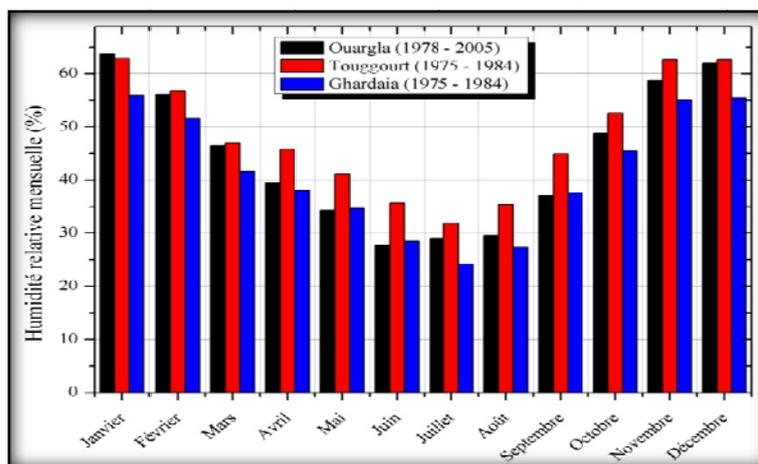


Fig. III-7: Humidité moyennes mensuelles en % (1990 – 2005)

Le vent est un phénomène continu au désert ou il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense grâce aux particules sableuses qu'il transporte, et contrepartie une sédimentation également importante qui se traduit par la formation de dunes. Des vents atteignant 100 Km/h sont un phénomène normal, l'air reste obscurci des journées entières par le vent de sable et les particules minérales peuvent être soulevées jusqu'à 1 500 mètres de haut par des trombes. Indépendamment de l'action mécanique que le vent exerce sur les végétaux dont il déchire les parties aériennes, il agit surtout en accentuant l'évaporation.

Dans la région d'Ouargla les vents soufflent du Nord-est et Sud. Les vents les plus fréquents en hiver sont les vents d'Ouest tandis qu'au Printemps les vents du Nord-est et de l'Ouest dominent en été ils soufflent du Nord-est et en automne du Nord-est et Sud-ouest [20].

D'après les données de l'O.N.M. (2006) pour la période de (1990 – 2005) les vitesses de vents assez importants sur toute la période estivale (Avril – Juillet) avec un maximum entre le mois de Mai et Juin (9.05 et 8.98 m/s).

2.4- La vitesse du vent

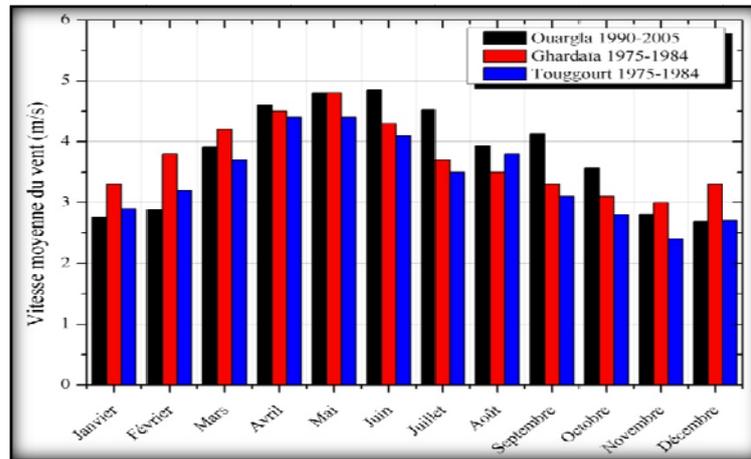


Fig. III-8: Moyenne mensuelle des vitesses de vent

2.5- La durée d'insolation

En raison du peu de nébulosité de l'atmosphère, les déserts reçoivent une quantité de lumière solaire relativement très forte. En exprimant la nébulosité moyenne en dixièmes (le ciel couvert étant compté pour dix dixièmes), on observe au Sahara le nombre d'heures annuelles de soleil est de 3 000 à 3 500. Cette forte luminosité est un facteur favorable pour l'assimilation chlorophyllienne, mais elle a en revanche un effet desséchant car elle augmente la température.

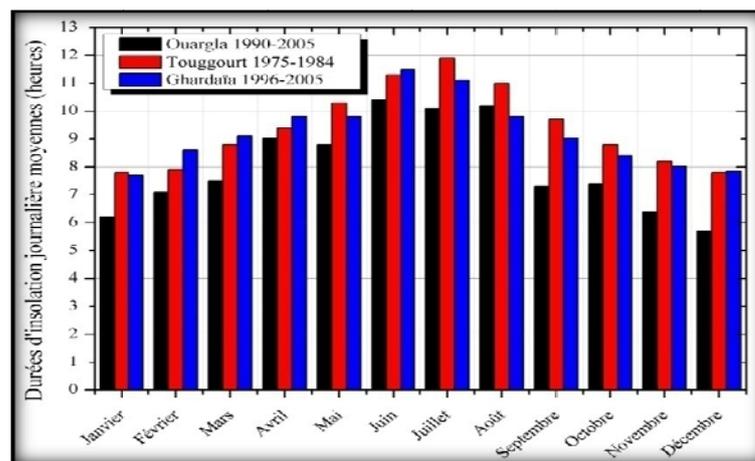


Fig. III-9: Insolation moyennes mensuelles

L'ensoleillement est considérable à Ouargla. Car l'atmosphère présente une grande pureté durant toute l'année, avec 138 jours en moyenne de l'année où le ciel est totalement clair [44]. La durée moyenne de l'insolation est de 265.85 heures/mois, avec un maximum de 342.46 heures en Juillet et un minimum de 216.72 heures en mois de Février. La durée d'insolation moyenne annuelle entre 1978 et 1999 est de 3190.17 heures/an, soit environ 9 heures/jour.

2.6- Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN

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

Ce diagramme montre que pour un climat saharien (tableau.8), il n'y a pas de période humide, et que toute l'année est déficitaire (*Fig.III-10*).

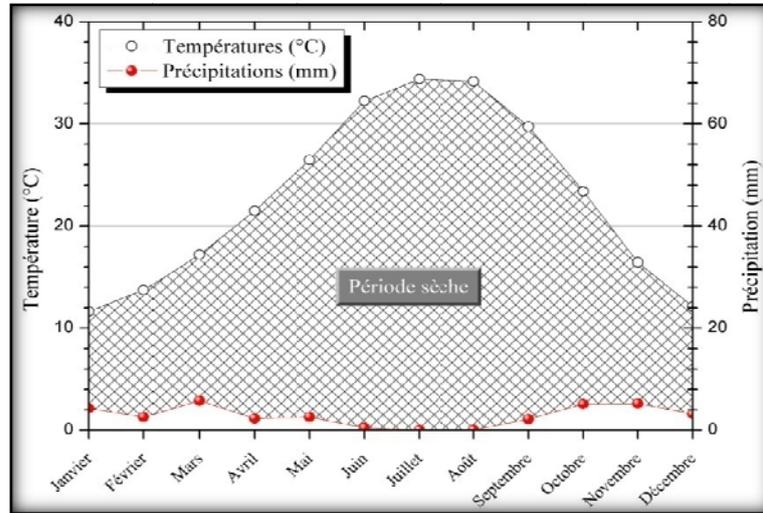


Fig. III-10: Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN de la région d'Ouargla

2.7- Indice d'Aridité de DEMARTONNE

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

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

Avec :

P : les précipitations moyennes annuelles.

T : la température moyenne annuelle.

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

$$I = \frac{6.46}{21.62 + 10} = 0.20$$

Tableau III-01 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE

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

Tableau III-02 : Indice d'Aridité de DEMARTONE.

Mois	Jan	Fév	Ma	Av	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
P mm	15.02	5.98	10.64	6.05	4.47	1.62	1.05	1.61	5.4	10.36	9.27	6.04
T C°	10.16	12.74	16.11	20.25	25.47	30.78	33.27	32.93	28.86	22.21	15.49	11.22
I = P/T+10	0.75	0.24	0.43	0.18	0.13	0.03	0.02	0.03	0.16	0.31	0.37	0.30

2.8- L'évapotranspiration

L'évaporation est un phénomène physique qui augmente avec la température, la sécheresse de l'air et l'agitation de cet air (on sait par exemple que le linge sèche d'autant plus vite qu'il fait plus chaud et qu'il y a davantage de vent). Ce terme représente la restitution de l'eau de la surface terrestre sous forme de vapeur, à l'atmosphère et sous des conditions climatiques et physiographiques. Ces conditions sont pratiquement toujours remplies au Sahara et de ce fait l'évaporation atteint une ampleur considérable. En supposant le cas théorique d'une nappe d'eau libre qui serait constamment alimentée, on a pu mesurer que la tranche d'eau évaporée annuellement dans le Sahara algérien serait de 3 à 5 mètres environ suivant les localités, c'est-à-dire une valeur infiniment plus forte que la tranche d'eau qui tombe sur le sol lors des pluies.

L'évapotranspiration est le point le plus délicat à évaluer. Contrairement aux pluies ou aux écoulements qui peuvent faire l'objet d'une approche quantitative satisfaisante, bien que peu précise, il est actuellement très difficile de mesurer directement le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

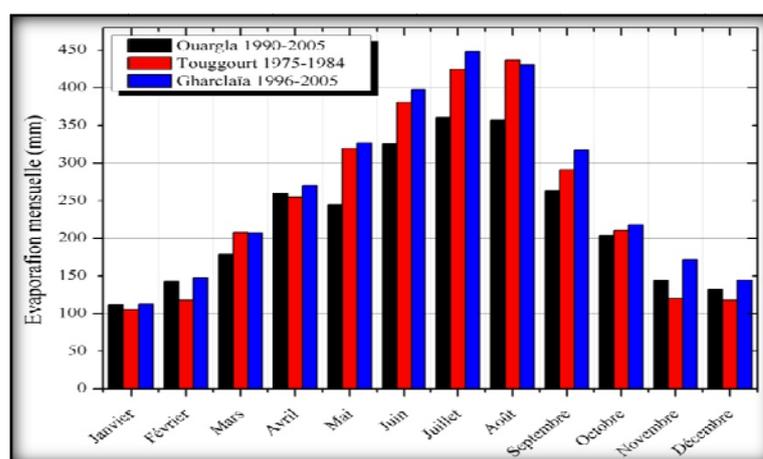


Fig. III-11: Les évaporations moyennes mensuelles

L'évapotranspiration dépend de nombreux facteurs:

- Température du sol, de l'air et de l'eau;
- Hygrométrie de l'air;
- Etat et quantité d'eau contenue dans le sol;
- Rayonnement solaire;
- Vent et pression atmosphérique;
- Nature et état de la végétation;
- Topographie et exposition.

Diverses formules permettent d'évaluer l'évapotranspiration. Il convient de différencier l'évapotranspiration potentielle ETP, qui est la quantité d'eau théoriquement évaporable par une surface d'eau libre, [26]

L'évapotranspiration réelle (ETR) qui correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée; et l'évapotranspiration réelle ETR, qui est la quantité d'eau réellement évaporée et qui dépend des conditions naturelles (Végétation, nature du sol,...).

2.8.1. Calcul de l'ETP

L'ETP peut être évaluée à l'aide de nombreuses formules (Thornthwaite, Turc, Primault, Penman, FAO-Penman-Monteith...), nous avons appliquée la formule de Thornthwaite. [21]

➤ Formule de Thornthwaite

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

$$ETP = 16 * (10 t/I)^n * K$$

Avec:

$$I = (t/5)^1 \text{ et } I = \sum i$$

$$a = (1.6/100) I + 0.5$$

t : est la température moyenne mensuelle du mois considéré;

ETP : est l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau);

K : est un coefficient d'ajustement mensuel il est fonction du mois et de la latitude (L=32°).

Tableau III-03 : ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHTWAITE a la station d'Ouargla (1988-2005).

Mois	Températures (°C)	i	K	ETP corrigée (mm)
Janvier	12,9	4,14	0,89	14,6672
Février	13,5	4,44	0,86	15,5488
Mars	17,15	6,35	1,03	34,7728
Avril	21,55	8,95	1,08	64,8
Mai	26,6	12,27	1,19	121,6656
Juin	32,15	16,3	1,19	198,968
Juillet	34,8	18,36	1,21	245,872
Août	34,55	18,16	1,15	229,448
Septembre	31,8	16,03	1,03	167,1072
Octobre	24,5	10,84	0,98	81,6928
Novembre	20,95	8,57	0,88	48,9984
Décembre	12,2	3,81	0,87	12,2496
Moyenne annuelle	23,55416667	128,22		102,9825

Source: O.N.M.

La valeur de l'évapotranspiration potentielle annuelle trouvée est de 1235,79 mm pour un indice thermique annuel (I = 128.22).

Donc on peut distinguer que:

L'évapotranspiration potentielle (ETP) qui correspond à la quantité qui pourrait être évaporée et transpirée si le sol contenait en permanence une quantité d'eau suffisante.

L'évapotranspiration réelle (ETR) qui correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée;

2.8.2. Calcul du bilan hydro-climatique

Tableau III-04 : ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORN-THWAITE a la station d'Ouargla (1988-2005).

Mois	P	ETP	P-ETP	RU=100	ETR	PEF	DEF
Janvier	4,30	112,15	-107,85	0	104,30	0	-7,85
Février	2,60	142,7	-140,10	0	2,60	0	-140,10
Mars	5,80	178,8	-173,00	0	5,80	0	-173,00
Avril	2,30	260	-257,70	0	2,30	0	-257,70
Mai	2,60	244,7	-242,10	0	2,60	0	-242,10
Juin	0,50	325,6	-325,10	0	0,50	0	-325,10
Juillet	0,06	360,7	-360,64	0	0,06	0	-360,64
Août	0,11	357,15	-357,04	0	0,11	0	-357,04
Septembre	2,19	263,16	-260,97	0	2,19	0	-260,97
Octobre	5,13	203,8	-198,67	0	5,13	0	-198,67
Novembre	5,25	143,92	-138,67	0	5,25	0	-138,67
Décembre	3,19	132,15	-128,96	0	3,19	0	-128,96
TOTAL	34,03	2724,83		0	134,03	0	-2590,8

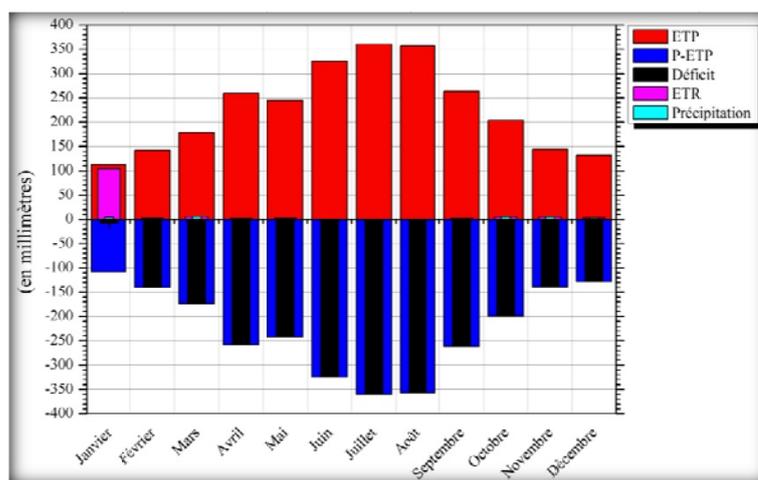


Fig. III-12: Le bilan hydro-climatologique de la région de Ouargla

2.9- CONCLUSION

Donc on peut dire que les précipitations de la région d'Ouargla sont très faibles de l'ordre de 36.92 mm/an et le régime climatique de type aride. La température moyenne annuelle est de 22.7°C avec des écarts importants entre le jour et la nuit: 16.03°C.

La distribution mensuelle des précipitations au cours des 29 ans (1977 – 2005), montre que la période pluvieuse correspond aux mois allant d'Octobre à Avril; et la saison sèche du mois de Mai à Septembre.

3. HYDROGEOLOGIE

Les eaux souterraines constituent un facteur important, influant sur le comportement géotechnique des roches et l'utilisation des terrains. Ce facteur n'est pas indépendant des autres, puisque les caractéristiques des eaux souterraines dépendent de la perméabilité des roches dans lesquelles elle se trouve, donc de leur texture, de leur structure et de leur fissuration ainsi que de leur composition chimique, c'est-à-dire de leur nature et de leur état. Les eaux souterraines jouent, de plus, un rôle primordial dans le développement de certains phénomènes géologiques: instabilité de pente, phénomènes de dissolution, de tassement et de gonflement de certaines roches. Il n'est pas étonnant que les conditions hydrogéologiques puissent être étudiées indirectement à partir de l'étude d'autres facteurs en particulier de la géomorphologie [45]

Les terrains du Bas-Sahara assurant l'infiltration et la circulation souterraine des eaux sont essentiellement représentés par les formations sablo-gréseuses du Continental intercalaire, les bancs de calcaires marins du Cénomano-Turonien et du Sénonien-Eocène, les accumulations sableuses fluvio-lacustres du Tertiaire continental (16). Le banc Cénomano-turonien contient une nappe dont les zones d'alimentation se situent à la périphérie du bassin, dans les régions où affleure la formation. Les eaux circulent dans les calcaires, en direction des parties basses de la cuvette, sous le toit imperméable des argiles du Sénonien inférieur qui peut atteindre une épaisseur de 300 mètres. Malgré cette disposition favorisant une mise en charge des eaux, les calcaires du Cénomano-Turonien ne sont pas exploités dans le Bas-Sahara, car leurs couches plongeantes ne peuvent être atteintes qu'après la traversée de 500 à 600 mètres de morts-terrains au moins et leur fissuration faible ou inexistante, s'opposant à une bonne circulation des eaux, n'assure qu'une productivité très aléatoire.

Généralement on peut dire que Le grand bassin sédimentaire du Sahara septentrional contient trois principaux aquifères. [50]

- A la base la nappe du continental intercalaire: l'un des plus grands réservoirs captifs du monde ;
- Au milieu la nappe du complexe terminal ;
- Au sommet Les nappes phréatiques.

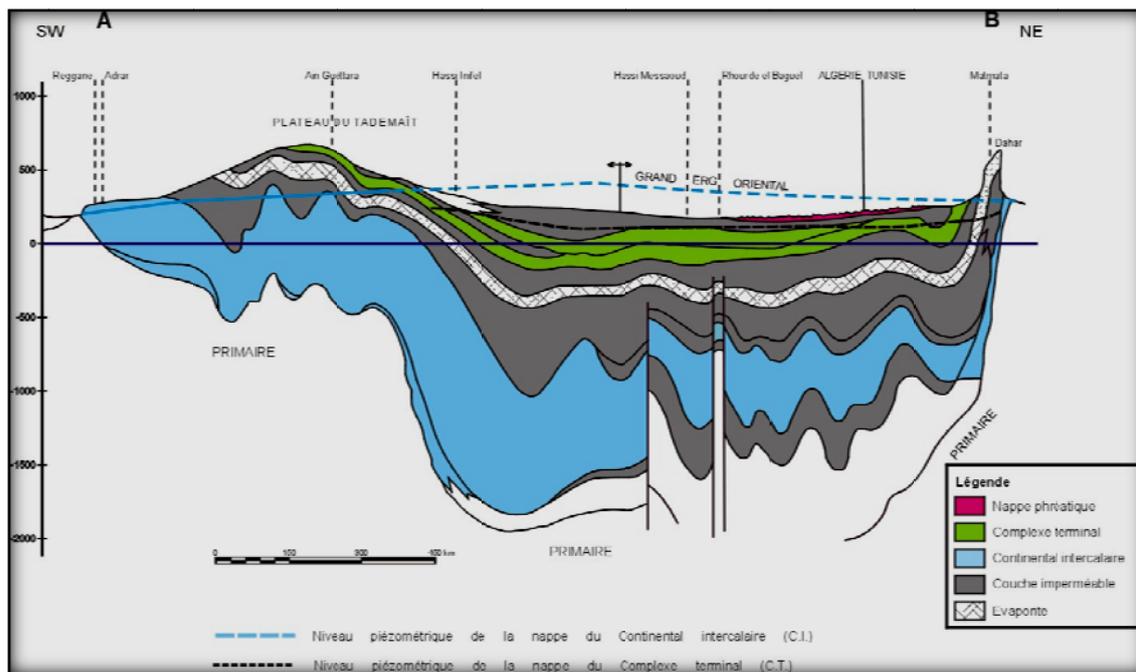


Fig. III-13: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)

3.1- Nappe du continentale intercalaire (C. I.)

Le réservoir du C.I. est contenu dans les formations continentales du crétacé inférieur (Barémien et Albien), Composé essentiellement de grès, sables et argiles. Le réservoir s'étend sur environ 600 000 km², il est continu du Nord au Sud depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili et le Hoggar, d'Ouest en Est depuis la vallée de la Saoura jusqu'au désert libyen. Au Nord-est de la dorsale du M'Zab, le toit de l'aquifère, constitué d'argiles et d'évaporites du Cénomaniens, est continu sur tout le bassin [50]

La profondeur augmente du Sud au Nord, de 1000 m au bas Sahara, à 2000 m sous les chotts, provoquant ainsi une forte charge de la nappe sur tout le bassin oriental. Le substratum est constitué de formations argilo-sableuses et argileuses ou carbonatées d'âge de plus en plus récent du Sud vers le Nord [29]

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

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

Les eaux en provenance du Nord-Ouest se divisent sur l'axe de la dorsale du M'zab approximativement suivant deux directions, une partie s'écoule vers le Sud et le Sud-ouest (Gourara, Touât et Tidikelt), et l'autre partie s'écoule suivant une direction Ouest-Est vers le golf de Gabes qui constitue son exutoire naturel. Les eaux en provenance du plateau du Tinrhert s'écoulent vers le Nord-est sous l'Erg Oriental en direction de l'exutoire de Tunisie. Sur la région d'Ouargla, la nappe de C.I est captée à une profondeur comprise entre 1300 et 1400 m, le débit exploité par forage est de 100 l/s, en moyenne. Les forages captant cette nappe sont au nombre de 2 et fournissent un débit annuel de 7 Hm³ densité essentiellement à l'alimentation en eau potable des agglomérations de Rouissat et Ain El Beida, et caractérisée par une transmissivité de 8.10^{-3} m²/s et un coefficient d'emménagement de 10^{-3} m²/s [50, 30]

3.2- Nappe du complexe terminal (C.T.)

Le système aquifère du complexe terminal couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional sur environ 350 000 Km². Le terme "nappe du complexe terminal" regroupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes. Cette nappe peut circuler dans l'une ou encore dans les deux formations litho-stratigraphiques suivantes [50, 29]:

- Le Sénonien et l'Eocène carbonatés.
- Le Mio-Pliocène sableux.

La première carte piézométrique de la nappe du complexe terminal a été établie et publiée par [16]. Elle a été reprise et complétée par J.AILLAIRE à l'aide des renseignements fournis par les forages pétroliers lors de l'étude de (50). Cette même carte a été révisée et complétée grâce à la densité des forages pétroliers et hydrauliques. Les axes et les directions d'écoulement sont indiqués sur cette carte piézométrique. L'allure des isopièzes montre que la nappe peut être alimentée par les zones de bordures suivantes :

3.2.1- Alimentation à partir de l'Atlas saharien

Entre Biskra et la frontière tunisienne, les courbes isopièzes sont parallèles à l'Atlas, l'alimentation peut avoir deux origines :

- A travers la flexure Sud-atlasique.
- Par infiltration des crues des Oueds à l'aval de l'accident atlasique.

3.2.2- Alimentation par le plateau du Tademaït et Tinrhert

Les eaux qui s'infiltrent sur le plateau de Tademaït et du Tinrhert, s'écoulent vers le Nord et convergent vers l'exutoire principal : la zone des chotts Merouane et Melrhir.

3.2.3- Alimentation par les monts du M'Zab

Le réseau très dense des Oueds du versant oriental du M'Zab joue un rôle important dans l'alimentation de la nappe des sables Mio-Pliocène lors des crues exceptionnelles (crues de Oued N'sa et M'Zab qui atteignent Sebkhet Safioune au Nord de la cuvette).

Les exutoires sont constitués principalement par les grandes cuvettes d'évaporation : chotts Melrhir et Merouane [50, 29].

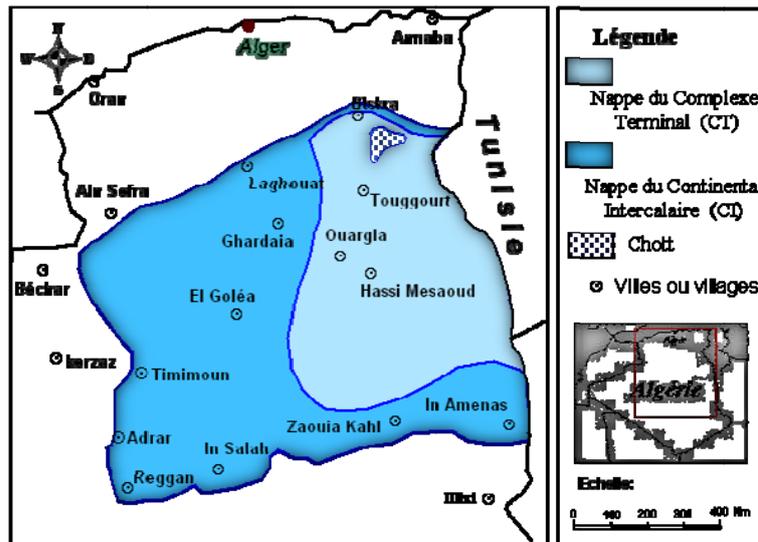


Fig. III-14 : Carte des ressources en eau souterraines (continentale intercalaire et complexe terminal), extrait de recueil des communications, 2002

3.3- Nappe superficielle (phréatique)

Les nappes phréatiques sont partout présentes au Sahara et se situent généralement dans les zones de dépressions ou les vallées, elles sont alimentées par les pluies, les crues, les eaux de drainage et aussi très souvent par les remontées naturelles (sources) en provenance des aquifères plus profondes ou encore par les fuites dans les ouvrages exploitants ces dernières.

Ces ressources superficielles sont importantes dans tout le Sahara, elles permettent d'irriguer les petites palmeraies, les jardins légumiers et d'abreuver les troupeaux et leurs propriétaires.

Les profondeurs des nappes dites libres au Sahara varient entre 1 et 60 m, sauf dans la région des Ziban où elle peut atteindre les 150m, le résidu sec est très variable selon les zones.

Le recours aux eaux souterraines plus profondes par la multiplication des forages d'exploitation captant les aquifères du CI et du CT destinés aux besoins d'irrigation et d'alimentation en eau potable a accéléré la remontée des niveaux hydrostatiques de nappes phréatiques. Cette situation d'excès d'eau a perturbé l'écosystème oasien et a engendré des problèmes environnementaux nuisibles notamment pour l'agriculture (salinité des sols, dégradation des palmeraies par asphyxie, inondation des ghouts,...).

En outre, l'extension de l'urbanisation dans certaines agglomérations sus-alimentées en eau (plus de 450 l/j/ habitant) mais insuffisamment couvertes par des réseaux d'assainissement est à l'origine de la formation de lagunes et de la remontée des eaux. Des parties des villes d'Ouargla et d'El Oued subissent depuis plusieurs années les conséquences néfastes de la remontée des nappes phréatiques.

La nappe phréatique est exploitée seulement à l'ouest, au nord d'Ouargla et aussi au sud de l'erg occidental par la technique similaire au ghout (creusement de cratère dans le sable), [51]

3.3.1- Généralité sur la Nappe phréatique de la région d'Ouargla

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

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

Cette nappe a connu une remontée du niveau d'eau ayant provoqué de graves problèmes d'écologie dans les zones urbaines et agricoles. Ce phénomène a engendré des affaissements de terrain et la création d'un milieu anaérobique néfaste pour les cultures et le palmier.

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

La forte salinité est due essentiellement au lessivage des formations gypseuses et argileuses par les eaux de la nappe, tandis que la faible minéralisation est due à la dilution par les eaux d'irrigation provenant des nappes sous jacentes et à l'absence de niveaux gypseux dans la formation sableuse qui caractérise la nappe phréatique.

Une des causes principales de la remontée des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla est d'ordre morphologique, une topographie très plane conjuguée à un manque d'exutoire naturel. L'alimentation de la nappe provient essentiellement :

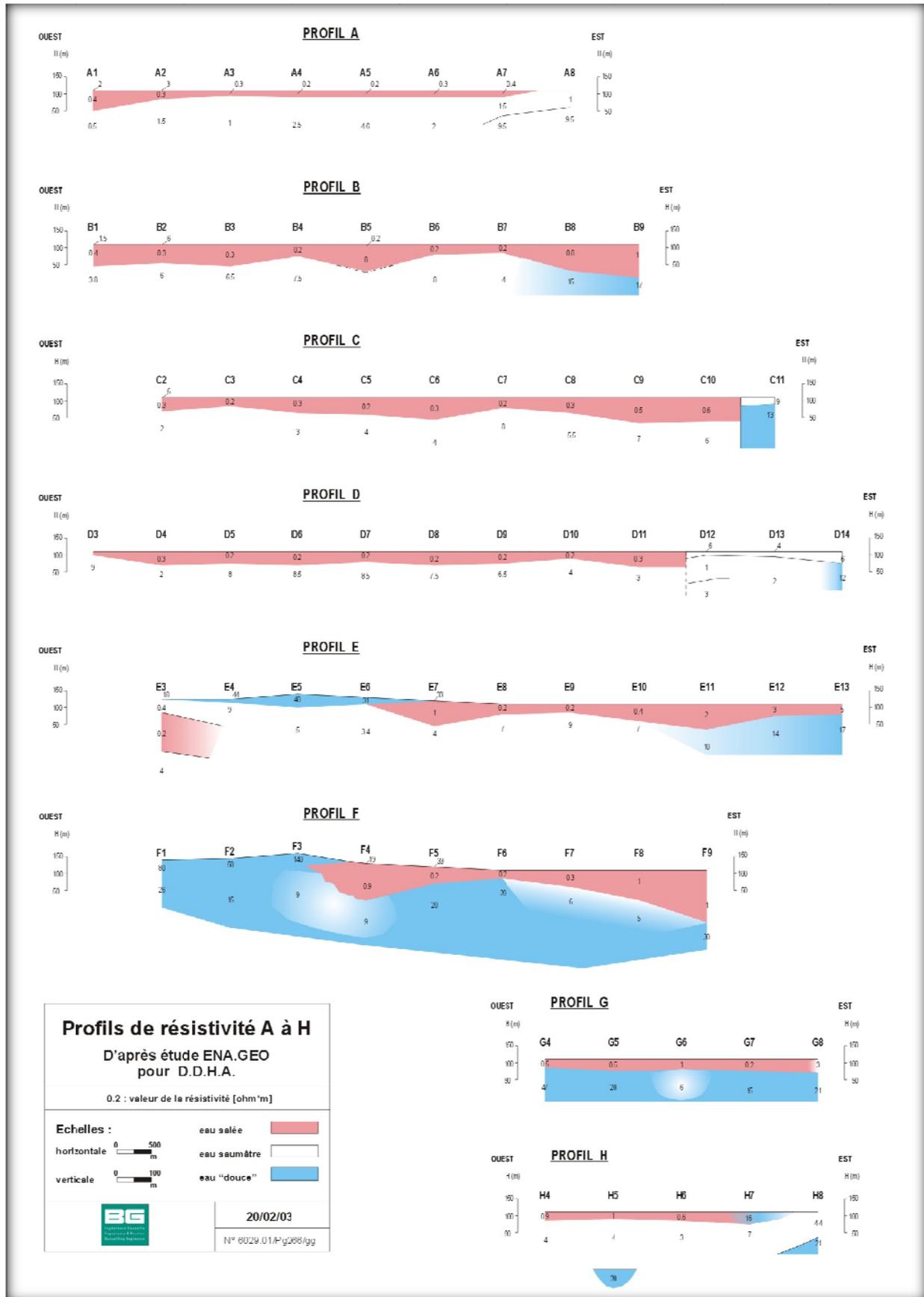
- Des rejets d'eaux usées d'origine domestique
- De l'eau excédentaire liée à une irrigation irrationnelle des palmeraies
- Des eaux de ruissellement venant des parties hautes et des apports de crues des trois Oueds dans la cuvette (N'sa, M'Zab et M'ya)

Les effets nuisibles de la remontée des eaux dans la cuvette sont atténués par l'existence des réseaux de drainage par canaux à ciel ouvert dans les palmeraies, ainsi que d'un collecteur d'eaux usées ; l'ensemble de ces eaux de rejet étant évacué par pompage vers la zone d'Oum Raneb située à 8 km au nord de la ville d'Ouargla.

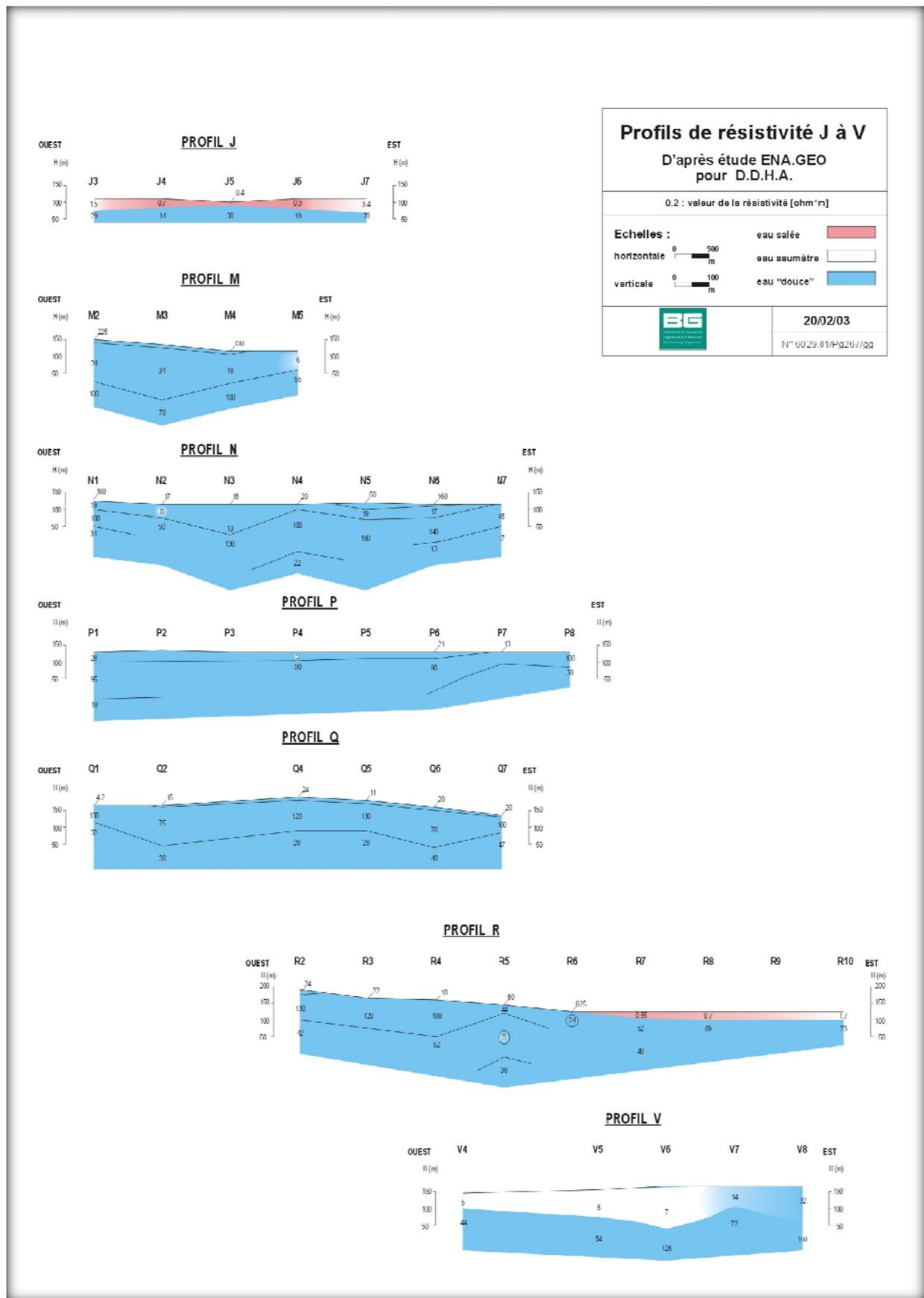
3.3.1.1- Étude géophysique

Afin de pouvoir préciser la structure, et la géométrie des formations superficielles, une étude géophysique a été entreprise par l'ENAGEO (mai 1991). Les résultats de cette prospection géophysique ont permis d'établir des corrélations avec les coupes lithologiques des sondages effectués. Ainsi, quatre coupes géophysiques ont été établies de façon à couvrir l'ensemble de la cuvette (*Fig. III-32*).

Interprétation des coupes géo-électriques [30, 25]



Profils A à H
Fig. III-16a : Profils de résistivité ENAGEO



Profils J à V
Fig. III-16b Profils de résistivité ENAGEO

Coupe N° 01 : Cette coupe est orientée Nord-Sud, elle s'étend de N'Goussa à Sebkhet Se-fioune. Elle peut être subdivisée en deux parties légèrement différentes du point de vue électrique.

- *La partie Nord* : caractérisée par de très faible résistivité (inférieures à $0.9 \mu\text{-m}$) pour les deux terrains en présence.
- *La partie Sud* : Montre l'apparition d'un troisième terrain (substratum) résistant avec une résistivité $< 1 \mu\text{-m}$, le substratum se situe à des profondeurs variables, la profondeur maximale est de l'ordre de 20 m.

Coupe N° 02 : Cette coupe couvre la partie centrale de la zone d'étude (région de N'Goussa). Elle met en évidence un passage latéral de faciès.

Ce changement de lithologie est confirmé par les logs des forages. Les terrains situés au Nord de N'Goussa sont constitués par des sables fins argileux de résistivité $< 20 \mu\text{-m}$ tandis que la partie Sud est composée de tufs friables à compactés, ceci est traduit par une augmentation de la résistivité.

Coupe N° 03 : Cette coupe passe par la Sebkha de Bamendil, qui est délimitée d'une façon précise par la prospection électrique ou de très faibles valeurs de résistivité sont enregistrées comparativement aux parties méridionales et septentrionales. La Sebkha est constituée par des sables fins conducteurs ayant une résistivité $< 1 \mu\text{-m}$. dont la profondeur atteint une vingtaine de mètres. Les parties de part et d'autre de la sebkha son caractérisées par une résistivité élevée correspondant aux terrains constitués de tufs et de tufs sableux.

Coupe N° 04 : Cette coupe couvre la partie Est d'Ouargla, elle met en évidence dans sa partie centrale :

- Un terrain très conducteur dont la résistivité n'excède pas $1 \mu\text{-m}$, correspondant aux dépôts sableux de la sebkha Oum-Raneb.
- Un substratum relativement résistant variant de 1 à $27 \mu\text{-m}$ qui correspond aux tufs et aux tufs sableux.

Les parties Nord et Sud présentent une résistivité importante due à la présence de terrain constitué par des tufs et des tufs sableux.

3.3.1.2- Faciès Lithologique

La nappe phréatique est contenue dans les formations perméables sablo-gypseuse du Quaternaire. Les sondages carottés effectués par LTPS, en plus des logs des piézomètres effectuées par l'ENAGEO, ont permis de relever la présence de trois classes de profil géologiques (Figure 16) :

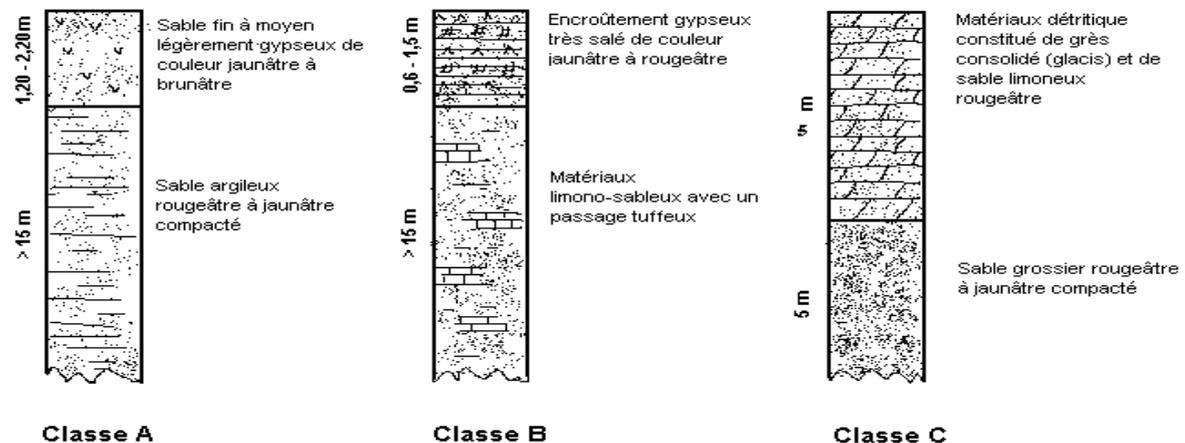


Fig. III-17: Log géologiques des formations de la nappe phréatique

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

- Une première couche dont l'épaisseur varie de 1.20 à 2.20 m constituée de sable fin à moyen légèrement gypseux de couleur jaunâtre à brunâtre avec une consistance de moyenne compacité.
- Une deuxième couche constituée de sable argileux rougeâtre à jaunâtre compactée, dont l'épaisseur varie entre 5 et 15 m.

Classe B : Elle caractérise les chotts et les sebkhas. On distingue:

- Un encroûtement gypseux très salé de couleur jaunâtre à rougeâtre dont l'épaisseur est variée de 0.6 m à 1.5 m.
- Matériaux limono-sableux avec un passage tufeux.

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

- Matériau détritique constitué de sable rouge consolidé (glacis), et de sable limoneux rougeâtre pauvre en gypse dont l'épaisseur est supérieure à 10 m.
- Sable grossier rougeâtre à jaunâtre consolidé avec la profondeur.
- Plateau discontinue d'épaisseur 0.8 – 1.0 m discontinue (Plateau calcaireux, encroûtement gypseux très dure);

3.3.2- Caractéristiques Hydrodynamique de la Nappe

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

3.3.2.1- Granulométrie

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

3.3.2.2- Porosité

La porosité totale d'un échantillon est égale au rapport, exprimé en pour cent du volume de vides au volume total : $n = V_v / V_t$. Des mesures de la porosité ont été effectuées sur des échantillons prélevés sur des profils du sol représentatif de la cuvette [37]. Les valeurs de la porosité déterminées varient entre 10 et 30 %.

3.3.2.3- Limites d'Atterberg

Les essais de limites d'Atterberg ont été effectués sur des échantillons prélevés sur la deuxième couche (limon argileux ou argile limoneuse); les essais révèlent des indices de plasticité (IP) variant entre 5.0 et 19 % et des limites de liquidité (LL) qui varient entre 22 et 25.5 %; ce qui démontre que les sols composant soit à des limons de faible compressibilité soit à des argiles minérales de faible plasticité. [37]

3.3.2.4- Perméabilité et Transmissivité

La perméabilité dépend a priori du milieu solide-fluide (porosité, granularité, salinité) et également des conditions hydrogéologiques de chaque zone (zone de recharge, zone centrale, exutoire). Le coefficient de perméabilité moyen de la nappe phréatique varie entre 1.27×10^{-1} m/s et 5.6×10^{-3} m/s. Tandis que, la transmissivité varie entre 2 m²/s et 9×10^{-2} m²/s [30].

3.3.2.5- *Coefficient d'emmagasinement*

Le coefficient d'emmagasinement (S) est le volume d'eau exprimé en pour cent, que l'on peut retirer par gravité d'un prisme vertical de terrain saturé de section unité. Les valeurs de S varient entre 10^{-2} et 2×10^{-1} [30].

3.3.3- *Piézométrie*

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

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

En octobre 2002, la surface libre de la nappe se situait à la cote 135,08 m au en ville d'Ouargla, dans l'enceinte du Centre Culturel et 134,65 m, tout au sud, pour les points les plus élevés. La cote était de 127,95 m entre le Chott et la sebkha d'Ouargla, 7 m plus bas que ces points. Les points les plus bas sont situés dans la Sebkheth Safioune, tout au nord, avec des cotes comprises entre 102,19 m et 102,95 m, inférieures de 32 m à celles des points les plus hauts et 25 m plus bas qu'au Chott. La nappe s'écoule librement des points hauts vers les points bas, perpendiculairement aux isopièzes et n'a aucune possibilité de remonter de la Sebkheth Safioune vers le Chott d'Ouargla ou la sebkha d'Oum Raneb.

Les parties hautes de la nappe phréatique sont situées au sud et sous la ville d'Ouargla. Elles sont représentées en vert sur la carte. Les parties basses de la nappe phréatique sont représentées en bleu. Elles sont situées au nord dans la Sebkheth Safioune pour les plus basses.

Les cotes principales sont : 134 m au sud ; 135 m en ville d'Ouargla ; 128 m au Chott et à la sebkha ; 127 m à la sebkha d'Oum Raneb ; 117 m à N'Goussa et 102 m à la Sebkheth Safioune.

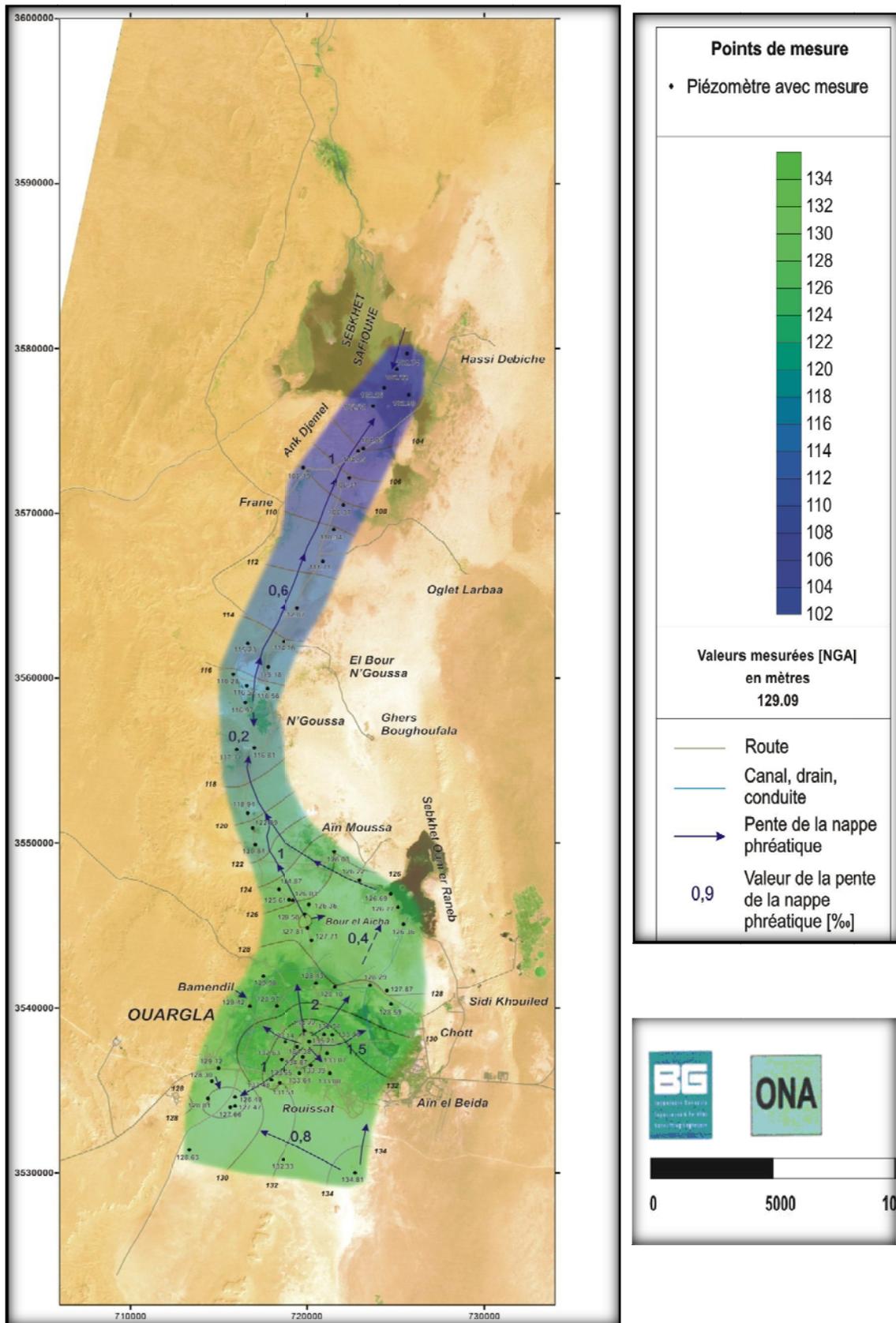


Fig. III-18: Carte piézométrique de la nappe phréatique en novembre 2003

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

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

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

La nappe phréatique est épaisse de 1 à 8 m. Elle repose sur un épais niveau imperméable, étanche, qui occupe tout le fond de la vallée d'Ouargla et l'isole des nappes artésiennes sous-jacentes. [10]

3.3.4- Analyse du phénomène de remontée de la nappe phréatique

3.3.4.1- Avant 1956 (date du premier forage à l'Albien)

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 mètre.

3.3.4.2- 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 Mio-Pliocène 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, [44]

3.3.4.3- Etat en 1968:

La nappe phréatique dessine nettement un dôme sous la ville. Sa cote est plus élevée que celle de la nappe du Mio-Pliocène

Le Bureau d'Hydraulique dessine une carte piézométrique en avril-mai 1968. La surface de la nappe forme un dôme culminant à la cote de 134,5 m sous le quartier Duprez avec une pente régulière en direction des chotts où elle n'atteint plus que la cote 128 m et même 127 m tout au nord.

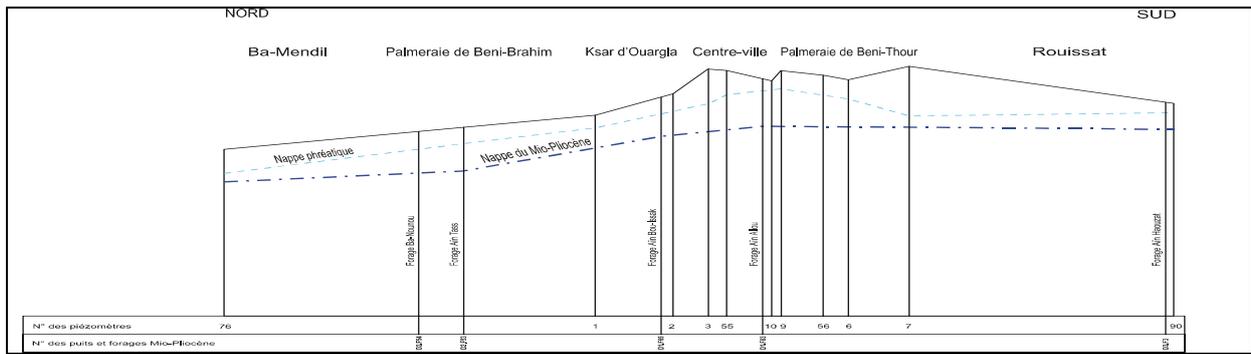


Fig. III-19: Coupe hydrogéologique passant par la ville d'Ouargla (en 1968).

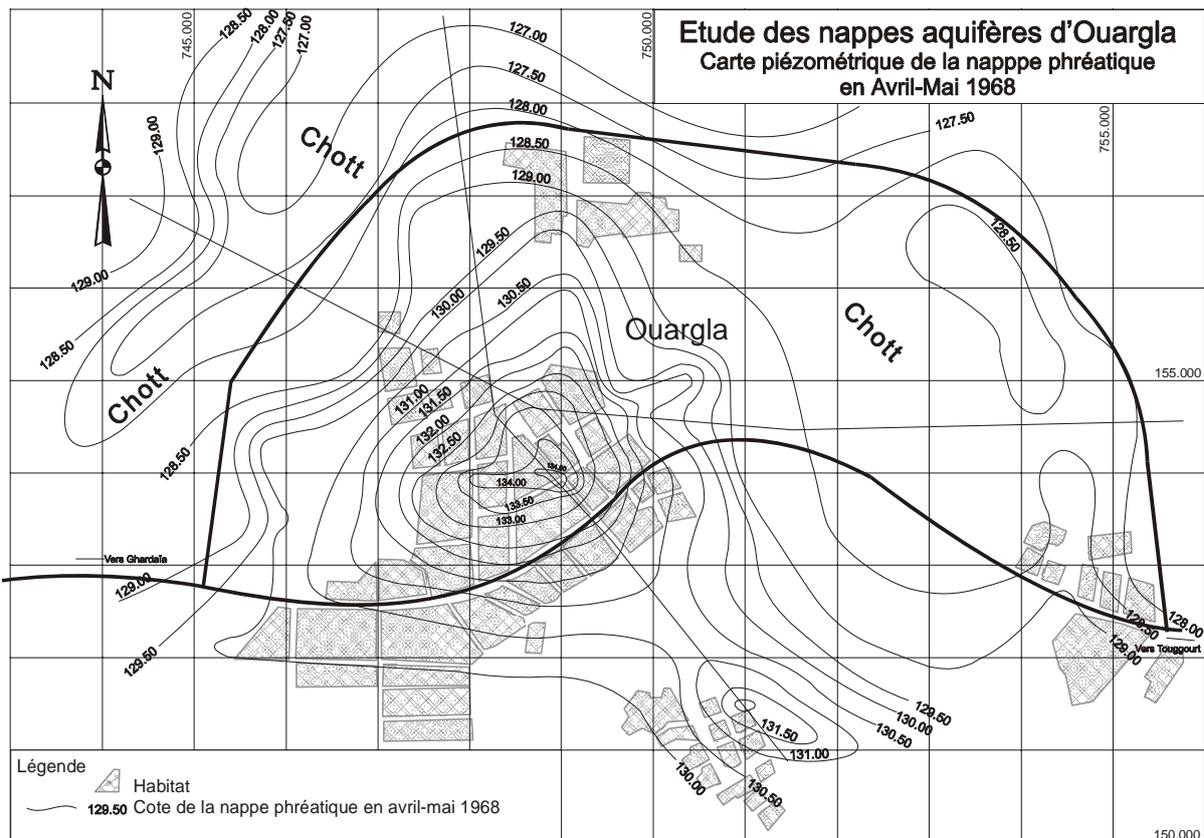


Fig. III-20: Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril-mai 1968.

Les isopièzes dessinent un dôme centré sous les immeubles récents.

Les lignes de courant, perpendiculaires aux isopièzes, indiquent nettement un écoulement radial depuis ce point haut en direction des canaux de drainage ceinturant la ville au nord, et aussi de zones sableuses situées au sud. On ne peut expliquer cette situation singulière que par une alimentation de la nappe phréatique à partir de son point haut sous les immeubles du quartier Duprez et un drainage par le chott.

Cette alimentation ne peut pas se faire naturellement à partir des nappes plus profondes. La nappe du Mio-Pliocène présente un niveau piézométrique inférieur à celui de la nappe phréatique dans toute cette zone haute. On pourrait envisager la nappe du C.I. (Continental intercalaire ou Albien) qui présente un niveau piézométrique nettement plus élevé d'environ 200 mètres, mais pour alimenter la nappe phréatique, les eaux devraient traverser les nappes du CT (Complexe terminal), dont le Mio-Pliocène, qu'elles mettraient en charge et aux eaux desquelles elles se mélangeraient, ce qui n'est pas le cas (cf. fig. 9). L'alimentation de la nappe phréatique ne peut provenir que d'une cause anthropique : irrigation des palmeraies et eaux urbaines.

La nappe phréatique est à une profondeur de 0,75 m à 2 m sous la ville, avec une variation très faible (quelques centimètres) entre août 1968 et avril – mai de la même année et inférieure à 0,5 m sous la palmeraie de Beni-Sissin et d'une partie de celle de Beni-Brahim, ce qui est nettement insuffisant pour les cultures dont le rendement optimum dépend essentiellement d'un bon drainage, d'un bon lessivage et d'un volume d'irrigation suffisant.

3.3.4.4- Améliorations apportées par le réseau d'assainissement:

En 1972 – 73, on construit un réseau d'égouts qui draine une partie de la nappe sous l'agglomération. Il semble que ces travaux aient amélioré la situation car en octobre 2001, sur les 18 piézomètres PL situés principalement en ville d'Ouargla, la profondeur moyenne de la nappe sous le sol était de 2,37 m (cf. fig. 21), avec un seul piézomètre au-dessous de 1,3 m, le PL 44 situé dans une partie humide de l'enceinte du château d'eau Sahara el Gharbia et peut-être influencé par des fuites. (On notera toutefois que ces mesures ne sont qu'indicatives car elles n'ont pas été effectuées sur les mêmes piézomètres, ceux de 1968 n'ayant pas été maintenus).

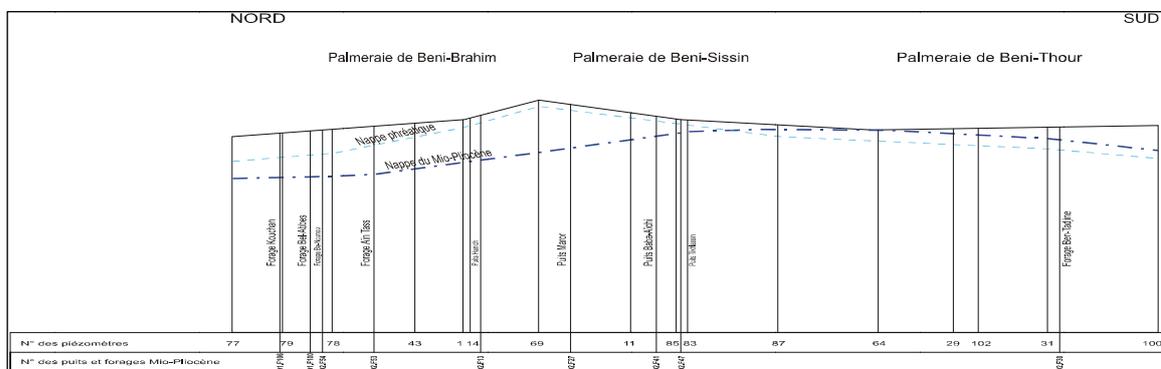


Fig. III-21: Coupe hydrogéologique au travers de la palmeraie en 1968.

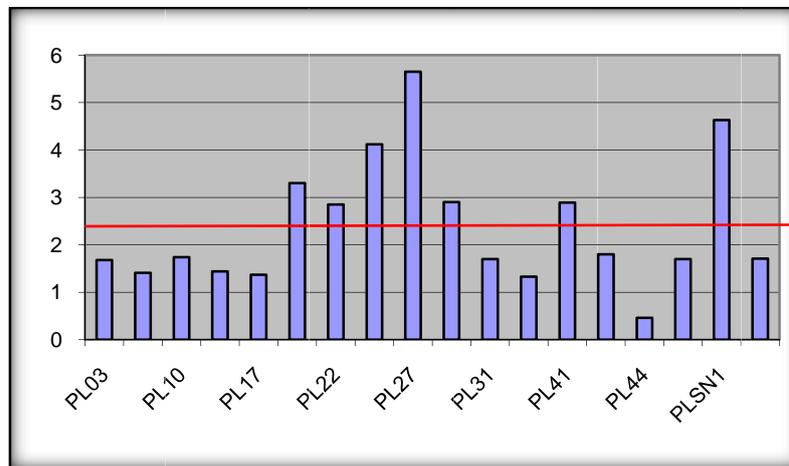


Fig. III-22: Profondeur de la nappe phréatique sous le sol (en mètres)

— Moyenne : 2,37 m

3.3.4.5- Travaux récents:

En 1989 un programme est lancé dans le but de trouver une solution pour le rejet des eaux hors de la cuvette et pour éliminer la production et l'arrivée d'eau au niveau de celle-ci.

L'étude devait concerner :

- L'origine des eaux;
- La localisation exacte des nappes phréatiques, des sebkhas et des chotts;
- Le sens d'écoulement souterrain de cette nappe.

Elle a comporté :

- Une étude de la cuvette par prospection géophysique;
- La réalisation de 45 piézomètres à l'intérieur de la ville et de 113 piézomètres couvrant la totalité de la cuvette;
- Des campagnes piézométriques en 1991, 1992 et 1993 par la DHW et ENAGEO;
- Un levé topographique de profils en long de la cuvette;
- Une étude hydrochimique et isotopique par le C.D.T.N.

Dès 1994, les mesures piézométrique et hydrochimique ont été reprises par l'ANRH à raison d'une à deux campagnes par an.

Entre février 1992 et avril 2002, sur une période de 10 ans, une baisse générale de niveau est constatée sur les nouveaux piézomètres (les mesures sur les anciens piézomètres ayant été abandonnées, des comparaisons sur une période plus longue ne sont pas possibles).

Seuls 6 piézomètres présentent une montée du niveau égale ou supérieure à 10 centimètres. Ils sont situés au nord et au sud de N'Goussa ainsi qu'à l'est et l'ouest d'Ouargla (*Fig. III-22*).

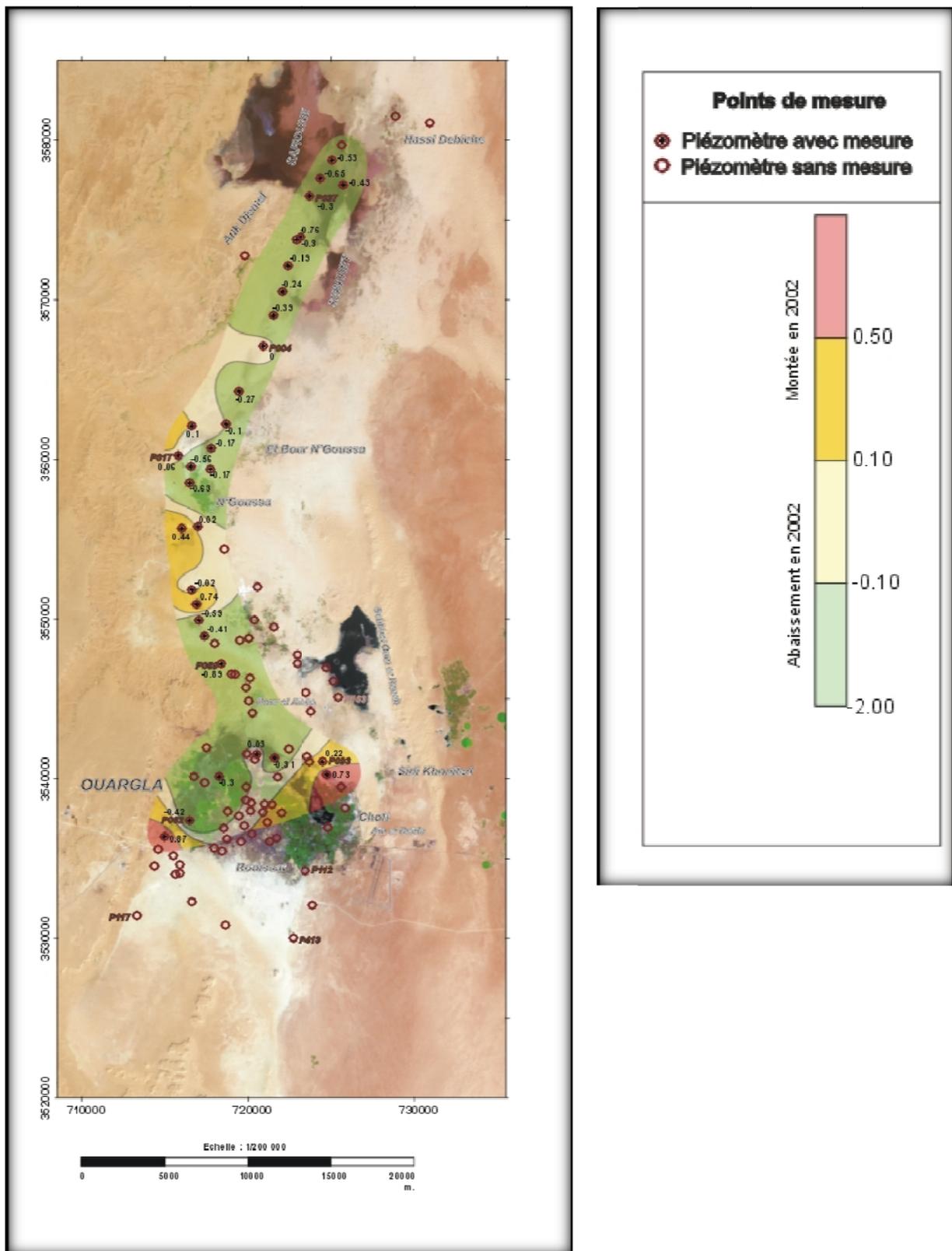


Fig. III-23: Différence des niveaux piézométrique de la nappe entre avril 2002 et février 1992

D'une année à la suivante et en considérant la même saison, entre octobre 2002 et novembre 2003, on constate que les variations sont généralement faibles et qu'en moyenne elles s'équilibrent (Figure 23).

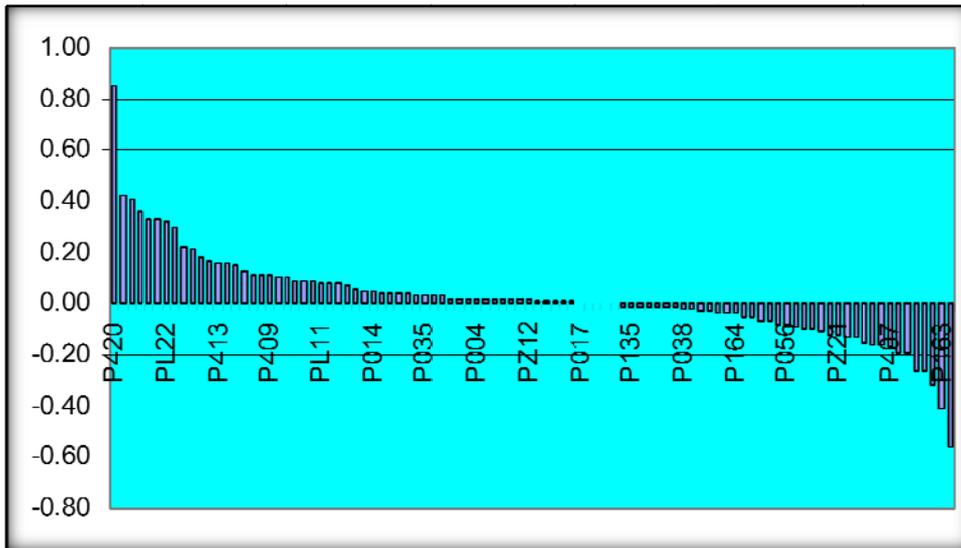


Fig. III-24: Diagramme des différences de niveaux piézométriques entre octobre 2002 et novembre 2003

D'une saison à la suivante, de la fin de la période estivale (octobre 2001) à la fin de la période hivernale (avril 2002), on constate une montée générale de la nappe en fin d'hiver (Figure 24 et 25).

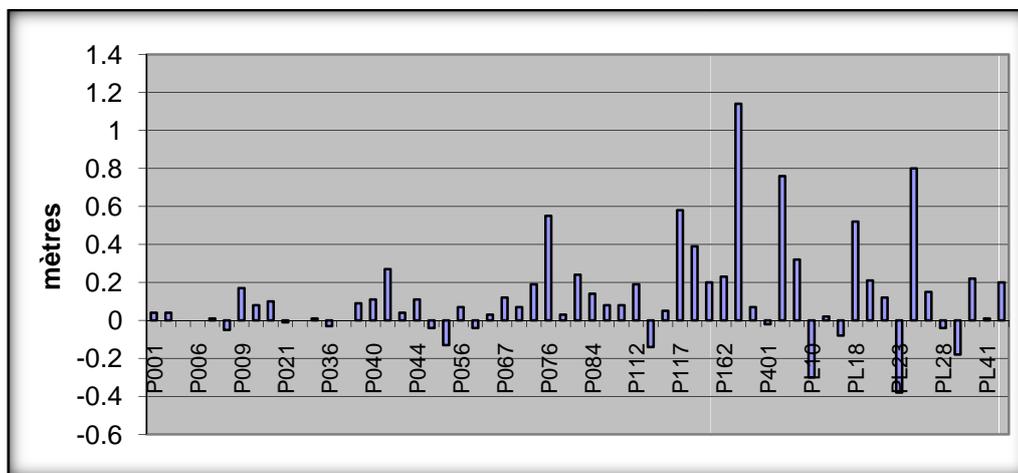


Fig. III-25: Variation des niveaux piézométriques (en mètres) entre avril 2002 et octobre 2001

A la fin de la période hivernale, le niveau de la nappe phréatique est monté à la plupart des piézomètres, parfois de manière importante (1,14 m au P 163).

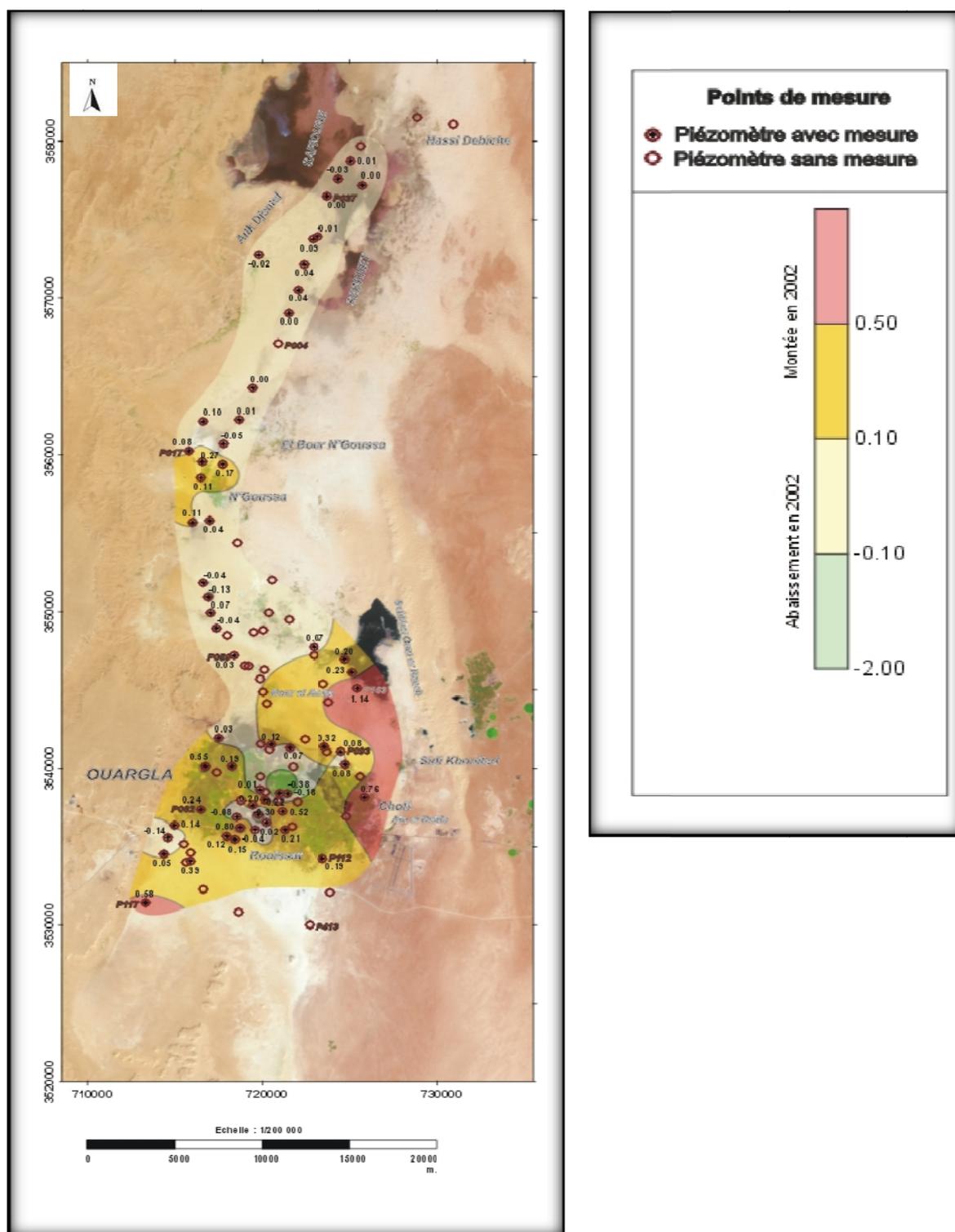


Fig. III-26: Différence des niveaux piézométrique de la nappe phréatique entre avril 2002 et octobre 2001

On note toutefois des différences importantes selon les régions.

Dans toute la zone située au nord de N'Goussa et dans la Sebkhet Safioune, le niveau de la nappe est resté remarquablement constant, avec des variations comprises entre + 9 cm (au P 039) et - 3 cm (P 036) en avril 2002 (Figure 25).

Aux environs de N'Goussa, la nappe est montée de 11 cm à 27 cm sous l'effet de l'irrigation. Au sud de N'Goussa et jusqu'aux environs de Bour el Aïcha (P 059), la nappe est restée stable, avec une tendance à la baisse (-13 cm au P 055).

Au centre ville, on constate une baisse atteignant 20 à 40 cm (38 cm au PL 23, 18 cm au PL 30 voisin, 30 cm au PL 10) et aussi une montée brutale + 80 cm au PL 25 et aux environs, + 0,76 m au PL 03 à Chott, + 0,55 m en bord de sebkha à Bamendil, + 0,58 m au P 117 et le solde des piézomètres généralement en hausse de 10 à 30 cm.

Les quatre piézomètres situés à proximité de la Sebkhet Oum Raneb sont à la hausse. Celle-ci est comprise entre 7 cm pour le P 165 le plus éloigné et 1,14 m au P 163. Ils reflètent bien la montée des eaux dans la Sebkhet pendant la saison hivernale, à cause d'un rejet d'eaux de drainage et d'assainissement important et d'un taux d'évaporation plus faible qu'en été.

Dans l'agglomération d'Ouargla, des variations journalières importantes ont été observées (Figure 26). 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.

Il a été réalisé 7 groupes de 3 piézomètres pour observer ces variations. Sur les deux mois de durée des mesures, l'on ne distingue pas de tendance générale, ni à la baisse, ni à la hausse du niveau piézométrique, mais des fluctuations qui peuvent être très rapides. Le niveau piézométrique peut varier de plusieurs dizaines de centimètres en quelques heures.

Près de la station de pompage Ouled Naceur, le 14 octobre 2001, le niveau piézométrique est remonté de 31 centimètres au P1, de 16 centimètres au P2 et de 42 centimètres au P3 en moins de quatre heures (Figure 26).

A la station Sidi Amrane, le niveau piézométrique dans le P1 est descendu de 68 centimètres entre le 15 octobre 2001 à 16 h et le 16 octobre à 10 h pour remonter de 56 centimètres entre le 16 à 10 h et 17 octobre 2001 à 8 h.

Dans un jeu de piézomètres, les mesures sont cohérentes d'une série de mesures à l'autre. Les mouvements piézométriques sont similaires sur tous les piézomètres d'un même jeu entre deux séries de mesures. [10]

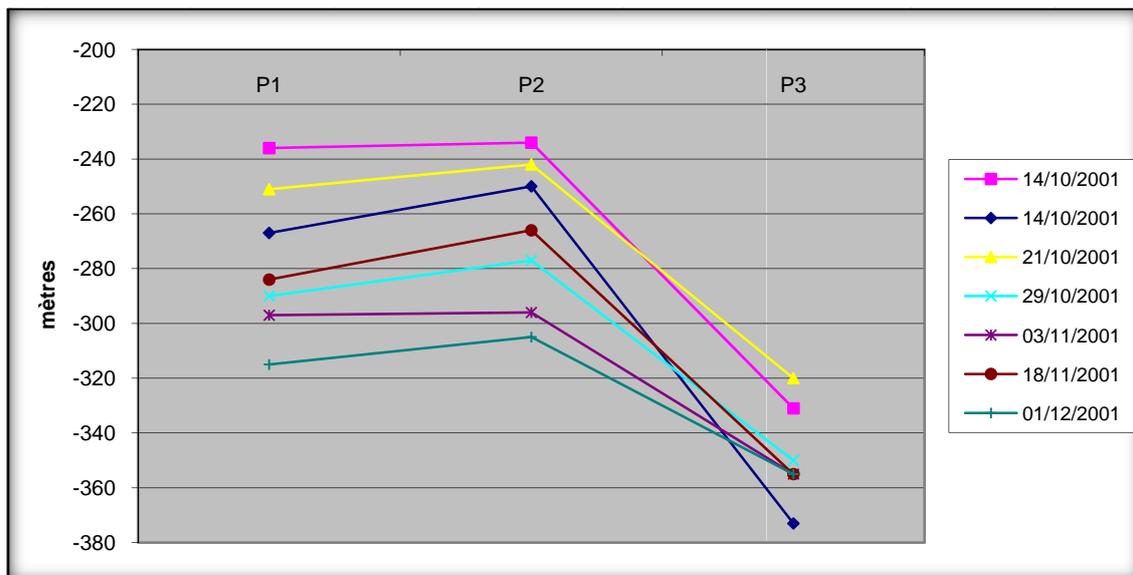


Fig. III-27: Piézométrie à l'abord de la station de pompage Ouled Naceur – Hamdat

3.3.5- Bilan hydrique de la nappe superficielle:

Le niveau de la nappe phréatique est réglé par la balance entre le débit des eaux entrant dans la région et celui des eaux en sortant. Un surplus aux entrées (ou un déficit aux sorties, ce qui revient au même) se traduit par une augmentation de la quantité d'eau stockée, d'où une élévation du niveau de la nappe phréatique, alors qu'un déficit aux entrées (ou un surplus aux sorties, par évaporation ou par écoulement, par exemple) se traduit par un prélèvement sur l'eau stockée dans la nappe, d'où une baisse du niveau de celle-ci. [10]

3.3.5.1- Equation du bilan d'eau:

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

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

Entrées:

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

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

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

Soit pour les entrées :

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

Sorties:

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

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

Soit pour les sorties :

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

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

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

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

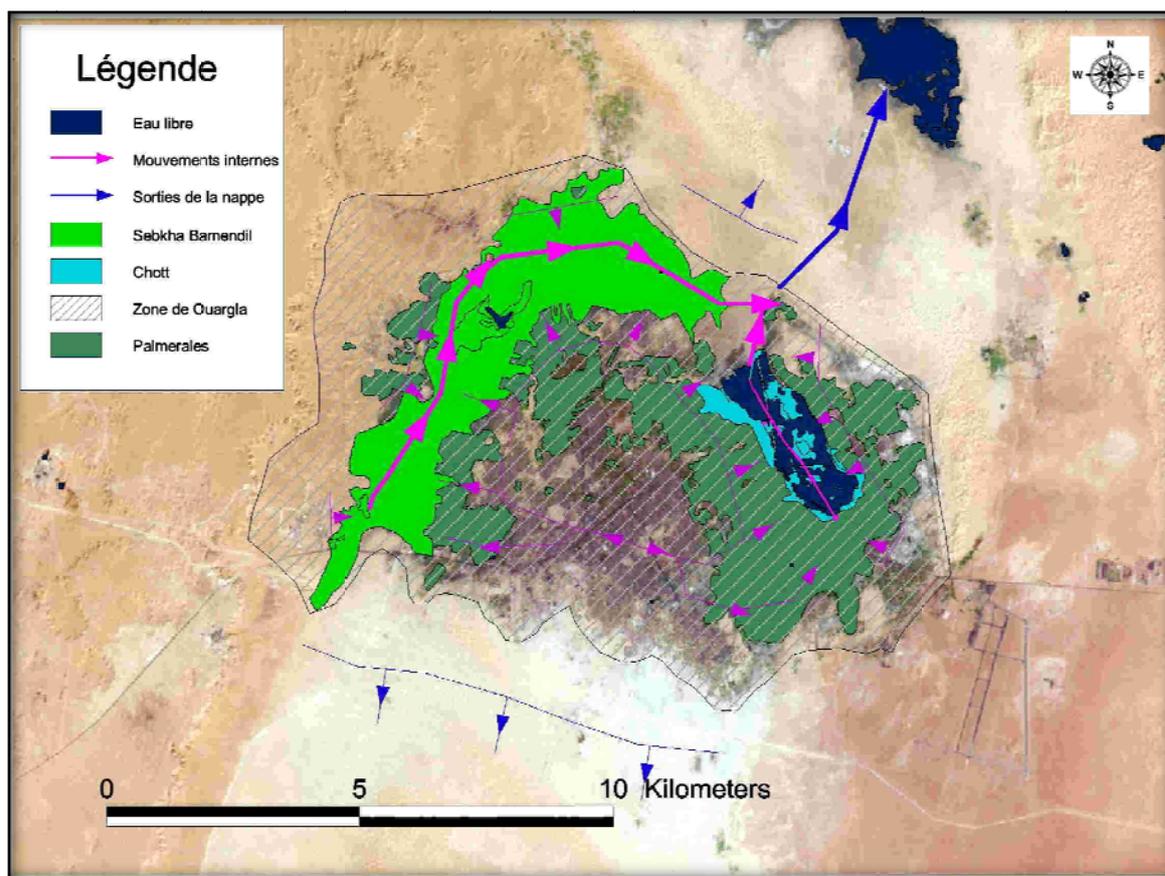


Fig. III-28: Zone d'Ouargla

3.3.5.2- Estimation des termes du bilan d'eau

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

- ✓ $Q_{Pré}^{Inf}$: Quantité d'eau tombée multipliée par un coefficient d'infiltration pour l'eau de pluie.

- 43 mm par an (moyenne de 10 ans)
- Coefficient d'infiltration 6 %
- Surface de la zone d'Ouargla : 10'327,5 ha

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

- ✓ Q_{F-Aep} : Débits forages destinés à l'AEP :

Selon les données EDEMIAO 2004 et la campagne de mesures de débits : **49'309 m³/j**

- ✓ Q_{F-Irr} : Débits forages destinés à l'irrigation des palmeraies :

Selon les données de mesure des débits ANRH et la campagne de mesure des débits 2004 : 102'810 m³/j

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

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

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

Avec :

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

$i : \text{Pente} = 2\text{‰}$,

$L = 12 \text{ km}$

Soit un débit de **539 m³/j**

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

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

L'évaporation d'un plan d'eau dépend des conditions atmosphériques et de la salinité de l'eau. Au niveau d'Ouargla, des mesures sur bac ont donné des évaporations variant entre 1881 mm/an pour l'année 1957-1958 et 3219 mm/an 1960-1961. Une évaporation moyenne de 2600 mm/an a été retenue. L'évaporation sur plan d'eau est estimée à 80 % de l'évaporation mesurée sur bac. Une diminution de 7 % de l'évaporation est observée avec une eau à 100 g/l de sels en solution. Soit une évaporation pour les surfaces d'eau libre de 1,96 m par an.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La population en 2003 est estimée à 180'000 habitants

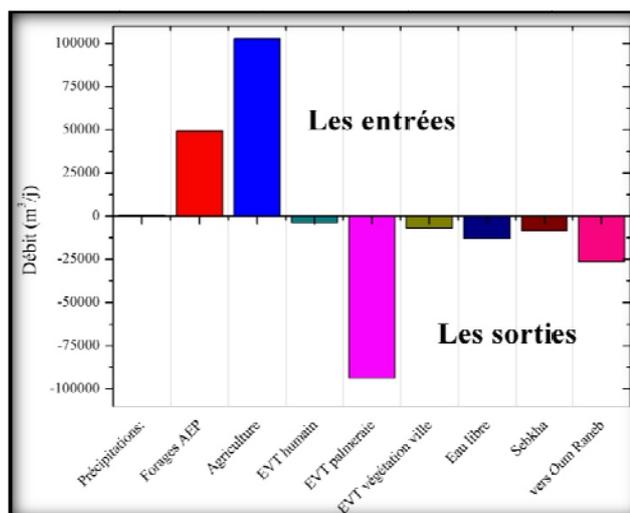
$180000 \text{ habitants} \times 22 \text{ l/jour/habitant} = 3960 \text{ m}^3/\text{j}$

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

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

3.3.5.3- *Résumé du bilan d'eau*Tableau III-05 : *Bilan d'eau de la zone d'Ouargla*

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



Source: O.N.A.

Fig. III-29: *Bilan d'eau de la zone d'Ouargla*

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

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

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

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

4. CONCLUSION:

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

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

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

Les cartes piézométriques établies, ont montré que :

- La cuvette se divise en deux zones localisées de part et d'autre de l'axe Bour El Hai-cha- Hassi Miloud où l'on remarque l'existence d'une ligne de partage des eaux souterraines. La nappe présente des points hauts sous les agglomérations et les palmeraies irriguées à partir du CI ou du CT et des points bas sous les rares palmeraies irri-

guées à partir de la nappe phréatique, à Hassi Berhla, ainsi que dans les sebkhas. Elle présente des contre-pentes au sud d'Ouargla et de N'Goussa.

- La nappe phréatique est caractérisée par des fluctuations saisonnières et annuelles. On a constaté une diminution moyenne du niveau statique de l'ordre de 16 cm entre 1992 et 1995. Par contre, entre les périodes 1995 et 1998, il y a eu une remontée de 10 cm.
- Les principales sources d'alimentation de cette nappe sont:
 - Les eaux d'irrigation provenant des nappes profondes;
 - Les fuites des réseaux de distribution et les rejets d'assainissement;
 - Les précipitations et apports des Oueds: N'sa, M'zab;
 - Drainance verticale, et drainage latéral.

Les caractéristiques hydrochimiques de la nappe phréatique sont:

- La salinité augmente dans le sens d'écoulement de la nappe phréatique et suggère une acquisition de la minéralisation par dissolution des sels lors du parcours des eaux souterraines.
- La carte de salinité précise le sens d'écoulement déterminé par la piézométrie, ainsi elle confirme l'existence de la zone de partage des eaux au niveau de Hassi-Miloud - Bour El Haïcha.

En ce qui concerne les prélèvements, les principales nappes exploitables dans la cuvette sont la nappe du Mio-Pliocène avec 262 forages, la nappe de Sénonien avec 34 forages et le CI avec 7 forages. On estime les volumes mobilisables à 76 millions m³ par an, dont 30 % destinées pour l'AEP et l'industrie, et 70 % destinées pour l'irrigation.

Le bilan d'eau de la zone d'Ouargla a mis en évidence un manque d'irrigation et de drainage des palmeraies. Au cas où ces derniers seraient optimisés pour que les palmiers atteignent un rendement correct, il faudrait s'attendre à une augmentation des rejets de la station Chott atteignant 1,3 fois les rejets actuels (ils passeraient de 26470 m³/jour actuels à 61470 m³/jour). Il devient évident que les eaux usées épurées devraient être utilisées pour l'irrigation des palmeraies avec un complément d'eau des nappes profondes et que la station Chott ne devrait plus évacuer que des eaux de drainage, inutilisables car trop salées. [10]

Entre Ouargla et Bour el Aïcha, sur le profil R, les résistivités sont 20 fois plus faibles (0,25 à 1,2 ohm.m), de R 6 à R 10 jusqu'à une profondeur de 15 à 25 m qui est celle de la nappe phréatique. Les conductivités, mesurées au P 96 (93 mS/cm), P 93 (139 mS/cm) et P 164 (204 mS/cm) sont 20 fois plus élevées et caractéristiques d'eaux extrêmement salées (de l'ordre de 50 à 150 grammes/litre de résidu sec). Sur ces deux profils on observe une excellente corrélation entre résistivité, conductivité et observations de surface. (Sur le profil V, les eaux de la nappe phréatique sont utilisées pour l'irrigation ; sur le profil R, les SE R 6 à R 10 sont situés dans la sebkha de Ouargla).

Au nord de Bour El Aïcha et jusqu'à N'Goussa, les profils O et P recoupent la vallée dans une région de palmiers bours et de palmeraies irriguées. Les résistivités ne sont jamais inférieures à 6 ohm.m, quelle que soit la profondeur d'investigation considérée. Dans cette région, les piézomètres P 54 à P 59 situés dans l'axe de la vallée et les puits 402, 404, 415, 420, 421 en travers de la vallée ont des conductivités comprises entre 2,6 milliS/cm (P 59) et 18,6 mS/cm (puits 420 dans une petite palmeraie abandonnée). On est loin des valeurs mesurées plus au Sud dans la Sebkha.

Au nord de N'Goussa, on entre dans le domaine de la Sebkhet Safioune. Les SE qui sont dans la partie basse de la vallée ont des résistivités comprises entre 0,2 et 1 ohm.m et des conductivités de l'ordre de 100 à 200 mS/cm sont mesurées dans les piézomètres.

Chapitre IV :
Pollution minérale
et organique

Chapitre IV

Pollution minérale et organique des eaux

La qualité des eaux souterraines est fonction de nombreux paramètres tels que :

- le type d'alimentation (pluie ou eau superficielle)
- la nature des terrains traversés
- le temps de séjour
- la profondeur de la nappe, etc.

La qualité des eaux dépend en partie des eaux de pluie (dans l'atmosphère) et essentiellement des interactions géochimiques et biologiques dans le sol et dans la nappe. Le rôle du sol est généralement majeur dans l'acquisition des caractères chimiques des eaux souterraines, en particulier du fait de la présence de certains paramètres (polluants ou non) qui le composent.

Les interactions eau-roche se traduisent par la mise en solution des formations géologiques par la précipitation de substances contenues dans la roche. Les eaux transitant à travers des formations différentes ont donc naturellement une composition chimique différente.

La composition chimique ainsi acquise, au sol, est d'origine multiple : naturelle, domestique, urbaine, industrielle et agricole. Tout en distinguant les polluants miscibles des non-miscibles, on les classe en polluants physiques, chimiques et biologiques.

- polluants physiques : température, gaz, suspension, radioactivité
- polluants chimiques : substances sous forme minérale ou organique, ils peuvent être : dissous (sels, hydrocarbure) mélangés (alcools) émulsés (graisse sur détergents) en phase séparée (produits pétroliers)
- polluants biologiques : germes, virus ou amibes

Les processus de pollution sont extrêmement variés, que ce soit par les fosses septiques campagnardes ou les dépôts de déchets hautement toxiques. Dans beaucoup de pays on évacue les déchets liquides en profondeur dans des eaux de médiocre qualité. Ces déchets rejoignent souvent la surface beaucoup plus vite que prévu si les potentiels en profondeur sont plus élevés qu'en surface. D'autre part, la surexploitation actuelle de nombreuses nappes peut mettre en mouvement rapide des eaux polluées, précédemment stabilisées en régime d'écoulement naturel. Comme pour les tranchées drainantes, les captages doivent éviter les risques de contamination. La réalisation de puits à eau de bonne qualité implique que l'on isole soigneusement la nappe des infiltrations polluantes venant de la surface, non seulement dans le puits mais surtout à sa circonférence. De très nombreux puits sont pollués par des infiltrations de surface provenant par exemple des excréments d'animaux.

1. ECHANTILLONNAGE

Afin d'avoir des analyses représentatives et fiables, la méthode d'échantillonnage exige une réflexion préalable et une précaution attentive de prélèvement, ainsi nous avons essayé de répondre aux critères suivants :

- ✓ Types des échantillons prélevés (eaux souterraines, eaux de surface ...).
- ✓ Lieux d'échantillonnage (piézomètres, chott, sebkha, drains...).
- ✓ Périodes d'échantillonnage (hautes eaux et basses eaux).
- ✓ Paramètres analysés sur terrain.
- ✓ Paramètres analysés au laboratoire.

1.1- Choix des sites expérimentaux

Le choix des sites de prélèvement, est basé sur des exigences de représentativité au niveau des milieux de pollution en relation directe avec la nappe, les photos ci-dessous illustrent les endroits d'échantillonnage :

- La ville de Ouargla (*Photos IV-01*) : sol représentant un remblai riche en béton, avec des infiltrations des eaux d'AEP et usées alimentant la nappe.



Photos IV-01 : Piézomètres au niveau de la ville de Ouargla

- Les palmeraies (*Photos IV-02*) : zones agricoles avec une irrigation et fertilisation continue alimentant la nappe. Les drains une prolifération des plantes ce qui indique l'existence des nutriments contrairement aux autres drains.



Photos IV-02 : Drains au niveau des la palmeraies

- Les eaux courantes (*Photos IV-03*) : représentées par les canaux (drains) drainants la nappe et lieu du rejet des eaux usées, donc sont des eaux renouvelables.



Photos IV-03 : Drains au niveau de Sebkhata Bamendil

- La station de relevage du Chott (*Photos IV-04*) : c'est l'endroit où se collectent toutes les eaux usées et de drainage pour qu'elles se refoulent vers le sebkhat Oum.



Photos IV-04 : La station de relevage du Chott

- Les chotts et les sebkhas (*Photos IV-05*) : sont des eaux stagnantes représentant l'affleurement de la nappe dans des dépressions d'un sol salifère dû à l'évaporation intense, et l'endroit de collecte des eaux de rejet, dans une zone endoréique sans exutoire naturel.



Photos IV-05 : Chott Ain Baidha pendant la période hivernale

- Les chotts et les sebkhas à l'état sec (*Photos IV-06*): sont des dépressions d'un sol salifères vécues une évaporation intense et ne reste que les eaux de rejet.



Photos IV-06 : Chott Ain Baidha pendant la période estivale

- Les affleurements du Mio-pliocène (*Photos IV-07*): sont des grès friable a ciment calcaire et des sables rouge, occupant des sites élevés, et d'un niveau statique peut atteindre 10m de profondeur.



Photos IV-07 : Les affleurements du Mio-pliocène

1.2- Périodes de prélèvements

Pour l'étude et le suivi de la variation spatio-temporelle de la composition physico- chimique des eaux usées et celle de la nappe phréatique, la composition, des eaux résiduaires est plus ou moins variable selon les journées, les mois et les saisons. Compte tenu de cette fluctuation, ainsi que celle des systèmes de transfert et de dilution, il a été difficile de pratiquer une technique de prélèvement satisfaisante, ainsi on a eu recours au prélèvement instantané qui présente l'avantage de diminuer les risques de précipitation, d'absorption, de concentration ou d'évaporation.

Afin d'apprécier l'impact des effluents urbains et agricoles sur la nappe phréatique, deux séries de prélèvements ont été effectuées. Une campagne de prélèvements, de 24 points d'eau, a été réalisée durant le mois de février (période des hautes eaux) ; et une campagne, de 32 points d'eau durant le mois de juin (période des basses eaux).

2. INVENTAIRE DES POINTS D'EAU

La majorité des points d'eau recensés (piézomètres, eaux de surface) sont d'une profondeur variant entre 0.2 et 10 m, ils servent en grande partie à l'irrigation. La plupart de ces points d'eau sont localisés dans les zones suivantes :

- Agglomérations (Ouargla, Chott, Ain Baïdha et Ngoussa)
- Palmeraies (Ouargla, Chott et Bamendil)
- Chott et sebkhas (Khafji, Bamendil, Chott, Oum-Raneb, N'Goussa et Safioune)

Un programme des prélèvements a été effectué selon l'inventaire des points d'eau (*Fig. IV-01*) suivant :

- ✓ 11 piézomètres : représentant les piézomètres communs dans les deux compagnes (le mois de février caractérise la période des hautes eaux et le mois de juin qui caractérise la période des basses eaux).
- ✓ 04 piézomètres : représentant les piézomètres communs dans les compagnes plus un point d'eau de surface le plus proche de chaque piézomètre (pour définir l'influence des eaux de surface sur les eaux souterraines). Donc 15 piézomètres communs entre les deux périodes (pour définir l'influence climatique sur les eaux souterraines).
- ✓ 02 piézomètres : représentant les piézomètres de la première compagne.
- ✓ 11 piézomètres : représentant les piézomètres de la deuxième compagne.
- ✓ Un seul piézomètre : représentant le piézomètre (P084) de la première compagne
- ✓ en comparaison avec l'eau de surface le plus proche (Rejet Khafji), absent en deuxième compagne dû à son état sec.
- ✓ Un seul point d'eau de surface : représentant le drain Saïd-Otba de la première compagne.
- ✓ Un seul point d'eau de surface : représentant le drain ITAS de la deuxième compagne.
- ✓ 14 piézomètres : représentant les piézomètres seulement en deuxième compagne, où les analyses ont été effectuées en fonction de deux niveaux de profondeur afin d'évaluer l'influence de la profondeur sur les eaux souterraines (P084, P538, PL04, PL04', P76, P160, P57, P55, P54, P08, P06, P37, P43, P50).

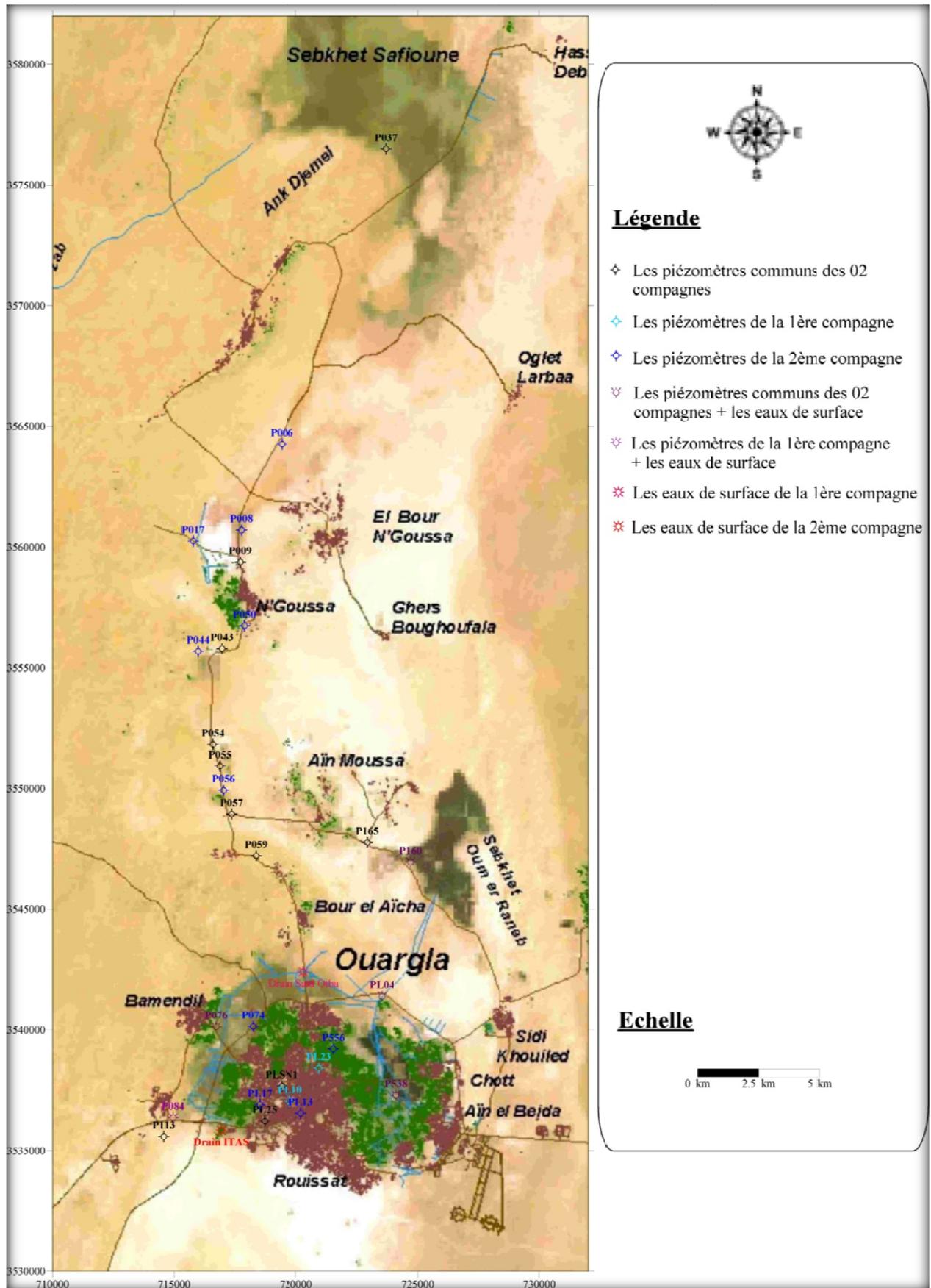


Fig. IV-01 : Inventaire des points d'eau de la cuvette de Ouargla

3. MATERIELS ET METHODES

3.1- Échantillonnage

Les différentes analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique et des eaux usées de la région d'étude ont été effectuées au laboratoire d'analyses physico-chimiques (Sonatrach, Haoudh Berkaoui).

Tous les prélèvements d'eau sont effectués dans des flacons en polyéthylène. Les échantillons, conservés à 4 °C, sont transportés au laboratoire dans un délai ne dépassant pas 4 heures selon les instructions de Rodier, 1996.

3.2- Méthodes d'analyses

Sur ces échantillons nous avons déterminé, selon les normes AFNOR et ISO, les paramètres suivantes :

3.2.1- Le pH :

pH-mV-T°-mètre de terrain étanche et robuste pour applications industrielles HI 9025

Affichage simultané du pH (ou mV) et de la température

Exactitude de mesure ± 0.01 pH

Indicateur de stabilité pour un étalonnage correct

Boîtier étanche et solide

Accepte toutes les électrodes pH ou redox à fiche BNC

Gamme redox permettant la vérification de l'état de l'électrode pH ou la mesure du potentiel redox (avec connexion d'une électrode redox)

Extinction automatique après 20 min de non-utilisation

Étalonnage simple au clavier avec tampons mémorisés

Compensation automatique de la température avec la sonde de température connectée

Un outil de terrain par excellence ! D'une fabrication solide avec un boîtier parfaitement étanche, il est apprécié pour sa robustesse et sa simplicité d'utilisation. **HI 9025** est livré dans une mallette de transport, prêt à l'emploi avec une électrode pH et une sonde de température.

Applications Terrain : industrie

pH-mètre de laboratoire BASIC 20

Réactifs : Solution tampons; pH = 4, pH = 7 et pH = 10

Compact, robuste et simple à utiliser.

Ecran alphanumérique rétro-éclairé avec message en français.

Clavier intuitif et fonctionnel.

Étalonnage en deux points. Reconnaissance automatique de 4 tampons. Validité de l'étalonnage programmable de 0 à 99 h.

Compensation automatique de température (ou manuelle).

- Mesure du pH de -2.00 à 16.00 en 0.01

- Mesure des mV ± 1500 en 1 mV



Photo IV-08 : pH-mV-T°-mètre de terrain **HI 9025**



Photo IV-09 : pH-mètre de laboratoire **BASIC 20**

- Mesure de la température de -20 à $+150^{\circ}\text{C}$ en 0.1°C
- Livré complet avec support flexible, solutions, électrode 52 01 avec sonde de température 63 280 014 pH-mètre BASIC 20 avec électrode combinée

3.2.2- *La température* : Est déterminée au même temps que le pH à partir du pH-mètre.

3.2.3- *La conductivité électrique* :

Conductivimètre CD 4301

La conception de cet appareil offre à l'utilisateur de bonnes performances, une gamme de mesures étendue et un affichage numérique de grande taille.

- ✓ Plusieurs gammes de mesure : $0-199,9\mu\text{S}$, $0,2-1,999\text{mS}$ et $2-19,99\text{mS}$
- ✓ Grand afficheur à cristaux liquides pour une bonne lisibilité, même en ambiance de forte luminosité, en conservant une faible consommation.
- ✓ Fonction maintien d'affichage de la valeur mesurée possible.
- ✓ Boîtier ABS à haute résistance.
- ✓ Facilité d'utilisation
- ✓ Indicateur de pile faible
- ✓ Nombreuses applications : contrôle de l'eau, aquariophilie, alimentation, photographie, laboratoire, industrie papetière, contrôle de qualité, enseignement, etc...



Photo IV-10 :
Conductivimètre CD 4301

Spécifications générales :

Affichage : LCD de 18 mm de hauteur, $3\frac{1}{2}$ digits maximum affiché 1999
Fonction maintien d'affichage

Gamme de mesure : 3 calibres $199,9\mu\text{S}$, $1,999\mu\text{S}$, $19,99\text{mS}$
 μS : microsiemens, mS : millisiemens

Résolution : $0,1\mu\text{S}$ pour la gamme $199,9\mu\text{S}$
 $0,001\text{mS}$ pour la gamme $1,999\text{mS}$
 $0,01\text{mS}$ pour la gamme $19,99\text{mS}$

Précision (à $23\pm 5^{\circ}\text{C}$) : $\pm (2\% \text{ gamme de mesure} + 1 \text{ digit})$

Indicateur d'erreur de gamme : Affichage de 1

Temps d'échantillonnage : Environ 0,4 seconde

Compensation de température : Automatique de 0 à 50°C)

Température d'utilisation : 0°C à 50°C

Humidité relative : Maximum 80% d'humidité relative

Alimentation : Pile 9V longue durée

Consommation : Environ 5 mA

Poids : 340 g pile

Dimensions : Boîtier : $168 \times 80 \times 35$ mm
Sonde : $\varnothing 12 \times 120$ mm longueur

Accessoires inclus : Mode d'emploi
Sonde
Valisette de transport

3.2.4- L'oxygène dissous :

La mesure a été effectuée à l'aide d'un oxymètre type WTW de Labo

Cet oxymètre portable est très résistant et robuste. Un câble de 330 pieds (100 mètres) est disponible pour mesurer l'oxygène dissous en profondeur. Une combinaison interne de batterie/chargeur permet une utilisation de plus de 600 heures. Vous obtenez un large écran LCD, une mémoire de 50 mesures et une sortie digitale RS 232.



Photo IV-11 : oxymètre type WTW de terrain

Cette analyseur est de construction solide et peut à lui seule établir la norme en aquaculture pour les analyseurs d'oxygène dissous. Il est complétement résistant à l'immersion à l'eau pour une profondeur de 1 mètre (Norme IP-67), résiste aux impacts, et mesure l'oxygène dissous de 50 mg/L et 500% de saturation. Il possède une sonde remplaçable d'oxygène dissous polarographique, avec un capuchon de membrane facile à remplacer. Un bouton de calibration et de température, de salinité (jusqu'à 70 ppt), et de compensation d'altitude (jusqu'à 10,000').

Paramètres	mg O ₂ /l - % saturation - °C
Plages de mesure	mg O ₂ /l: 0,00...19,99 / 0,0...90,0 % Saturation: 0,0...199,9 / 0...600 °C: -5 ... +50,0°C
Précision	O ₂ : ± 0,5% de la valeur mesurée ± 1 digit °C: ± 0,1 K ± 1 digit
Compens. température	automatique 0...40 °C (compensation IMT)
Correction de salinité	0,0 ... 70,0 salinité (ajustable)
Garantie	3 ans sur l'appareil (1 an sur la sonde)
Poids	3.3 lb

3.2.5- Les éléments majeurs :

- Les anions : Les ions de Cl⁻ et HCO₃⁻, sont dosés par titrimétrie.
L'ion de SO₄²⁻ est analysés par le spectrophotomètre de type DR 2000 (HACH).
- Les cations : Les ions de Ca²⁺, Mg²⁺, sont dosés par titrimétrie.
Les ions de Na⁺, K⁺, sont analysés par le photomètre à flamme.

Photomètres de flamme Modèle IC9200 : pour les laboratoires de contrôle industriels et l'Enseignement. INFORLAB CHIMIE présente le photomètre de flamme simple faisceau, adaptés à l'analyse en routine du Sodium et du Potassium.

- ✓ Filtres Na et K en standard.
- ✓ Options : filtres Ca, Ba et Li
- ✓ Sécurité : détection automatique de l'extinction de flamme.
- ✓ Alimentation : butane, propane ou gaz naturel
- ✓ Sortie enregistreur : 0-1 V



Photo IV-12 : Matériel de mesure par titrimétrie



Photo IV-13 : Photomètre de flamme Modèle IC9200

Spécifications techniques

Modèles : IC9200 (Industries)			
Gammes:	Na : < 0,2ppm	K : < 0,2ppm	
	Ca : < 15ppm	Li : < 0,25ppm	Ba : < 30ppm
Reproductibilité :	< 1 % cv sur 20 mesures consécutives (solution 10ppm Na)		
Linéarité :	Meilleure que 2% sur solutions Na et K (3ppm) et Li (5ppm)		
Interférences :	< 0,5% pour Na, K, Li en concentration égale à celle de l'ion mesuré		
Sortie enregistreur :	1 V nominal pour une lecture de 100.0		
Alimentations :	Electrique: 220/240V (50/60Hz)		
	Air comprimé: sans humidité, ni huile à 61/mn et 1 Kg/cm ²		
	Gaz: Butane ou Propane 26 à 37mBar/Gaz naturel 7 à 15mbar		
Dimensions :	420(L)x360(I)x300(h) mm		
Poids :	8 Kg		

3.2.6- Les nutriments :

NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} et NH_4^+ sont analysés par spectrophotométrie de type *DR 2000 (HACH)*.

Celles-ci se calculent à l'aide du spectrophotomètre DR/2000 HACH (méthode n° 750, Hach, 1989). Le principe fondamental de l'appareil repose sur l'absorption de lumière traversant une solution colorée, l'intensité étant proportionnelle à la concentration de l'élément cherché (loi de Lambert-Beer). La détermination de la turbidité mesure donc une propriété optique de l'échantillon d'eau qui résulte de la dispersion et de l'absorption de la lumière par les particules de matière en suspension présentes dans l'échantillon.

En ce qui concerne l'utilisation de l'appareil, il faut d'abord régler préalablement la longueur d'onde correspondant à la méthode utilisée de chaque élément, afin de mesurer la bonne concentration.

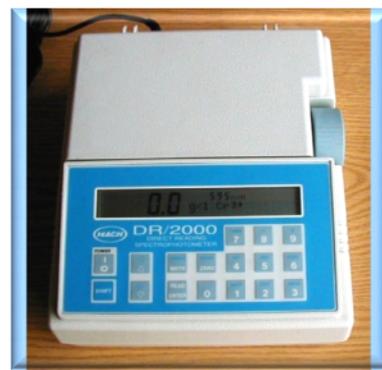


Photo IV-14 : (HACH)
Spectrophotomètre *DR 2000*

3.2.7- La demande biologique en oxygène à 5 jours (DBO5) :

La DBO est la quantité de dioxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'eau pour oxyder les matières organiques, dissoutes ou en suspension dans l'eau. Il s'agit donc d'une consommation potentielle de dioxygène par voie biologique. Ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en matières organiques biodégradables d'une eau (toute matière organique biodégradable polluante va entraîner une consommation d'O₂) au cours des procédés d'autoépuration.

La DBO est mesurée au bout de 5 jours (=DBO₅), à 20°C (température favorable à l'activité des micro-organismes consommateurs d'O₂) et à l'obscurité (afin d'éviter toute photosynthèse parasite).

Deux échantillons sont nécessaires : le premier sert à la mesure de la concentration initiale en O₂, le second à la mesure de la concentration résiduaire en O₂ au bout de 5 jours. La DBO₅ est la différence entre ces 2 concentrations. Les mesures seront effectuées sur un même volume et le second échantillon sera conservé 5 jours à l'obscurité et à 20°C.

Afin de mesurer la totalité de la demande, l'O₂ ne doit pas devenir facteur limitant de l'activité microbienne. En effet une eau abandonnée à elle même dans un flacon fermé consommera rapidement le dioxygène dissous : il faut donc s'assurer au préalable que ce

dioxygène suffira largement à la consommation des micro-organismes. On utilise pour cela la méthode des dilutions, où l'échantillon à doser est dilué dans une quantité d'eau telle qu'à l'issue de la mesure le taux d'O₂ résiduel reste supérieur à 50% du taux initial. Une quantité réduite du mélange micro-organismes + substrat est ainsi mise à disposition du dioxygène d'un important volume d'eau dépourvu de demande propre.

Matériel : oxymètre, agitateur magnétique, aérateur, flacons

Protocole

- *Préparation de l'eau de dilution* : mettre la veille du prélèvement, dans un récipient de 10 l, de l'eau du robinet dans laquelle on plonge pendant 24 h un aérateur la saturer en dioxygène. Laisser reposer 12 h.
- *Choix du facteur de dilution* : Le facteur de dilution F dépendra de la charge de l'eau analysée. Par exemple, on choisira un facteur de dilution de l'ordre de 10 pour une eau de surface (DBO moyenne = 1 à 30 mg/l) ou de 50 à 100 pour une eau usée (DBO moyenne = 300 mg/l pour un effluent domestique).
- *Préparation des flacons de mesure* : verser dans le flacon un peu d'eau de dilution puis la quantité prévue d'échantillon puis remplir le reste du flacon avec l'eau de dilution. Fermer le flacon sans y laisser d'air. Faire ainsi 2 flacons identiques.
- *Mesure au temps 0* : doser l'O₂ dissous dans un flacon d'échantillon dilué (T₀ en mg/l).
- *Incubation* : placer les 2 flacons restants à l'étuve 20°C et à l'obscurité pendant 5 jours.
- *Mesure au temps 5 j* : doser l'O₂ dissous dans le flacon d'échantillon dilué restant (T₅ en mg/l).

Résultats : $DBO = F (T_0 - T_5)$

3.2.8- La demande chimique en oxygène (DCO) :

La DCO permet d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale.

On évalue la quantité d'oxygène (en mg /l), utilisée par les réactions d'oxydation, à partir de la mesure du résidu de réactifs au bout de 2 h. L'oxydation s'effectue à chaud, en milieu acide, en présence d'un excès d'oxydant.

- Prélever 2 ml de l'eau à analyser et le rajouter au tube de réactifs à DCO
- Placer le tube 2 heures à 150 °C
- Après refroidissement, lire directement la DCO au colorimètre.

Matériel et réactifs

- Tubes de réactifs à DCO (gamme 0-150mg/l ou 0-400 mg/l)
- Pipette 2 ml
- Réacteur à DCO ou bain à sec 150 °C
- Colorimètre
- Etalon DCO (par exemple 100 mg/l pour une gamme de mesures 0-150 mg/l)

Résultats : Le spectrophotomètre (HACH) DR 2000 étalonné peut lire directement la DCO en mg/l.

3.3- Méthodes de calculs

3.3.1- Feuilles d'interprétation des données scientifiques avec le logiciel Excel

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

A l'aide d'un document vierge, un petit programme aquexsimple établis à partir d'un tableur Excel permet d'encoder vos données et de les présenter en graphiques pour faciliter les interprétations.

Les principales mesures physico-chimiques de la station choisie sont reprises sur la feuille de synthèse. Elles peuvent être interprétées ainsi :

- *Les indicateurs de pollution organique.*

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

Un indice de pollution organique IPO, calculé à partir des concentrations de ces ions, permet de classer l'eau analysée sur une échelle à 5 niveaux de pollution. Les classes ont été établies à partir des modifications induites par les polluants dans les peuplements d'algues. L'indice le plus élevé correspond à une pollution nulle ou très faible, représentée conventionnellement par une couleur bleue.

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

Toutefois, la mesure de ce paramètre n'est pas souvent effectuée dans des bonnes conditions par les jeunes étudiants et la feuille récapitulative ne l'utilise pas pour le graphique qui illustre le niveau de pollution.

Tableau IV.01: La classification de la pollution organique

	NH ₄ ⁺ (mg N/l)	NO ₂ ⁻ (µg N/l)	PO ₄ ³⁻ (µg P/l)	DBO ₅ (mg O ₂ /l)	IPO	Pollution organique
Classe 5	< 0,1	< 6	< 16	< 2	5 – 4,6	Nulle
Classe 4	0,1 – 0,9	6 - 10	16 – 75	2 – 5	4,5 – 4,0	Faible
Classe 3	1,0 – 2,4	11 – 50	76 – 250	5,1 – 10	3,9 – 3,0	Modérée
Classe 2	2,5 – 6,0	51 – 150	251 - 900	10,1 – 15	2,9 – 2,0	Forte
Classe 1	> 6	> 150	> 900	> 15	1,9 – 1,0	Très forte

- *Les indicateurs d'eutrophisation*

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

3.3.2- Application du tableur Excel en métrologie et microbiologie environnementale

A l'aide du logiciel « TPSV2-5.xls » nous avons le calcul des paramètres suivants :

1°) le rapport DBO₅/DCO. La DCO correspond à la demande chimique en oxygène (témoin de la chimiodégradation) et la DBO₅ représente la demande biologique en oxygène (témoin de la biodégradation).

2°) la quantité de matière oxydable (dégradable par oxydation chimique ou biologique) à l'aide de la formule : $MO = (2DBO_5 + DCO) / 3$

3°) pour le pH, la conductivité et les matières en suspension (MES), la moyenne et l'écart type dans le temps.

4°) le type d'effluent en présence à partir du ratio DBO₅/DCO calculé précédemment. Pour se faire, programmez une formule conditionnelle qui permettra d'afficher « effluent industriel peu dégradé » si le ratio est inférieur à 0,1 ; « effluent inorganique toxique » si le ratio est inférieur à 0,3 ; et « effluents agroalimentaires et domestiques » si le ratio est supérieur ou égal à 0,3.

5°) la qualité de l'eau en fonction des moyennes pour le pH, la conductivité et les MES. Voir le tableau ci-dessous.

Tableau IV.02: La qualité de l'eau en fonction du pH, de la conductivité et les MES

Classe	Pollution nulle ou faible	Pollution modérée	Mauvaise qualité
Conductivité	< 750 µS/cm	< 1500 µS/cm	> 1500 µS/cm
pH	De 6,5 à 8,5	De 6 à 6,5 et de 8,5 à 9	< 6 et > 9
MES	< 25 mg/L	< 150 mg/L	> 150 mg/L

3.3.3- EQUIL :

Ce logiciel « EQUIL » est un programme de calcul, basé sur une méthode connue et éprouvée dans le domaine des eaux : la méthode HALLOPEAU & DUBIN, modifié et complété par le concepteur.

Ce programme permet d'effectuer des calculs d'équilibres chimiques dans les eaux naturelles, particulièrement les équilibres calco-carboniques.

Après une première introduction des 5 paramètres, on obtient :

- pHs ou pH (théorique) de saturation : pH que l'on doit obtenir pour être à l'équilibre, à TAC constant.
- CO₂ libre (mg/l).
- Indice (IS ou index) de saturation : correspond à pH - pHs,
 - s'il est positif (>0.01), l'eau est entartrante,
 - s'il est négatif (<-0.01), l'eau est agressive vis à vis du calcaire,
 - s'il se situe entre -0.01 et 0.01, l'eau est considérée à l'équilibre calco-carbonique.
- Alc/CaO : rapport Alcalinité / Calcium (exprimé en équivalents de CaO).
- CO₂ agressif : correspond à la fraction du gaz carbonique libre, susceptible d'attaque chimique sur le calcaire (carbonate de calcium), n'existe évidemment que pour les eaux à caractère agressif (IS < -0,01).

- CaCO_3 dissolvable : quantité de carbonate de calcium (CaCO_3) potentiellement dissolvable dans l'eau, par attaque du CO_2 agressif (acidité carbonique), *Nota* : si l'eau présente un caractère entartrant, il y a indication de CaCO_3 précipitable.
- Indication du CCPP (calcium carbonate precipitation potential) : la quantité de CaCO_3 qui peut être théoriquement précipitée (eau entartrante) ou dissoute (eaux agressives), dans ce dernier cas la valeur est négative.
- Indice de stabilité : indice de stabilité de RYZNAR (IR) = (2 pHS-pH), donne une indication de la tendance corrosive ou incrustante (entartrante) de l'eau.

Par ailleurs, il est indiqué la tendance de l'eau : agressive, entartrante ou à l'équilibre ; et également la proposition de rectification de l'eau (mise à l'équilibre /reminéralisation).

3.3.4- PHREEQCI :

PHREEQCI développé par Parkhurst and Appelo (1999) du United States Geological Survey (USGS) sera utilisé au cours de ce travail (version 2.15). Il s'agit du programme PHREEQC avec une interface pour Windows. Il est disponible gratuitement sur le site de l'USGS.

Ce programme offre le choix de quatre bases de données thermodynamique.

D'un point de vue thermodynamique les fonctions de PHREEQC nous permettront de déterminer :

1) En mode statique : l'état d'équilibre des eaux : spéciation, force ionique, indice de saturation des phases minérales.

2) En mode dynamique

♦ les réactions vers l'équilibre : mise en équilibre d'une phase aqueuse avec une phase solide ou un gaz (interaction eau-roche) ;

♦ les réactions non-équilibrées :

♦ mélange de deux masses d'eau différenciées ;

♦ des réactions d'une solution avec un solide de manière irréversible.

La mise en équilibre de la solution peut ensuite être fixée pour déterminer l'évolution de la solution (c'est-à-dire faire précipiter les phases sur-saturées).

♦ Modélisation inverse : propositions d'une série de solutions possibles pour expliquer le passage d'une eau de l'état 1 à un état 2 en fonction des contraintes imposées.

La plupart des codes permettent d'effectuer les mêmes fonctions. La principale différence entre les codes de calculs géochimiques sont les bases de données thermodynamiques utilisées. La manière d'effectuer les calculs peut également être différente. PHREEQC ne fonctionne pas en « boîte noire » : l'utilisateur doit être en mesure de préciser exactement les contraintes du système. L'avantage est que le code n'inclut dans la solution que les éléments ayant été définis pour la modélisation. Le désavantage est que le système doit être bien connu et contraint (ce qui n'est pas toujours le cas).

4. POLLUTION MINERALE

La qualité d'une eau souterraine est caractérisée par un certain nombre de paramètres physiques, chimiques, déterminant à leur tour des caractères organoleptiques seuls immédiatement perceptibles pour l'utilisateur. Afin de suivre l'évolution du faciès chimique et de la qualité des eaux dans la zone d'étude, nous avons pris en considération les variables suivantes :

- la dureté de l'eau correspondant à sa minéralisation en calcium et magnésium
- le pH qui dépend de la teneur en ions;
- la teneur en gaz dissous issus de l'atmosphère (O₂ et CO₂);
- la teneur en substances minérales dissoutes généralement sous forme ionique: anions (bicarbonates, chlorures, sulfates) et cations (calcium, magnésium, sodium, potassium);

Une teneur trop élevée d'un ou plusieurs composants chimiques cause des désagréments au consommateur (saveur, risques sanitaires) et aux canalisations (corrosion, entartrage...) L'eau est alors jugée impropre à la consommation (et à sa distribution) à moins de subir au préalable un traitement approprié. D'autre part, une teneur élevée d'un élément chimique peut être l'indice d'une pollution par d'autres substances toxiques.

4.1- Résultats des mesures et des analyses chimiques de l'eau

Les analyses physico-chimiques des eaux de la cuvette d'Ouargla (eaux de surface et nappe superficielle) pendant les deux périodes de l'année 2007, ont fait l'objet de représentations graphiques facilitant et aidant l'interprétation.

4.1.1- Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)

Pour évaluer l'état chimique des eaux souterraines et superficielles de la zone d'étude, nous avons utilisé des paramètres facilement mesurables et qui s'avère d'une grande utilité.

a- Température (T) :

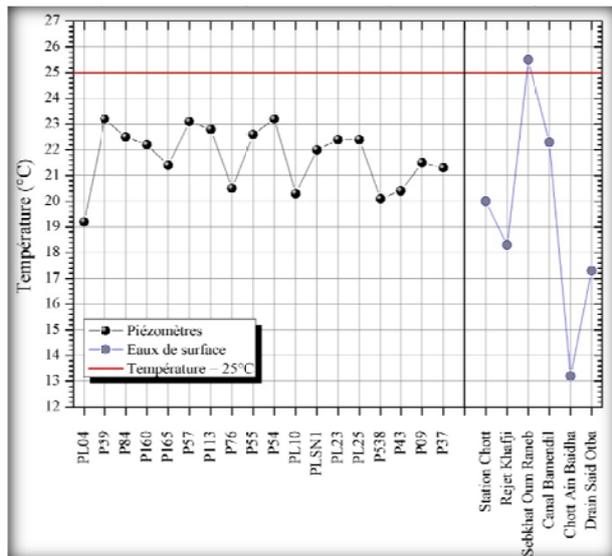


Fig.IV-02 : Variation de la température au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

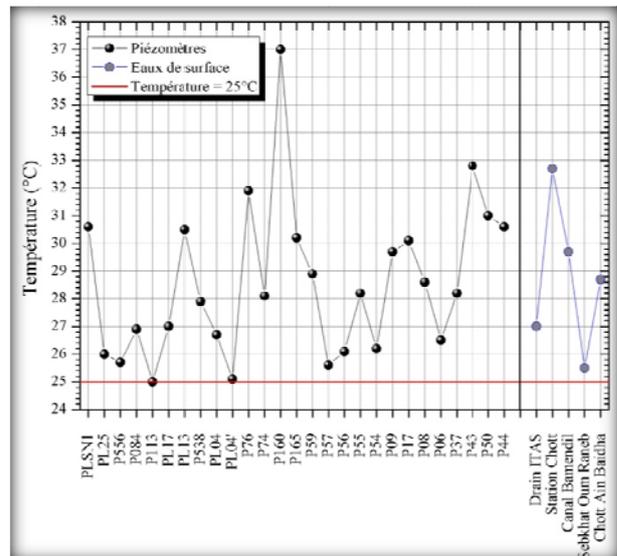


Fig.IV-03 : Variation de la température au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Le paramètre 'température' a été mesuré sur l'ensemble de points de prélèvements, dans les deux périodes d'observation. La température est relativement élevée pour les eaux de la région, vu son climat, mais elle reste toujours dans les normes de potabilité (Fig. V-01) la température varie entre 19°C (PL04) et 24°C (P059) pour les eaux souterraines et entre 13°C (Chott Ain

Baïdha) et 25°C (Sebkhath Oum Raneb) pour les eaux de surface durant le mois de Février (Fig. IV-02). Par contre au mois de Juin (Fig. IV-03) elle varie entre 25°C (P113) et 37°C (P160) dans les eaux souterraines et entre 25°C (sebkhath Oum Raneb) et 33°C (station chott) dans les eaux de surface. Ces variations changent en fonction de la température de l'air, des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Elles jouent un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux.

b- Conductivité électrique :

L'eau peut être considérée comme une solution électrolytique, car presque tous ses constituants dissous, majeurs et mineurs, sont présents sous forme ionique. Grâce à la présence de ces ions, l'eau devient susceptible de se laisser traverser par un courant électrique (la salinité).

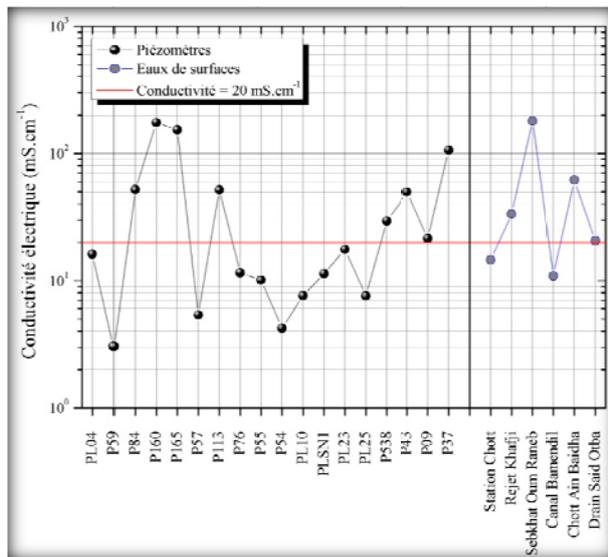


Fig. IV-04 : Variation de la conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

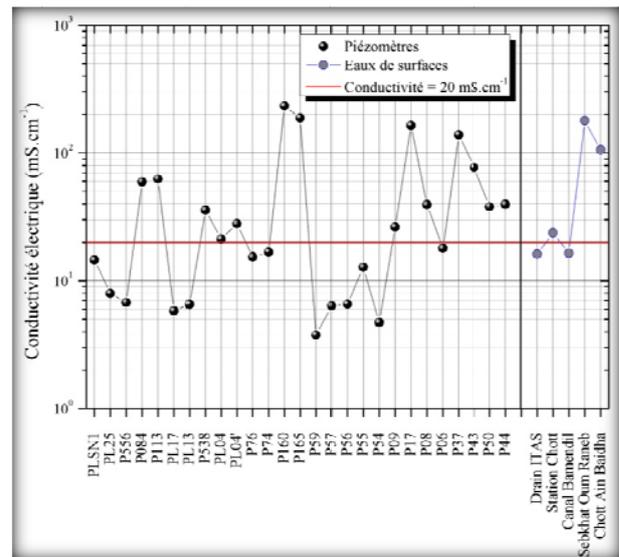


Fig. IV-05 : Variation de la conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Les teneurs en sels dissous sont très élevées, exprimées à travers la conductivité, elles montrent des eaux assez chargées et très conductrices, dépassant largement les normes de potabilité. Au mois de février (Fig. IV-04) la conductivité des eaux souterraines varie entre 3 mS/cm (P59) et 200 mS/cm (P160). Pour les eaux de surface varie entre 10 mS/cm (canal Bamendil) et 200 mS/cm (sebkhath Oum Raneb). Dans les deux périodes d'observation, en hautes comme en basses eaux, on remarque que la différence entre les valeurs de conductivité mesurées, dans les eaux de surface et les eaux souterraines, reste dans le même ordre de grandeur (entre 3-200 mS/cm), tel est le cas du puits P160 et de Sebkhath Oum Raneb). Cette remarque suggère déjà la contamination des eaux souterraines par les eaux superficielles.

c- Potentiel d'Hydrogène (pH) :

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques dans les diagrammes Eh-pH.

Le pH de l'eau conditionne les équilibre physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôt). Le pH est corrigé selon le cas par élimination du CO₂ dissous en excès ou par correction de la dureté carbonatée.

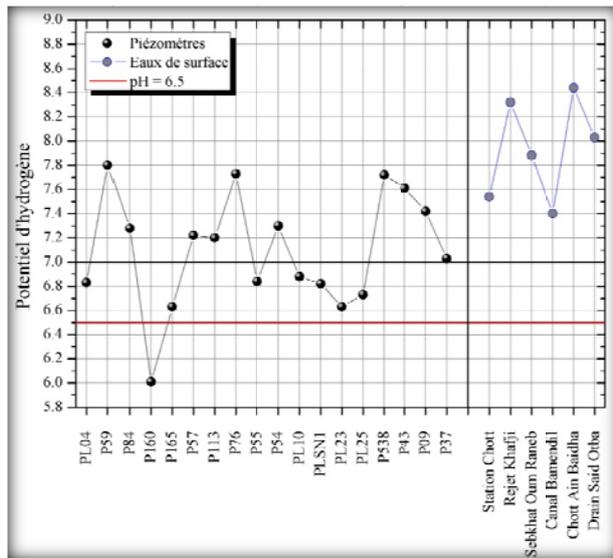


Fig.IV-06 : Variation du pH au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

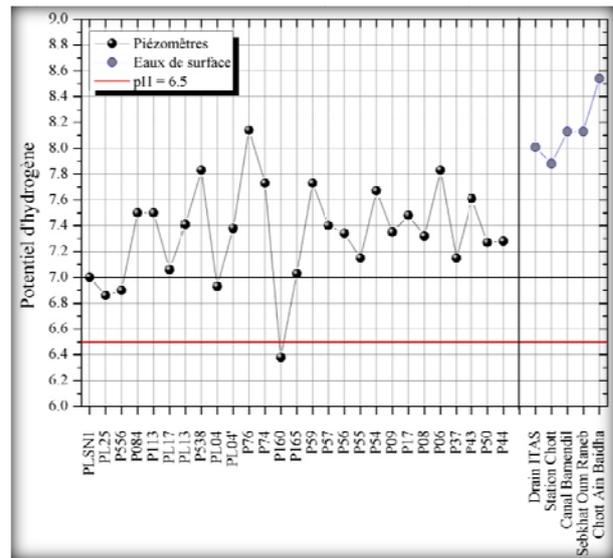


Fig.IV-07 : Variation du pH au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Dans les basses comme dans les hautes eaux, les valeurs du pH, sont nettement plus élevées dans les eaux de surfaces. La période des hautes (Fig. IV-06) eaux montre des pH entre 6.0 (P160) et 7.8 (P59) dans les eaux souterraines. Les eaux de surface montrent une nette alcalinité d'un pH variant entre 7.4 (canal Bamendil) et 8.4 (chott Ain Baïdha).

La période des basses (Fig. IV-07) eaux montre que les eaux tendent vers l'alcalinité avec des pH variant entre 6.4 (P160) et 8.2 (P76) dans les eaux souterraines et 7.9 (station Chott) à 8.6 (chott Ain Baïdha dans les eaux de surface).

d- Potentiel d'oxydoréduction (Eh) :

Ce paramètre nous permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction).

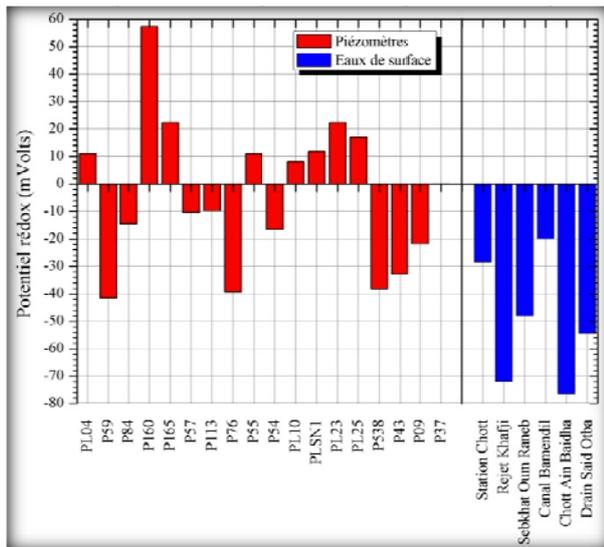


Fig.IV-08 : Variation du Eh au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

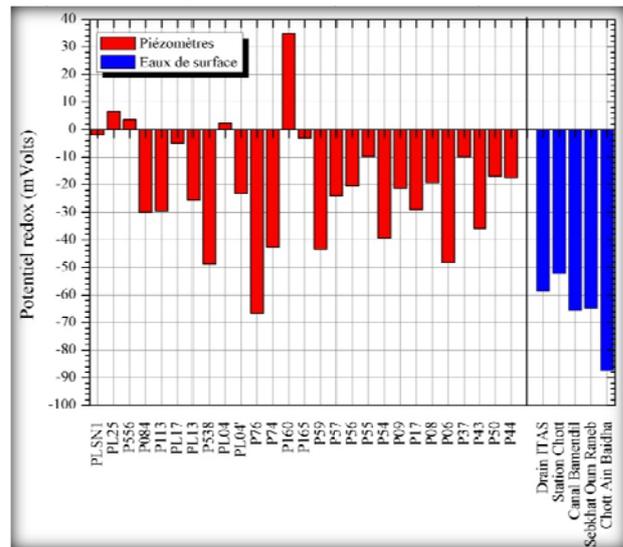


Fig.IV-09 : Variation du Eh au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

D'une façon générale, les eaux de la cuvette de Ouargla montrent un milieu mal oxygéné, le potentiel redox est souvent négatif, ceci offre un environnement propice à la prolifération des microorganismes et des algues. Les valeurs du potentiel redox varient entre 58 mV (P76) et -42 mV (P59) dans les eaux souterraines, et entre -20 mV (canal Bamendil) à -76 mV (chott Ain

Baïdha) dans les eaux de surface montrant un milieu complètement réducteur, cela pour la période hivernale (Fig. IV-08).

Pour la période estivale (Fig. IV-09) les valeurs varient entre 36 mV (P160) et -68 mV (P076) dans les eaux souterraines, et entre -54 mV (station Chott) et -88 mV (chott Ain Baïdha) dans les eaux de surface.

4.1.2- Les éléments majeurs

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

Le calcium est un des paramètres qui contribuent à la minéralisation des eaux. Il en ressort que les eaux de souterraines comme celles de surface de la région d'étude, présentent des teneurs assez remarquables en calcium. Cela aurait pour origine la dissolution des formations carbonatées CaCO_3 du Miopliocène située à la limite Ouest de Ouargla, et des formations alluvionnaires gypseuses (CaSO_4) du Quaternaire, situées dans les dépressions.

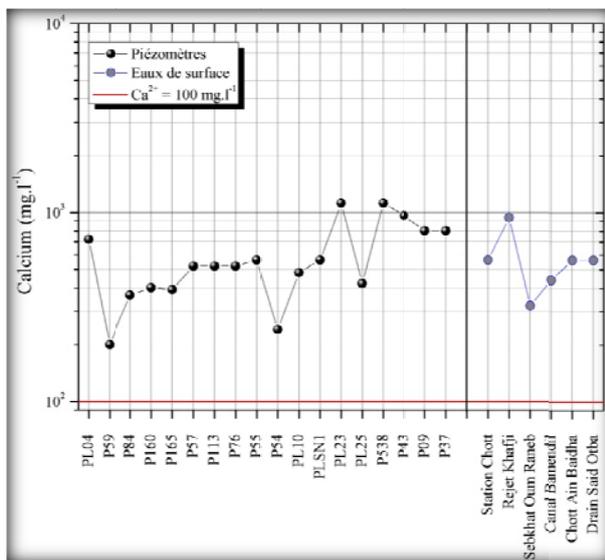


Fig.IV-10 : Variation du Ca^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

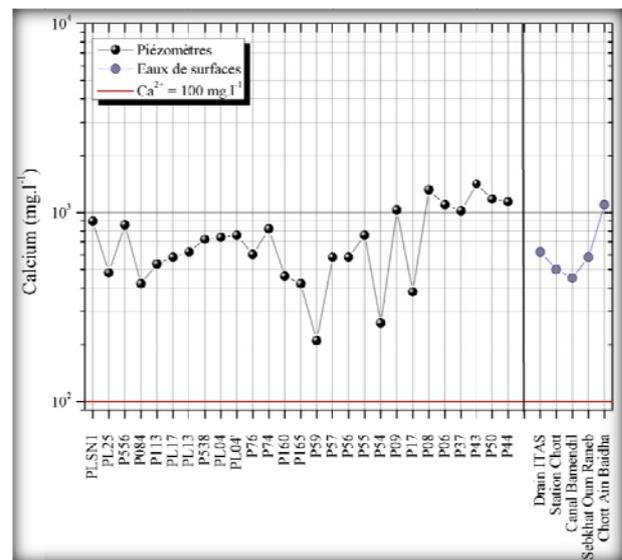


Fig.IV-11 : Variation du Ca^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Les analyses chimiques faites au niveau de la cuvette, montrent que les concentrations en calcium varient en période des hautes eaux (Fig. IV-10) de 200 mg/l (P59) à 1100 mg/l (PL23 et P538) pour les piézomètres, et de 300 mg/l (sebkhat Oum-Raneb) et 950 mg/l (rejet Khafji) pour les eaux de surface.

En période des basses eaux (Fig. IV-11), les eaux souterraines ont des concentrations allant de 200 mg/l (P59) et 1400 mg/l (P43). Les eaux de surface varient de 45 mg/l (canal Bamendil) et 1100 mg/l (chott Ain Baïdha).

b- Magnésium (Mg^{2+}):

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient:

- Soit de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) (essayez de voir avec la géologie pour situer l'origine).
- Soit des formations salifères riches en magnésium « MgSO_4 ».

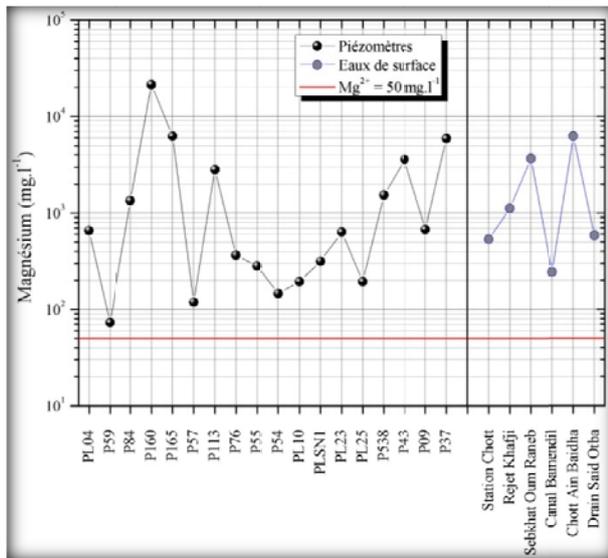


Fig.IV-12 : Variation du Mg^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

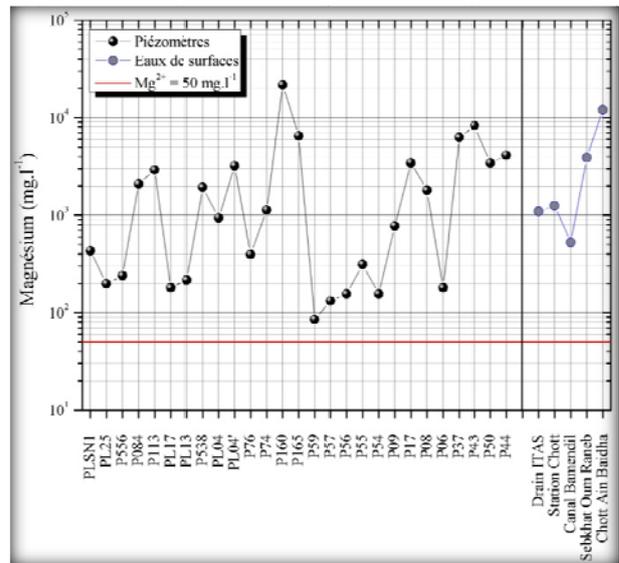


Fig.IV-13 : Variation du Mg^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Au mois de février (Fig. IV-12) les concentrations en magnésium des eaux souterraines varient entre 70 mg/l (P59) et 20000 mg/l (P160). Pour les eaux de surface entre 250 mg/l (canal Bamendil) et 6000 mg/l (chott Ain Baïdha).

Au mois de juin (Fig. IV-13) les concentrations des eaux souterraines varient de 85 mg/l (P59) et 21000 mg/l (P160), et varient entre 530 mg/l (canal Bamendil) et 11000 mg/l (chott Ain Baïdha) pour les eaux de surface.

Les graphiques (Fig. IV-12 et IV-13) montrent que les dépressions et chott sont les plus chargées en sels de magnésium

c- Sodium (Na^+) :

L'élément le plus dominant dans les analyses des cations, est le sodium. L'environnement climatique (climat semi-aride, température élevée, évaporation intense) semble être lié aux teneurs notables du sodium.

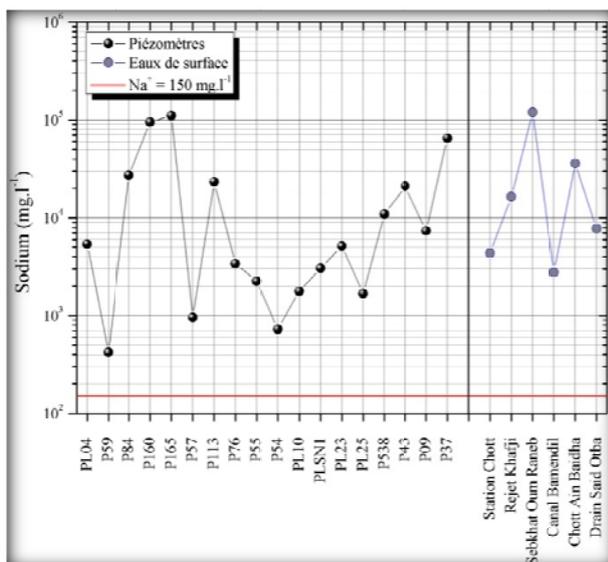


Fig.IV-14 : Variation du Na^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

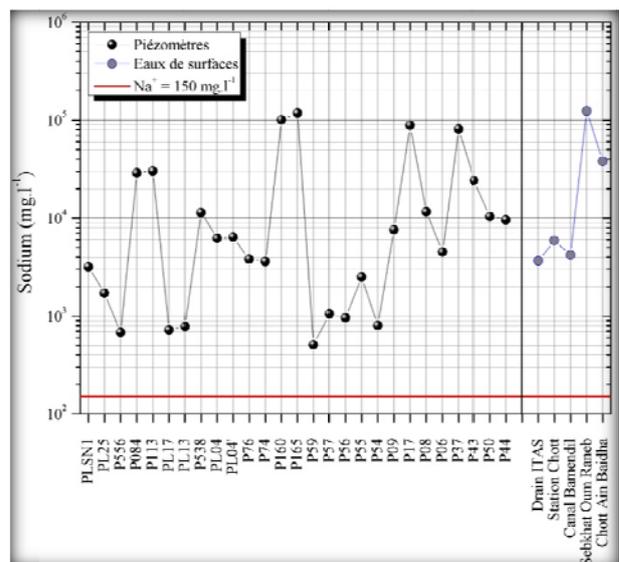


Fig.IV-15 : Variation du Na^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

En période hivernale (*Fig. IV-14*) les concentrations en sodium dans les eaux souterraines allant de 400 mg/l (P59) à 100 g/l (P160 et P165), et pour les eaux de surface entre 2800 mg/l (canal Bamendil) et 110 g/l (sebkhat Oum Raneb).

En période estivale (*Fig. IV-15*) les concentrations en sodium allant de 500 mg/l (P59) à 100 g/l (P160 et P165) dans les eaux souterraines, et entre 3700 mg/l (drain ITAS) et 110 g/l (sebkhat Oum Raneb) pour les eaux de surface.

Donc les eaux des affleurements Mio-pliocène et de la ville sont les moins chargées, par contre des dépressions et chotts sont les plus chargées

d- Potassium (K^+):

Le potassium provient de l'altération des formations argileuses des alluvions quaternaires et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) retrouvée dans les eaux usées agricoles.

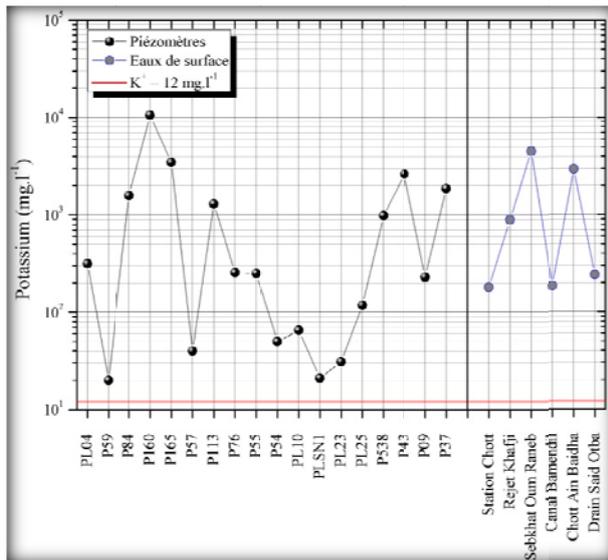


Fig. IV-16 : Variation du K^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

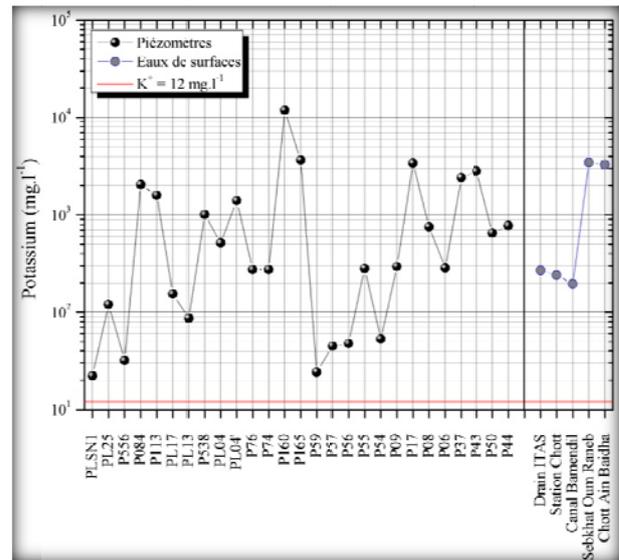


Fig. IV-17 : Variation du K^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Les concentrations en potassium varient en période des hautes eaux (*Fig. IV-16*) de 20 mg/l (P59 et PLSN1) à 10000 mg/l (P160) pour les piézomètres, et de 200 mg/l (station Chott) et 4500 mg/l (sebkhat Oum-Raneb) pour les eaux de surface.

En période des basses eaux (*Fig. IV-17*), les eaux souterraines ont des concentrations allant de 200 mg/l (PLSN1 et P59) et 11000 mg/l (P160). Les eaux de surface varient de 200 mg/l (canal Bamendil) et 3500 mg/l (sebkhat Oum-Raneb).

e- Chlorure (Cl^-)

L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution des formations salifères, et secondairement aux rejets d'eau usée déversées dans le canal.

En période hivernale (*Fig. IV-18*) les concentrations en chlorures dans les eaux souterraines allant de 400 mg/l (P59) à 200 g/l (P160), et pour les eaux de surface entre 2500 mg/l (canal Bamendil) et 160 g/l (sebkhat Oum Raneb).

En période estivale (*Fig. IV-19*) les concentrations allant de 650 mg/l (P59) à 200 g/l (P160) dans les eaux souterraines, et entre 4000 mg/l (drain ITAS) et 180 g/l (sebkhat Oum Raneb) pour les eaux de surface.

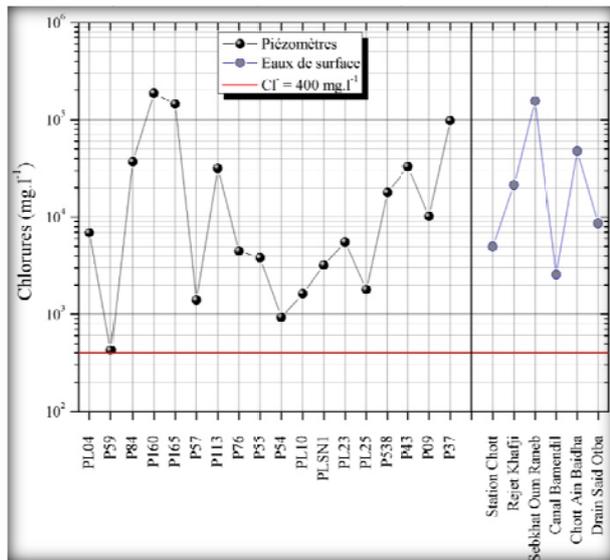


Fig.IV-18 : Variation du Cl au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

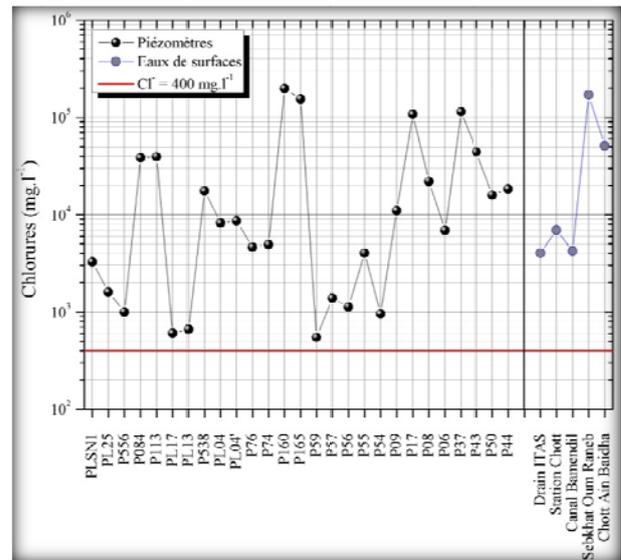


Fig.IV-19 : Variation du Cl au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

f- Sulfates (SO₄²⁻) :

La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses. Les sulfates contenus dans l'eau souterraine sont fournis par la dissolution du gypse. D'une part, des pesticides provenant des eaux d'irrigation.

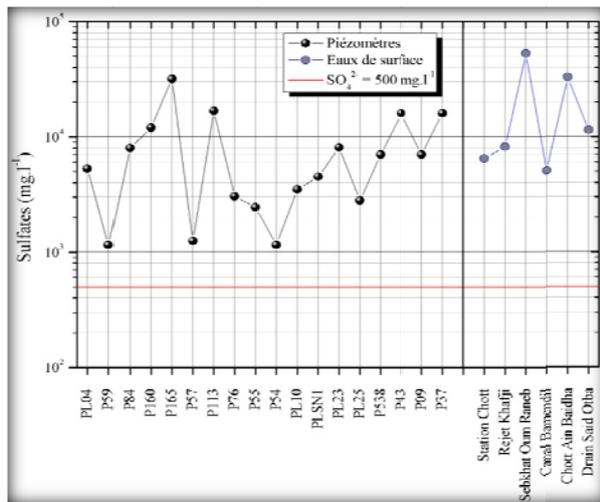


Fig.IV-20 : Variation du SO₄²⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

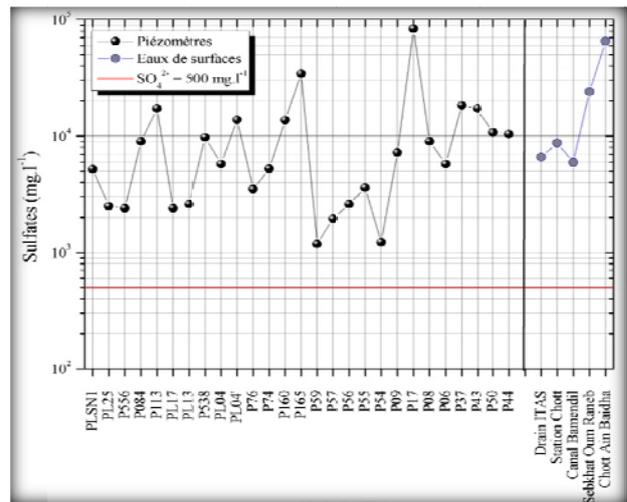


Fig.IV-21 : Variation du SO₄²⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Les concentrations en sulfates varient en période des hautes eaux (Fig. IV-20) de 1000 mg/l (P59 et P54) à 31000 mg/l (P165) pour les piézomètres, et de 5000 mg/l (canal Bamendil) et 50000 mg/l (sebkhat Oum-Raneb) pour les eaux de surface.

En période des basses eaux (Fig. IV-21), les eaux souterraines ont des concentrations allant de 1000 mg/l (P59 et P54) et 85000 mg/l (P17). Les eaux de surface varient de 6000 mg/l (canal Bamendil) et 65000 mg/l (chott Ain Baidha).

g- Bicarbonates (HCO₃⁻) :

La présence des bicarbonates dans l'eau de la zone d'étude aurait la même origine que celles du calcium et magnésium, citées auparavant. Elle est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique.

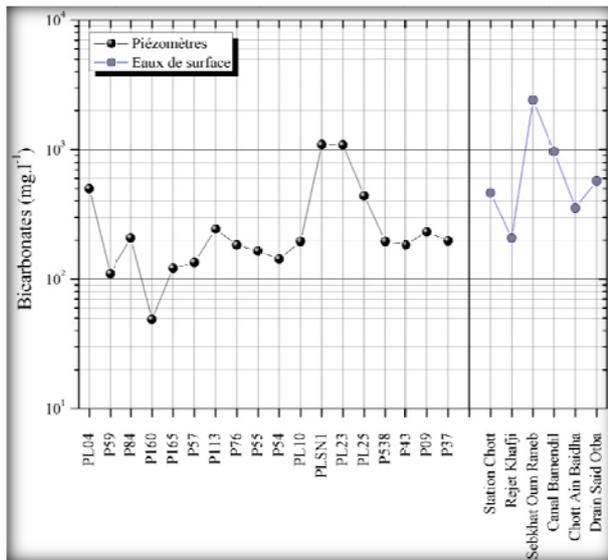


Fig.IV-22 : Variation du HCO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

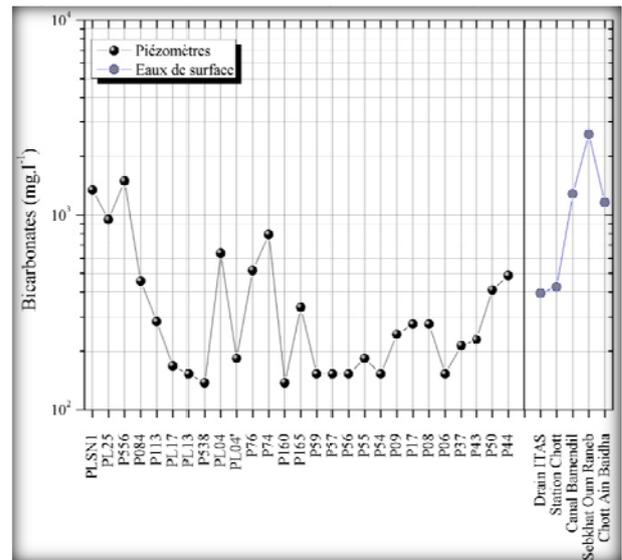


Fig.IV-23 : Variation du HCO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Au mois de février (Fig. IV-22) les concentrations en bicarbonates des eaux souterraines varient entre 50 mg/l (P160) et 1000 mg/l (PLSN1 et PL2). Pour les eaux de surface entre 200 mg/l (rejet Khafji) et 2500 mg/l (sebkhath Oum-Raneb).

Au mois de juin (Fig. IV-23) les concentrations des eaux souterraines varient de 140 mg/l (P160) et 1500 mg/l (P556), et varient entre 300 mg/l (drain ITAS) et 2600 mg/l (sebkhath Oum-Raneb) pour les eaux de surface.

4.2- Faciès chimiques des eaux

Pour définir l'évolution spatio-temporelle des faciès chimiques présents dans les eaux d'Ouargla, nous avons illustré les résultats des analyses par des graphiques.

4.2.1- Le diagramme de Piper :

La représentation des données physico-chimiques sur le diagramme de Piper montre plusieurs faciès chimiques qui dépendent de la nature géologique de l'aquifère, des activités agricoles et industrielles.

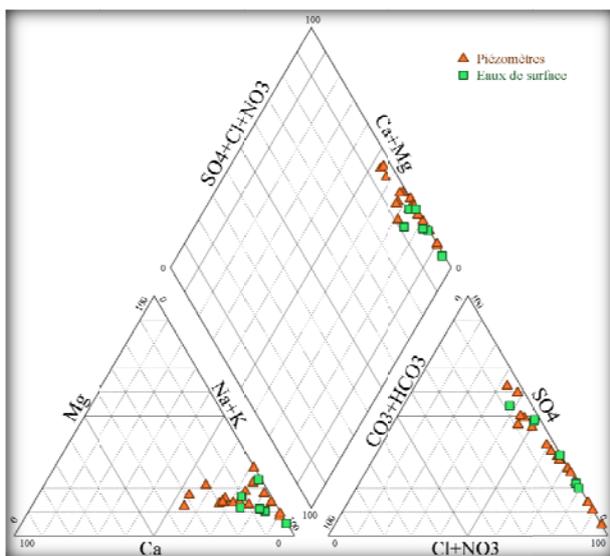


Fig.IV-24: Diagramme de Piper (Février 2007)

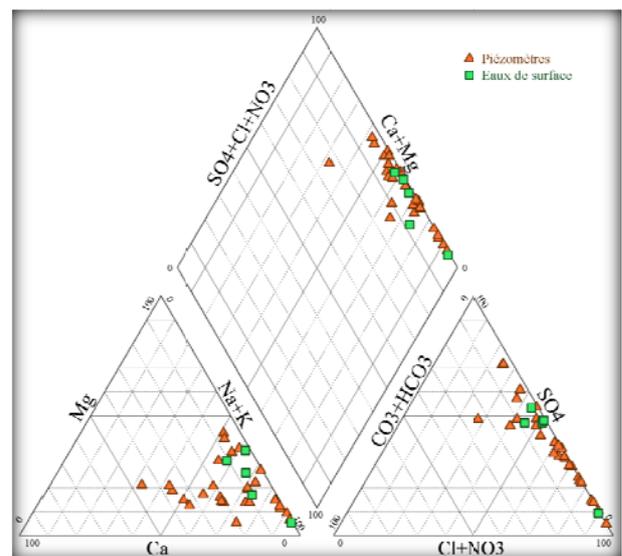


Fig.IV-25: Diagramme de Piper (Juin 2007)

Le diagramme de Piper (*Fig. IV-24 et IV-25*) montre que la distribution des points d'eau occupe, d'une part, au niveau du triangle des cations le pôle sodique, d'autre part, au niveau du triangle des anions sont réparties entre le pôle chloruré et sulfaté. Quant au faciès chimique, il regroupe une seule famille chlorurée sulfato-sodique. Ceci montre bien un faciès chimique chloruré-sodique dominant imposé par l'aridité du climat et un faciès secondaire sulfato-sodique provoqué en partie par la pollution anthropique.

4.2.2- Evolution des faciès chimiques

Vu la prédominance de ces ions (Na^+ , Cl^- , Mg^{++} , SO_4^{--}) dans l'eau de la nappe on a réalisé une représentation des faciès chimiques dans un diagramme $\text{Na}^+ / \text{Mg}^{++} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ (*Fig. IV-26*). Ce diagramme montre l'existence de deux pôles caractéristiques de la nappe. Entre les deux pôles représentés par le faciès chloruré sodique (eaux des dépressions, chotts et sebkhas) et l'autre sulfaté sodique (eaux de la ville et des affleurements du Mio-pliocène) avec une prédominance chlorurée.

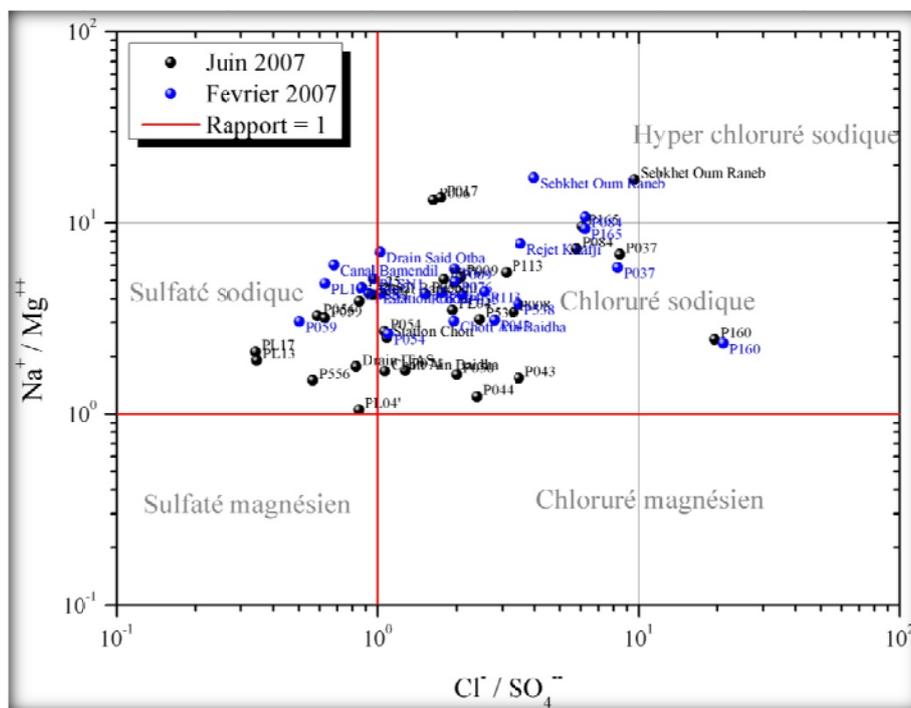


Fig.IV-26: Caractérisation du faciès chimique

4.2.3- Répartition des faciès chimiques

L'ensemble des diagrammes des eaux de la cuvette de Ouargla a montré deux familles chimiques (*Tableau IV-3*) :

- Une famille chlorurée, la plus dominante, représente près de 70% des points d'eau avec une majorité sodique et magnésienne. Les eaux de cette famille sont des eaux des dépressions (sebkhas et chotts) là où l'influence de l'évaporation est intense (donc précipitation des carbonates et des sels minéraux).
- Une famille sulfatée ne représente que 30 % des eaux de la cuvette avec un faciès sodique et magnésien. Un seul piézomètre (P556) présente un faciès calcique. Les eaux de cette famille sont les eaux des piézomètres de la ville et les piézomètres des affleurements Mio-pliocène (influence des eaux profondes par le biais des infiltrations des eaux des fuites du réseau d'AEP, d'assainissement ainsi que l'irrigation au niveau des palmeraies).

Tableau IV-3: Répartition des faciès chimiques des eaux selon les périodes

Faciès chimique	Faciès caractéristique	Périodes		Observation
		Février 2007	Juin 2007	
Chloruré sodique	$\frac{rCl > rSO_4 > rHCO_3}{rNa > rMg > rCa}$	PL04, P84, P160, P165, P113, P76, P538, P43, P09, P37. <i>P54.</i> Chott Ain Baïdha, Sebkhat Oum-Raneb, Station Chott. Rejet Khafji, Drain Saïd Otba.	PL04, P84, P160, P165, P113, P76, P538, P43, P09, P37. P50, P08, P17, P44, P74, Chott Ain Baïdha, Sebkhat Oum-Raneb, Station Chott.	Février 2007 32.14 % Juin 2007 37.50 % <hr/> Total 69.64 %
	$\frac{rCl > rSO_4 > rHCO_3}{rNa > rCa > rMg}$	P55. <i>P57.</i>	P55. <i>P54.</i> P06.	
Sulfaté sodique	$\frac{rSO_4 > rCl > rHCO_3}{rNa > rCa > rMg}$	P59, PLSN1, PL25. PL23, PL10. <i>Canal Bamendil.</i>	P59, PLSN1, PL25. <i>P57.</i> P56, PL13, PL17.	Février 2007 10.71 % Juin 2007 17.86 % <hr/> Total 28.56 %
	$\frac{rSO_4 > rCl > rHCO_3}{rNa > rMg > rCa}$	-	PL04'. <i>Canal Bamendil.</i> Drain ITAS.	
Sulfaté calcique	$\frac{rSO_4 > rCl > rHCO_3}{rCa > rNa > rMg}$	-	P556	Juin 2007 01.79 %

4.2.4- Classification des faciès chimiques

Vue la répartition des eaux de la cuvette en deux familles (chlorurée et sulfaté) avec une majorité chlorurée ; deux classifications ont été établie afin de déterminer les différents types des eaux.

a- Famille chlorurée:

On constate que les eaux de la cuvette de Ouargla (Tableau IV-4) ne présentent aucune teneur normale en chlorures. Et la majorité (plus de 80%) se trouve au dessus de la limite supérieure de la potabilité permanente. Or, Seulement 18% des points d'eau appartenant à l'affleurement du Mio-pliocène et trois piézomètres de la ville de Ouargla, reste dans la limite de potabilité.

Tableau IV-4 : Classification selon la concentration en chlorures

Classe	Limites (meq/l)	Echantillons		Observations
		Février 2007	Juin 2007	
Eaux hyperchlorurées	$r\text{ Cl} > 700$	P84, P160, P165, P113, P43, P37. Sebkhat O. Raneb, Chott Ain Baïdha.	P084, P160, P165, P113, P43, P37. P17. Sebkhat O. Raneb, Chott Ain Baïdha.	30.36%
Eaux chlorothalassiques	$700 > r\text{ Cl} > 420$	P538 Rejet Khafji	P538. P08, P50, P44.	Eau de mer $r\text{ Cl} = 560$ <hr/> 10.71%
Eaux chlorurées fortes	$420 > r\text{ Cl} > 140$	P09, PL04. PL23. Station Chott. Drain Saïd Otba	P09, PL04. PL04', P06. Station Chott.	17.86%
Eaux chlorurées moyennes	$140 > r\text{ Cl} > 40$	P76, P55, PLSN1, PL25. PL10. Canal Bamendil	P76, P55, PLSN1, PL25. P74. Canal Bamendil. Drain ITAS.	40 = limite supérieur de la potabilité permanente <hr/> 23.21%
Eaux oligochlorurées	$40 > r\text{ Cl} > 15$	P59, P57, P54.	P59, P57, P54. P56, P556, PL13, PL17,	17.86%
Eaux chlorurées normales	$r\text{Cl} < 10$	-	-	-

b- Famille sulfatée:

Les eaux de la cuvette de Ouargla (Tableau IV-5) sont loin de satisfaire la norme en sulfates. Près de 90% des échantillons se trouvent au dessus de la limite supérieure de la potabilité permanente. Seul 03.57% concernant les eaux des affleurements du Mio-pliocène caractérisées par les deux piézomètres (P59 et P54) en période hivernale (Février 2007) respectent la norme de potabilité.

Tableau IV-5 : Classification selon la concentration en sulfates

Classe	Limites (meq/l)	Echantillons		Observations
		Février 2007	Juin 2007	
Eaux hypersulfatées	$r \text{SO}_4 > 58$	PL04, P84, P160, P165, P113, P76, PLSN1, P538, P43, P37, P09. PL25. PL10, PL23. Canal Bamendil, Sebkhath O. Raneb, Chott Ain Baïdha, Station Chott. Rejet Khafji, Drain Saïd Otba.	PL04, P084, P160, P165, P113, P76, PLSN1, P538, P43, P37, P09. P55. PL04', P74, P17, P08, P06, P50, P44. Canal Bamendil, Sebkhath O. Raneb, Chott Ain Baïdha, Station Chott. Drain ITAS.	Eau de mer $r\text{SO}_4 = 58$ <hr/> 78.57%
Eaux sulfatées	$58 > r \text{SO}_4 > 24$	P57. P55.	P57. PL25, P59, P54. P56, P556, PL13, PL17.	24 = limite supérieur de la potabilité permanente <hr/> 17.86%
Eaux oligosulfatées	$24 > r \text{SO}_4 > 06$	P59, P54.	-	03.57%
Eaux sulfatées normales	$r \text{SO}_4 < 06$	-	-	-

4.3- L'influence climatique sur la salinité des eaux de la cuvette

Les analyses physico-chimiques des eaux de la cuvette de Ouargla (eaux de surface et nappe superficielle) pendant l'année 2007, ont montré une grande variation des concentrations des éléments chimiques. Ces dernières dépassent les normes de potabilité dans la majorité des cas.

Cette importance des concentrations est due à l'influence de plusieurs facteurs, surtout le facteur climatique dans une zone hyperaride, caractérisé par la température élevée générant une évaporation intense.

4.3.1- Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)

a- Température (T) :

Les eaux souterraines des affleurements Mio-pliocène (P54, P55, P57, P59 et P113) (Fig. IV-27) montrent une faible variation (augmentation) de la température entre le mois de février et le mois de juin, de l'ordre de 2 à 5°C. Par contre l'écart de la température entre février et juin est remarquable dans les eaux des dépressions (chotts et sebkhas) et peut varier entre 8 à 15°C.

Ce qui indique que l'influence de la température est importante au niveau des dépressions là où le niveau statique est plus proche de la surface du sol ainsi que les eaux sont stagnantes.

Les eaux de surface montrent une variation très élevée par sa relation directe avec l'atmosphère, sauf que le de prélèvement au niveau de sebkhat Oum Raneb ne montre aucune variation, cela est à l'état sec de presque toute la sebkha, au mois de juin, à l'exception de quelques endroits sous abris (pont chaussée).

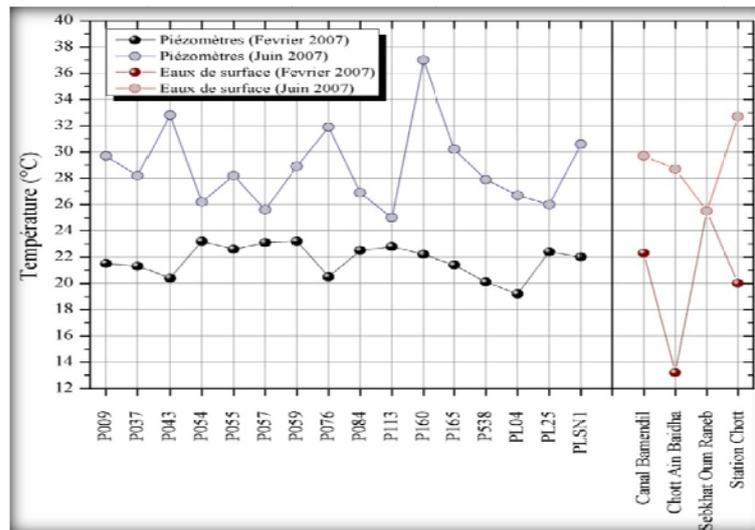


Fig.IV-27 : Evolution temporaire de la température au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

b- Conductivité électrique :

Généralement les eaux de la cuvette (Fig. IV-28) montrent une nette augmentation de la salinité entre les deux périodes d'observation, provoquée par l'augmentation de la température par conséquent par le phénomène d'évaporation intense.

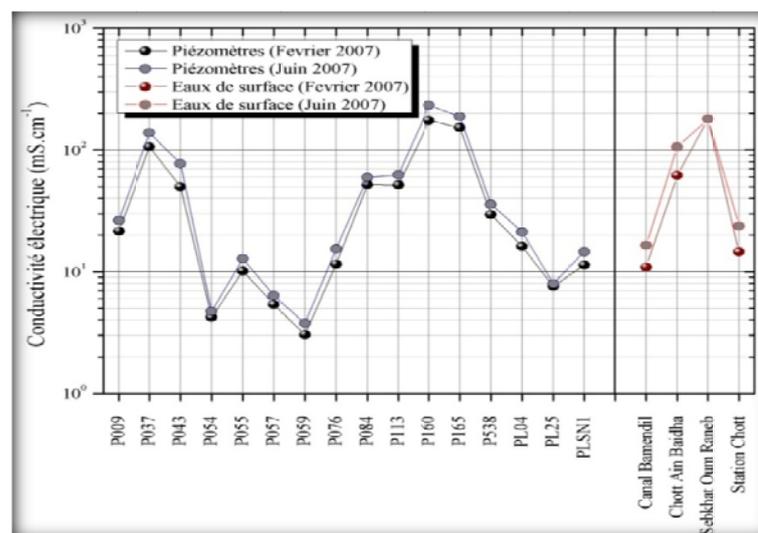


Fig.IV-28 : Evolution temporaire de la conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

c- Potentiel d'Hydrogène (pH) :

L'évolution du pH entre les deux périodes (Fig. IV-29) présente une nette tendance à l'alcalinisation des eaux dans presque tous les piézomètres, surtout les eaux de surface.

L'exception des deux piézomètres (P09 et P59) montre une tendance vers la neutralité.

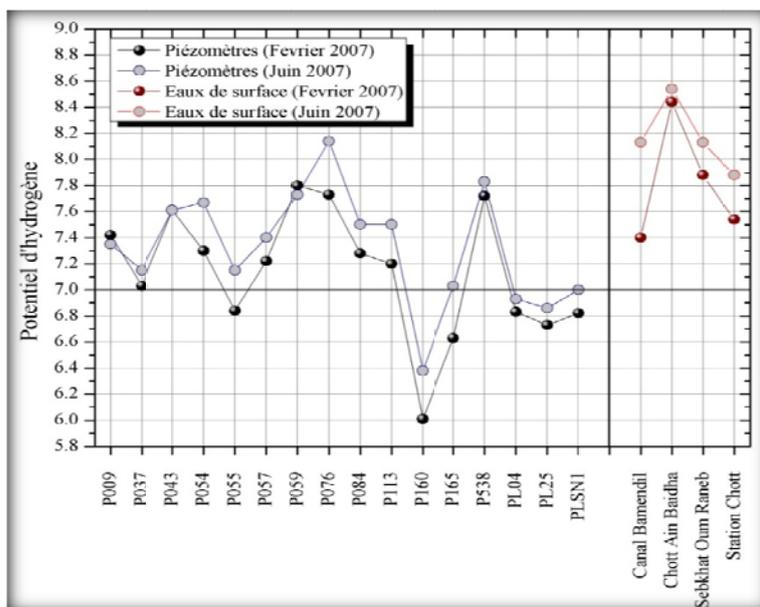


Fig.IV-29 : Evolution temporaire du pH au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

d- Potentiel d'oxydoréduction (Eh) :

L'évolution du potentiel redox (Eh) entre les deux périodes (Fig. IV-30) présente une nette tendance vers le milieu réducteur surtout les eaux de surface, traduisant une consommation de l'oxygène par la voie chimique et/ou organique.

Le piézomètre P09 montre une très faible tendance vers le milieu oxydant.

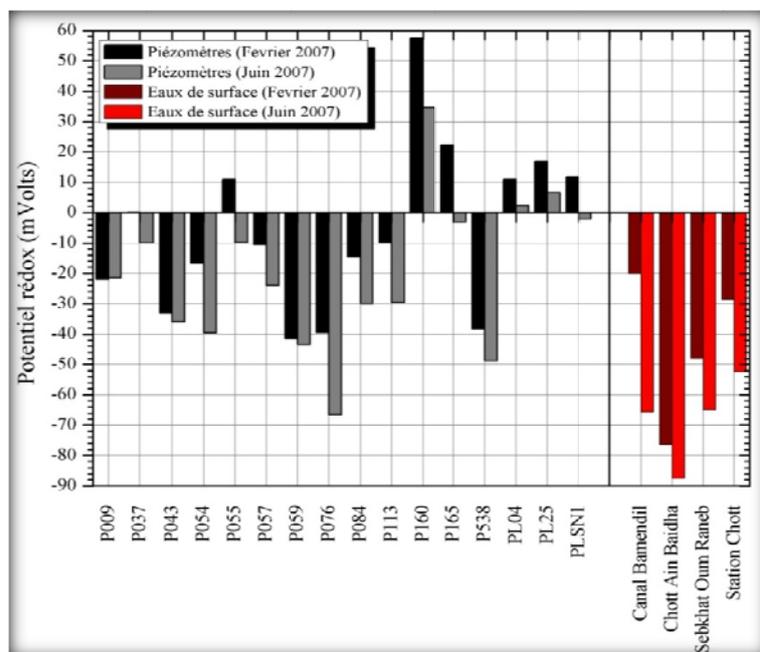


Fig.IV-30 : Evolution temporaire du Eh au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

4.3.2- Les éléments majeurs

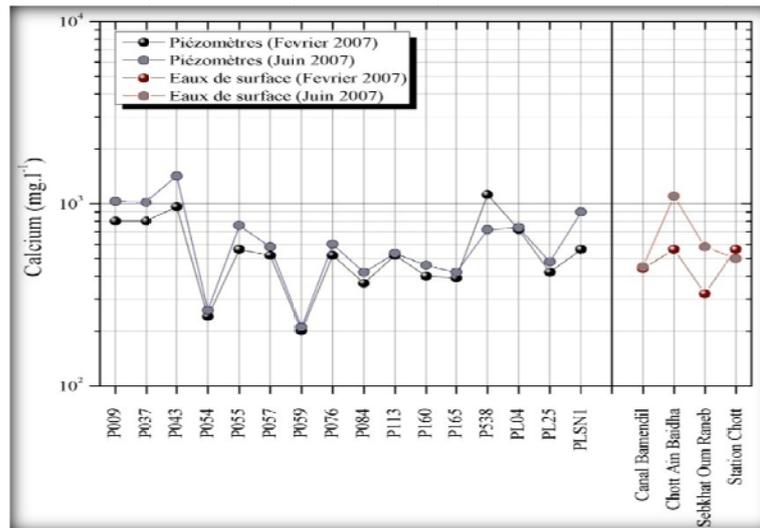
a- Calcium (Ca^{2+}):

Fig.IV-31 : Evolution temporaire du Ca^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

L'évolution temporelle des concentrations en calcium (Fig. IV-31) montre une augmentation en période estivale, à l'exception du piézomètre P538 au niveau du chott Ain Baïdha où montre une diminution de la concentration, qui se traduit par une précipitation du CaCO_3 due à un apport de HCO_3^- par les eaux usées. Cette précipitation est confirmée par les diminutions des bicarbonates au niveau des eaux du canal de la station de relevage Chott.

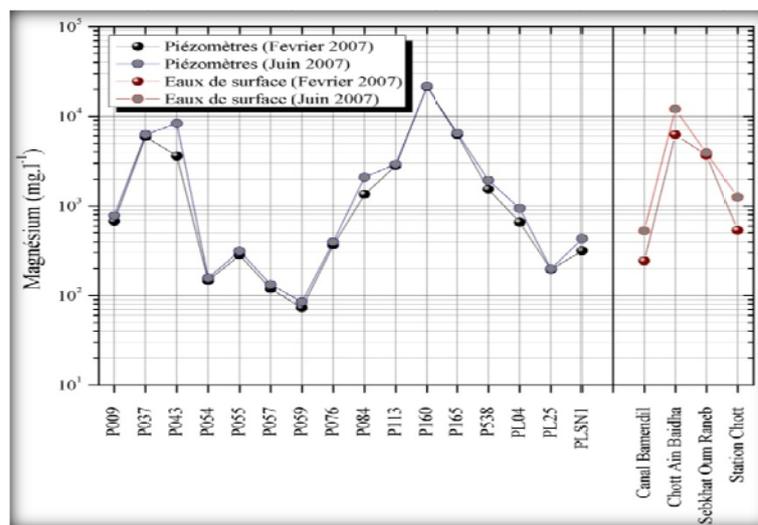
b- Magnésium (Mg^{2+}):

Fig.IV-32 : Evolution temporaire du Mg^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

L'évolution temporelle du magnésium (Fig. IV-32) montre toujours une augmentation de la concentration en période chaude par l'effet de l'évaporation (sels d'une grande solubilité).

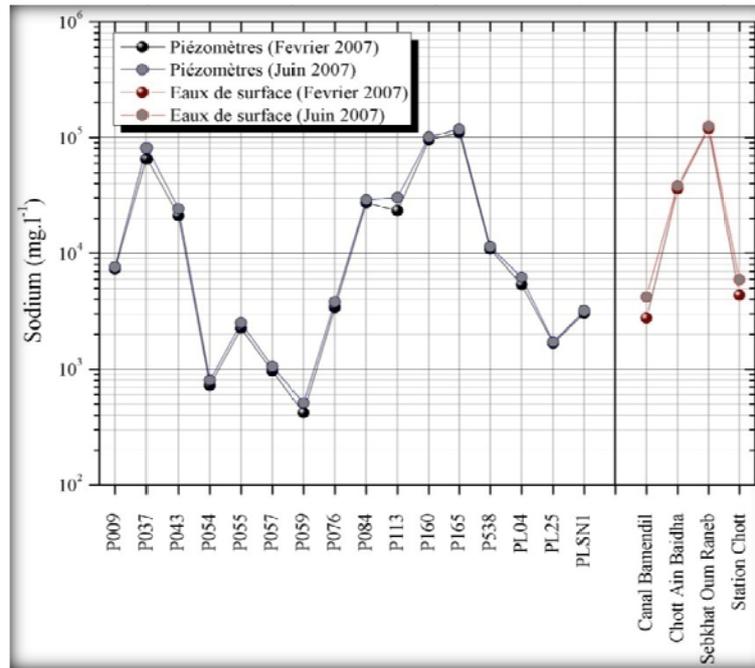
c- Sodium (Na^+):

Fig.IV-33 : Evolution temporaire du Na^+ au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

L'évolution temporelle du sodium (Fig. IV-33) montre toujours une faible augmentation de la concentration au mois de juin par l'effet de l'évaporation (NaCl d'une très grande solubilité).

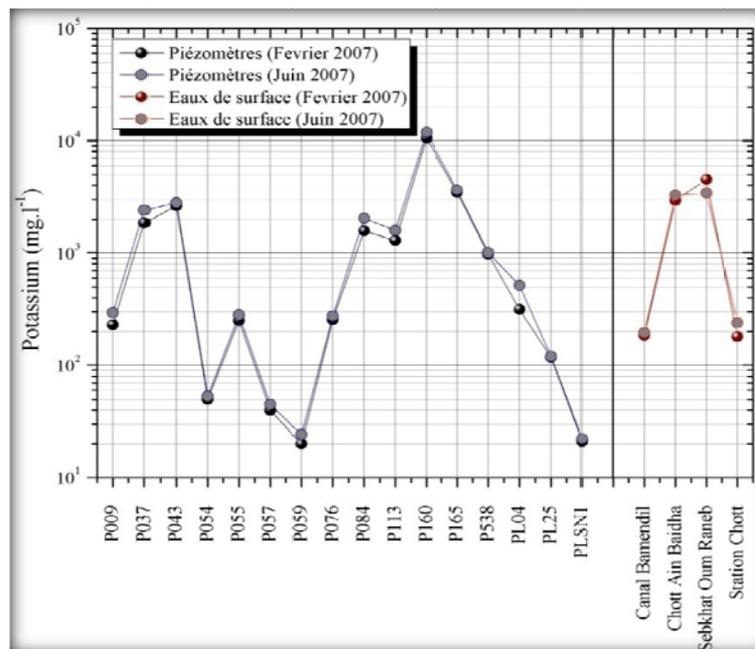
d- Potassium (K^+):

Fig.IV-34 : Evolution temporaire du K^+ au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

L'évolution temporelle du potassium (Fig. IV-34) montre toujours une faible augmentation de la concentration au mois de juin dans tous les piézomètres. Seul le point d'eau de surface « Sebkhath Oum Raneb » montre une diminution.

e- Chlorure (Cl)

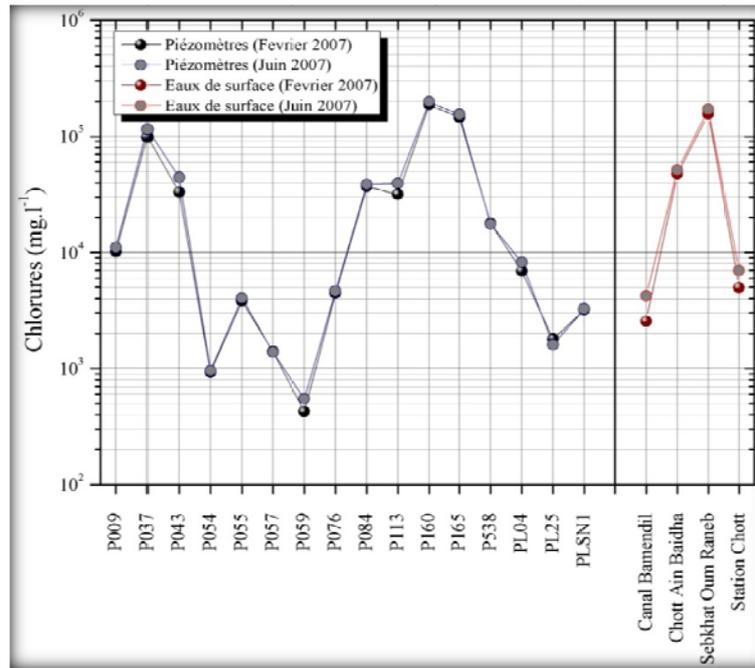


Fig.IV-35 : Evolution temporaire du Cl au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

L'évolution temporelle des chlorures (Fig. IV-35) montre toujours une faible augmentation de la concentration au mois de juin par l'effet de l'évaporation (NaCl d'une très grande solubilité).

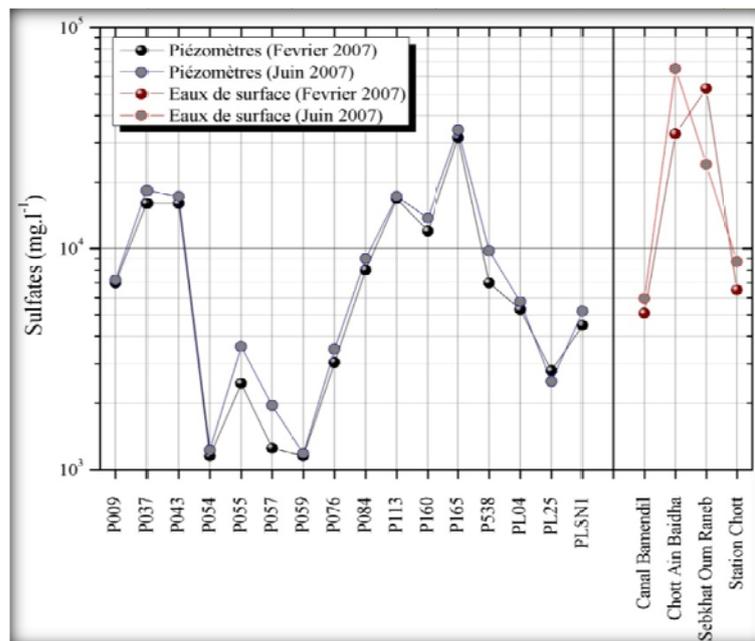
f- Sulfates (SO₄²⁻) :

Fig.IV-36 : Evolution temporaire du SO₄²⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla
Périodes : Février-Juin 2007

L'évolution temporelle des sulfates (Fig. IV-36) montre toujours une faible augmentation de la concentration au mois de juin par l'effet de l'évaporation (CaSO₄ d'une grande solubilité). Seul le point d'eau de surface « Sebkhath Oum Raneb » montre une diminution traduisant une précipitation des gypses atteignant la saturation dans une telle minéralisation.

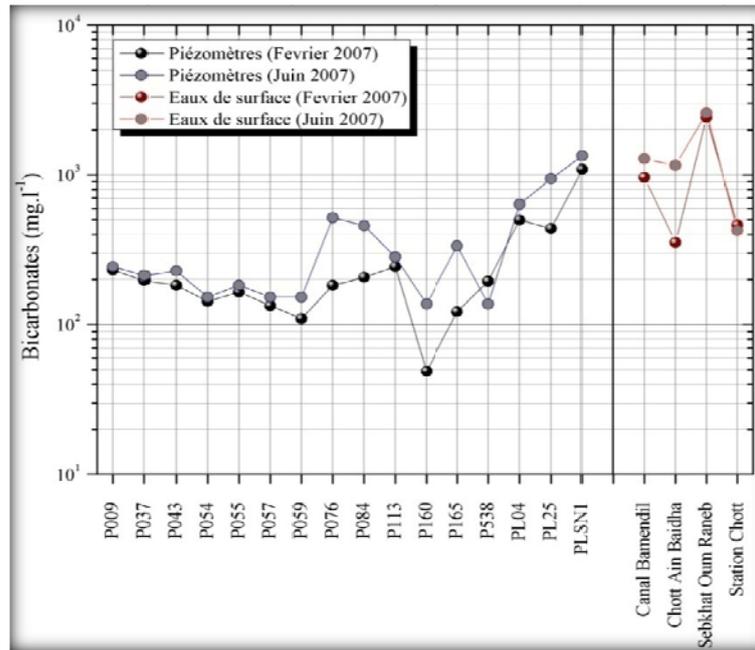
g- Bicarbonates (HCO_3^-) :

Fig.IV-37 : Evolution temporelle du HCO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)

L'évolution temporelle des concentrations en bicarbonates (Fig. IV-37) montre une augmentation en période estivale, à l'exception du piézomètre P538 au niveau du chott Ain Baïdha où montre une diminution de la concentration, ce qui confirme la précipitation du CaCO_3 démontré plus haut.

4.4- Influence des eaux de surface sur la salinité des eaux souterraines

Les analyses physico-chimiques des eaux de la cuvette de Ouargla (eaux de surface et nappe superficielle) pendant l'année 2007, ont montré une grande variation des concentrations des éléments chimiques. Cependant, la relation entre la composition chimique des eaux de surface et celle des eaux souterraines reste encore à prouver.

4.4.1- Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)

a- Température (T), Conductivité électrique (CE) et Potentiel d'Hydrogène (pH) :

L'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques (Fig. IV-38) montre que les eaux de surface au niveau de :

- ✓ Chott Ain Baïdha présente un pH alcalin (8.5), une forte conductivité (200 mS/cm) et une température de l'ordre de 28.6°C. Le piézomètre (P538), proche du chott montre le même comportement avec des valeurs moindres (pH=7.2, T°=27.8°C et conductivité= 40mS), indiquant une contamination des eaux de la nappe par les eaux du chott.
- ✓ La station de relevage Chott présente un pH alcalin (7.9), une température élevée (32.6°C) mais une faible conductivité (2mS/cm) dans un canal collecteur des eaux usées, donc une dilution par le renouvellement continue des eaux usées (la T° et la matière organique influe directement sur le pH). Les deux piézomètres, les plus proches de la station, sont PL04 et PL04' (100 et 10m respectivement) avec une faible température, pH moindre et une conductivité supérieure à celle du canal, traduisant le contact important eau- roche.

- ✓ Le canal de Bamendil a une influence directe sur le piézomètre P76 distant de 20m. on note une simple différence au niveau du paramètre température, où la température du canal est légèrement faible dû à l'alimentation du canal par les eaux usées.
- ✓ Sebkhât Oum Raneb montre de faible T° et une faible conductivité par rapport au piézomètre P160 cela s'explique par l'état sec de la sebkhâ, sauf quelques endroits sous-abris (pont chaussée), ce qui minimise l'influence climatique. La matière organique rend le milieu très alcalin. Généralement les eaux de surface (usées et d'irrigation) montrent une nette influence sur les eaux souterraine en collaboration avec les autres paramètres.

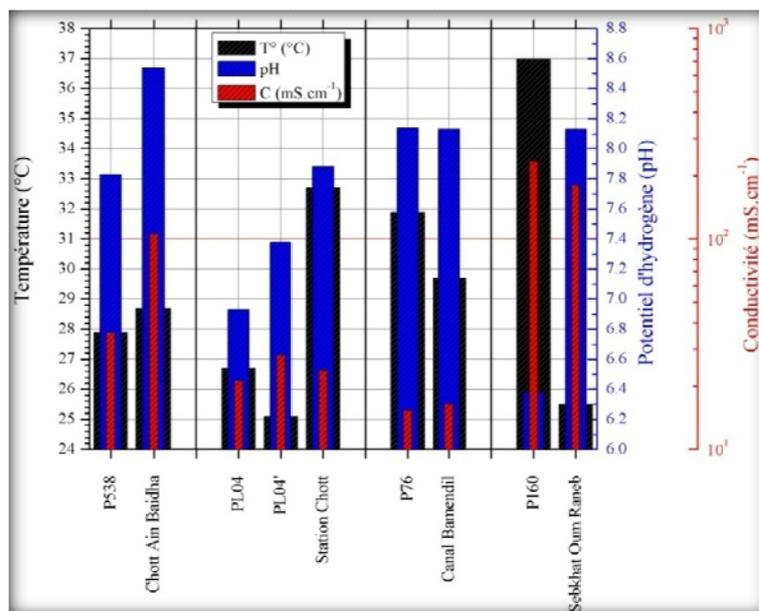


Fig.IV-48 : Evolution de la température, pH et conductivité au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

4.4.2- Les éléments majeurs

a- Chott Ain Baïdha :

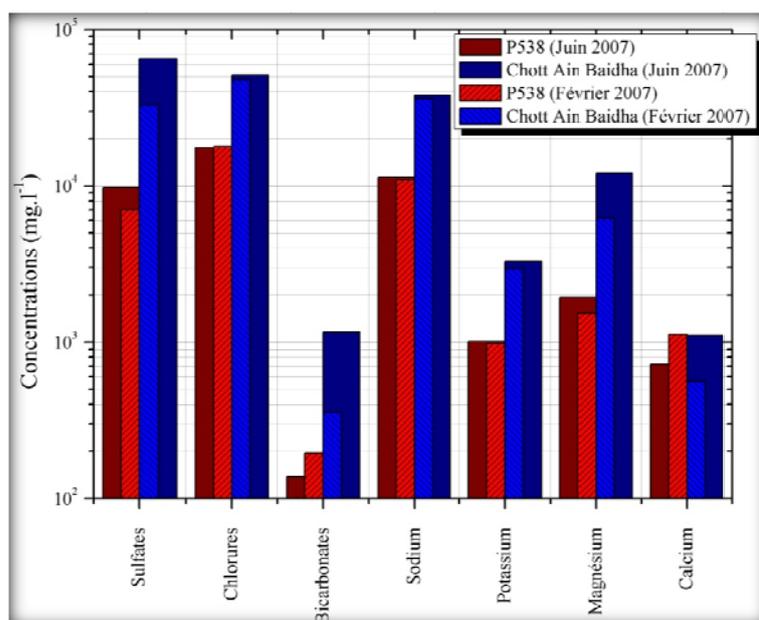


Fig.IV-39 : Evolution des concentrations au niveau du Chott Ain Baïdha

L'évolution des concentrations au niveau du Chott Aïn Baïdha (*Fig. IV-39*) montre que tous les ions des eaux du chott sont supérieurs à ceux du piézomètre P538, à l'exception du calcium au mois de juin présente une inversion des concentrations. Ce phénomène s'explique par la concentration élevée en bicarbonates des eaux usées, lié à la précipitation des sels dissous. Par contre l'allure générale du diagramme montre un certain parallélisme des teneurs entre les eaux du piézomètre et les eaux du chott, impliquant une corrélation étroite, par conséquent une contamination de la nappe par les eaux des chotts.

b- Canal Bamendil :

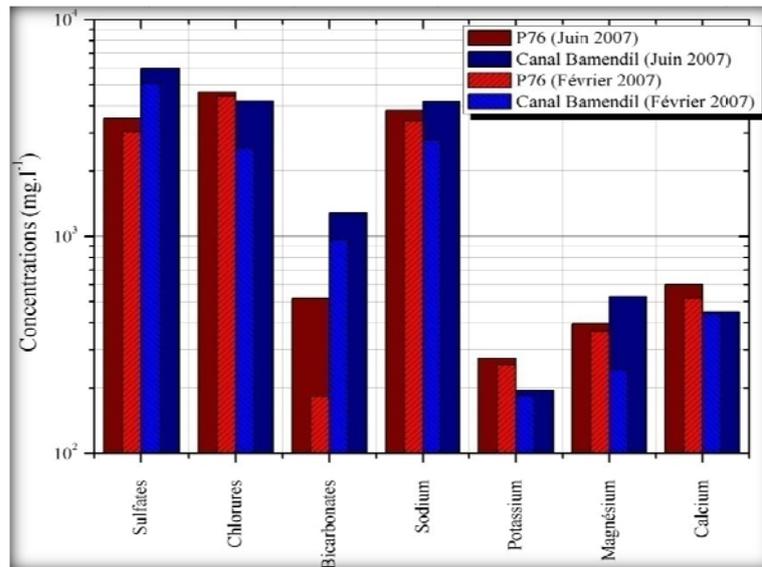


Fig.IV-50 : Evolution des concentrations au niveau du Canal Bamendil

L'évolution des concentrations au niveau du canal de Bamendil (*Fig. IV-40*) montre que les concentrations en :

- ✓ sulfates et bicarbonates des eaux du canal sont supérieures que celles du piézomètre P76.
- ✓ chlorures, potassium et calcium des eaux du canal sont inférieurs que ceux du piézomètre P76.
- ✓ sodium et magnésium des eaux du canal en mois de février sont inférieurs que celles du piézomètre P76. Par contre, elles s'inversent au mois de juin.

c- Station de relevage Chott :

L'évolution des concentrations au niveau du Station de relevage Chott (*Fig. IV-41*) montre que tous les ions des eaux du canal sont inférieurs à ceux du piézomètre PL04' distant de 10 m du canal, à l'exception des bicarbonates.

Pour le piézomètre PL04 distant de 50m du canal montre que les :

- ✓ sulfates et magnésium sont inférieurs à ceux du canal.
- ✓ chlorures, bicarbonates, sodium, potassium et calcium sont supérieurs à ceux du canal.

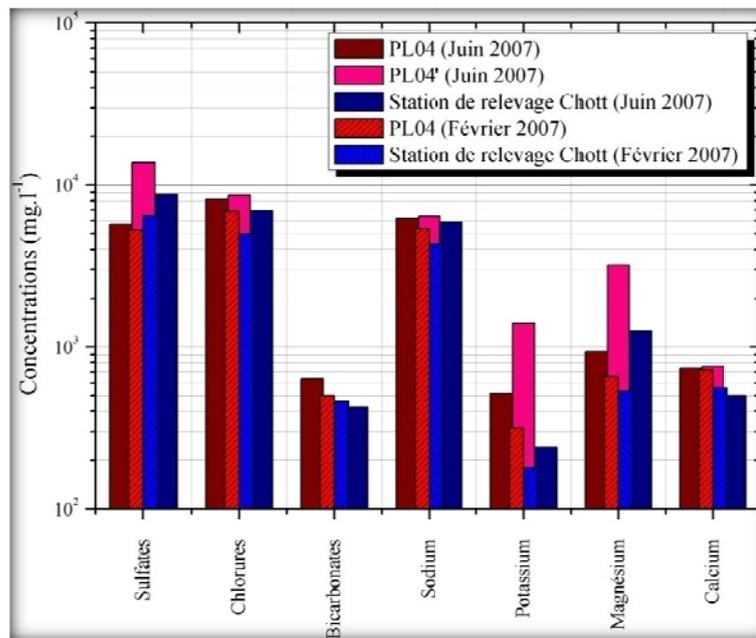


Fig.IV-41 : Evolution des concentrations au niveau de la station de relevage Chott

d- Sebkhath Oum Raneb :

L'évolution des concentrations au niveau de Sebkhath Oum Raneb (Fig. IV-42) montre que les concentrations en :

- ✓ Sulfates, bicarbonates et sodium des eaux de la Sebkhath sont supérieures à ceux du piézomètre P160.
- ✓ chlorures, potassium et magnésium des eaux de la Sebkhath sont inférieurs à ceux du piézomètre P160.
- ✓ Seul le calcium des eaux de la Sebkhath en mois de février est inférieur que celui du piézomètre P160, et inversement au mois de juin.

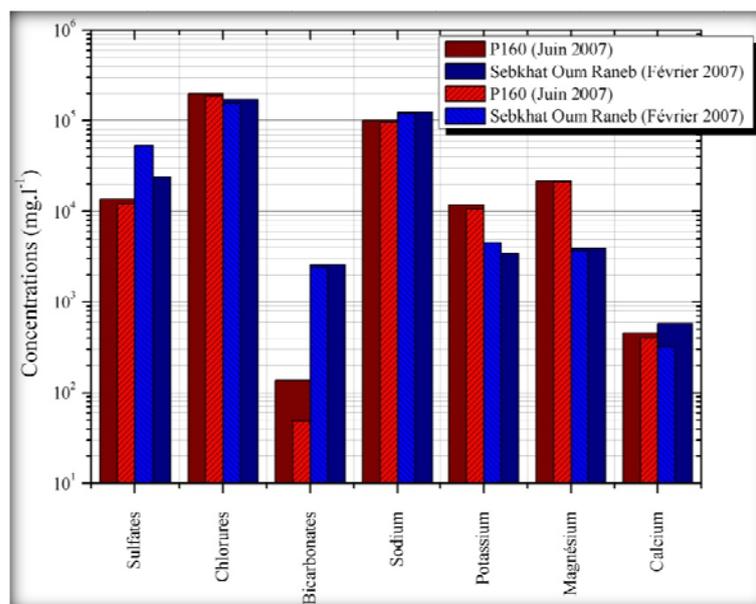


Fig.IV-42 : Evolution des concentrations au niveau de sebkhath Oum Raneb

4.5- L'influence de la profondeur sur la salinité des eaux de la cuvette

La nappes libre d'Ouargla) est très vulnérable, par sa nature géologique, son niveau piézométrique et par le passage du canal d'évacuation : les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique (par excès de rejet des eaux de la nappe profonde) aboutit à lessiver les particules de la zones non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées. Or, la percolation de l'eau dans la zone non saturée peut produire une fixation des substances sur les particules et donc une épuration partielle de l'eau.

Pour atteindre, verticalement, la nappe libre d'Ouargla, les polluants transportés par les eaux d'infiltration (eaux d'irrigation) doivent franchir de nombreux obstacles:

* *le sol* : L'activité chimique et microbiologique est intense (oxydation, réduction...) De nombreux corps sont modifiés chimiquement, les polluants organiques peuvent être métabolisés et minéralisés. Néanmoins, cette biodégradation peut aboutir à des métabolites au moins aussi toxiques que les polluants d'origine. Les complexes argilo-humiques des formations du Miopliocène et du Quaternaire peuvent fixer de nombreux corps minéraux et organiques par adsorption.

* *la zone non saturée* : Comme le sol, elle joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances. Cette action est d'autant plus efficace que la granulométrie est plus faible.

* *la zone saturée* : La filtration se poursuit dans le milieu poreux de la nappe et prend une direction d'écoulement horizontale ; le polluant est dilué dans la masse d'eau.

4.5.1- Les paramètres physico-chimiques (mesure *in situ*)

a- Température (T) :

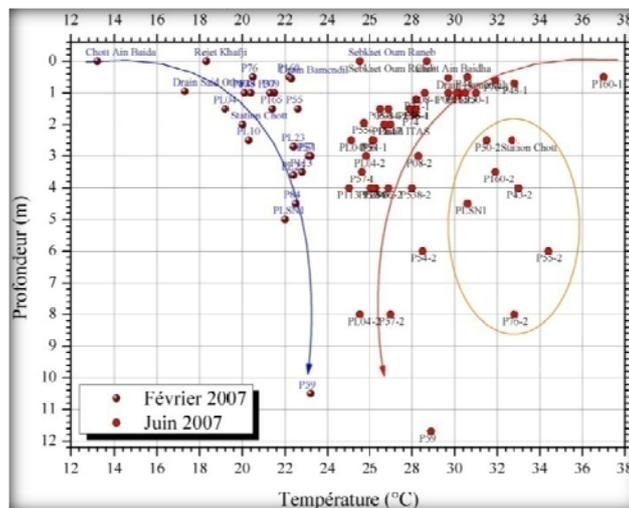


Fig.IV-43 : Evolution de la température en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)

L'évolution de la température en fonction de la profondeur (Fig. IV-43) montre une croissance de la température au niveau des premiers mètres de profondeur, pour rester constante ensuite.

En hautes et basses eaux les valeurs de la température augmentent en fonction de la profondeur pour atteindre à 5 m de profondeur, 22° en hiver et 37° en été.

Par ailleurs on note que l'influence de la profondeur sur la température se fait sentir à 12m.

La première période (février) ne montre aucune anomalie (les analyses ont été faite au niveau d'une seule profondeur), par contre pour la deuxième période (juin) montre des anomalies qui existe au niveau de la deuxième profondeur. Ce phénomène s'explique par un comportement d'un volume d'eau cylindrique (piézomètre) ce qui diffère du milieu poreux (aquifère). Le volume d'eau chauffé au niveau de la partie supérieure s'accompagne d'une évaporation donc augmentation de la salinité et augmentation de la densité ce qui créer un mouvement descendant et ascendant de l'eau (augmentation de la température à la partie inférieure du volume d'eau).

b- Conductivité électrique :

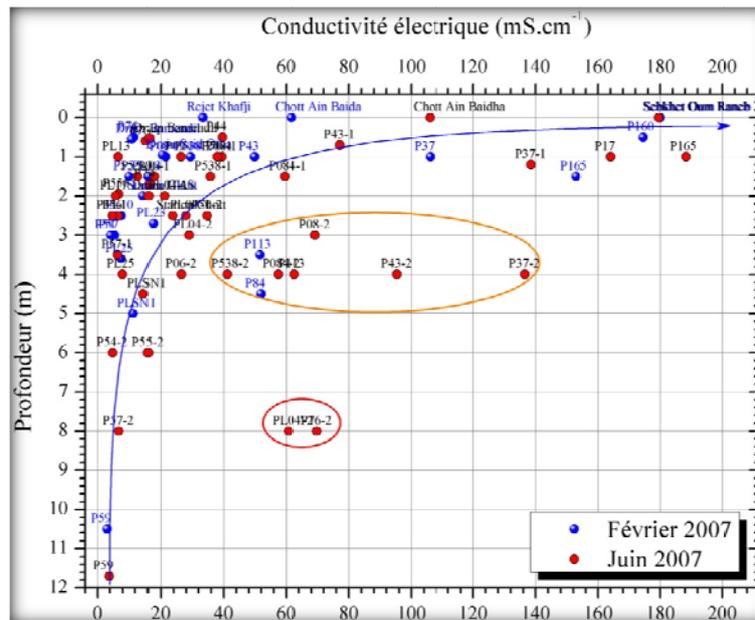


Fig.IV-44 : Evolution de la conductivité en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution de la conductivité en fonction de la profondeur (Fig. IV-44) montre que la conductivité est plus élevée dans les premiers mètres de profondeur, pour la majorité des points d'eau. Cependant les échantillons appartenant aux eaux de la nappe se distinguent par leurs faibles conductivités au delà de 5m de profondeur. Ceci revient à dire que l'évolution de la conductivité en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-45) montre :

- ✓ une forte augmentation au niveau des piézomètres de la ville qui s'explique par le phénomène d'infiltration des fuites des réseaux d'AEP, d'assainissement et d'irrigation d'où cette dilution au niveau des couches d'eau supérieures.
- ✓ une faible augmentation à nulle au niveau des piézomètres des affleurements mio-pliocène expliquant les très faibles influence des facteurs externes.
- ✓ une diminution au niveau des dépressions (P84 dans le rejet Khafji à sec), (P160 dans sebkat Oum Raneb à sec), (P37 dans sebkat Safioune à sec) et (P50 dans sebkat Ngoussa à sec). Ce phénomène s'explique par l'influence directe de la température sur ces eaux de faible profondeur d'où une augmentation de la salinité par évaporation à ce niveau.

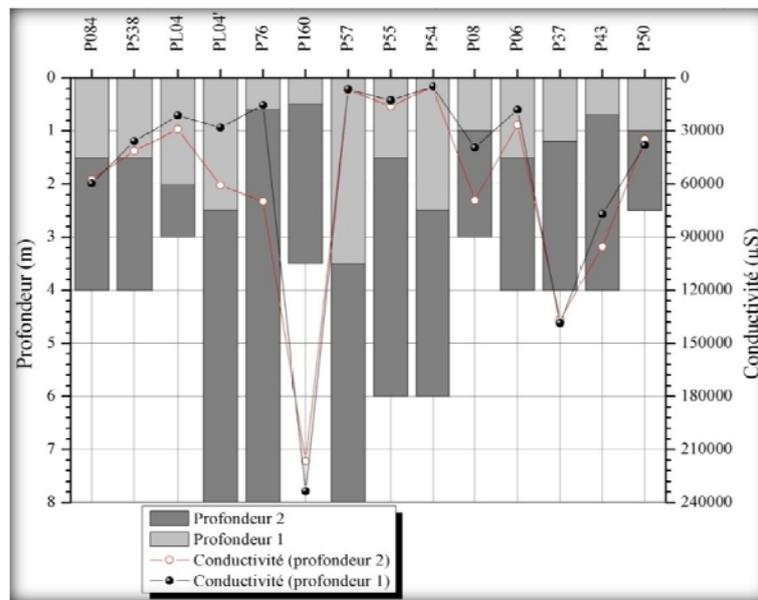


Fig.IV-45 : Evolution de la conductivité en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

c- Potentiel d'Hydrogène (pH) :

L'évolution du pH en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-46) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une tendance vers la neutralité au niveau des piézomètres sous influences anthropiques.
- ✓ une tendance vers l'alcalinité au niveau des piézomètres des affleurements mio-pliocène ainsi que les eaux acides du piézomètre P160.
- ✓ Pas de variation au niveau des dépressions (P84 dans le rejet Khafji à sec) et (P37 dans sebkhat Safioune à sec).

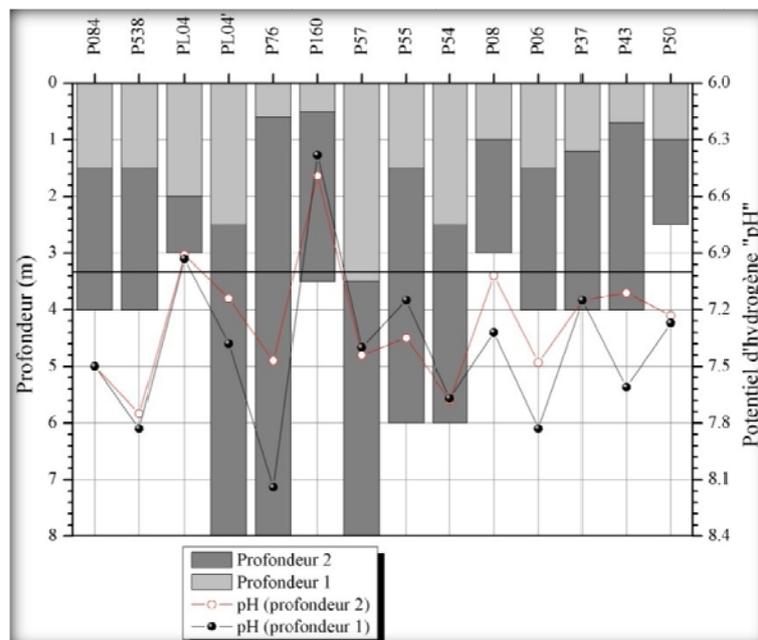


Fig.IV-46 : Evolution du pH en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

a- Potentiel d'oxydoréduction (Eh) :

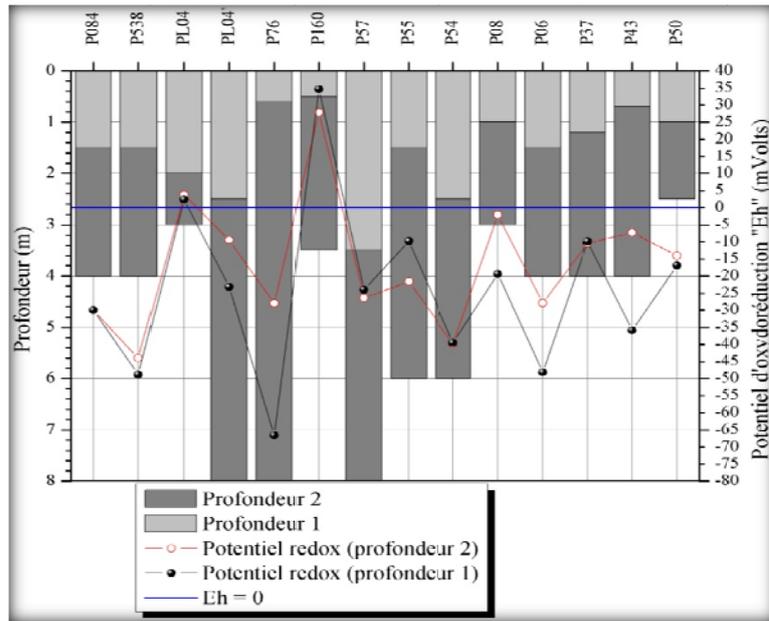


Fig.IV-47 : Evolution du Eh en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution du Eh en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-47) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une tendance vers le milieu oxydant au niveau des piézomètres sous influences anthropiques.
- ✓ une tendance vers le milieu réducteur au niveau des piézomètres des affleurements mio-pliocène ainsi que les dépressions à l'état sec.

4.5.2- Les éléments majeurs

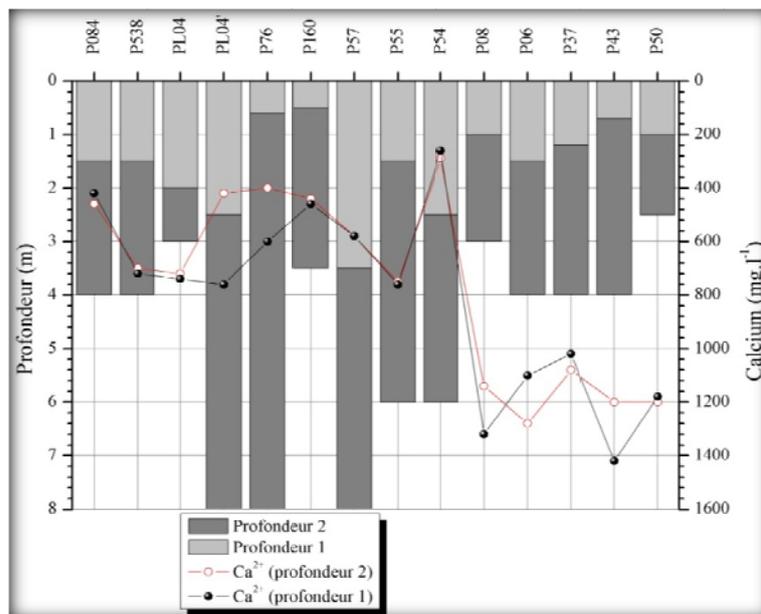
a- Calcium (Ca^{2+}) :

Fig.IV-48 : Evolution du Ca^{2+} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution de la concentration en calcium en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-48) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une augmentation au niveau des piézomètres des dépressions à sec et des affleurements Mio-pliocène qui s'explique par l'épuisement des bicarbonates (pas d'apport anthropique) et la dissolution des gypses.
- ✓ une diminution au niveau des piézomètres sous influence anthropique. Ce phénomène s'explique par enrichissement en bicarbonates qui se précipitent avec le Ca sous l'influence de la température estivale.

b- Magnésium (Mg^{2+}) :

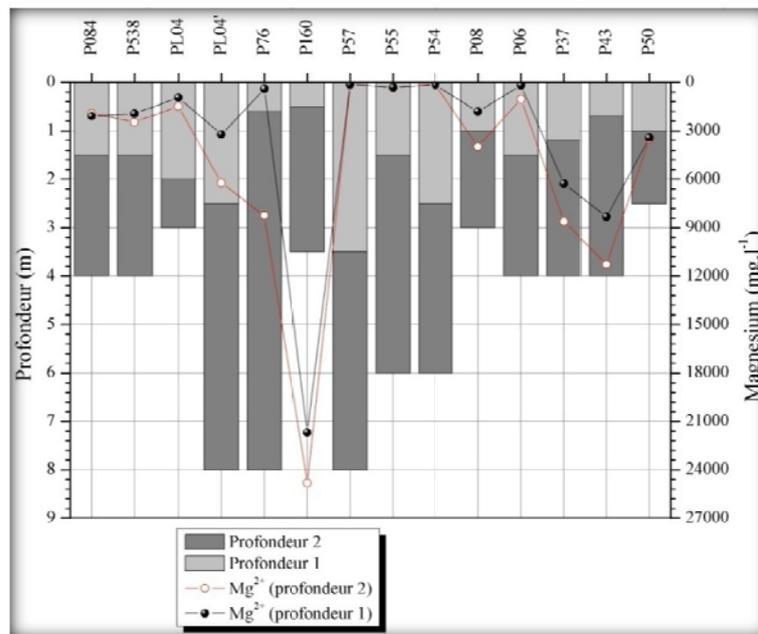


Fig.IV-49 : Evolution du Mg^{2+} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution de la concentration en magnésium en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-49) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une augmentation au niveau de presque tous piézomètres qui s'explique par le phénomène d'évaporation concentration.
- ✓ une diminution seulement au niveau du piézomètre P84 dans le rejet Khafji à sec. Ce phénomène s'explique par l'influence directe de la température sur ces eaux de faible profondeur d'où une augmentation de la salinité par évaporation à ce niveau.

c- Sodium (Na^+) :

L'évolution de la concentration en sodium en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-50) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une augmentation au niveau de presque tous piézomètres qui s'explique par le phénomène d'évaporation concentration.
- ✓ une diminution au niveau des piézomètres des dépressions à sec (P84 dans le rejet Khafji), (P160 dans sebkhat Oum Raneb), (P37 dans sebkhat Safioune) et (P50 dans sebkhat Ngoussa). Ce phénomène s'explique par l'influence directe de la température sur ces eaux de faible profondeur d'où une précipitation des sels sodiques.

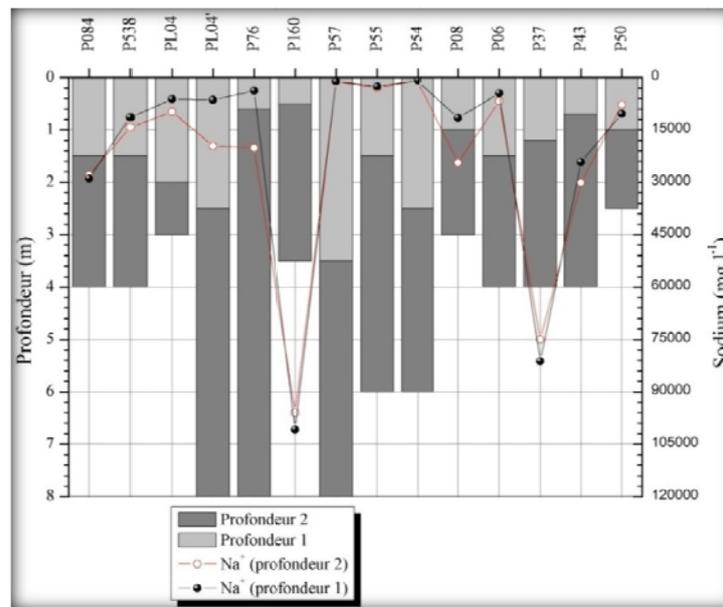


Fig.IV-50 : Evolution du Na⁺ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

d- Potassium (K⁺):

L'évolution de la concentration en potassium en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-51) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une augmentation au niveau de presque tous piézomètres qui s'explique par le phénomène d'évaporation concentration.
- ✓ une diminution au niveau des piézomètres des dépressions à sec (P84 dans le rejet Khafji), (P37 dans sebkhat Safioune) et (P50 dans sebkhat Ngoussa). Ce phénomène s'explique par l'influence directe de la température sur ces eaux de faible profondeur d'où une précipitation des sels potassiques.

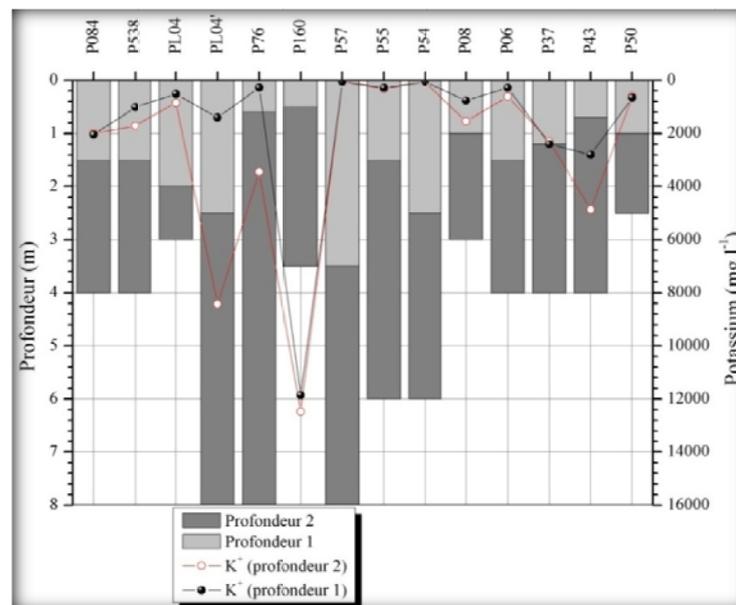


Fig.IV-51 : Evolution du K⁺ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

e- Chlorure (Cl)

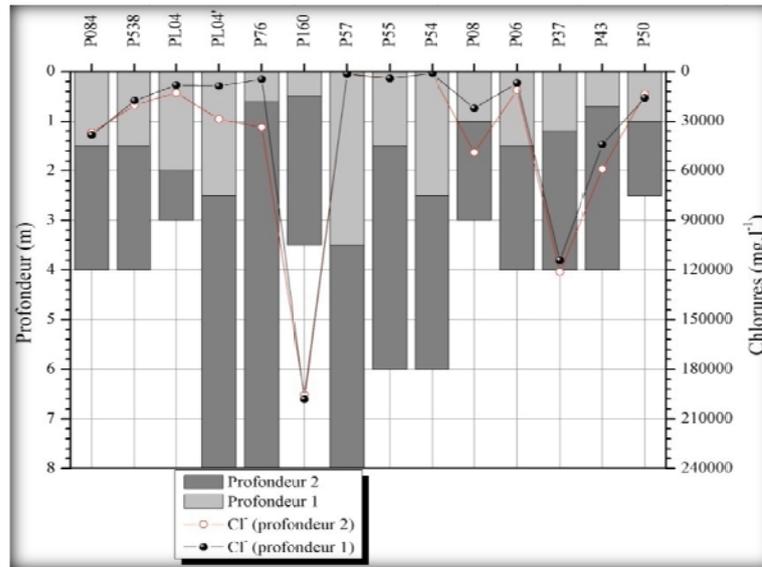


Fig.IV-52 : Evolution du Cl en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution de la concentration en chlorures en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-52) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une augmentation au niveau de presque tous piézomètres qui s'explique par le phénomène d'évaporation concentration.
- ✓ une diminution au niveau des piézomètres des dépressions à sec (P84 dans le rejet Khafji), (P160 dans sebkhat Oum Raneb), et (P50 dans sebkhat Ngoussa). Ce phénomène s'explique par l'influence directe de la température sur ces eaux de faible profondeur d'où une précipitation du NaCl.

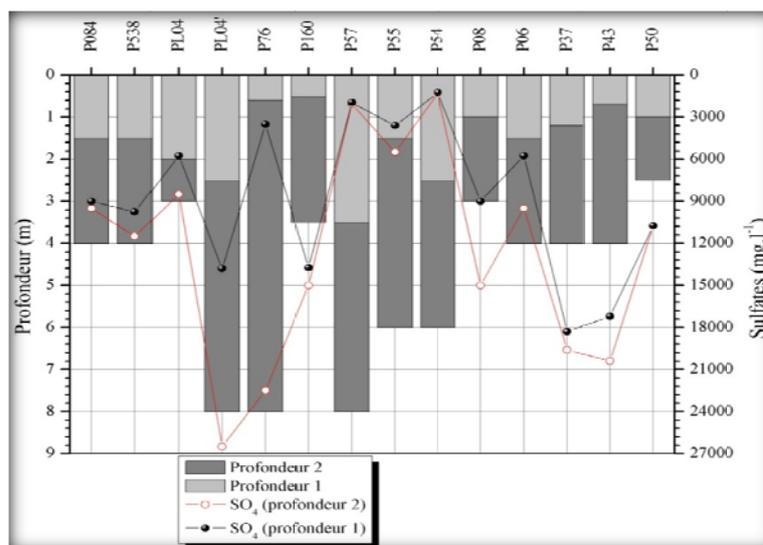
f- Sulfates (SO₄²⁻) :

Fig.IV-53 : Evolution du SO₄²⁻ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution de la concentration en sulfates en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-53) montre en deuxième profondeur une augmentation au niveau tous piézomètres qui s'explique par le phénomène d'évaporation concentration.

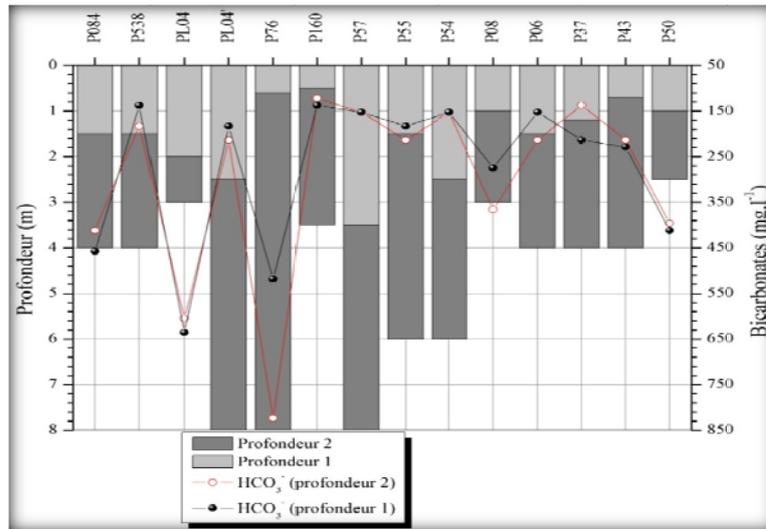
g- Bicarbonates (HCO_3^-) :

Fig.IV-54 : Evolution du HCO_3^- en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution de la concentration en bicarbonates en fonction de la profondeur dans chaque piézomètre (Fig. IV-54) montre en deuxième profondeur :

- ✓ une forte augmentation au niveau des piézomètres de la ville qui s'explique par le phénomène d'infiltration des fuites des réseaux d'AEP, d'assainissement et d'irrigation d'où cette dilution au niveau des couches d'eau supérieures.
- ✓ une légère augmentation à nulle au niveau des piézomètres des affleurements mio-pliocène expliquant les très faibles influence des facteurs externes.
- ✓ une diminution au niveau des dépressions à sec (P84 dans le rejet Khafji à sec), (P160 dans sebkhat Oum Raneb à sec), (P37 dans sebkhat Safioune à sec) et (P50 et P43 dans sebkhat Ngoussa à sec). Ce phénomène s'explique par l'influence directe de la température sur ces eaux de faible profondeur d'où une précipitation des carbonates vue leurs faibles solubilités.

4.6- L'influence lithologique sur la salinité des eaux

4.6.1- Les titres de l'eau

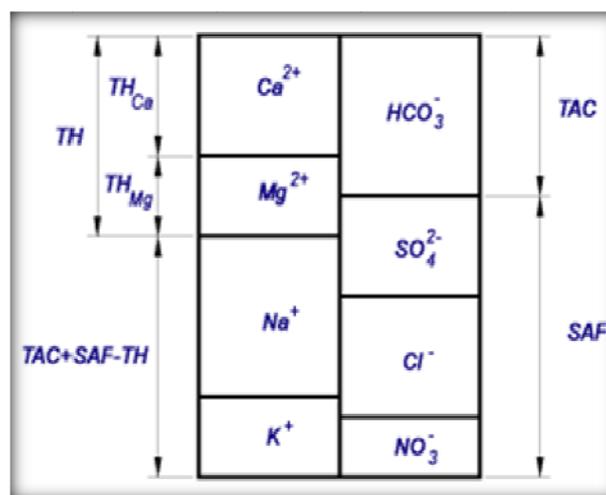


Fig.IV-55 : La représentation graphique des différents titres de l'eau

Une représentation graphique (Fig. IV-55) de la composition de l'eau sur diagramme de Stabler, où on reporte en meq.l^{-1} les concentrations des différentes espèces, montrant ses différents titres.

a- Titre alcalimétrique complet (TAC) :

$$TAC = [OH^-] + [CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] \quad (\text{en } \text{meq.l}^{-1})$$

Le titre TAC exprimera l'alcalinité totale de l'eau.

Les répartitions dans le TA et le TAC des espèces hydroxydes, carbonates et hydrogencarbonates sont fournies dans le tableau suivant :

Tableau IV-6 : Classification des titres alcalimétriques

Espèces	Valeurs comparées des titres alcalimétriques.				
	TA=0	TA<1/2TAC	TA=1/2 TAC	TA>1/2TAC	TA=TAC
OH ⁻ =	0	0	0	2TA-TAC	TAC
CO ₃ ²⁻ =	0	2TA	TAC	2(TAC-TA)	0
HCO ₃ ⁻ =	TAC	TAC-2.TA	0	0	0

Si le pH de l'eau est : < 4.5 → TAC = 0

> 8.3 → TAC = (CO₃²⁻) + (OH⁻)

< 8.3 → TA = 0

Les valeurs comparées des titres alcalimétriques des eaux de la cuvette de Ouargla en fonction des valeurs de pH < 8.3 montrent que le TAC = HCO₃.

Généralement les bicarbonates (HCO₃) se présentent dans la cuvette (Fig. IV-56 et IV-57) par des faibles valeurs comparativement aux autres éléments. Les valeurs les plus élevées sont au niveau des piézomètres de la ville ainsi que les eaux usées.

Les carbonates (CO₃) et le dioxyde carbonique (CO₂) se présentent avec des concentrations très faibles, montrant que les concentrations en CO₂ > CO₃ au niveau de tous les piézomètres (eaux souterraines). Or, pour les eaux du chott Ain Baïdha, sebkhat Oum Raneb, et du rejet Khafji et du canal Bamendil, on remarque un pH supérieur à 8, par conséquent une présence de carbonates avec CO₃ > CO₂.

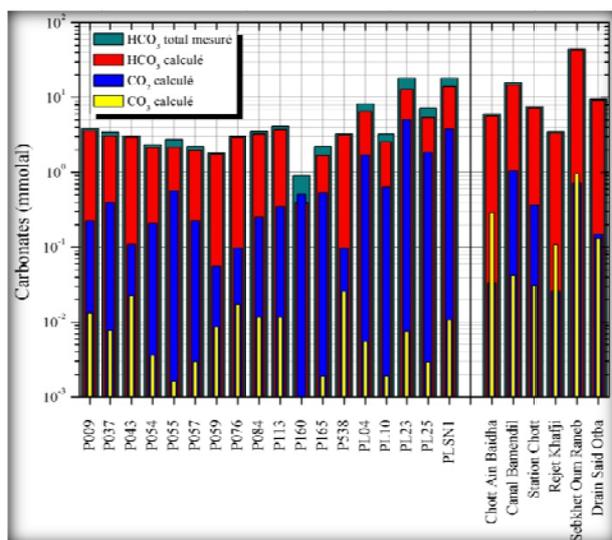


Fig.IV-56 : Evolution des carbonates au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

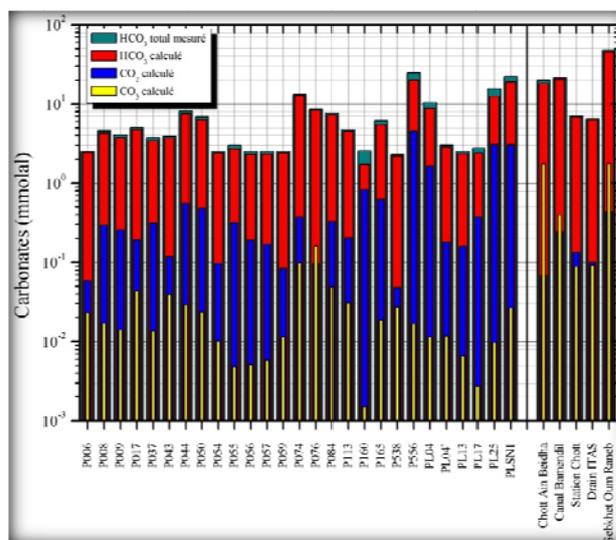


Fig.IV-57 : Evolution des carbonates au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

b- Titre en Sels d'Acides Forts (SAF) :

$$SAF = [SO_4^{2-}] + [Cl^-] + [NO_3^-] \quad (\text{en } meq.l^{-1})$$

La dénomination SAF vient de Sels d'Acides Forts.

En effet les anions cités sont présents dans les trois acides forts suivants : Acide sulfurique, acide chlorhydrique et acide nitrique.

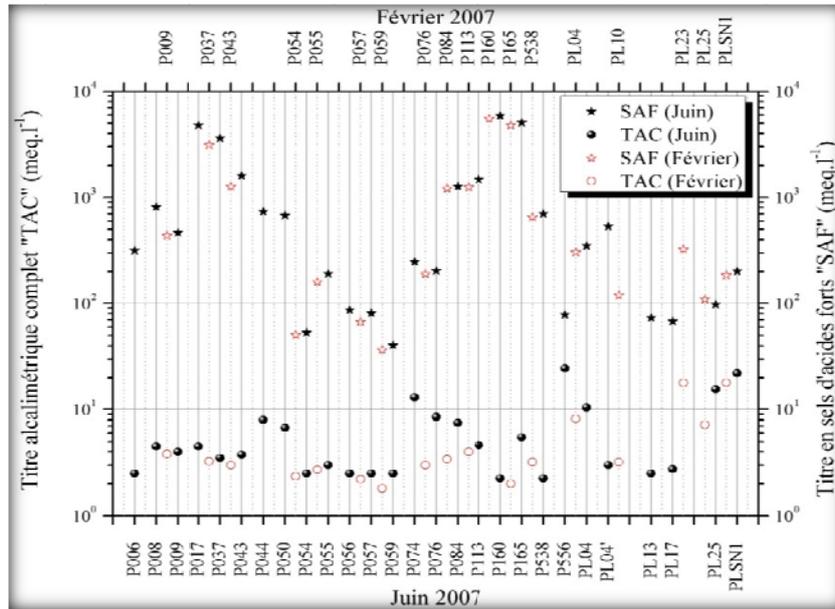


Fig.IV-58 : Evolution du TAC et du SAF au niveau de la cuvette de Ouargla

L'évolution du TAC (fig. IV-58) montre que les concentrations ne dépassent pas 30 meq.l⁻¹, dans les deux périodes, par contre le SAF montre des concentrations plus de 30 meq.l⁻¹ et allant à des valeurs atteignant 6000 meq.l⁻¹ dans les deux périodes.

Ce qui montre que l'alcalinité des eaux de la cuvette n'est pas carbonatée mais liées aux sels dissous selon leurs richesse lithologique.

c- Titre hydrotimétrique total (TH) :

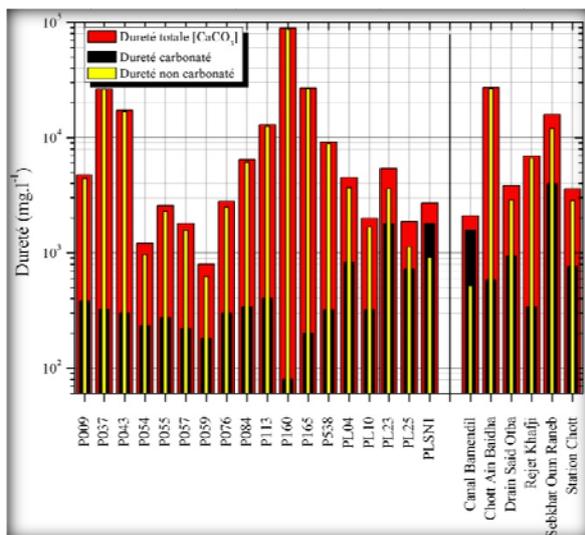


Fig.IV-59 : Evolution de la dureté au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

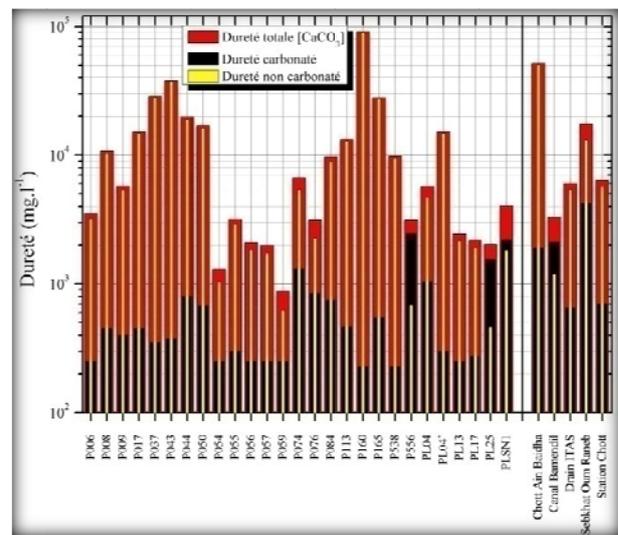


Fig.IV-60 : Evolution de la dureté au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Il mesure la concentration en ions alcalino-terreux : calcium et magnésium essentiellement.

$$TH = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] \quad (\text{en } meq.l^{-1})$$

Remarque : Le titre hydrotimétrique de l'eau permet de quantifier une notion qualitative : la dureté de l'eau.

Le calcium associé aux carbonates de l'eau forme du carbonate de calcium très peu soluble qui est à l'origine des problèmes d'entartrage les plus courants aux niveaux des canalisations des eaux de l'AEP de Ouargla et des pompes dans les forages.

Les eaux de la cuvette (*Fig. IV-59 et IV-60*) montrent des valeurs très élevées de la dureté surtout dans les zones des dépressions (chotts et sebkhas), et relativement moins au droit des affleurements du Mio-pliocène et des piézomètres de la ville.

d- Dureté permanente et temporaire.

Après une ébullition prolongée, les carbonates et bicarbonates précipitent une partie des alcalino-terreux (calcium, magnésium), et la quantité précipitée est liée au TAC.

La dureté liée au TAC est appelée dureté temporaire, la dureté résiduelle : dureté permanente.

On préfère utiliser la notion de dureté carbonatée qui est identique à la notion de dureté temporaire et qui est donc égale au TAC si $TH > TAC$.

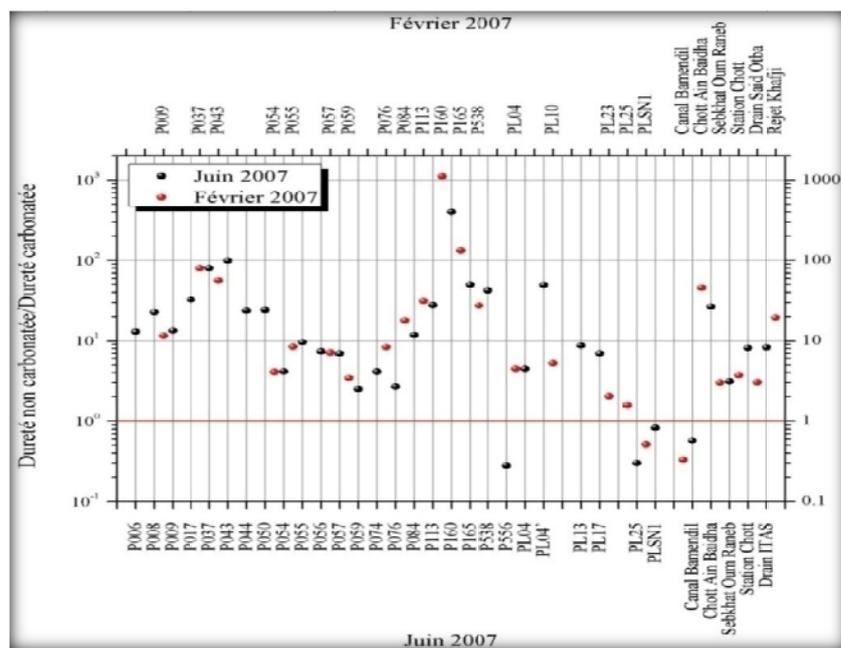


Fig.IV-61 : Evolution du rapport entre la dureté non carbonatée et carbonatée

Généralement les eaux de la cuvette de Ouargla (*Fig. IV-59 et IV-60*) montre que le titre hydrotimétrique TH est supérieur au titre alcalimétrique complet ($TH > TAC$), ce qui indique que la dureté temporaire (carbonatée) = TAC, cette dernière est très faible par rapport à la dureté totale surtout au niveau des affleurements du Mio-pliocène et les sebkhas.

La dureté permanente (non-carbonatée) liée aux sels d'acides forts, représente presque la totalité de la dureté des eaux de la cuvette, par contre elle est moindre pour une majorité de la dureté carbonatée au niveau des piézomètres de la ville. Cela est dû essentiellement à la lithologie (sol remanié riche en débris en évaporites) et eaux de la nappe profonde du Sénonien carbonaté.

Le rapport entre la dureté permanente et la dureté temporaire (*Fig. IV-61*) confirme la dominance de la dureté liée aux sels dissous.

4.6.2- La dissolution / précipitation

a- Les carbonates

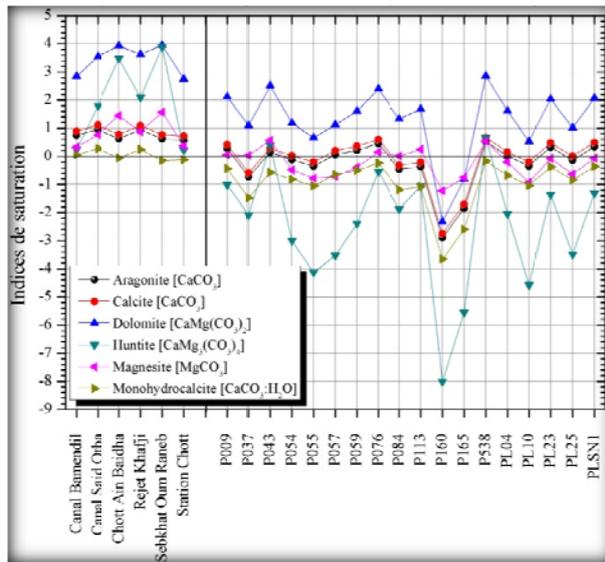


Fig.IV-62 : Indice de saturation des carbonates (Février 2007)

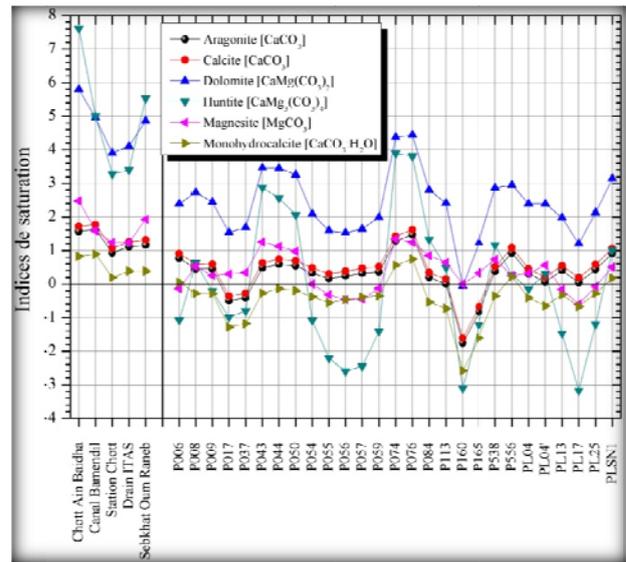


Fig.IV-63 : Indice de saturation des carbonates (Juin 2007)

L'indice de saturation des carbonates au niveau des eaux de surface (Fig.IV-62 et IV-63) sont tous sursaturés cela est due à la concentration élevée en bicarbonates.

Les eaux souterraines montrent qu'au mois de février (l'aragonite, la calcite et la dolomite) sont sursaturées, par contre l'huntite, la magnésite et le monohydrocalcite sont sous-saturées.

Au mois de juin l'indice de saturation augmente pour rendre tous les minéraux carbonatés sursaturés dans des zones bien déterminées (Ngonssa, Bamendil, Khafji et la ville de Ouargla). Les zones montrant les pics faibles et non-saturés sont les zones des sebkhas (Oum Raneb et Safioune) et les zones d'affleurement du Mio-pliocène. Donc la saturation en carbonate dépend principalement de la concentration en bicarbonates (HCO₃).

b- Les sulfates

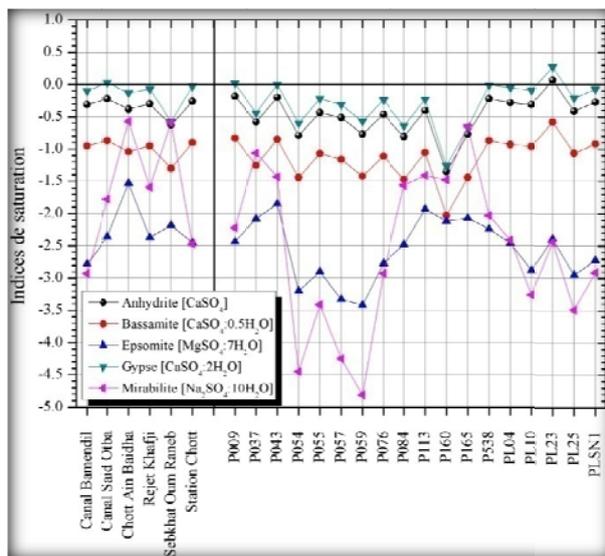


Fig.IV-64 : Indice de saturation des sulfates (Février 2007)

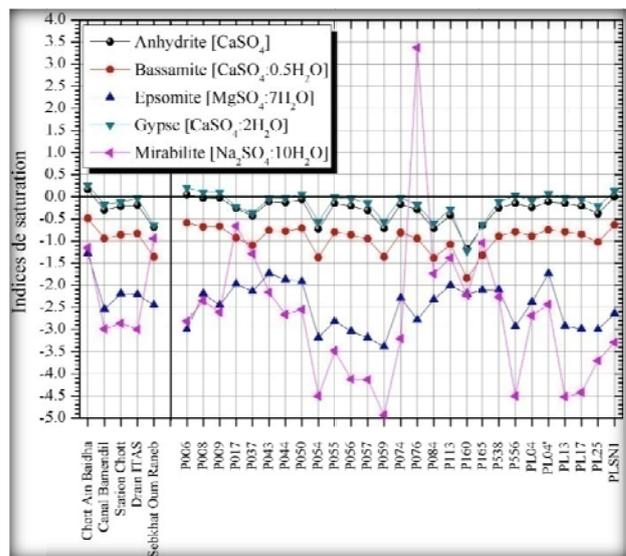


Fig.IV-65 : Indice de saturation des sulfates (Juin 2007)

L'indice de saturation (Fig.IV-64 et IV-65) montre que seul les gypses et l'anhydrite sont proche de l'équilibre dans les deux périodes et au niveau des eaux de surface et souterraines sauf qu'il ya une augmentation au mois de juin vue la forte évaporation ce qui augmente la concentration. Toujours les piques faibles caractérisent les mêmes endroits que celles des carbonates mais élevées.

c- Les chlorures

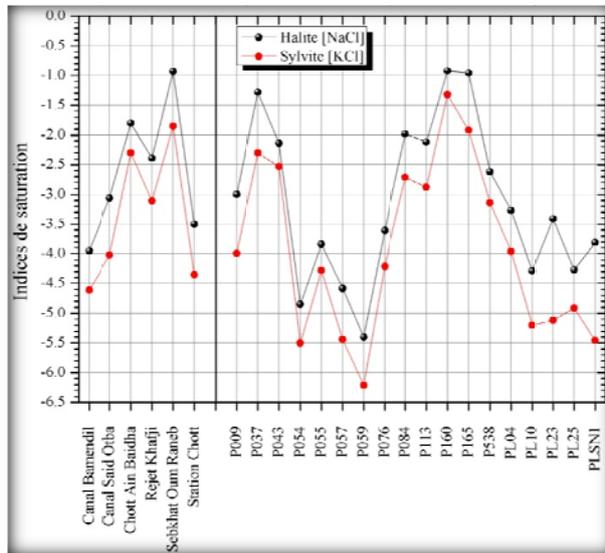


Fig.IV-66 : Indice de saturation des chlorures (Février 2007)

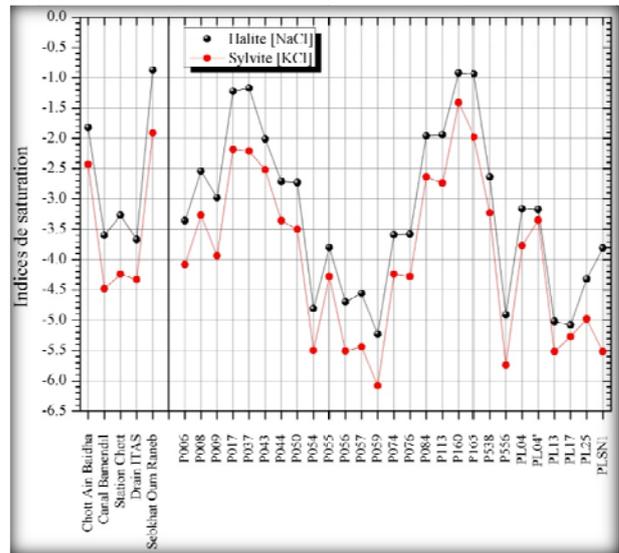


Fig.IV-67 : Indice de saturation des chlorures (Juin 2007)

L'indice de saturation (Fig.IV-66 et IV-67) montre que les deux minéraux sont sous-saturés en montrant des piques proches de l'équilibre dans les deux sebkhas (Oum Raneb et Safioune) vue leurs topographie (dépression) et l'évaporation intense rend l'eau trop salée jusqu'à la saturation.

d- Les phosphates

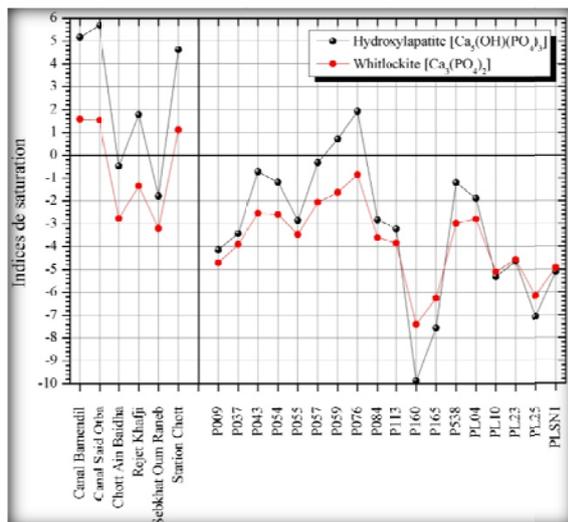


Fig.IV-68 : Indice de saturation des phosphates (Février 2007)

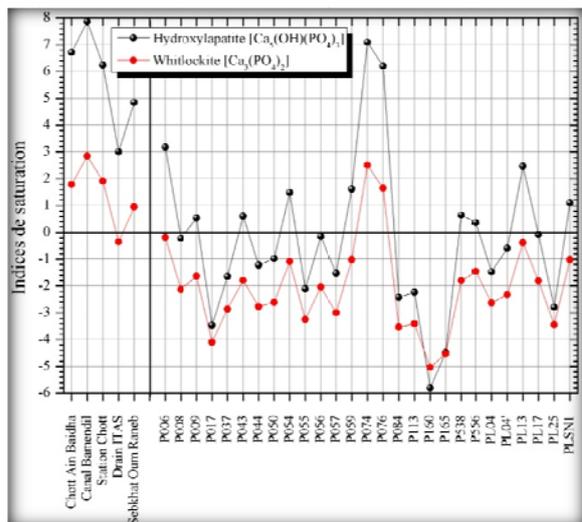


Fig.IV-69 : Indice de saturation des phosphates (Juin 2007)

Au mois de février les indices de saturation des phosphates (Fig.IV-68 et IV-69) montrent que les eaux de surface sont sursaturées au niveau du canal Bamendil, canal Saïd Otba, rejet Khafji et la station Chott ; et sous-saturées au niveau du chott Ain Baïdha et sebkhat Oum Raneb

pour l'hydroxylapatite. Même chose pour le witlockite avec des valeurs moindres montrant une sous-saturation au niveau des eaux de rejet Khafji. Ceci montre que la sursaturation des eaux de surface occupe les eaux des canaux et drains (eaux usées) des eaux courantes et la sous-saturation au niveau des eaux stagnantes.

Au mois de juin les eaux de surface montrent une sursaturation surtout pour l'hydroxylapatite.

Les eaux souterraines montrent au mois de février que toutes les eaux sont sous-saturées sauf l'hydroxylapatite au niveau du P59 et P76.

Au mois de juin les eaux montrent une augmentation générale des valeurs de l'indice de saturation et leurs tendance à l'équilibre même la sursaturation au niveau des piézomètres P74 et P76 proche du canal Bamendil (eaux usées). Contrairement au pique sous-saturé au niveau du piézomètre P160 de sebkhat Oum Raneb.

e- Les gaz dissous

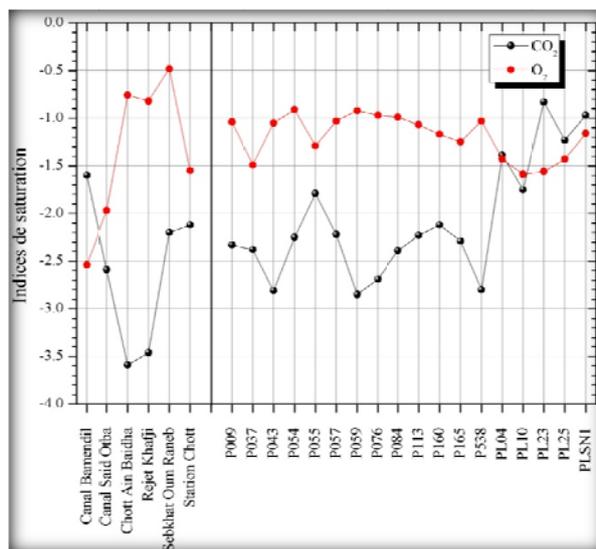


Fig.IV-70 : Indice de saturation des gaz dissous (Février 2007)

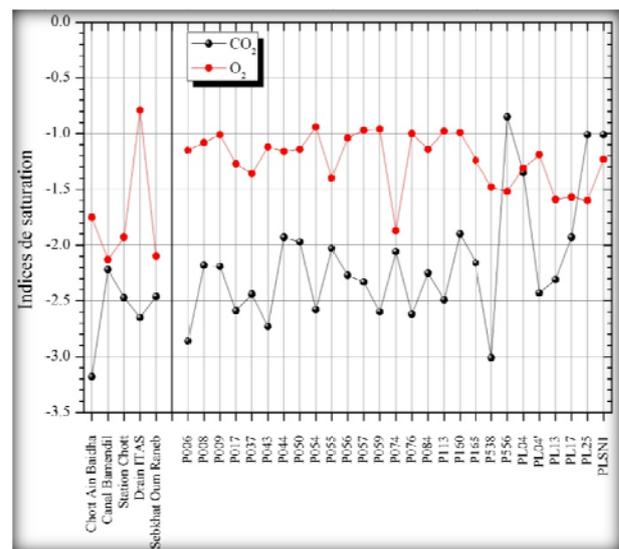


Fig.IV-71 : Indice de saturation des gaz dissous (Juin 2007)

Généralement l'indice de saturation du CO_2 et O_2 dissous (Fig.IV-70 et IV-71) montrent toujours une sous-saturation vue le milieu réducteur et pauvre en bicarbonates rendant consommation des deux gaz importants.

4.6.3- Les échanges de bases

Les indices d'échanges de bases (Fig. IV-72 et IV-73) montrent que la majorité des échanges au niveau des eaux de la cuvette sont des échanges de déséquilibres, qui sont due généralement par la pauvreté en matière d'argile, la richesse en formations salifères.

Les piézomètres P08, P43 et P44 de sebkhat Ngoussa, P160 de sebkhat Oum Raneb montrent des échanges de bases due à la richesse du sol en matière organique et l'argile.

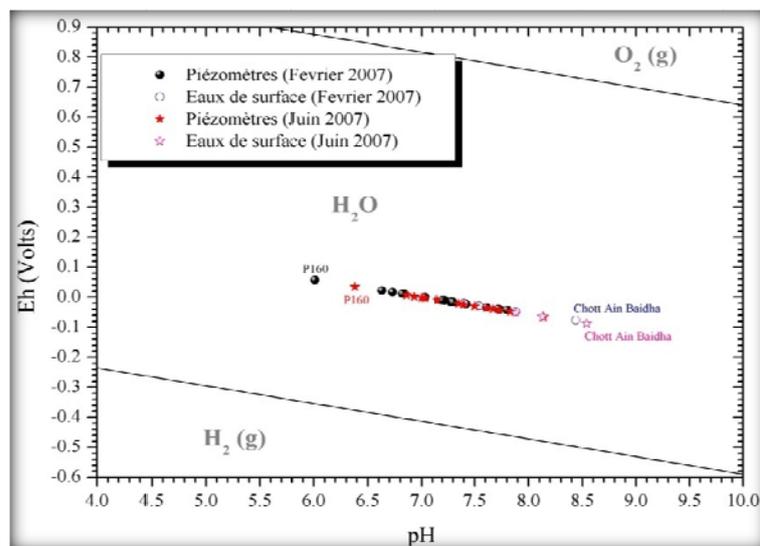


Fig.IV-77 : Diagramme Eh-pH du domaine de stabilité de l'eau

b- Formes de l'azote

La forme la plus stable de l'azote est le diazote N_2 , c'est donc une forme très répandue d'azote. Si l'on s'intéresse aux formes de l'azote en solution et en excluant N_2 , les espèces les plus fréquentes sont NO_3^- , NO_2^- , et NH_4^+ et NH_4OH , deux formes ammoniacales

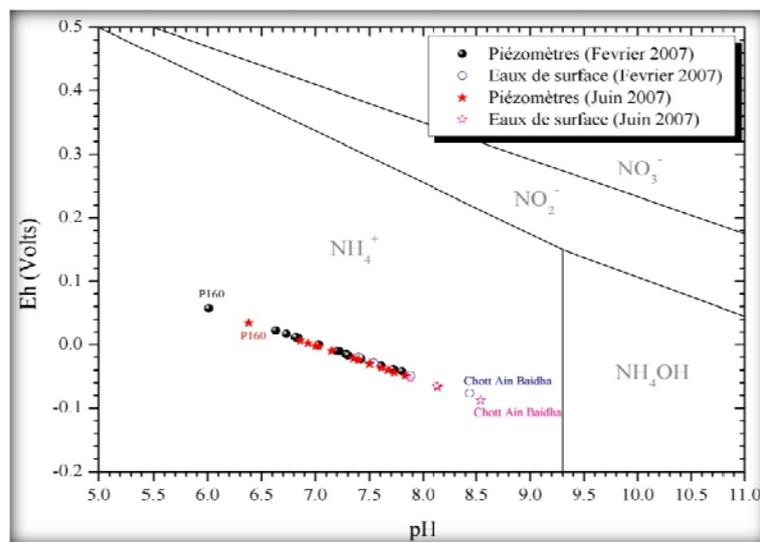


Fig.IV-78 : Diagramme Eh-pH des formes de l'azote

Le diagramme de pourbaix de l'azote (Fig.IV-78) montre que les eaux de la cuvette représentent la forme de l'azote réduit (forme ammoniacale NH_4). Ce qui indique que les eaux représentent un milieu réducteur.

c- Formes du soufre

Le diagramme des principales formes du soufre a été représenté ici.

Le Soufre VI (SO_4^- et HSO_4^-) domine en conditions oxydantes.

Le passage Soufre VI/ Soufre -II se situe dans des niveaux très bas de potentiel redox.

Le diagramme de pourbaix du soufre (Fig.IV-79) montre que les eaux de la cuvette représentent la forme du soufre IV (SO_4) qui domine en conditions oxydantes.

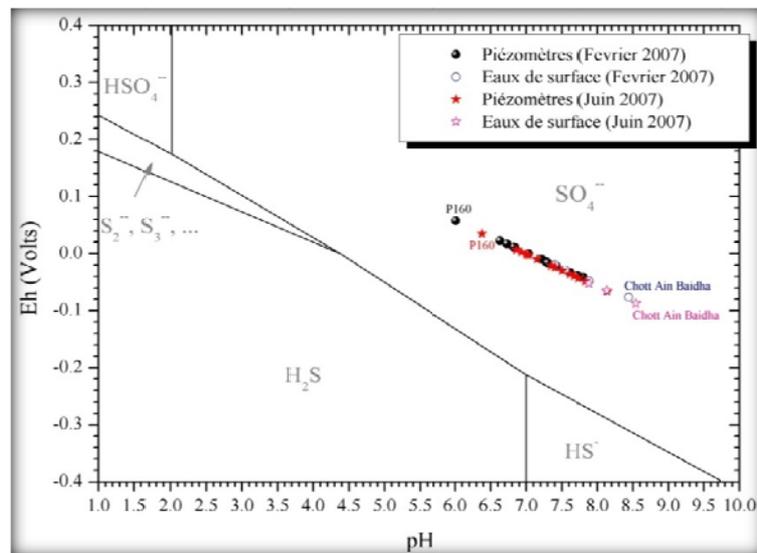


Fig.IV-79 : Diagramme Eh-pH des formes du soufre

d- Formes du carbone

En conditions oxydantes, les formes prédominantes du carbone inorganique sont : CO_2 aqueux (soit pour partie H_2CO_3), HCO_3^- qui est l'espèce habituellement dominante de l'alcalinité carbonatée si l'on considère ses formes libres ou complexes, et CO_3^{2-} qui ne devient prédominante que dans les eaux ultrabasiqes, c'est à dire dans les faciès carbonatés sodiques salés. Ces trois formes occupent un vaste domaine de conditions pH/Eh.

En conditions très réductrices, le méthane CH_4 devient la forme dominante.

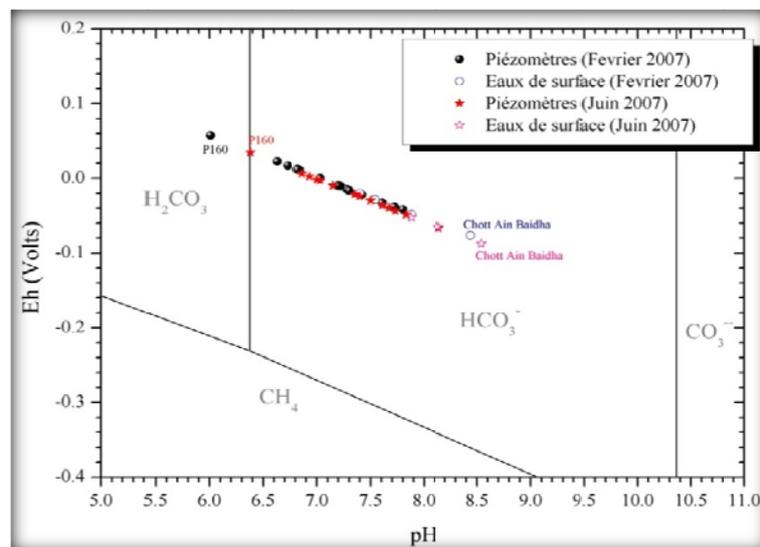


Fig.IV-80 : Diagramme Eh-pH des formes du carbone

Les formes du carbone (Fig.IV-80) montrent que les eaux de la cuvette représentent la forme bicarbonatée HCO_3^- (l'espèce dominante de l'alcalinité carbonatée).

Ce qui indique que les eaux représentent un milieu oxydant pour le carbone.

e- Formes du chlore

Ce diagramme permet de discuter, pour toute valeur de pH et de potentiel électrochimique, de la stabilité relative des espèces chlorées en solution aqueuse. L'idée est de diviser le plan (Eh, pH) en zones où une espèce prédomine sur les autres.

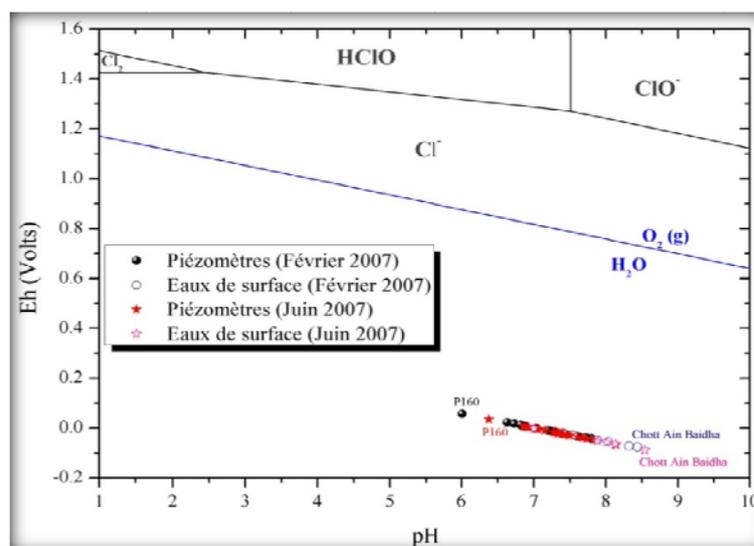


Fig.IV-81 : Diagramme Eh-pH des formes du chlore

On remarque en premier lieu que les composés Cl_2 , HClO et ClO^- sont des oxydants très puissants quelque soit le pH. Leurs domaines d'existence sont au-dessus de celui de l'eau, cela signifie donc que, d'un point de vue thermodynamique, Cl_2 , HClO et ClO^- sont capables d'oxyder l'eau, ce qui entraînerait un dégagement de dioxygène O_2 .

Dès que le milieu n'est plus très acide, Cl_2 se dismute en HClO et Cl^- pour les pH inférieurs à 7,5 et en ClO^- et Cl^- pour les pH supérieurs à 7,5. On avait déjà mentionné ce fait lors de la présentation de l'électrolyse du chlorure de sodium.

Les formes du chlore (Fig.IV-81) montrent que les eaux de la cuvette représentent la forme Cl^- (la forme stable du chlore en solution aqueuse).

Ce qui indique que les eaux représentent un milieu réducteur pour le chlore.

f- Formes du phosphore

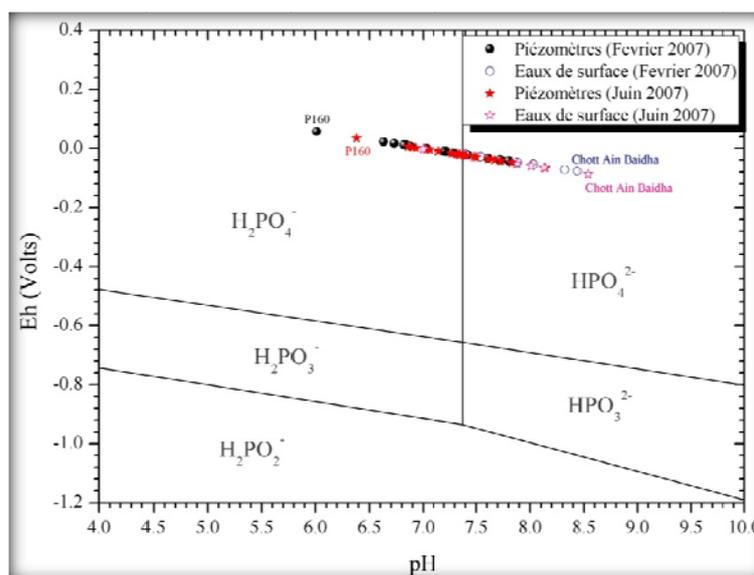


Fig.IV-82 : Diagramme Eh-pH des formes du phosphore

Les formes des phosphates (Fig.IV-82) montrent que les eaux de la cuvette représentent les deux formes H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} , avec une tendance vers la forme HPO_4^{2-} en période estivale.

Ce qui indique que les eaux représentent un milieu oxydant pour le phosphore.

5. POLLUTION ORGANIQUE

La pollution organique se réfère aux substances polluantes contenant de la matière organique (fécales, boues, résidus de bois, etc...), celles-ci s'appellent les matières organiques biodégradables. Elle engendre une diminution de la teneur en oxygène dissous, due à la décomposition de la matière organique par les bactéries.

Les rejets urbains contiennent des molécules organiques et des métaux, des huiles et des graisses, des détergents et des rejets industriels.

Les fertilisants agricoles ont à peu près le même effet que les déchets organiques ; Les nitrates, les pesticides et les phosphates proviennent du drainage et du lessivage des terres arables et contaminent les eaux souterraines. Ils facilitent la croissance du phytoplancton à tel point que les particules végétales mortes peuvent produire des conditions anoxiques.

Ainsi les matériaux organiques sont susceptibles d'être attaqués par les bactéries, par conséquent, on assiste à un processus oxydant qui réduit les composés organiques en composés inorganiques stables comme le CO_2 , l' H_2O et le NH_3 .

5.1- Les nutriments

Les nutriments essentiels pour les plantes : Ce sont des substances nécessaires pour le métabolisme et la photosynthèse des plantes comprenant les macronutriments (N, P, K, Ca, Mg et S) et les micronutriments (Fe, Mn, B, Cu, Mo, Zn et Si).

Sources urbaines de nutriments incluent les eaux usées domestiques, les déchets industriels... Sources rurales incluent celles de l'agriculture, de la gestion des forêts et des logements ruraux.

5.1.1- L'oxygène dissous (O_2)

Pour quantifier et évaluer la pollution organique dans les eaux de la cuvette de Ouargla, nous avons suivi les paramètres indispensables participants à la dégradation de la qualité des eaux.

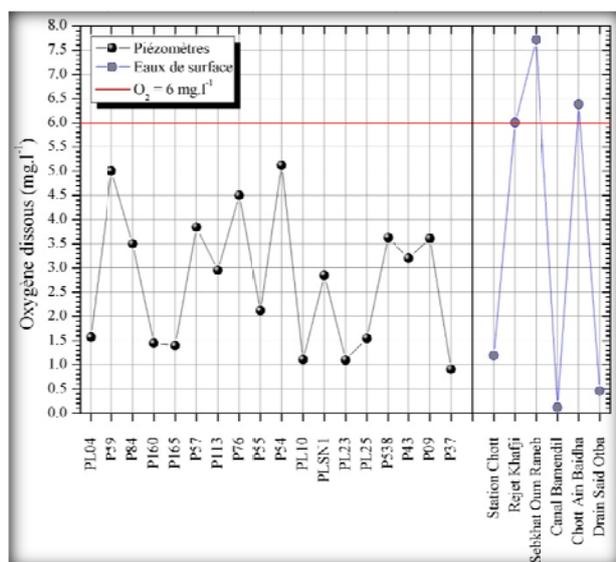


Fig.IV-83 : Variation de l' O_2 au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

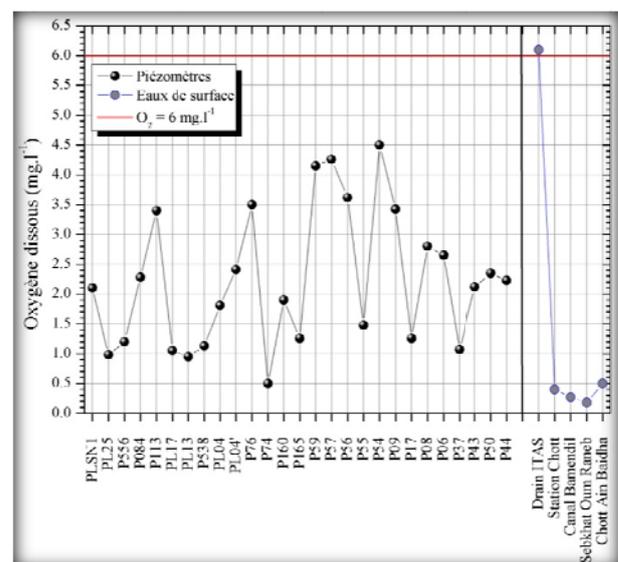


Fig.IV-84 : Variation de l' O_2 au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution de la teneur en oxygène dissous dans les deux périodes d'observation (Fig. IV-83 et IV-84) permet de voir que :

La teneur en oxygène dissous au niveau des eaux souterraines est assez variable, cependant, on note de faibles teneurs dans les puits proches des sebkhas. Cas du P37, situé proche de sebkha

Safioune, qui présente une teneur de 0.8 mg/l. Ceci admet une contamination des eaux souterraines à cet endroit par consommation de l'oxygène dissous. Partout, ailleurs les eaux souterraines montrent des teneurs moyennes en oxygène dissous, allant de 1.5 à 5.3 mg/l. Entre les deux saisons (février et juin), on remarque une diminution des teneurs en oxygène dissous, le milieu tend à la réduction.

Quant aux eaux de surface, la variation saisonnière est importante. On passe d'un milieu bien aéré (février) à un milieu réducteur (juin). Les figures (Fig. IV-83 et IV-84) indiquent deux familles d'eau quelque soit la période d'échantillonnage, des eaux assez riches en oxygène dissous (6 à 7.6 mg/l) et des eaux assez pauvres (0.1 à 0.5mg/l) en oxygène dissous. Ceci s'explique par leurs situations géographiques :

1. Les drains (station Chott, canal Bamendil et drain Saïd Otba) présentant les drains de la nappe superficielle, l'accumulation et le transfert des eaux usées, donc ce sont des eaux courantes même à faible débit, avec un renouvellement continu des eaux usées riche en matière organique. Les valeurs en oxygène sont très faibles, entre 0.1 et 1.2 mg.l-1 ce qui traduit la richesse des eaux usées en matière organiques, donc la consommation de l'oxygène par les micro-organismes.
2. Les dépressions (rejet Khafji, sebkhat Oum Raneb et chott Ain Baïdha) présentant l'affleurement de la nappe superficielle et l'accumulation de toutes sortes des eaux usées, de ce fait ce sont des eaux stagnantes. Les valeurs en oxygène sont élevées 6.1 et 7.8 mg.l-1 traduisant le contact eau-atmosphère dans des conditions climatiques hivernales favorisant le renouvellement de l'aération de l'eau.

5.1.2- les nitrates (NO_3^-)

Représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques.

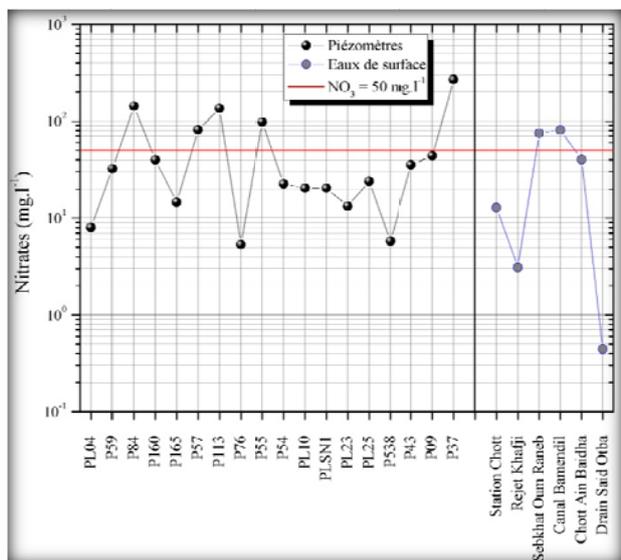


Fig.IV-85 : Variation du NO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

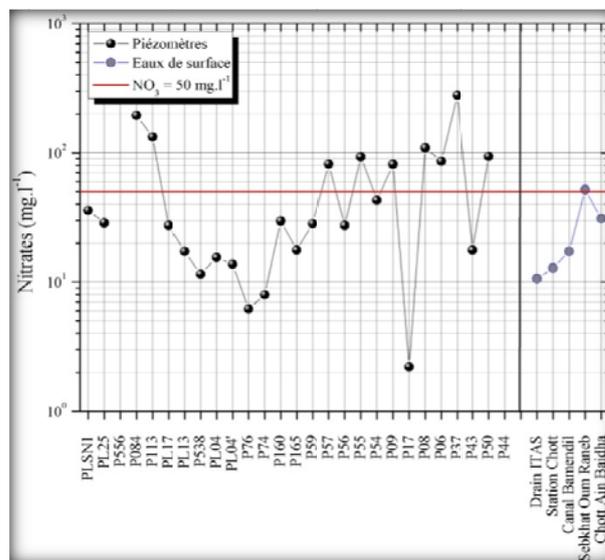


Fig.IV-86 : Variation du NO_3^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Les eaux souterraines montrent qu'en mois de février (Fig. IV-85) ont des valeurs entre 5.4 mg.l⁻¹ (P76 du canal Bamendil) à 270 mg.l⁻¹ (P37 de sebkhat Safioune). Au mois de juin les valeurs allant de 1.1 mg.l⁻¹ (P17 de sebkhat Ngoussa) à 280 mg.l⁻¹ (P37).

Les eaux de surface en mois de février ont des valeurs entre 0.42 mg.l⁻¹ (drain Saïd Otba) et 80 mg.l⁻¹ (canal Bamendil avec le point de prélèvement est plus proche de la source d'eau usée).

Au mois de juin (Fig. IV-86) les valeurs des concentrations allant de 10 mg.l⁻¹ (drain ITAS) à 50 mg.l⁻¹ (sebkhat Oum Raneb).

5.1.3- Les nitrites (NO₂⁻)

Représentent une forme moins oxygénée et moins stable, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme toxique.

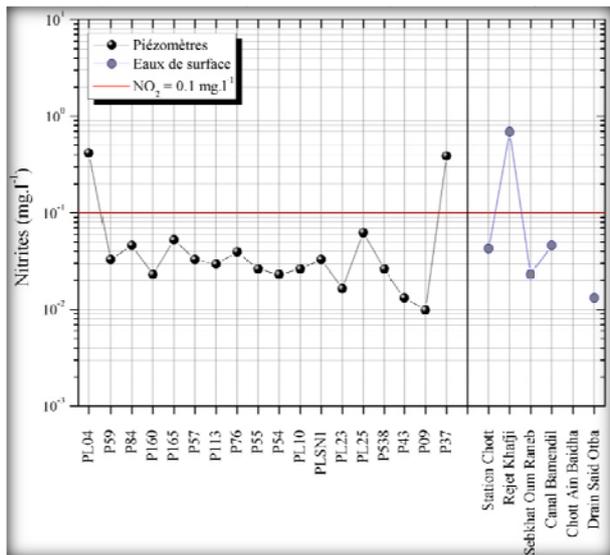


Fig. IV-87 : Variation du NO₂⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

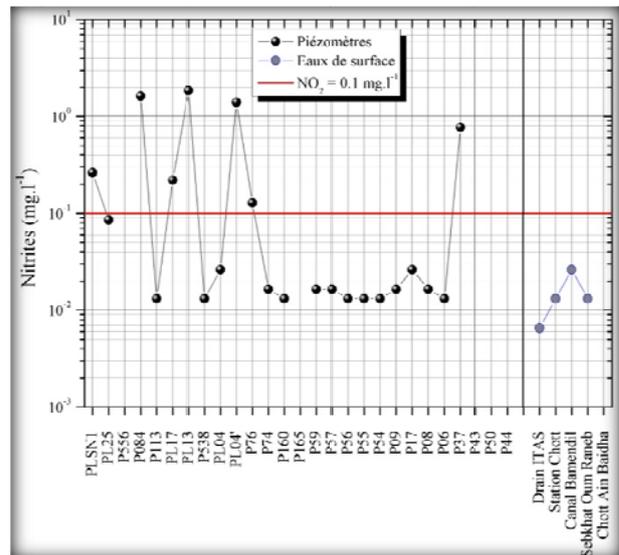


Fig. IV-88 : Variation du NO₂⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Les eaux souterraines montrent (Fig. IV-87 et IV-88) des teneurs relativement faibles en nitrites (inférieures aux normes), cependant le point de prélèvement PL04 révèle une augmentation de la teneur en nitrites (0.4mg /l). Cette valeur serait à l'origine de la situation du piézomètre proche de la station de chott et de la Sebkha Safouane. En période de basses eaux, on note une accentuation de réduction des eaux, les teneurs en nitrites atteignent les 2mg /l.

Les eaux de surface montrent des valeurs nulles dans les deux périodes au niveau du chott Ain Baïdha. Au mois de février les concentrations varient entre 0.012 mg.l⁻¹ (drain Said Otba) et 0.7 mg.l⁻¹ (rejet Khafji). Au mois de juin les valeurs sont entre 0.055 mg.l⁻¹ (drain ITAS) et 0.03 mg.l⁻¹ (canal Bamendil).

5.1.4- L'ammonium (NH₄⁺)

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence dans l'eau est liée soit aux rejets urbains soit la réduction des nitrates et nitrites.

Nous n'avons que les résultats d'analyse du mois de juin de cet élément (Fig. IV-89). Ils nous indiquent que dix piézomètres (P165, P57, P56, P54, P09, P08, P06, P37, P43 et P50) sont des piézomètres loin des eaux de rejet, ont des valeurs nulles. Le reste des piézomètres montre des valeurs allant de 0.012 mg.l⁻¹ (P59 et P55) à 7 mg.l⁻¹ (PL13 est un piézomètre de la ville de Ouargla).

Donc les valeurs les plus faibles sont celles des piézomètres loin des rejets par contre les valeurs les plus élevées caractérisent les piézomètres de la ville de Ouargla ainsi que les plus proche des drains des eaux usées.

Les eaux de surface montrent des valeurs de concentration entre 0.09 mg.l⁻¹ (drain ITAS) et 0.65 mg.l⁻¹ (station Chott).

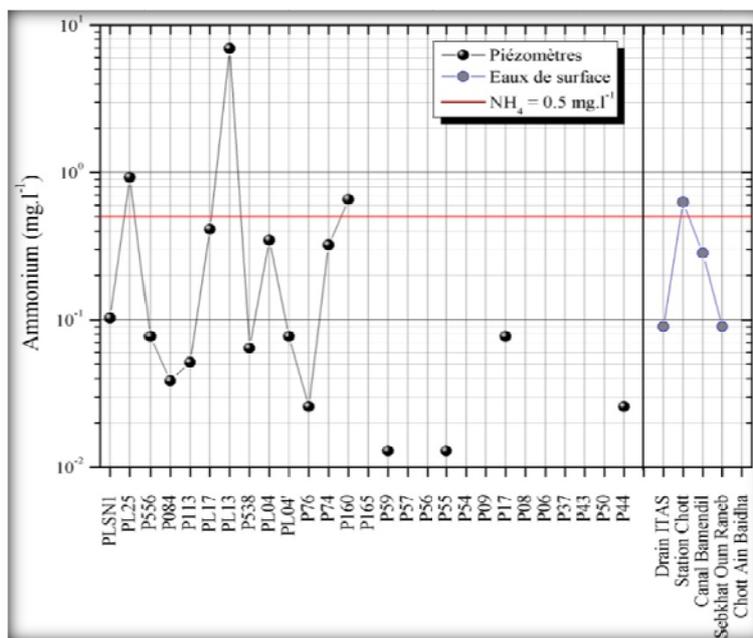


Fig.IV-89 : Variation du NH_4^+ au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Le transfert naturel de l'azote dans les eaux se fait selon les conditions d'oxydoréduction et les réactions biologiques suivantes :

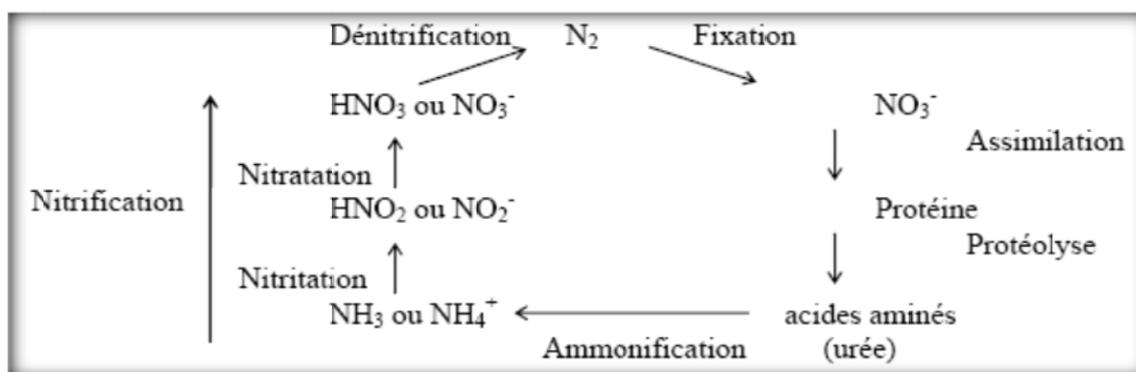


Fig. IV-90 : Cycle de l'azote

L'origine des nitrates dans les eaux superficielles d'Ouargla, aurait pour origine d'une part les eaux usées domestiques, d'autre part comme pour les eaux souterraines, les eaux d'irrigation des palmeraies. La présence des nitrites et de l'ammonium serait liée au processus de dénitrification (Fig. IV-90) par consommation d'oxygène. La forte teneur en CO_2 et la faible teneur en oxygène accroissent la concentration en ammonium dans l'eau.

5.1.5- Les phosphates (PO_4^{3-}) :

Le phosphate peut se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO_3 , pyro $H_4P_2O_7$ et ortho H_3PO_4 , en milieu aqueux, les formes méta et pyro tendent vers la forme ortho pour dès le pH de 5 à 8.

Les eaux souterraines montrent une variation de la concentration en phosphate en période des basses eaux (Fig. IV-91) des valeurs entre 0.01 mg.l^{-1} (PL25 et P09) à 0.7 mg.l^{-1} (P160). Au mois de juin (Fig. IV-92) les concentrations augmentent pour atteindre les valeurs entre 0.02 mg.l^{-1} (P57) et 10 mg.l^{-1} (P74).

Les eaux de surface montrent au mois de février des concentrations allant de 0.11 mg.l^{-1} (rejet Khafji) à 16 mg.l^{-1} (canal Bamendil). Ce qui montre deux groupes des eaux de surface qui sont :

1. Les drains (station Chott, canal Bamendil et drain Saïd Otba) présentant les drains de la nappe superficielle, l'accumulation et le transfert des eaux usées. Donc sont des eaux courantes même à faible débit, avec un renouvellement continu des eaux usées riche en matière organique. Les valeurs sont élevées, entre entre 8 et 17 mg.l^{-1} .
2. Les dépressions (rejet Khafji, sebkhat Oum Raneb et chott Ain Baïdha) présentant l'affleurement de la nappe superficielle et l'accumulation de toutes sortes des eaux usées. Donc sont des eaux stagnantes. Les valeurs sont très faibles 0.12 et 0.56 mg.l^{-1} .

Au mois de juin les valeurs sont élevées allant de 0.31 mg.l^{-1} (drain ITAS) à 16 mg.l^{-1} (sebkhat Oum Raneb).

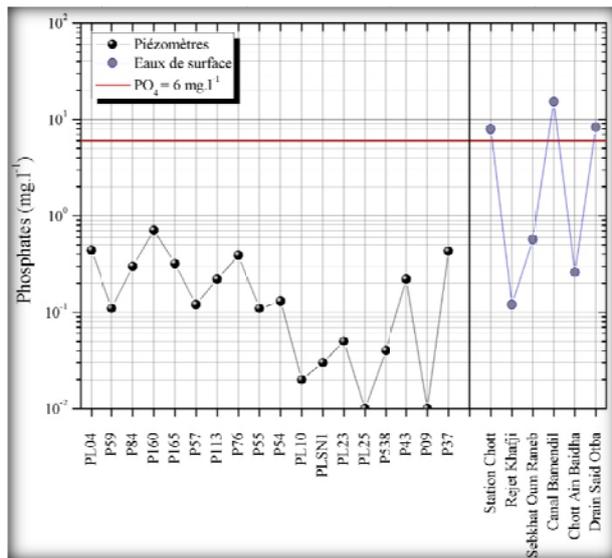


Fig.IV-91 : Variation du PO_4^{3-} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

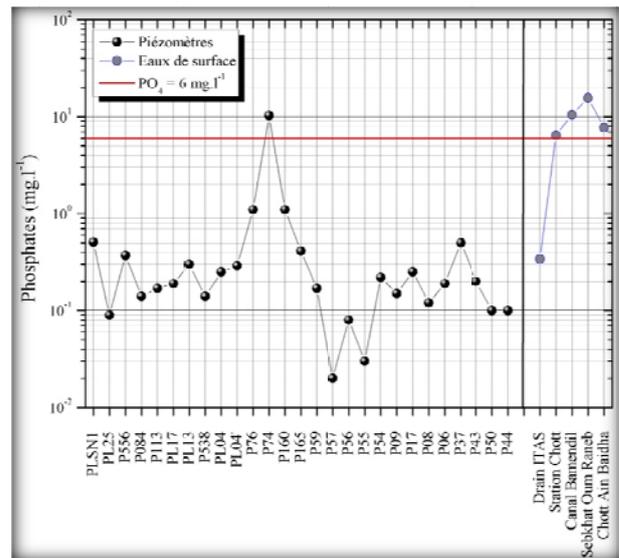


Fig.IV-92 : Variation du PO_4^{3-} au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

Généralement les résultats des concentrations en nitrates au niveau des eaux de surface montrent des valeurs inverses que celles de l'oxygène dissous, dans les deux périodes, confirmant la consommation de l'oxygène en présence du phosphore.

5.2- L'influence climatique sur les nutriments des eaux de la cuvette

5.2.1- L'oxygène dissous (O_2)

L'évolution temporelle de l'oxygène des eaux de la cuvette de Ouargla (Fig.IV-93) montre deux types de variations bien distinctes :

1. Une légère augmentation pendant la période chaude (juin) au niveau des cinq piézomètres (P37, P57, P113, P160 et PL04). Seul le canal de Bamendil des eaux de surface montre cette augmentation.
2. Une diminution au niveau du reste des piézomètres (11 piézomètres), ainsi que le reste des eaux de surface.

Notant que la tendance générale de l'oxygène dissous est une diminution vers la période chaude pour les eaux souterraine et de surface.

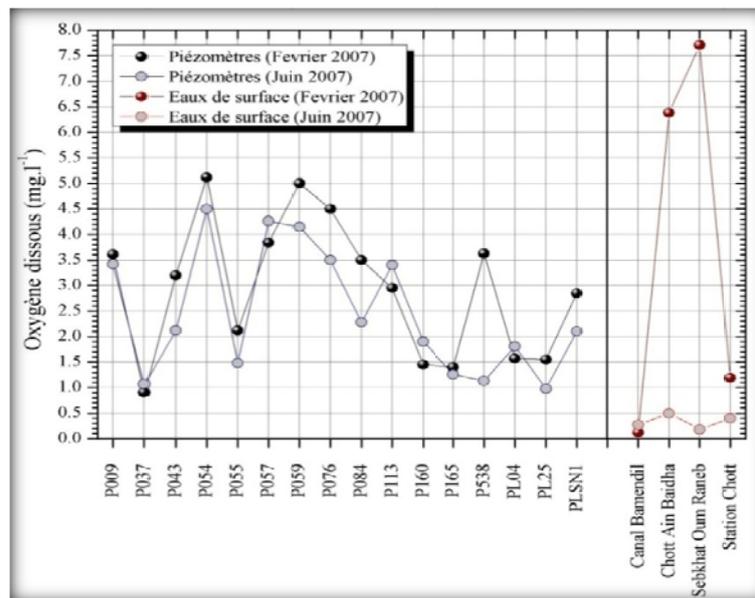


Fig.IV-93 : Evolution temporelle de l'O₂ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)

5.2.2- Les nitrates (NO₃⁻)

L'évolution temporelle des nitrates des eaux de la cuvette de Ouargla (Fig.IV-94) montre trois types de variations :

1. Aucune variation de la concentration au niveau du piézomètre P57 des eaux souterraines et la station de relevage Chott des eaux de surface.
2. Une diminution au niveau des cinq piézomètres (P43, P55, P59, P113 et P160) pour les eaux souterraines. Toutes les eaux de surface montrent cette diminution à l'exception de la station de relevage Chott.
3. Une augmentation au niveau du reste des piézomètres (11 piézomètres), ainsi que la station de relevage Chott des eaux de surface.

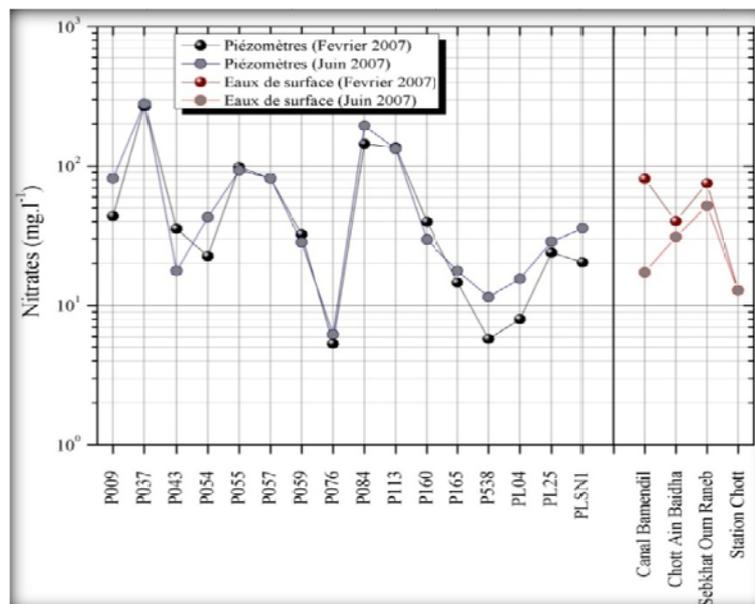


Fig.IV-94 : Evolution temporelle du NO₃⁻ au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)

Notant que la tendance générale des nitrates est une augmentation vers la période chaude pour les eaux souterraine et une diminution pour les eaux de surface.

5.2.3- Les nitrites (NO_2^-)

L'évolution temporelle des nitrites des eaux de la cuvette de Ouargla (*Fig.IV-95*) montre trois types de variations :

1. Des concentrations nulles au niveau du chott Ain Baïdha des eaux de surface.
2. Une augmentation au niveau des six piézomètres (P09, P37, P76, P84, PL25 et PLSN1).
3. Une diminution au niveau du reste des piézomètres (10 piézomètres), ainsi que toutes les eaux de surface.

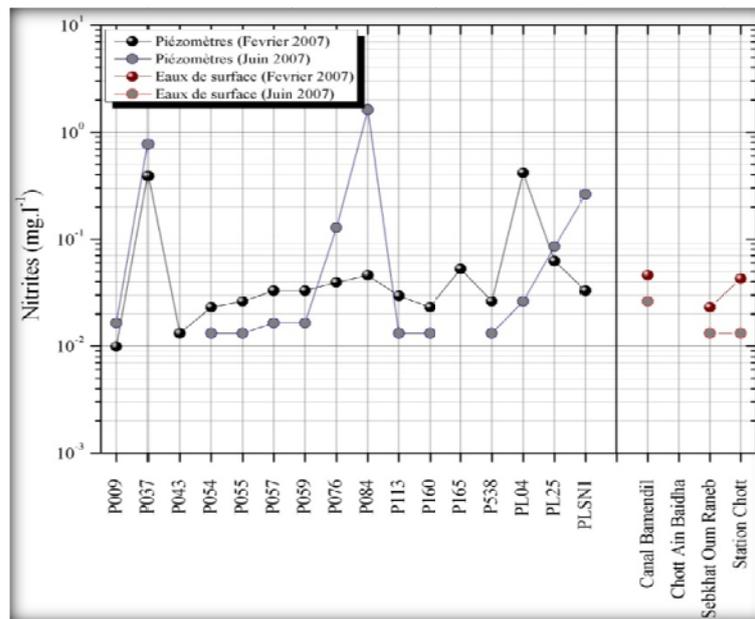


Fig.IV-95 : Evolution temporelle du NO_2^- au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)

La tendance générale des nitrites est une diminution vers la période chaude quelque soit pour les eaux souterraine ou pour les eaux de surface.

5.2.4- Les phosphates (PO_4^{3-})

L'évolution temporelle des phosphates des eaux de la cuvette de Ouargla (*Fig.IV-96*) montre deux types de variations :

1. Une diminution au niveau des six piézomètres (P43, P55, P57, P84, P113 et PL04) pour les eaux souterraines. Pour les eaux de surface concernant le canal Bamendil et la station de relevage Chott.
2. Une augmentation au niveau du reste des piézomètres (10 piézomètres) des eaux souterraines, ainsi que du chott Ain Baïdha et sebkhath Oum Raneb des eaux de surface.

Pour les eaux de surfaces ou souterraines, on note une tendance générale des phosphates vers augmentation en période chaude.

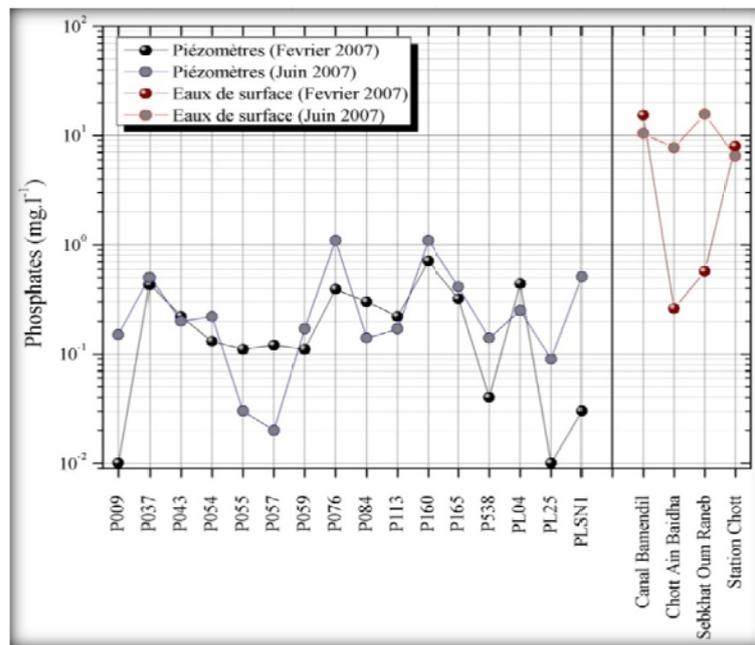


Fig.IV-96 : Evolution temporelle du PO_4^{3-} au niveau de la cuvette de Ouargla (Février-Juin 2007)

5.3- Influence des eaux de surface sur les nutriments des eaux souterraines

5.3.1- Chott Ain Baidha :

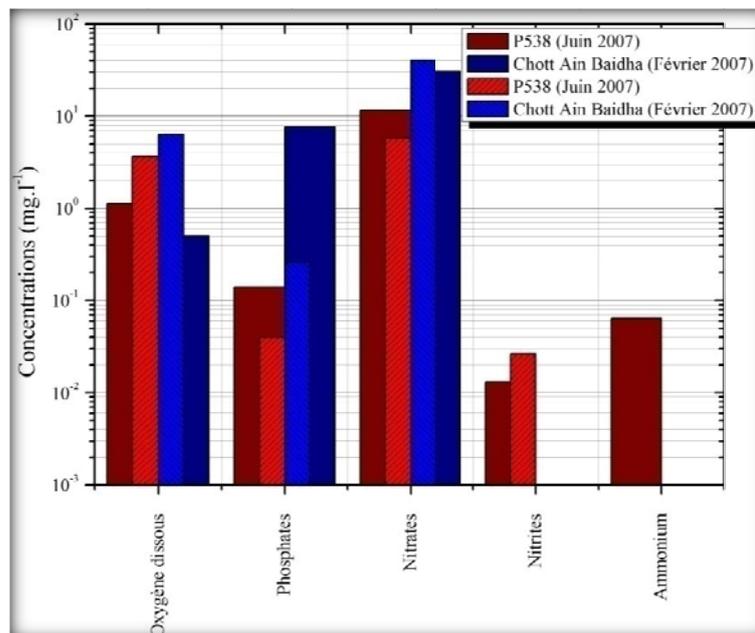


Fig.IV-97 : Evolution des concentrations au niveau du Chott Ain Baidha

L'évolution des concentrations des nutriments au niveau du Chott Ain Baidha (Fig.IV-97) montre que les valeurs au niveau des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines sont :

- ✓ Elevées au mois de février et faible au mois de juin pour l'oxygène dissous.
- ✓ Elevées dans les deux périodes pour les phosphates et les nitrates.
- ✓ Faibles dans les deux périodes pour les nitrites.
- ✓ Faibles au mois de juin pour l'ammonium.

5.3.2- Canal Bamendil :

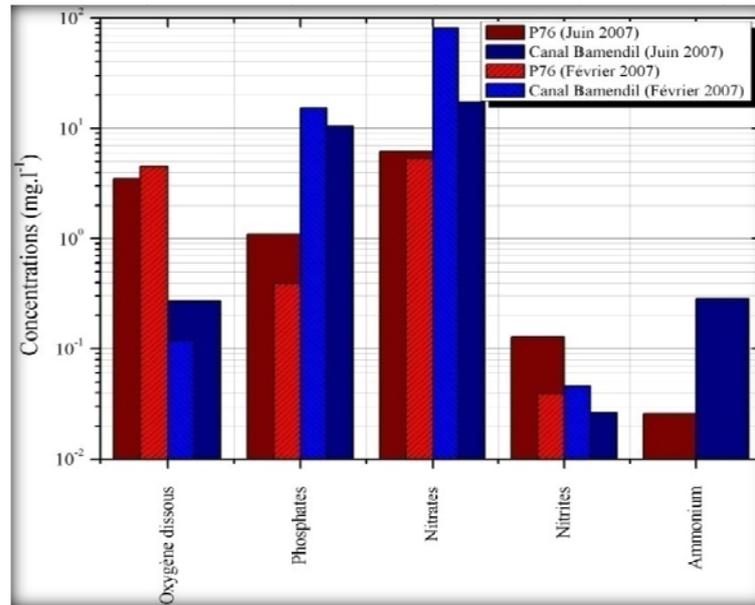


Fig.IV-98 : Evolution des concentrations au niveau du Canal Bamendil

L'évolution des concentrations des nutriments au niveau du Canal Bamendil (Fig.IV-98) montre que les valeurs au niveau des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines sont :

- ✓ Faibles dans les deux périodes pour l'oxygène dissous.
- ✓ Elevées dans les deux périodes pour les phosphates et les nitrates.
- ✓ Elevées au mois de février et faible au mois de juin pour les nitrites.
- ✓ Elevées au mois de juin pour l'ammonium.

5.3.3- Station de relevage Chott :

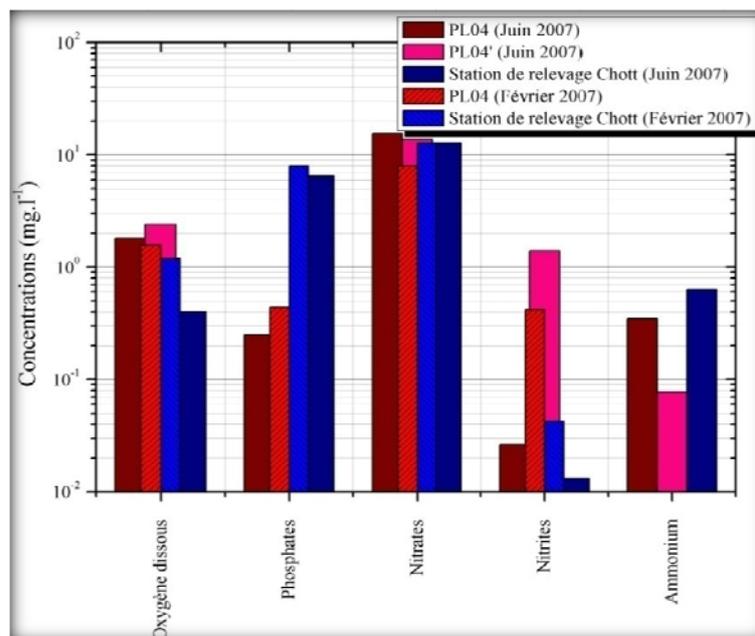


Fig.IV-99 : Evolution des concentrations au niveau de la Station de relevage Chott

L'évolution des concentrations des nutriments au niveau de la Station de relevage Chott (Fig.IV-99) montre que les valeurs au niveau des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines sont :

- ✓ Faibles dans les deux périodes pour l'oxygène dissous et les nitrites.
- ✓ Elevées dans les deux périodes pour les phosphates.
- ✓ Elevées au mois de février et faible au mois de juin pour les nitrates.
- ✓ Elevées au mois de juin pour l'ammonium.

5.3.4- Sebkhata Oum Raneb :

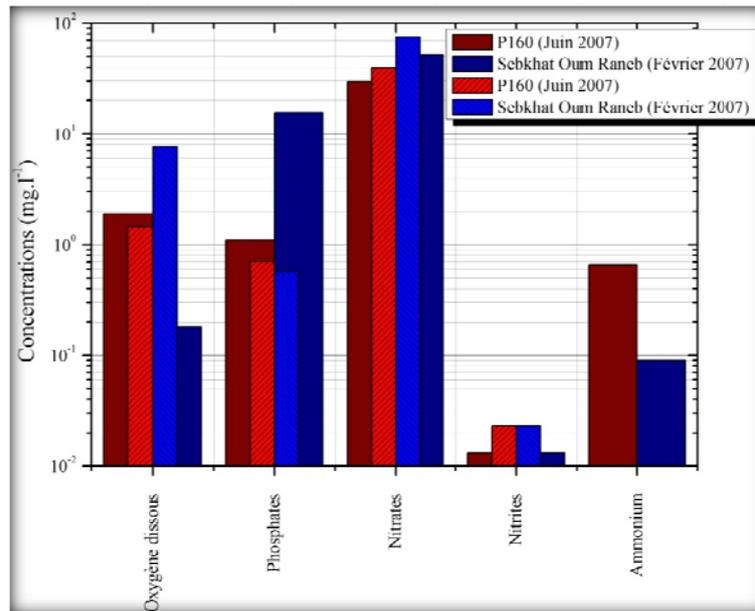


Fig.IV-100 : Evolution des concentrations au niveau de Sebkhata Oum Raneb

L'évolution des concentrations des nutriments au niveau de Sebkhata Oum Raneb (Fig.IV-100) montre que les valeurs au niveau des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines sont :

- ✓ élevées au mois de février et faibles au mois de juin pour l'oxygène dissous ;
- ✓ faibles au mois de février et élevées au mois de juin pour les phosphates ;
- ✓ élevées dans les deux périodes pour les nitrates ;
- ✓ constantes dans les deux périodes pour les nitrites ;
- ✓ faibles au mois de juin pour l'ammonium.

5.4- Influence de la profondeur sur les nutriments des eaux de la cuvette

5.4.1- L'oxygène dissous (O₂)

L'évolution de l'oxygène dissous au niveau des eaux souterraines en fonction de la profondeur (Fig.IV-101) montre les variations de la concentration suivantes :

1. Des concentrations constantes au niveau du piézomètre P538 du chott Ain Baïdha.
2. Une augmentation au niveau des trois piézomètres (P55, P08 et P37).
3. Une diminution au niveau du reste des piézomètres (10 piézomètres).

La tendance générale de l'oxygène dissous est une diminution vers la profondeur.

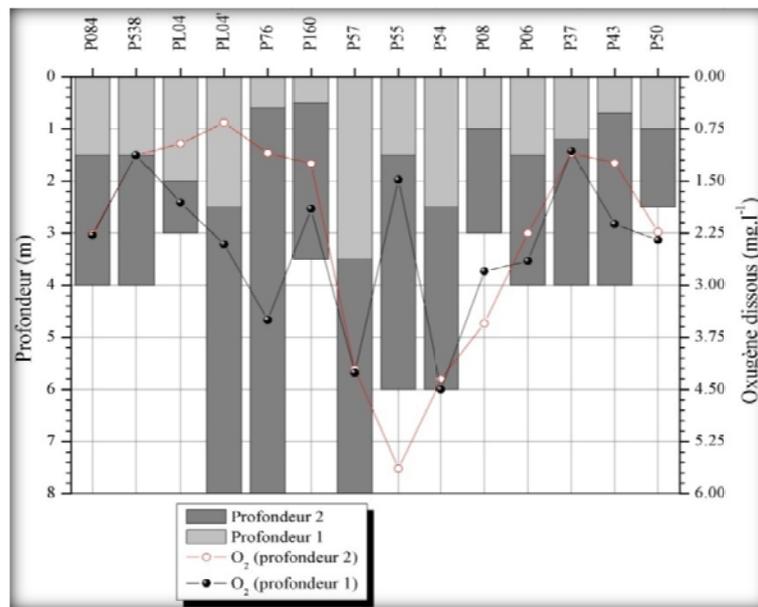


Fig.IV-101 : Evolution de l'O₂ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

5.4.2- Les nitrates (NO₃⁻) :

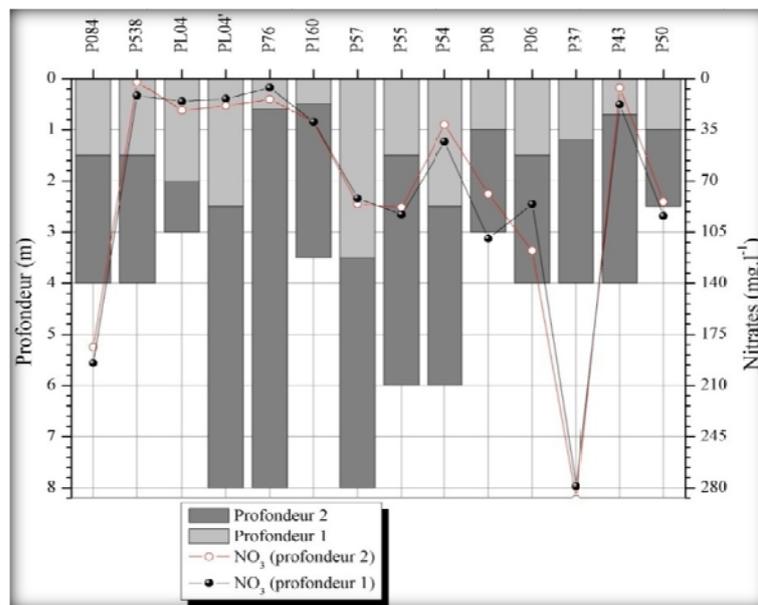


Fig.IV-102 : Evolution du NO₃⁻ en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution des nitrates au niveau des eaux souterraines en fonction de la profondeur (Fig.IV-102) montre les variations de la concentration suivantes :

1. une constance de la concentration au niveau du piézomètre P160 de sebkhat Oum Raneb.
2. Une augmentation au niveau des trois piézomètres (PL04, PL04' et P76) à proximité des drains, ainsi que les trois piézomètres (P57, P06 et P37).
3. Une diminution au niveau du reste des piézomètres (07 piézomètres).

La tendance générale des nitrates est une augmentation vers la profondeur au niveau des piézomètres à proximité des drains (eaux usées) et celles de sebkhat Safioune ; et une diminution dans le reste des piézomètres.

5.4.3- Les nitrites (NO_2^-) :

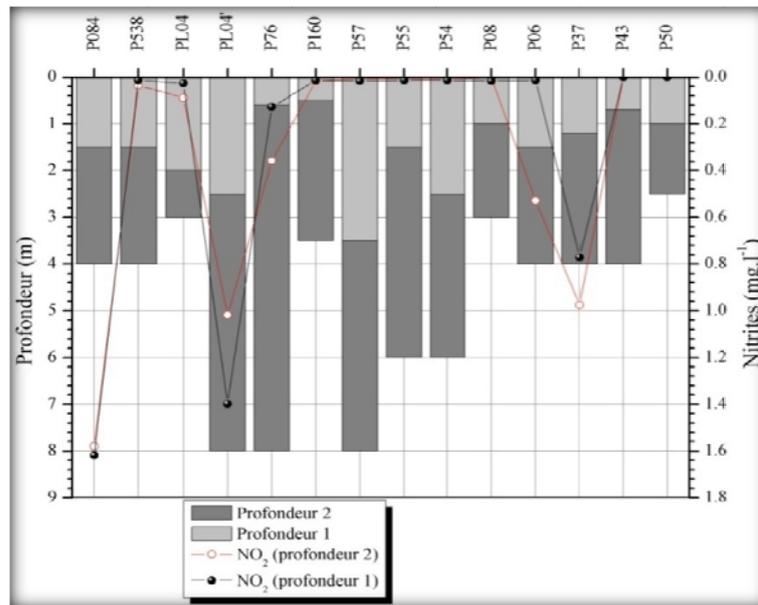


Fig.IV-103 : Evolution du NO_2^- en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

L'évolution des nitrites au niveau des eaux souterraines en fonction de la profondeur (Fig.IV-103) montre les variations de la concentration suivantes :

1. Concentration négligeable aux niveaux des deux piézomètres P43 et P50.
2. Une augmentation au niveau des trois piézomètres (P538 du chott Ain Baidha, PL04 de la station de relevage Chott et P76 du canal Bamendil), ainsi que les deux piézomètres (P06 entre Ngoussa sebkhat Safioune et P37 de sebkhat Safioune).
3. Une diminution au niveau du reste des piézomètres (07 piézomètres).

La tendance générale des nitrites est une augmentation vers la profondeur au niveau des piézomètres à proximité des eaux usées et celles de sebkhat Safioune ; et une diminution dans le reste des piézomètres.

5.4.4- L'ammonium (NH_4^+)

L'évolution de l'ammonium au niveau des eaux souterraines en fonction de la profondeur (Fig.IV-104) montre les variations de la concentration suivantes :

1. Des concentrations nulles au niveau des cinq piézomètres (P54, P08, P37, P43 et P50).
2. Une augmentation au niveau des cinq piézomètres (P84 du rejet Khafji, P538 du chott Ain Baïdha, PL04' de la station de relevage Chott), ainsi que les deux piézomètres (P57 et P06) loin des eaux de rejet.
3. Une diminution au niveau du reste des piézomètres (04 piézomètres).

La tendance générale de l'ammonium est une augmentation vers la profondeur au niveau des piézomètres à proximité des eaux usées ; et une diminution dans le reste des piézomètres.

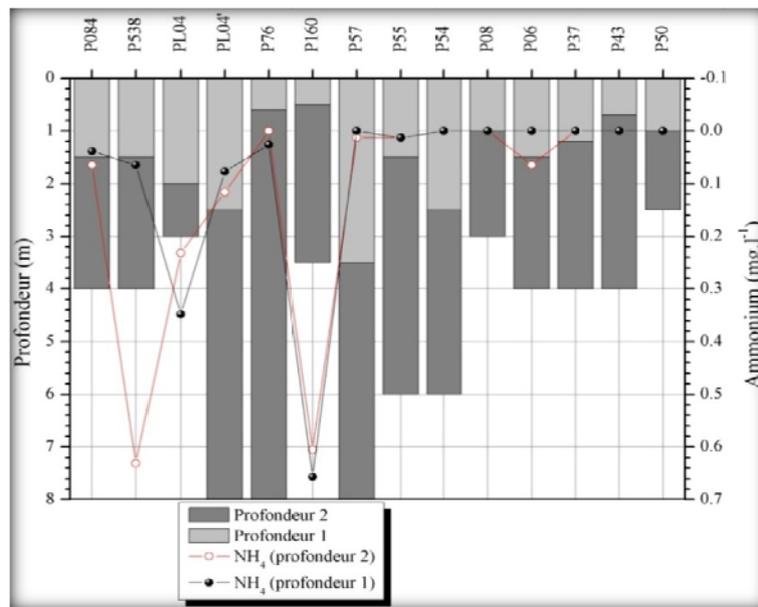


Fig.IV-104 : Variation du NH_4 en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

5.4.5- Les phosphates (PO_4^{3-}) :

L'évolution des phosphates au niveau des eaux souterraines en fonction de la profondeur (Fig.IV-105) montre les variations de la concentration suivantes :

1. Une concentration nulle au niveau du piézomètre (P84).
2. Une augmentation au niveau des huit piézomètres (P538, PL04, P160, P57, P08, P06, P43 et P50).
3. Une diminution au niveau du reste des piézomètres (05 piézomètres).

La tendance générale des phosphates est une augmentation vers la profondeur ; et une diminution surtout dans les piézomètres à proximité des eaux usées.

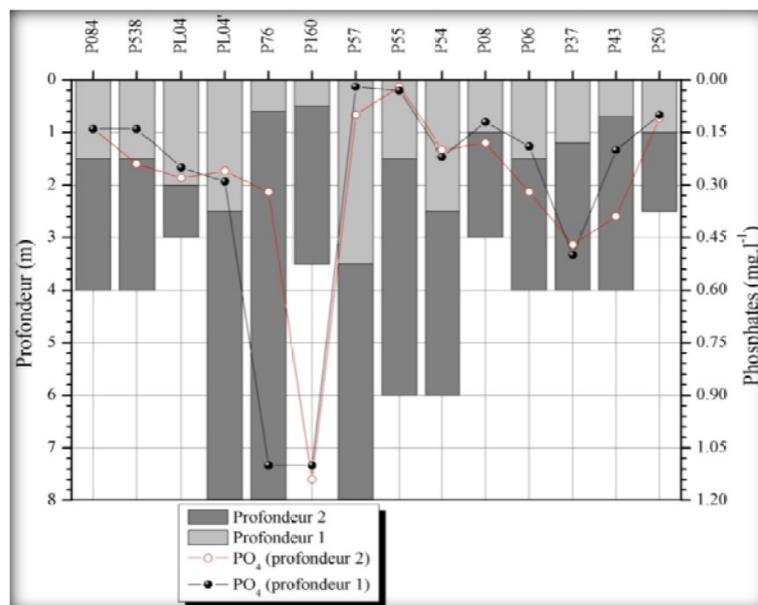


Fig.IV-105 : Evolution du PO_4^{3-} en fonction de la profondeur au niveau de la cuvette de Ouargla (Juin 2007)

5.5- Les indices de pollution de l'eau

5.5.1- L'indice de la biodégradabilité (IB) :

Les indices de la biodégradabilité indiquent des classes d'autoépuration « biodégradabilité » décrivant des milieux riches ou pauvres en matière organique.

La variation spatio-temporelle du rapport DCO/DBO5 montre un indice de biodégradabilité variant entre 2 et 3. Cette situation (*Fig.IV-106*) indique que les eaux des rejets sont des effluents domestiques biodégradables avec des souches sélectionnées, nécessitant une épuration combinée (biologique et physico-chimique) [48].

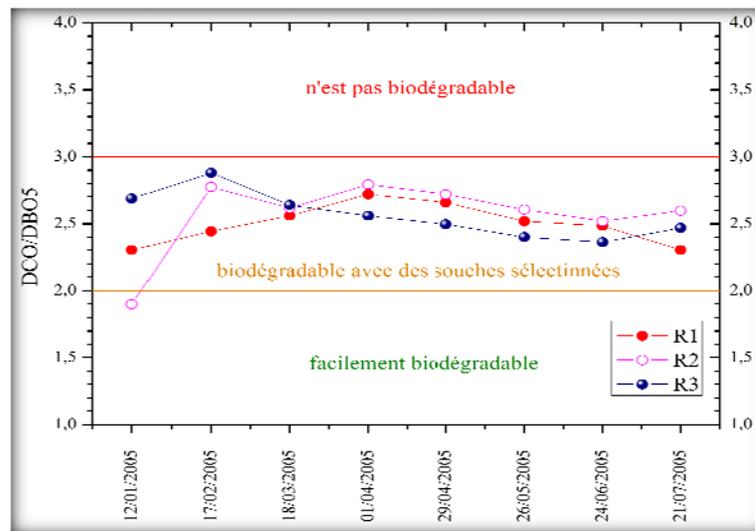


Fig.IV-106 : Variation spatio-temporelle de l'indice de la biodégradabilité au niveau des points de rejets

5.5.2- L'indice de pollution organique (IPO) :

Les valeurs de l'indice de pollution organique indiquent les variations spatio-temporelles des classes de pollution par une dégradation ou une autoépuration des eaux. La figure ci-dessous (*Fig.IV-107*), révèlent des familles relatives aux :

- les *eaux usées* présentant des indices variant entre 1 à 1.66, montrant une seule classe de pollution organique « très forte », avec une évolution spatiale qui reflète une faible autoépuration progressive en allant vers l'aval (Sebkhat Oum Raneb), par contre leurs évolutions temporelles montrent une faible dégradation dans les mois chauds.

- les *eaux souterraines* avec des indices allant de 1.66 à 3.33, montrent trois classes de pollution organique (pollution très forte, forte et modérée). L'évolution spatiale (*Fig. IV-108*) reflète une nette autoépuration progressive en allant de l'amont (PZ1), le point le plus proche de la pollution superficielle, vers l'aval (PZ3), surtout au niveau des mois hivernaux, et une faible autoépuration au niveau des mois estivaux. L'évolution temporelle montre une faible augmentation de la pollution dans le piézomètre PZ1, à nulle dans le PZ2 et une forte augmentation dans le piézomètre PZ3.

Donc la très forte pollution s'observe surtout dans la partie amont (zone la plus proche des rejets domestiques et agricoles « Chott Ain Baïdha »), ainsi que la période estivale (évaporation intense « concentration »). La pollution modérée ne s'observe qu'au niveau de la partie aval par autoépuration [39] (loin des sources de pollution « Sebkhat Oum Raneb ») dans un relief plan, ainsi que la période hivernale (évaporation moindre « dilution »).

Les eaux souterraines de la cuvette de Ouargla (*Fig. IV-108*) montrent une pollution organique forte au niveau de la ville de Ouargla, surtout au niveau du piézomètre PL13. Une pollution organique modérée occupe toute la ville de Ouargla, ainsi que la zone des drains, sebkhat Oum Raneb et sebkhat Safioune. Une pollution faible à nulle occupe la ville de Ngoussa et la zone des affleurements Mio-pliocène ainsi que la zone du chott Ain Baïdha.

5.5.3- L'indice d'eutrophisation (IE) et comportement des nutriments minéraux :

Les teneurs en azote et en phosphore sont également des paramètres indicateurs d'eutrophisation. La fragilité du milieu d'étude a été prise en compte par le suivi des nutriments minéraux dans la nappe et le canal (NO_3 , NH_4 et PO_4) [15].

a- Nitrates - Ammonium:

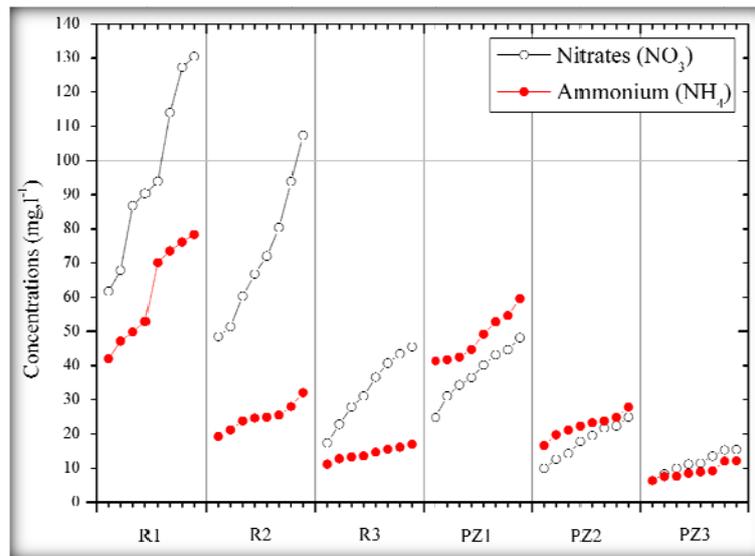


Fig.IV-109 : la variation spatio-temporelle des NO_3 et NH_4 au niveau des points de rejets et les piézomètres

La variation spatio-temporelle des nitrates et ammonium dans les eaux usées et souterraines (*Fig.IV-109*) montre une forte teneur en nitrates (40 à 130 mg.l^{-1}) dans les eaux du canal, par contre une chute dans les eaux souterraines (60 à 10 mg.l^{-1}). L'évolution spatiale montre une diminution vers l'aval, par contre l'évolution temporelle augmente toujours en période estivale, ceci s'explique par le phénomène conjugué nitrification (apport d'engrais) par les eaux alimentant le canal et dénitrification dans le milieu réducteur, de la nappe (relativement faible en oxygène). Sur la même figure (*Fig.IV-109*), on remarque le phénomène inverse au niveau de l'ammonium. La présence de l'ammonium provient des fertilisants utilisées dans les périmètres irrigués (l'amont), et une contamination par les matières organiques humaines au niveau des zones de rejet (canal à ciel ouvert). Cette forme azotée devienne dominante ($>$ au nitrates) dans les eaux souterraines au niveau des piézomètres PZ1 et PZ2.

b- Nitrites - phosphates

L'évolution spatio-temporelle des nitrites et phosphates dans les eaux du canal (usées) et souterraine (*Fig.IV-110*) montre une forte teneur en phosphates (2.6 à 3.1 mg.l^{-1}) dans les eaux usées, par contre une chute dans les eaux souterraines (0.7 à 0.3 mg.l^{-1}).

L'évolution spatiale montre une diminution vers l'aval, par contre l'évolution temporelle augmente toujours en période estivale, mais avec une faible augmentation pour les eaux souterraines que celles des eaux de rejet. Ceci s'explique par l'apport d'engrais et les rejets domestiques par les eaux alimentant le canal, ainsi que la précipitation des minéraux phosphatés

(Apatite) par sa faible solubilité [28] dans un milieu réducteur chargé en sels minéraux (nappe superficielle).

Les courbes des nitrites comportent comme celle des nitrates.

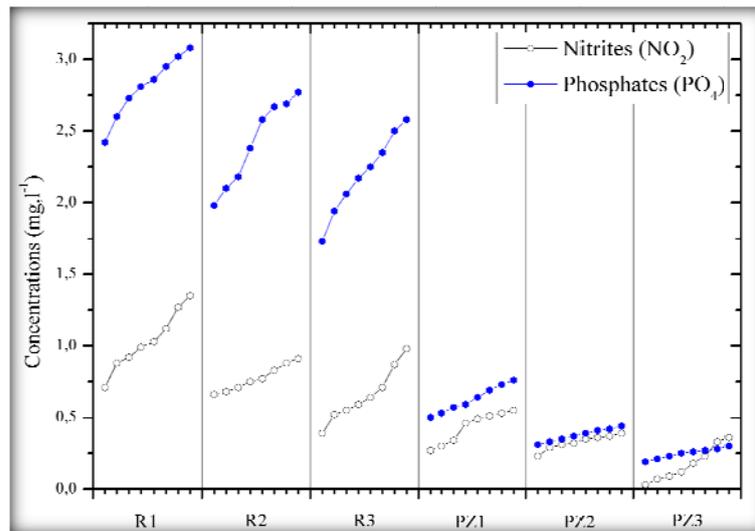


Fig.IV-110 : la variation spatio-temporelle des NO_2 et PO_4 au niveau des points de rejets et les piézomètres

c- L'indice d'eutrophisation

Les valeurs de l'indice d'eutrophisation indiquent les variations spatio-temporelles des classes d'eutrophisation par une richesse ou une pauvreté en nutriments.

Les eaux usées présentent des indices entre 1 et 2 (Fig. IV-111) montrant une forte eutrophisation allant jusqu'à très forte. L'évolution spatiale montre une très faible diminution des nutriments (NO_3 et PO_4) en allant vers l'aval (Sebkhet Oum Raneb), et leurs évolutions temporelles montrent un enrichissement en matière des nutriments dans la période estivale surtout en amont, et reste constante en aval.

Les eaux souterraines montrent une eutrophisation modérée jusqu'au faible, avec un « IE » allant de 3 à 4 (Fig.IV-111). L'évolution spatiale montre une constance des nutriments pour une classe modérée sauf que dans l'aval (Sebkhet Oum Raneb) on remarque une légère diminution en période hivernale traduisant la classe d'une faible eutrophisation.

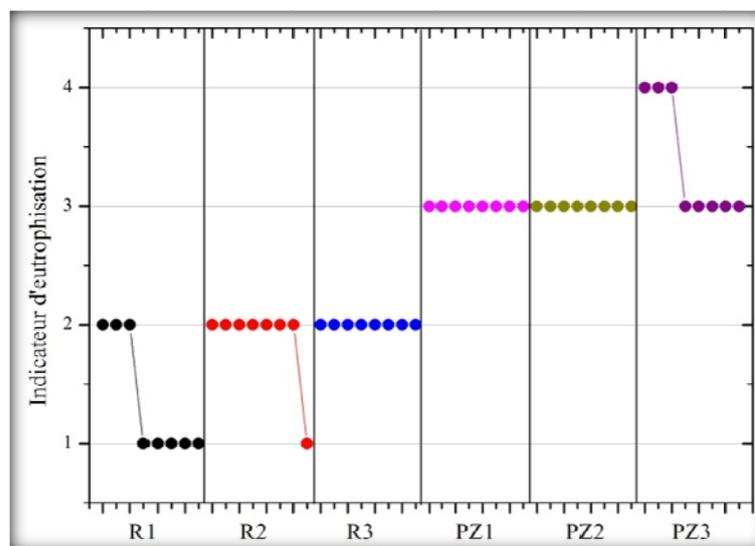


Fig.IV-111 : la variation spatio-temporelle de l'indice d'eutrophisation au niveau des points de rejets et les piézomètres

5.5.4- L'IQM « indice de qualité microbiologique » :

Le dénombrement des coliformes fécaux et les streptocoques fécaux est un indicateur de contamination fécale. L'IQM varie de 1.33 (R1) à 2.33 (R3) et de 3.67 (PZ1) à 5 (PZ3). (Fig.IV-112).

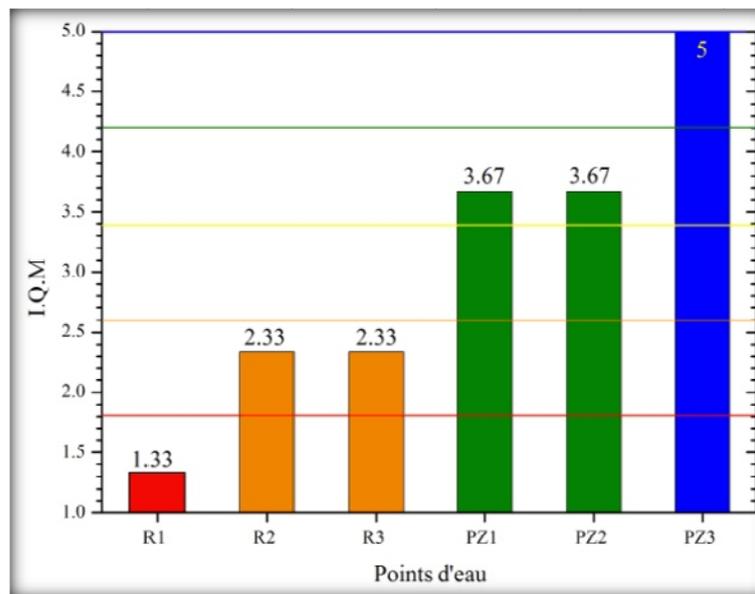


Fig.IV-112 : Variation spatiale de l'indice de la qualité microbiologique au niveau des points de rejets et les piézomètres

Les eaux usées présentent des indices de qualité microbiologique montrant une contamination fécale très forte pour le point de rejet R1 (amont), et une contamination fécale relativement moindre (forte) pour R2 et R3. Cette diminution vers l'aval s'explique par l'éloignement de la source de contamination et la diminution de la matière organique par la biodégradation [38], d'une part, par l'augmentation de la salinité d'autre part.

Les eaux souterraines montrant des indices de qualité microbiologique pour les piézomètres PZ1 et PZ2 par de faible contamination fécale, cela due au milieu favorable pour ce multiplier par la présence de la matière organique et la température. Par contre le PZ3 montre une contamination fécale nulle, cela due à une stérilité par la très forte salinité (sebkha Oum Raneb).

6. CONCLUSION

Les eaux de la cuvette de Ouargla présentent une pollution organique à différents degrés essentiellement aux niveaux des drains collecteurs riches des eaux de rejet, cela est dû à l'influence de plusieurs facteurs :

Influence climatique par l'effet de la température donc une évaporation intense engendrant une forte concentration des nutriments.

Influence des eaux de surface sur les eaux souterraines : généralement les eaux de surface ont des concentrations supérieures à celle des eaux souterraines, cela influe directement sur la qualité des eaux souterraines par infiltration.

Influence de la profondeur : ce facteur est lié à plusieurs paramètres surtout lithologique, par l'autoépuration ainsi que les réactions d'oxydoréduction.

L'ensemble des graphiques, expliquant le phénomène de la pollution organique dans la cuvette de Ouargla, est résumé dans une carte d'évolution spatiale de l'indice de pollution organique ; Cette carte s'avère d'une utilité importante dans l'étude de la contamination des eaux souterraines par les eaux superficielles.

Chapitre V :
Gestion qualitative
des eaux

Chapitre V

Gestion qualitative des eaux

La qualité de l'eau dépend de la présence de polluants et de leur quantité, de facteurs physiques et chimiques tels que le pH et la conductivité, de la quantité de sels présente et de la présence ou non d'engrais. Les hommes ont beaucoup d'influence sur ces facteurs, car ils rejettent leurs déchets dans l'eau et ajoutent toutes sortes de substances et de polluants qui ne sont pas présents naturellement dans l'eau.

L'eau salée est une eau qui contient une certaine quantité de sels. Cela signifie que sa conductivité est plus haute et elle a un goût beaucoup plus salée quand on la boit. L'eau salée n'est pas considérée comme une eau potable, ceci car le sel draine l'eau hors du corps humains. Quand les hommes boivent de l'eau salée ils risquent la déshydratation.

L'eau douce est une eau dont la concentration en sel dissous est inférieure à 1%. A peine 1% de l'eau disponible sur terre est de l'eau douce, alors que 41% des espèces connues de poissons vivent dans cette eau. Les zones d'eau douce sont habituellement proches des terres; donc elles sont souvent menacées par un ajout permanent de matière organique, de nutriments inorganiques et de polluants.

Pour déterminer la qualité de l'eau des prélèvements des échantillons, c'est à dire de petites quantités d'eau qui peuvent être analysées en laboratoire. Les laboratoires testent différents facteurs sur ces échantillons, et vérifie s'ils répondent aux normes de qualité de l'eau. Un de ces facteurs est le nombre de colonies de la bactérie coliforme, c'est un indicateur de qualité pour l'eau potable et l'eau de baignade. Un autre facteur est la concentration de certains polluants et d'autres substances telles que les agents d'eutrophication.

Nous utilisons de grandes quantités d'eau chaque jour, car l'eau est utilisée pour beaucoup de choses. Nous utilisons l'eau pour boire, pour faire la vaisselle, pour prendre une douche, pour rincer les toilettes, pour cuisiner et pour beaucoup d'autres choses encore.

Mais l'eau n'est pas seulement utilisées à des fins domestiques, on l'utilise aussi l'eau dans l'industrie et dans l'agriculture. Dans l'agriculture l'eau est principalement utilisée pour irriguer les cultures, mais dans les industries elle a beaucoup d'applications. Elle peut être un des ingrédients d'un produit que l'on veut produire, mais également faire partie du procédé de production en lui-même. L'eau peut être employée pour refroidir les substances dans les procédés de production, pour le transport et le traitement des matières premières, pour bouillir ou faire cuire, pour rincer, pour le transport des produits.

On ne peut gérer une eau ou donner sa destination, qu'après avoir vérifié sa qualité vis-à-vis des normes demandées par les utilisateurs. A cet effet la norme de chaque consommateur doit impérativement répondre aux critères de potabilité. Ainsi l'alimentation en eau potable est basée sur les limites données par l'OMS. Quand à l'irrigation l'exigence est relativement moindre, elle est basée essentiellement sur la salinité et la texture du sol.

La norme demandée par le secteur industriel, reste jusqu'à lors dépendante du domaine d'application

1. QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE (AEP)

Une eau est caractérisée par un ensemble de paramètres accessibles à l'analyse. Tous ces éléments constituent la minéralisation de l'eau dont l'importance dépend essentiellement de la nature géologique des terrains traversés.

En suivant la classification de l'a législation française et l'OMS, on distingue :

- Les paramètres organoleptiques : couleur, turbidité, odeur, saveur.
- Les paramètres physico-chimiques : température, conductivité, calcium, magnésium, pH, sodium, potassium, chlorures, sulfates, dureté totale, silices, résidu sec à 180 °C, oxygène dissous, gaz carbonique dissous.

Le résidu sec constitue une mesure globale de la minéralisation. Cette dernière peut être également approchée par la mesure de la conductivité ou de son inverse, la résistivité. La présence de matières minérales dissoutes en quantité raisonnable communique à l'eau un goût agréable et apporte à l'organisme de nombreux éléments indispensables.

Un excès de certains sels peut rendre l'eau désagréable à boire (Chlorure de sodium ou de magnésium) ou même provoquer des désordres physiologiques (Sulfate de Magnésium laxatif, propriété de certaines eaux minérales). C'est pourquoi la réglementation fixe des limites de concentration pour ces ions (*Tableau V-01*).

- Les substances indésirables : On classe dans cette rubrique : nitrates, nitrites, ammonium, azote Kjeldahl, oxydabilité, COT (carbone organique total), hydrogène sulfuré, hydrocarbures dissous, phénols, Bore, détergents, organo-chlorés autre que les pesticides, phosphore, chlore libre résiduel, matières en suspension, baryum et argent.

Il faut bien avoir à l'esprit que, même en cas de pollution importante, aucune eau ne peut entraîner un risque de toxicité aiguë. Il ne peut exister qu'un risque de toxicité chronique par effet d'accumulation, comme cela a été observé pour le plomb (saturnisme) ou le mercure (maladie de minamata).

Tableau V-01 : Normes européennes de potabilité des eaux CEE (1975)

Variable	Niveau guide	Concentration maximale admissible	Concentration minimale requise
pH	6.5-8.5	9.5	6.0
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	400	1250	
Résidu sec mg/l		1500	
Dureté totale (degrés français)	35		10
Calcium mg/l	100		10
Magnésium mg/l	30	50	5
Sodium mg/l	<20	100	
Potassium mg/l	<10	12	
Aluminium mg/l		0.05	
Alcalinité $\text{mg}/\text{l CO}_3\text{H}$	30		
Sulfates $\text{mg}/\text{l SO}_4$	5	250	
Chlorures $\text{mg}/\text{l Cl}$	5	200	
Nitrates $\text{mg}/\text{l NO}_3$		50	
Nitrites $\text{mg}/\text{l NO}_2$		0.1	
Ammoniaque $\text{mg}/\text{l NH}_4$	0.05	0.5	
Oxygène dissous	5		
DBO5 mg/l		50 % teneur initiale O_2	
Phosphore $\mu\text{g}/\text{l}$	300	2000	

1.1- Les éléments mesurés in-situ

La température, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité électrique, sont des paramètres facilement mesurables et utiles pour la détermination de la qualité chimique des eaux.

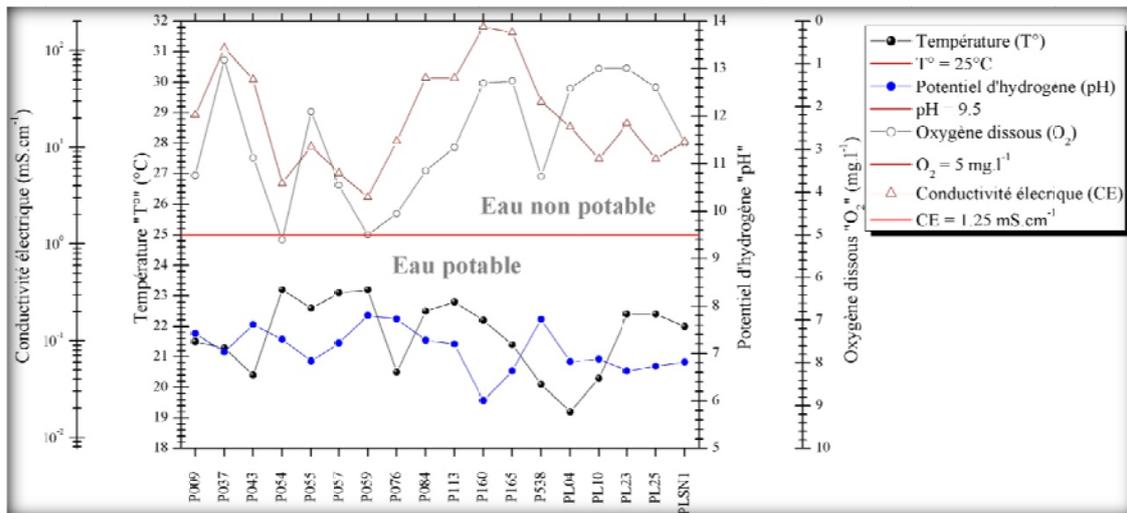


Fig. V-1 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité, T° , pH et O_2 (Février 2007)

Pour évaluer la qualité des eaux de la nappe de Ouargla, nous avons dressé des courbes d'évolution dans l'espace de certaines paramètres (Fig.V-1) et nous avons tracé la limite de potabilité, on remarque que les eaux ne dépassent pas les normes de potabilité vis-à-vis la température et le pH, alors qu'elles sont loin de satisfaire les besoins de l'être humain concernant la conductivité et l'oxygène dissous.

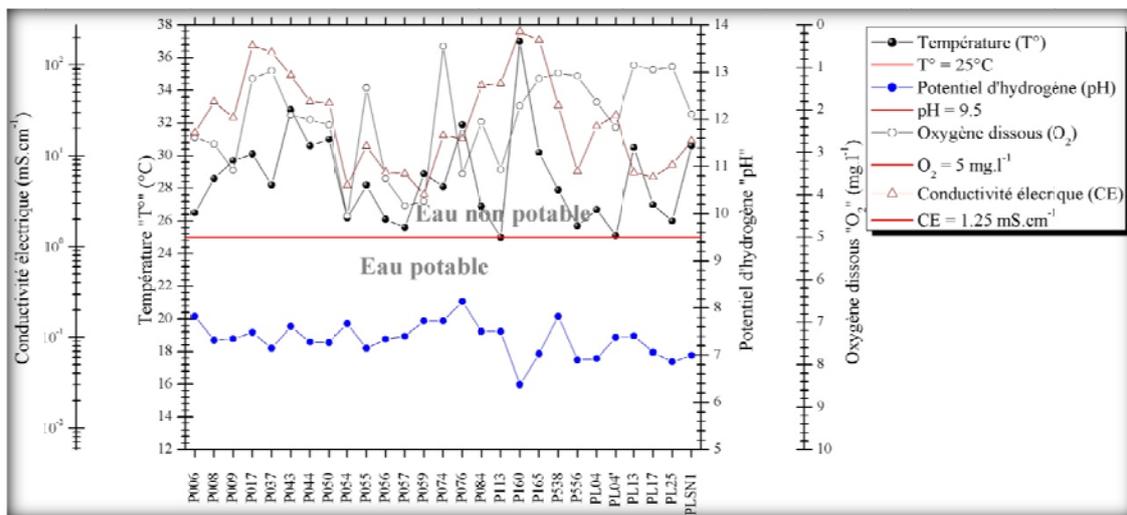


Fig. V-2 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité, T° , pH et O_2 (Juin 2007)

Cependant cette évolution de la qualité est provoquée par une réduction d'oxygène et une augmentation de la température pendant la période des basses eaux, ou on note que certains paramètres dépassent largement les normes de potabilité.

1.2- Les anions

Les sulfates, les chlorures, et les bicarbonates, sont des paramètres utiles, en combinaison avec les cations, pour la détermination de la salinité dans l'eau.

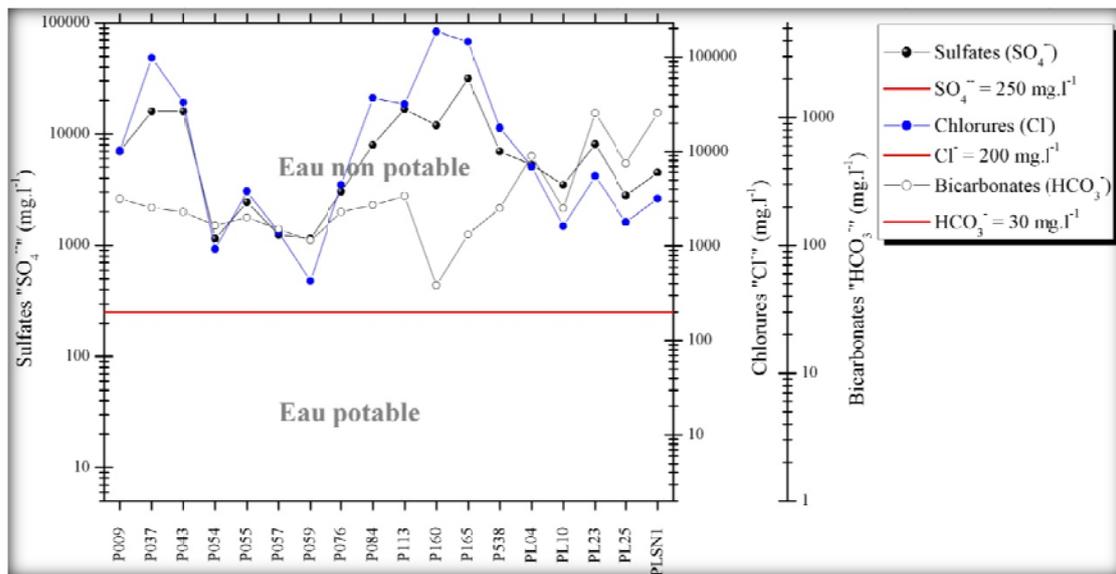


Fig. V-3 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions (Février 2007)

La période hivernale des hautes eaux (Février 2007) montre que tous les anions (Fig.V-3) ne sont pas dans les normes européennes de potabilité des eaux CEE (1975), surtout les chlorures et les sulfates, ce qui a rendu les eaux non potables.

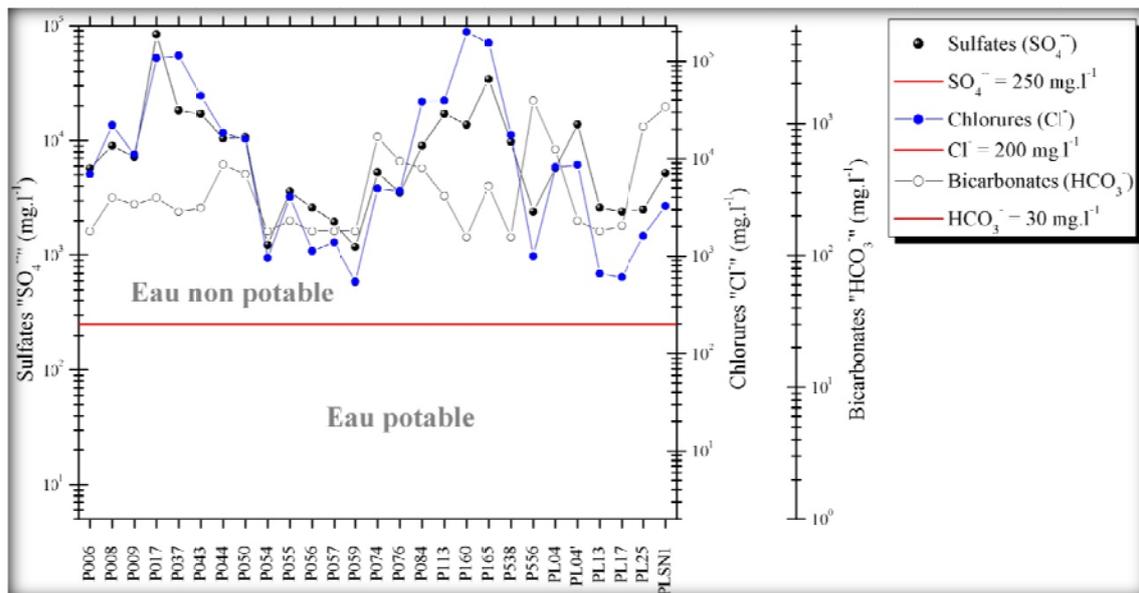


Fig. V-4 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions (Juin 2007)

La période estivale des basses eaux (Juin 2007) montre aussi que tous les anions (Fig.V-4) ne sont pas dans les normes européennes de potabilité, avec une augmentation des concentrations par le fait de l'évaporation, donc les eaux sont trop salées et non potables.

1.3- Les cations

Le sodium, le potassium, le magnésium et le calcium, sont aussi des paramètres utiles, en combinaison avec les anions, pour la détermination de la minéralisation dans l'eau.

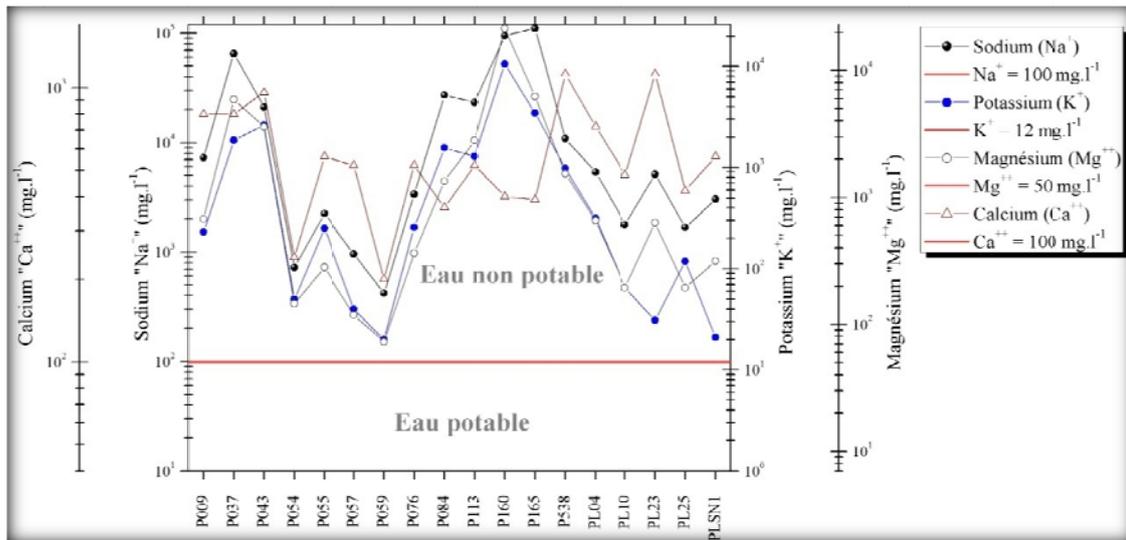


Fig. V-5 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations (Février 2007)

La période hivernale des hautes eaux (Février 2007) montre que tous les cations (Fig.V-5) ne sont pas dans les normes européennes de potabilité des eaux CEE (1975), surtout le Sodium et le magnésium, ce qui a rendu le milieu trop salé.

La période estivale des basses eaux (Juin 2007) montre aussi que tous les cations (Fig.V-6) sont hors normes de potabilité, relativement avec une faible augmentation des concentrations par le fait de l'évaporation, donc le milieu est trop salé et non potable pour la consommation humaine.

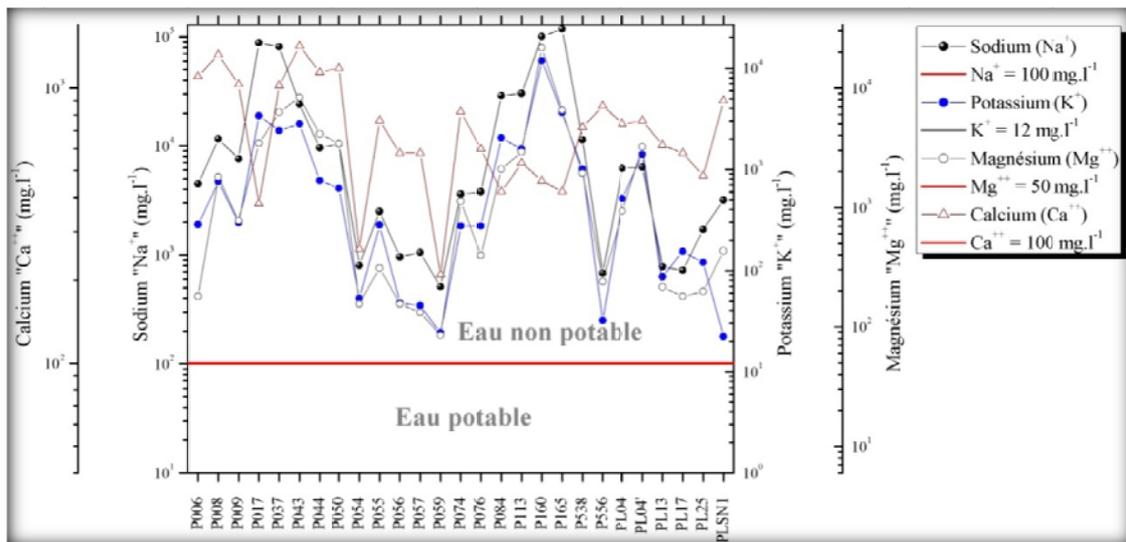


Fig. V-6 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations (Juin 2007)

1.4- Les nutriments

Les nitrates, les nitrites, le phosphate et l'ammonium, sont aussi des paramètres utiles, pour la détermination de la pollution surtout anthropique dans l'eau.

La période des hautes eaux (Février 2007) montre que presque tous les nutriments (Fig.V-7) sont dans les normes européennes de potabilité des eaux CEE (1975), surtout les phosphates par contre les nitrites montrent deux piézomètres (P037 et PL04) ne sont pas dans les normes. Les nitrates montrent aussi que les piézomètres (P037, P055, P057, P084 et P113) ne sont pas dans les normes.

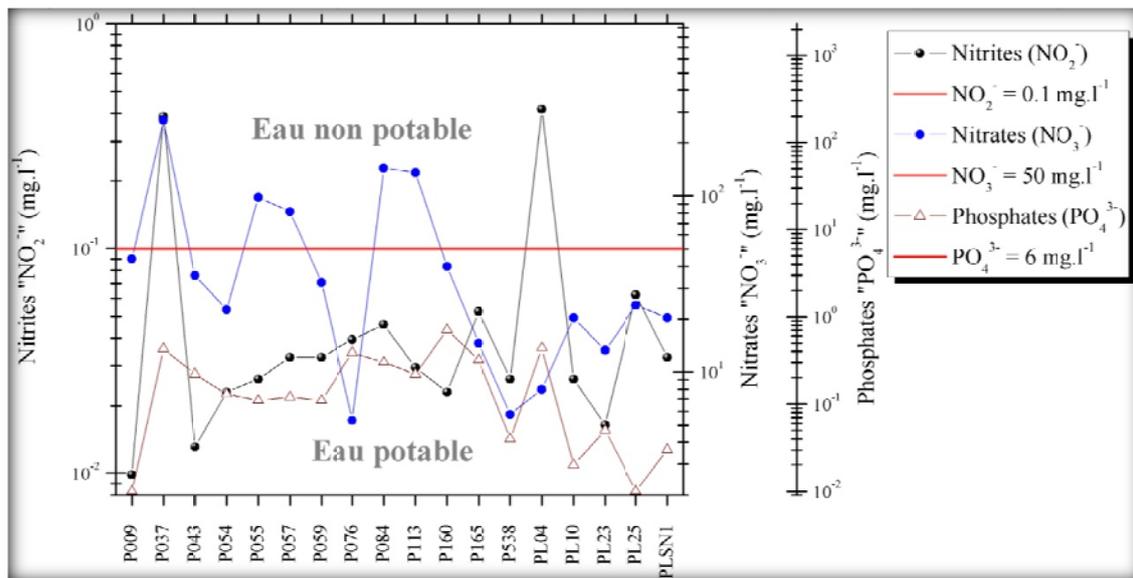


Fig. V-7 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments (Février 2007)

La période des basses eaux (Juin 2007) montre que seul l'ammonium (Fig.V-8) présente que tous les piézomètres sont dans les normes européennes de potabilité, par contre les nitrates, nitrites et phosphates montrent que le nombre des piézomètres hors normes a augmenté. Ce qui traduit le fait conjugué de l'irrigation fertilisation et l'évaporation intense dans un milieu hyperaride.

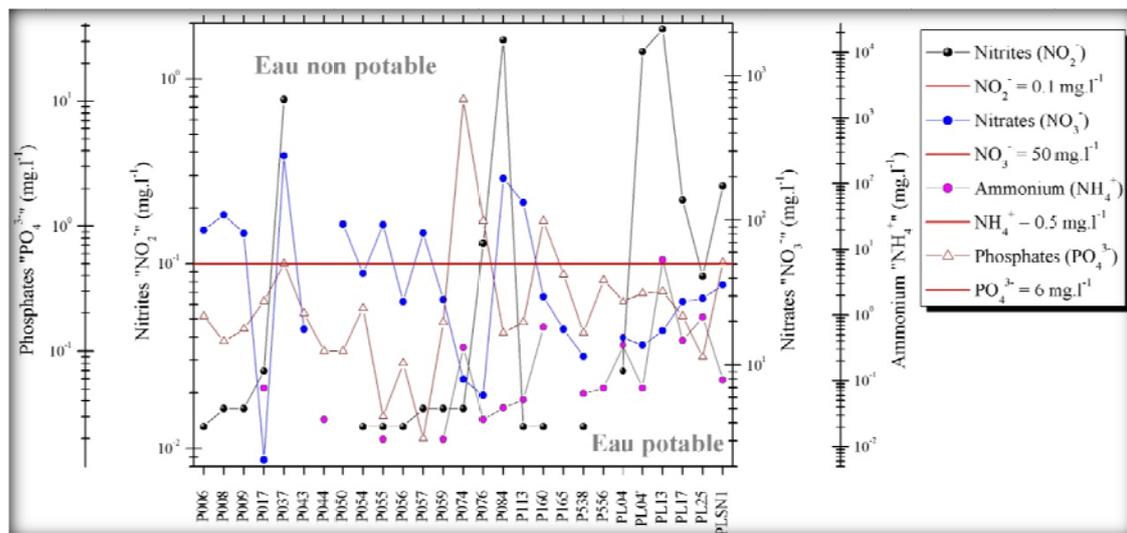


Fig. V-8 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments (Juin 2007)

Les eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla présentent une eau non potable pour la consommation humaine, ce qui nécessite d'une part, une élimination de toutes sources de pollution dans un tel milieu (endoréique et perméable), d'autre part, un dessalement qui peut être obtenu par ces deux procédés :

- procédé thermique, faisant appel à l'évaporation ;
- procédé membranaire, appliquant le principe de l'osmose inverse.

C'est ce dernier procédé qui est de plus en plus mis en œuvre, que ce soit pour des petites, moyennes ou très grandes capacités de production (> 300000 m³/j).

2. QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À L'IRRIGATION (AEA)

L'agriculture représente le plus important consommateur des ressources en eau. Ces ressources, suivant les régions dont elles proviennent, et leur contact éventuel avec des sources de pollution ont des caractéristiques très diversifiées.

De plus, vu la diminution des apports en eau constatée depuis plusieurs décennies, les agriculteurs, notamment dans les régions continentales, s'intéressent à l'utilisation des eaux usées et les eaux salées. C'est ainsi que des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation ont été établies afin de :

- protéger le public et les ouvriers agricoles ;
- protéger les consommateurs des produits agricoles ;
- protéger les ressources en eau superficielle et souterraine et les sols ;
- protéger le matériel d'irrigation ;
- maintenir des rendements acceptables.

2.1- Les risques du Sodium Adsorption Ratio (SAR)

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace les calcium et les magnésium adsorbés (échange de bases) sur les argiles de sol et cause la dispersion des particules dans le sol (c.-à-d. si le calcium et le magnésium sont les cations prédominants adsorbés sur le complexe d'échange du sol, le sol tend à être facilement cultivé et a une structure perméable et granulaire).

Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure, par conséquent l'asphyxie des plantes.

Ce problème est également relié à plusieurs facteurs tels que le taux de salinité (voir ci-dessous) et le type de sol. Par exemple les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux sols argileux quand ils sont irrigués avec de l'eau à haut SAR.

L'eau destinée à l'irrigation doit répondre à certaines exigences de sa qualité. Dans ce sens, on utilise le SAR et la minéralisation.

L'indice utilisé est le rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

Tableau V-02 : Le risque du SAR dans l'eau d'irrigation

	SAR	Notes
Nul	< 3.0	Pas de restriction sur l'utilisation d'eau
Léger à modéré	3.0 - 9.0	Entre 3 et 6, une attention particulière doit être portée sur les récoltes sensibles. Entre 6 et 8 du gypse doit être utilisé. Récoltes non sensibles. Des échantillons de sol doivent être prélevés et examinés tout les 1 ou 2 jours pour déterminer s'il y a une augmentation des teneurs en Sodium.
Elevé	> 9.0	Domage sévère.

Le SAR est défini par l'équation suivante :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Na : Sodium, Ca : Calcium, Mg : Magnésium, (en meq/l)

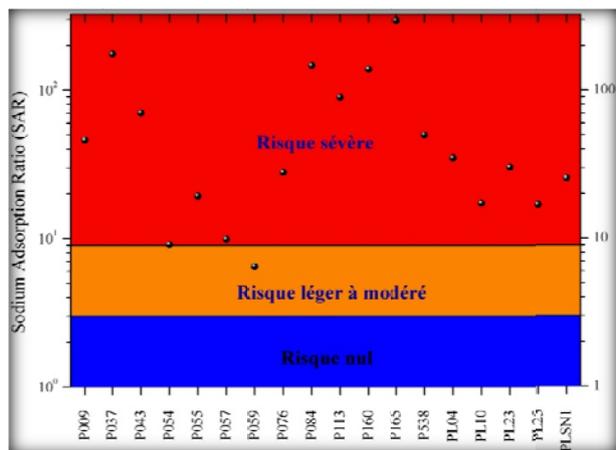


Fig. V-09 : Risques du SAR (Février 2007)

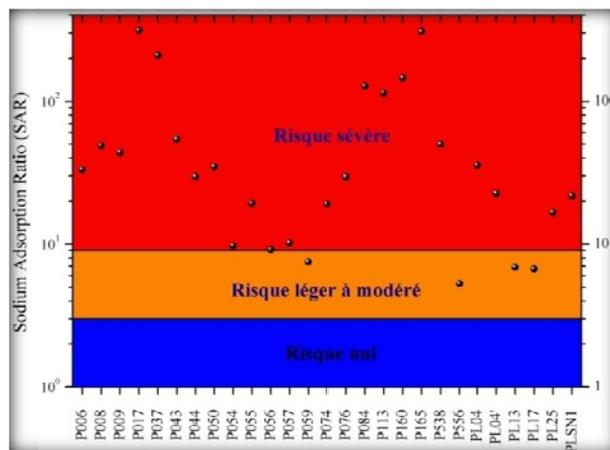


Fig. V-10 : Risques du SAR (Juin 2007)

Les deux figures montrent que l'ensemble des points d'eaux présente un risque sévère du SAR pour l'irrigation (plantes et sols), sauf pour le piézomètre P59 situé dans les grès du Mio-pliocène où présente le risque est léger à modéré. En période des basses eaux trois piézomètres de la ville montrent aussi un risque léger à modérer.

2.2- Relation entre le SAR et l'indice de salinité

À un SAR donné, le taux d'infiltration augmente avec certaines conditions comme, notamment, la salinité. Donc le SAR et le CE devraient être utilisés en combinaison pour évaluer des problèmes potentiels.

Tableau V-03 : SAR/Risque de salinité pour l'eau d'irrigation

SAR de:	0-3	3-6	6-12	12-20	20-40
Risques	et CE (dS/m) de :				
Nul	>0.7	>1.2	>1.9	>2.9	>5.0
Léger	0.7	1.2	1.9	2.9	5.0
Modéré	0.2	0.3	0.5	1.3	2.9
Sévère	<0.2	<0.3	<0.5	<1.3	<2.9

Comme on peut le voir dans le *tableau V-03*, pour une eau très faiblement salée, une eau avec, pourtant, un SAR faible doit être évité. Mais, une eau très salée (EC1.50-3.00) avec un SAR au-dessus de 4, doit être soigneusement gérée. Il est recommandé que, une fois par an, les sols doivent être soumis à des tests afin de détecter d'éventuel problème de sodisation.

Le taux de salinité et le sar sont des indices proportionnelles, plus la salinité est élevée, plus l'indice SAR pourra poser des problèmes d'infiltration. Mais, plus la salinité sera basse, plus les problèmes d'infiltration seront indépendant de la valeur du SAR.

Les averses de pluie peuvent réduire la salinité des sols et, par conséquent, augmenter l'indice SAR et affecter la pénétration d'eau dans ces sols.

La composition chimique des eaux de la nappe superficielle montre quelles ont des facies chloruré sodique et sulfaté sodique. Sur le diagramme de Riverside (*Fig.V-11 et V-12*), le classement de ces eaux montre une eau à très forte salinité C4 et moyen pouvoir alcalinisant pour le piézomètre P59. Par contre, l'ensemble des points d'eau se situe dans la classe C5 où on note une salinité excessive et un fort pouvoir alcalinisant.

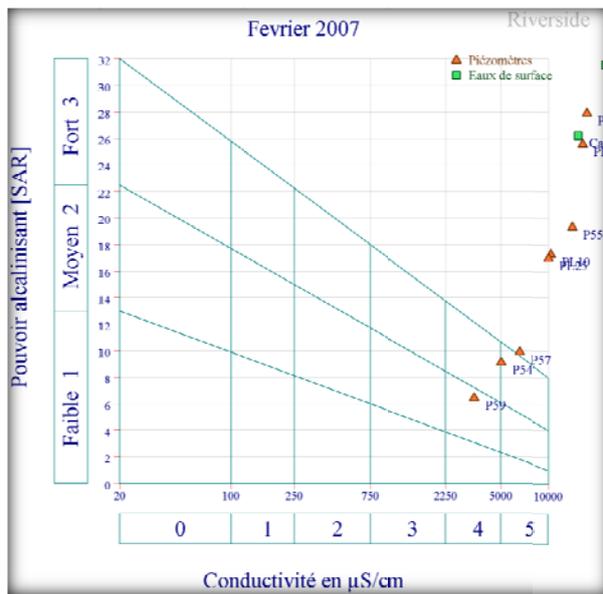


Fig. V-11 : Diagramme de Riverside (Février 2007)

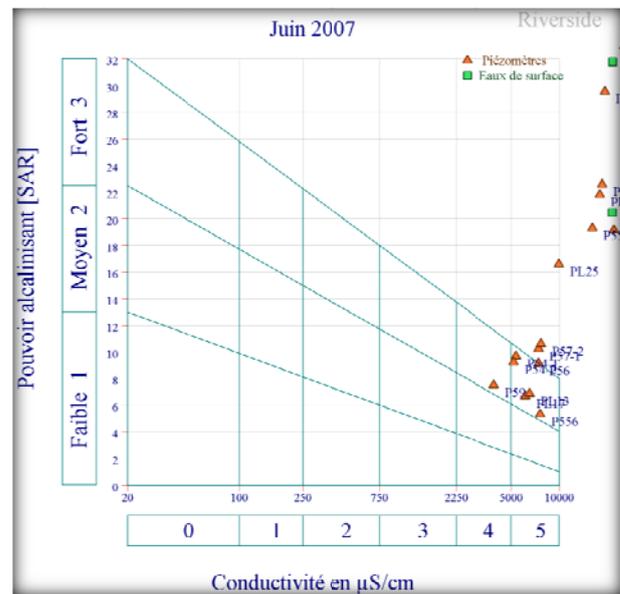


Fig. V-12 : Diagramme de Riverside (Juin 2007)

2.3- Les risques de la salinité

L'excès de teneur en sel est l'un des soucis principaux avec l'eau utilisée pour l'irrigation. Une concentration élevée en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.

L'utilisation d'une eau salée pour l'irrigation dépendra de plusieurs facteurs:

- La tolérance en sel des plantes
- Les caractéristiques du sol sous l'irrigation
- Les conditions climatiques : La qualité de l'eau d'irrigation joue un rôle essentiel dans les secteurs arides affectés par des taux d'évaporation élevés entraînant une accumulation importante de sel dans les sols.
- Les procédures de gestion des sols et de l'eau.

En général, l'eau réutilisée pour l'irrigation doit avoir un degré faible ou moyen de salinité. (i.e. conductivité électrique de 0.6 à 1.7 dS/m).

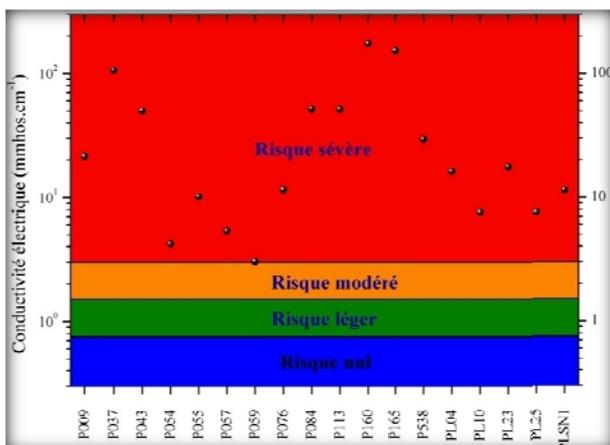


Fig. V-13 : Risques de la salinité (Février 2007)

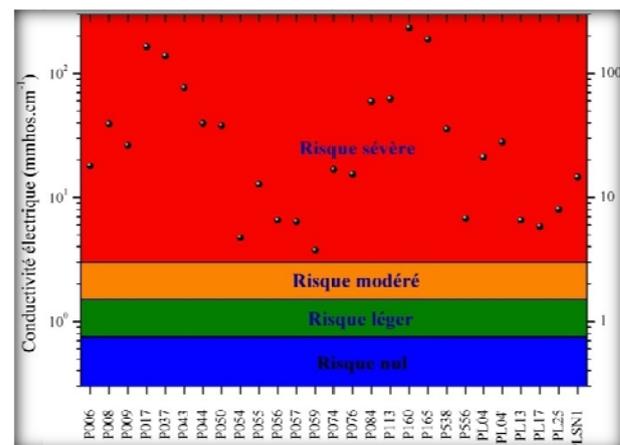


Fig. V-14 : Risques de la salinité (Juin 2007)

Les figures (fig.V-13 et V-14) montrent que tous les piézomètres présentent un risque sévère de la salinité, donc les eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla dans leur état naturel, sont inutilisables pour l'irrigation.

2.4- Risque des bicarbonates

Une forte teneur en carbonate (CO_3^{2-}) et en bicarbonate (HCO_3^-) augmente la valeur du S.A.R (environ $>3\text{-}4\text{meq/L}$ ou $>180\text{-}240\text{mg/L}$), pour les raisons suivantes :

- ✓ Les ions carbonate et bicarbonate combinés au calcium ou au magnésium précipiteront sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3) ou carbonate de magnésium (MgCO_3) dans des conditions de sécheresse (la cuvette de Ouargla montre une sécheresse permanente).
- ✓ Lorsque la concentration de Ca et de Mg décroît, la teneur du sodium et l'indice SAR deviennent plus importants. Ceci causera un effet d'alcalisation et augmentera le pH. Par conséquent, lorsqu'une analyse d'eau indique un pH élevé, ce peut être un signe d'une teneur élevée en ions carbonate et bicarbonate. Tel est le cas des eaux de la nappe superficielle et des eaux du canal évacuateur. Les eaux sont soumises à une teneur en Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et pH élevées, résultant de la précipitation de CaCO_3 et du MgCO_3 .

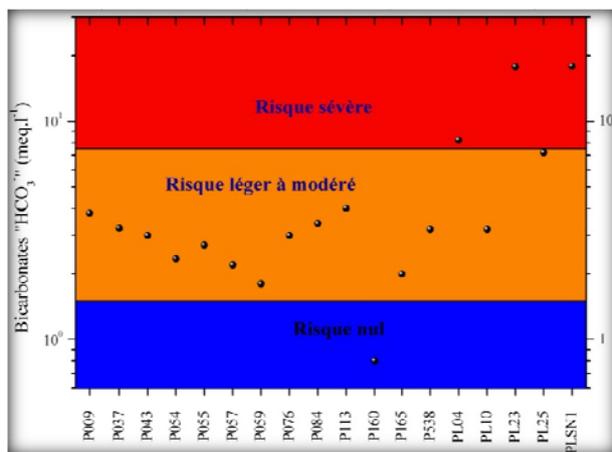


Fig. V-15 : Risques des bicarbonates (Février 2007)

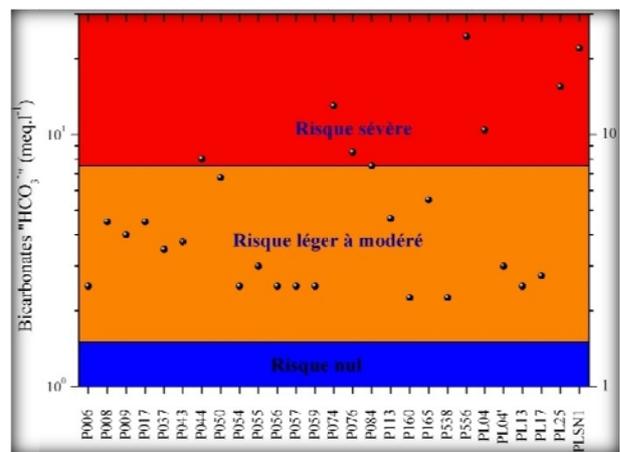


Fig. V-16 : Risques des bicarbonates (Juin 2007)

Ainsi la figure V-15 montre que la majorité des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla ont un risque de bicarbonates léger à modéré, sauf que le piézomètre P160 (situé dans sebkhet Oum Raneb) présente un risque nul, par contre les trois piézomètres PL04, PL23 et PLSN1 (des piézomètres situés dans la ville) montrent un risque sévère des bicarbonates.

La figure V-16 montre que le risque des bicarbonates a augmenté dans la période des basses eaux relativement à celle des hautes eaux.

2.5- Les risques des ions phytotoxiques

Les ions toxiques les plus communs dans les eaux d'égouts sont :

- Chlorure (Cl)
- Sodium (Na)

Le sodium et le chlorure sont habituellement absorbés par les racines. Lorsque l'absorption se fait par les feuilles le taux d'accumulation est plus grand. L'absorption directe se produit habituellement dans des systèmes d'irrigation par arrosage dans des conditions de faible humidité et de hautes températures. La convenance de concentration de ces anions dépend du type de récolte, de l'état de croissance, de la concentration en ions, du climat et de l'état des sols.

Les figures (V-17 et V-18) montrent que toutes les eaux souterraines et eaux usées du canal ont un risque sévère des chlorures vis-à-vis les plantes.

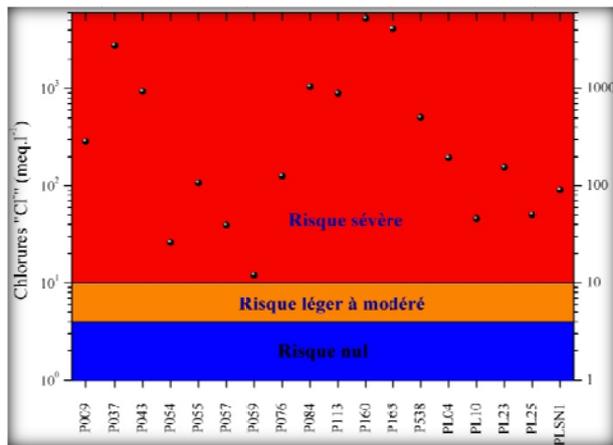


Fig. V-17 : Risques des chlorures
(Février 2007)

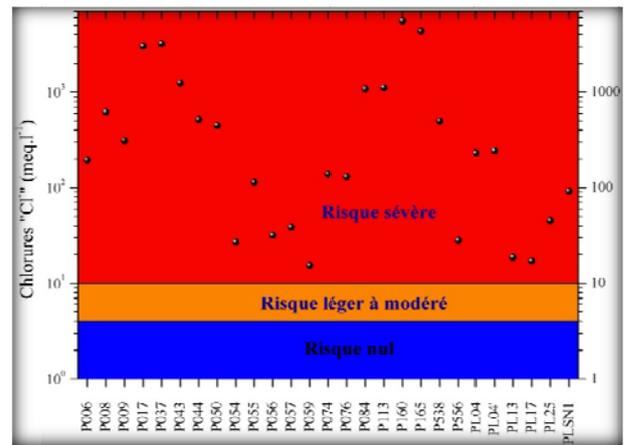


Fig. V-18 : Risques des chlorures
(Juin 2007)

Les teneurs élevées en sodium posent un problème crucial lorsque la vitesse d'infiltration est réduite. Dans ce cas, la perméabilité du sol est faible et l'eau d'irrigation atteint difficilement la plante. On note par ailleurs, une saturation du sol et la formation d'une croûte de grains avec un pH élevé, provoquant ainsi une possibilité accrue de présence de maladies, des herbes, d'érosion des sols, de manque d'oxygène et de disponibilité nutritive insatisfaisante.

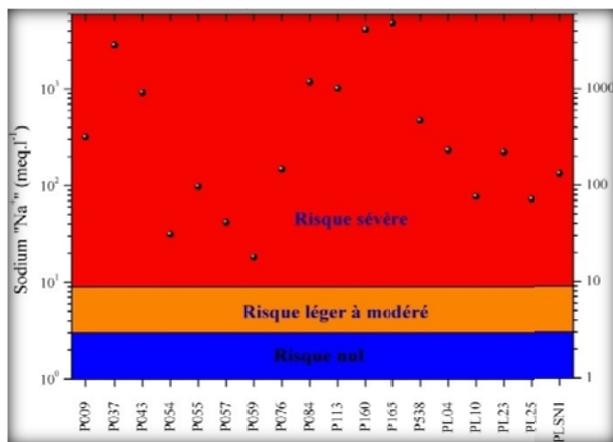


Fig. V-19 : Risques du Sodium
(Février 2007)

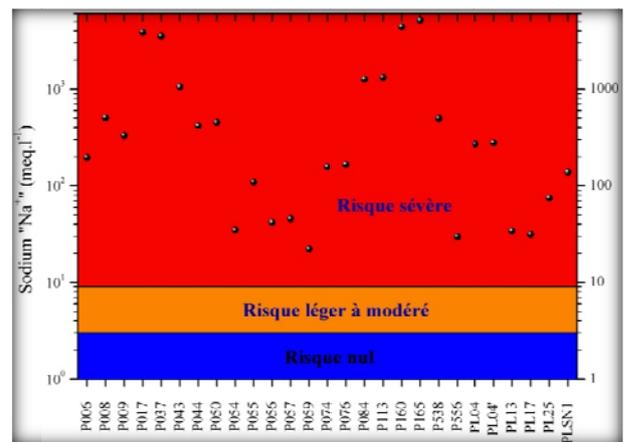


Fig. V-20 : Risques du Sodium
(Juin 2007)

Au niveau de la cuvette de Ouargla, les plantes et le sol sont très affectés par les eaux chargées en sodium (Fig. V-19 et V-20) et le graphique montre bien que le risque du sodium dépasse bien les 10 meq.l⁻¹ dans l'ensemble des points observés.

3. QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À L'INDUSTRIE (AEI)

Dans l'industrie et la construction, la corrosion et l'incrustation ont des conséquences économiques considérables, tant directement, par les coûts d'intervention et la consommation de produits métallurgiques qu'elles engendrent, qu'indirectement (arrêt des unités industrielles de production pour réparations, dégradation de la qualité des produits manufacturés en contact avec l'eau chargée de métaux dissous, etc.).

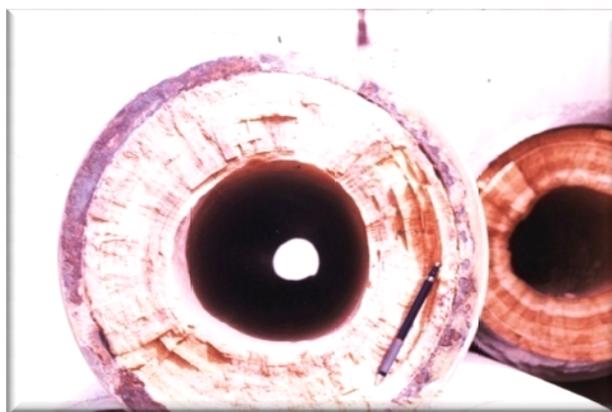
La qualité des eaux utilisée dans ce domaine se distingue par :

- leur agressivité vis-à-vis des calcaires, bétons et ciments,
- leur corrosivité vis-à-vis des métaux,
- leur caractère incrustant.

Dans les deux premiers cas, les ouvrages et équipements concernés sont endommagés et même détruits et l'eau acquiert turbidité et coloration. Dans le dernier cas, les canalisations sont rétrécies, parfois même obstruées et ne transitent plus les débits prévus.

Lorsqu'il s'agit d'eau de consommation humaine, la pollution de l'eau par les métaux mis en solution dans l'eau peut avoir des conséquences tantôt désagréables pour le consommateur (couleur ou saveur altérées), tantôt beaucoup plus graves (intoxications par certains métaux lourds comme le plomb et le cadmium, par exemple).

3.1- Indicateurs calco-carboniques :



Photos V-01 : Les canalisations sont rétrécies par entartrage

Le déséquilibre calco-carbonique dans une eau, peut être néfaste sur les conduites, les chaudières, ... pour définir l'aspect ou le caractère agressif ou entartrant de l'eau (*Photo V-1*) de la nappe de Ouargla, nous avons utilisé un logiciel de calcul appelé Equilibre (EQUIL1). Ce dernier s'appuie sur les données d'analyses demandées par le diagramme de Langelier, permet de définir certains indices calco-carbonique.

3.1.1- L'indice de Ryznar (*indice de stabilité*)

Cet indice est défini de la façon suivante : $I_R = 2pH_s - pH$.

où pH_s = pH théorique de saturation,
 pH = pH mesuré à 25°C

Il permet de définir la tendance agressive ou entartrante d'une eau aérée. Le tableau ci-contre donne la relation entre l'indice de stabilité et la tendance incrustante ou corrosive de l'eau.

Tableau V-04 : Relation entre l'indice de stabilité et la tendance de l'eau

I _R	Tendance
4 à 5	Entartrage important
5 à 6	Entartrage faible
6 à 7	Équilibre
7 à 7,5	Légère corrosivité
7,5 à 8,5	Corrosivité notable
> 8,5	Corrosivité importante

Les résultats sont regroupé en (fig.V-21) représentant l'indice de Ryznar, durant la période des hautes eaux, montre que seul le piézomètre P160 situé dans sebkhet Oum Raneb présente une agressivité notable, les piézomètres P054, P057, P059, P165 et PL10 présentent un équilibre calco-carbonique. Le reste des piézomètres présentent un entartrage entre faible et important.

La période des basses eaux (fig. V-22) présente une nette tendance aux eaux entartrantes et ne reste que le P054 et P059 à l'équilibre calco-carbonique.

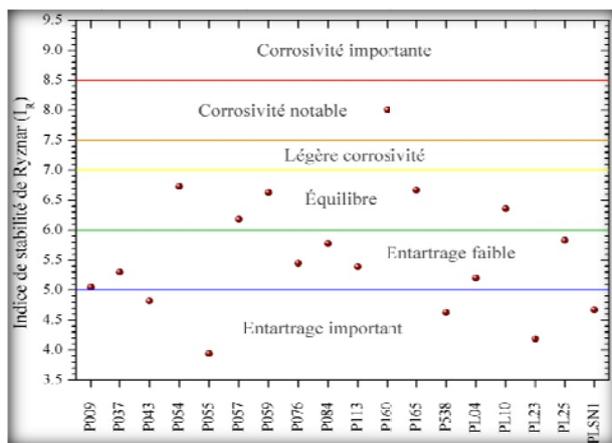


Fig. V-21 : L'indice de stabilité de Ryznar (Février 2007)

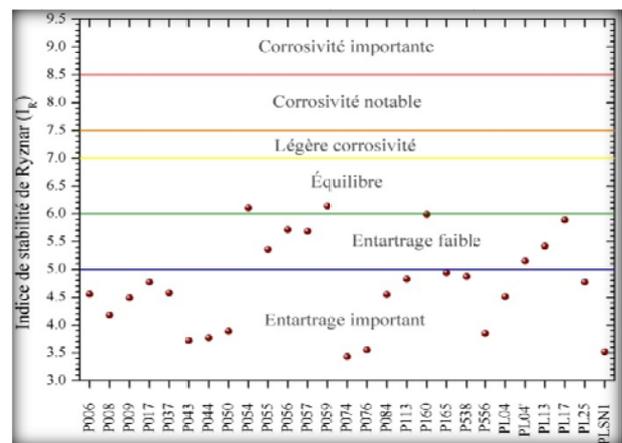


Fig. V-22 : L'indice de stabilité de Ryznar (Juin 2007)

3.1.2- L'indice de Langelier (indice de saturation)

Cet indice est défini de la façon suivante : $I_L = pH - pH_s$

Une eau agressive est caractérisée par un indice de Langelier négatif, ce qui signifie que le pH de l'eau mesuré est inférieur au pH_s de saturation : l'eau, sous saturée en CaCO₃, dissout le calcaire sous l'action du CO₂ agressif. S'il est positif, il y a formation d'une couche de carbonate de calcium qui protège les tuyauteries.

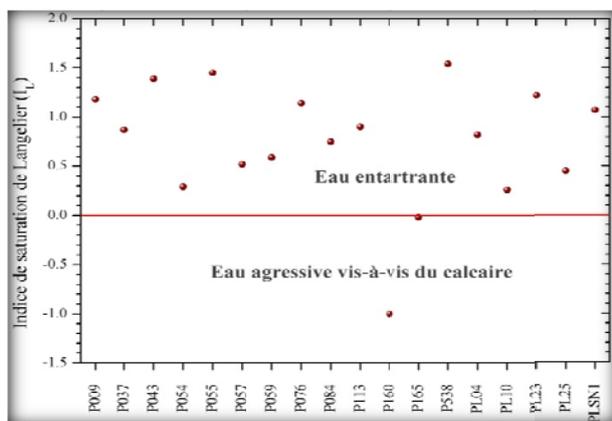


Fig.V-23 : L'indice de saturation de Langelier (Février 2007)

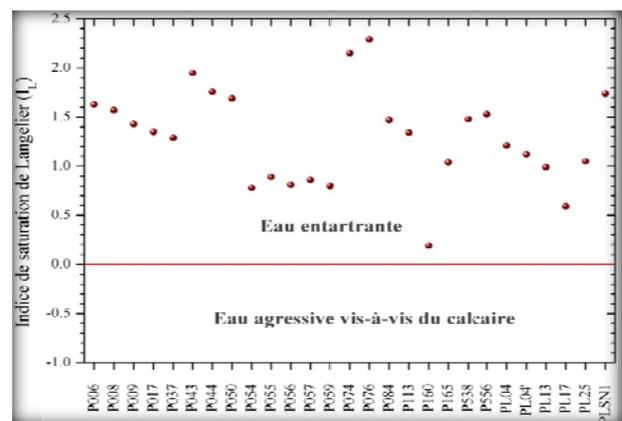


Fig.V-24 : L'indice de saturation de Langelier (Juin 2007)

L'eau des piézomètres de sebkhat Oum Raneb P160 et P165 sont agressives vis-à-vis du calcaire en période des hautes eaux (fig. V-23) par contre le reste des piézomètres sont entartrantes dans les deux périodes (fig. V-24).

3.1.3- Indication du CCPP (calcium carbonate precipitation potential)

La quantité de CaCO_3 qui peut être théoriquement précipitée (eau entartrante) ou dissoute (eaux agressives), dans ce dernier cas la valeur est négative.

Cette indication confirme la tendance entartrante des eaux de la nappe superficielle (fig. V-25 et V-26) déterminée par l'indice de Langelier.

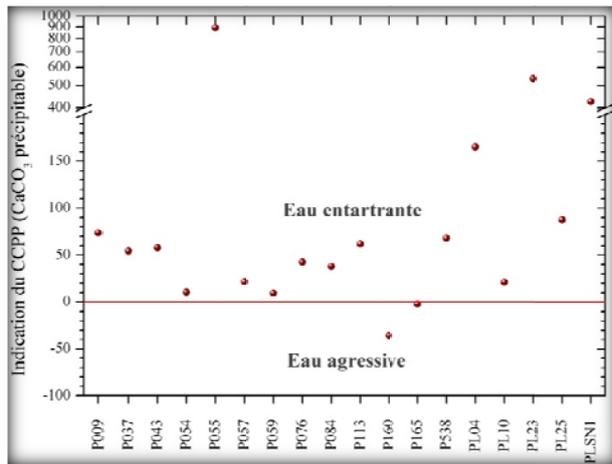


Fig. V-25 : Indication du CCPP (Février 2007)

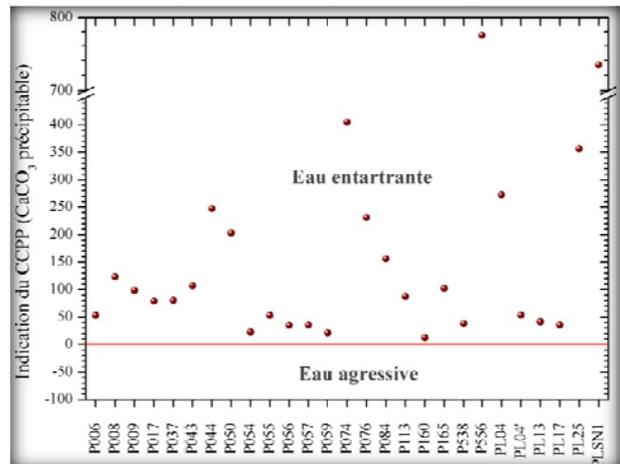


Fig. V-26 : Indication du CCPP (Juin 2007)

3.2- Indicateurs de corrosivité



Photos V-02 : Les canalisations sont détruits par corrosion

3.2.1- L'indice de Larson (indice de corrosivité)

Cet indice est défini de la façon suivante : $I_C = ([\text{Cl}^-] + 2 \times [\text{SO}_4^{2-}]) / [\text{HCO}_3^-]$

Les concentrations sont exprimées en mol/l.

Cette formule empirique est basée sur de nombreuses expérimentations effectuées par les américains Larson et Skold, qui ont estimé que cet indice ne devrait pas dépasser 0,2 ou 0,3. D'autres ont estimé que des valeurs allant jusqu'à l'unité étaient acceptables. Le tableau ci-dessous montre l'interprétation que l'on peut faire des valeurs de l'indice.

Tableau V-05 : Relation entre l'indice de corrosivité et la tendance de l'eau

I _c	Tendance
< 0,2	Pas de tendance à la corrosion
0,2 à 0,4	Faible tendance
0,4 à 0,5	Légère tendance
0,5 à 1	Tendance moyenne
>1	Nette tendance à la corrosion

Cet indice permet de déterminer la corrosivité d'une eau à partir des concentrations en ions chlorures, sulfates et bicarbonates. Mais il ne tient pas compte des ions calcium et magnésium qui ralentissent le phénomène de corrosion.

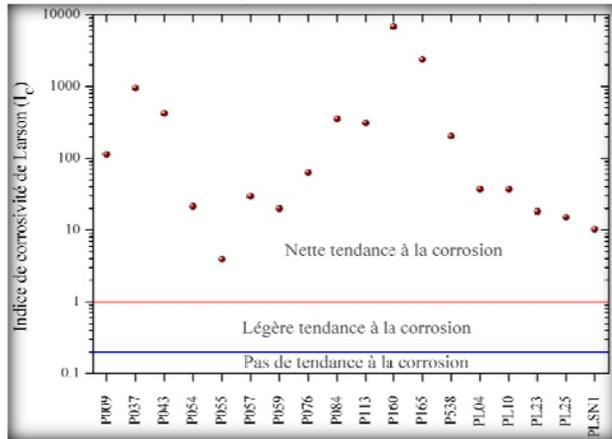


Fig. V-27 : L'indice de corrosivité de Larson (Février 2007)

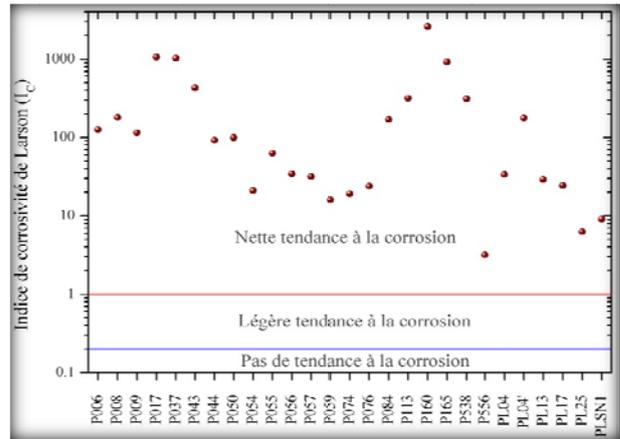


Fig. V-28 : L'indice de corrosivité de Larson (Juin 2007)

Cet indice (fig. V-27 et V-28) montre que les eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla montre une nette tendance à la corrosion vis-à-vis des métaux, quelque soit l'endroit et la période.

3.2.2- L'indice de Leroy (indice de corrosivité)

L'indice de Leroy est égal au rapport du TAC sur le TH. Il permet de confirmer ou non la tendance à la corrosion d'une eau. Avec des concentrations exprimées en meq/l, l'eau est considérée comme non corrosive si l'indice est compris entre 0,7 et 1,3.

Il est à utiliser en complément de l'indice de Larson. Ils permettent, à eux deux, de préciser les tendances d'une eau.

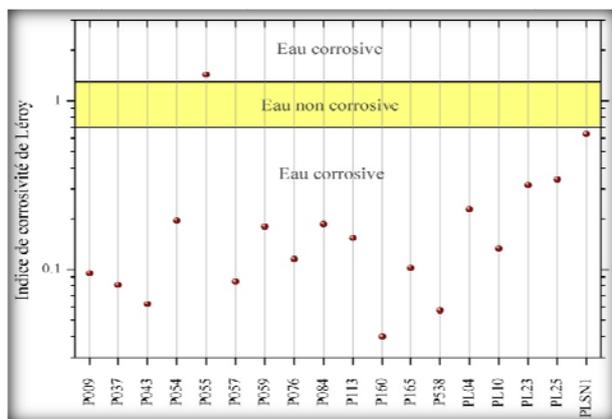


Fig. V-29 : L'indice de corrosivité de Leroy (Février 2007)

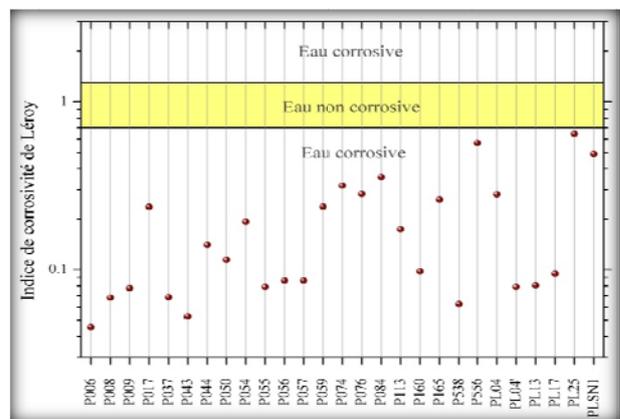


Fig. V-30 : L'indice de corrosivité de Leroy (Juin 2007)

Cet indice (fig. V-29 et V-30) confirme et précise que les eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla montre une nette tendance à la corrosion vis-à-vis des métaux, quelque soit l'endroit et la période.

3.3- Répartition spatiale de la tendance agressive ou entartrante des eaux

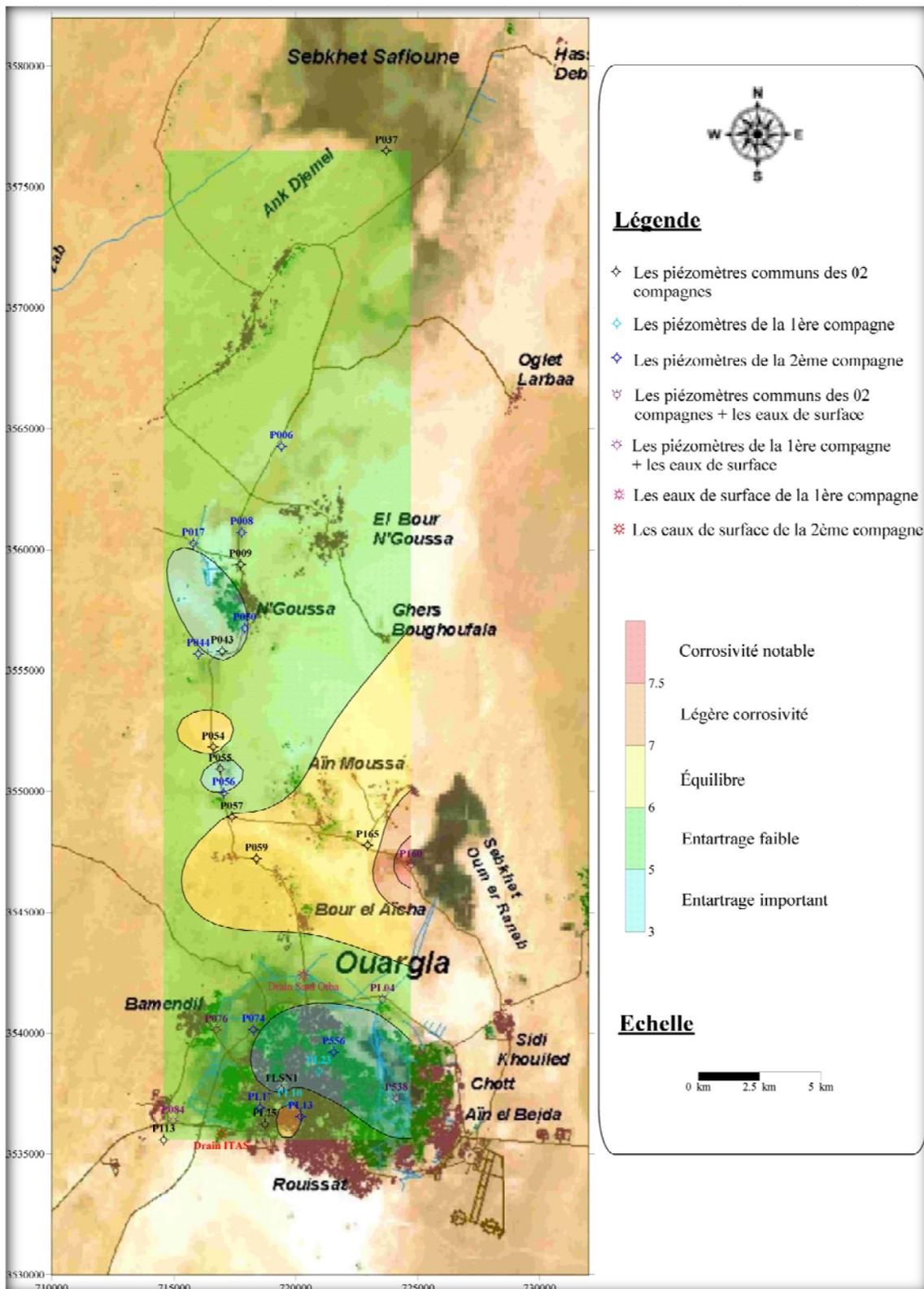


Fig. V-31 : Carte de la tendance agressive ou entartrante des eaux de la cuvette de Ouargla (Février 2007)

La répartition spatiale de la tendance agressive ou entartrante des eaux de la cuvette (*Fig. V-31*) de Ouargla montre deux zones d'entartrage important caractérisant la ville de Ouargla et le village de Ngoussa par l'utilisation des eaux d'AEP de la nappe sénonienne carbonatée, ainsi que la richesse du sol en débris de béton.

La dépression de sebkhat Oum Raneb est caractérisée par une corrosivité notable vue son état découvert caractérisée par une évaporation intense et une conductivité très élevée montrant des concentrations en chlorures (Cl^-) et en sulfates (SO_4^{--}) très élevées. Par contre les concentrations en bicarbonates (HCO_3^-) sont très faibles.

4. CONCLUSION

Les eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla montrent qu'elles sont non potable pour la consommation humaine avec un risque sévère pour le sol et les plantes. Les indices calco-carboniques montrent que ces eaux sont entartrantes (risques de bouchage de canalisation). Les indices de corrosivité montrent une nette tendance à la corrosion vis-à-vis les métaux (destruction des équipements hydrauliques). On conclue alors, que quelques soit la destination prévue des eaux de la nappe superficielle de Ouargla, les eaux demandent à être traitée (station de traitement) avant usage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail a été effectué sur deux périodes d'observation (Février et Juin 2007) en complément avec une période précédente (Slimani 2005).

Plus d'une centaine d'échantillon a été réalisée sur des sites expérimentaux portant sur des points de rejet et des piézomètres, dans une cuvette à sable gypseux, et à une topographie plane, sous climat hyperaride.

Le suivi des paramètres physico-chimiques et organiques a permis de détecter une évolution temporaire par une augmentation des concentrations de tous les éléments (chimiques et organiques), du mois de Février au mois de juin toujours sous l'effet de la température par évaporation des eaux de surface et souterraines.

L'évolution spatio-temporelle montre une concentration minérale et nutritives élevée (pollution), cela est due essentiellement à l'évaporation intense et la pollution (agricole et domestique), et à la biodégradation de la matière organique.

Les eaux de la cuvette de Ouargla présentent une pollution minérale très marquée surtout au niveau des chotts et sebkhas, due à l'influence de plusieurs facteurs :

Influence climatique par l'effet de la température donc une évaporation intense engendrant une forte minéralisation.

Influence des eaux de surface sur les eaux souterraines : généralement les eaux de surface ont des concentrations supérieures à celle des eaux souterraine, cela influe directement sur la qualité des eaux souterraines par infiltration ainsi que sur le sol par des précipitations salifères.

Influence de la profondeur : ce facteur es lié à plusieurs paramètres surtout lithologique, si le sol est riche en lentilles salifères (P160), ainsi que l'influence de la température se diminue en fonction de la profondeur (P059 = 10m).

Influence lithologique : la lithologie joue un grand rôle dans la minéralisation des eaux par la dissolution et précipitation des sels minéraux.

Les eaux de la cuvette de Ouargla présentent une pollution organique plus ou moins considérable surtout au niveau des drains collecteurs riches aux eaux de rejet, cela est dû à l'influence de plusieurs facteurs :

Influence climatique par l'effet de la température donc une évaporation intense engendrant une forte concentration des nutriments.

Influence des eaux de surface sur les eaux souterraines : généralement les eaux de surface ont des concentrations à celle des eaux souterraine, cela influe directement sur la qualité des eaux souterraine par infiltration.

Influence de la profondeur : ce facteur est lié à plusieurs paramètres surtout lithologique, si le sol est riche en lentilles salifères (P160), ainsi que la température n'atteignant plus les grandes profondeurs (P059).

L'indice de biodégradabilité variant entre 2 et 3. Cette situation indique que les eaux des rejets sont des effluents domestiques biodégradables avec des souches sélectionnées, nécessitant une épuration combinée (biologique et physico-chimique)

La gestion qualitative des eaux de la région impose un traitement préalable avant leur usage.

La qualité des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla montre des eaux non potable pour la consommation humaine avec un risque sévère pour le sol et les plantes. Les indices calco-carboniques montrent que ces eaux sont entartrantes (risques de bouchage de canalisation). Les indices de corrosivité montrent une nette tendance à la corrosion vis-à-vis les métaux (destruction des équipements hydrauliques).

***Références
bibliographiques***

Bibliographie

- [1]- ALIEV M., (1972). Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz au Sahara algérien. (Tome 1) SONATRACH -Alger, 275p.
- [2]- ALLOUL B., (1981). Etude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux de l'Algérie en vue de leur valorisation routière.
- [3]- ANAT, (2003). Etude de modernisation de l'agglomération de Ouargla * Projet de création d'un nouveau pôle de centralité urbaine, 28p.
- [4]- BARBAUGER A. (2001). L'Oasis et le pays d'Ouargla Ann. Géo 1900p, 141 -158 pp.
- [5]- BATAILLON C., (1955). Le Souf. 7ns/. Rech. Sahar., mémoire n° 2, Alger, 140 p.
- [6]- BEL F. et DEMARGNE F. (1961). Etude géologique du Continental terminal. Dossier de la Direction de l'énergie et des Carburants (Ministère de l'Industrie et de l'Energie). Alger, 22p, 24 pi.
- [7]- BIDAUX P. & al, (1987). Reconnaissance de certains caractères chimiques des eaux souterraines des séries carbonatées karstiques dévono-carbonifères de Chine méridionale, Revue des sciences de l'eau, 253-276 pp.
- [8]- BLUM A. & al, (2002). Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport final, Rapport BRGM RP-51549-FR, 5 volumes, volume 1, 182 p.
- [9]- BONNARD & GARDEL (2001). Vallée d'Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission IA Reconnaissances et diagnostic de l'assainissement, 156p.
- [10]- BONNARD & GARDEL, (2004). La Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. « Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau ». Mission II, Rapport final, 110 p.
- [11]- BOULAIN J. (1980). Pédologie appliquées - Masson; Paris, 25-42 pp.
- [12]- BRL ingénierie (1999). Etude du plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, 52p.
- [13]- BRL. A.N.R.H. (1993) - Etude Pédologique des sols de la région de Ouargla. Rapport interne ANRH-Ouargla, 32 p.

- [14]- BRL-BNEDER (1999). Etude du plan directeur générale de développement des régions sahariennes. Lot 1. Etude de base. Phase II A3. Monographies spécialisées des ressources naturelles. Ressources en eau, Vol. 3. Modélisation du Complexe Terminal. 63p.
- [15]- CORNAZ P., (2004). Evaluation du statut trophique d'un canal de drainage sous l'impact des pollutions d'origines diffuses et ponctuelles : le cas du Grand Canal de la plaine du Rhône. Mémoire. Magister, UNIL, 152 p.
- [16]- CORNET A. (1961). Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté aux officiers du cours préparation aux affaires sahariennes. Service des Etudes Scientifiques. Birmandries, Alger, 108 p., fig., tabl. Croquis, cartes, diagrammes.
- [17]- GUENDOOUZ A. (1985) - Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-est septentrional (Algérie). Thèse 3^{ème} cycle - Paris, 243p.
- [18]- CORNET A. (1964). Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géographie Physique et Géologie Dynamique Vol.VI. fascl.,5-72 pp.
- [19]- DEBIECHE Taha-Hocine, (2002), Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle (Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien). Th. Doctorat, Univ. de Constantine, 191 p.
- [20]- DUBIEFJ (1959-1963) - Le climat du Sahara. Institut des recherches sahariennes. Mémoire hors série, tome 1 et 2.- ALGER, 275p.
- [21]- LABORDE J-P., (2003). Hydrologie de surface - Université de Nice - Sophia Antipolis, A. N. R. H. Alger, 27 p.
- [22]- DUBOST D. (2002). Écologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algériennes. Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides Biskra, 207-215 pp.
- [23]- DUTIL, P. (1971). Contribution à l'étude des sols et des paléosols sahariens. Thèse d'état de l'Université de Starsbourg, 345 p.
- [24]- EL AYACHI B., (1951). Une journée de réjouissance publique à Ouargla 1951 Mission Sahara n° 5 –Ouargla et sa population, 12-25 pp.
- [25]- ENAGEO (1989) - Rapport interne d'étude géophysique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla Novembre 1989- Ouargla, 32 p.
- [26]- ERIC G. et al. (2004). Hydrogéologie Objet, méthodes, application. Edition Dunod, Paris, 24-25 pp.

- [27]- FRANQUIN J., (1996). Les Traitements des eaux dans l'industrie pétrolière. Editions TECHNIP, pp. 31-58.
- [28]- GALVEZ-CLOUTIER R. & al, (2002). La détérioration des plans d'eau : Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophisation. Vecteur environnement, volume 35, Numéro 6, 18-37 pp.
- [29]- GUENDOOUZ A. et MOULA. A.S (1992-1995) - Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla 1er rapport interne 1992 et 2ème rapport interne 1995 CDTN/DDHL- ALGER, 30p-60p.
- [30]- HADJ-ABDERRAHMANE (1998). Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Rapport interne ANRH, Ouargla, 65p.
- [31]- HAMDI-AÏSSA Belhadj. & Girard M.C., (2000). Apport des données satellitales pour l'évaluation de l'impact sur l'environnement du risque salinisation dans l'écosystème désertique (cuvette de Ouargla, Algérie), 06 p.
- [32]- HAMDI-AÏSSA Belhadj (2000). Evaluation de l'état de surface de la cuvette d'Ouargla par les images satellites. Revue SECHERESSE, 12 p.
- [33]- HAMDI-AÏSSA, Belhadj. (2001). Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord-Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 283p.
- [34]- IDDER Tahar (1998). La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et technique de remédiations proposées. L'exemple d'Ouargla. Thèse Doct., Université d'Angers, 284p.
- [35]- KLEPPER S., (1999). La pollution par les phosphates. Cours MSE, 44 p.
- [36]- LECLERCQ L., (2001). L'aridité Intérêt et limites des méthodes d'estimation de la qualité de l'eau. Station scientifique des Hautes-Fagnes, Belgique, Document de travail, 44 p.
- [37]- LTPS (juin 2003) - Rapport d'étude géotechnique interne (L'assainissement des eaux résiduaires, Pluviales et d'irrigation). Vallée d'Ouargla, 11p.
- [38]- MIQUEL M., (2003). La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 195 p.
- [39]- NAMOUR P., (1999). Autoépuration des rejets organiques domestiques nature de la matière organique résiduaire et son effet en rivière. Th. Doctorat, Univ. Claude Bernard – LYON1, 160 p.
- [40]- NESSON CL., SARI Dj. et PEILLON P. (1978). Recherches sur l'Algérie - Mémoires et

Documents Publié sous la direction de Jean DRESCH- CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, Paris, 14-32 pp.

- [41]- NOEMI d'Ozouville, (2002). Contributions à l'étude hydro-géochimique du bassin versant de Kaluvelly, Sud-Est de l'Inde. DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 52 p.
- [42]- OMS. (1994). Directives de qualité de l'eau de boisson. Critères d'hygiène et documentation à l'appui, Genève, 2ème édition, Volume 2, 272-279 pp.
- [43]- RODIER J. (1984). L'analyse de l'eau, 7^{ème} édition, 1353p.
- [44]- ROUVILLOIS-BRIGOL M. (1975). Le pays de Ouargla (Sahara Algérien) variation et organisation. Pub. Univ. Sorbonne, Paris, 361p.
- [45]- SANEJOUAND R. (1972). La cartographie géotechnique en France - Ministère de l'Équipement et du Logement, Direction de l'Aménagement Foncier et de l'Urbanisme, L.C.P.C. 20-28 pp.
- [46]- SCHOELLER H., (1959). Hydrologie des régions arides progrès récents. Unesco, pp. 53-83.
- [47]- SLIMANI R., (2006). Contribution à l'évaluation d'indicateurs de pollution environnementaux dans la région de Ouargla : Cas des eaux de rejets (agricoles et urbaines). Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 95 p.
- [48]- TOUAFRI L. & al, (2002). L'impact de la pollution des effluents d'oued Boutane de Khemis-Meliana. Optimisation d'un procédé d'épuration. Université de Khemis-Meliana, 09 p.
- [49]- TOUIL Youcef (2003). Etude des possibilités de la réutilisation des eaux de drainage dans la cuvette d'Ouargla. Mém. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique Arbaoui Abdellah, Alger, 102p.
- [50]- UNESCO. (1972). Projet ERESS. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris. 100 p.
- [51]- ZEMMOURI M. et BESBES M. (1994). Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Rapport interne ANRH—Ouargla, 26 p.

Article

Alteration of the Aquifer Water in Hyperarid Climate, by Wastewater: Cases of Groundwater from Ouargla (Northern Sahara, Algeria)

¹Djidel Mohamed, ²Bousnoubra-Kherici Houria, ²Kherici Nacer and ¹Nezli Imed-Eddine

¹Department of Hydrocarbon and Geology, ITE, P.O. Box 511,
University Kasdi Merbah, Ouargla

²Faculty of Science, Laboratory of Geology, University Badji Moukhtar,
Annaba, P.O. Box 12 El Hadjar 23200 Annaba, Algeria

Abstract: The present study is registered, on the area of Ouargla (the Sahara septentrional, Algeria) reports of the aquifer contamination by the anarchistic urban rejections. By its geomorphology (basin), its hyperarid climate and the presence of chotts, the area is subjected to an important degree of vulnerability, encouraged by the discharges of wastewater (domestic and irrigation). These factors expose aquifer's water to a severe pollution. In order to evaluate this pollution, a regular monitoring of the quality of aquifer's water and the collecting canal's water, was conducted over seven months (January- July 2005). The statistical processing, the space-time chart and the calculation of pollution index of physicochemical, organic and bacteriological analyses data, made it possible to identify the behavior of these parameters according to the temperature, evaporation and salinity. The complementarity of the results shows that aquifer's water is exposed to a permanent danger, degrading the environment. The situation imposes possible solutions, by optimization of a wastewater treatment process meets the standards required, based on a combined treatment (biological and physicochemical).

Key words: Urban effluents, pollution index, biodegradation, eutrophication, self-purification

INTRODUCTION

The pollution affects as well the industrialized countries as those in the process of development. The problem is particularly serious for the countries whose climate is arid. Because of a pronounced hydrous deficit, the concentration of the pollutants in water remains high whereas their capacity of recycling is very low.

In the case of the basin of Ouargla, the pollution generated by the discharge of wastewater has reached an alarming level due to the diversity of pollutants and the large quantity of wastewater ($40906 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ for the year 2005)^[1]. The surface aquifer, is exploited by wells for agricultural and domestic purposes, crossed by a collecting in the open air canal, pollution deteriorates quality and limit its uses.

Thus we make state of the contamination of the surface aquifer water by the anarchistic urban rejections. The main factor influence this situation is topography: The total height is 9 m only, between the highest point (Ksar) and the lowest (chott), for a site which extends in its broad dimensions from, 5 km from

East to West and 8 km from North to South This natural constraint obliged that the realization of the collectors, which flow by gravity, must have the slope and thus progress in-depth. Two figures summarize the extent of the anomalies on the main network: 15% of flowing sections against slope and 55% have a slope lower than 5%^[3]. The direct infiltration without any water treatment, highly mineralized (urban and agricultural); from the deep aquifers, Complex Terminal (CT) and Continental Intercalary (CI), through sandy clay gypseous of Quaternary on the surface, gain the surface aquifer of the Basin and therefore, a rebound of his piezometric level in a region, where the topography is flat with no outlet (endoreic basin).

The determination of Organic Pollution Index (OPI), Eutrophication Index (EI) and Microbiological Quality Index (MQI) with the physicochemical study of waters coupled with the distribution of organic parameters in the wastewater collector and aquifer's water, can draw some conclusions as to the biodegradation of organic matter and power self-purification of the water.

Corresponding Author: Djidel Mohamed, Department of Hydrocarbon and Geology, ITE, University Kasdi Merbah, P.O. Box 511, Ouargla Tel: +213-775.902123 Fax: +213-29763636

MATERIALS AND METHODS

The area of Ouargla is situated north-east of the Great Algerian Sahara, it is distant 850 km from the capital Algiers. It is limited to the north by Djelfa and El-Oued departments, to the south by Illizi and Tamanrasset departments, to the west by Ghardaia department and east by Tunisia. The Basin of Ouargla corresponding to a great depression (a big Oasis of the Algerian Sahara), which covers an area of about 750 km² (Fig. 1). Its natural limits are defined males: it is limited to the west by a calcareous plate, to the east by a plate whose boundaries are not clear; to the south by a massive dune covers the ruins of Sedrata and the North by Zabret Bouaroua.

The appearance climate of the region is desert or hyperarid: precipitations are low and erratic, ranging from 0.01 and 17.2 mm by exceptional year^[2]. Temperatures vary greatly between night and day. The average annual temperature ranges from 06°C (January) and 43°C (July). The evapotranspiration, also varies between 380 (July) and 112 mm (January).

From hydrogeological a surface aquifer is located at depths ranging from 1-3 m in urban areas and 0.5-0.9 m in agricultural areas, it surfaced in the Chotts and may reach 15 m deep in the border areas (sandstone relief).

The lithology of the aquifer consists of fine to medium sand clay, rarely coarse south of Ouargla and more to the North (N'goussa) sands are rich in gypsum (Fig. 2), which becomes dominant Sebkheth Safioune^[10].

- Zone A: It is the most spread class, it represents approximately of 75% of the soils
- Zone B: It characterizes the chotts and the sebkhas
- Zone C: It characterizes the slopes of the basin and the Mio-Pliocene plate

At the basin of Ouargla the surface aquifer is not exploited because of the rate of salt contained in its waters. It is thick from 1 to 8 m and is based on a tight impermeable level, which occupies the bottom of the valley of Ouargla and isolates it from the underlying aquifers. The aquifer is recharged by:

- Wastewater discharges of domestic origin
- Excess water tied to a palm irrigation irrational
- Runoff from the upper sections and the input of the three Wadis flooding in the bassin (N'sa, M'zab and M'ya)

The harmful effects of the rising water in the basin are mitigated by the existence of the drainage systems

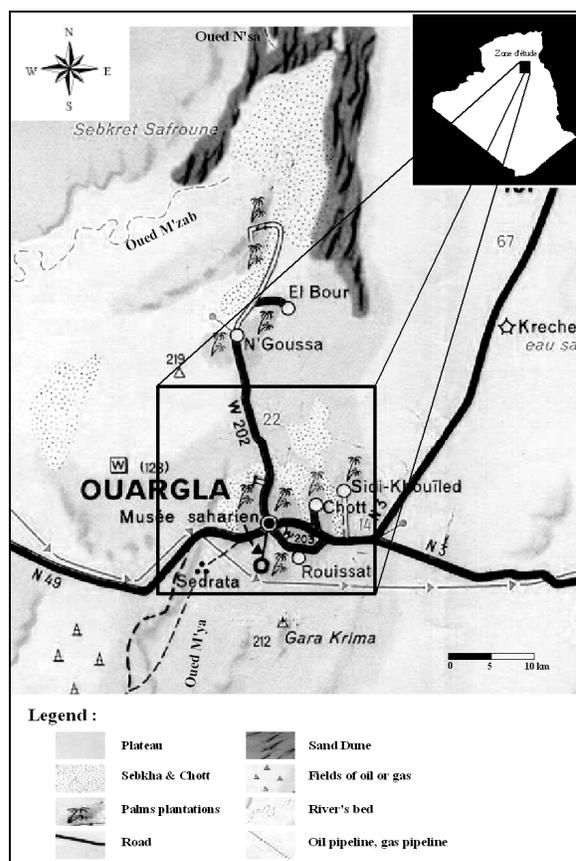


Fig. 1: Localization of the study area

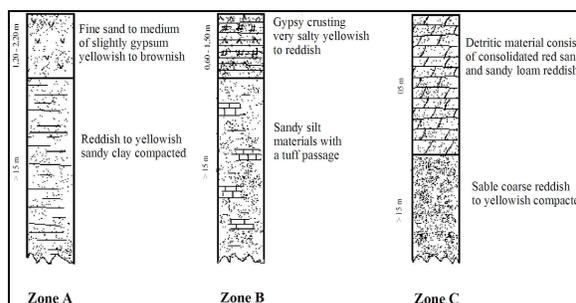


Fig. 2: Lithological log of the surface aquifer

(canals), including those of palm (total length 80 km) and the crossing of Sebkhya Bamendil and the entire northern part of Ouargla (10.5 km). All these effluent water is pumped evacuated to the Sebkhya Oum-Raneb (Fig. 3) located 8 km north of the town of Ouargla.

The total flow of wastewater is 29900 m³ day⁻¹ for the year 2005, with 61% network and 39% individual assainissement, 12900 m³ day⁻¹ deversed in the aquifer and 17000 m³ day⁻¹ in the surface (drains and chotts)^[3].

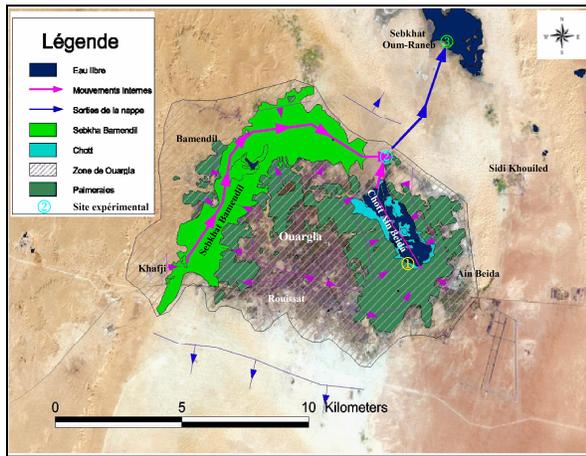


Fig. 3: The water flow in the basin of Ouargla (source: BG, 2004)

In order to monitor the behavior of pollution in the aquifer and the canal, we used physico-chemical and bacteriological data (Slimani, 2006)^[11] complemented by measures of organic parameters in the piezometers (aquifer) and of upstream downstream in the discharge stations (canal).

The analyses are carried out according to standard AFNOR^[11]. Eight sampling campaigns were made between January and July (2005) with a time interval of 25-30 days, three piezometers (PZ1, PZ2 and PZ3) installed respectively near each rejection point (R1, R2 and R3).

The methods developed in the interpretation of data are based on a statistical treatment using the application of software Aquexmono.xls^[7], resulting in the calculation of Organic Pollution Index (OPI), Eutrophication Index (EI), Microbiological Quality Index (MQI) and Biodegradability Index (BI).

The principle of the OPI is to spread the values of polluting elements in 5 classes (Table 1) and then determine, from its own measures, the number of corresponding class for each parameter and then to make the average^[07].

The Evaluation of eutrophication: There's no reliable index to evaluate the level of eutrophication from chemistry. Experiments with artificial pollution have shown that nitrates alone do not entail a significant increase in crop production while a low intake of phosphates enough to trigger the proliferation plant. It is well known that the phosphorus is the limiting factor. As it is very expensive to eliminate sewage, the problem of eutrophication persists for a long time (LECLERCQ L, 2001)^[7].

Table 1: Classes of organic pollution

Parameters classes	DBO5 (mg-O ₂ L ⁻¹)	Ammonium (mg-N L ⁻¹)	Nitrites (µg-N L ⁻¹)	Phosphates (µg-P L ⁻¹)
5	<02	<0.1	<05	<15
4	2.1-05	0.1-0.9	06-10	16-75
3	5.1-10	1.0-2.4	11-50	76-250
2	10.1-15	2.5-6.0	51-150	251-900
1	>15	>6	>150	>900

OPI = average number of classes of 4 parameters (at best):

- 5.0-4.6: Null organic pollution
- 4.5-4.0: Low organic pollution
- 3.9-3.0: Moderate organic pollution
- 2.9-2.0: High organic pollution
- 1.9-1.0: Very high organic pollution

Table 2: Classes of bacteriological pollution

Class No.	Bact. tot. (mL ⁻¹)	Colif. f. (mL ⁻¹)	Strepto. f. (mL ⁻¹)
5	<2000	<100	<05
4	2000-9000	100-500	05-10
3	9000-45000	500-2500	10-50
2	45000-360000	2500-20000	50-500
1	>360000	>20000	>500

The average number of MQI classes is like calculating the OPI by the following interpretation:

- 4.3-5.0: Null Fecal contamination
- 3.5-4.2: Low Fecal contamination
- 2.7-3.4: Moderate Fecal contamination
- 1.9-2.6: High Fecal contamination
- 1.0-1.8: Very high Fecal contamination

Calculation of microbiological quality (MQI): The limits of the classes (Table 2) were established by BOVESSE and DEPELCHIN, 1980^[7].

RESULTS AND DISCUSSION

Chemical facies: The representation of physicochemical data on the Piper diagram (Fig. 4) shows a chemical facies which still depends on the geological nature of the aquifer (responsible geochemical)^[11] and agricultural and industrial activities (anthropic).

Generally Piper diagram shows a single chemical facies, whatever the effluent water or underground water, is Cl-Na but the points are closer to sulphated limit, for a facies Cl-SO₄-Na. The circles of mineralization (D = TDS*0.2) show that water of the aquifer is more mineral-bearing than that of water of rejections.

The biodegradability index (BI): The indices indicate the biodegradability classes' auto-purification biodegradability describing environments rich or poor in organic matter.

The space-time variation of the report DCO/DBO5 showed a biodegradability index between 2 and 3. This situation (Fig. 5) indicates that the wastewaters

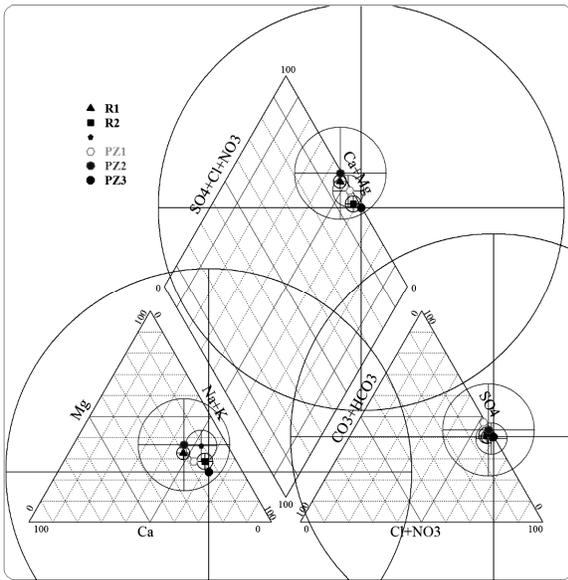


Fig. 4: The chemical facies representation in Piper diagram for discharges points and piezometers

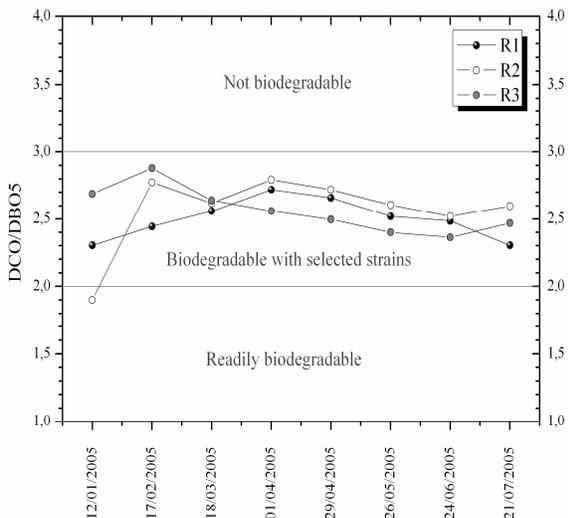


Fig. 5: Variation of biodegradability index at discharges points according to time (year 2005)

effluents are biodegradable domestic effluents with selected strains, requiring a combined treatment (biological and physicochemical)^[12].

The Organic Pollution Index (OPI): The index values of organic pollution indicate the space-time variation of the pollution classes by decomposition or auto-purification water. Figure 6 shows families relating to the wastewater indices ranged from 1.66-1, showing a

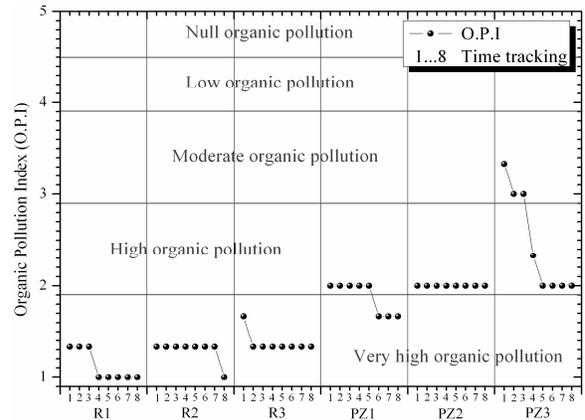


Fig. 6: Variation of the organic pollution index for discharge points and piezometers according to time (year 2005)

single class of organic pollution very high, with spatial evolution reflecting low auto-purification progressive going downstream (Sebkhet Oum-Raneb), against their developments show a low temporal degradation in the warmer months.

Groundwater has indices ranging from 1.66-3.33, showed three classes of organic pollution (very high, high and moderate). The spatial evolution reflects a net auto-purification progressive ranging from upstream (PZ1), the nearest point of surface pollution, towards downstream (PZ3). The self-purification is more important while going about the warmer months. This is explained by the phenomenon of evaporation - concentration.

Thus very high pollution characterizes the upstream part like zone of contribution (City and palm plantations) and the pollution moderated by self-purification^[9] characterizes the downstream part like zone of rejection (Sebkhet Oum-Raneb). This pollution increases in estival period (intense evaporation "concentration") in a plane relief.

The Eutrophication Index (EI) and behavior of mineral nutrients:

The nitrogen and phosphorus are also parameters indicative of eutrophication. The fragility of the environment study was taken into account by tracking mineral nutrients in the water and the canal (NO_3 , NH_4 and PO_4)^[4].

Nitrates-ammonium: The space-time variation of nitrates and ammonium in waste and underground water (Fig. 7) shows a high content nitrates ($40\text{-}130 \text{ mg L}^{-1}$) in water of the channel, on the other hand a fall in groundwater ($60\text{-}10 \text{ mg L}^{-1}$). The spatial evolution

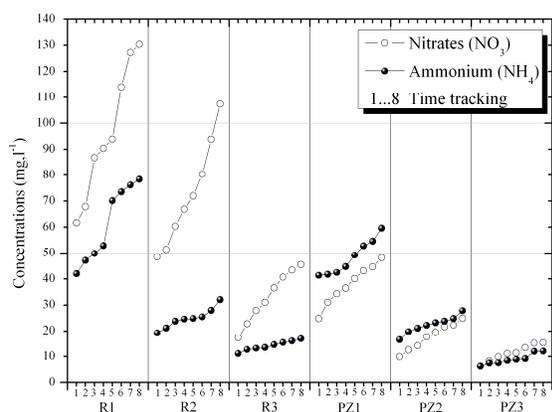


Fig. 7: Variation of NO_3 and NH_4 for discharge points and piezometers according to time (year 2005)

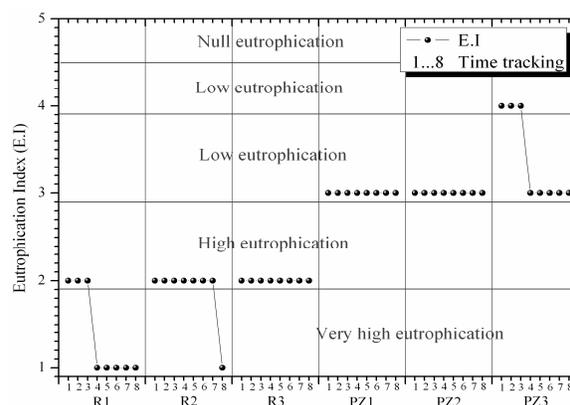


Fig. 9: Variation of the eutrophication index for discharge points and piezometers according to time (year 2005)

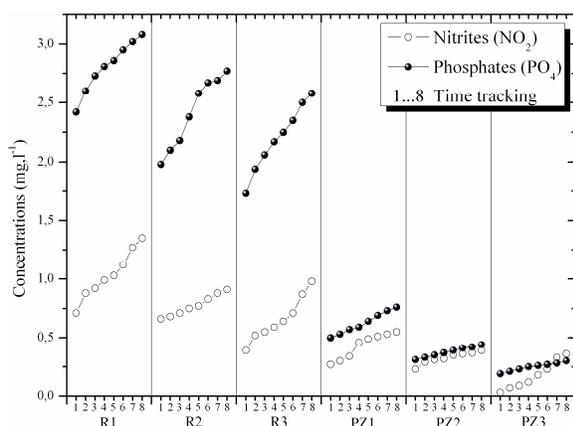


Fig. 8: Variation of the NO_2 and PO_4 for discharge points and piezometers according to time (year 2005)

shows a decrease downstream, against the temporal evolution is increasing in estival period, this is explained by the phenomenon combined nitrification (fertilizer) by the waters feeding the canal and denitrification in the reductive water (low oxygen). On the same figure (Fig. 7), the reverse in the ammonium. The presence of ammonium fertilizer used comes in irrigated (upstream) and a contamination by organic matter at the level of human rejection zones (open channel). This nitrogenized form becomes dominant as nitrates in groundwater (PZ1 and PZ2).

Nitrites-phosphates: The space-time evolution of nitrites and phosphates in water of the channel and underground (Fig. 8) shows a high content of phosphates ($2.6\text{-}3.1 \text{ mg L}^{-1}$) in wastewater, on the other hand a fall in ground waters ($0.7\text{-}0.3 \text{ mg L}^{-1}$).

The spatial evolution shows a decrease towards the downstream, against the temporal evolution grow during the summer, but with a slight increase in groundwater than reject water. This is due to the fertilizer and discharges from domestic waters feeding the canal, as well as the precipitation of phosphatic minerals (Apatite) by its low solubility^[5] in reducing water highly mineralized (ground water).

The spatial evolution of nitrites shows a decrease downstream, against the temporal evolution is increasing in estival period, this is explained by the phenomenon combined nitrification-denitrification.

The Eutrophication Index (EI): The index values indicate the space-time variations of the eutrophication classes by a wealth or poverty of nutrients.

The wastewater is classed between 1 and 2 (Fig. 9) indicating a high to very high degree of eutrophication. The spatial evolution shows very slight decrease nutrients (NO_3 and PO_4) by going downstream (Sebkhet Oum-Raneb) and their temporal trends show an enrichment in terms of nutrients in the summer months especially upstream and remains constant downstream.

Groundwater eutrophication shows a moderate to low, with an EI from 3-4 (Fig. 9). The spatial evolution shows a consistency of nutrients for a moderate level except that in the downstream (Sebkhet Oum-Raneb) a slight decrease during the winter reflecting the low level of eutrophication.

The Microbiological Quality Index (MQI): The enumeration of fecal coliforms and fecal streptococci is an indicator of fecal contamination. The MQI ranged from 1.33 (R1) to 2.33 (R3) and 3.67 (PZ1) to 5 (PZ3) (Fig. 10).

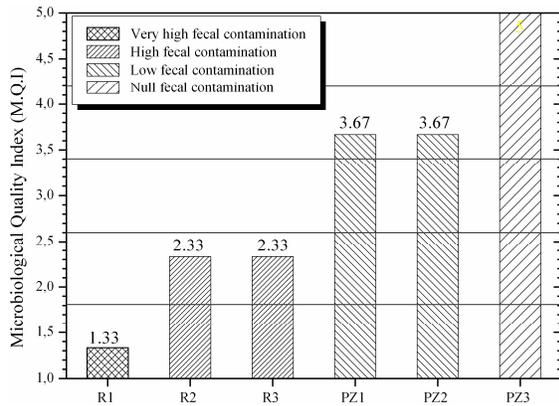


Fig. 10: Variation of the microbiological quality index for discharge points and piezometers

Wastewaters are indications of microbiological quality showing a very high fecal contamination in the discharge point R1 (upstream) and a relatively lower fecal contamination (high) to R2 and R3. This decrease downstream explained by the distance of the source of contamination and the loss of organic matter by biodegradation^[8].

Groundwater showing signs of microbiological quality for piezometers PZ1 and PZ2 by low fecal contamination, this due to the enabling environment for this increased by the presence of organic matter and temperature. By contrast, PZ3 shows a zero fecal contamination, that due to sterility by the very high salinity (sebkha Oum-Raneb).

CONCLUSION

This work has seven months results (eight samples) out of three experimental sites of the upstream^① towards the downstream^③, each site relates to a discharge point and a piezometer, in a sand gypseous basin has a flat topography, under hyperarid climate.

The monitoring of the physicochemical and organic parameters made it possible to detect a temporal increase in the concentrations of all elements (chemical and organic), from January to July still under the effect of temperature by evaporation of surface and underground water.

The spatial evolution shows a decrease downstream nutrients and organic matter of anthropic (pollution), it is caused primarily by the distance from sources of pollution (agricultural and domestic) and the biodegradation organic matter.

The calculation of pollution index allowed to classify the wastewater in biodegradable domestic effluent with selected strains showing a very high

organic pollution and bacteriological by an anthropic contribution rich in organic matter and nutrients upstream. The eutrophication index ranks water of rejection in high eutrophication by a wealth of nutrients which promotes algal proliferation at surface water (chott and sebkha) reflecting an anoxia.

Groundwater shows high organic pollution, which results in an infiltration of pollutants through the unsaturated zone permeable and low thickness (in our case 0.2-1.2 m) of a lithology consists of fine to medium sandy clay rich in gypsum towards the sebkhas, reflecting the sensitive area vulnerable to pollution. The eutrophication index shows a moderate level, which can impact on surface water by the rising waters.

The high organic, bacteriological and eutrophic pollution in a sensitive area has adverse impacts on the environment and public health, which requires a combined treatment (biological and physicochemical).

REFERENCES

- Blum, A. *et al.*, 2002. Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport final, Rapport BRGM RP-51549-FR, 5 volumes. 1: 182.
- Bonnard and Gardel, 2001. Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. «Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique». Mission IA Reconnaissances et diagnostic de l'assainissement, pp: 156.
- Bonnard and Gardel, 2004. La Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau. Mission II, Rapp. final, pp: 110.
- Cornaz, P., 2004. Evaluation du statut trophique d'un canal de drainage sous l'impact des pollutions d'origines diffuses et ponctuelles: Le cas du Grand Canal de la plaine du Rhône. Mémoire. Magister, Unil, pp: 152.
- Galvez-Cloutier, R. *et al.*, 2002. La détérioration des plans d'eau: Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophisation. Vecteur environnement, 35 (6): 18-37.
- Klepper, S., 1999. La pollution par les phosphates. Cours MSE, pp: 44.

7. Leclercq, L., 2001. L'aridité Intérêt et limites des méthodes d'estimation de la qualité de l'eau. Station scientifique des Hautes-Fagnes, Belgique, Document de travail, pp: 44.
8. Miquel, M., 2003. La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, pp: 195.
9. Namour, P., 1999. Autoépuration des rejets organiques domestiques nature de la matière organique résiduaire et son effet en rivière. Th. Doctorat, Univ. Claude Bernard-Lyon1, pp: 160.
10. Nezli, I., 2004. Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued Mya (Ouargla). Mémoire. Magister, University Badji Mokhtar, Annaba, pp: 152.
11. Slimani, R., 2006. Contribution à l'évaluation d'indicateurs de pollution environnementaux dans la région de Ouargla: Cas des eaux de rejets (agricoles et urbaines). Mémoire de Magister, Université de Ouargla, pp: 95.
12. Touafri, L. *et al.*, 2002. L'impact de la pollution des effluents d'oued Boutane de Khemis-Meliana. Optimisation d'un procédé d'épuration. Université de Khemis-Meliana, pp: 09.