

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran

Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie
et de l'Aménagement du Territoire
Département des Sciences de la Terre

Mémoire

Présenté pour l'obtention du grade de
Magister en Sciences de la Terre

Option : Hydrogéologie

Thème :

**Caractérisation des eaux souterraines de la plaine de la M'leta (Algérie, Nord-Ouest)
par application de méthodes statistiques multivariées
et modélisation géochimique**

Présenté par : BELLAREDJ Abderahim El Mehdi

Soutenu le 20 novembre 2013 devant le jury composé de :

Mansour H.	Professeur	Université d'Oran	Président
Zaïdi-Mebrouk N.	Maître de conférences A	Université d'Oran	Rapporteur
Hassani M.I.	Professeur	Université d'Oran	Co-rapporteur
Safa A.	Maître de conférences A	Université d'Oran	Examineur
Mahammed D.	Maître de conférences B	Université d'Oran	Invité

Oran, 2013

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis d'exprimer mes sincères remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail et en particulier :

Monsieur Mansour Hamidi, Professeur et enseignant au Département des Science de la Terre à l'Université d'Oran, qui me fait l'honneur de présider le jury.

Madame Zaïdi Mebrouk Naima, Maître de conférences A, enseignante au Département des Science de la Terre de l'Université d'Oran, qui m'a encadré, dirigé et orienté tout au long de ce travail.

Monsieur Hassani Moulay-Idriss., Professeur, enseignant au Département des Science de la Terre de l'Université d'Oran, qui a proposé la région d'étude et codirigé ce travail en me prodiguant ses précieux conseils et critiques constructives.

Monsieur Safa Aïssa., Maître de conférences A, enseignant au Département des Science de la Terre de l'Université d'Oran d'avoir accepté de faire partie du jury.

Monsieur Mahammed Djillali Maître de conférences B, enseignant au Département des Science de la Terre de l'Université d'Oran pour avoir bien voulu examiner ce travail et faire partie de ce jury.

Le personnel du laboratoire d'hydrochimie de l'A.N.R.H. d'Oran et en particulier
Monsieur Mahi Chakib

Au final, Il m'est agréable de remercier tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université d'Oran qui ont contribué à ma formation et à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Introduction générale	1
 Chapitre 1 : Caractéristiques physiques de la région d'étude	
I- Cadre géographique	2
I.1- Situation géographique de la région d'étude.....	2
I.2- Situation géographique du secteur d'étude.....	2
I.3- Aperçu morphologique.....	3
I.4- Aperçu hydrologique.....	4
II- Cadre climatique	5
II.1- Données générales.....	5
II.2- Etude des précipitations.....	5
II.3- Etude des températures.....	8
II.4- Humidité.....	9
II.5- Vent	9
II.6- Evaporation	10
II.7- Etude du climat de la région.....	10
III- Cadre géologique	13
III.1- Introduction	13
III.2- Substratum anté à synchronappe	13
III.3- Remplissage (couverture) post-nappe.....	15
III.4- Pliocène.....	20
III.5- Pléistocène.....	20
III.6- Holocène.....	20
III.7- Aperçu structural.....	22
III.8- Etude géophysique.....	22
IV- Cadre hydrogéologique	30
IV 1-Trias.....	30
IV 2- Formations Jurassico-crétacées.....	30
IV 3- Dépôts continentaux rouges des Tessala.....	30
IV 4- Marnes bleues du Miocène supérieur.....	31
IV 5- Calcaires marneux à tripolis.....	31

IV 6- Calcaires récifaux.....	31
IV 7- Pliocène inférieur.....	34
IV 8- Pléistocène inférieur.....	34
IV 9- Nappe intermédiaire.....	34
IV 10- Aquifère alluvial.....	34
IV 11- Etude piézométrique de la nappe alluviale.....	34
IV 12- Etude des caractéristiques hydrodynamiques.....	38
V- Conclusion.....	43

Chapitre 2 : Hydrochimie

Introduction.....	45
I- Principaux oueds.....	46
I.1- Caractéristiques physico-chimiques.....	46
I.1.1- Minéralisation.....	46
I.1.1.2- Teneur en ions.....	46
I.1.1.3- Faciès caractéristiques.....	46
II- Nappe libre.....	47
II.1- Traitement des données de la campagne de mars 1986	47
II.2- Traitement des données de la campagne d'octobre 2011	57
III- Complexe mio-pliocène et nappe intermédiaire	59
III.1- Traitement des données de la campagne de mars 1986	59
III.2- Traitement des données de la campagne d'octobre 2011	63
III.2.1- Complexe mio-pliocène.....	63
III.2.2- Nappe intermédiaire.....	69
IV- Interprétation du chimisme des eaux de la plaine de la M'leta.....	74
IV 1- Minéralisation.....	74
IV 2- Acquisition de la composition ionique.....	74
V- Hydrochimie isotopique.....	78
V.1- Isotope de la molécule de l'eau.....	78
V.2- Processus de minéralisation	79
V.3- Isotopes du carbone	80
V.4- Estimation des temps de résidence	83

VI- Conclusion	84
-----------------------------	----

Chapitre 3 : Traitement statistique & Modélisation géochimique

I- Traitement statistique	85
I.1- Méthodes d'analyse et de traitement des données.....	85
I.1.1- Analyse en Composantes Principales (ACP).....	86
I.1.2- Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).....	86
I.2- Application.....	87
I.2.1- Nappe libre (campagne 1986)	87
I.2.2- Complexe mio-pliocène et nappe intermédiaire (campagne d'octobre 2011)..	92
II- Modélisation géochimique	98
Introduction	98
II.1- Diagramme de dispersion de Datta & Tyagi.....	98
II.2- Diagramme de Gibbs.....	101
II.3- Résultats tirés des diagrammes de Datta & Tyagi et Gibbs.....	103
II.4- Indices de saturation	104
II.5- Diagrammes d'équilibre (stability diagrams)	106
III- Conclusion	110
Conclusion générale	111

Introduction Générale

Les eaux souterraines ne cessent de gagner en importance à travers le monde. Elles sont considérées aujourd'hui comme l'une des sources majeures d'approvisionnement des populations en eau potable. Les eaux souterraines sont plus propres (non polluées) et ne nécessitent pas de très grands traitements comparées aux eaux de surface.

La variation du chimisme dans les eaux souterraines dans un milieu dit naturel est due essentiellement à l'interaction entre ces eaux et la composition minérale du matériau aquifère où elles circulent. Ainsi, de telles eaux auront majoritairement une qualité acceptable et des teneurs en éléments chimiques assez faibles. Cependant, les eaux souterraines sont exposées constamment à des risques de pollution dont le degré et l'intensité sont tributaires de plusieurs paramètres, qu'ils soient naturels ou anthropiques.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines peut se faire par plusieurs approches dont les plus importantes sont : l'étude des eaux souterraines en utilisant la conductivité électrique (CE) et la température (T) comme traceurs, l'étude des variations des pressions des différentes eaux, la signature isotopique des isotopes stables tels que l'oxygène (O) ou des isotopes radiogéniques tels que le Strontium (Sr), les méthodes des SIG basées sur des rapports tels que : Na^+/Cl , $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, sur la conductivité électrique (CE) et sur le SAR, les études géophysiques, les techniques de statistique multivariées, telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) et enfin, la modélisation géochimique.

Dans plusieurs régions côtières du pays, l'eau souterraine apparaît comme étant la source d'eau douce répondant le mieux aux exigences domestiques, agricoles et industrielles, notamment dans les régions qui ne reçoivent pas des précipitations importantes et régulières. Cette situation se retrouve dans le cas de la plaine de la M'leta, bordant au Sud la Grande Sebkhah d'Oran, où la moyenne annuelle s'établit autour de 300 mm.

Dans ce mémoire, l'étude des eaux souterraines de la plaine de la M'leta a été réalisée en combinant : les informations hydrogéologiques et hydrochimiques (méthodes graphiques conventionnelles), les méthodes statistiques multivariées (ACP et CHA) et la modélisation géochimique. Cela, dans le but de déterminer les facteurs et les mécanismes contrôlant le chimisme des eaux souterraines de cette région.

Chapitre 1

Caractéristiques physiques de la région d'étude

I- Cadre géographique :

I.1- Situation géographique de la région d'étude :

Le secteur objet de cette étude fait partie du bassin versant de la Grande Sebkhia d'Oran. Ce grand bassin versant est situé à la proximité immédiate Sud-Ouest de la ville d'Oran. Son périmètre correspond à la ligne de partage des eaux alimentant la dépression endoréique dont la Sebkhia d'Oran constitue la partie centrale (Figure n° 01). Ce bassin versant endoréique est limité :

- au Nord par la ligne de crête de direction SW-NE des massifs littoraux d'Oran (Djebel Murdjadjo) qui l'isolent de la Méditerranée,
- au Sud, par la ligne de crête des Monts Tessala,
- à l'Est, il se raccorde au plateau d'Oran et de Boufatis suivant une ligne Es-Sénia-Oued Tlelat,
- à l'Ouest, dans la région de l'Oued El Malah, il est séparé du bassin de l'Oued El Malah et de la mer par une ligne de basses collines.

Administrativement, le bassin de la Grande Sebkhia d'Oran est couvert par les wilayas d'Oran, de Sidi Bel Abbès et d'Ain Témouchent.

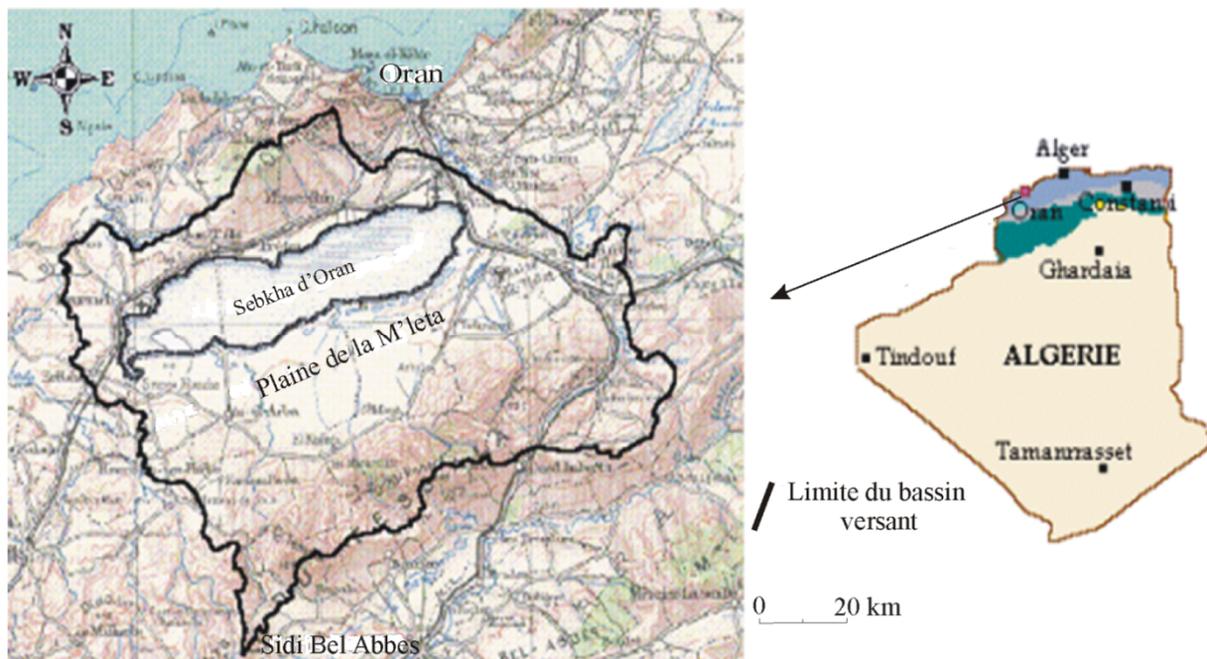


Figure n° 01: Situation géographique de la région d'étude.

I.2- Situation géographique du secteur d'étude :

La plaine de la M'leta est située au Sud de l'agglomération oranaise. Elle occupe la

partie méridionale du sillon central du bassin endoréique de la Grande Sebkhia d'Oran (figures n° 01 et 02). Son altitude se maintient d'une façon assez constante à une centaine de mètres. Elle est limitée :

- au Nord, par la Sebkhia d'Oran,
- au Sud, par les Monts Tessala,
- à l'Est, par la plaine de Tafraoui- Tlelat,
- à l'Ouest, par la plaine de Hammam Bouhadjar- El Malah.

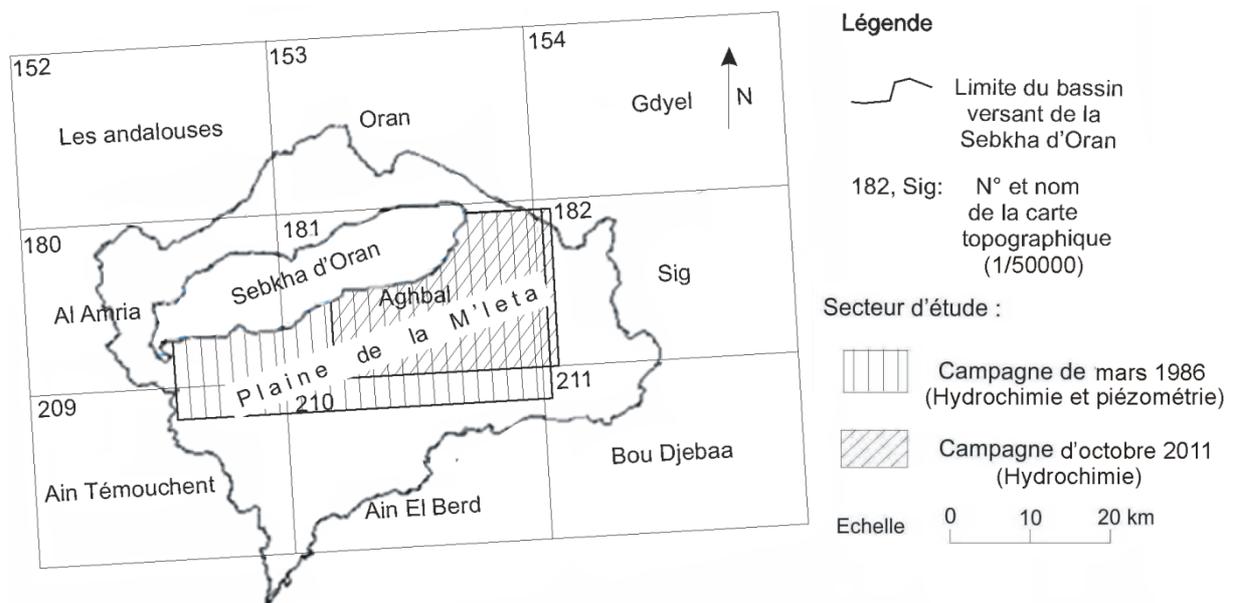


Figure n° 02: Situation géographique du secteur d'étude.

I.3- Aperçu morphologique:

Le sillon médian incluant la plaine de la M'leta, ainsi que les deux ensembles montagneux qui l'encadrent (Djebel Murdjadjo au Nord et Monts Tessala au Sud) sont orientés selon la direction WSW – ENE (figure n° 03).

Au Sud de la plaine de la M'leta, les Monts Tessala constituent un massif de structure complexe, long d'une cinquantaine de kilomètres, d'altitude moyenne de 800 m, qui culmine à 1061m (pic des Monts Tessala) et qui surplombe de 700 à 800 m la plaine de la M'leta.

Au Nord de la Grande Sebkhia, les massifs littoraux d'Oran offrent des reliefs avec beaucoup plus de resserrement, à morphologie bien accusée, culminant à 581 mètres (Djebel Murdjadjo). Le versant Sud est fortement entaillé par une série d'oueds de direction Sud -Nord, alors que le versant Nord est formé de hautes falaises. Au centre, la dépression de la Sebkhia

d'Oran de 40 km de longueur et 25 km de largeur correspond au prolongement de la plaine du Chélif vers l'Ouest. Les deux entités géologiques sont séparées par une zone de hauteurs orientées du NE au SW.

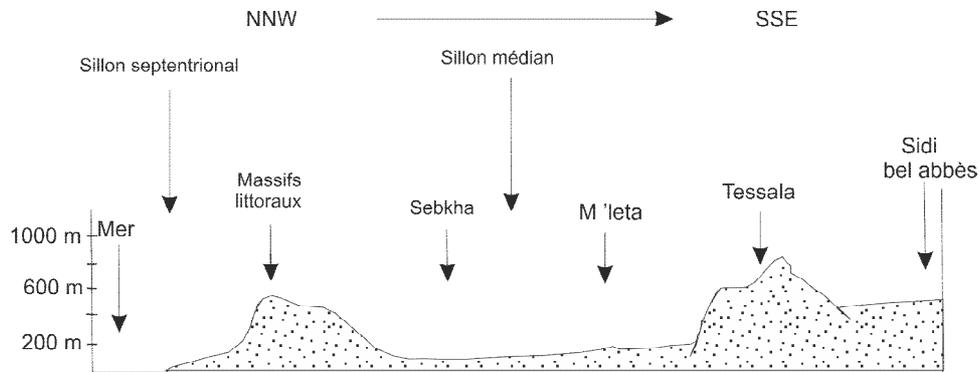


Figure n° 03 : Représentation graphique de l'allure morphologique générale de l'Oranie (Hassani M.I., 1987).

I.4- Aperçu hydrologique:

Considéré comme étant endoréique, le bassin versant de la Sebkha d'Oran ne présente pas de grands oueds le traversant en longueur.

Sous l'influence combinée de la tectonique et du type de climat régnant dans la zone d'étude, le réseau hydrographique se trouve totalement désorganisé. Ainsi, tous les cours d'eaux se caractérisent par un régime très instable, où l'écoulement ne se fait que par intermittence (les oueds connaissent soit la sécheresse soit les crues). Le passage brutal des oueds de la zone des reliefs à la plaine, est la principale cause des discontinuités des talwegs au niveau de la zone de rupture de pente. A la sortie des zones de reliefs, les oueds du bassin de la Sebkha ne présentent plus la particularité d'avoir des talwegs bien définis. En effet, ils aboutissent tous au centre du bassin, sur des surfaces planes ou peu escarpées. Ces surfaces sont admises comme étant des zones de subsidence (en témoigne les très faibles valeurs de la densité de drainage). Par conséquent, les eaux finissent par se disperser en bras divagants tout en déposant du matériel fin, limono-argileux. Le principal oued dévalant des Monts Tessala est l'Oued Besbes, dont le bassin versant (dans les Monts Tessala) occupe une superficie égale à 108 km² (Hassani M.I., 1987).

II- Cadre climatique :

II.1- Données générales :

L'étude climatique s'est basée sur des données relatives à la période 1990-2005, au niveau des deux stations : Es-Sénia et Tamzourah, fournies par l'Office National de la Météorologie (O.N.M), et par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H).

Pour ce qui est du vent et de l'évaporation annuelle, leur appréciation a été faite uniquement à l'aide de données O.N.M enregistrées à la station d'Es-Sénia, durant la période s'étendant de 1990 à 2002.

Tableau n° 01 : Coordonnées des stations climatiques d'Es-Sénia et de Tamzourah.

Station	Altitude (m)	Longitude (E/W)	Latitude (N)
Es-Sénia	90	W 00° 36'	N 35°38'
Tamzourah	170	W 00° 40'	N 35°24'

II.2- Etude des précipitations :

II.2.1- Précipitations annuelles :

II.2.1.1- Carte des précipitations moyennes annuelles :

La carte des moyennes pluviales annuelles (période : 1913-1963, figure n° 04) dressée par Chaumont M. et Paquin C. en 1968, montre une nette variation de la pluviométrie. En effet, l'influence de l'altitude se fait clairement sentir en comparant, par exemple, la pluviométrie caractérisant les cimes des Tessala (800 mm environ) à celle de la moyenne générale enregistrée dans la plaine (300 à 500 mm environ). En plus, la pluviométrie diminue considérablement en allant de l'Ouest vers l'Est en raison d'une meilleure exposition de la partie occidentale de la plaine aux vents d'Ouest et du Nord-Ouest, chargés en humidité, un caractère toutefois, typiquement local. D'un autre côté, l'éloignement à la mer ne peut être retenu comme facteur influant sur les précipitations (Hassani M.I., 1987).

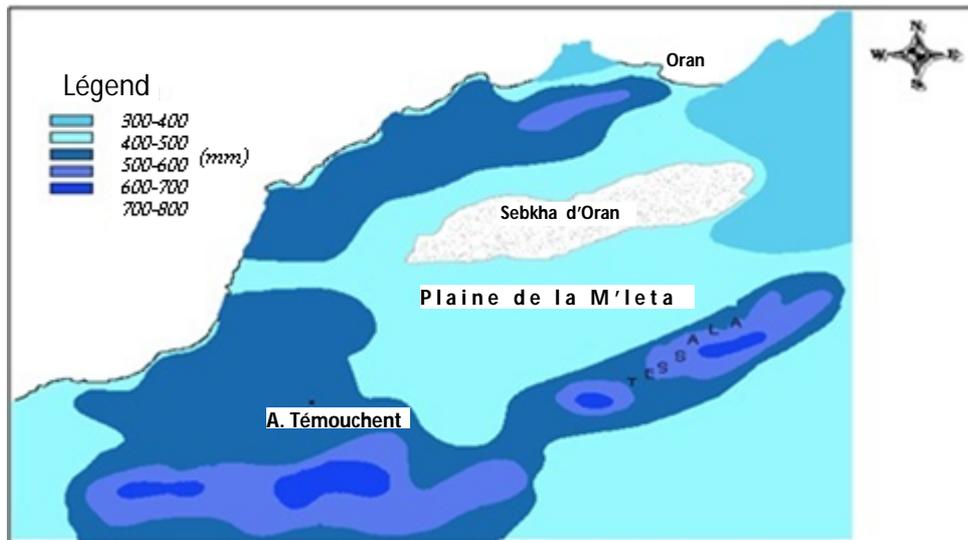


Figure n° 04 : Carte pluviométrique de la région d'Oran pour la période 1913-1963.

(Précipitations moyennes en mm d'après
Chaumont M. et Paquin C., 1968).

II.2.1.2- Variation interannuelle de la pluviométrie (1994-2005) :

D'après la figure n° 05, la variabilité interannuelle des précipitations entre les deux stations de Tamzourah et d'Es-Sénia est facilement remarquable. Ces précipitations sont plus importantes au niveau de la station d'Es-Sénia.

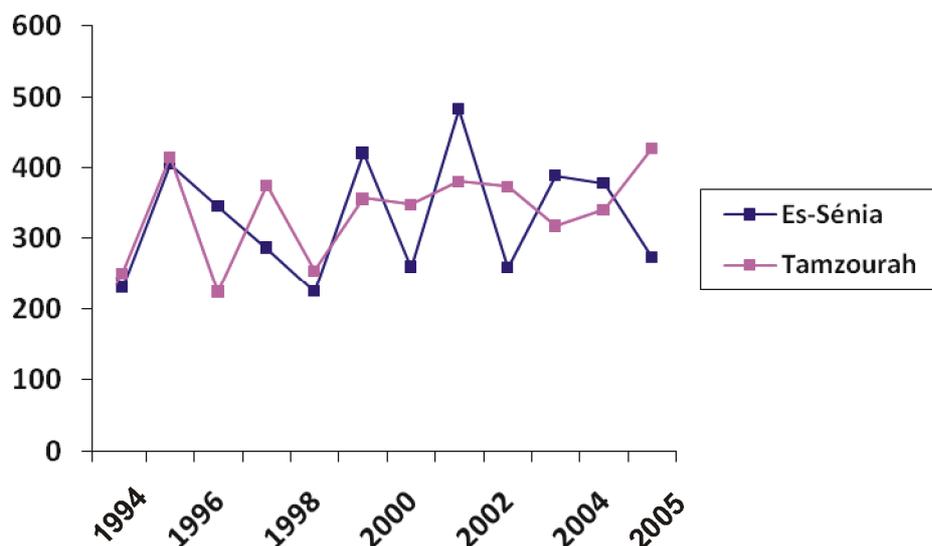


Figure n° 05 : Précipitations annuelles pour la période 1994-2005.

II.2.1.3- Précipitations saisonnières :

Du tableau n° 02, les plus grandes valeurs de précipitation sont enregistrées en automne.

Tableau n° 02: Précipitations saisonnières pour la période 1990-2005.

Station	Saisons (mm)			
	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Es-Sénia	139	129	82	6,5

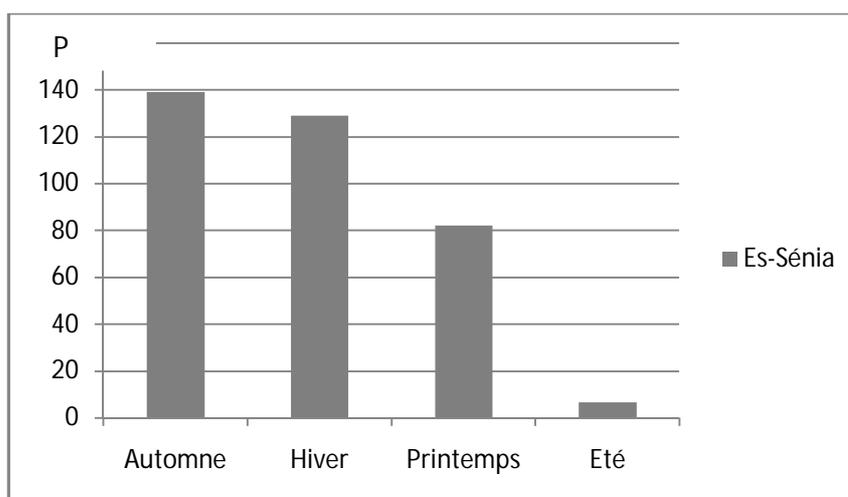


Figure n° 06 : Précipitations saisonnières pour la période 1990-2005.

II.2.1.4- Précipitations mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau de la station d'Es-Sénia pour la période de 1990 à 2005 sont reportées sur le tableau n° 03 :

Tableau n° 03 : Précipitations mensuelles pour la période 1990-2005.

Station	Mois (mm)												Total annuel
	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	
Es-Sénia	44	44,5	24	33,5	25,5	3,5	0,5	2,5	13	60	66	40,5	358

Le tableau n° 03 montre une baisse très importante du cumul annuel des précipitations au niveau de la station d'Es-Sénia entre 1990 et 2005, par rapport à la période 1913-1963 (figure n° 04).

Concernant les précipitations mensuelles, la figure n° 07 permet de distinguer trois périodes :

- une période humide, représentée par les deux mois d'octobre et de novembre,
- une période sèche, comprise entre le mois de juin et le mois de septembre,
- la troisième et dernière période se caractérise par des valeurs de précipitations intermédiaires entre les deux premières.

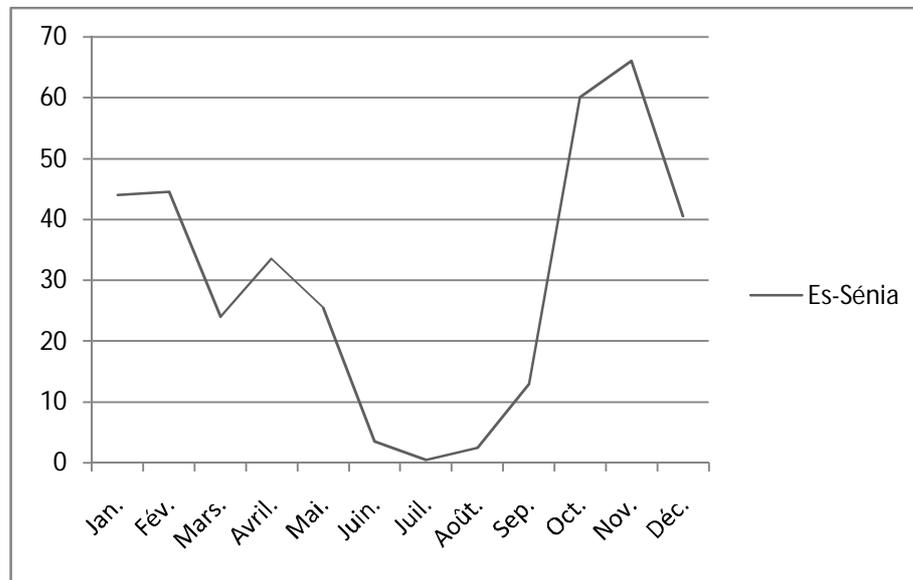


Figure n° 07 : Précipitations mensuelles pour la période 1990-2005.

II.3- Etude des températures:

Les températures mensuelles présentées dans le tableau n° 04 ont été enregistrées durant la période de 1990 à 2005 au niveau de la station d'Es-Sénia.

Tableau n° 04 : Températures moyennes mensuelles pour la période 1990-2005.

Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Moyenne
Es-Sénia °C	10	12	14	16	19	23	25	26	24	20	15	12	18

Du tableau n° 04, on remarque que le mois de janvier est le plus froid avec une température moyenne égale à 10 °C, tandis que le mois d'août est le plus chaud avec une température moyenne de 26 °C.

La température moyenne annuelle est égale à 18 °C. Cette température est relativement faible, étant donné le climat semi aride caractérisant la région d'étude.

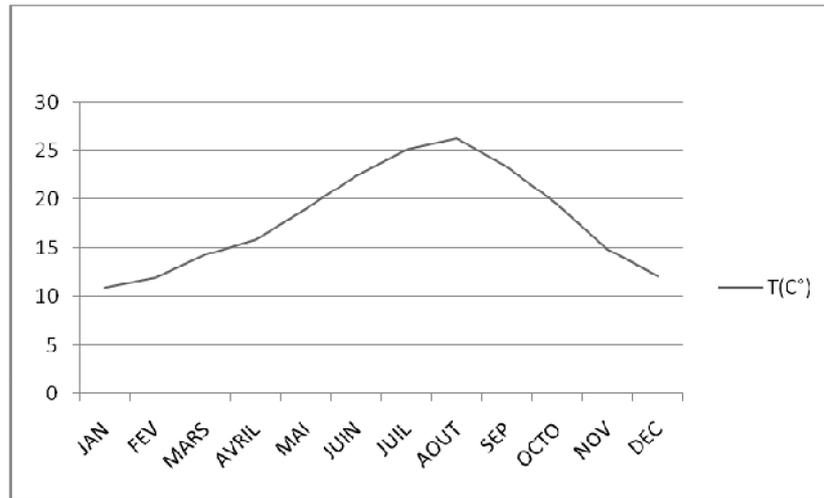


Figure n° 08 : Températures mensuelles pour la période 1990-2005.

La figure n° 08 permet de constater que la saison froide ($T < 15\text{ °C}$) débute en novembre et se poursuit jusqu'au mois d'avril. La saison la plus chaude s'étale sur six mois, commençant en mai et se terminant en octobre.

II.4- Humidité:

Les valeurs d'humidité (tableau n° 05) enregistrées au niveau de la station d'Es-Sénia sont assez élevées. Cette tendance est surtout due à la proximité de la mer.

Tableau n° 05 : Humidités mensuelles (1990-2005).

Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
H %	71,7	70,6	70	64,75	65,9	64,4	64	62,8	64,6	68,35	71	72,7

II.5- Vent :

Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent à la station d'Es-Sénia, relatives à la période 1990-2005, sont présentées dans le tableau n° 06 :

Tableau n° 06 : Vitesses moyennes mensuelles du vent (1990 - 2005).

Es-Sénia	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Vitesse moy (m/s)	7,28	4,55	4,95	4,96	4,74	4,74	4,47	4,31	4,18	4	4,33	4,4
Direction	W	W	W	W	W	W	WSW	W	W	WSW	WSW	WSW

L'étude des vents se base généralement sur deux caractères principaux, à savoir : la vitesse et la direction. Les vents dominants dans la région sont essentiellement de direction W et à un degré moindre WSW en automne. Pendant la période estivale, les vents de type Sirocco (vents chauds et secs de direction WSW) soufflent pendant quelques jours par an (de 5 à 7 jours).

II.6- Evaporation :

II.6.1- Evaporation mensuelle :

Du tableau n° 07, l'évaporation atteint son maximum au mois d'août, égalant 171 mm. La valeur minimale (60.5 mm) par contre, est enregistrée au mois de décembre et janvier. Au cours de l'année, nous pouvons distinguer deux périodes, la plus affectée par l'évaporation se prolonge d'avril à octobre, tandis que l'autre occupe le reste de l'année.

Tableau n° 07 : Evaporations mensuelles (1990-2005).

Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Evaporation	61	65	84	120	133	154	169	171	140	100	74	61

II.6.2-Evaporation annuelle :

Les variations interannuelles de l'évaporation (tableau n° 08) sont assez remarquables à l'image de la grande différence observée entre la valeur maximale enregistrée en 1995 et celle minimale relative à 2002.

Tableau n° 08 : Evaporations annuelles (1992-2002).

Année	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Moyenne (mm)	1407	1453	1549	1643	1412	1511	1571	1561	1467	1133	1070

II.7- Etude du climat de la région :

La combinaison des données des précipitations et des températures nous a permis d'obtenir les diagrammes suivants :

II.7.1- Diagramme de Gaussen et Bagnouls:

Ce diagramme représenté par deux courbes (précipitations et températures

mensuelles), est obtenu en portant pour chaque mois, les températures mensuelles avec une échelle valant deux fois celle des précipitations mensuelles. D'après Gaussen et Bagnouls, un mois sec est un mois où la précipitation exprimée en mm est inférieure ou égale au double de la température exprimée en °C.

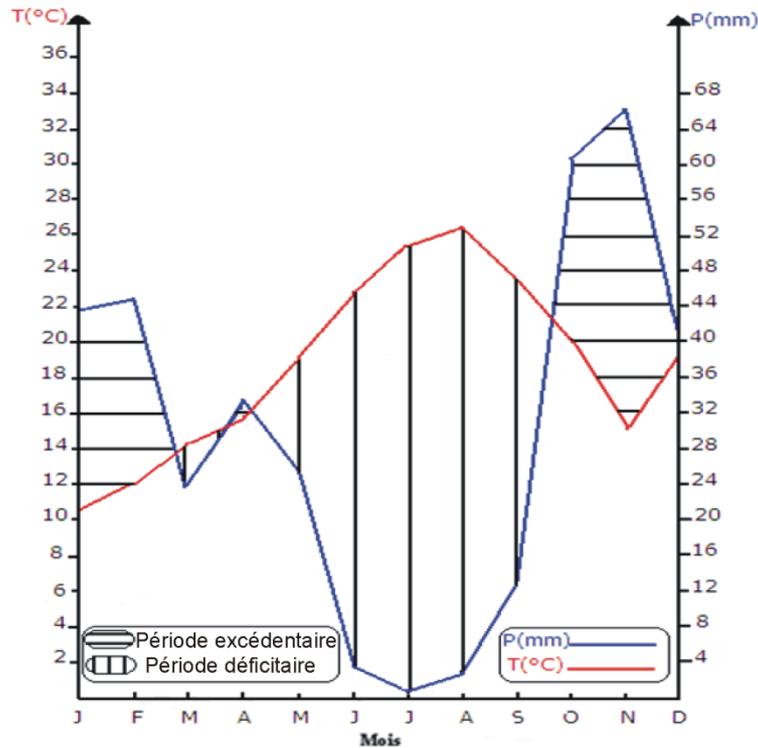


Figure n° 09 : Diagramme pluviothermique de la station d'Es-Sénia (1990-2005).

La courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations pendant le mois de mars et durant la période mai-septembre. Ainsi, ces six mois sont considérés comme étant les mois secs de l'année au niveau de la station d'Es-Sénia, durant la période 1990-2005.

II.7.2- Diagramme ombrothermique (méthode d'Euverte) :

Cette méthode consiste à reporter en ordonnées les températures (°C) suivant une échelle arithmétique parallèlement aux précipitations (mm) suivant une échelle logarithmique avec les mois de l'année en abscisses. Lorsque la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations, on est dans une période déficitaire.

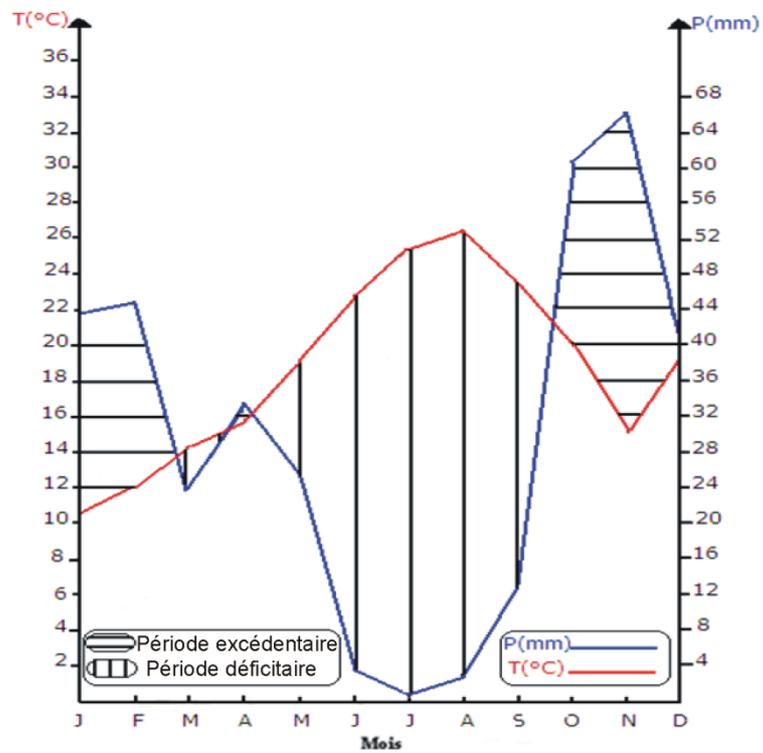


Figure n° 10 : Diagramme ombrothermique de la station d'Es-Sénia (1990-2005).

D'après le diagramme ombrothermique (figure n° 10), cette période déficitaire commence au mois de juin et se termine au mois de septembre. En dehors de cet intervalle, les besoins en eau sont couverts.

III- Cadre géologique:

III.1- Introduction :

La région d'étude fait partie du grand ensemble des massifs littoraux oranais. Elle est située dans la zone externe du domaine tellien de la chaîne alpine. La morphologie actuelle de la région de la Grande Sebkha d'Oran s'est formée à la faveur d'une succession de mouvements orogéniques intenses, s'étendant de l'anté Miocène jusqu'au Quaternaire. La structure géologique de la région détermine deux ensembles structuraux, à savoir : le substratum anté à synchronappe et le remplissage post-nappe (figure n° 11).

La description des contextes géologique et hydrogéologique de la région d'étude s'est basée essentiellement sur les travaux de M. Hassani M.I. (1987).

III.2- Substratum anté à synchronappe :

Dans les Monts Tessala, l'allochtone tellien avec ses différentes unités (nappes) et le Miocène anté à synchronappe forment un substratum essentiellement marno-schisteux. Tous les étages allant du Trias à l'Oligo-Miocène sont présents indifféremment et dans les différentes unités. Ces dernières sont toutes d'origine septentrionale et leur mise en place dans le sillon Sud-tellien s'achève à la fin de la phase alpine.

III.2.1- Trias :

Le Trias est formé essentiellement de masses de gypse, auxquelles sont associées des argiles multicolores et des éléments de l'autochtone remaniés en blocs allogènes. Ces formations, en raison de leur affleurement en structure diapirique, pénètrent à travers les différentes formations géologiques et n'occupent jamais de ce fait, une position stratigraphique normale.

Les formations évaporitiques présentent un aspect intrusif manifeste au niveau du diapir d'Arbal. Pourtant, ce complexe chaotique se trouve fréquemment en position anormale; soit sous forme de lames tectoniques, soit injecté dans les fractions liées aux différentes unités sénoniennes.

III.2.2- Jurassique :

Les dépôts jurassiques atteignent 400 m d'épaisseur environ. Représentés par des calcaires liasiques bréchiques et marmorisés souvent recristallisés, ils sont observés sous forme de lambeaux autour et sur le sommet de Tafraoui.

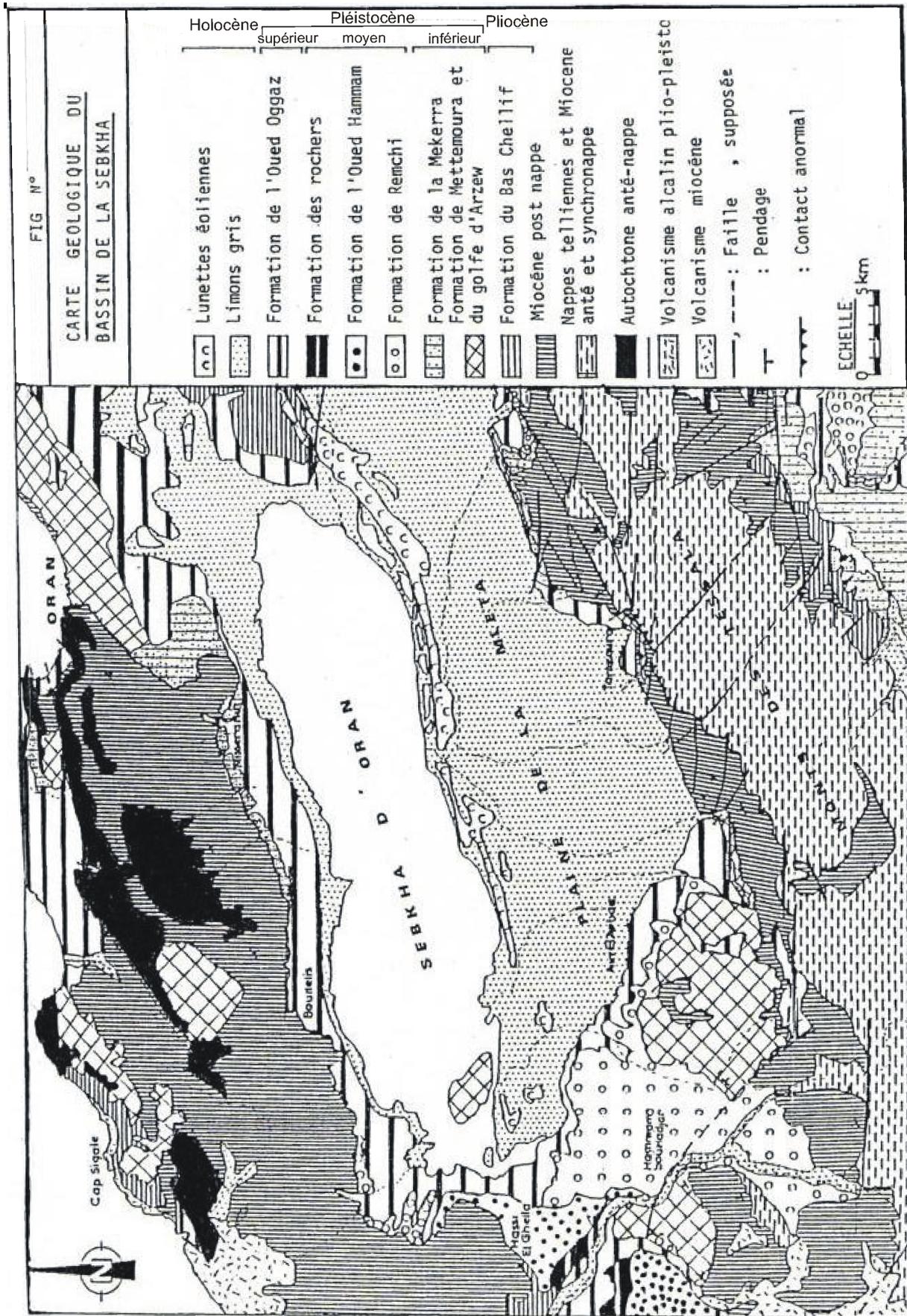


Figure n° 11 : Carte géologique du bassin versant de la Grande Sebka d'Oran.

(D'après Tomas G., 1985, in Hassani, 1987).

III.2.3- Crétacé :

Dans les Monts Tessala, les dépôts crétacés (800 à 850 m) représentés par des formations marno-schisteuses datant du Néocomien au Sénonien, forment le substratum sur lequel reposent les unités autochtones miocènes.

Dans le bassin synchro-nappe sud-tellien, la fin de la mise en place des unités telliennes se fait parallèlement à une sédimentation marine qui se poursuit encore un certain temps sous forme de dépôts du Miocène synchro-nappe. Ce cycle, étroitement lié aux phases ultimes de l'orogénèse alpine, est suivi par un nouveau grand cycle sédimentaire marqué par une transgression succédant à la régression générale de la fin du Miocène inférieur. C'est le Miocène post-nappe.

III.3- Remplissage post-nappe (couverture) :

Ce cycle est lié à une nouvelle transgression succédant à la régression générale de la fin du Miocène inférieur. Cette transgression n'envahit que très progressivement les massifs littoraux (Djebel Murdjadjo) ainsi que les Monts Tessala, où se développent des dépôts littoraux aux faciès trop variés, d'épaisseur réduite et à forte extension dans les zones basses du domaine. Ce remplissage est constitué par :

III.3.1- Miocène 1^{er} cycle (Miocène inférieur) :

Dans le versant Nord des Monts Tessala, les dépôts continentaux rouges sont formés d'alternance de conglomérats à fragments de schistes, de grès oligocènes et crétacés et de marnes rouges. Ces dépôts peuvent atteindre 250 m d'épaisseur et représentent une suite continue allant de l'Oued El Malah jusqu'au Sud de Sig. Au-dessous de la plaine de la M'leta la présence ou l'absence de ces formations est inconnue. En effet, les forages réalisés dans la région ne sont pas assez profonds pour atteindre ces formations.

III.3.2- Miocène 2^{ème} cycle (Miocène supérieur) :

La transgression du Miocène supérieur débute très généralement dans le bassin du Chélif par une importante série gréso-sableuse. Au niveau du secteur d'étude, cette série est constituée par les formations suivantes :

III.3.2.1- Niveau détritique de base :

Ce niveau est formé de grès marins, affleurant uniquement dans les zones hautes. En effet, dans les Monts Tessala, les niveaux gréseux deviennent lenticulaires et moins épais. A

certaines endroits, ces grès passent latéralement à des marnes bleues qui reposent sur le substratum allochtone.

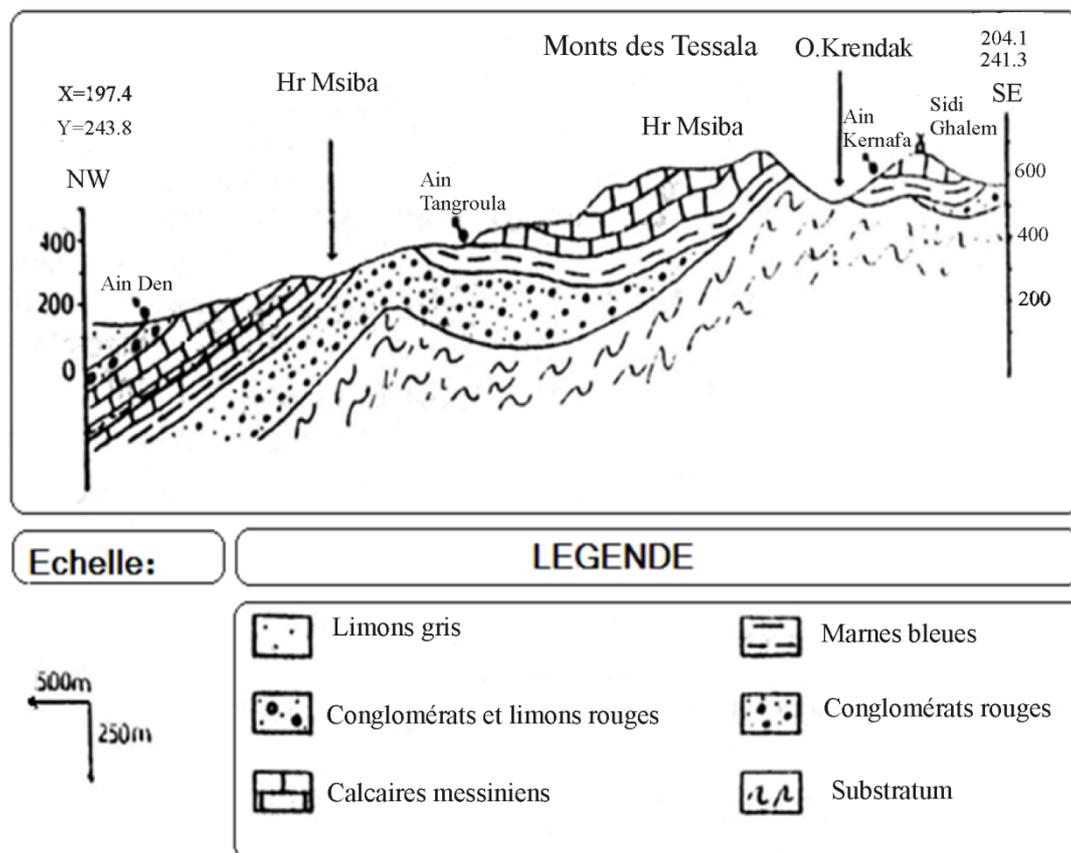


Figure n° 12 : Coupe géologique du secteur Arbal-Tamzourah (Hassani M.I., 1987).

Entre Tamzourah et la plaine de Tameira, ce faciès est très réduit et il y a passage progressif entre les couches continentales et les marnes bleues. Dans les Monts Tessala (vers Sidi Mohamed El Kadi), les niveaux de base de la transgression sont constitués de calcaire peu épais à algues et à Clypéastres (Fenet, 1975).

III.3.2.2- Formations médianes :

Elles sont constituées de marnes bleues qui prennent une grande extension sous le plateau d'Oran et dans les Monts Tessala, où elles peuvent atteindre 600 m d'épaisseur.

III.3.2.3- Formations terminales :

Elles sont représentées en grande partie par des dépôts de tripolis et de gypses qui marquent la fin de la transgression du Miocène supérieur dans le bassin du Chélif. On y rencontre de bas en haut :

III.3.2.3.1- Tripolis et gypses :

Dans les Monts Tessala, les tripolis sont peu représentés. Toutefois, quelques lits de tripolis entrecoupés de marnes blanches demeurent intercalés dans les calcaires massifs récifaux entre Arbal et Tamzourah. Au delà de cette zone et vers l'Ouest, les marnes sont complètement relayées par les calcaires. Les tripolis sont recoupés par plusieurs forages et leur épaisseur augmente au fur et à mesure que l'on s'avance vers le centre du bassin.

III.3.2.3.2- Calcaires récifaux:

Cette formation est limitée vers le bas par la série des marnes blanches à vertes à tripolis. En profondeur, ces calcaires sont gris clairs, bioclastiques, oolithiques et parfois gréseux et massifs. Souvent, on observe des passées marno-calcaires grises claires à bleuâtres. Néanmoins, on peut trouver parfois des passées marneuses au sein même des calcaires. Ces calcaires affleurent non seulement au flanc Sud du Djebel Murdjadjo, mais aussi au flanc Nord des Tessala.

Sous la plaine de la M'leta, surtout dans la zone de Tafraoui (figure n° 13), huit forages ont recoupé cette formation. Seuls : F31, F37 et F38 l'ont recoupé en entier sur : 69, 134 et 134 m respectivement. En allant du Sud vers le Nord, on note une réduction de l'épaisseur de la série. En effet, l'épaisseur atteint 134 m (F37 et F38) à la bordure du bassin alors qu'elle diminue à 69 m (F31) à son centre (figures n° 14 et 15). En aval des affleurements calcaires, un compartimentage accentué caractérise cette formation. En témoigne le rejet de 96 m du toit de cette formation qui passe de 186 m au forage F37 à 262 m au forage F39. Ces deux derniers n'étant distants l'un de l'autre que d'un demi-kilomètre seulement. Il en est de même pour les forages F31 et F32, où la côte du toit passe respectivement de 334 m à 430 m. Ainsi, le tracé d'une carte isobathe est impossible sauf si l'on a recours à la géophysique.

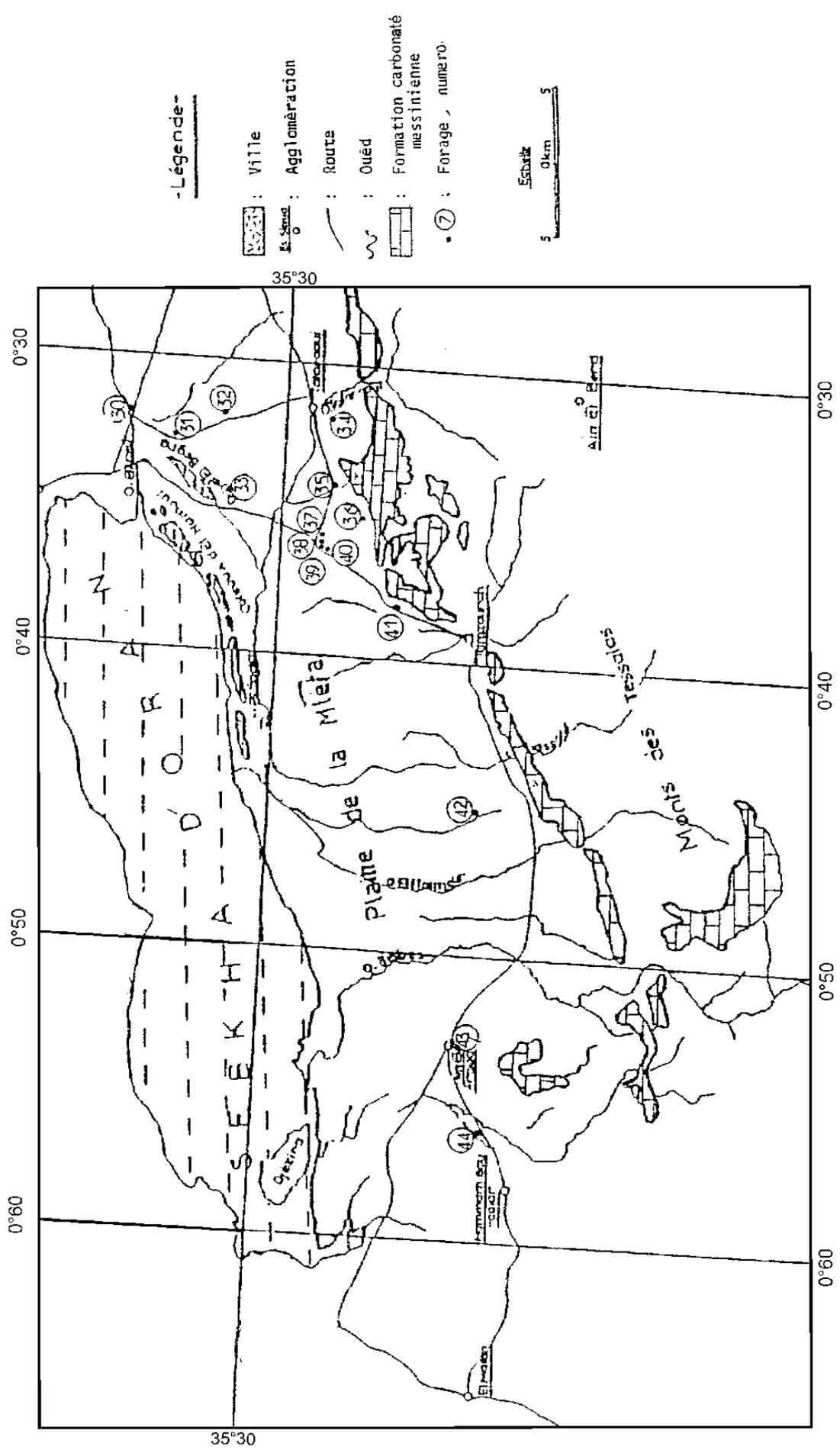


Figure n° 13 : Localisation des forages (Hassani M.I., 1987, extrait).

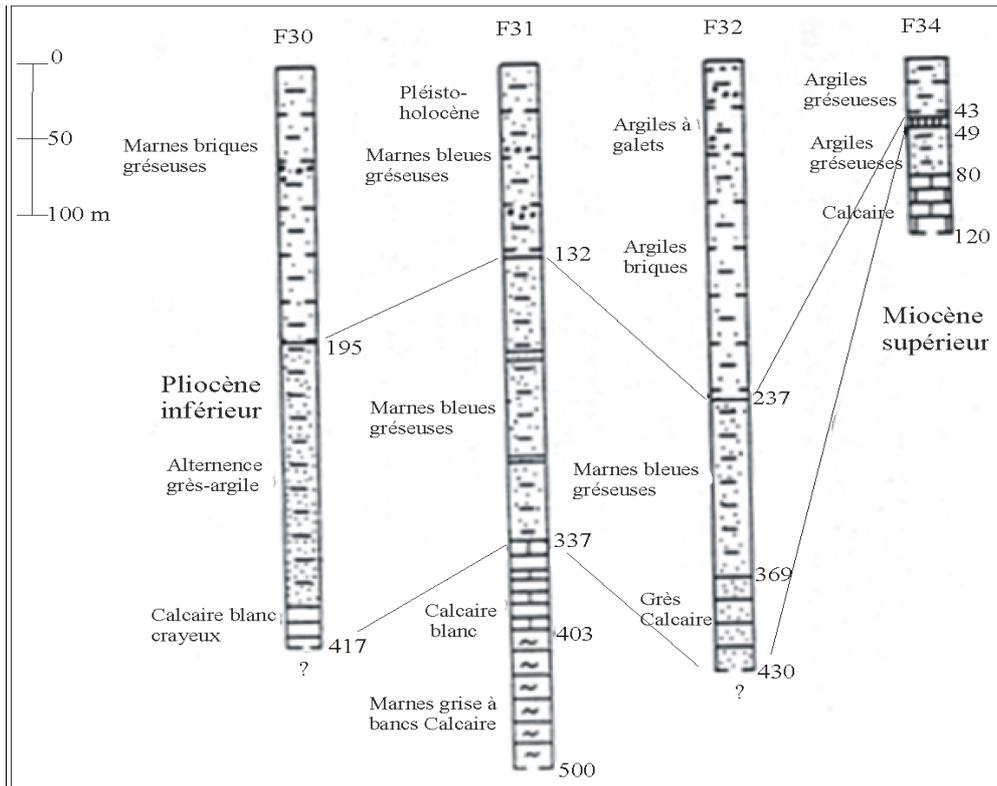


Figure n° 14 : Corrélation des logs des forages selon une coupe Nord-Sud à travers la plaine de la M'leta (Hassani M.I., 1987).

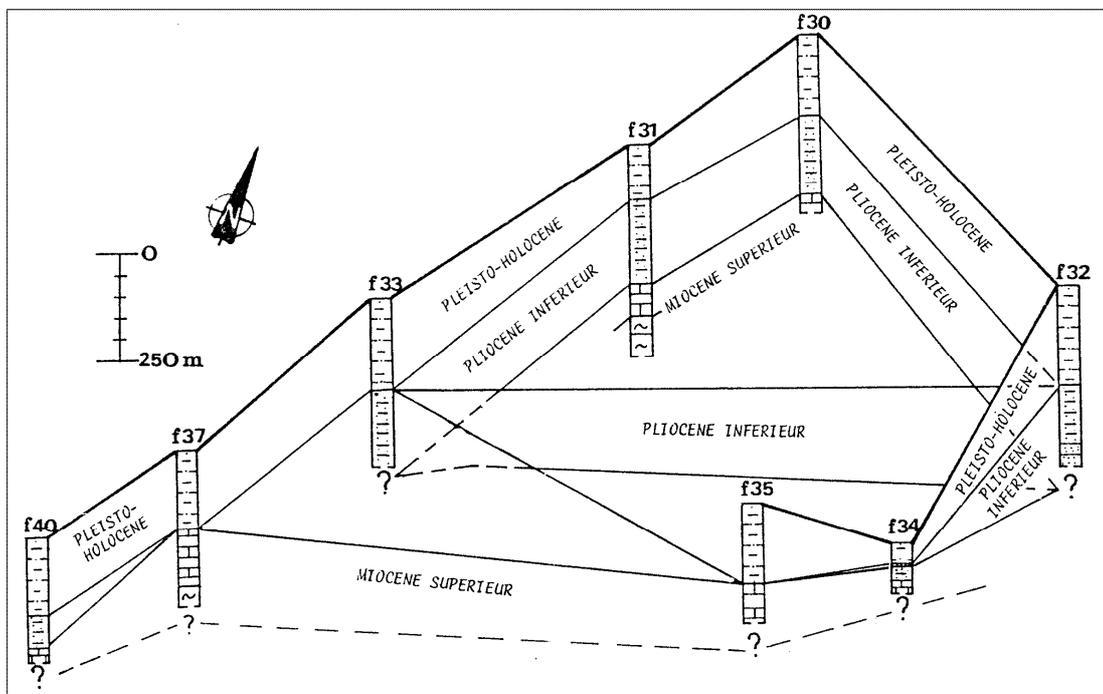


Figure n° 15 : Coupe géologique synthétique de la plaine de la M'leta selon la répartition spatiale des forages (Hassani M.I., 1987).

III.4- Pliocène :

Le pliocène marin n'affleure qu'au Nord-Est dans les anticlinaux des Djebels Djira et Debbi (au Nord-Est de la plaine), où des marnes à intercalations gréso-sableuses atteignent 100 à 200 m d'épaisseur. Au Sud de la Sebkha, la ligne de rivage du bassin pliocène devrait se situer à l'emplacement actuel de la flexure des Monts Tessala. La formation des marnes débute souvent par des niveaux détritiques gréseux ou sableux, parfois conglomératiques. Des intercalations gréseuses et sableuses demeurent interstratifiées dans toute la série. Au niveau de F32, les marnes atteignent 132 m ; elles sont grises et bleutées.

Les grès marins astiens correspondent à des grès calcaires jaunes localement très fossilifères ; vers le sommet, il y a passage à des formations laguno-lacustres.

Le forage F34 situé à Tafraoui a rencontré 6 m de Pliocène marin sous forme de calcaire blanc récifal (bordure du bassin pliocène). Quant aux forages F39 et F40, ils traversent respectivement 44 et 88 m d'une formation de marnes bariolées brunes claires à bleues verdâtres, fortement gypseuse, située entre les calcaires récifaux miocènes et les marnes compactes brunes. Cette formation a été attribuée au Pliocène marin par corrélation.

Le pliocène marin se termine dans la région par le creusement d'une surface d'érosion de grande extension allant de l'Est d'Oran à El Amria. Ce glacis sera fossilisé par la formation marine au Pléistocène inférieur.

III.5- Pléistocène :

Dans la plaine de la M'leta et à EI-Djezira, le Pléistocène inférieur est présent sous forme d'assises continentales azoïques de limon rouge parfois conglomératique. Ces assises sont recouvertes par une croûte indurée à faciès calcaire. Pour ce qui est des pléistocènes moyen et supérieur, ils n'affleurent que timidement aux alentours de Hammam Bou Hadjar pour le premier et près de Tamzourah et d'Ain Larbaa pour le second.

III.6- Holocène :

La majeure partie de la plaine de la M'leta est couverte par des limons gris salés et gypseux (alluvions récentes) sous forme de terrasses pouvant atteindre 40 m d'épaisseur.

Dans la plaine de la M'leta, cinq grands cônes de déjection à éléments grossiers encore actifs de nos jours sont reliés (Oueds : El Haïmeur, Sebbah, Rassoul, Tamzourah et Tafraoui). Au Sud et au Sud-Est de la Sebkha (collines d'El Hamoul) se développent des lunettes éoliennes à matériaux argilo-sableux ou argileux. Ces lunettes sont le résultat du creusement des sols salés de la Sebkha par les vents W et N-W.

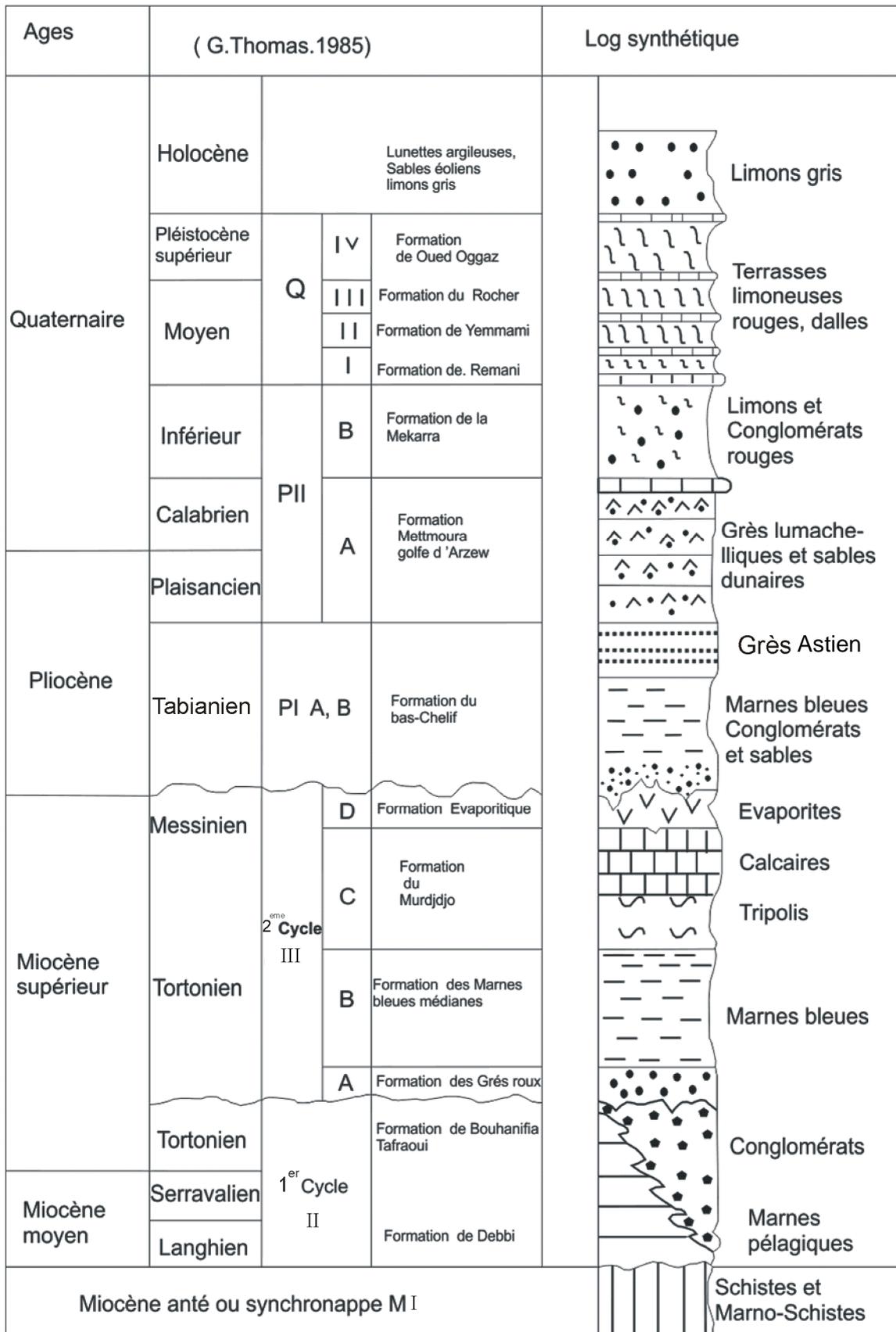


Figure n° 16 : Log géologique synthétique de la Grande Sebka d'Oran.
(in Hassani M.I, 1987, extrait).

III.7- Aperçu structural :

De nombreux travaux effectués sur la région (Doumergue F., 1912; Gourinard G., 1958; Perrodon A., 1957; Fenet B., 1975, Thomas G., 1985; etc.) ont permis de distinguer les ensembles structuraux de la région.

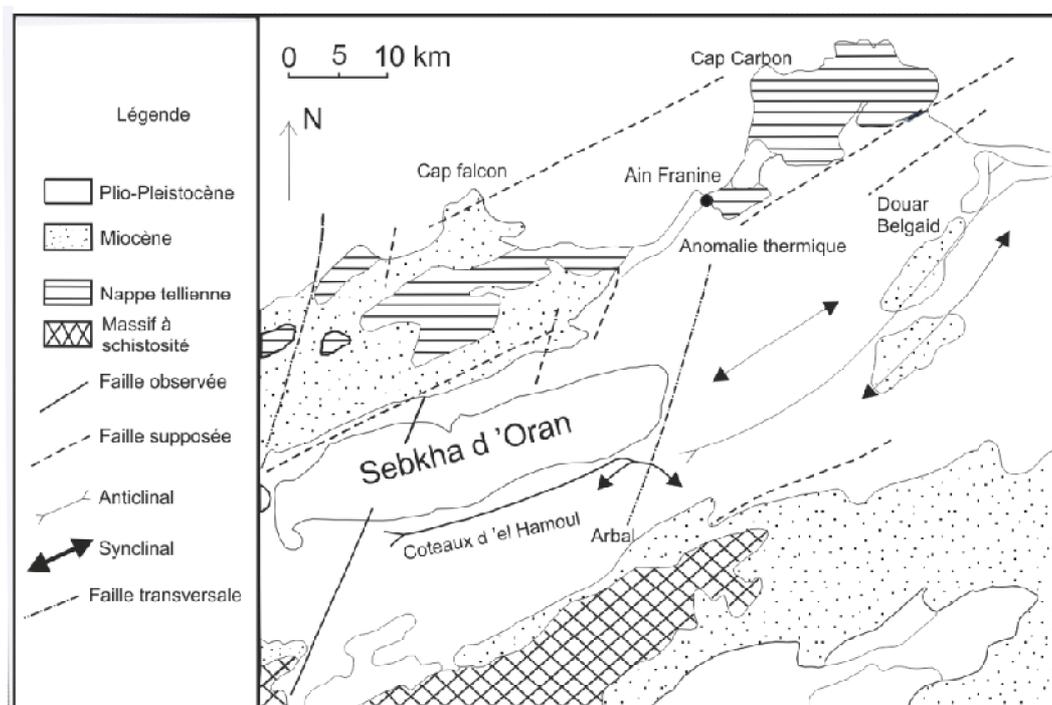


Figure n° 17 : Esquisse structurale de l'Oranie centrale (Fenet B., 1975).

La tectonique de la région est contrôlée par des phases de cisaillement et de collision qui engendrent une tectonique polyphasée. Cependant, arrivé aux dépôts des formations post-nappe la compression est prédominante (Thomas, 1985). La tectonique dessine les traits essentiels de la structure actuelle et s'exprime selon les directions principales N 10-20°, N50-70° et N 140°.

La partie Sud du plateau d'Oran est une zone à tectonique assez calme avec un léger pendage des formations vers le Sud en direction de la Grande Sebkha d'Oran et la Dayat Morsly. Ce prolongement n'est toutefois pas uniforme. En effet, il peut s'inverser localement, créant des dépressions avec des points bas, où l'eau de pluie s'accumule en saison humide. Cela correspond à des ondulations tectoniques post-pléistocènes de très faible amplitude affectant les couches de ce dernier étage.

III.8- Etude géophysique :

Dans le but d'estimer les réserves d'eaux souterraines exploitables dans la partie orientale

de la plaine de la M'leta, une étude géophysique a été réalisée par l'Entreprise Nationale de l'Exploration Minière (E.R.E.M) en 1984 (figure n° 18).

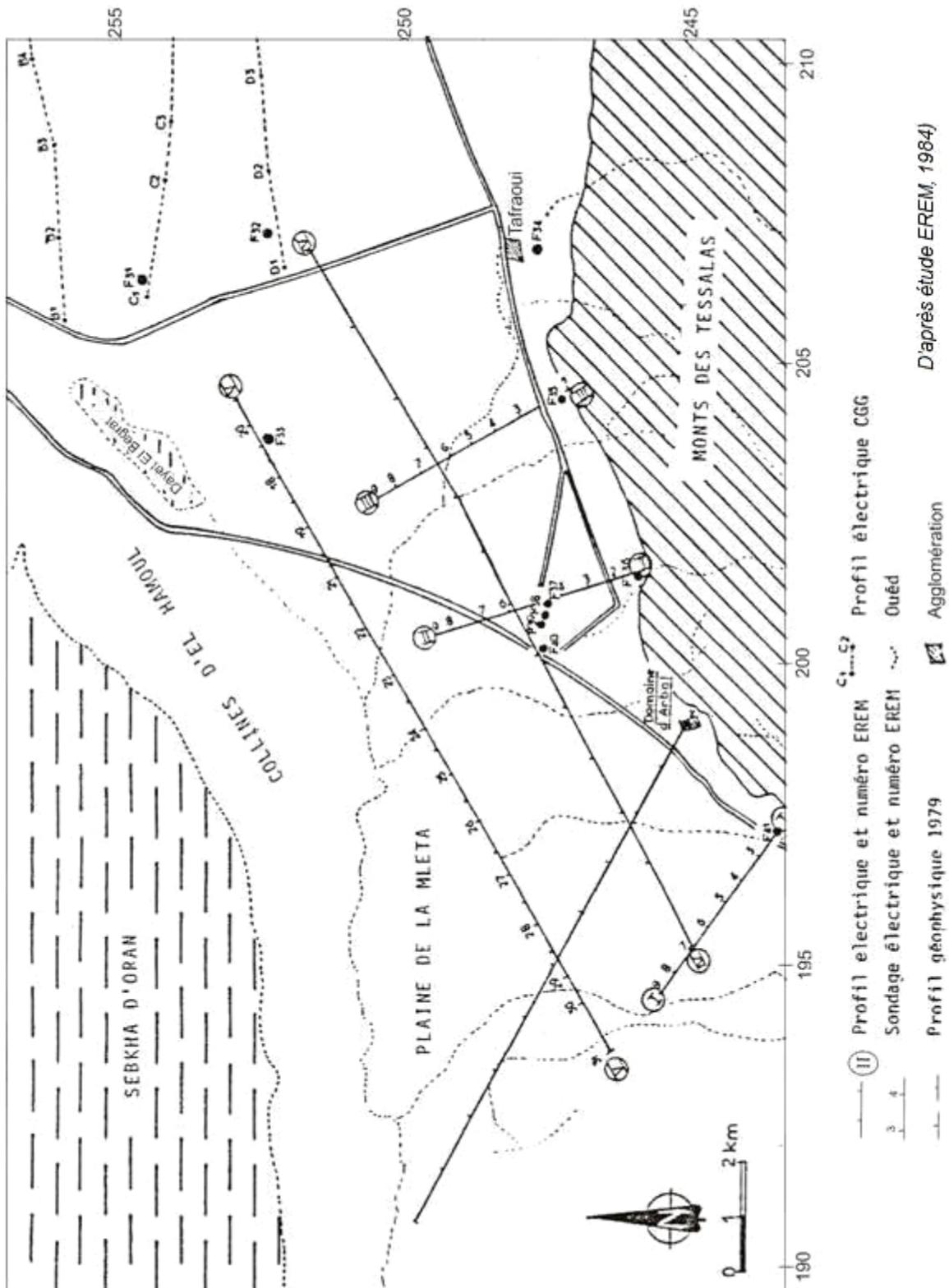


Figure n° 18 : Localisation des profils et des sondages électriques (in Hassani M.I., 1987).

III.8.1- Travaux réalisés :

La prospection géoélectrique a été réalisée en deux étapes. La première en 1983 et la deuxième en 1984.

La première étape a concerné trois profils subméridionaux : (I, II, III, figure n°18), de 4 km de long. Ainsi, dans le but d'une différenciation lithologique de la coupe en présence et de la mise en évidence des secteurs favorables à l'implantation des captages, 25 sondages électriques avec un pas d'observation de 500 m et une ligne d'émission AB de 2000 m ont été réalisés.

Pour la deuxième étape, 37 sondages électriques ont été réalisés au total. Cette étape a concerné deux profils (VI, V, figure n° 18) et elle a permis de localiser les principaux accidents tectoniques de la région d'Arbal.

L'interprétation des courbes des sondages électriques a permis :

- l'établissement des courbes géoélectriques (figures n° 19 et 20).
- l'établissement de la carte schématique structurale du toit de la formation carbonatée (figure n° 21).

III.8.2- Résultats et interprétations :

Des coupes géoélectriques (figures n° 19 et 20), on distingue de haut en bas :

Le premier niveau, de 0,5 à 10 m d'épaisseur totale, se caractérise par des valeurs de résistivité variant de 0,5 à 25 Ω .m (elle atteint dans certains cas 58 Ω .m). Cette basse valeur des résistivités est due à une forte salinité des sols et à la minéralisation élevée des eaux de la nappe superficielle. Ce niveau correspond à des argiles, des grès, des marnes et dans certains intervalles à des sables et galets. Ces derniers se distinguent sur les courbes par des résistivités élevées (17 à 50 Ω .m).

La courbe suivante se caractérise par une résistivité variant de 2 à 10 Ω .m et une épaisseur comprise entre 8 et 75 m. Cette couche correspond à des marnes, des grès, des sables et des galets. La profondeur du gisement sur le profil IV-IV varie de 50 à 131 m et de 45 à 95 m sur le profil V-V.

Pour le troisième niveau, les résultats de l'interprétation quantitative des courbes SE caractérisent deux types de niveaux géoélectriques. Le premier, avec une résistivité comprise entre 10 et 35 Ω .m, est constitué principalement de marnes à passées de grès. Le deuxième niveau, représenté par des marnes à passées fines de grès, est défini par une résistivité variant entre 2 et 10 Ω .m.

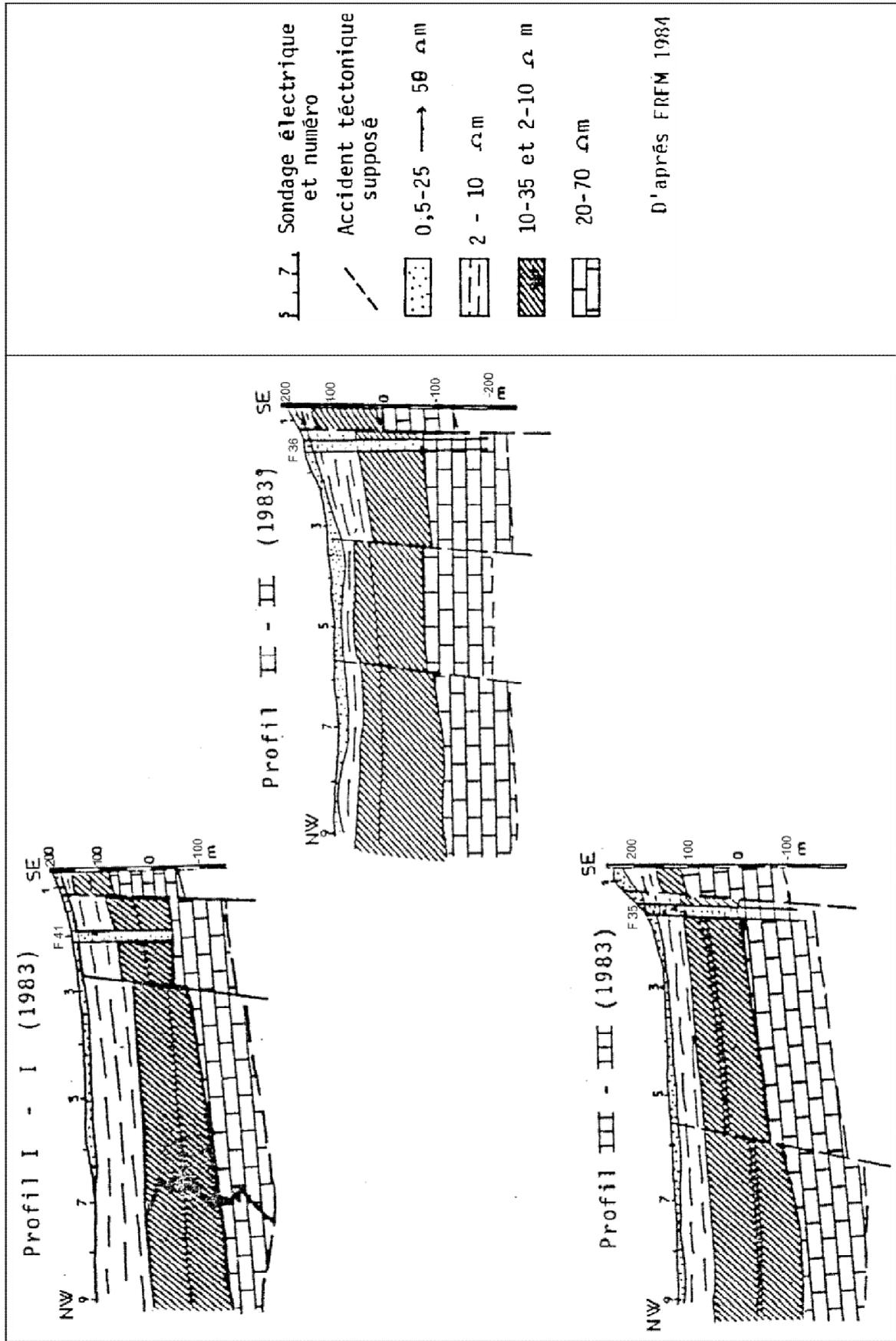


Figure n° 19 : Coupes géoélectriques de la partie orientale de la plaine de la M'leta (in Hassani M.I., 1987).

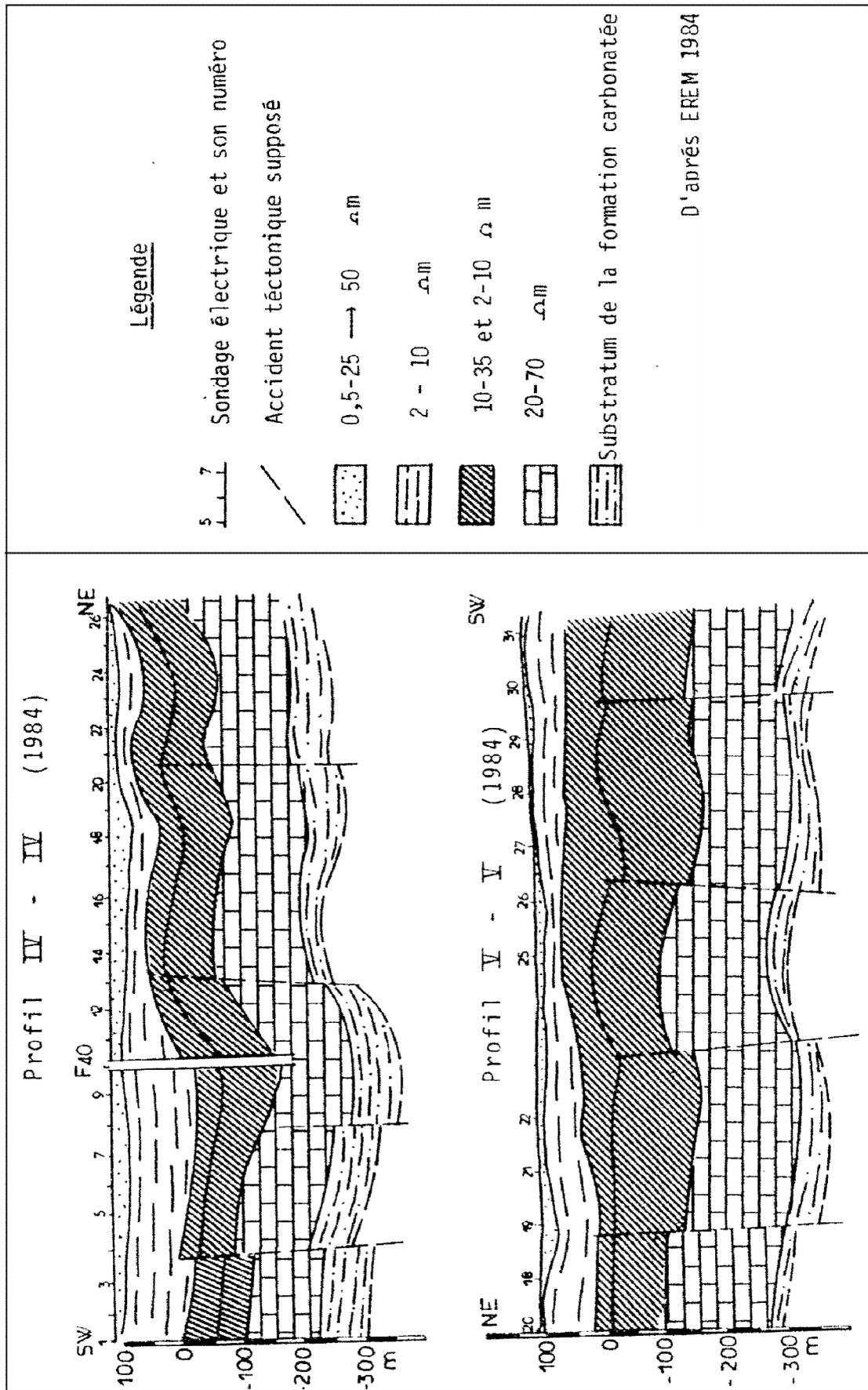


Figure n° 20 : Coupes géoélectriques de la partie orientale de la plaine de la M'leta (in Hassani M.I., 1987).

La formation carbonatée sur les courbes géoélectriques représente un niveau repère de haute résistivité comprise entre 20 et 70 Ω .m. L'augmentation avec la profondeur de cette résistivité sur la courbe SE, a permis la délimitation du toit de la formation carbonatée sur l'ensemble du secteur étudié. Ainsi le toit de cette formation repose à une profondeur s'accroissant du Sud-Est vers le Nord-Ouest de 162 à 265 m. L'épaisseur totale de cette formation n'a pu être déterminée géoélectriquement en raison de la moindre longueur de la ligne d'émission AB = 2000 m (profondeur d'investigation = 200 m).

Afin d'augmenter l'exactitude de la différenciation des intervalles les plus aquifères, la méthode des dérivées normales a été utilisée ainsi que l'interprétation semi-quantitative des courbes des sondages électriques en croix. Ceci a permis de différencier les intervalles les plus aquifères. Ainsi les intervalles les plus aquifères de la formation ont été localisés à des profondeurs comprises entre 162 et 254 m (profil IV, pqs 2-15 et profil V pqs 23-29) et entre 360 et 400 m (profil IV, 2-11 et profil V, 19-22).

Le débit spécifique de la formation aquifère tiré du coefficient d'anisotropie varie de 0,5 à 0,8 l/s pour une épaisseur de 120 m de l'aquifère.

Pour ce qui est de la minéralisation, elle a été déterminée à l'aide des sondages électriques. L'analyse des résultats des eaux de la nappe superficielle montre qu'elle est comprise entre 2,5 et 12 g/l et qu'elle diminue avec la profondeur du gisement. Quant aux eaux associées à la formation carbonatée, leur minéralisation varie entre 0,9 et 2,2 g/l.

L'établissement de la carte en isobathe de la formation carbonatée a nécessité une synthèse des données géophysiques obtenus dans la région entre 1977 et 1984. Ainsi, les courbes des sondages électriques de la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G.) et Technosel ont été réinterprétées. De la figure n° 21 ressort nettement la structure compartimentée en blocs des formations. On note un ennoyage progressif vers le Nord-Ouest de l'assise calcaro-gréseuse de l'ordre de 0 à 175 m. Sur la base de la variation des types de courbes de sondages électriques, il a été précisé une quantité de lignes tectoniques en surface. On distingue deux accidents tectoniques majeurs : l'un relatif à la partie bordière des Monts Tessala, où l'amplitude peut atteindre 20 à 110 m (profil I-I) et l'autre accident majeur suit un axe Chabet Es Sadla-Dayet El Begrat. Les accidents secondaires sont en général de direction subméridienne et leur orientation coïncide dans la plupart des cas avec le réseau hydrographique actuel.

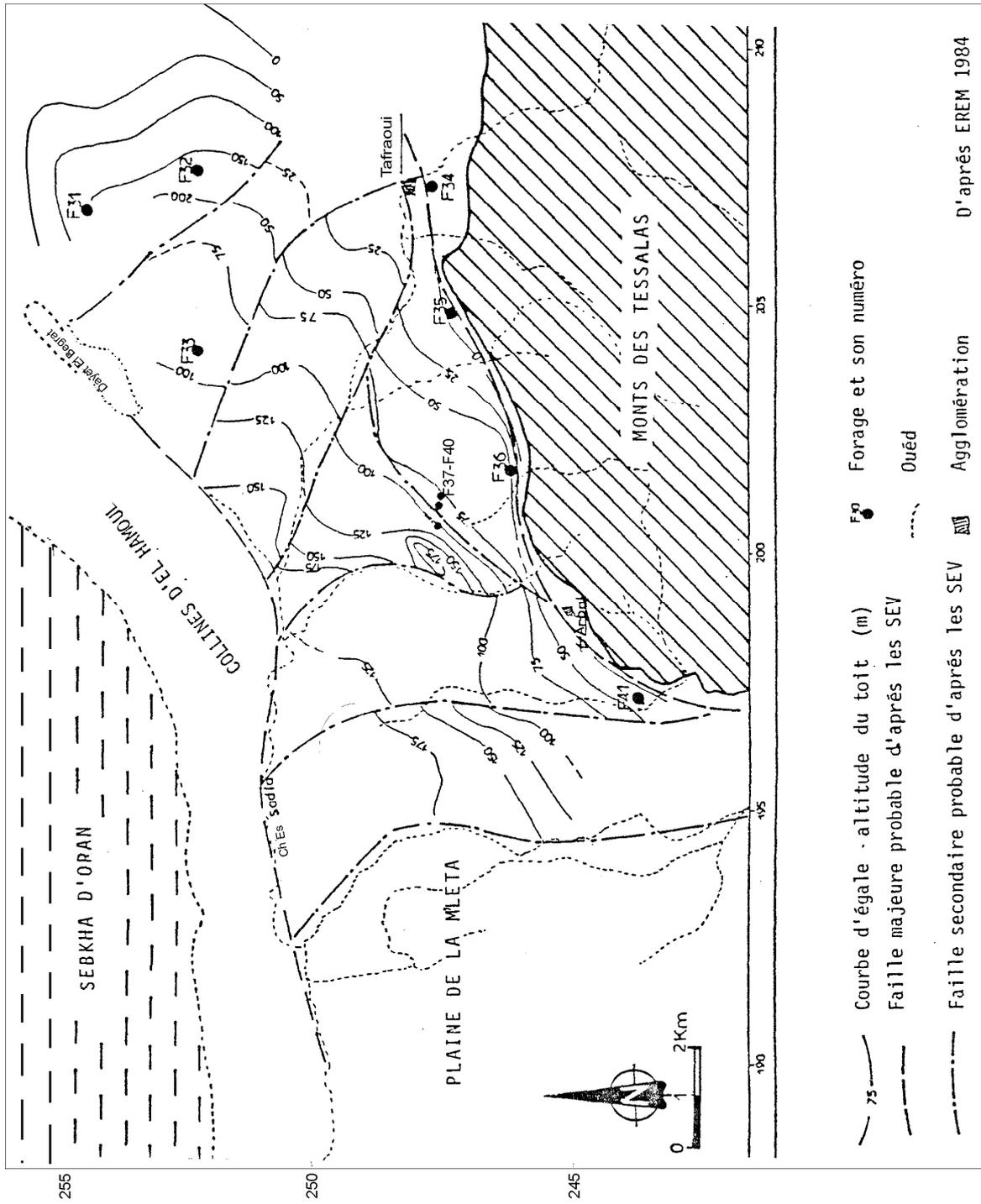


Figure n° 21 : Carte du toit du complexe carbonaté (in Hassani M.I., 1987).

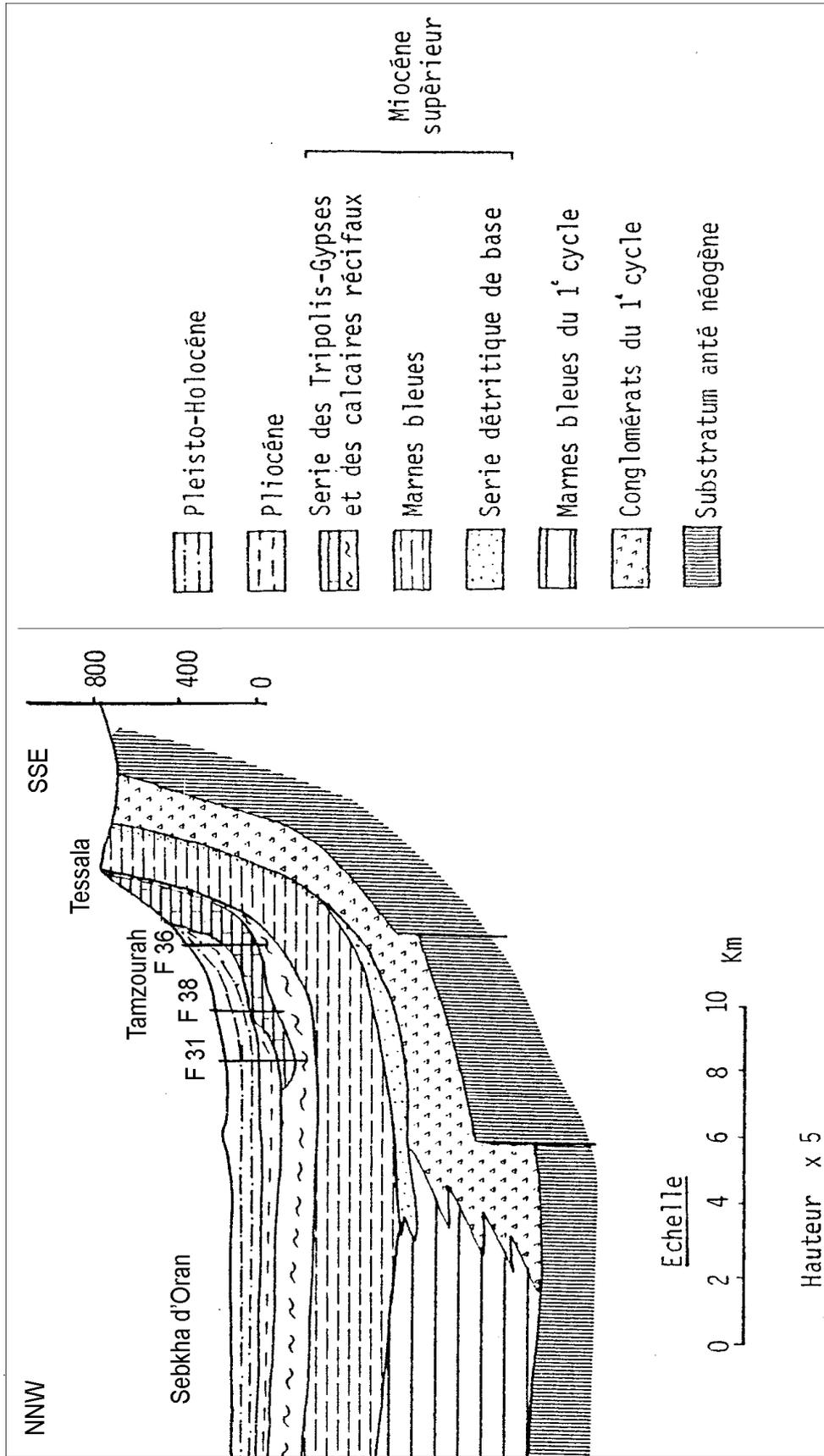


Figure n° 22 : Coupe géologique interprétative de la partie Sud du bassin de la Sebkha d'Oran (in Hassani M.I., 1987).

IV- Cadre hydrogéologique :

IV.1-Trias :

Malgré la faible extension des formations évaporitiques (diapir d'Arbal) dans les Tessala, elles jouent un rôle hydrogéologique important du fait de leur contribution à la salure des eaux de la plaine. En témoigne le résidu sec des eaux des sources qui sortent au contact de ces formations qui est très élevé. La valeur la plus importante avoisinant les 22 g/l est enregistrée pour les eaux de la source d'Aïn Kraouir (X = 220,3 Y = 244,3). Cette source émerge à quelques mètres en amont du contact des formations évaporitiques avec les marnes bleues miocènes.

IV.2- Formations jurassico-crétacées :

Ce sont des terrains généralement imperméables, où l'écoulement souterrain est négligeable. Au niveau des Tessala, les calcaires massifs liasiques du pic de Tafraoui chevauchent des formations marno-schisteuses du Crétacé (unité allochtone) et malgré l'exigüité de cet impluvium perché, quelques sources à faibles débits sortent au contact des deux formations. Parmi elles on cite :

Ain Saf Saf : (X = 207,9 Y=243, 2)

Ain Kerma : (X = 210,2 Y = 243)

Ain Belem : (X = 208,3 Y = 243,3)

Dans la partie orientale des Monts Tessala, les unités tectoniques sont formées essentiellement de marno-schistes du Crétacé, où l'écoulement souterrain y est négligeable. Toutefois, des lentilles ou bancs plus ou moins durs (calcaires, grès, etc.) peuvent s'intercaler parfois au sein de ces marno-schistes. Ces bancs peuvent parfois favoriser l'émergence de petites sources de faible débit (< 1 l/s). D'autres sources émergent au contact des unités tectoniques à la faveur de la différence des perméabilités respectives telles que :

Ain Alleg : X = 201,3 Y = 235,4

Ain Debakla : X = 195,2 Y = 233,2

IV.3- Dépôts continentaux rouges des Tessala :

Du fait de la présence d'argilites et de marnes rouges dans ces dépôts, les argiles

rouges conglomératiques continentales du premier cycle Miocène post-nappe sont considérées comme de mauvais aquifères.

IV.4- Marnes bleues du Miocène supérieur :

Pratiquement imperméables dans toute la plaine, elles assurent l'étanchéité en profondeur des murs des aquifères miocènes supérieurs sus-jacents. Dans les Tessala, elles affleurent plus largement dans la zone entre Arbal et Taфраoui. Au pic des Tessala, elles isolent parfois en parallèle avec les marnes schisteuses des lambeaux discordants de calcaires et calcaires gréseux messiniens, où se constituent des nappes perchées drainées par de nombreuses sources (voir figure n° 12).

IV.5- Calcaires marneux à tripolis :

Dans les Tessala, les affleurements de cette formation ne sont pas importants et son rôle hydrogéologique est faible dans la région.

IV.6- Calcaires récifaux :

D'une puissance variant entre 130 et 250 m, cet aquifère est de loin le plus profond et le plus intéressant du point de vue exploitation et rentabilité. En effet, il constitue avec son extension latérale un très bon réservoir de type en charge.

Cet aquifère est associé aux grès consolidés, aux sables fins du Pliocène marin et aux calcaires récifaux du Miocène supérieur. Ces derniers ont une épaisseur qui varie entre 60 et 75 m, mais qui peut atteindre 130 m par endroits (au Sud de la plaine). Elle diminue toutefois rapidement suivant des failles sub-longitudinales sous les terrains récents.

Ces calcaires sont caractérisés par une bonne perméabilité de fissure. Cette fissuration a été décelée dans la plupart des forages, où des pertes de boues partielles et totales ont été signalées dans les intervalles des calcaires. D'après l'E.R.E.M. (1984), ces fissures sont partiellement comblées par un sable quartzueux à grain fin, compliquant le captage des eaux.

Du fait de la grande fissuration des calcaires récifaux, une bonne partie des eaux de précipitation et de ruissellement s'y infiltrent. Ces dernières sont arrêtées vers le bas par un mur formé essentiellement d'intercalations de niveaux marneux à tripolis, de marnes bleues, d'argilites rouges ou de marno-schistes des unités tectoniques. Vers le haut, l'aquifère est limité soit par les marnes rouges du Pléistocène inférieur ou du Pléisto-Holocène (les alluvions plio-quaternaires), soit par les marnes bleues du Pliocène inférieur marin (Plaisancien).

L'impluvium de la nappe des calcaires s'étend entre le domaine d'Arbal à l'Ouest

et le Mont Chouki à l'Est sur une superficie de plus de 25 km². Il comprend non seulement les affleurements des calcaires, mais aussi les assises imperméables qui peuvent les suralimenter (figure n° 23).

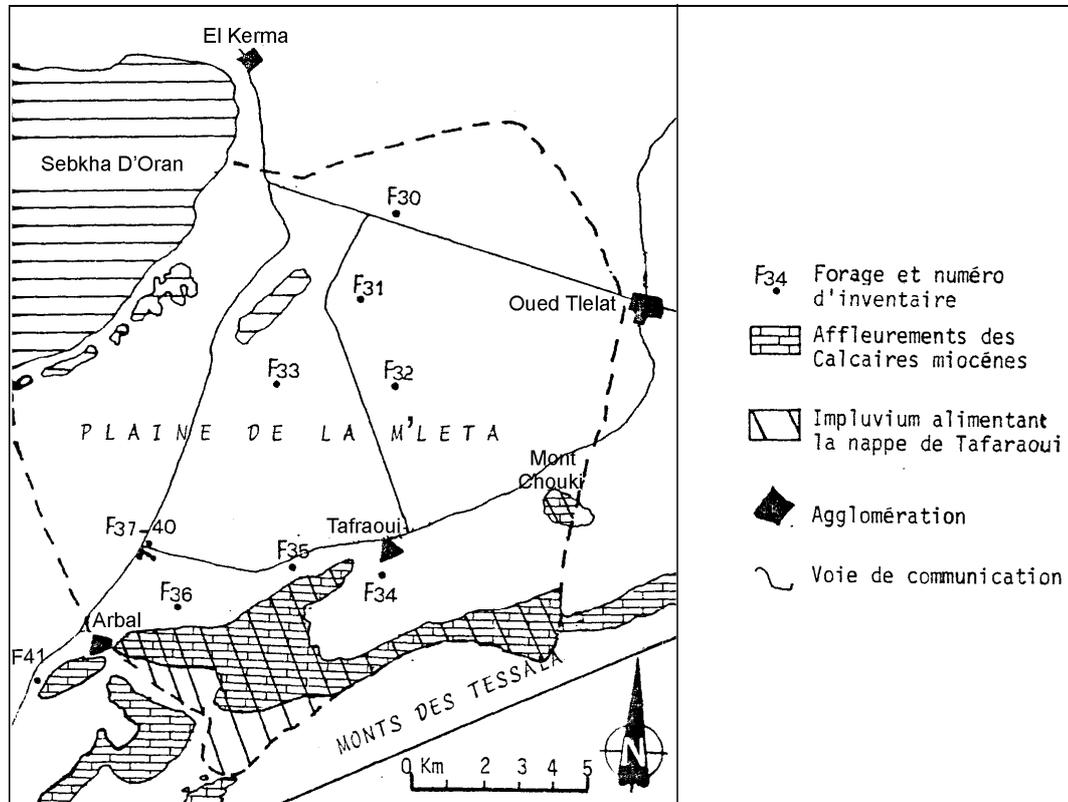


Figure n° 23 : Carte des affleurements calcaires et des forages de la plaine de la M'leta.

(Hassani M.I., 1987).

L'excédent en eau de cette nappe captive est évacué par une série de sources de débordement situées en bordure Sud de la plaine, telles que les sources d'Ain Defla (X=209.15, Y= 245.6) et Ain Den (X=197.6, Y= 244.5). Ces sources émergent au contact du toit des calcaires avec le mur des formations plio-quaternaires imperméables. Le débit de ces sources a fortement baissé depuis la sollicitation de la nappe captive par les forages. Certaines ont même tari (Hassani M.I., 1987).

La nappe des calcaires est libre au niveau des affleurements (Monts Tessala et Djebel Murdjadjo). Elle devient captive par contre en plaine, sous les dépôts post-nappe peu perméables (les alluvions plio-quaternaires). Ces dépôts récents mettent le complexe en charge et semblent former une bonne couverture étanche qui protège la nappe profonde et empêche sa pollution et son intercommunication avec des eaux polluées de la surface. Cette nappe captive est fortement ascendante. Sa charge varie de 159 m vers le Nord-Ouest de la plaine (F35)

jusqu'à 254 m au centre de la plaine (F40). Ainsi, la hauteur moyenne de cette charge peut être estimée à 192 m (figure n° 24 et Tableau n° 09).

Tableau n° 09 : Caractéristiques de l'aquifère carbonaté capté par les forages de la plaine de la M'leta. (Hassani M.I., 1987).

N° du forage	Côte du forage en m	Profondeur en m	Côte du mur de l'aquifère en m	Côte du toit de l'aquifère en m	Puissance de l'aquifère en m	Prof. du N.S. par rapport au sol en m	Côte du N.S en m	Hauteur de la charge en m
F31	106	501	< 297	< 228	69	14,5	91,5	319,5
F34	168	120	?	> 118,8	> 70	?	?	?
F35	151,75	289	?	< 37,95	> 100,1	30,6	121,15	159,10
F36	161,03	348	?	< 75,07	> 111,9	53,67	107,35	182,3
F37	108,76	360	< 211,24	< 77,24	134,0	13,37	95,39	172,65
F38	107,31	390	< 212,69	< 78,68	134,0	12,09	95,22	173,91
F39	104,83	273	?	< 81,17	> 87	9,63	95,20	176,37
F40	102,52	296	?	< 159,48	< 159,48	7,98	94,54	254,02

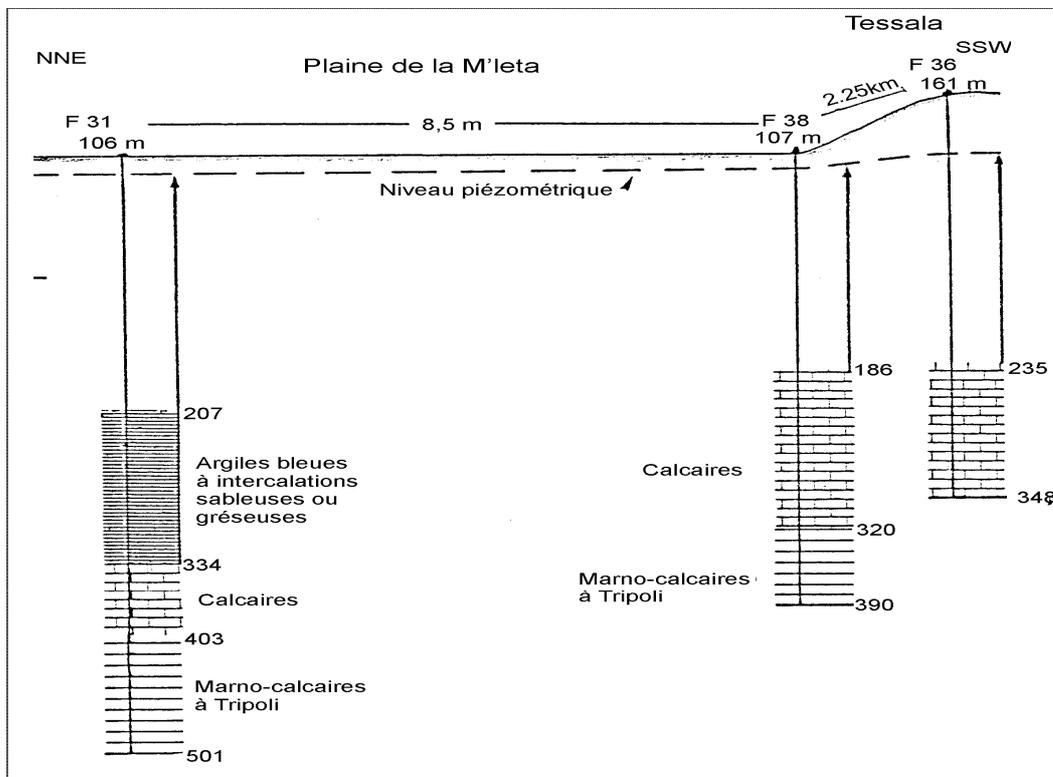


Figure n° 24 : Charge hydraulique de la nappe par rapport aux formations aquifères de la plaine de la M'leta (Hassani M.I., 1987).

IV.7- Pliocène inférieur :

Dans la plaine de la M'leta, le Pliocène inférieur est parfois essentiellement marneux (F39 et F40) et aucune nappe n'y est présente. En bordure du bassin, il est de faciès calcaire (F34) avec une épaisseur réduite (< 10 m) et un débit insignifiant. Parfois la série est marneuse débutant par des niveaux gréseux superposés aux calcaires miocènes (F33, F32, F31). La nappe est alors commune aux deux formations (figure n° 24). Dans certains cas, des intercalations gréseuses sont signalées dans la série marneuse (F30).

IV.8- Pléistocène inférieur :

Les formations du pléistocène inférieur sont essentiellement continentales dans la plaine de la M'leta. A prédominance d'argile rouge, elles sont considérées comme de mauvais aquifères. Néanmoins, en bordure du bassin, au milieu de l'affleurement des argilites, des niveaux conglomératiques épais (ravin de Bou Seter) s'intercalent. Ces conglomérats cimentés par un matériel grésosableux, bien que d'extension réduite au Nord, passent en profondeur et sont d'assez bons aquifères. Le forage F35 a recoupé ces conglomérats à 42.6 m de profondeur (avec une cote égale à 109.75 m) et sur une épaisseur de 46 m.

IV.9- Nappe intermédiaire :

A des profondeurs variant de 85 à 200 m, des niveaux aquifères représentés par des argiles sableuses et graveleuses à galets calcaires sont observés (voir logs géologiques en annexe 2). Ces formations plio-quatérnaires forment d'assez bons aquifères et sont captés par un bon nombre de forages creusés par des particuliers dans des fermes, dont la profondeur varie entre 90 et 150 m (voir tableau n° 16, chapitre 2).

IV.10- Aquifère alluvial :

Dans la plaine de la M'leta, l'aquifère alluvial est constitué de deux niveaux. Le premier formé d'alluvions récentes de couleur grise et de composition argilo-limoneuse souvent salée et gypseuse (Holocène). Le deuxième niveau, plus ancien, est formé de limons caillouteux de couleur rougeâtre affleurant aux alentours de Tamzourah et d'Ain Larbaa.

L'aquifère alluvial contient une nappe occupant la totalité de la plaine. Elle est captée par de nombreux puits domestiques à faible débit et dont la profondeur varie de 1 à 30 m.

IV.11- Etude piézométrique de la nappe alluviale :

Dans la plaine de la M'leta, il faut se garder de faire l'erreur de parler de nappe libre unique. En effet, les dépôts sablonneux ou limoneux quaternaires sont irrégulièrement

aquifères, surtout sur le bord Sud formé de cônes de déjection. Cette sédimentation entraîne un compartimentage de la plaine, ayant comme corollaire hydrogéologique directe, la création d'autant de niveaux aquifères que de niveaux relativement perméables. Cependant, l'eau (par circulation lente entre les différents niveaux) et les pressions finissent par s'y transmettre d'où l'utilisation du terme de nappe.

Dans le cadre de cette étude, nous avons disposé d'une carte piézométrique établie en avril 1986 (Hassani M.I., 1987) et d'une série de données relatives à une campagne piézométrique réalisée par l'A.N.R.H au mois de mars 2001. De cette dernière série de données, nous avons établi une deuxième carte piézométrique (figures n° 25 et 26).

Toutes les côtes piézométriques utilisées pour les deux cartes sont relevées au niveau des puits appartenant à la nappe alluviale superficielle.

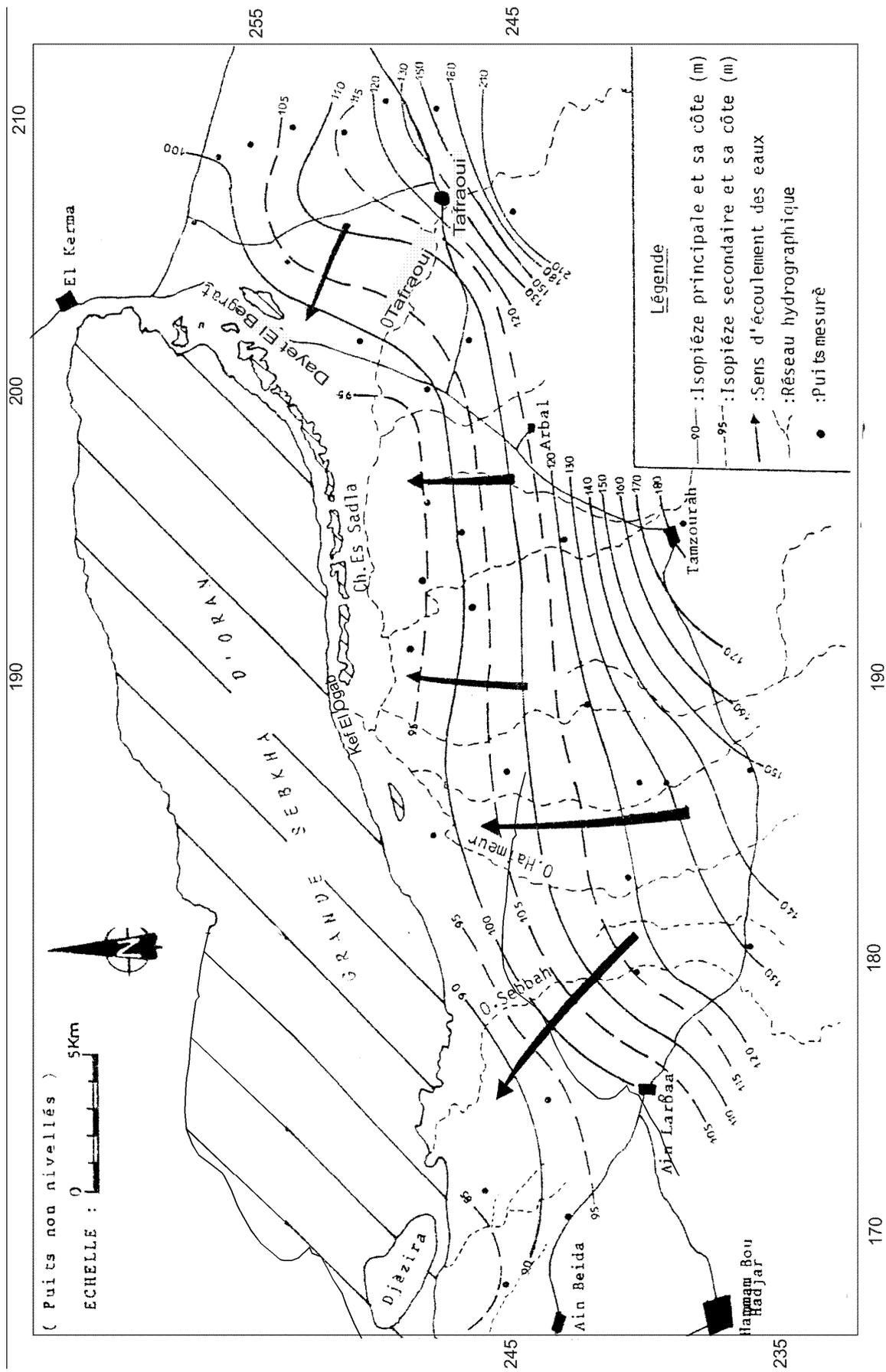


Figure n° 25 : Carte piézométrique de la nappe libre de la plaine de la M'leta (Campagne d'avril 1986, Hassani M.I., 1987)

(Données brutes en annexe 10).

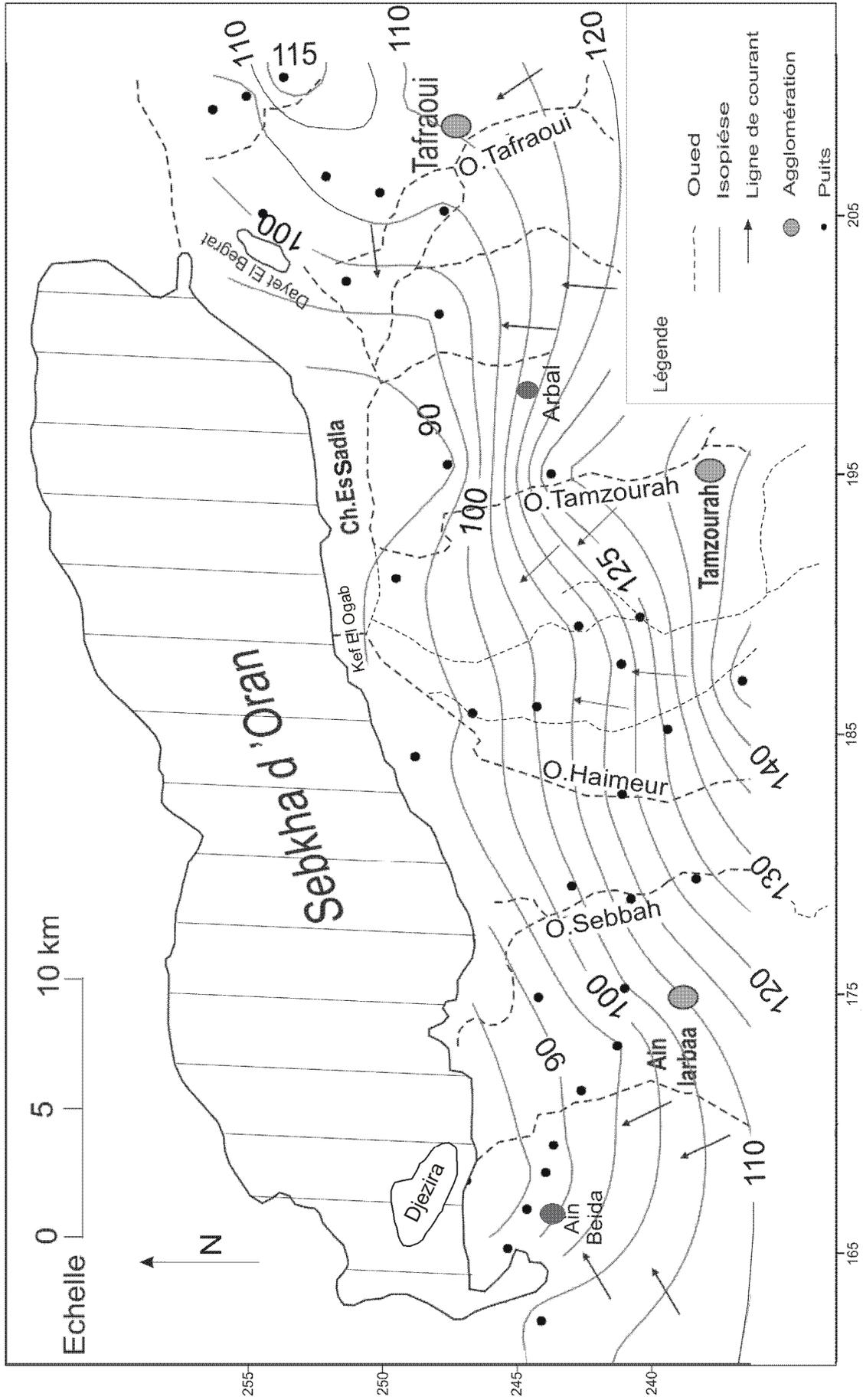


Figure n° 26 : Carte piézométrique de la nappe libre de la plaine de la M'leta (mars 2001).

(Données brutes en annexe 11).

De l'observation des deux cartes piézométriques (figures n° 25 et 26), il se dégage que les courbes piézométriques sont à faible concavité et s'orientent vers l'aval, déterminant ainsi, une nappe radiale à écoulement divergent vers le Nord.

On peut distinguer trois grandes zones :

La zone de Tafraoui, où l'écoulement se fait, soit subparallèlement à l'Oued Tafraoui, soit vers la Dayet El Begrat.

Vers l'Est, une autre zone s'individualise entre Arbal et l'Oued Haimeur. L'écoulement souterrain se dirige en direction de l'oued Kef El Ogab. Cette deuxième zone correspondrait donc à une zone de drainage des eaux souterraines.

La région d'Ain Larbaa peut être considérée comme la troisième zone. Dans cette partie de la nappe, l'écoulement est subparallèle à l'Oued Sebbah et le drainage se fait en direction de la partie Sud-Ouest de la Grande Sebkhah d'Oran (région d'El Djezira).

Des deux cartes, une baisse du niveau piézométrique de plus de 20 m est enregistrée entre les deux périodes (mars 1986 et mars 2001) en amont de la nappe. En aval, le niveau se stabilise entre 90 et 95 m.

L'alimentation de la nappe alluviale de la plaine de la M'leta se fait en grande partie à partir des eaux météoriques s'infiltrant tout au long de l'impluvium, mais aussi à partir des eaux des Oueds dévalant des Tessala. Ces eaux, bénéficiant de la bonne perméabilité des formations alluvionnaires (formées d'éléments grossiers), s'infiltrèrent au niveau des cônes de déjection en périodes de hautes eaux.

Une autre part de l'alimentation se fait latéralement au niveau de la zone de Tafraoui et plus précisément à partir des affleurements calcaires. Cela est facilement décelable sur les cartes, où les isopièzes leur sont subparallèles. Ce qui n'est pas le cas en allant vers l'Ouest, notamment entre Tamzourah et Arbal et au Sud-Est d'Ain Larbaa, où les isopièzes sont subperpendiculaires aux affleurements calcaires, indiquant ainsi, une contribution nulle à l'alimentation.

IV.12- Etude des caractéristiques hydrodynamiques :

Les principaux paramètres hydrodynamiques traités dans cette étude sont la transmissivité T et le coefficient d'emmagasinement S . Les équations utilisées pour le traitement analytique des essais de pompage sont des relations donnant le rabattement en fonction du débit et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. Les essais de pompage comprennent les mesures de la descente et de la remontée du niveau dynamique. La méthode de Jacob est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'interprétation des essais de pompage.

En effet, l'approximation logarithmique de Jacob est une méthode qui s'appuie sur la formule de Theis. Toutefois, les conditions de son application sont plus restrictives. Ainsi, lorsque le temps de pompage est suffisamment grand, le développement en série de l'équation de Theis se réduit à la formule de Jacob qui s'énonce comme suit:

$$\Delta = (0,183Q) / (T) \cdot (\text{Log } 2, 25 t T) / (R^2 S)$$

où :

Δ : Rabattement en m,

Q : Débit constant de pompage en m³/s,

t : Temps de pompage en s,

R : Distance à la quelle on mesure le Rabattement

T : Transmissivité en m²/s,

S : Coefficient d'emmagasinement.

IV.12.1- Premier mode opératoire :

Sur un diagramme semi-logarithmique, les temps de pompage sont portés en abscisse logarithmique et en ordonnée arithmétique les rabattements correspondants. Cela détermine une droite de forme :

$$y = ax + b \text{ avec } C = 0,183Q / T$$

C représentant la pente de cette droite pour un cycle logarithmique,

T est égale alors à $0.183Q / C$

La droite tracée coupe l'axe des abscisses au point t_0 , où le rabattement Δ est nul. On obtient alors l'égalité suivante :

$$0 = (0,183Q) / (T) \cdot (\text{Log } 2, 25 t_0 T) / (R^2 S) ,$$

d'où
$$S = (2,25 T t_0) / R^2.$$

Ce mode opératoire a été appliqué au puits Carillot (X = 194,8 ; Y = 246,1), captant l'aquifère alluvial et au forage "OT2" (F33) (X =204 m ; Y =252,35), captant la nappe des calcaires gréseux de la plaine de la M'leta.

IV.12.1.1- Puits Carillot :

Pour le puits Carillot, seules les parties terminales des courbes sont représentatives et ont été prises en compte (figure n° 27).

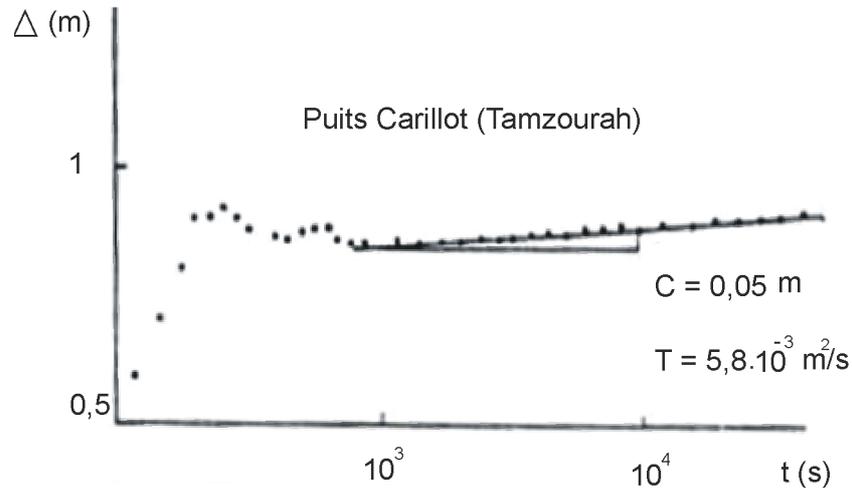


Figure n° 27 : Courbe interprétative de l'essai de pompage (descente) du puits Carillot d'après la méthode de Jacob (Hassani M.I., 1987).

On remarque une augmentation assez faible des rabattements au cours du temps de pompage. Cette augmentation détermine une droite de pente $C = 0,05$ m qui a permis d'estimer la valeur de la transmissivité à $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ au niveau du puits Carillot.

IV.12.1.2- Forage OT2 (F33) :

De la courbe interprétative du forage OT2 (figure n° 28), deux droites de pentes différentes sont observées. Une première avec une pente égale à 3 m et une deuxième avec une pente plus raide de l'ordre de 8.2 m. La différence de pente peut être due au fait qu'au début du pompage, les eaux sollicitées sont celles présentes dans le forage lui-même avant que la nappe ne prenne le relais.

Vers la fin, la courbe interprétative présente un palier de stabilisation. Ce dernier est peut être le résultat d'un phénomène de drainance de l'aquifère semi captif sus-jacent (ensemble argilo-sableux).

Etant donné que les mesures de rabattement ont été faites dans les deux ouvrages pompés, le calcul du coefficient d'emménagement ne peut être envisagé.

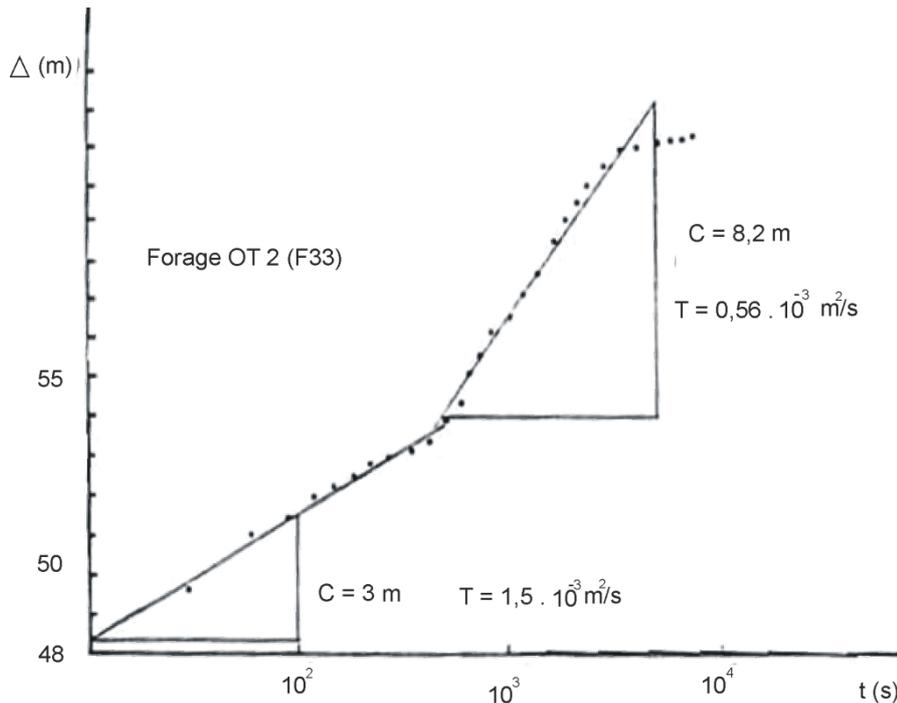


Figure n° 28 : Courbe interprétative de l'essai de pompage (descente) du forage OT2 d'après la méthode de Jacob (Hassani M.I., 1987).

IV.12.2- Deuxième mode opératoire :

Ce mode a été appliqué pour les trois forages F38, F39 et F40, servant de piézomètres pour le forage de pompage F37 (figure n° 23).

La méthode consiste à porter toutes les mesures des trois piézomètres sur un seul papier semi-log avec le rabattement en fonction de t/r^2 (t/r^2 porté sur l'axe logarithmique). On trace une ligne droite s'ajustant sur ces points et l'on détermine son intersection avec l'axe des rabattements. Les coordonnées en ce point sont :

$$\Delta = 0 \text{ et } t/r^2 = (t/r^2)_0.$$

On détermine les valeurs de $(t/r^2)_0$ et Δ et on déduit T et S à l'aide des formules :

$$T = (0,183Q) / C \Delta \quad \text{et} \quad S = 2,25 T (t/r^2)_0$$

L'application de cette méthode a permis de tracer des courbes interprétatives des pompages d'essais pour chaque forage (figure n° 29).

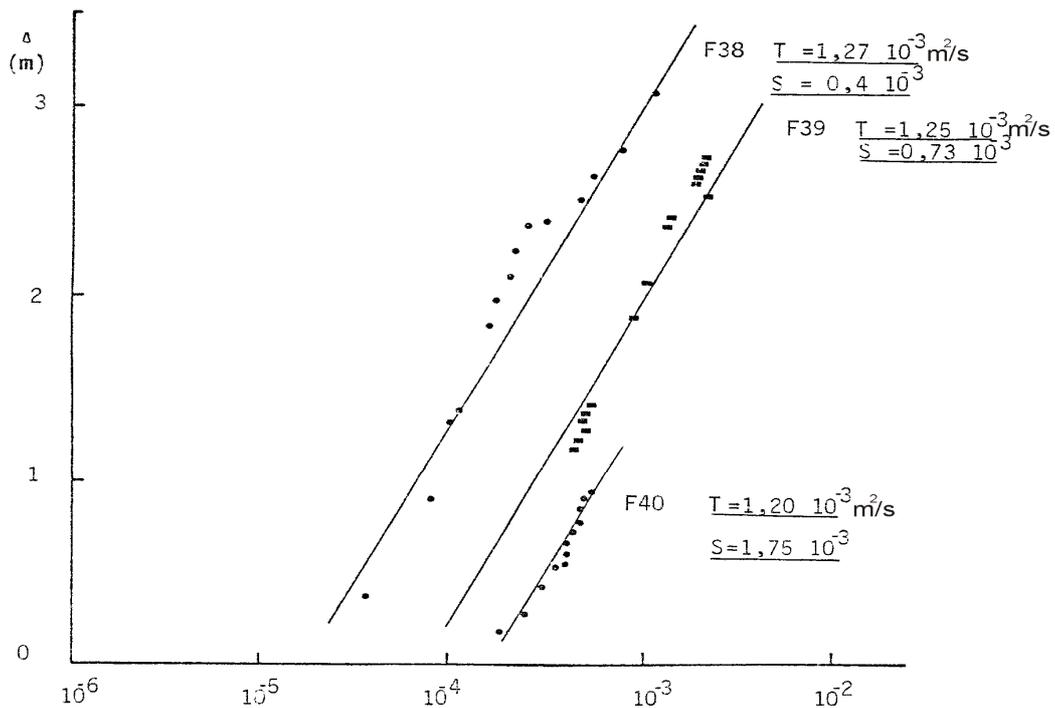


Figure n° 29 : Courbes interprétatives des essais de pompage (descente) des forages F38, F39 et F40, d'après la méthode de Jacob (Δ en fonction $\log t/r^2$). (Hassani M.I., 1987).

Tableau n°10: Valeurs de T et S et aquifères captés pour tous les points d'eau (D'après la méthode de Jacob).

Points d'eau	T en m^2/s	S	Aquifère
Puits Carillot	$5,8 \cdot 10^{-3}$		Alluvions (M'leta)
OT2 (F33)	$0,56 \cdot 10^{-3}$		Complexe mio-pliocène
F38	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	
F39	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$0,73 \cdot 10^{-3}$	
F40	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	

Du tableau n° 10, les valeurs de la transmissivité relatives au complexe mio-pliocène sont nettement inférieures à celle de la nappe libre (granulométrie plus grossière des alluvions quaternaires comparés au calcaires, calcaires gréseux mio-pliocène). Les valeurs du coefficient d'emmagasinement montre une bonne porosité efficace des formations aquifères du complexe mio-pliocène.

V- Conclusion :

La région étudiée est caractérisée par un climat semi-aride nonobstant sa proximité de la mer. En raison de l'influence des zonalités verticales et horizontales, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 300 mm et sont caractérisées par une irrégularité et une torrencialité importante, d'où les variations interannuelles et inter-saisonnières relativement importantes enregistrées dans la région.

L'évaporation a un effet limité en hiver du fait de la coïncidence de la saison des pluies avec la période froide. Pendant la saison chaude, une grande partie des eaux du ruissellement sont remobilisées par l'évaporation. Ainsi, les intervalles humides et secs se manifestent pendant de longues périodes consécutives.

Dans la plaine de la M'leta, l'infiltration des eaux de précipitation est assez appréciable en raison des faibles pentes caractérisant les terrains. Dans les Monts Tessala par contre, la combinaison des fortes pentes, de la faible couverture végétale et de la forte densité du réseau hydrographique contribue à la mobilisation de quantités très importantes d'eau de précipitations qui se transforment en torrents boueux (crues dévastatrices).

L'étude géologique du bassin de la Grande Sebkhah d'Oran a permis de distinguer deux grands ensembles, à savoir, un substratum anté à synchro-nappe représenté au Nord par les massifs schisteux autochtones à para-autochtones (Djebel Murdjadjo) et un complexe d'unités allochtones ou nappes (Monts de Tessala). Ces deux ensembles sont séparés par un bassin comblé d'une importante sédimentation post-nappe.

La tectonique est contrôlée par des phénomènes de cisaillement et de collision qui engendrent une tectonique polyphasée. Néanmoins, la compression devient prédominante arrivé aux dépôts des formations post-nappe.

L'étude géophysique de la plaine de la M'leta a permis de suivre en profondeur l'aquifère carbonaté miocène et de confirmer le compartimentage des formations déjà décelées par la corrélation des forages de cette zone.

L'étude géologique a permis ainsi de caractériser trois formations qui jouent un rôle hydrogéologique important au niveau de la plaine de M'leta. Ces formations sont représentés par les calcaires, calcaires gréseux du Mio-Pliocène, les niveaux argileux sableux à galets calcaires du Plio-Quaternaires et les alluvions récentes du Quaternaire.

La région de la plaine de la M'leta ne comprend que deux aquifères majeurs connus. Le premier forme une nappe libre irrégulièrement saturée en eau, d'une faible puissance variant de 3 à 30 m, captée par des puits à faibles débits.

Le deuxième aquifère présent dans cette région est l'aquifère du complexe mio-pliocène. Ce dernier se caractérise par des formations de grande extension, tant à l'affleurement qu'en profondeur, mais aussi par une épaisseur assez appréciable et un taux de fracturation élevé, facilitant la circulation des eaux et favorisant leur emmagasinement.

Un troisième aquifère peut être signalé dans la plaine de la M'leta, à savoir celui de la nappe intermédiaire. Cet aquifère représenté par les niveaux plio-quadernaires reste mal connu quant à son extension et à son épaisseur. Il apparaît néanmoins que ces niveaux sont discontinus et irrégulièrement aquifères. Toutefois, seule une étude géophysique détaillée de la région saura le confirmer.

L'étude piézométrique de la plaine de la M'leta a montré que l'écoulement de la nappe alluviale s'effectue du Sud vers le Nord. C'est-à-dire, des Monts Tessala vers la Grande Sebkhah en passant par la plaine. La piézométrie a également mis en évidence les principales zones d'alimentation de la nappe libre. Cette alimentation se fait, soit à partir des eaux des crues des oueds (au niveau des cônes de déjection, là où la granulométrie est assez grossière), soit à partir des eaux météoriques (s'infiltrant dans les alluvions quand la granulométrie des terrains le permet). La recharge de la nappe libre à partir des affleurements calcaires reste assez limitée dans la plaine de la M'leta.

Les transmissivités estimées dans notre secteur d'étude sont considérées comme assez représentatives de celles des autres puits et forages de la plaine de la M'leta. Ainsi, elles varient de $0,38 \cdot 10^{-3}$ à $1,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour les calcaires miocènes et de $1,5 \cdot 10^{-3}$ à $5,8 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour les alluvions plio-quadernaires. Pour ce qui est des coefficients d'emmagasinement relatifs aux calcaires miocènes, ils varient de $0,4 \cdot 10^{-3}$ à $1,17 \cdot 10^{-3}$.

Au final, on peut dire que la combinaison des facteurs climatiques (tels que : la semi aridité du climat, l'irrégularité des précipitations, le prolongement de la période sèche favorisant l'évaporation intense), morphologiques et géologiques (réseaux hydrographique mal hiérarchisé, provoquant la multiplication des cours d'eau secondaires dont les bassins versant sont parfois entièrement formés d'affleurements salifères) aura sûrement un effet très important sur l'acquisition de la minéralisation des eaux de la plaine de la M'leta.

Chapitre 2
Hydrochimie

Introduction :

L'étude hydrochimique a concerné les puits et les forages implantés dans la plaine de la M'leta et elle s'est basée sur deux séries de données : une série relative à la campagne effectuée par l'A.N.R.H en mars 1986, regroupant 34 puits et 6 forages ; la deuxième série a été obtenue lors de la campagne que nous avons-nous même réalisé en octobre 2011, sur les deux journées du 03 et du 06 octobre. Les 13 forages qui ont fait l'objet de la campagne d'octobre 2011 ont été choisis en tenant compte de deux conditions majeures :

- avoir la meilleure répartition possible des forages,
- inclure le plus grand nombre de forages en activité.

La campagne d'octobre 2011 a ciblé deux catégories de forages : des forages exploités pour des besoins domestiques (forages gérés par la Société de l'Eau et de l'Assainissement d'Oran S.E.O.R.) et des forages destinés à l'irrigation et à l'abreuvement du bétail (forages creusés par des particuliers au niveau des fermes). Concernant la nappe libre, nous n'avons échantillonné que deux puits captant cette nappe.

L'échantillonnage s'est fait en utilisant des bouteilles d'un litre et demi (deux bouteilles pour chaque point échantillonné) et les échantillons collectés ont été analysés au laboratoire d'hydrochimie de l'A.N.R.H. d'Oran.

La conductivité électrique, le pH et le résidu sec (paramètres physiques), ont été mesurés respectivement en utilisant : un conductivimètre HD3406.2 Delta Ohm ($\pm 0,5\%$), un pH mètre de paillasse WTW-720 ($\pm 0.1\%$) et une étuve falc.

Les concentrations des éléments chimiques : Ca, Mg, HCO_3 et Cl ont été calculées par volumétrie. Les teneurs en sodium et en potassium ont été quant à elles estimées à l'aide d'un photomètre à flamme DIEIT CORNING-410. Le dosage des sulfates a été fait par gravimétrie. Pour les nitrates, elles sont réduites en nitrites et ces dernières ont été calculées par un UV-visible PERKIN-ELMER-lambda 25.

Dans ce chapitre, on étudiera les principales caractéristiques physico-chimiques des :

I- eaux des principaux oueds dévalant des Monts Tessala (campagne de mars 1986),

II- eaux de la nappe libre (campagne de mars 1986 : 34 puits et campagne d'octobre 2011: 2 puits),

III- eaux des forages comprenant :

- ceux de la campagne de mars 1986 : 6 forages captant le complexe mio-pliocène,
- ceux de la campagne d'octobre 2011: 7 forages captant le complexe mio-pliocène et 6 forages captant la nappe intermédiaire.

I- Principaux oueds :

I.1- Caractéristiques physico-chimiques :

Les caractéristiques hydrochimiques des principaux oueds traversant notre secteur d'étude sont données en annexe 1.

I.1.1- Minéralisation :

La minéralisation des eaux des oueds varie de 1,8 g/l (Oued Tamzourah) jusqu'à 7,32 g/l (Oued Haimeur) (figure n° 30). Les oueds secondaires sont généralement les plus salés dans les Monts Tessala. En effet, leurs bassins versants sont parfois constitués en grande partie par des affleurements évaporitiques. Contrairement aux oueds secondaires, les cours d'eaux importants sont alimentés par un bassin versant étendu, où la proportion des affleurements salifères est réduite.

I.1.1.2- Teneur en ions :

Les teneurs en Na, Cl et SO₄ représentent près de 90% de la minéralisation totale des eaux des oueds. Ces dernières se minéralisent toutes en passant par la plaine de la M'leta. De plus, il est remarqué que l'abondance des affleurements évaporitiques dans le bassin versant d'un oued, est directement liée aux valeurs élevées du résidu sec caractérisant les eaux y circulant. Ceci est dû à l'altération très rapide des évaporites.

I.1.1.3- Faciès caractéristiques :

a/ Eaux chlorurées sodiques et sulfatées :

A leur sortie en plaine, la quasi-totalité des oueds dévalant des Monts Tessala présentent ce faciès.

$$r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3,$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}$$

b/ Eaux sulfatées sodiques et chlorurées :

Ce faciès caractérise en particulier les oueds de Tamzourah, d'El Rassoul et d'El Haimeur.

$$r \text{SO}_4 > r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3,$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}.$$

II- Nappe libre:

II.1- Traitement des données de la campagne de mars 1986:

Les résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe libre relatifs à la campagne de mars 1986 sont présentés en annexe 2.

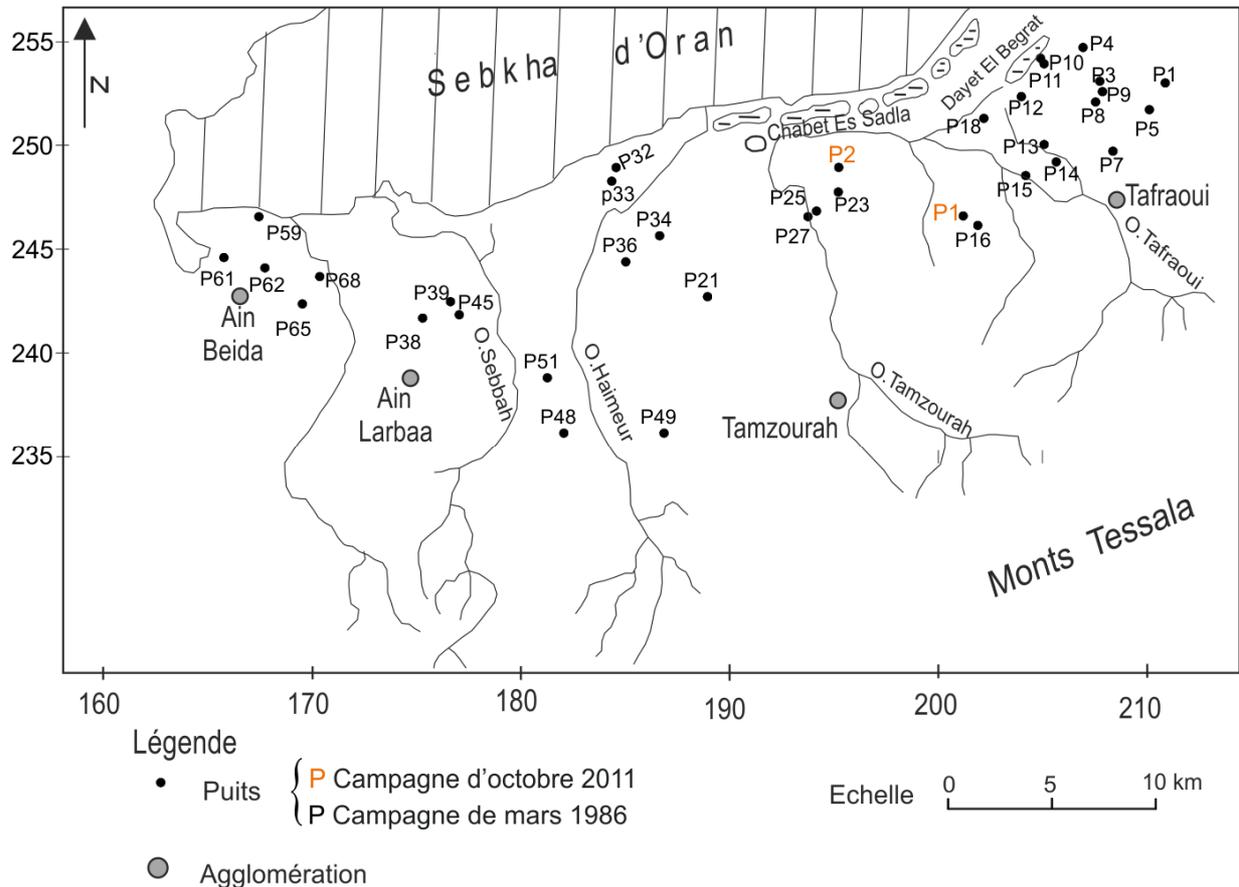


Figure n° 30 : Localisation des puits captant la nappe libre de la plaine de la M'leta.

II.1.1- Paramètres physiques :

Du tableau n° 11, les eaux ont un pH presque neutre et sont très minéralisées, surtout au niveau du puits P11. Ainsi, du point de vue minéralisation, les eaux de la nappe libre sont de mauvaise qualité.

Tableau n° 11: Paramètres physiques.

Paramètres	Minimum	Puits	Maximum	Puits	Moyenne
pH	7,4	P48	8,5	P23	7,85
Conductivité ms/cm	3	P36	17,75	P11	8,53
Minéralisation (g/l)	2,7	P68	9,24	P11	5
Résidu sec (g/l)	2,7	P59	11,7	P11	5,72

II.1.2- Paramètres chimiques:

L'analyse du tableau n° 12 nous permet de faire les remarques suivantes :

- les anions et les cations prédominants sont respectivement les ions chlorures et les ions sodium.
- les ions sulfates présentent également des teneurs élevées et viennent en seconde position après les chlorures.
- les ions calcium, magnésium et bicarbonates, étant généralement des ions résultant des précipitations et des dissolutions, sont toujours en interactions (équilibres calcocarboniques). Dans notre secteur d'étude, leurs valeurs sont très rapprochées.
- les teneurs en nitrates dépassent pour certains échantillons la norme de l'OMS (l'Organisation Mondiale de la Santé), ainsi que la norme algérienne, fixées toutes les deux à 50 mg/l.
- les plus faibles teneurs sont celles relatives à l'ion potassium. Cependant, elles peuvent atteindre des pics assez remarquables, à l'image de la valeur observée au puits numéro 33.

Tableau n° 12 : Paramètres chimiques.

Ions (mg/l)	Minimum	Puits	Maximum	Puits	Moyenne
Na	610	P45	2738	P11	1200
K	7	P12	103	P33	26
Ca	80	P59	620	P11	305
Mg	8	P68	504	P33	235
Cl	1054	P23	3185	P4	1880
SO ₄	154	P68	3648	P11	1253
HCO ₃	5.2	P15	676	P23	353
NO ₃	3,7	P38	95	P68	45

II.1.3- Représentation graphique :

Les faciès hydrochimiques sont généralement utilisés pour designer des types d'eaux qui ont des attributs géochimiques différents. Ils sont d'un grand apport lorsqu'il y a lieu de comparer la distribution et les origines des eaux souterraines. Dans le cas d'une prédominance claire d'un ion particulier (> 50% du total des cations ou des anions), le faciès peut alors être identifié sur la base du constituant prédominant. Dans le cas contraire, les plus grandes valeurs des quantités en réactions, des cations et des anions sont prises en considération pour définir le type d'eau à caractériser. Selon la méthode semi-log de Schoeller-Berkaloff et celle de Piper, les analyses chimiques des eaux de la nappe libre ont été graphiquement

représentées (figures n° 31-33). Des diagrammes Schoeller-Berkaloff obtenus, la majorité des échantillons présentent deux pôles de minéralisation, Na et Cl. Toutefois, on note la présence du faciès des eaux sulfatées sodiques au niveau des puits P18 et P23.

a/ Eaux chlorurées sodiques :

Ce faciès caractérise la majorité des eaux captées par les puits dans la plaine. Il est exprimé par les formules caractéristiques suivantes :

$$\begin{array}{ll} r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3 & \text{ou} & r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 \\ r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca} & & \text{ou} & r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Ca} > r \text{Mg} \end{array}$$

On distingue deux sous classes dans ce faciès :

- la première caractérise le plus grand nombre d'échantillons (20).

$$\begin{array}{l} r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3 \\ r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca} \end{array}$$

- la deuxième sous classe représente des eaux toujours chlorurées, sauf que leurs teneurs en bicarbonates augmentent avec la minéralisation aux dépens des sulfates.

$$\begin{array}{l} r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4, \\ r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}. \quad \text{(P5)} \\ \text{ou} \quad r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Ca} > r \text{Mg}. \quad \text{(11 puits).} \end{array}$$

b/ Eaux sulfatées sodiques :

Ces eaux ne sont captées que par les puits P18 et P23. Leur formule caractéristique s'écrit comme suit :

$$\begin{array}{l} r \text{SO}_4 > r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3, \\ r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}. \end{array}$$

Diagramme de Piper

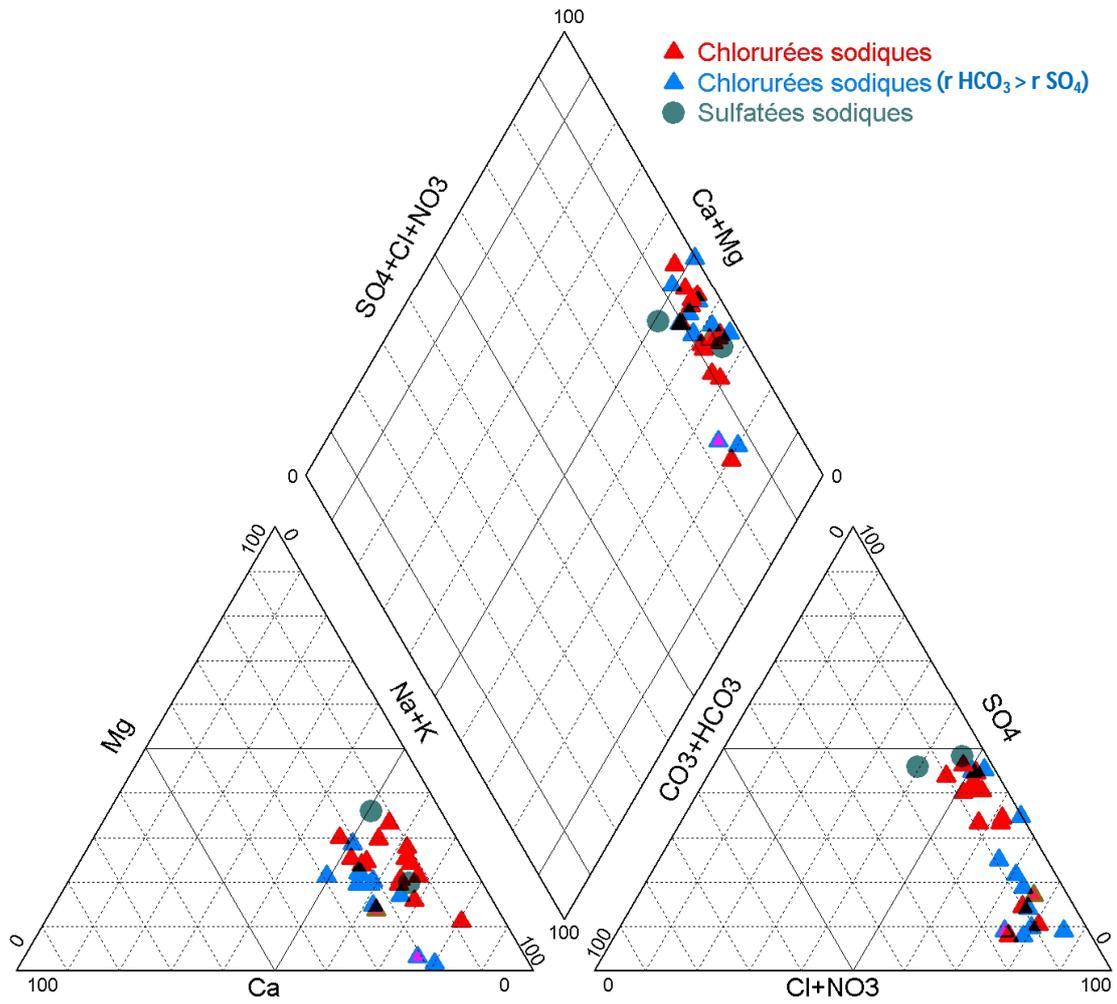


Figure n° 31: Faciès hydrochimiques des eaux de la nappe libre (campagne de mars 1986).

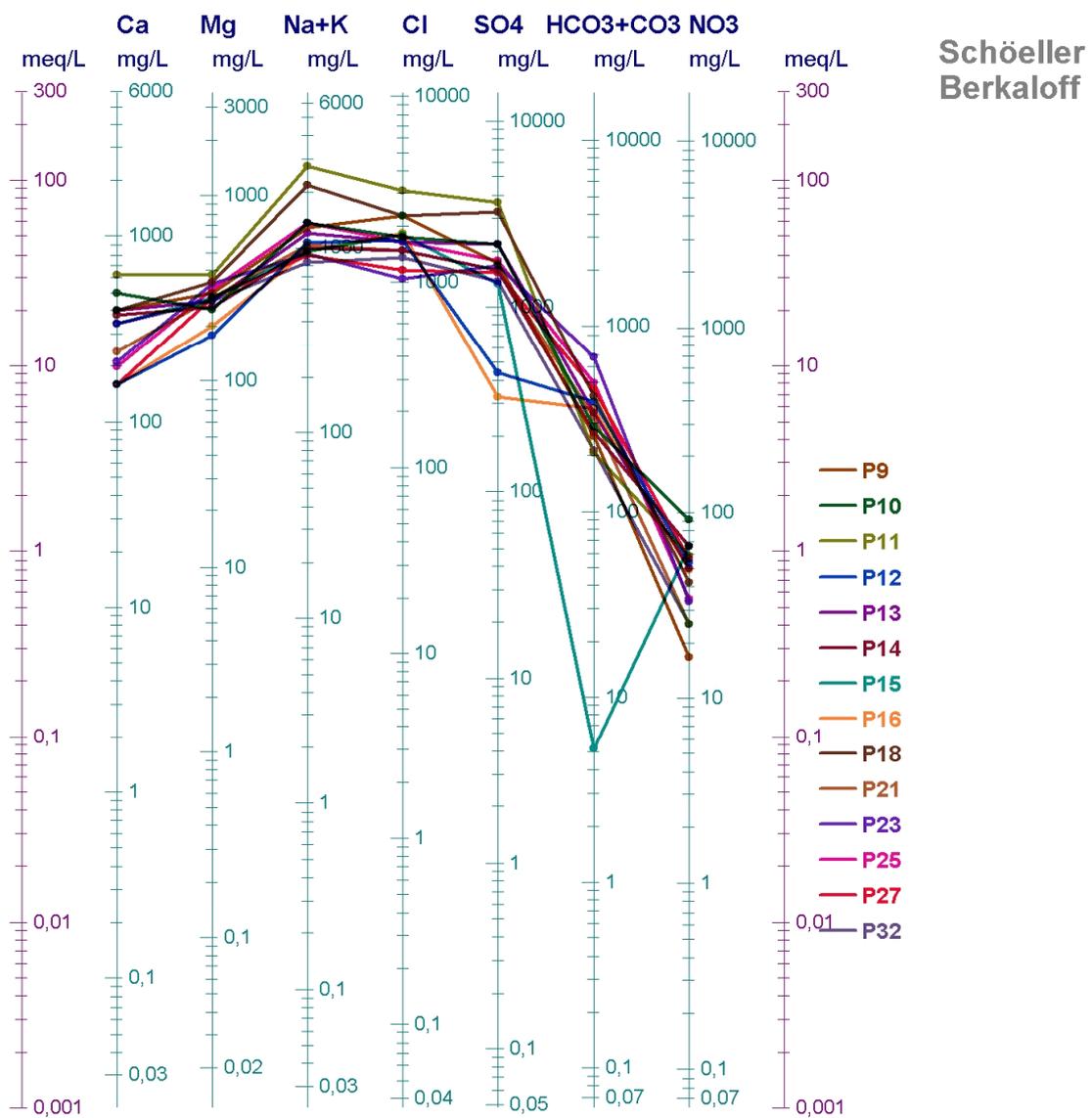


Figure n° 32 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (P9 – P32). (Campagne de mars 1986).

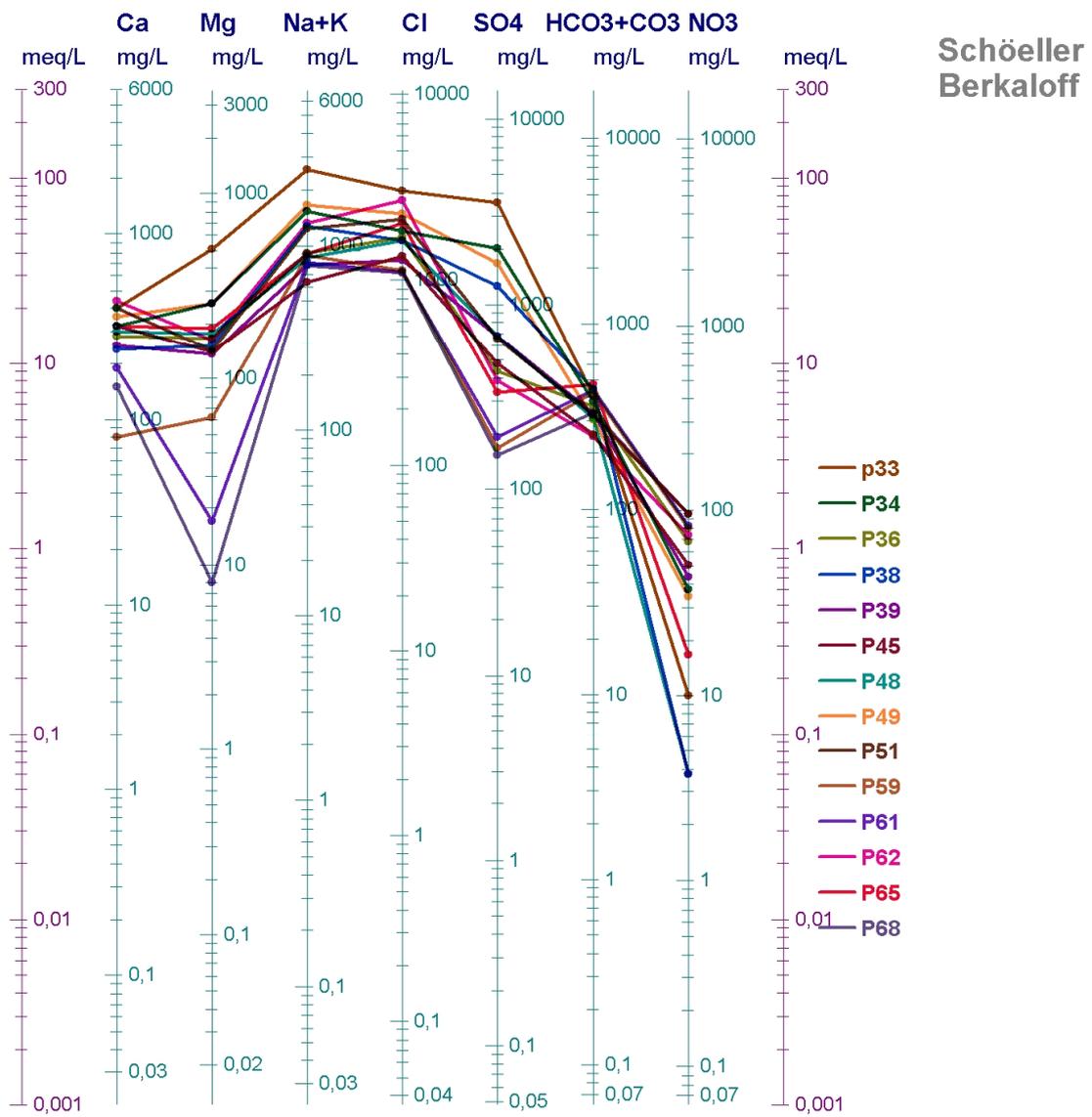


Figure n° 33 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (P33 - P68).
(Campagne de mars 1986).

II.1.4- Cartes d'isoteneurs :

Les cartes d'isoteneurs sont généralement utilisées pour suivre l'évolution spatiale du chimisme des eaux souterraines. Elles sont d'un grand apport lorsqu'il y'a lieu d'étudier les sources de contaminations des nappes.

a/ Carte des minéralisations :

De la carte (figure n° 34), l'augmentation de la minéralisation se fait généralement du Sud vers le Nord. Cette augmentation est liée à un changement de faciès géologique. En effet les eaux passent des alluvions à bonne perméabilité, vers une sédimentation plus fine en direction de la Sebkhha. Ainsi, les circulations sont plus lentes (voir cartes piézométriques figures n° 25 et 26) en raison de la baisse du gradient hydraulique et la durée du contact eau-encaissant est plus longue. Parallèlement à cela, la diminution du niveau topographique et de l'altitude en direction de la Sebkhha, rapproche d'autant plus le niveau piézométrique de la surface (il atteint parfois 1,5 m), accentuant de ce fait, l'effet de l'évaporation sur les eaux souterraines.

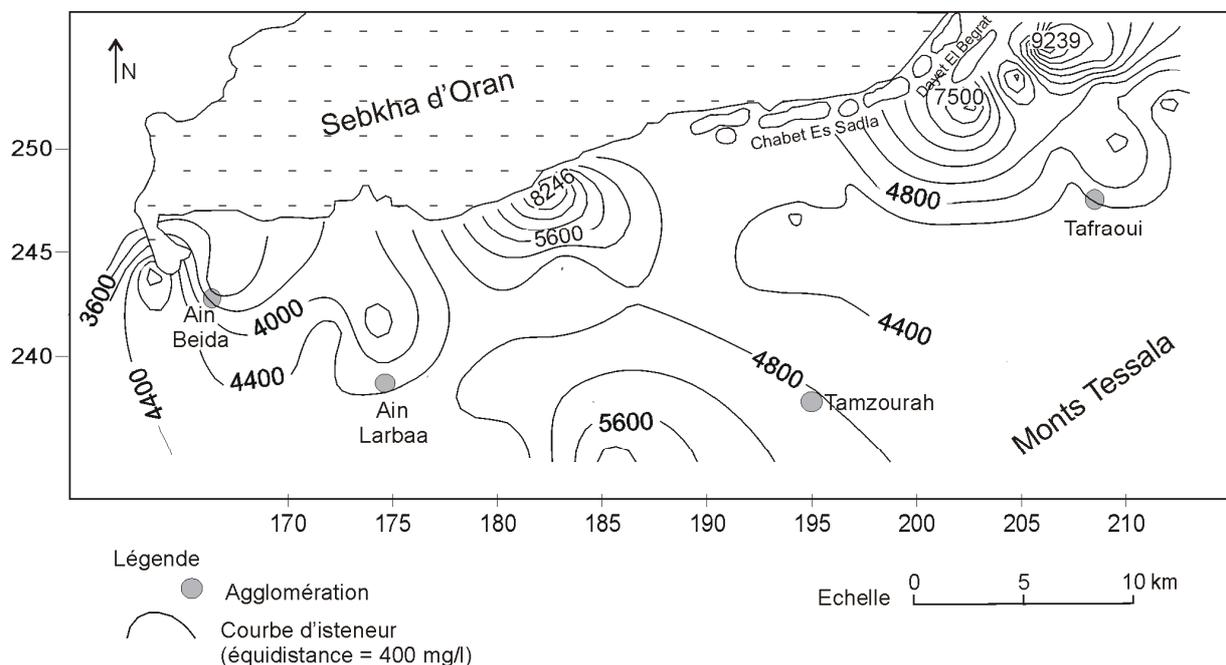


Figure n° 34 : Carte des minéralisations des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta.

b/ Carte des chlorures :

Les teneurs en chlorures sont les plus élevées (elles représentent plus de 37% de la minéralisation) et par conséquent, elles conditionnent les valeurs du résidu sec et de la minéralisation. Cela apparaît clairement sur la carte des chlorures (figure n° 35) qui ressemble, à quelques différences près, à celle de la minéralisation. Les teneurs en chlorures augmentent du Sud vers le Nord, en direction de la Sebkha. Les ions chlorures peuvent avoir plusieurs origines, dont les plus importantes sont, la dissolution des chlorures de sodium des alluvions salifères, les activités humaines ou l'origine atmosphérique.

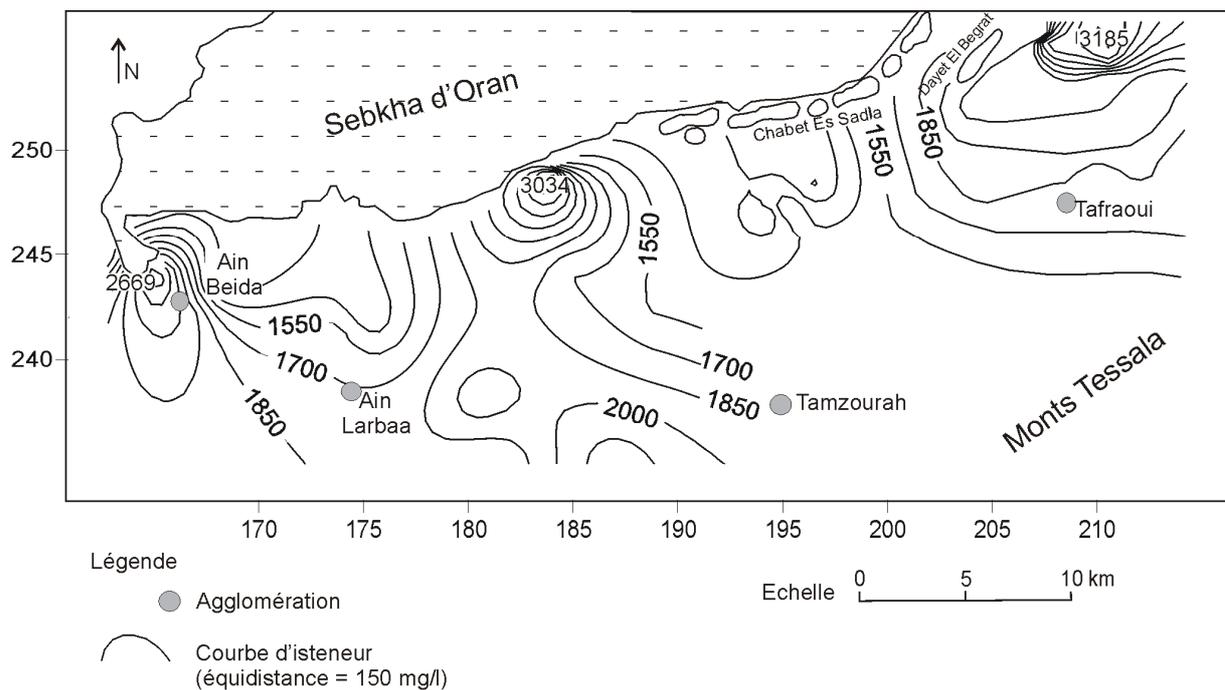


Figure n° 35 : Carte des chlorures des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta.

c/ Carte des sulfates :

Les sulfates sont les ions les plus abondants après les chlorures dans les eaux de la nappe libre. Toutefois, la carte des sulfates (figure n° 36), contrairement à celle des chlorures présente moins de similitudes avec la carte des minéralisations. Cela pourrait être le résultat de la moindre présence des évaporites dans la plaine (voir cadre géologique, chapitre 1) comparées aux formations argileuses très abondantes dans la région d'étude. Les sulfates peuvent provenir de l'altération des pyrites, des pollutions artificielles, etc.

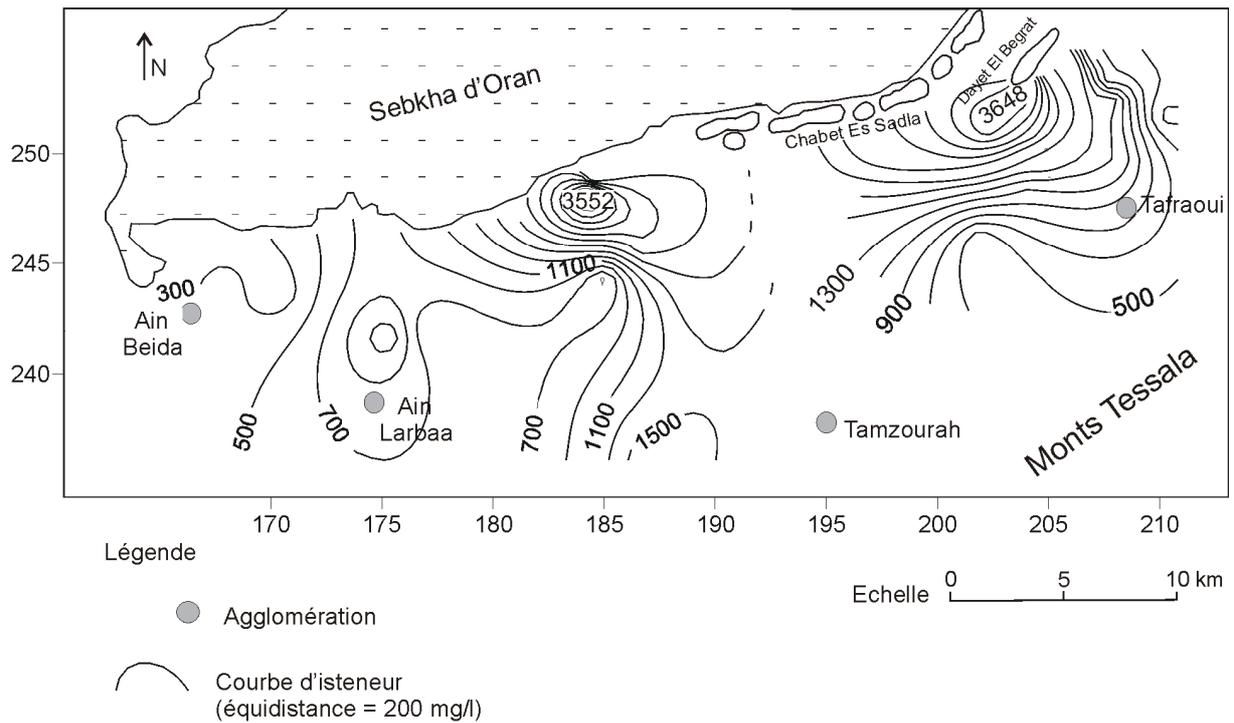


Figure n° 36 : Carte des sulfates des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta.

d/Carte du sodium :

Les teneurs en sodium sont très élevées et viennent en troisième position, juste après les chlorures et les sulfates.

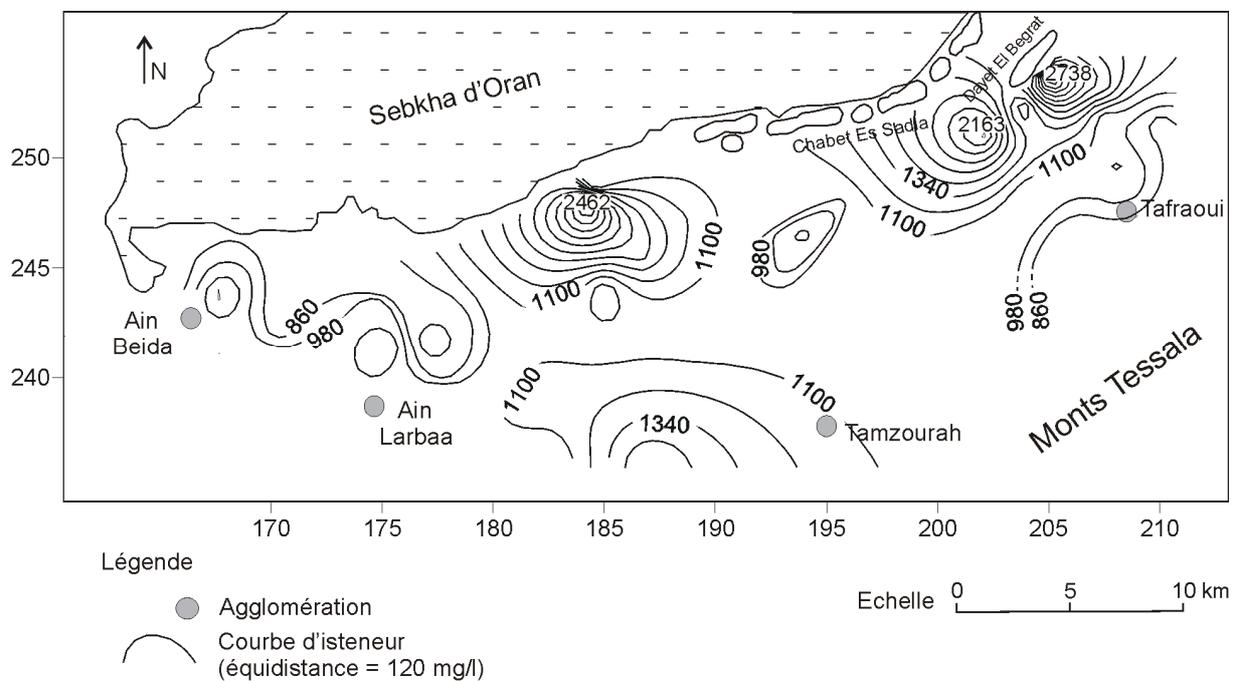


Figure n° 37 : Carte du sodium des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta.

La profusion des argiles et des alluvions salifères est la principale cause des teneurs élevées enregistrées pour l'ion sodium dans notre secteur d'étude. La carte d'isoteneurs en Sodium (figure n° 37) ressemble à celles des minéralisations et des chlorures. Un constat qui démontre la grande contribution de ce cation dans la minéralisation globale des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta.

e/Carte des nitrates :

La présence des nitrates dans les eaux souterraines est généralement le résultat de l'oxydation des matières organiques liées aux activités humaines (agricoles ou urbaines) ou de la dégradation microbienne des matières organiques présentes naturellement dans le sol.

D'après la carte des nitrates (figure n° 38), les plus grandes concentrations se localisent à l'Ouest de la plaine, où les valeurs oscillent entre 80 et 100 mg/l. Les concentrations moyennes variant de 40 à 60 mg/l, sont observées au Nord de la région de Taфраoui.

La différence enregistrée entre les teneurs des ions nitrates est due à une activité agricole plus intense, un faible taux de raccordement aux réseaux d'assainissement et enfin à une population plus dense à l'Est de la plaine (villages d'Ain Larbaa et d'Ain Beida) comparée aux autres localités de la région.

En moyenne, les teneurs en nitrates des eaux de la nappe sont inférieures à 45 mg/l. Ainsi, on pourrait penser que ces eaux obéissent aux normes de l'OMS (< 50 mg/l). Ce qui n'est pas le cas, puisque sur les 34 puits échantillonnés, 15 d'entre eux, captent des eaux avec des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l.

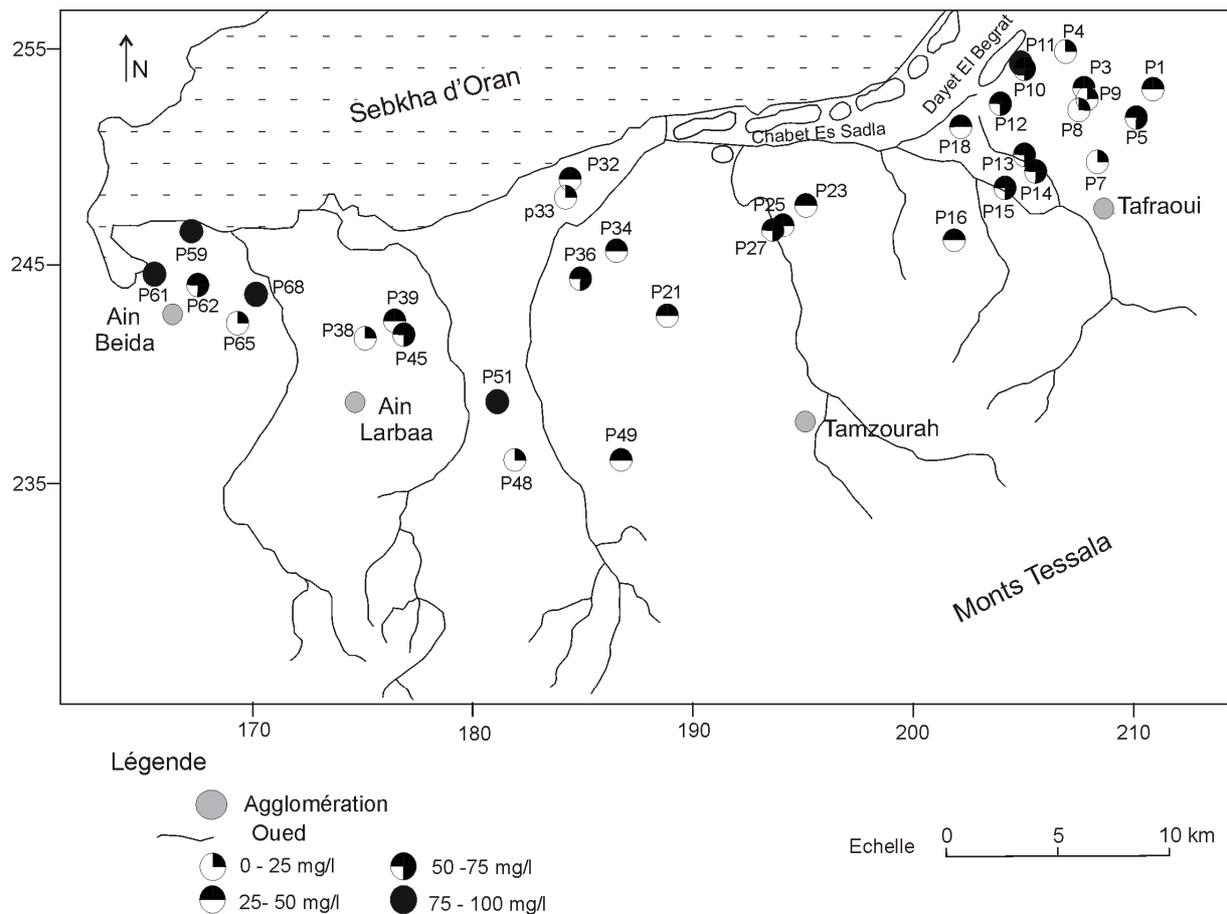
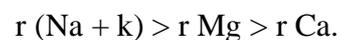
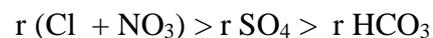


Figure n° 38 : Carte des nitrates des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta.

II.2- Traitement des données de la campagne d'octobre 2011 :

La campagne de 2011 n'a ciblé qu'accessoirement la nappe phréatique et n'a concerné que deux puits (figure n° 30) en raison de la médiocre qualité des eaux de cette nappe.

Les deux puits échantillonnés captent des eaux chlorurées sodiques ayant pour formule caractéristique :



La minéralisation des eaux captées par ces deux puits est importante. En effet, elle est de l'ordre de 4,8 g/l pour les eaux du puits P2 et de 7,4 g/l pour celles du puits P1.

De la figure n° 30, il apparaît que les puits P16, P15 et P23, P25, P27 (campagne de mars 1986) sont les plus proches respectivement de P1 et P2 (campagne d'octobre 2011).

Tableau n° 13 : Comparaison des eaux des puits "P1 avec P16 et P15"
et "P2 avec P23, P25 et P27".

	2011	1986			2011	1986		
	P1	P16	P15		P2	P25	P27	P23
Minéralisation en g/l	7.4	4.3	5		4.8	5	3.8	4
Faciès hydrochimiques	Eaux chlorurées sodiques						Eau sulfatée sodique	

Du tableau n° 13, une augmentation de la minéralisation de plus de 2 g/l est observée au niveau du puits P1 (2011) comparées aux valeurs enregistrées pour les puits p15 et p16 (1986). L'augmentation de la minéralisation peut être le résultat soit de l'évaporation, de la baisse du niveau piézométrique ou d'un pompage intense.

Pour ce qui est des puits P2 (2011) et P23, P25 P27 (1986), les valeurs de minéralisations sont presque identiques pour les deux périodes.

Le tableau n° 13 montre également que le faciès des eaux chlorurées sodiques est toujours présent dans les eaux de la nappe phréatique.

III- Complexe mio-pliocène et nappe intermédiaire :

III.1- Traitement des données de la campagne de Mars 1986 :

La campagne de mars 1986 n'a concerné que six forages. Ces derniers captent les eaux des calcaires / calcaire gréseux du miocène supérieur / base du pliocène. Les analyses chimiques de ces eaux sont données en annexe 5.

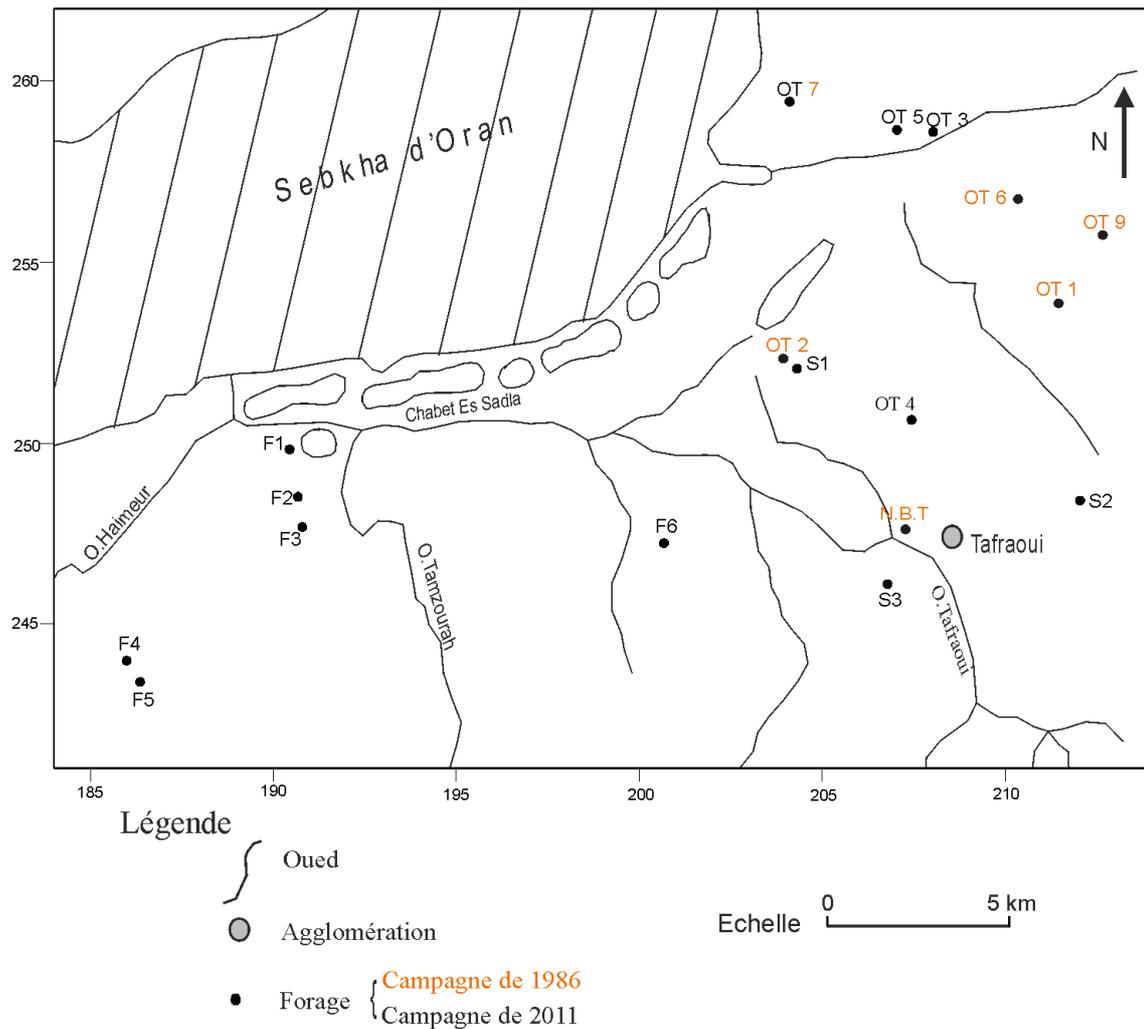


Figure n° 39 : Localisation des forages.

III.1.1- Paramètres physiques (tableau n° 14) :

A l'exception du pH, tous les paramètres physiques enregistrent des valeurs sensiblement inférieures à celles des eaux de la nappe libre. Cependant, ces eaux restent chargées en sels malgré leur profondeur.

Tableau n°14 : Paramètres physiques.

Paramètres	Minimum	Forages	Maximum	Forages	Moyenne
pH	7.03	OT2	8	OT7	7.4
Conductivité (ms/cm)	2.37	OT2	3.98	OT1	2.97
Minéralisation (g/l)	1.4	OT6	2.75	OT1	2.04
Résidu sec (g/l)	1.6	OT6	3.08	OT1	2.21

III.1.2- Paramètres chimiques :

Comme pour les eaux de la nappe libre, les sulfates et les chlorures sont les anions prédominants. Toutefois, les ions bicarbonates sont plus abondants que le sodium et les teneurs en calcium sont supérieures à celles du magnésium pour les eaux profondes.

Les teneurs en potassium sont les plus faibles. Quant à celles relatives aux nitrates elles sont conformes aux normes internationales.

Tableau n° 15 : Paramètres chimiques.

Ions (mg/l)	Minimum	Forages	Maximum	Forages	Moyenne
Na	223	OT2	442	OT9	302,5
K	6	N.B.Tafraoui	11	OT7	7,8
Ca	62	OT6	321	OT1	193.3
Mg	77	OT7	161	OT1	107,3
Cl	261	OT2	891	OT1	539.8
SO ₄	288	OT6	686	OT1	547.5
HCO ₃	109	OT6	461	OT2	334.5
NO ₃	1	OT2, OT7	32	OT1	7.8

III.1.3- Classification des eaux :

L'application de la méthode des formule caractéristiques sur les eaux du complexe miopliocène a permis la distinction de quatre types de faciès.

a/ Eaux chlorurées sodiques :

Ces eaux sont captées par les forages OT6 et OT9. Elles ont pour formules caractéristiques :

$$r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3,$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}.$$

b/ Eaux chlorurées calciques :

Ces eaux ne sont captées que par le forage OT1.

$$r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3,$$
$$r \text{Ca} > r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg}.$$

c/ Eaux sulfatées sodiques :

Ce faciès comprend deux sous classes. La première caractérise les eaux captées par le forage OT7 :

$$r \text{SO}_4 > r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3,$$
$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Ca} > r \text{Mg}.$$

La deuxième sous classe représente également des eaux sulfatées sodiques. Toutefois elles sont plus bicarbonatées que chlorurées (OT2).

$$r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3 > r(\text{Cl} + \text{NO}_3)$$
$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Ca} > r \text{Mg}.$$

d/ Eaux sulfatées calciques :

Des six forages étudiés, le forage N.B.Taфраoui (N.T.B sur la figure n° 39) capte les seules eaux sulfatées calciques. Leur formule caractéristique est :

$$r \text{SO}_4 > r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3,$$
$$r \text{Ca} > r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg}.$$

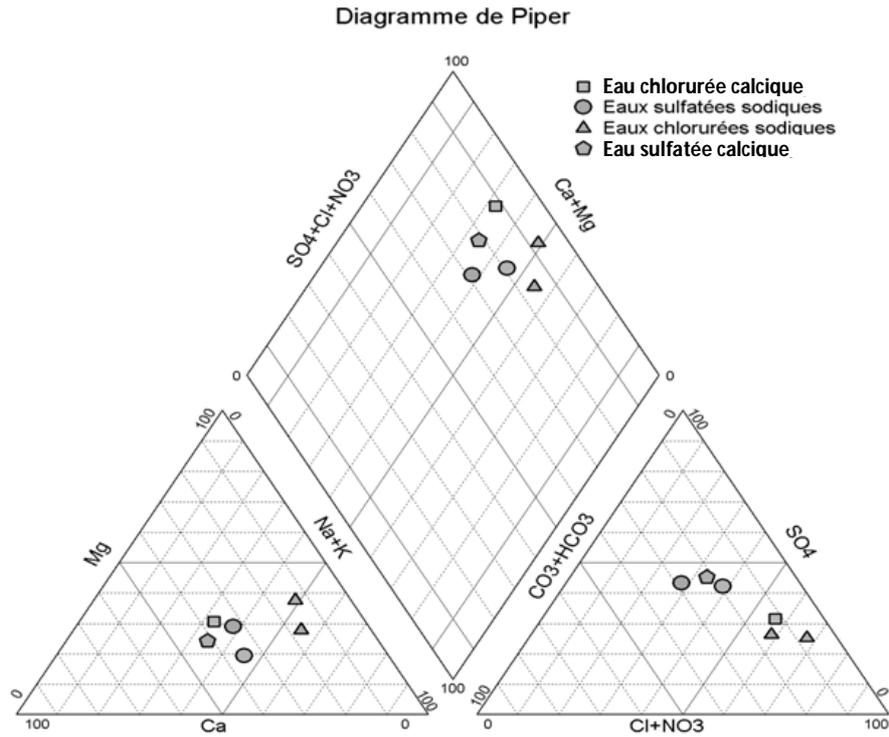


Figure n° 40 : Faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène.
(Campagne de mars 1986).

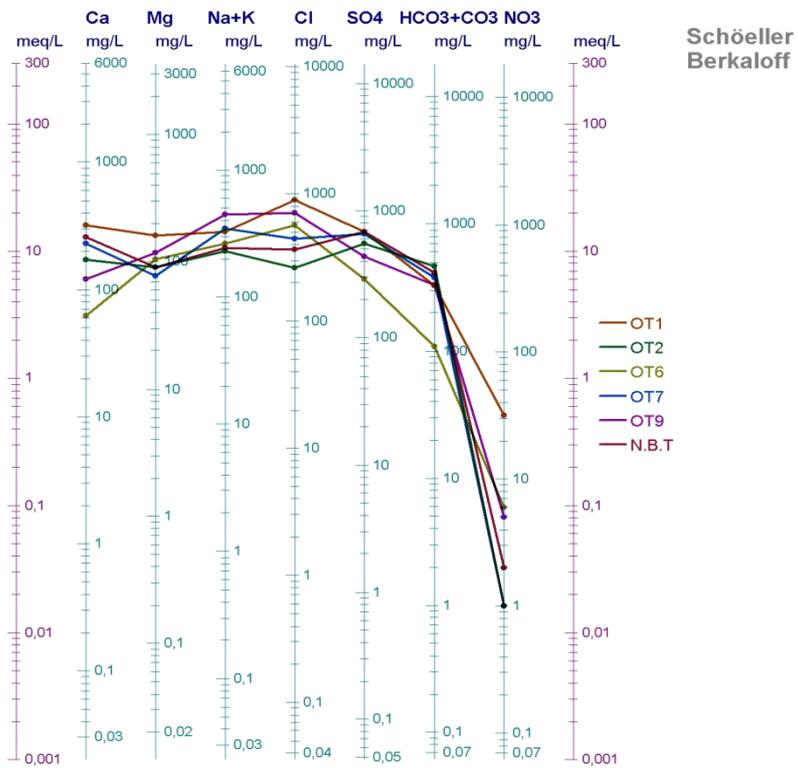


Figure n° 41 : Représentation graphique des eaux du complexe mio-pliocène selon
la méthode de Schoeller-Berkaloff (campagne de mars 1986).

III.2- Traitement des données de la campagne d'octobre 2011 :

Les treize forages échantillonnés (figure n° 39) lors de la campagne d'octobre 2011 sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau n° 16 : Caractéristiques des forages échantillonnés (campagne d'octobre 2011).

	Noms	Noms sur la carte	Profondeurs en m	Aquifères captés	Observations
Forages gérés par la S.E.O.R.	OT3	OT3	417	Complexe mio-pliocène	Tous les forages sont protégés par un périmètre de protection immédiat et exploités pour des besoins domestiques.
	OT4	OT4	450		
	OT5	OT5	420		
	OT7	OT7	270		
	Douar El Wharna	S1 (SEOR)	431		
	Khaïliya	S2 (SEOR)	/		
	Ghraïdiya	S3 (SEOR)	/		
Forages des fermes agricoles	Belkhosse	F1	105	Nappe intermédiaire (niveaux aquifères du Plio-quaternaire)	- Le forage F1 est artésien - Forages non protégés par des périmètres de protection immédiats. Ils sont utilisés soit pour l'irrigation, soit pour l'abreuvement du bétail.
	Rzigui 1	F2	100		
	Rzigui 2	F3	97		
	Lemiche	F4	111		
	Boudaoud	F5	95		
	Kharbouche	F6	130		

III.2.1-Complexe mio-pliocène :

III.2.1.1-Paramètres physiques (Tableau n° 17):

Avec une moyenne de pH égale à 7,26, les eaux captées par les forages gérés par la S.E.O.R. ont un pH presque neutre. Ces eaux ont une minéralisation relativement faible. En moyenne, la valeur du résidu sec est inférieure à 2,5 g/l ; celle de la minéralisation, est égale à 2 g/l. La présence des matières en suspension reste faible, d'où les faibles valeurs de turbidité enregistrées pour les eaux du complexe mio-pliocène. Toutefois, la présence des matières en suspension et des matières organiques serait peut être due à des crépîrages de niveaux aquifères plus proches de la surface et de ce fait, plus exposés aux facteurs anthropiques.

Tableau n° 17: Paramètres physiques.

Paramètres	Minimum	Forages	Maximum	Forages	Moyenne
pH	7,13	OT7	7,57	S2	7,26
Conductivité ms/cm	1,12	S2	4,07	OT7	2,69
Minéralisation (g/l)	0,85	S2	3,09	OT7	2,04
Résidu sec (g/l)	1,04	S2	3,64	OT7	2,36
Turbidité (U.T.)	1	OT3, OT5	2	OT5, S1	1,29
Matières en suspension (mg/l)	2	OT4, OT7	5	OT5, S1	4,29
Matière organiques acides (mg/l)	0,6	OT5	4,6	OT7	2,5

III.2.1.2-Paramètres chimiques :

L'examen du tableau n° 18 permet de faire les remarques suivantes :

Les sulfates et les chlorures restent les anions les plus prédominants dans les eaux de la plaine de la M'leta. Les ions bicarbonates et sodium sont les cations les plus présents dans les eaux du complexe mio-pliocène.

Avec une moyenne en dessous de 8 mg/l, les nitrates obéissent aux normes de l'OMS.

Tableau n° 18: Paramètres chimiques.

Ions (mg/l)	Minimum	Forages	Maximum	Forages	Moyenne
Na	147	S2	1162	OT7	336
K	5	S2	9	S3, OT4	7.6
Ca	51	S2	244	OT5	185
Mg	55	S2	139	OT7	109
Cl	226	S2	913	OT7	505,5
SO ₄	51	S2	876	OT5	563
HCO ₃	279	S3	721	S1	429,5
NO ₃	2	OT5	22	S3	6,86

III.2.1.3-Faciès hydrochimiques :

Du diagramme Schoeller-Berkaloff obtenu (figure n° 43), quatre pôles de minéralisation sont observés: Na, Cl, SO₄ et HCO₃. Les eaux chlorurées sodiques et sulfatées sodiques caractérisent la majorité des forages. Le forage S1, capte les seules eaux bicarbonatées sodiques.

a/ Eaux chlorurées sodiques :

Ces eaux sont captées par trois forages. On distingue trois sous classes pour ce faciès dont les formules caractéristiques sont :

$$r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3,$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}. \quad (\text{S3})$$

ou $r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Ca} > r \text{Mg} \quad (\text{OT7})$

$$r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca} \quad (\text{S2})$$

b/ Eaux sulfatées sodiques:

$$r \text{SO}_4 > r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{HCO}_3,$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Ca} > r \text{Mg}. \quad (\text{OT4 et OT5})$$

ou $r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}. \quad (\text{OT3})$

c/ Eaux bicarbonatées sodiques:

$$r \text{HCO}_3 > r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Ca} > r \text{Mg}. \quad (\text{S1})$$

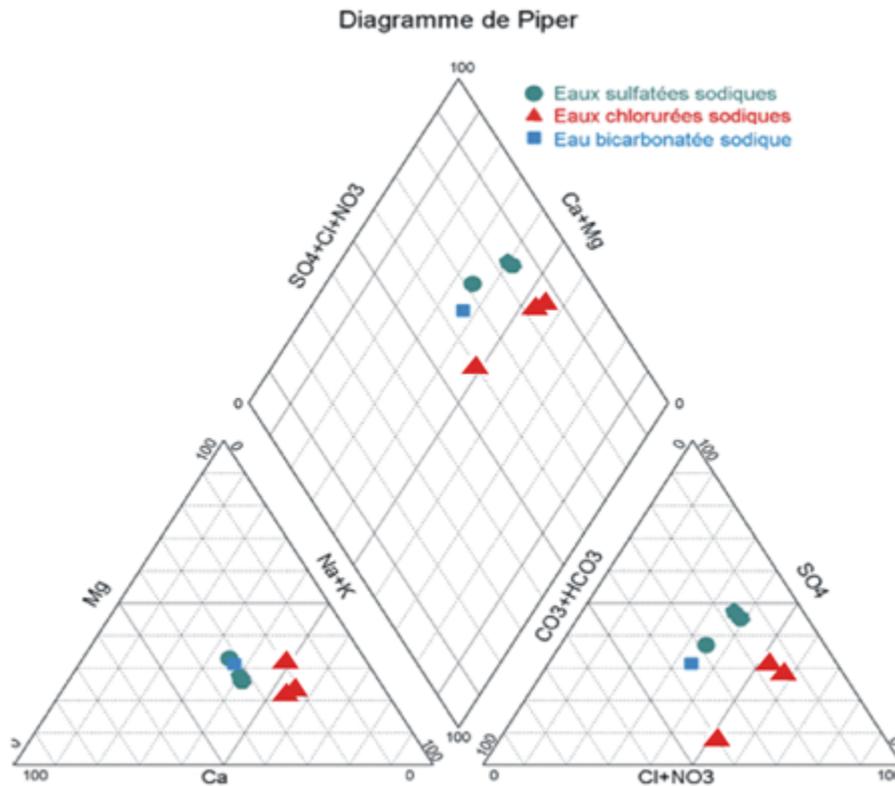


Figure n° 42 : Faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène. (Campagne d'octobre 2011).

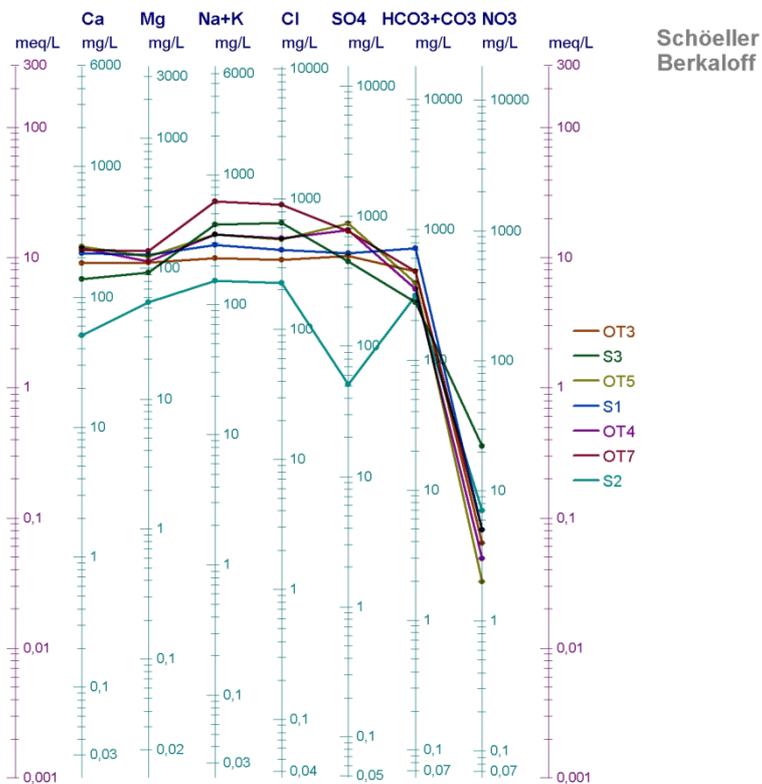


Figure n° 43 : Représentation graphique des eaux du complexe mio-pliocène selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (campagne d'octobre 2011).

III.2.1.4- Évolution chimique des eaux du complexe mio-pliocène :

a/ Forage OT7 :

Le forage OT7 est le seul échantillonné pendant les deux campagnes de mars 1986 et d'octobre 2011. Les résultats des analyses chimiques des eaux captées par le forage OT7 relatives aux deux campagnes, sont présentés dans le tableau n°19.

Tableau n° 19 : Principaux paramètres physico-chimiques des eaux du forage OT7.

Campagne	Teneurs en mg/l										pH	COND µs/cm	Faciès hydrochimique
	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	MIN R	RS			
2011	61,6	8	13,7	22,8	478	91,3	767	5	3089	364,0	7,1	4070	Eau chlorurée sodique
1986	33,6	1,1	77	23,0	375	44,2	653	1	2125	224,0	8	2990	Eau sulfatée sodique

Du tableau n°19, les valeurs de la minéralisation et du résidu sec, augmentent respectivement de près de 1 g/l et de 1,5 g/l. Une assez forte augmentation des teneurs est également observée, surtout pour les chlorures et le sodium. Cette augmentation influe sur le faciès hydrochimique caractérisant les eaux du forage OT7, qui passent des eaux sulfatées sodiques à des eaux chlorurées sodiques.

b/ Comparaison générale :

Dans les tableaux n° 20 et n° 21, nous présentons les moyennes des principaux paramètres physico-chimiques des eaux du complexe mio-pliocène pour les deux campagnes (mars 1986 et octobre 2011).

Tableau n° 20 : Principaux paramètres physiques des eaux du complexe mio-pliocène.

Campagne	pH	Minéralisation (mg/l)	Résidu sec (mg/l)
1986	7,4	2040	2210
2011	7,26	2041	2360

Tableau n° 21 : Teneurs en éléments chimiques des eaux du complexe mio-pliocène.

Campagne	Teneurs en mg/l							
	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃
1986	302,5	7,8	193,3	107	539,8	547,5	334,5	7,8
2011	336	7,6	185	109	505,5	563	429,5	6,86

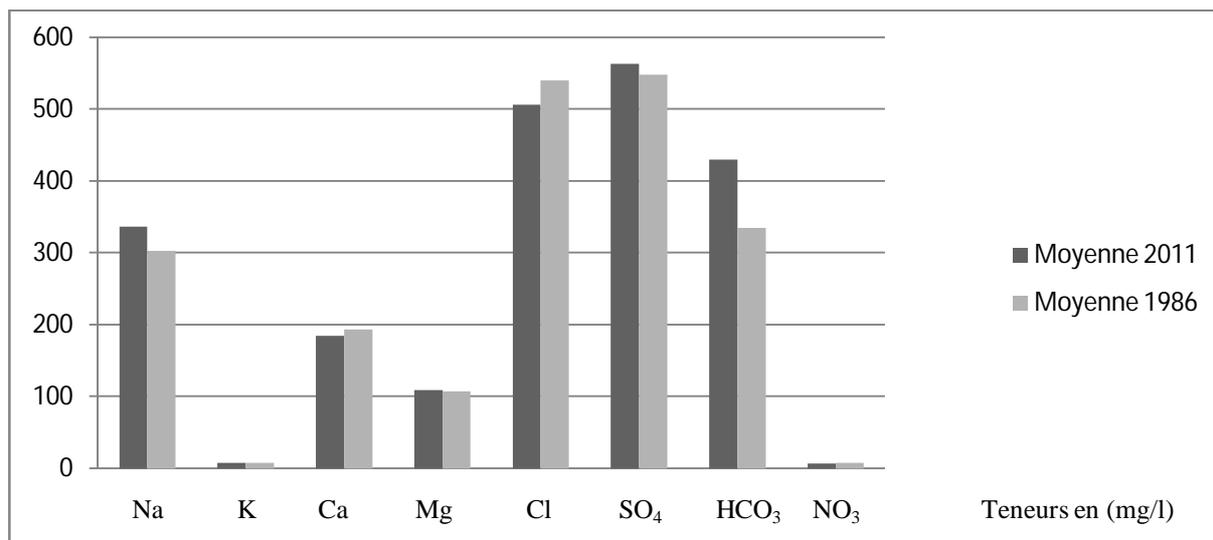


Figure n° 44 : Représentation graphique des moyennes des éléments chimiques majeurs des eaux du complexe mio-pliocènes pour les campagnes de mars 1986 et d'octobre 2011.

L'examen des deux tableaux n° 20 et n° 21 et de l'histogramme (figure n° 44) permet de faire les remarques suivantes :

La valeur de la minéralisation des eaux est presque identique pour les deux périodes. Cependant, une légère augmentation (de 150 mg/l) du résidu sec est observée. Concernant le pH, les eaux sont autour de la neutralité pour les deux périodes.

Pour ce qui est des éléments chimiques, les plus grandes augmentations des teneurs entre 1986 et 2011 sont relatives respectivement aux ions bicarbonates (95 mg/l) et sodium (33,5 mg/l). Une faible diminution des teneurs en chlorures (de 34 mg/l) et en calcium (8 mg/l) est par contre enregistrée entre les deux périodes. Pour le reste des éléments chimiques les teneurs sont presque identiques pour les deux campagnes

b-1/ Faciès hydrochimiques :

Le tableau n° 22 regroupe tous les faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène pour les deux campagnes.

Tableau n° 22 : Faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène.

Campagne	T y p e d ' e a u				
	Chlorurée sodique	Chlorurée calcique	Sulfatée sodique	Sulfatée calcique	Bicarbonatée sodique
1986	OT6, OT9	OT1	OT7, OT2	N.B.Tafraoui	
2011	OT7, S2, S3		OT3, OT4, OT5		S1

Du tableau n° 22, les eaux chlorurées sodiques sont captées aux niveaux de 5 forages. En raison de l'abondance des argiles et des alluvions salifères, ce faciès est prédominant dans toutes les eaux de la plaine de la M'leta. La dissolution des anhydrites blanches formant le mur de l'aquifère mio-pliocène au niveau de certains forages (voir logs géologiques en annexe), pourraient expliquer la présence du faciès des eaux sulfatées sodiques. Ces dernières sont captées par 5 forages.

III.2.2- Nappe intermédiaire :

III.2.2.1- Paramètres physiques :

Du tableau n° 23, la valeur moyenne du pH est de 7.47 indiquant ainsi un pH presque neutre ou assez faiblement basique.

Comparées aux eaux du complexe mio-pliocène, les eaux des forages captant la nappe intermédiaire sont plus minéralisées, en témoigne la différence des valeurs moyennes du résidu sec des eaux entre les deux nappes :

nappe intermédiaire, $R_s = 3,42 \text{ g/l}$,

complexe mio-pliocène, $R_s = 2,36 \text{ g/l}$ (campagne de 2011),

complexe mio-pliocène, $R_s = 2,21 \text{ g/l}$ (campagne de 1986).

Les matières en suspension sont présentes en quantités relativement élevées, surtout au niveau du forage F3, où l'eau est totalement trouble. Cela explique la grande valeur de turbidité (51 U.T.) enregistrée pour les eaux de ce forage. La plus faible valeur de turbidité est mesurée au forage F6 (forage le plus profond captant la nappe intermédiaire). La présence des matières en suspension et des matières organiques en grandes quantités dans les eaux de la nappe intermédiaire serait peut être due, à leur mélange avec les eaux de la nappe libre.

Tableau n° 23 : Paramètres physiques.

Paramètres	Minimum	Forages	Maximum	Forages	Moyenne
pH	7,3	F6	7,8	F4	7,47
Conductivité (ms/cm)	2,88	F4	6,38	F6	4,3
Minéralisation (g/l)	2,18	F4	4,84	F6	3,26
Résidu sec (g/l)	2,26	F4	5,4	F6	3,42
Turbidité (U.T.)	1	F6	51	F3	14,5
Matières en suspension (mg/l)	2	F6	58	F3	20,16
Matière organiques acides (mg/l)	3,6	F4	7,9	F2	5,75

III.2.2.2 - Paramètre chimiques :

Comme pour les eaux de la nappe libre et du complexe mio-pliocène, le tableau n° 24 montre que les concentrations en ions Cl, SO₄ et Na restent prédominantes pour les eaux de la nappe intermédiaire.

Concernant les teneurs en potassium, elles sont les plus faibles (moyenne = 3,5 mg/l).

Avec une moyenne de 8,5 mg/l, les teneurs en nitrates obéissent aux normes de l’OMS et sont intermédiaires entre celles relatives aux eaux la nappe libre et celles du complexe mio-pliocène.

Tableau n° 24 : Paramètres chimiques.

Ions (mg/l)	Minimum	Forages	Maximum	Forages	Moyenne
Na	561	F4	1162	F6	782
K	2	F3	4	F1, F2, F4, F6	3,5
Ca	75	F4	177	F5	113,5
Mg	78	F4	239	F5	149
Cl	668	F4	1840	F6	1122
SO ₄	386	F3	1084	F5	652
HCO ₃	362	F1	408	F5	383,6
NO ₃	2	F3	19	F6	8,5

III.2.2.3-Faciès hydrochimiques :

Toutes les eaux captées par la nappe intermédiaire sont chlorurées sodiques. Cela serait dû à une présence de plus en plus importante des formations argileuses vers l’Ouest de la plaine de la M’leta, tant à la surface qu’en profondeur.

Les eaux de la nappe intermédiaire ont pour formule caractéristique :

$$r(\text{Cl} + \text{NO}_3) > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3,$$

$$r(\text{Na} + \text{k}) > r \text{Mg} > r \text{Ca}.$$

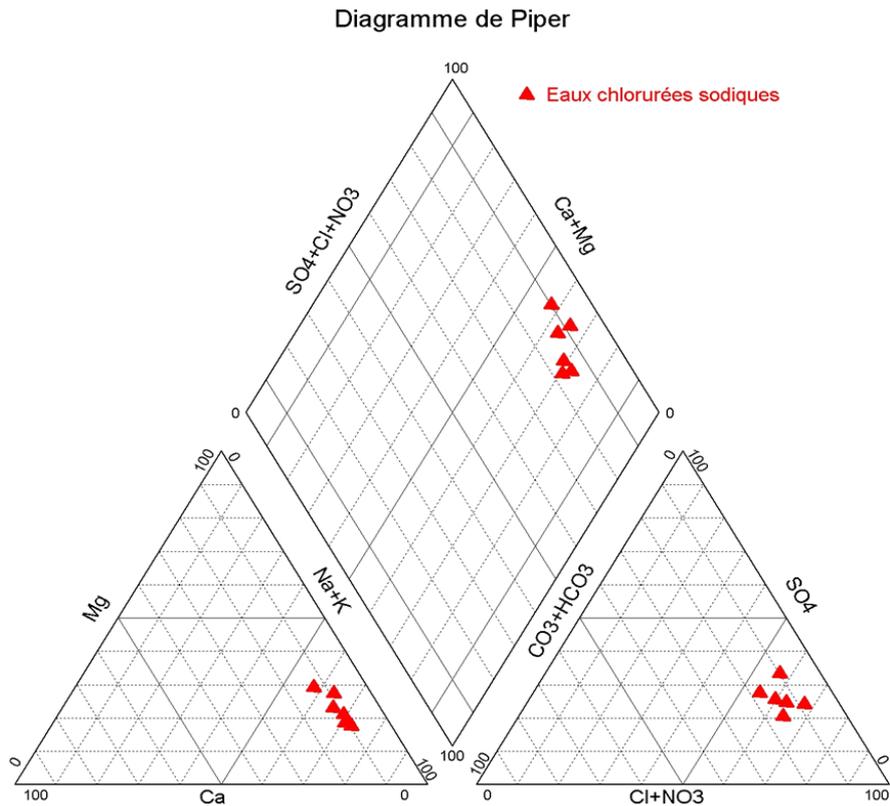


Figure n° 45 : Faciès hydrochimiques des eaux de la nappe intermédiaire. (Campagne d'octobre 2011).

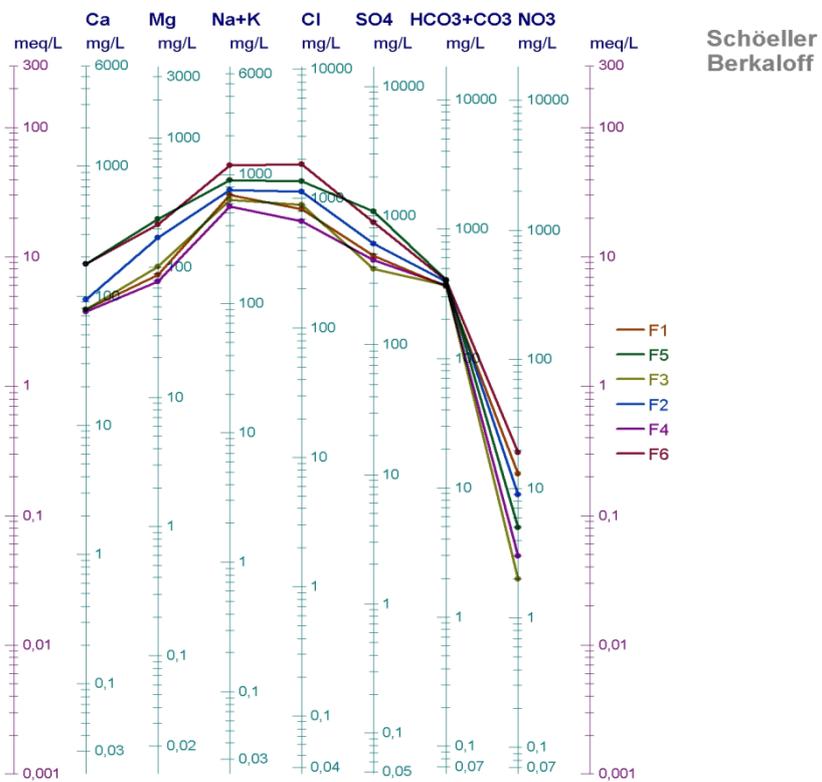


Figure n° 46 : Représentation graphique des eaux de la nappe intermédiaire selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (campagne d'octobre 2011).

III.2.3- Evolution spatiale de la minéralisation des eaux des forages :

Malgré le faible nombre des échantillons, la figure n°47 montre que la minéralisation des eaux du complexe mio-pliocène augmente du Sud vers le Nord. C'est-à-dire suivant la même direction relative à la minéralisation des eaux de la nappe libre. Cette augmentation est due à une zonalité géologique à l'Est de la plaine. En effet, les forages S2 et S3 implantés sur les affleurements calcaires, captent les eaux les moins minéralisées. En allant vers le Nord l'aquifère mio-pliocène devient de plus en plus gréseux. Cela influe sur les vitesses d'écoulement qui sont considérablement réduites. Par conséquent, les durées des interactions eau/roche sont plus longues, favorisant ainsi les phénomènes d'altération et de dissolution.

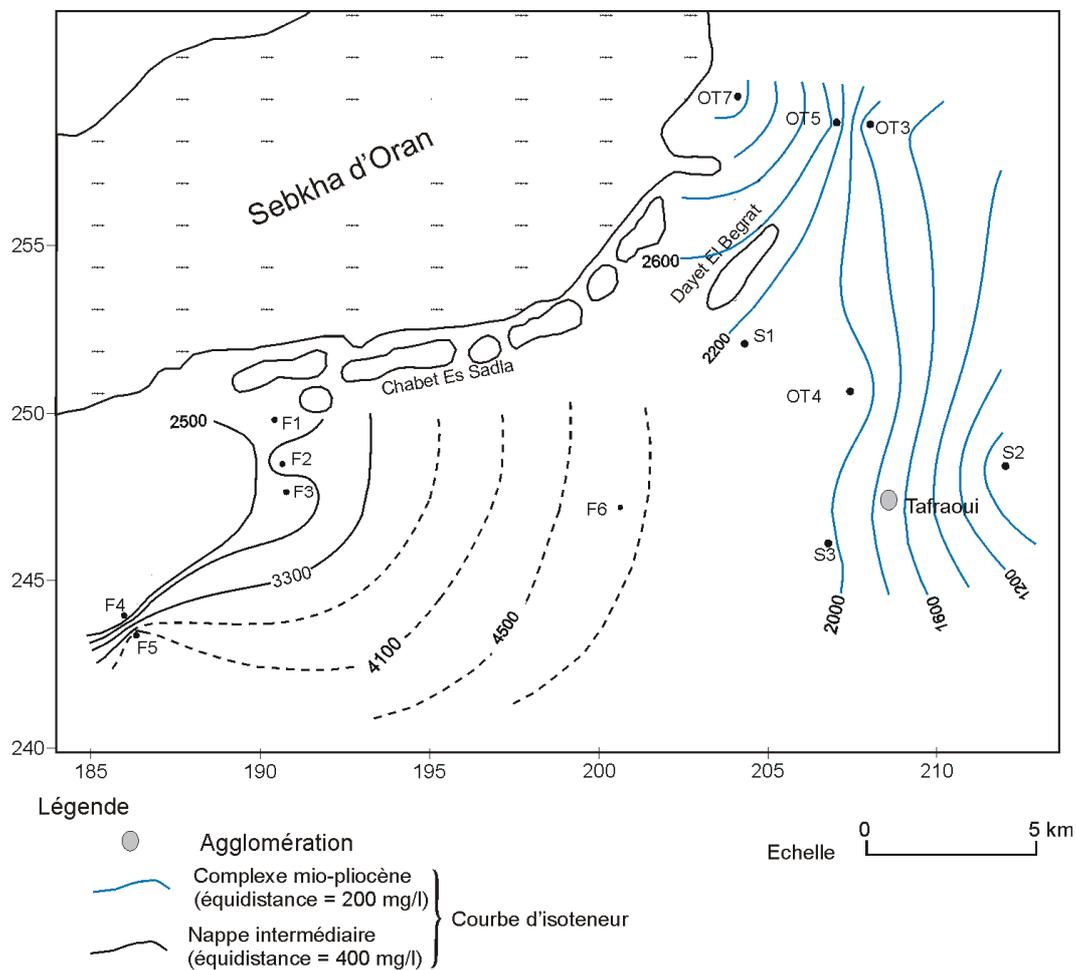


Figure n° 47 : Evolution spatiale de la minéralisation des eaux des forages.
(Campagne d'octobre 2011).

Pour la nappe intermédiaire (figure n°47), la minéralisation des eaux ne semble pas augmenter suivant une direction bien définie. Elle varie de 2,18 g/l au forage F4 à 4,31 g/l au forage F5, distant à peine de 700 m, alors qu'elle n'augmente que d'environ 300 mg/l entre F4

et F1, éloignés l'un de l'autre de plus de 7 km. Cette différence de minéralisation des eaux de la nappe intermédiaire serait due soit à un pompage moins fréquent dans certains forages comparés à d'autres, soit à la discontinuité des niveaux aquifères (argiles/marnes graveleuses et sableuses à galets calcaires plio-quaternaires) le long de la zone d'étude. En effet, ces niveaux se caractérisent par des épaisseurs très variables et sont recoupés sur des profondeurs différentes (voir logs géologiques des piézomètres: Douar Saida, S5A, S2A et S3A en annexe). Ainsi les niveaux aquifères les moins profonds pourraient être alimentés par les eaux très minéralisées de la nappe libre et des oueds qui accentuent la minéralisation des eaux de la nappe intermédiaire.

IV- Interprétation du chimisme des eaux de la plaine de la M'leta :

IV.1- Minéralisation :

On peut dire que la minéralisation des eaux (nappe libre et complexe mio-pliocène) augmente généralement en allant vers le Nord en direction de la Sebkha. Cette minéralisation est le résultat de l'exposition accrue des eaux (nappe libre) à l'évaporation, due à la diminution du niveau statique, selon la direction d'écoulement des eaux souterraines (voir cartes piézométriques, chapitre 1). La minéralisation serait due également aux phénomènes d'altération chimiques et aux échanges ioniques qui s'effectuent entre la roche et l'eau (nappe libre, nappe intermédiaire et complexe mio-pliocène), en particulier les réactions d'échange de base. Ce phénomène est le résultat direct des processus de sorption et de désorption.

Les minéraux argileux sont les échangeurs d'ions les plus courants dans le sol et dans les systèmes aquifères. Ce phénomène est lié à la structure cristalline des particules d'argile et la capacité potentielle d'échange d'ions dépend de la nature de l'argile considérée. Les cations présents dans les eaux souterraines sont facilement échangeables comparés aux anions.

L'activité humaine contribue à la salinisation des eaux souterraines de la plaine de la M'leta par le biais de l'industrie (partie Est de la plaine) et de l'utilisation extensive des engrais et des pesticides. Ces produits s'infiltrent dans le sous-sol lors du lessivage (après précipitations), en particulier dans les sols sableux (Hubbard and Sheridan, 1994). De plus, les études menées par Kolpin et al en 1996, 1997 et Potter & Carpenter en 1995, ont démontré que les pesticides peuvent se dégrader en d'autres composés beaucoup plus dangereux couramment trouvés dans les eaux souterraines.

Outre les pratiques industrielles et agricoles, les contaminants peuvent provenir d'une source ponctuelle, ou d'une forme plus large qui se diffusent dans la région. L'exemple le plus édifiant étant, la combinaison d'un grand nombre de points de sources ponctuelles dans une région, tels que les fosses septiques, donnant un effet similaire à une source diffuse.

IV.2- Acquisition de la composition ionique :

Les anions et autres solutés ne se déplacent pas de manière semblable, en raison de l'interaction entre leurs charges ioniques et celles des minéraux argileux et des matières organiques. Les charges des différents minéraux varient considérablement. Dans de nombreux cas, ils peuvent dépendre du pH ainsi que des constituants et des concentrations des solutions se trouvant dans le sol. Ainsi, des surfaces à la fois positivement et négativement chargées peuvent exister simultanément sur différentes parties d'un même minéral.

Généralement, les argiles présentent une charge négative, excluant les anions proches de leurs surfaces. Le volume exclus, dépend du soluté et de sa concentration dans le sol. De ce fait, les anions sont repoussés hors de la matrice rocheuse et vers la porosité principale, tandis que les cations sont adsorbés. Ce phénomène est assez remarquable lors des tests de traceurs cationiques où les courbes de restitution présentent un retard.

La sorption significative des anions se fait dans les sols contenant des oxydes hydratés. Les principaux composés dans ce mécanisme sont les oxydes d'aluminium et de fer, ainsi que les bords des couches des silicates. La charge des surfaces de ces minéraux dépend du pH de la solution du sol. Ce dernier en diminuant, favorise l'augmentation des charges positives (la kaolinite est un minéral qui affiche ce comportement). La sorption des anions entraîne leur retard par rapport à la circulation de l'eau dans le sol, ou dans l'aquifère, ce qui peut induire en erreur sur leurs concentrations réelles dans les eaux d'une nappe. C'est ainsi que Johnston en 1988, a démontré que le fait d'ignorer la sorption des chlorures à de faible valeur de pH résulte en une surestimation de leur valeur, qui se retrouve multipliée par deux.

IV.2.1- Chlorures :

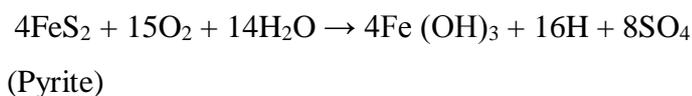
Dans notre zone d'étude, les concentrations des ions chlorures sont très importantes. Elles ont généralement de très mauvaises conséquences, telles que la détérioration des tuyauteries et des structures métalliques, la réduction des récoltes, etc. Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines dont les plus importantes sont :

- la dissolution des chlorures de sodium des alluvions salifères,
- atmosphérique, notamment par l'apport des eaux de pluies riches en chlorures (Les embruns),
- l'activité humaine, telle que l'absence des réseaux d'assainissements.

IV.2.2- Sulfates :

En général, la présence des sulfates dans les eaux souterraines peut être due à:

- la dissolution des sulfates contenus dans les évaporites des alluvions (gypse et anhydrite),
- l'oxydation de la pyrite et autres sulfures minéraux des roches sédimentaires,



(Cette réaction se traduit par la diminution du pH et l'augmentation de la concentration des

sulfates dans les eaux souterraines).

- l'attaque des silicates,
- l'apport des sulfates d'origine marine qui rejoignent les eaux souterraines lors des précipitations,
- la réduction microbienne des ions sulfates en sulfure d'hydrogène.

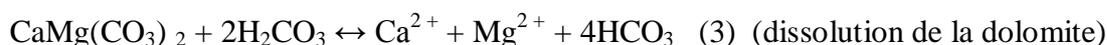


- la restitution des sulfates adsorbés auparavant sur les particules colloïdales des sols et des matériaux aquifères (Krouse, 1980).
- la pollution par les engrais et pesticides sulfatés pour les besoins agricoles.

IV.2.3- Calcium et magnésium :

Le calcium, le magnésium et les bicarbonates sont les cations dominants dans les eaux souterraines. Leur proportion varie en fonction de l'intensité des phénomènes de dissolution et de précipitation. Pendant l'infiltration, ou le long du flux, les eaux souterraines peuvent dissoudre le CaCO_3 et le $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ présents dans les roches carbonatées, augmentant de ce fait la concentration des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- .

Les principales réactions qui ont lieu lors du contact eaux-souterraines/roches-carbonatées sont :



Ainsi, les ions calcium et magnésium présents dans les eaux souterraines, sont particulièrement dérivés de la dissolution des calcaires, des dolomites, du gypse et des anhydrites. Cependant, ils peuvent également provenir des minéraux argileux, tels que la montmorillonite, l'illite et la chlorite (Garrels, 1976).

La présence du calcium peut être également attribuée aux processus d'échange de cations (Garrels, 1976), à l'évaporation, mais aussi aux actions des microorganismes. En effet la dégradation de la matière organique présente dans les sols, produit de fortes concentrations de dioxyde de carbone dissous (CO_2). Ce processus abaisse encore plus le pH et augmente par conséquent, la concentration de l'acide carbonique (H_2CO_3) dans l'eau souterraine.

V- Hydrochimie isotopique :

Introduction :

Les données utilisées dans cette partie du chapitre 2, ont été tirées du rapport final du projet CMEP, intitulé "Aménagement de la Grande Sebkha d'Oran, étude hydrologique" (AGSOEH), année 2005.

L'étude des isotopes naturels en hydrogéologie a plusieurs buts, dont les plus importants sont :

- l'identification des différents types d'eau, ainsi que leurs conditions d'infiltration,
- la localisation des zones de recharge et de drainance des nappes,
- l'estimation des temps de transit et des vitesses d'écoulement des eaux souterraines,
- l'étude des mélanges des masses d'eau.

V.1- Isotope de la molécule de l'eau :

Au niveau du lac salé de la Sebkha d'Oran, les teneurs en ^{18}O varient de -9,6 ‰ à 4,8 ‰. Un tel enrichissement en isotopes lourds est certainement lié à un phénomène évaporatoire intense qui marque, dès le mois de mai, le début de l'assèchement du lac. Concernant les teneurs en ^2H , elles varient de -70 ‰ pour les eaux du ruissellement du versant Nord des Tessala à 20 ‰ au niveau du lac salé.

V.1.1- Relation $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$:

Le diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (figure n°48) montre dans l'ensemble, une bonne corrélation des points, selon une courbe linéaire ayant pour équation :

$$\delta^2\text{H} = 5,289 \delta^{18}\text{O} - 8,936$$

Toutefois, une dispersion des points relatifs aux eaux de surface est constatée avec des écarts $\Delta\delta^2\text{H} \approx 90$ et $\delta^{18}\text{O} \approx 14$. Ces eaux présentent un enrichissement notable surtout aux lacs salés de la Sebkha et à la Dayet El Begrat. Les teneurs en isotopes stables de la molécule d'eau sont faibles pour les eaux des oueds ; seul l'Oued Kef El Ogab (avec une minéralisation > 55 g/l) drainant la nappe libre et caractérisé par un régime d'écoulement permanent présente des eaux relativement enrichies.

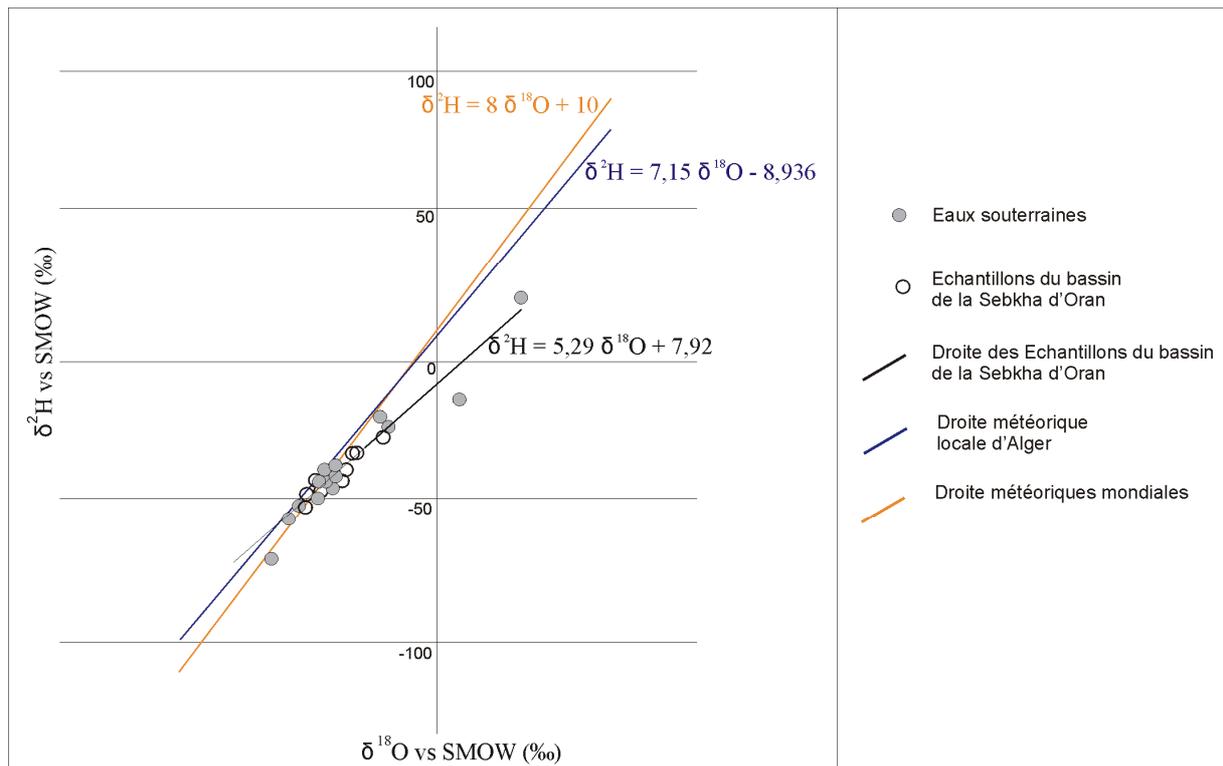


Figure n° 48 : Relation $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).

Pour ce qui est des eaux souterraines, la majorité des échantillons se retrouve en dessous de la droite météorique mondiale et locale de l'Algérois, représentant ainsi, des eaux évaporées. En général, les valeurs moyennes tournent autour de -6‰ pour l' ^{18}O et 42‰ pour le ^2H . Cependant, quelques échantillons se démarquent de ces valeurs moyennes notamment ceux des eaux thermales de Hammam Bou Hadjar. En effet, la source d'Ain El Begra alimentant le complexe thermal semble être d'origine plus profonde. Cette source est une résurgence qui remonte à la surface par artésianisme, aux travers des fractures et/ou par diffusion ascendante.

V.2- Processus de minéralisation :

Les écoulements souterrains dans notre secteur d'étude, ont tendance à se diriger vers l'aire de décharge de la Sebka qui représente la zone la plus basse du bassin (80 m d'altitude environ). La minéralisation des eaux augmente également suivant la même direction, c'est-à-dire du Sud vers le Nord. Ainsi, outre les phénomènes évaporatoires affectant les étendues d'eau libre, l'hypothèse d'une dissolution des sels peut être considérée.

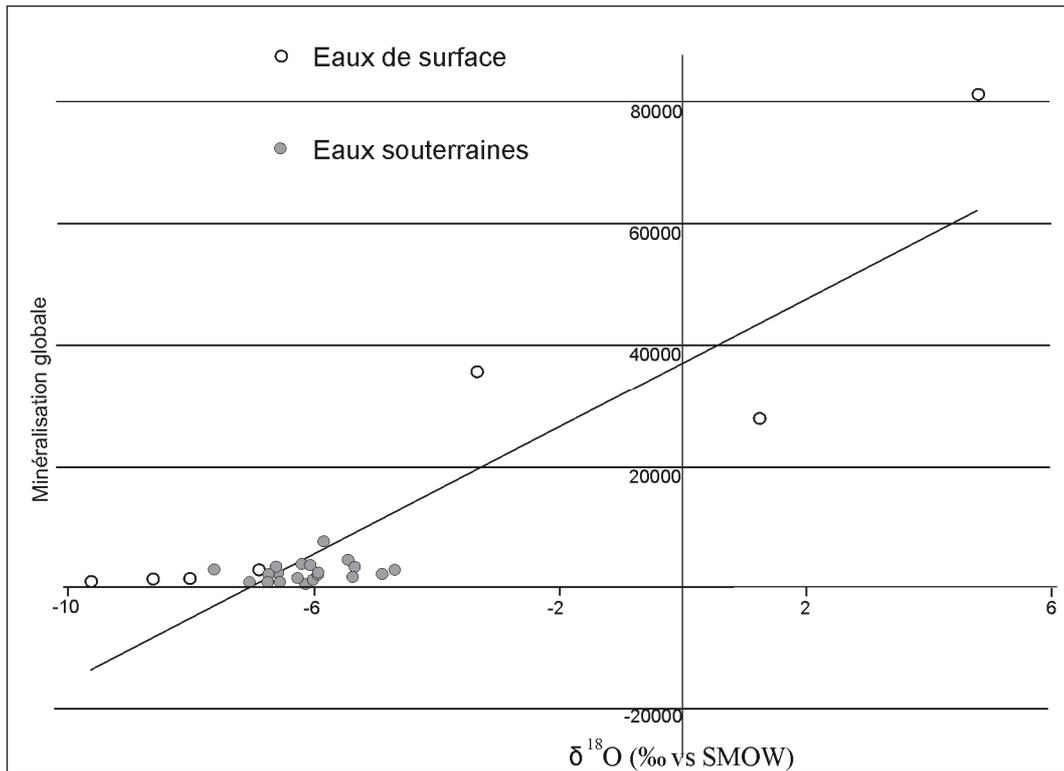


Figure n° 49 : Relation minéralisation globale - $\delta^{18}\text{O}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).

La distribution des points sur le digramme (figure n° 49) montre que les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ relatives aux eaux de surfaces sont assez dispersées. Cela dit, il apparaît que l'enrichissement en ^{18}O est lié à des valeurs élevées de la minéralisation. Ceci est également valable pour les eaux du lac de la Grande Sebkha et de l'Oued Kef El Ogab, suggérant de ce fait, l'évaporation comme phénomène responsable de la minéralisation de ces eaux. Quant aux teneurs en ^{18}O des eaux des oueds Besbes, El Rassoul et Tamzourh, elles restent assez faibles.

Concernant les eaux souterraines, dont les points sont plus ou moins regroupés sur le diagramme, il semblerait que l'acquisition de la minéralisation pour les horizons profonds se fait par la mise en solution du gypse, de l'anhydrite et de la halite. Ainsi, c'est la dissolution qui prend le dessus sur l'évaporation qui ne joue plus le rôle principal dans la minéralisation des eaux profondes. Les phénomènes d'évaporation et de dissolution peuvent être associés dans les niveaux superficiels.

V.3- Isotopes du carbone :

Le CO_2 atmosphérique et biogénique, ainsi que le carbone marin, représentent les trois grands réservoirs naturels du carbone minéral. Ce dernier se présente sous trois formes isotopiques :

- le carbone banal ou léger ^{12}C : 98,9 %,
- le carbone lourd ^{13}C : 1,1 %,
- le carbone instable ou radioactif ^{14}C : $1,18 \cdot 10^{-2}$.

Trois points captant différentes formations géologiques réparties dans le bassin de la Grande Sebkhah d'Oran ont été échantillonnés pour l'analyse en ^{13}C et ^{14}C . Les analyses ont été effectuées sur des bicarbonates précipités sous forme de BaCO_3 à l'aide de BaCl_2 , dans un milieu rendu basique par addition de soude (NaOH).

Tableau n° 25: Composition isotopique (^{13}C et ^{14}C) des eaux du bassin de la Grande Sebkhah d'Oran (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).

Nom	Formation captée	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	$A^{14}\text{C}$ (%)
Forage OT5	Complexe mio-pliocène	-3,9	$5,9 \pm 0,6$
Forage Oued Sebbah	Grès et sables pliocènes	-10,38	$16,4 \pm 0,4$
Source d'Ain El Begra (Hammam Bou Hadjar)	Eau émergeant par drainance des formations profondes	-4	$2,2 \pm 0,2$

V.3.1- Carbone – 13 :

La corrélation des teneurs en ^{13}C et en ^{18}O (figure n° 50) permet de faire les remarques suivantes :

- les eaux prélevées sur les bordures du bassin (Forage Oued Sebbah) se caractérisent par les plus faibles teneurs en ^{13}C .
- les eaux du forage OT5 et de la source d'Ain El Begra par contre, présentent des teneurs en ^{13}C du carbone inorganique total dissous (CITD) relativement plus élevées.

Ainsi, une source de carbone enrichi en ^{13}C semble contribuer au CITD, notamment dans les eaux profondes. En effet, la nature carbonatée des affleurements constituant la zone de recharge, représente une source potentielle de carbone « mort ». Par conséquent, on considère que le carbone en solution dans les eaux profondes du système aquifère de la Sebkhah d'Oran est le produit d'un mélange isotopique entre une phase gazeuse et une phase minérale selon l'équation :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{biogénique}} + \delta^{13}\text{C}_{\text{minéral}}$$

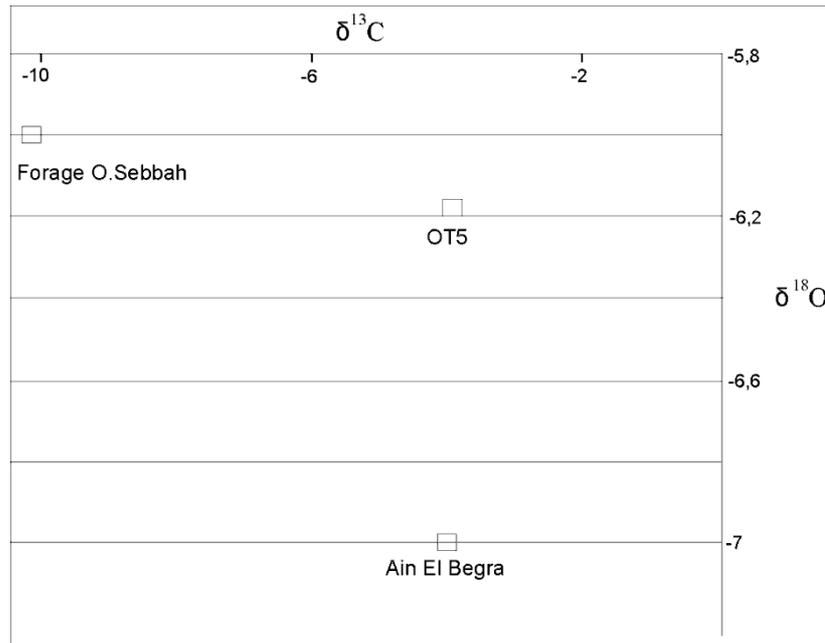


Figure n° 50 : Corrélation $\delta^{13}\text{C} / \delta^{18}\text{O}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).

V.3.2- Carbone – 14 :

V.3.2.1- Relation $\text{A}^{14}\text{C} / \delta^{13}\text{C}$:

De la figure n° 51, un enrichissement plus important en ^{14}C est observé sur les bordures du bassin (eau du forage Oued Sebbah) comparé aux teneurs en ^{14}C des eaux profondes du forage OT5 et de la source d'Ain El Begra. Dans les deux cas, la minéralisation du carbone peut être biogénique, issue soit de la transpiration et de la dégradation des plantes, soit de l'oxydation de la matière organique. Ainsi, l'activité du carbone dissous sous forme de bicarbonates devrait être considérée comme le résultat d'un mélange équi-atomique du CO_2 porteur de ^{14}C et du carbonate solide, généralement dépourvu de radiocarbone.

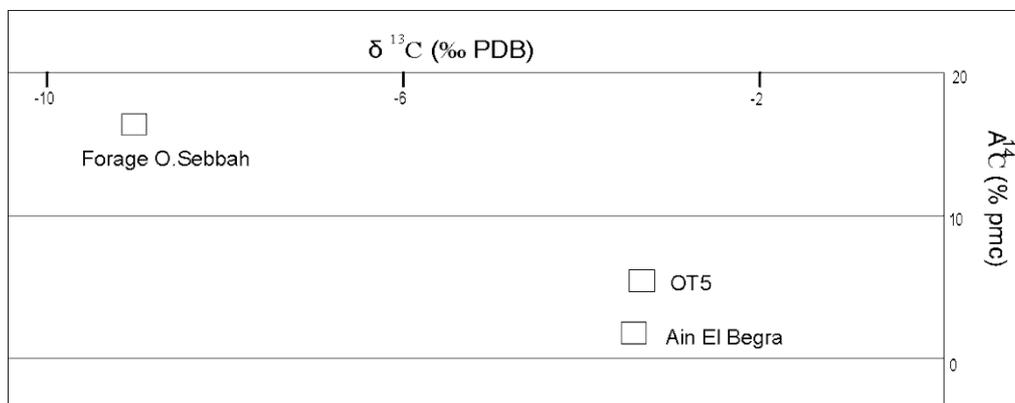


Figure n° 51 : Relation $\delta^{13}\text{C} - \text{A}^{14}\text{C}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).

V.4- Estimation des temps de résidence :

Le temps de résidence représente le temps moyen de renouvellement de la réserve. L'étude des teneurs en ^{13}C a montré l'existence d'une dilution du CITD d'origine biogène par un carbone « mort », issu de la dissolution de la matrice carbonatée qui se matérialise par un vieillissement apparent des eaux.

Les modèles de correction appliqués dans cette étude sont ceux de Pearson, Fontes et Garnier, l'AIEA, Evans et Eichinger. Les résultats obtenus (tableau n° 26) pour les activités initiales et les temps de résidence correspondants, montrent que les modèles à base de mélange isotopique entre le CO_2 biogénique et la matrice carbonatée semblent les plus adaptés à cette étude.

Tableau n° 26: Age radiométrique moyen des eaux du bassin de la Grande Sebkhah d'Oran (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).

Nom	Formation captée	Activité initiale A^{14}C (%)	Age moyen (ans)
Forage OT5	Complexe mio-pliocène	$5,9 \pm 0,6$	12000 ± 2200
Forage Oued Sebbah	Grès et sables pliocènes	$16,4 \pm 0,4$	10400 ± 1800
Source d'Ain El Begra (Hammam Bou Hadjar)	Eau émergeant par drainance des formations profondes	$2,2 \pm 0,2$	18500 ± 2600

Du tableau n° 26, les trois eaux sont relativement anciennes. Pour les eaux du forage Oued Sebbah, cela est dû à une circulation assez lente dans les milieux poreux représentés par les grès et les sables pliocènes captés par ce forage. Les grandes profondeurs et les longues périodes de réalimentation de la nappe du complexe mio-pliocène sont tenus responsables de l'âge assez ancien caractérisant les eaux du forage OT5. Les eaux de la source d'Ain El Begra, sont les plus anciennes. Elles émergent à la faveur d'une drainance verticale après un long cheminement dans le sous-sol profond. Elles proviendraient probablement de formations anté-miocènes.

VI- Conclusion :

L'étude hydrochimique des eaux de la plaine de la M'leta nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Les eaux des oueds deviennent de plus en plus minéralisées en passant par la plaine. Elles sont chlorurées sodiques dévalant des Monts Tessala et deviennent sulfatées sodiques arrivées au centre du bassin où les formations évaporitiques sont plus présentes.

A l'image des eaux des oueds, les eaux de la nappe libre sont également très minéralisées et sont caractérisées par le même faciès hydrochimique prédominant, à savoir, celui des eaux chlorurées sodiques.

Les même faciès hydrochimiques relatifs aux eaux de la nappe libre sont généralement retrouvés pour les eaux des forages (nappe intermédiaire et complexe mio-pliocène). Cependant, les eaux sulfatées sodiques sont plus présentes et sont captées par plusieurs forages.

L'étude des cartes d'isoteneurs nous a permis de constater que l'augmentation de la minéralisation se fait généralement du Sud vers le Nord de la plaine.

Les valeurs de la minéralisation très élevées des eaux de la nappe libre sont dues à une évaporation intense, favorisée par la faible profondeur du niveau statique de la nappe libre.

Pour les eaux des forages, les valeurs de la minéralisation restent assez fortes, surtout pour les eaux de la nappe intermédiaire. Ces fortes valeurs seraient dues dans le cas de la nappe intermédiaire, soit à un faible régime de pompage des forages, soit à un mélange avec les eaux de la nappe libre par drainance. Concernant les eaux du complexe mio-pliocène, les valeurs élevées de la minéralisation seraient peut être le résultat d'un crépinage de niveaux aquifères plus salés dans les forages.

Les interactions eaux/roches seraient également responsables des teneurs enregistrées pour les eaux de la plaine de la M'leta, surtout pour les eaux des forages, où l'effet de l'évaporation est absent.

L'étude isotopique a confirmé que l'évaporation est bel et bien le principal phénomène responsable de la minéralisation des eaux de la nappe libre et des oueds. Concernant les horizons profonds, l'étude isotopique a démontré que l'acquisition de la minéralisation des eaux des forages se fait par la dissolution du gypse, de l'anhydrite et de la halite.

Chapitre 3

Traitement statistique & Modélisation géochimique

I- Traitement statistique :

I.1- Méthodes d'analyse et de traitement des données :

Les données des campagnes de mars 1986 (nappe libre uniquement) et d'octobre 2011 (Forages uniquement) ont été traitées selon la distribution de Laplace-Gauss. Cette dernière est la distribution de probabilité continue la plus courante et la plus utilisée. Elle est définie par :

$$Y = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(X-\mu)^2/\delta^2} \quad (1)$$

Quand la variable X est centrée et rapportée à son écart type ; $Z = (X - \mu) / \delta$.

où :

Z : Variable centrée réduite (Z-Score),

X : Variable,

μ : Moyenne arithmétique (arithmetic mean),

δ : Ecart type (standard deviation),

L'équation (1) s'écrit sous la forme usuelle suivante :

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(z)^2}$$

On dit alors que Z est distribuée suivant une loi normale centrée réduite de moyenne nulle et de variance égale à 1.

La standardisation des données est essentielle dans les méthodes statistiques multivariées. En effet, lors du calcul des distances euclidiennes, les paramètres avec les plus grandes variances tendent à avoir une grande influence sur ceux dont les variances sont moindres (Güler et al. 2002; Cloutier et al. 2008). En plus, la standardisation des données augmente leur homogénéité ainsi que leur normalité.

Après standardisation des données, deux méthodes statistiques multivariées ont été appliquées sur les variables centrées réduites obtenues (voir annexes 3 et 8), à savoir, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

I.1.1- Analyse en Composantes Principales (ACP) :

L'analyse en composantes telle qu'on la retrouve dans le « *Dictionary of statistics and methodology* » (Vogt, 1993) : « est un ensemble de méthodes permettant de procéder à des transformations linéaires d'un grand nombre de variables intercorrélées, de manière à obtenir un nombre relativement limité de composantes non corrélées. Cette approche facilite l'analyse en regroupant les données en des ensembles plus petits et en éliminant les problèmes de multicolinéarité entre les variables ».

De manière générale, toutes les méthodes d'analyse de données ont pour but de rechercher l'axe C1 qui visualise au mieux les individus, c'est-à-dire celui pour lequel la variance des individus est maximale. Dans une ACP, cette direction est appelée première composante principale. Par la suite, une seconde direction C2 peut être recherchée en tenant compte du fait, qu'elle doit encore avoir la variance maximale, mais aussi, avoir une corrélation nulle (orthogonale à C1) avec la première. La recherche des axes se poursuit pour les p axes, dont les parts de représentativité sont de plus en plus faibles, au fur et à mesure que p augmente. L'origine est placée au centre de gravité du nuage et la disposition des variables les unes par rapport aux autres, aide à donner un sens à chaque axe ; plus une variable est éloignée de l'axe, plus elle contribue à son explication.

De façon simplifiée, on peut dire que l'ACP est une simple réduction mathématique de la quantité des données et cela sans assumptions exagérées (Anderson, 1958; Morrison, 1964; Sharma, 1996), permettant ainsi à l'utilisateur, une description de l'information, avec un nombre de variables considérablement réduit, comparé à celui originalement présent.

I.1.2- Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) :

Il est possible de distinguer deux grands types de méthodes de classification:

- les méthodes non hiérarchiques qui produisent directement une partition en un nombre fixe de classes,
- les méthodes hiérarchiques qui produisent une succession de partitions en classes, chaque fois similaires à l'image des célèbres classifications des espèces, genres, familles, ordres, etc.

Les méthodes de classification hiérarchiques fournissent plus d'informations que les méthodes de partitionnement, puisqu'une hiérarchie induit plusieurs partitions.

Il existe deux sortes d'algorithmes de classification hiérarchique :

- les premiers fournissent une série de partitions de plus en plus fines et sont appelés algorithmes de classification hiérarchique descendante,
- les seconds fournissent une série de partitions de moins en moins fines et sont appelés

algorithmes de classification hiérarchique ascendante.

I.1.2.1- Définition de la CHA :

La CHA consiste à agréger progressivement les individus selon leur ressemblance mesurée à l'aide d'un indice de similarité ou de dissimilarité. Elle nécessite la définition d'une mesure de similarité ou de distance entre les objets à classer (échantillons) et d'un critère d'agrégation des classes. Au départ, on a une partition en n classes, chaque classe étant composée d'un seul objet (partition la plus fine). L'algorithme commence par la suite à rassembler les couples d'individus se ressemblant le plus, puis à agréger progressivement les autres individus ou groupes d'individus, jusqu'à ce que la totalité des individus ne forme plus qu'un seul groupe. La CHA produit un arbre binaire de classification appelé dendrogramme.

I.1.2.2- Méthodes de mesures :

Il existe de nombreuses mesures de ressemblances (similarités ou dissimilarités) et plusieurs méthodes pour les calculer (critères d'agrégations). Les divers logiciels proposent des indices et des critères sélectionnés en fonction de leurs propriétés mathématiques et de leur intérêt pratique ou pédagogique. Dans le cadre de ce travail, on a utilisé le logiciel XLSTAT.

I.2- Application :

I.2.1- Nappe libre (campagne de mars 1986) :

Les résultats du calcul des paramètres statistiques représentatifs des 34 échantillons (observations) et des 10 variables représentées par le pH et les teneurs en g/l de la Minéralisation et des éléments chimiques, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃, Na, Ca, Mg, K, sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau n° 27 : Statistique descriptive des eaux de la nappe libre.

Variabes	pH	MINR	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Na	Ca,	Mg	K
Moyennes	7,9	5	0,35	1,88	1,25	0,044	1,19	0,3	0,235	0,026
Ecart-types	0,22	1,5	0,14	0,6	0,95	0,027	0,5	0,12	0,1	0,02

Du tableau n° 27, les sulfates et la minéralisation présentent les plus grandes valeurs relatives à l'écart type. Ceci montre la grande dispersion des teneurs de ces deux paramètres. Les

plus faibles dispersions par contre, sont relatives aux nitrates et au potassium.

I.2.1.1- Calcul des coefficients de corrélation :

Le tableau n° 28 montre que les meilleures corrélations entre paramètres physiques et chimiques, sont celles qu'on retrouve entre la MINR et les ions Na, Cl, Mg et SO₄. Ainsi, ces quatre éléments chimiques sont directement responsables de la minéralisation des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta.

Tableau n° 28 : Matrice de corrélation des variables.

Variables	MINR(mg/l)	pH	Na(mg/l)	K(mg/l)	Mg(mg/l)	Ca(mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl(mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
MINR(mg/l)	1									
pH	-0,257	1								
Na(mg/l)	0,944	-0,272	1							
K(mg/l)	0,125	-0,178	0,257	1						
Mg(mg/l)	0,779	0,132	0,678	0,066	1					
Ca(mg/l)	0,690	-0,284	0,579	-0,080	0,467	1				
HCO ₃ (mg/l)	0,003	0,194	0,086	0,192	0,070	-0,497	1			
Cl(mg/l)	0,880	-0,390	0,782	0,140	0,583	0,548	0,051	1		
SO ₄ (mg/l)	0,752	0,031	0,783	0,160	0,779	0,627	-0,099	0,370	1	
NO ₃ (mg/l)	-0,294	0,123	-0,198	-0,022	-0,529	-0,067	-0,179	-0,313	-0,244	1

Les meilleures corrélations entre éléments chimiques se retrouvent entre :

- les sulfates et le sodium (0,783),
- les chlorures et le sodium (0,782),
- les sulfates et le magnésium (0,779),
- le magnésium et le sodium (0,687).

I.2.1.2- Analyse en Composantes Principales :

I.2.1.2.1- Diagonalisation :

a/ Valeurs propres :

La diagonalisation nous a permis de distinguer les axes suivants :

Tableau n° 29 : Valeurs propres et variabilité en % des axes factoriels.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Valeur propre	6,498	1,599	1,321	1,013	0,757	0,383	0,207	0,122	0,070	0,015	0,011	0,003
Variabilité (%)	54,149	13,327	11,008	8,445	6,311	3,188	1,728	1,013	0,583	0,127	0,095	0,026
% cumulé	54,149	67,477	78,484	86,930	93,241	96,429	98,157	99,170	99,753	99,879	99,974	100,000

La variance expliquée est de 67.5 % pour les deux axes F1 et F2, avec plus de 50% pour

le premier axe F1.

b/ Corrélation entre les variables et les facteurs :

Du tableau n° 30, les meilleures corrélations du facteur F1 se font respectivement avec la MINR et les ions Na, SO₄, Mg et Cl. Concernant le facteur F2, il est bien corrélé avec l'ion HCO₃ et faiblement avec les ions K et Mg.

Tableau n° 30 : Corrélation entre les variables et les facteurs.

Facteurs	MINR	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	pH
F1	0.979	0.939	0.155	0.824	0.73	-0.053	0.809	0.837	-0.351	-0.242
F2	0.011	0.075	0.328	0.298	-0.557	0.865	0.012	0.034	-0.433	0.387

c/ Contribution des variables (%) :

La minéralisation et les ions Na, Cl, et SO₄ contribuent presque à 70% dans le facteur F1. Le facteur F2, est quant à lui représenté à plus de 65% par les ions HCO₃ et Ca.

Ainsi, les échantillons les plus à l'Est de l'axe F1 seraient les plus minéralisés, tandis que ceux les plus au Nord de l'axe F2 seraient les plus riches en ions bicarbonates.

Tableau n°31 : Contribution des variables en (%).

Facteurs (%)	MINR	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	pH
F1	20.54	18.43	0.67	14.76	11.53	0.071	14.67	14.38	3.34	1.57
F2	0.01	0.3	6.6	5.37	19.73	46.85	0.002	0.06	11.41	9.66

I.2.1.2.2- Représentation graphique :

La figure n° 52-(A), montre que la majorité des paramètres est positivement corrélée autour de l'axe F1 à l'exception des ions NO₃ et HCO₃. Selon l'axe F2, tous les paramètres sont positivement corrélés, sauf les nitrates et le calcium. Ainsi, tous les paramètres sont bien corrélés, sauf les nitrates et le potassium qui convergent vers l'intérieur du cercle.

De la figure n° 52- (B), plusieurs remarques peuvent être faites, les plus importantes sont : 59% (20) des échantillons sont négativement corrélés avec l'axe F1 et par conséquent avec la minéralisation et les ions Na, Cl, SO₄, Mg, Ca et K. Ainsi, les échantillons sont de plus en plus minéralisés en allant à droite de l'axe F1 et vice-versa.

15 échantillons sont positivement corrélés avec l'axe F2. Etant donné que les ions bicarbonates contribuent positivement à plus de 45% dans cet axe, les échantillons se trouvant le

plus au Nord de celui-ci, seront les plus riches en bicarbonates (et en potassium).

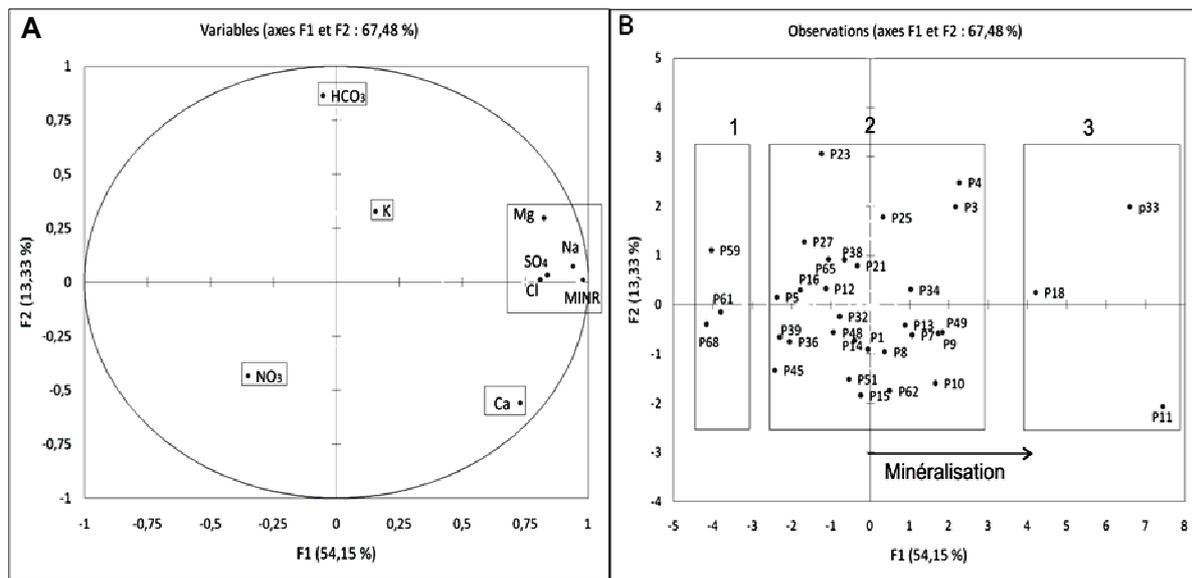


Figure n° 52 : Représentation graphique des variables (A) et des Individus (B).

L'application de l'ACP nous a permis d'identifier les groupes suivants :

- **le groupe n° 01** : ce groupe renferme 3 puits : P59, P61 et P68. Avec une moyenne de résidu sec égale à 2,8 g/l, ces puits captent les eaux les plus faiblement minéralisées de la nappe libre.
- **le groupe n° 02** : ce groupe comporte le plus grand nombre de puits (28). Ces derniers captent tous des eaux chlorurées sodiques (sauf P23). Ces eaux ont une minéralisation intermédiaire (4,9 g/l) entre le premier et le troisième groupe.
- **le groupe n° 03** : il est formé par 3 puits captant les eaux les plus minéralisées de la nappe libre (moyenne = 8,3 g/l).

I.2.1.3- Classification hiérarchique ascendante :

L'application de la CHA pour les données relatives aux eaux de la nappe libre (campagne de mars 1986), nous a permis d'obtenir un dendrogramme (figure n° 53) où s'individualisent les groupes suivants (tableau n° 32) :

Tableau n° 32 : Subdivision des puits à l'aide de la CHA.

Groupe n° 01	Groupe n° 02	Groupe n° 03	Groupe n° 04
P59	P3	P1	P11
P61	P4	P5	P18
P68	P7	P12	P33
	P8	P16	
	P9	P23	
	P10	P27	
	P13	P36	
	P14	P38	
	P15	P39	
	P21	P45	
	P25	P48	
	P32	P65	
	P34		
	P49		
	P51		
	P62		

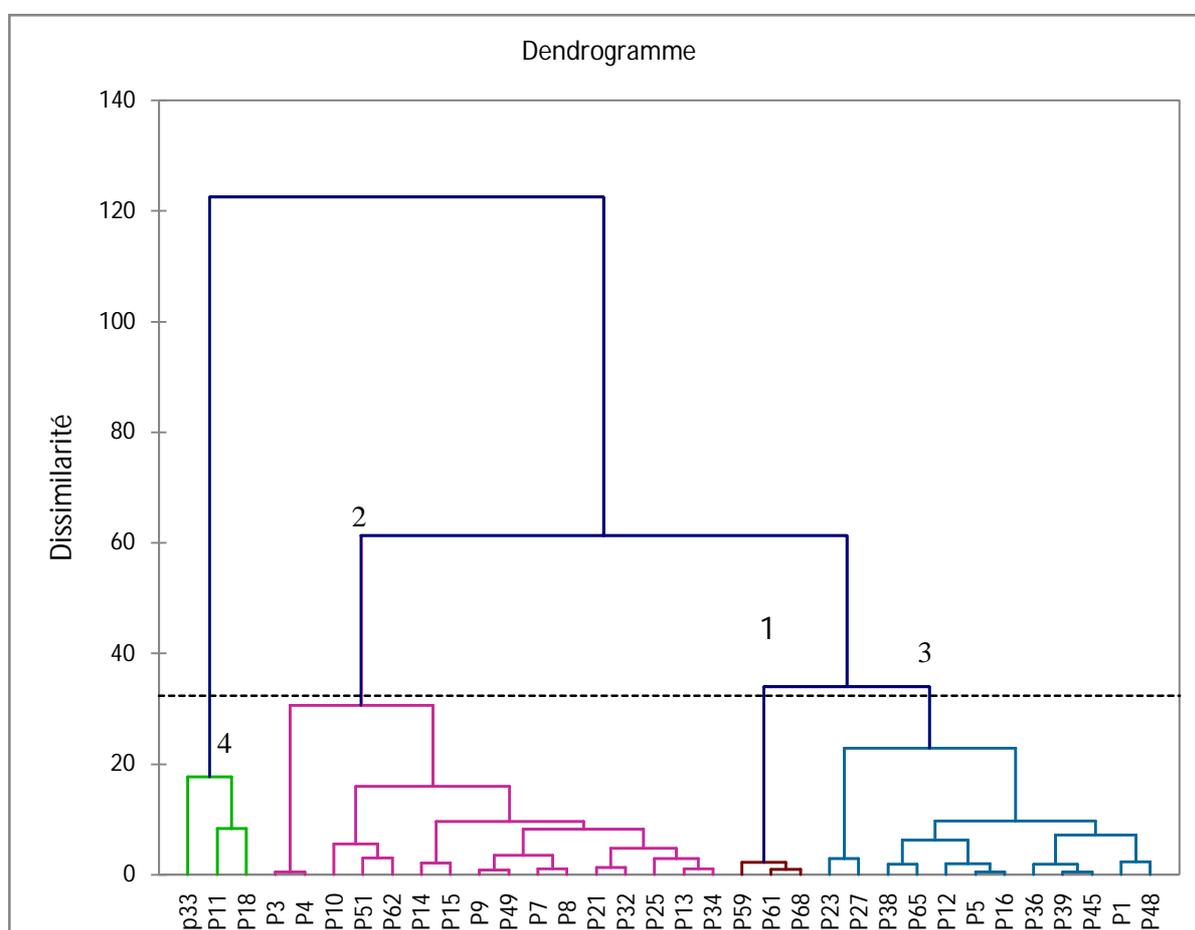


Figure n° 53 : Dendrogramme des eaux puits de la nappe libre.

L'examen du tableau n° 32 et du dendrogramme (Figure n° 53) fait ressortir deux groupes identifiés auparavant par l'ACP, à savoir les groupes n°01 et n°04 (n°03 pour l'ACP).

Contrairement à la subdivision des individus obtenue par l'ACP, où la majorité des

échantillons (28) se trouvaient dans un même groupe (n°02), l'application de la CHA a permis de classer ces échantillons en deux groupes différents, n°02 et n°03, comportant respectivement, 16 et 12 puits (tableau n°33).

Cela peut s'expliquer comme suit :

Tableau n° 33 : Comparaison des subdivisions des individus entre l'ACP et la CHA.

		Teneurs en mg/l								
ACP	CHA	MINR	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
Groupe n°02	Groupe n°02	5460	1237	25,16	267	355	316	2054	1447	43
	Groupe n°03	4123	910	17	201	239	391	1604	710	39

Du tableau n° 33, une augmentation des teneurs des éléments chimiques est observée en comparant les eaux du groupe n° 03 à celles du groupe n° 02 (groupes identifiés par la CHA), surtout pour les ions SO₄, Cl et Na. Cette augmentation des teneurs est interprétée par la CHA comme une mesure de dissimilitude et de ce fait, elle permet une plus grande différenciation au sein d'un même groupe, les individus (échantillons) sont classés ainsi en deux groupes, au lieu d'un seul en appliquant l'ACP ; cette dernière n'étant pas une méthode de classification, elle ne fait ressortir que les directions majeurs d'ajustement de la variable et des individus.

I.2.2- Complexe mio-pliocène et nappe intermédiaire (campagne d'octobre 2011) :

En raison du faible nombre d'échantillons en notre possession, le traitement statistique des données de la campagne d'octobre 2011 a été fait pour l'ensemble des 13 forages (7 forages captant le complexe mio-pliocène et 6 la nappe intermédiaire).

Les résultats d'analyse des 13 échantillons et des 10 variables représentées par les teneurs en mg/l de la MINR, des éléments chimiques HCO₃, Cl, SO₄, NO₃, Na, Ca, Mg, et K sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau n° 34 : Statistique descriptive des eaux des forages.

	MINR	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	pH
Moyenne mg/l	2602	542	5,7	127,5	152	408	790	604	7,6	7,3
Ecart-type	1059	291	2,45	53,2	69,5	109	452	271	6,5	0.2

I.2.2.1- Matrice de corrélation :

Les meilleures corrélations positives de la MINR se font respectivement avec les ions Cl, Na, Mg et SO₄. Cela montre la grande contribution de ces ions dans la minéralisation des

eaux captées par les forages.

Tableau n° 35 : Matrice de corrélation des variables.

Variables	MINR(mg/l)	pH	Na(mg/l)	K(mg/l)	Mg(mg/l)	Ca(mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl(mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
MINR(mg/l)	1									
pH	-0,183	1								
Na(mg/l)	0,935	0,108	1							
K(mg/l)	-0,361	-0,629	-0,569	1						
Mg(mg/l)	0,907	-0,377	0,741	-0,246	1					
Ca(mg/l)	0,244	-0,865	-0,087	0,671	0,398	1				
HCO ₃ (mg/l)	0,037	-0,468	-0,123	0,200	0,221	0,461	1			
Cl(mg/l)	0,958	0,002	0,984	-0,500	0,808	-0,006	-0,107	1		
SO ₄ (mg/l)	0,789	-0,510	0,556	0,090	0,820	0,695	0,140	0,592	1	
NO ₃ (mg/l)	0,282	0,009	0,379	0,061	0,147	-0,185	-0,310	0,425	-0,035	1

Les meilleures corrélations positives des éléments majeurs se retrouvent entre :

- les chlorures et le sodium (0.984),
- les sulfates et le magnésium (0.820),
- les chlorures et le magnésium (0,808),
- le sodium et le magnésium (0.741).

I.2.2.2- Analyse en Composantes Principales :

I.2.2.2.1- Diagonalisation :

a/ Valeurs propres :

Du tableau n° 36, le premier et le deuxième facteur expliquent respectivement plus de la moitié (54,5%) et du quart (26,2%) de la variable. Ainsi, ils représentent tous deux cumulés, plus de 80% de la variable.

Tableau n° 36 : Valeurs propres et variabilité en % des axes factoriels.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Valeur propre	6,544	3,146	1,208	0,690	0,209	0,119	0,045	0,031	0,008	0,000	0,000	0,000
Variabilité (%)	54,531	26,219	10,063	5,748	1,745	0,988	0,376	0,256	0,069	0,003	0,002	0,000
% cumulé	54,531	80,750	90,813	96,561	98,306	99,294	99,670	99,927	99,996	99,998	100,000	100,000

b/ Corrélations entre les variables et les facteurs :

Le tableau n° 37 montre de très bonnes corrélations positives du facteur F1 avec la MINR et les ions Mg, Cl, Na et SO₄. Donc, les échantillons proches de cet axe seront d'autant plus

minéralisés à sa droite qu'à sa gauche. Le facteur F2 pour sa part, est bien corrélé avec les ions Ca, K et moyennement avec l'ion HCO₃. Ainsi, les eaux les plus riches en calcium devront être observées au Nord de cet axe sur l'espace des individus (figure n° 54).

Tableau n° 37 : Corrélations entre les variables et les facteurs.

Facteurs (%)	MINR	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	pH
F1	0.99	0.9	-0.3	0.93	0.31	0.07	0.93	0.82	0.28	-.027
F2										

c/ Contributions des variables en (%) :

D'après le tableau n° 38, la minéralisation et les ions Mg, Cl, Na et SO₄ contribuent à plus de 92% dans le facteur F1. Pour le facteur F2 les ions Ca, K et HCO₃, représentent plus de 58% du total des variables s'ajustant sur son axe.

Tableau n° 38 : Contribution des variables en %.

Facteurs (%)	MINR	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	pH
F1	21.6	17.6	2	19.25	2.13	0.12	19	14.7	1.8	1.6
F2	0.2	5	19.8	0.7	27.3	11	3.25	5.7	2.6	24.45

I.2.2.2- Représentation graphique :

L'espace des variables (figure n° 54) montre que la majorité des paramètres sont bien inter-corrélés entre eux, sauf les nitrates et à un degré moindre l'ion bicarbonate.

Selon l'axe F1, toutes les variables sont positivement corrélées, à l'exception de l'ion Potassium.

Selon l'axe F2 par contre, les paramètres sont subdivisés de part et d'autre en deux groupes. Les variables corrélées positivement sont représentées par les ions K, HCO₃, SO₄, Mg et Ca et celles corrélées négativement par la MINR et les ions, Na, Cl et NO₃.

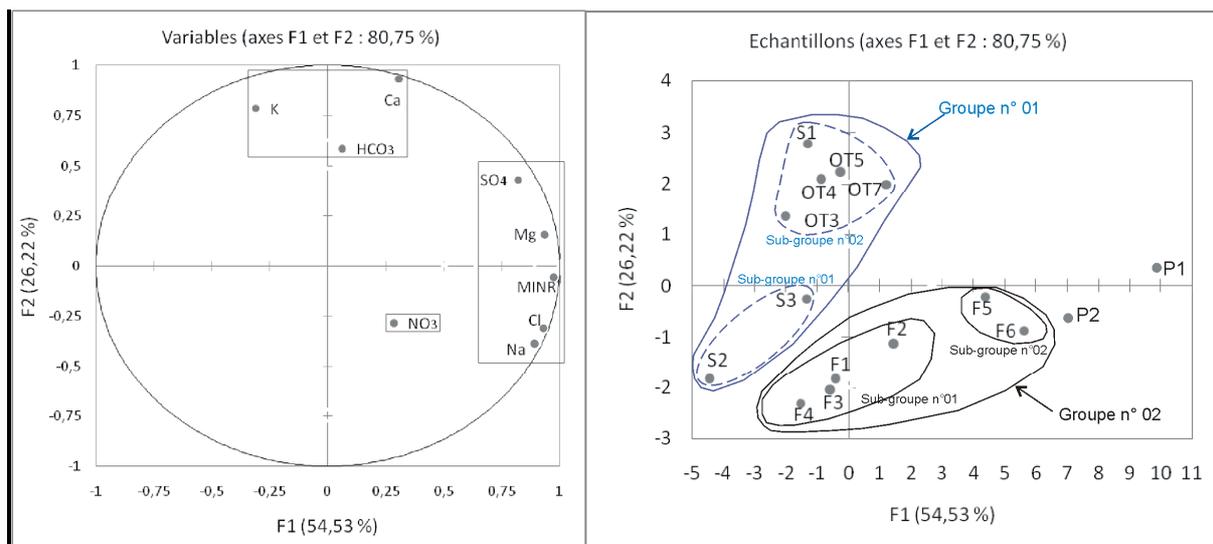


Figure n° 54 : Représentation graphique des variables et des individus.

Sur l'espace des individus (figure n°54), on distingue deux grands groupes. Le premier englobant uniquement les forages captant le complexe mio-pliocène, le deuxième, ceux relatifs à la nappe intermédiaire.

Le groupe n°01 :

Ce groupe rassemble les 07 forages gérés par la SEOR. A l'exception d'OT7, tous ces forages captent des eaux négativement corrélés avec l'axe F1. Sachant que ce dernier est représenté à plus 92% par la minéralisation et les ions Mg, Cl, Na et SO₄, on peut dire que les eaux du complexe mio-pliocène sont relativement faiblement minéralisées. Cela est d'ailleurs confirmé par la moyenne de la minéralisation de ces eaux, qui est de l'ordre de 2 g/l. Ces eaux deviennent toutefois, plus minéralisées et changent de faciès en passant des affleurements calcaires au Sud, à des formations plus gréseuses au Nord. En effet, elles sont chlorurées sodiques au niveau du forage S2 (MINR = 0,85 g/l) puis bicarbonatées sodiques au niveau du forage S1 (MINR = 2 g/l) puis sulfatées sodiques au niveau du forage OT4 (MINR = 2,2 g/l) et elles redeviennent ensuite chlorurées sodiques au niveau du forage OT7 (MINR = 3,6 g/l)

Les forages captant le complexe mio-pliocène peuvent être classés en fonction de leurs emplacements en deux sous-groupes. Le premier comportant les forages implantés sur les affleurements calcaires (forages S2 et S3) et le deuxième, ceux se trouvant au Nord de la région de Tafraoui (forages : OT3, OT4, OT5, OT7 et S1).

Le groupe n°02 :

Le groupe n°02 réunit les forages de la nappe intermédiaire et il comporte également deux sous-groupes. Le premier sous-groupe englobe 4 forages : F1, F2, F3 et F4. Avec une moyenne de minéralisation égale à 2,6 g/l, ces forages captent des eaux faiblement minéralisées.

Le deuxième sous-groupe ne contient que deux forages, F5 et F6 en l'occurrence. Ces deux forages captent des eaux avec des valeurs de minéralisation respectives égales à 4,3 g/l et 4,8 g/l. Ces eaux étant assez profondes (95 m de profondeur pour F5 et 130 m pour F6) leur minéralisation, serait due soit à un mélange des eaux de la nappe intermédiaire avec celles très minéralisées de la nappe libre (comme on peut le remarquer sur l'espace des variables), soit à une faible activité de pompage dans ces deux forages. Concernant les faciès hydrochimiques, tous les forages du groupe n°02 captent des eaux chlorurées sodiques.

I.2.2.3- Classification Hiérarchique Ascendante :

L'application de la CHA sur les variables centrées réduites relatives aux données de la campagne d'Octobre 2011, nous a permis d'obtenir un dendrogramme (figure n°55) où s'individualisent les groupes suivant :

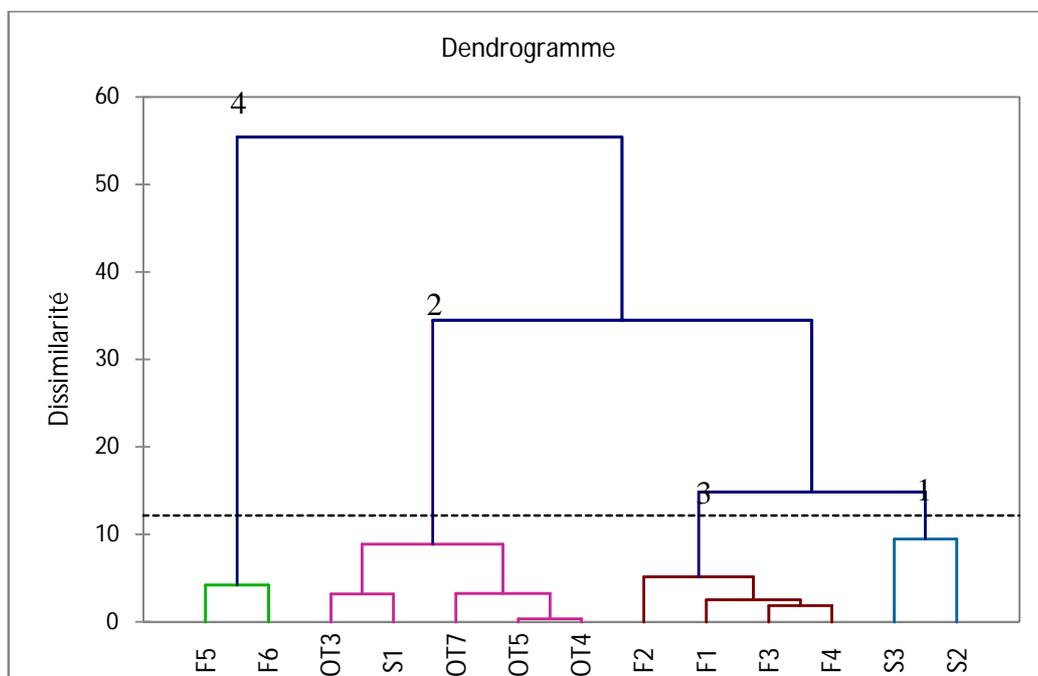


Figure n° 55 : Dendrogrammes des eaux des forages échantillonnés en octobre 2011.

Tableau n° 39 : Classification des forages à l'aide de la CHA.

Groupe n°01	Groupe n°02	Groupe n°03	Groupe n°04
S2	OT3	F1	F5
S3	OT5	F3	F6
	S1	F2	
	OT4	F4	
	OT7		

Le tableau n° 39, ainsi que le dendrogramme (figure n° 55) montrent qu'on retrouve exactement les mêmes groupes identifiés par l'ACP, ce qui démontre une bonne cohérence entre les résultats des deux méthodes.

II- Modélisation géochimique :

Introduction :

La chimie de l'eau d'un aquifère est généralement tributaire de deux facteurs fondamentaux, à savoir, le type de matériau en contact avec l'eau (interaction eau-roche) et le temps que ce contact prend. En effet, un nombre important de phénomènes et de réactions chimiques affectent les caractéristiques biologiques et géochimiques de l'aquifère, notamment les réactions acido-basiques, la précipitation et la dissolution des minéraux, l'absorption et l'échange d'ions, les réactions d'oxydoréduction, la dissolution des gaz et la biodégradation.

Pour essayer de connaître les paramètres majeurs influant sur le chimisme des eaux souterraines dans notre secteur d'étude, on a utilisé les diagrammes de dispersion de Datta & Tyagi (1996) ainsi que le diagramme de Gibbs (1970).

II.1-Diagramme de dispersion de Datta & Tyagi :

En fonction de la position des points échantillonnés (figures n°57 et 58) sur les diagrammes de dispersion [r ($\text{SO}_4 + \text{HCO}_3$) en fonction r ($\text{Ca} + \text{Mg}$)] par rapport à la ligne séparant la zone de l'altération des carbonates de celles des silicates (ligne 1:1), Datta & Tyagi ont déduit les conclusions suivantes :

La minéralisation des échantillons au-dessus de cette ligne, résultent de l'altération climatique des carbonates avec domination des ions calcium et magnésium.

La minéralisation des échantillons en dessous est due par contre, à l'altération climatique des silicates avec domination des ions bicarbonates et sulfates comparés aux ions calcium et magnésium.

Les échantillons sur, et le long de la ligne, doivent leur minéralisation aux deux altérations combinées.

*Sur les diagrammes de dispersion de Datta & Tyagi, figures n° 56 et 57, nous avons représenté respectivement, tous les échantillons de la nappe libre, ainsi que tous les échantillons des forages pour les deux campagnes de mars 1986 et d'octobre 2011.

II.1.1-Nappe libre (campagnes de mars 1986 et d'octobre 2011) :

La figure n° 56 fait ressortir presque la même classification des échantillons obtenue par les méthodes statistiques multivariées (l'ACP et la CHA) (voir partie traitement statistique, chapitre 3), ce qui confirme la bonne cohérence des résultats acquis par ces méthodes.

La figure n° 56 montre également que la majorité des échantillons (24) se retrouve, soit au-dessus, soit le long de la ligne (1:1). L'excès en r (Ca+ Mg) par rapport à r (SO₄+HCO₃), indique que les processus inverses d'échange d'ions sont prédominants dans l'aquifère alluvial (Cerling et al, 1989; Fisher et Mulican, 1997; McLean et Jankowski, 2000).

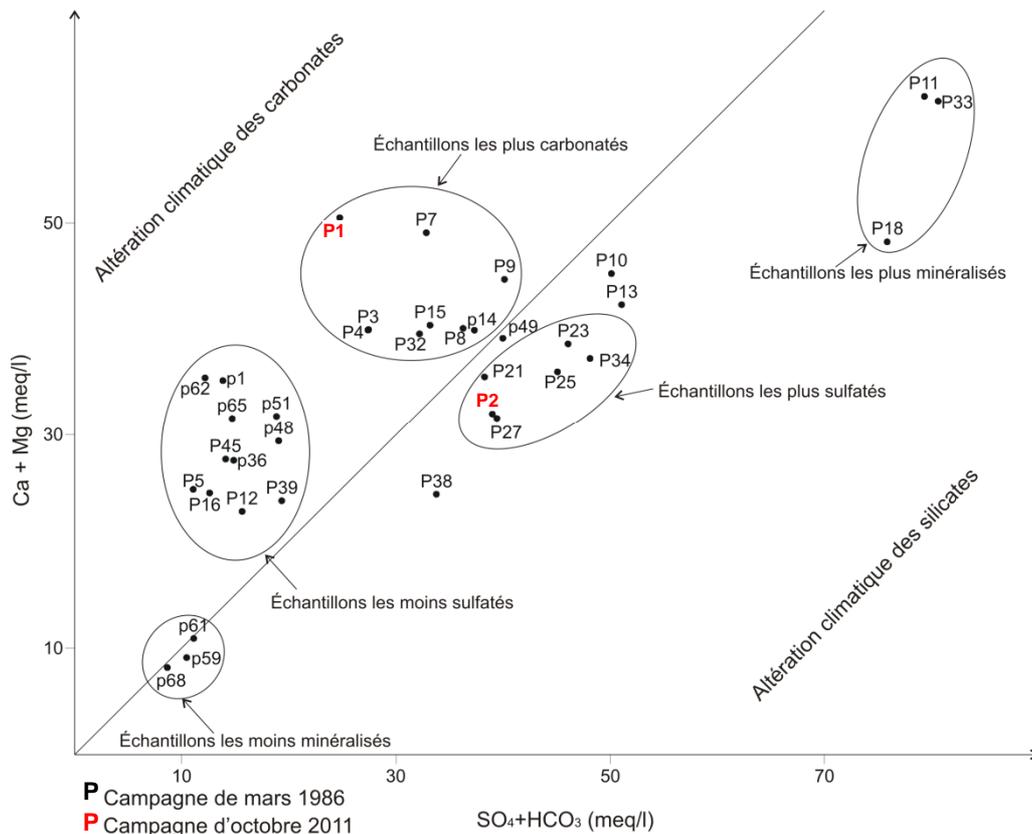


Figure n° 56 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre sur le diagramme de dispersion de Datta & Tyagi. (1996).

A partir du diagramme de dispersion (figure n° 56), les échantillons ont été classés en cinq groupes.

Le premier groupe englobe trois puits captant les eaux les plus minéralisées de la nappe libre. Ces puits sont soit peu profonds (niveau piézométrique proche de la surface) et donc très exposés à l'évaporation, soit alimentés directement par les eaux très minéralisées des oueds (voir annexe 1), soit soumis à une activité de pompage intense.

Le deuxième groupe contient également trois puits uniquement. Ces derniers sont implantés à l'Ouest de la région d'Ain Beida et captent les eaux les moins minéralisées de la nappe libre. Ces puits captent peut être des niveaux aquifères alimentés uniquement par les eaux de pluie (la nappe libre est formée par une multitude de niveaux aquifères, voir partie

piézométrie, cadre hydrogéologique, chapitre 1).

Le troisième groupe inclut 9 puits. Ces derniers se situent au Nord de Tafraoui (implantés sur les affleurements calcaires) et captent les eaux les plus carbonatées de la nappe libre, dont l'enrichissement en ions Ca^{+2} et Mg^{+2} est dû notamment, aux phénomènes de dissolution affectant les roches carbonatées.

Les échantillons du quatrième et du cinquième groupe sont classés en fonction de leurs teneurs en ions SO_4 . Ainsi, les eaux (chlorurées sodiques) les plus sulfatées sont celles relatives aux puits limitrophes à P23 (ce puits capte des eaux sulfatées sodiques). Cela serait lié à l'abondance des évaporites (gypse et anhydrite) dans cette partie de la plaine (centre du bassin). Les eaux chlorurées sodiques les moins sulfatées sont captées par les puits situés aux alentours de la région d'Ain Larbaa, où ce sont plutôt les formations argileuses qui abondent.

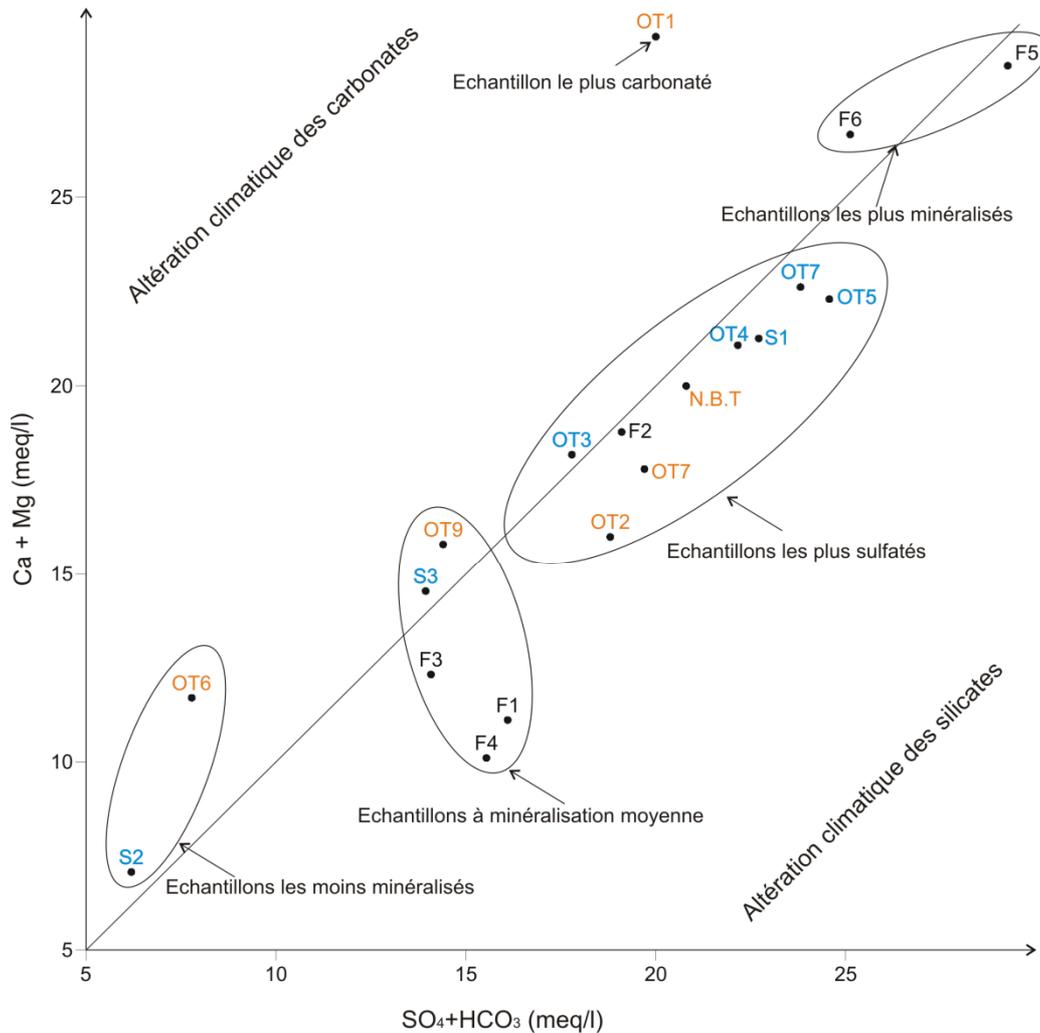
II.1.2- Complexe mio-pliocène et nappe intermédiaire (campagnes de mars 1986 et d'octobre 2011) :

A l'exception des forages OT1, OT6, F4 et F1, tous les échantillons se placent le long de la ligne 1:1 (figure n° 57). Donc, les deux processus d'altération des silicates et des carbonates, contribuent conjointement à la minéralisation des eaux des forages. Ainsi, on peut dire que les processus de dissolution de la calcite, de la dolomite, du gypse et de l'anhydrite sont dominants dans l'aquifères mio-pliocène (Cerling et al, 1989; Fisher et Mulican, 1997; McLean et Jankowski, 2000).

En fonction du faciès hydrochimique, on peut classer les échantillons en deux groupes majeurs. Le groupe des eaux chlorurées sodiques et celui des eaux les plus sulfatées.

Le premier groupe inclut les échantillons F5 et F6 (les plus minéralisés), OT6 et S2 (les moins minéralisés) ainsi que OT9, S3, F3, F4 et F1 (MINR = 2,3 g/l).

La majorité des échantillons (OT2, OT3, OT4, OT5, et OT7) inclus dans le deuxième groupe sont sulfatés sodiques, sauf F2 (chloruré sodique riche en sulfates), S1 (bicarbonaté sodique) et N.B.Tafraoui (sulfaté calcique). La présence de l'anhydrite (voir log géologiques des forages en annexe) serait à l'origine du faciès sulfaté des eaux profondes.



Complexe mio-pliocène : Campagne de mars 1986, Campagne d'octobre 2011
 Nappe intermédiaire: Campagne d'octobre 2011

Figure n° 57 : Représentation graphique des eaux des forages sur le diagramme de dispersion de Datta & Tyagi. (1996).

II.2-Diagramme de Gibbs :

Le diagramme de Gibbs (1970) est largement utilisé dans l'établissement des relations entre la composition chimique des eaux et les caractéristiques lithologiques des aquifères. Gibbs s'est basé sur les rapports $[r (Na/ Na + Ca) \text{ et } r (Cl/ Cl + HCO_3)]$ en fonction des valeurs du solide total dissous (TDS). Sur le diagramme de Gibbs et proportionnellement au résidu sec, trois zones de dominance : de la précipitation, de l'évaporation et de l'interaction eau/roche, sont distinguées.

*Sur les diagrammes de Gibbs, figures n° 58 et 59, tous les échantillons de la nappe libre, ainsi que tous les échantillons des forages, ont été respectivement représentés pour les deux campagnes d'échantillonnage (mars 1986 et octobre 2011).

II.2.1-Nappe libre (campagnes de mars 1986 et d'octobre 2011) :

Le diagramme de Gibbs (figure n° 58) montre que les échantillons de la nappe libre se situent dans la zone de dominance de l'évaporation. Toutefois, l'examen du diagramme (A) montre que ces échantillons sont à l'intérieur du domaine de l'évaporation, ce qui n'est pas le cas pour le diagramme (B). Cela s'expliquerait par une augmentation importante en chlorures liée aux rejets domestiques, augmentant de ce fait, le rapport $[r(Cl / Cl + HCO_3)]$.

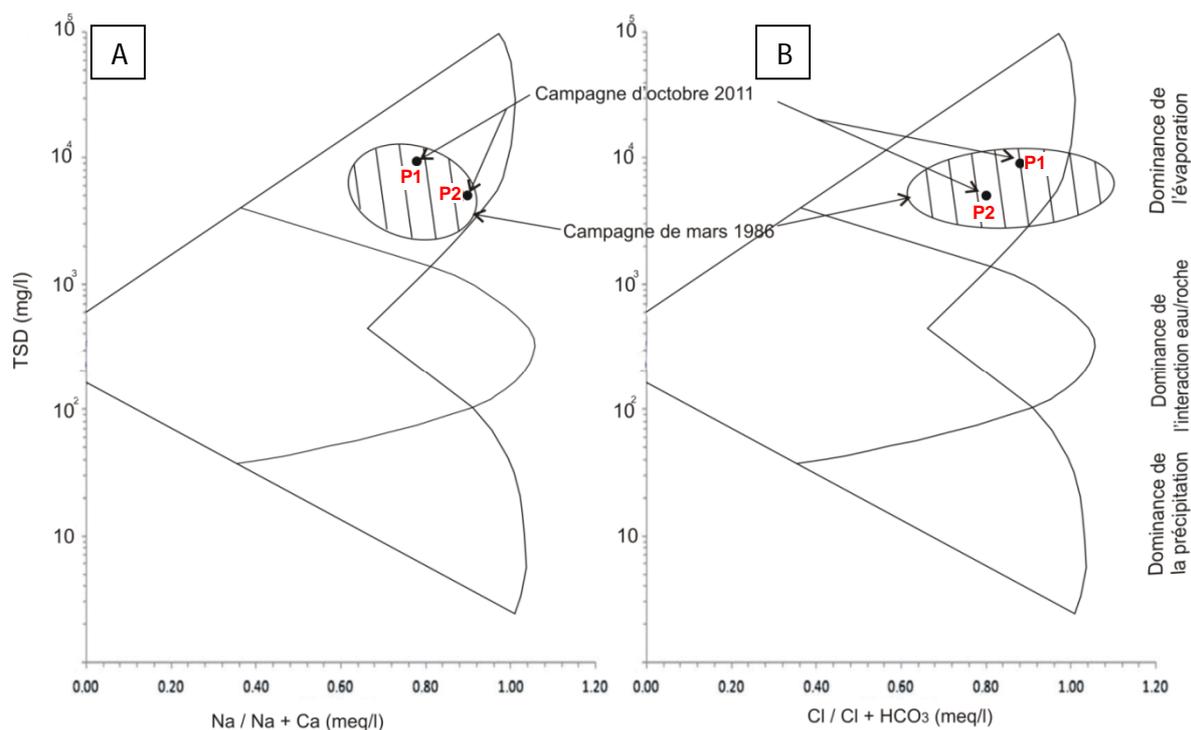


Figure n° 58 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre sur le diagramme de Gibbs (1970).

II.2.2- Complexe mio-pliocène et nappe intermédiaire (campagnes de mars 1986 et d'octobre 2011):

Contrairement à ce qui a été remarqué pour les eaux de la nappe libre (figure n° 58), tous les échantillons des forages se retrouvent à l'intérieur des zones de prédominance, soit de l'évaporation, soit de l'interaction eau/roche (figure n° 59). Cependant, étant donné la profondeur de ces eaux, l'influence des phénomènes d'évaporation serait négligeable (la profondeur des forages captant la nappe intermédiaire est de 95 m en moyenne et elle dépasse généralement les 400 m pour le complexe mio-pliocène). L'acquisition de cette minéralisation pourrait provenir du contact entre les eaux de la nappe intermédiaire et celles de la nappe libre.

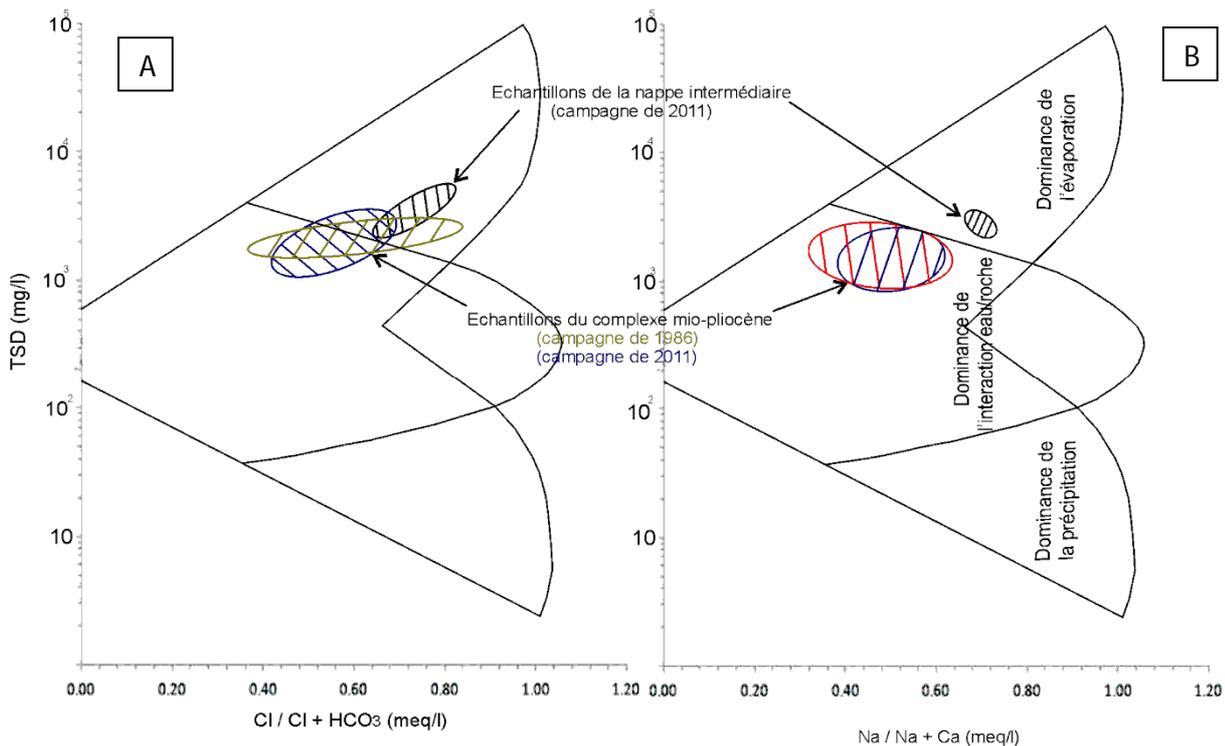


Figure n° 59 : Diagramme de Gibbs pour les eaux des forages.

Concernant les forages captant le complexe mio-pliocène, ils seraient probablement crépinés en profondeur où se trouvent d'autres niveaux aquifères avec des eaux de moindre qualité comparées à celles du complexe mio-pliocène. Cette hypothèse est d'autant plus confirmée si on compare les deux diagrammes (A) et (B) de la figure n° 59. En effet, l'apport anthropique des ions chlorures augmente les valeurs du rapport $[r(Cl / Cl + HCO_3)]$, ce qui s'interprète sur le diagramme (A), par un passage des échantillons de la zone de dominance de l'interaction eau/roche, à celle de l'évaporation.

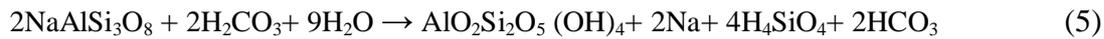
Sur le diagramme (B) par contre, tous les échantillons du complexe mio-pliocène (pour les deux campagnes) sont à l'intérieur du domaine de dominance de l'interaction eau / roche. Cela est dû à l'origine naturelle des ions Na et Ca dans les eaux souterraines.

II.3-Résultats tirés des diagrammes de Datta & Tyagi et Gibbs:

L'interprétation des diagrammes de Datta & Tyagi (1996) et Gibbs (1970) nous a permis de mettre la lumière sur deux origines (le facteur anthropique est également à considérer, surtout pour les eaux de la nappe libre) contribuant à la minéralisation des eaux de la plaine de la M'leta, à savoir, l'altération climatique et les interactions eau/roche.

L'altération climatique des silicates, augmente de façon considérable les concentrations des eaux souterraines en sodium et en bicarbonates (ainsi que les teneurs en

calcium et en magnésium). La réaction (5) l'illustre bien :



(Albite)

(Kaolinite)

Ajouté à cela, l'ensoleillement intense surtout en période estivale pour des climats arides à semi-arides favorise l'évaporation. Cette dernière est l'une des principales causes de la précipitation de la calcite (CaCO_3) et du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ce processus est interverti en période pluviale, où c'est plutôt la dissolution qui prend le dessus.

Comme nous l'avons déjà expliqué ci-dessus, l'interaction eau/roche n'a été observée que pour les eaux du complexe mio-pliocène. Ce processus joue un rôle important dans l'augmentation des teneurs en sels des eaux de cet aquifère.

II.4-Indices de saturation:

Dans notre présente étude, les indices de saturation de la calcite, de la dolomite, du gypse, de l'anhydrite, de la halite et de la calcédoine ont été calculés dans le but d'expliquer l'état de l'équilibre chimique existant entre les eaux de la plaine de la M'leta et ces minéraux. Le calcul des indices de saturation se base sur la formule de Lloyd et Heathcode, 1985 :

$$\text{SI} = \text{PAI} / K_{s p}$$

où

PAI: Produit d'activité ionique,

$K_{s p}$: Constante de solubilité du produit.

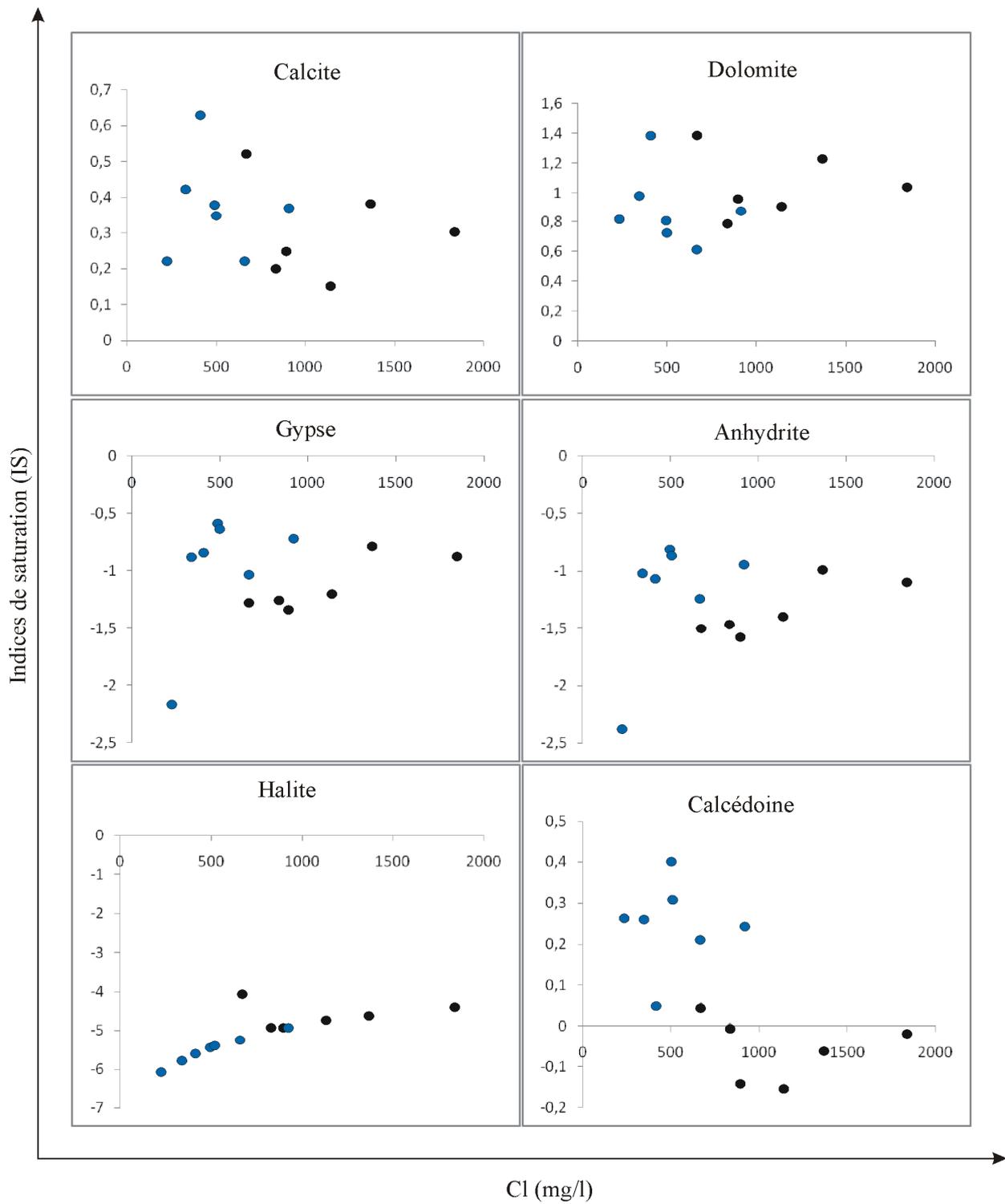
En fonction de la valeur de IS pour un minéral considéré on a :

IS = 0, l'eau est saturée par rapport à ce minéral,

IS > 0, l'eau est sursaturée par rapport à ce minéral,

IS < 0, l'eau est sous-saturée par rapport à ce minéral.

La figure n° 60 représente l'évolution des indices de saturation des 13 échantillons prélevés lors de la campagne d'octobre 2011 (les données relatives à la silice sont non disponible pour la campagne de mars 1986).



Campagne d'octobre 2011: ● Complexe mio-pliocène ● Nappe intermédiaire

Figure n° 60 : Indices de saturation en fonction des chlorures.

De la figure n° 60, tous les échantillons sont sous-saturés par rapport au gypse, à l'anhydrite et à la halite et sursaturés vis-à-vis de la calcite et de la dolomite. Par rapport à la calcédoine par contre, on remarque une nette distinction entre les eaux de la nappe

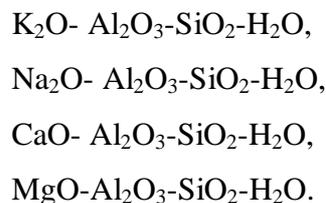
intermédiaire et celles du complexe mio-pliocène. En effet, ces dernières sont toutes sursaturées en calcédoine, alors que les eaux de la nappe intermédiaire sont dans leurs majorités sous-saturées vis-à-vis de ce minéral.

La figure n° 60 montre une évolution des eaux (pour les deux aquifères) d'un état fortement sous-saturé en halite à un état sous-saturé. Par rapport à la calcédoine, les eaux du complexe mio-pliocène sont de plus en plus saturées, tandis que celles de la nappe intermédiaire tendent plutôt vers l'équilibre.

II.5-Diagrammes d'équilibre (stability diagrams) :

En raison de l'absence de données relatives à la silice pour la campagne de mars 1986 seules les eaux échantillonnées lors de la campagne d'octobre 2011 ont été représentées sur les diagrammes d'équilibre (figures n° 61-64).

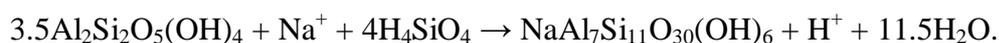
A l'aide des activités des ions Ca^{+2} Mg^{+2} K^+ Na^+ et de la molécule H_4SiO_4 , calculées avec le logiciel Phreeqc, les échantillons de la campagne de 2011 ont été reportés sur quatre diagrammes d'équilibre correspondant aux systèmes :



L'hydrolyse des silicates est un processus majeur contrôlant le chimisme des eaux souterraines dans notre secteur d'étude. En effet, l'altération des silicates produit des teneurs importantes en Na, HCO_3^- , Ca, Mg, K et $\text{SiO}_2(\text{aq})$. L'altération des minéraux primaires conduit à la formation de kaolinite et de montmorillonite. Par exemple, la kaolinite est formée de feldspaths (Albite) suivant la réaction (Deer et al. 1992):



La Montmorillonite n'est formée qu'en fin des processus d'altération, comme le montre la réaction de transformation de la kaolinite en montmorillonite sodique (Stumm & Morgan. 1996):



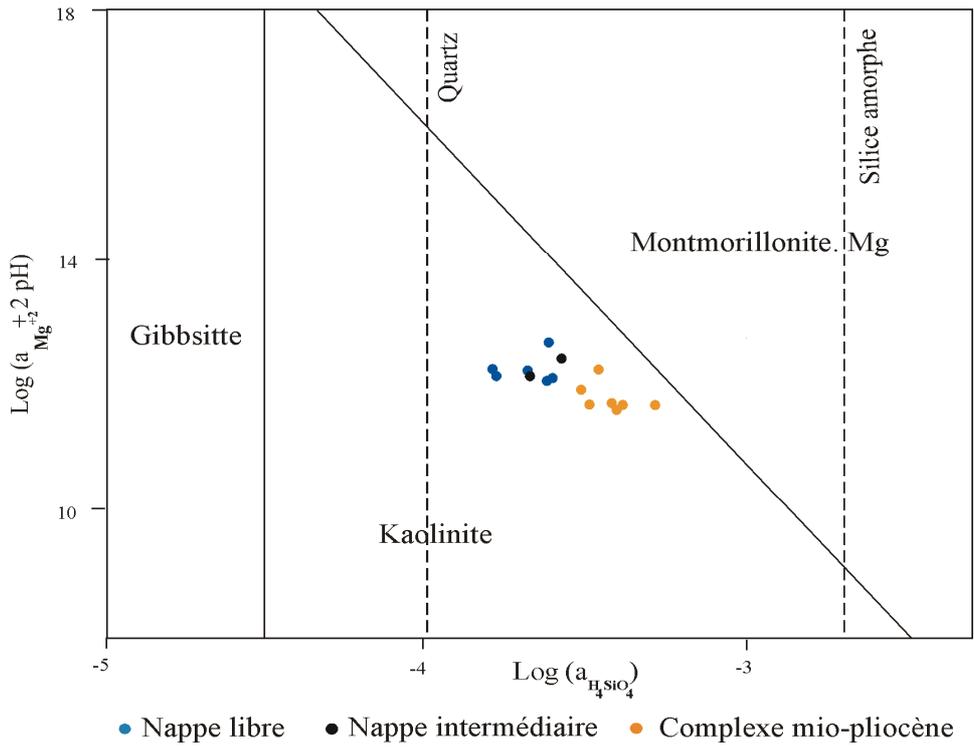


Figure n° 62 : Diagramme d'équilibre du système MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O.

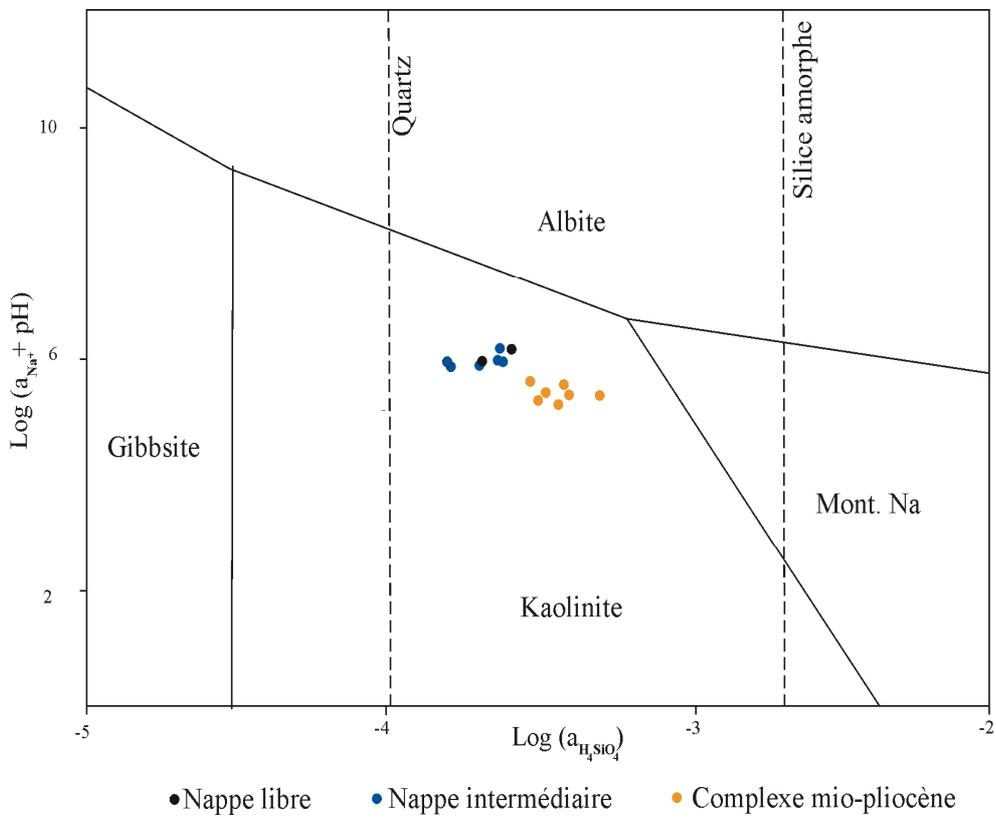


Figure n° 63 : Diagramme d'équilibre du système Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O.

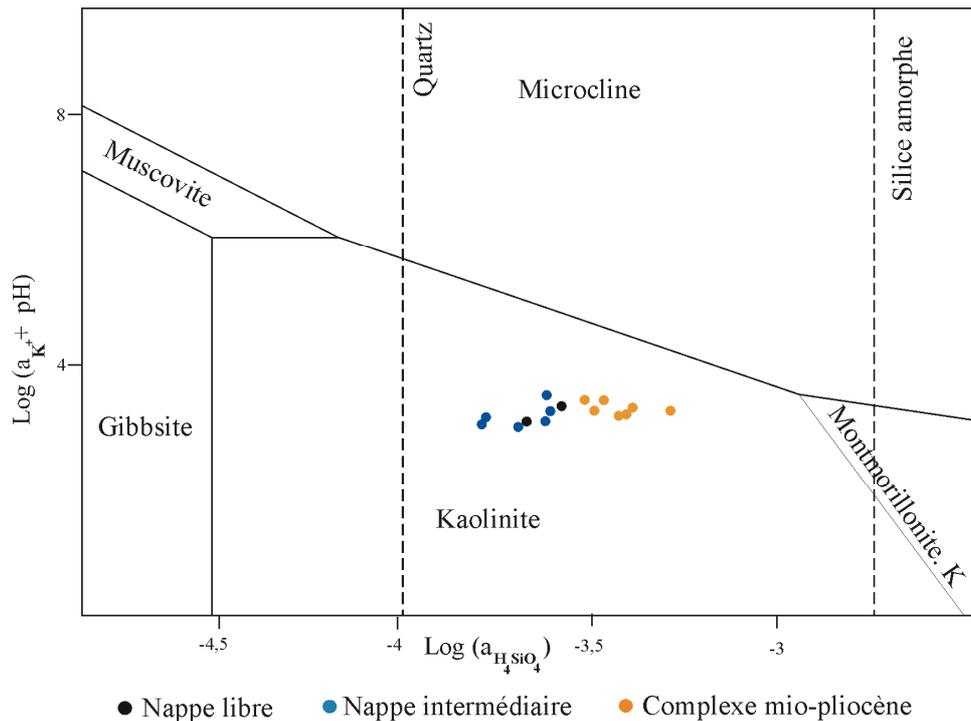


Figure n° 64 : Diagramme d'équilibre du système $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$.

D'après les quatre systèmes CaO , MgO , K_2O et Na_2O ($Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) (figure n°61-64), tous les échantillons se retrouvent dans le domaine de stabilité de la Kaolinite.

L'équilibre des eaux avec la kaolinite qui est un minéral très commun dans les sols confirme la présence des interactions des eaux du complexe mio-pliocène avec les roches carbonatées et les minéraux silicatés (Garrels, 1967; Marini, 2007).

Les échantillons ont une tendance globale vers le domaine de stabilité de la montmorillonite. Ainsi, dans le système $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, les eaux tendent vers le domaine de stabilité de la montmorillonite calcique tout en étant sous-saturées en feldspath calcique. Dans le système $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ par contre, la tendance va plutôt vers le domaine de stabilité de la montmorillonite magnésienne. Pour ce qui est des systèmes K_2O et Na_2O ($Al_2O_3-SiO_2-H_2O$), les eaux sont toujours dans le domaine de la kaolinite avec une tendance vers l'équilibre avec la montmorillonite sodique pour les eaux du complexe mio-pliocène. Quant aux eaux de la nappe intermédiaire, elles tendent vers le domaine des plagioclases sodiques. On remarque également que les échantillons sont plus éloignés de la limite du domaine de la montmorillonite potassique qu'ils ne le sont de celle de la montmorillonite sodique. Cela est dû au fait que les feldspaths sodiques sont plus solubles que les feldspaths potassiques.

III- Conclusion :

L'application des méthodes statistiques multivariées ACP et CHA sur les données relatives aux eaux de la nappe libre et celles des forages nous a permis de classer les échantillons en plusieurs groupes, en allant des eaux les moins minéralisées aux plus minéralisées. Ce classement se fait généralement du Sud au Nord, en partant des zones de recharges représentées par les affleurements carbonatés vers des formations plus gréseuses au Nord de la plaine.

Outre la confirmation de la prédominance du faciès des eaux chlorurées sodiques et la présence du faciès des eaux sulfatées sodiques, les résultats obtenus par la CHA et l'ACP nous ont permis de constater, que cette évolution de faciès, bien qu'elle concerne des eaux de différentes profondeurs, se fait toujours dans la même zone, soit, au centre du bassin.

L'étude des diagrammes de dispersion de Datta, Tyagi et du digramme de Gibbs a mis l'accent sur deux processus majeurs contribuant à la minéralisation des eaux de la plaine de la M'leta, à savoir, l'altération des silicates et celle des carbonates.

Pour les eaux de la nappe libre, cette altération se fait grâce à une évaporation intense surtout dans les puits où le niveau statique est très proche de la surface.

Concernant les eaux des forages, leur minéralisation est due plutôt à la dissolution des calcaires miocènes, ainsi que les anhydrites blanches.

Les indices de saturation ont mis en exergue le rôle des phénomènes de dissolution et de précipitation dans l'acquisition de la minéralisation dans les eaux profondes du complexe mio-pliocène et de la nappe intermédiaire.

Les diagrammes d'équilibre ont montré l'importance de la contribution des argiles (la kaolinite) et des minéraux argileux dans la minéralisation des eaux des forages.

Conclusion générale

L'étude des caractéristiques des eaux de la plaine de la M'leta nous a permis d'arriver aux conclusions suivantes :

- la plaine de la M'leta est caractérisée par un climat méditerranéen, semi-aride, où les variations interannuelles et inter-saisonniers sont très importantes. De ce fait, les précipitations sont irrégulières et dépassent rarement 300 mm/an.

- les valeurs de température et d'humidité enregistrées pour la plaine, montrent une succession de cycles humides et secs. Ces derniers, s'étalent sur de longues périodes et peuvent atteindre dix années et plus. Les vents sont essentiellement de direction W et WSW et l'évaporation est très intense, surtout en période estivale.

- l'étude géologique a révélé la présence de deux grands ensembles différents. Le premier est représenté par un bassin, où se développe une importante sédimentation post nappe (plaine de la M'leta) et le deuxième par un ensemble complexe d'unités allochtones ou nappes tectoniques (Monts Tessala). Dans les Monts Tessala, l'écoulement des eaux est très important, mais l'infiltration est négligeable et cela en raison du recouvrement de la zone active, par des formations schisto-marneuses imperméables. Dans la zone de subsidence (plaine de la M'leta) par contre, l'eau s'infiltré rapidement vers la nappe superficielle (surtout au niveau des cônes de déjection), ou va s'épandre directement dans la Sebkha d'Oran.

- les travaux géophysiques et les connaissances hydrogéologiques du secteur d'étude ont mis en exergue deux formations aquifères majeures. Les calcaires mio-pliocènes qui sont considérés comme étant l'aquifère le plus important de la région et les formations récentes de la plaine de la M'leta qui recèlent une nappe phréatique alluviale. Cette nappe présente un intérêt moindre du point de vue qualitatif et quantitatif. Cependant, un troisième aquifère peut être signalé dans la plaine de la M'leta, à savoir, celui des niveaux plio-quadernaires. Cet aquifère forme une nappe intermédiaire entre la nappe libre et le complexe mio-pliocène.

- l'établissement des cartes piézométriques relatives à la nappe libre, a montré la présence d'un écoulement souterrain de direction Sud-Nord (des Monts Tessala vers la Sebkha). L'alimentation de cette nappe se fait, soit dans les secteurs d'affleurement des formations carbonatées, soit aux niveaux des formations plio-quadernaires, ou encore, aux niveaux des cônes de déjection des principaux oueds.

- l'étude hydrochimique des eaux de la nappe libre et des oueds de la plaine de la M'leta fait ressortir la qualité médiocre de ces eaux. Ces dernières sont généralement chlorurées sodiques

et deviennent sulfatées sodiques à l'Est de la plaine (centre du bassin), où les formations évaporitiques sont plus présentes.

- l'augmentation des concentrations des eaux dans la plaine se fait généralement du Sud au Nord, en conformité avec le sens d'écoulement.

- les cartes d'isoteneurs ont montré le grand rôle que jouent certains ions dans l'acquisition de la minéralisation globale des eaux de la nappe libre. Elles nous ont également permis d'identifier le même sens d'évolution des teneurs en ions des eaux de la nappe libre.

- pour les horizons profonds, on note la présence des mêmes faciès hydrochimiques caractérisant les eaux de la nappe libre. Cependant, la présence du faciès des eaux sulfatées sodiques est ici plus fréquente. La minéralisation des eaux des forages (nappe intermédiaire et complexe mio-pliocène) est nettement inférieure à celle des eaux de la nappe libre.

- l'étude isotopique a démontré que l'évaporation est le premier processus responsable de la minéralisation des eaux de la nappe libre et des oueds, alors que les phénomènes de dissolution du gypse, de l'anhydrite et de la halite sont responsables de l'acquisition de la minéralisation des eaux des forages dans les horizons profonds.

- l'application des méthodes statistiques multivariées ACP et CHA nous a permis de classer les échantillons en plusieurs groupes, en allant des eaux les moins minéralisées aux plus minéralisées. Ce classement a confirmé le sens d'évolution des teneurs en éléments chimique qui se fait du Sud vers le Nord.

- la modélisation géochimique a mis en exergue trois processus majeurs contribuant à la minéralisation des eaux de la plaine de la M'leta, à savoir, l'altération des silicates, la dissolution des formations carbonatées et les facteurs anthropiques. Pour les eaux de la nappe libre, la minéralisation est due en grande partie à une évaporation intense, surtout en période estivale. Elle est également accentuée par la pollution et à un degré moindre par les échanges de base. Concernant les eaux des forages, leur minéralisation est le résultat de la dissolution des formations carbonatées, des évaporites ainsi que des sels alluviens. Cependant, certains échantillons considérés relativement minéralisés pour des eaux profondes, suggèreraient qu'il y a bel et bien mélange de ces dernières avec des eaux d'une moindre qualité.

Recommandations :

Plusieurs mesures de protection peuvent être entreprises pour protéger les eaux de la plaine de la M'leta de la détérioration, nous proposons en l'occurrence :

- la mise en place des périmètres de protection (ou leur agrandissement s'ils existent),
- le raccordement aux réseaux d'assainissement,
- la sensibilisation des principaux opérateurs dans la région.

Nous recommandons également d'accorder une plus grande attention à la partie centrale de la plaine de la M'leta et cela dans le but d'étudier, non seulement le développement de l'aquifère mio-pliocène sous la plaine et la Sebkha (sous les alluvions récentes), mais aussi l'extension des niveaux plio-quadernaires aquifères de la nappe intermédiaire. Ainsi, nous conseillons la réalisation de campagnes géophysiques s'étalant sur tout le bassin et la mise en place de forages de reconnaissance.

Annexes

Annexe 1 : Tableau des analyses hydrochimiques des eaux des principaux oueds traversant la plaine de la M'leta, campagne de mars 1986 (Hassani M.I., 1987).

Oueds	RS (mg/l)	COND (μ s/cm)	MINR (mg/l)	PH	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
El Rassoul	3700	5200	3224	8,4	1932	23	278	661	167	2205	3312	12
El Haimour	9270	11800	7316	8	84	0,59	22,86	32,8	2,8	62,18	69	0,19
El Besbes	4000	5700	3534	8,3	633	16	157	301	163	1240	720	34
El Sebbah	4460	6100	3782	8,4	27	0,41	12,9	15	2,7	34,97	15	0,55

Annexe 2 : Tableau des analyses hydrochimiques des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta, campagne de mars 1986 (Hassani M.I., 1987).

Nom	X	Y	RS(mg/l)	COND μ s/cm	MINR(mg/l)	pH	Na(mg/l)	K(mg/l)	Mg(mg/l)	Ca(mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl(mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
P1	210,83	253,02	5300	8003	5084	7,5	1104,46	12,121	257	280,4	264,74	2277	455,5	32,24
P3	207,7	253,1	7040	10630	7006	7,8	1610,69	32,84	327	260,4	633,8	3184	816	33
P4	206,9	254,73	7040	10630	7006	7,9	1612,76	34	327	261,4	636,84	3185	816	8
P5	210,07	251,73	3960	5980	3782	7,9	782,23	10,94	187	189,6	400,16	1608	216	56
P7	208,33	249,73	5580	8426	5394	8	1127,46	21,89	329	440,2	173,85	2224	1440	6,2
P8	207,5	252,1	5820	8788	4836	7,9	1035,46	17,98	244	400,2	200,7	1848,5	1584	23
P9	207,83	252,6	6800	10268	5952	7,8	1265,46	17,98	300	400,2	253,15	2277	1728	16,7
P10	204,87	254,21	7540	11385	5766	7,8	1311,46	39,88	246	500	283,65	1770	2184	91
P11	205,04	253,94	11760	17757	9239	7,6	2738,15	19,94	376	620	207	3106	3648	59
P12	203,95	252,36	6540	9875	4030	8	1058,46	7	178	159,6	390	1680	443,5	54
P13	205,04	250,05	6580	9936	5394	8	1173,46	14	271	400,2	341,6	1658	2184	50
P14	205,62	249,21	5580	8426	4650	8,2	989,46	14	254	380,2	265	1486	1584	65,7
P15	204,16	248,55	5480	8275	5084	8,2	943	12,9	284	340,2	5,2	1814	1344	65,7
P16	201,87	246,15	4480	6765	4340	8	943	9	201	159,6	354	1842,5	326	49
P18	202,16	251,31	9200	13892	7502	7,9	2162,92	12,12	343	400,2	421	2293	3216	42
P21	188,95	242,71	5340	8063	4774	8	989,69	39,88	286	239,6	323	1504	1584	25
P23	195,2	247,76	4949	7473	4030	8,5	909,42	14	342	209,6	676,5	1054	1680	33
P25	194,16	246,84	6020	9090	5084	8	1311	37,14	316	199,6	494	1664	1776	34
P27	193,75	246,57	4600	6946	3844	8,2	897	14	287	160	454	1160,5	1536	56
P32	184,58	248,94	5000	7550	4092	8,1	805,46	28,16	274	340,4	211,6	1364	1379	25
p33	184,37	248,28	10220	15432	8246	7,7	2462,15	102,83	504	400,2	407	3034	3552	10
P34	186,66	245,65	6420	9694	5456	7,9	1495,69	28,93	258	320,4	375,15	1823,6	2015,5	37,2
P36	185,04	244,39	4520	2993	4340	7,7	897,46	21,11	164,8	280,4	356,85	1701,5	432	68,2
P38	175,33	241,68	4960	7486	4650	7,8	1242,46	25	151	239,6	444,69	1631	1272	3,72
P39	176,66	242,47	3900	5889	3596	7,7	771,42	14	137	250,4	325,74	1285,8	672	44,02
P45	177,08	241,84	3660	5526	3348	7,7	610,19	20	142	320,4	250	1354	480	50,8
P48	182,08	236,13	4840	7308	4092	7,4	836,28	27	175	300,4	308	1639,4	672	3,72
P49	186,87	236,13	6980	10540	6200	7,7	1610,69	20	257	360,2	305	2277,3	1680	34,1
P51	181,29	238,8	5460	8244	5084	8	1219,46	7,82	143	400,2	319,64	2127	652,8	95
P59	167,5	246,57	2760	4167	2852	8,1	828,46	64,12	62	79,8	424	1129,6	168	80
P61	165,83	244,6	2860	4318	2852	7,7	759,23	50	17	189,6	436,15	1119,6	192	82
P62	167,79	244,1	5860	8848	5580	7,7	1288,46	35,2	163	440,2	247	2669	389,7	73,8
P65	169,58	242,36	4720	7127	4340	8	874,46	29	189	320,4	470	2024	336	16,75
P68	170,41	243,68	2800	4228	2728	7,9	725,42	53,2	8	150	332	1101	154	95

Annexe 3: Tableau des variables centrées réduites des analyses hydrochimiques des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta, campagne de mars 1986 (Hassani M.I., 1987).

Nom	RS(mg/l)	COND (µs/cm)	MINR(mg/l)	pH	Na(mg/l)	K(mg/l)	Mg(mg/l)	Ca(mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl(mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
P1	-0,217	-0,171	0,051	-1,772	-0,173	-0,760	0,211	-0,219	-0,643	0,652	-0,843	-0,464
P3	0,678	0,683	1,337	-0,413	0,874	0,320	0,891	-0,392	2,056	2,142	-0,462	-0,436
P4	0,678	0,683	1,337	0,040	0,878	0,380	0,891	-0,383	2,078	2,144	-0,462	-1,369
P5	-0,907	-0,828	-0,820	0,040	-0,839	-0,822	-0,469	-1,004	0,347	-0,447	-1,096	0,423
P7	-0,073	-0,033	0,259	0,493	-0,125	-0,251	0,910	1,163	-1,308	0,565	0,197	-1,436
P8	0,050	0,084	-0,115	0,040	-0,315	-0,455	0,085	0,817	-1,111	-0,052	0,350	-0,809
P9	0,554	0,565	0,632	-0,413	0,160	-0,455	0,629	0,817	-0,728	0,652	0,502	-1,044
P10	0,935	0,928	0,508	-0,413	0,255	0,687	0,104	1,680	-0,505	-0,181	0,984	1,730
P11	3,106	2,999	2,832	-1,319	3,204	-0,353	1,367	2,717	-1,065	2,014	2,531	0,535
P12	0,420	0,438	-0,654	0,493	-0,268	-1,027	-0,556	-1,263	0,273	-0,328	-0,856	0,348
P13	0,441	0,457	0,259	0,493	-0,030	-0,662	0,347	0,817	-0,081	-0,365	0,984	0,199
P14	-0,073	-0,033	-0,239	1,399	-0,410	-0,662	0,182	0,644	-0,641	-0,647	0,350	0,785
P15	-0,125	-0,082	0,051	1,399	-0,506	-0,720	0,473	0,298	-2,541	-0,108	0,096	0,785
P16	-0,639	-0,573	-0,447	0,493	-0,506	-0,923	-0,333	-1,263	0,010	-0,061	-0,980	0,162
P18	1,789	1,743	1,669	0,040	2,015	-0,760	1,046	0,817	0,500	0,679	2,075	-0,100
P21	-0,197	-0,151	-0,156	0,493	-0,410	0,687	0,493	-0,571	-0,217	-0,617	0,350	-0,734
P23	-0,398	-0,343	-0,654	2,759	-0,576	-0,662	1,037	-0,831	2,368	-1,357	0,451	-0,436
P25	0,153	0,183	0,051	0,493	0,254	0,544	0,784	-0,917	1,033	-0,355	0,553	-0,398
P27	-0,577	-0,514	-0,779	1,399	-0,602	-0,662	0,502	-1,259	0,741	-1,182	0,299	0,423
P32	-0,372	-0,318	-0,613	0,946	-0,791	0,076	0,376	0,300	-1,032	-0,847	0,133	-0,734
p33	2,313	2,243	2,167	-0,866	2,634	3,968	2,610	0,817	0,397	1,896	2,430	-1,294
P34	0,359	0,379	0,300	0,040	0,636	0,116	0,221	0,127	0,164	-0,092	0,806	-0,279
P36	-0,619	-1,799	-0,447	-0,866	-0,601	-0,292	-0,685	-0,219	0,031	-0,293	-0,868	0,878
P38	-0,392	-0,339	-0,239	-0,413	0,113	-0,089	-0,819	-0,571	0,673	-0,409	0,020	-1,529
P39	-0,938	-0,858	-0,944	-0,866	-0,861	-0,662	-0,955	-0,478	-0,197	-0,976	-0,614	-0,024
P45	-1,061	-0,976	-1,110	-0,866	-1,194	-0,350	-0,906	0,127	-0,751	-0,864	-0,817	0,229
P48	-0,454	-0,396	-0,613	-2,226	-0,727	0,015	-0,586	-0,046	-0,327	-0,395	-0,614	-1,529
P49	0,647	0,654	0,798	-0,866	0,874	-0,350	0,211	0,471	-0,349	0,653	0,451	-0,395
P51	-0,135	-0,092	0,051	0,493	0,065	-0,984	-0,896	0,817	-0,242	0,406	-0,635	1,879
P59	-1,524	-1,417	-1,442	0,946	-0,743	1,950	-1,683	-1,953	0,522	-1,233	-1,147	1,319
P61	-1,473	-1,368	-1,442	-0,866	-0,886	1,214	-2,120	-1,004	0,610	-1,249	-1,122	1,394
P62	0,071	0,104	0,383	-0,866	0,208	0,443	-0,702	1,163	-0,773	1,296	-0,913	1,087
P65	-0,516	-0,455	-0,447	0,493	-0,648	0,120	-0,450	0,127	0,858	0,237	-0,970	-1,042
P68	-1,503	-1,397	-1,525	0,040	-0,956	1,381	-2,208	-1,346	-0,151	-1,279	-1,162	1,879

Annexe 4 : Tableau des faciès hydrochimiques des eaux de la nappe libre de la plaine de la M'leta, campagne de mars 1986 (Hassani M.I., 1987).

Puits	Na(meq/l)	K(meq/l)	Mg(meq/l)	Ca(meq/l)	HCO ₃ (meq/l)	Cl(meq/l)	SO ₄ (meq/l)	NO ₃ (meq/l)	Faciès hydrochimique
P1	48,02	0,31	21,14	14,02	4,34	64,15	9,49	0,52	chloruré sodique
P3	70,03	0,84	26,9	13,02	10,39	89,7	16,99	0,53	chloruré sodique
P4	70,12	0,87	26,9	13,07	10,44	89,73	16,99	0,13	chloruré sodique
P5	34,01	0,28	15,38	9,48	6,56	45,3	4,5	0,9	chloruré sodique
P7	49,02	0,56	27,07	22,01	2,85	62,65	29,98	0,1	chloruré sodique
P8	45,02	0,46	20,07	20,01	3,29	52,07	32,98	0,37	chloruré sodique
P9	55,02	0,46	24,68	20,01	4,15	64,15	35,98	0,27	chloruré sodique
P10	57,02	1,02	20,24	25	4,65	49,87	45,47	1,47	chloruré sodique
P11	119,05	0,51	30,93	30,99	3,39	87,5	75,95	0,95	chloruré sodique
P12	46,02	0,18	14,81	7,98	6,39	47,33	9,24	0,87	chloruré sodique
P13	51,02	0,36	22,3	20,01	5,6	46,71	45,47	0,81	chloruré sodique
p14	43,02	0,36	20,9	19,01	4,34	41,86	32,98	1,06	chloruré sodique
P15	41,02	0,33	23,36	17,02	5,2	51,11	27,98	1,06	chloruré sodique
P16	41,02	0,23	16,54	7,98	5,8	51,9	6,79	0,79	chloruré sodique
P18	94,04	0,31	28,22	20,01	6,9	64,6	68,96	0,68	sulfaté sodique
P21	43,02	1,02	23,53	11,98	5,29	42,37	32,98	0,4	chloruré sodique
P23	39,54	0,36	28,14	10,48	11,09	29,7	34,98	0,53	sulfaté sodique
P25	57,02	0,95	26	9,98	8,1	46,88	36,98	0,55	chloruré sodique
P27	39,02	0,36	23,61	7,98	7,44	32,69	31,98	0,9	chloruré sodique
P32	35,02	0,72	22,54	17,02	3,47	38,42	28,73	0,4	chloruré sodique
P33	107,05	2,63	41,46	20,01	6,67	85,47	73,95	0,16	chloruré sodique
P34	65,03	0,74	21,23	16,02	6,15	51,37	41,97	0,6	chloruré sodique
p36	39,02	0,54	13,57	14,02	5,85	47,93	8,99	1,1	chloruré sodique
P38	54,02	0,64	12,42	11,98	7,29	45,95	26,48	0,06	chloruré sodique
P39	33,54	0,36	11,27	12,52	5,34	36,22	13,99	0,71	chloruré sodique
P45	26,53	0,51	11,68	16,02	4,1	38,14	9,99	0,82	chloruré sodique
p48	36,36	0,69	14,4	15,02	5,05	46,18	13,99	0,06	chloruré sodique
p49	70,03	0,51	21,14	18,01	5	64,15	34,98	0,55	chloruré sodique
p51	53,02	0,2	11,76	20,01	5,24	59,92	13,6	1,53	chloruré sodique
p59	36,02	1,64	5,1	3,99	6,95	31,82	3,5	1,29	chloruré sodique
p61	33,01	1,28	1,4	9,48	7,15	31,54	3,96	1,32	chloruré sodique
p62	56,02	0,9	13,41	22,01	4,05	75,18	8,12	1,19	chloruré sodique
p65	38,02	0,74	15,55	16,02	7,7	57,01	7	0,27	chloruré sodique
p68	31,54	1,36	0,66	7,49	5,44	31,03	3,21	1,53	chloruré sodique

Annexe 5 : Tableau des analyses hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène de la plaine de la M'leta, campagne de mars 1986 (Hassani M.I., 1987).

Forages	X	Y	COND (µs/cm)	RS (mg/l)	MINR (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
OT1	211,5	253,85	3986	3080	2744	322	7	161	321	324	891	686	32
OT2	204	252,35	2368	1880	1760	223	7	91	170	461	261	546	1
OT6	210,4	256,7	2373	1600	1402	253	9	105	62	109	570	288	6
OT7	203,5	257,7	2990	2240	2125	336	11	77	230	375	442	653	1
OT9	212,65	255,75	3343	2260	2163	442	7	119	120	329	709	432	5
N.B.Tafroui	207,31	247,61	2779	2200	2050	239	6	91	257	409	366	680	2

Annexe 6: Tableau des faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène de la plaine de la M'leta, campagne de mars 1986 (Hassani M.I., 1987).

Forages	Na (meq/l)	K (meq/l)	Mg (meq/l)	Ca (meq/l)	HCO ₃ (meq/l)	Cl (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	NO ₃ (meq/l)	Facies hydrochimique
OT1	14,006	0,17904	13,248	16,018	5,31	25,132	14,283	0,51609	chloruré calcique
OT2	9,7	0,17904	7,4882	8,483	7,5553	7,3619	11,368	0,01613	sulfaté Sodique
OT6	11,005	0,23019	8,6402	3,0938	1,7864	16,078	5,9964	0,09677	chloruré Sodique
OT7	14,615	0,28134	6,3361	11,477	6,1458	12,467	13,596	0,01613	sulfaté Sodique
OT9	19,226	0,17904	9,7922	5,988	5,3919	19,998	8,9946	0,08064	chloruré Sodique
N.B.Tafroui	10,396	0,15346	7,4882	12,824	6,703	10,324	14,158	0,03226	sulfaté Calcique

Annexe 7: Tableau des analyses hydrochimiques des eaux de la nappe intermédiaire et du complexe mio-pliocène de la plaine de la M'leta. (Campagne d'octobre 2011).

Forages	RS (mg/l)	COND (µs/cm)	MINR (mg/l)	PH	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
F1	2520	3320	2520	7,5	685	4	88	79	362	832	488	13
F5	4660	5680	4311	7,4	897	3	239	177	408	1363	1084	5
F3	2460	3310	2512	7,5	635	2	102	79	369	893	386	2
F2	3220	4190	3180	7,4	754	4	171	94	395	1138	606	9
F4	2260	2880	2186	7,8	561	4	78	75	369	668	456	3
F6	5400	6380	4842	7,3	1162	4	217	177	399	1840	892	19
OT3	1840	2220	1685	7,2	223	6	112	181	478	341	495	4
S3	2240	2680	2034	7,4	407	9	93	138	279	661	450	22
OT5	3040	3160	2398	7,2	338	8	124	244	386	491	876	2
S1	2240	2660	2019	7,2	281	8	128	216	721	409	515	5
OT4	2460	2905	2205	7,2	338	9	113	236	352	497	787	3
OT7	3640	4070	3089	7,1	616	8	137	228	478	913	767	5
S2	1040	1121	851	7,6	147	5	55	51	312	226	51	7

Annexe 8 : Tableau des variables centrées réduites des analyses hydrochimiques des eaux de la nappe intermédiaire et du complexe mio-pliocène de la plaine de la M'leta, campagne d'octobre 2011.

Forages	MINR(mg/l)	PH	Na(mg/l)	K(mg/l)	Mg(mg/l)	Ca(mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl(mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
F1	-0,078	0,640	0,492	-0,697	-0,741	-1,050	-0,425	0,093	-0,429	0,828
F5	1,613	0,068	1,220	-1,109	2,096	0,361	-0,003	1,268	1,773	-0,402
F3	-0,085	0,796	0,320	-1,520	-0,478	-1,050	-0,361	0,228	-0,805	-0,864
F2	0,545	0,016	0,729	-0,697	0,818	-0,834	-0,122	0,770	0,007	0,213
F4	-0,393	2,304	0,066	-0,697	-0,929	-1,108	-0,361	-0,270	-0,547	-0,710
F6	2,114	-0,296	2,130	-0,697	1,682	0,361	-0,085	2,323	1,063	1,751
OT3	-0,866	-0,816	-1,095	0,127	-0,290	0,419	0,639	-0,994	-0,403	-0,556
S3	-0,537	-0,036	-0,463	1,362	-0,647	-0,201	-1,186	-0,286	-0,569	2,213
OT5	-0,193	-0,868	-0,700	0,950	-0,065	1,326	-0,205	-0,662	1,004	-0,864
S1	-0,551	-0,920	-0,896	0,950	0,010	0,923	2,868	-0,843	-0,329	-0,402
OT4	-0,375	-0,816	-0,700	1,362	-0,272	1,211	-0,516	-0,649	0,676	-0,710
OT7	0,459	-1,180	0,255	0,950	0,179	1,096	0,639	0,272	0,602	-0,402
S2	-1,653	1,108	-1,356	-0,285	-1,361	-1,454	-0,883	-1,248	-2,043	-0,095

Annexe 9: Tableau des faciès hydrochimiques des eaux de la nappe intermédiaire et du complexe mio-pliocène de la plaine de la M'leta (Campagne d'octobre 2011).

Nom	Mg (meq/l)	Ca (meq/l)	NO ₃ (meq/l)	HCO ₃ (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	Cl (meq/l)	Na (meq/l)	K (meq/l)	Faciès hydrochimiques
F1	7,19	3,92	0,2	5,94	10,16	23,42	29,8	0,09	chlorurée sodique
F5	19,66	8,82	0,08	6,69	22,58	38,4	39	0,08	chlorurée sodique
F3	8,4	3,92	0,03	6,04	8,04	25,15	27,6	0,04	chlorurée sodique
F2	14,08	4,7	0,14	6,48	12,62	32,06	32,8	0,09	chlorurée sodique
F4	6,38	3,72	0,04	6,04	9,5	18,81	24,4	0,09	chlorurée sodique
F6	17,84	8,82	0,3	6,54	18,58	51,84	50,5	0,1	chlorurée sodique
OT3	9,17	9,01	1	7,48	10,31	9,6	9,7	0,14	sulfaté sodique
S3	7,68	6,86	0,35	4,57	9,37	18,62	17,7	0,22	chlorurée sodique
OT5	10,15	12,15	0,03	6,32	18,25	13,82	14,7	0,2	sulfaté sodique
S1	10,48	10,78	0,08	11,99	10,72	11,52	12,2	0,2	Bicarbonaté sodique
OT4	9,32	11,76	0,04	5,77	16,39	14,01	14,7	0,24	sulfaté sodique
OT7	11,26	11,36	0,08	7,84	15,97	25,72	26,8	0,21	chlorurée sodique
S2	4,53	2,54	0,11	5,12	1,07	6,35	6,4	0,13	chlorurée sodique

Annexe 10 : Tableau des niveaux piézométriques des puits de la plaine de la M'leta
(Campagne réalisée en avril 1986)
(Hassani. M.I., 1987)

N°	N° inventaire (A,N,R,H)	Altitude (m)	Niveau piézométrique	N°	N° inventaire (A,N,R,H)	Altitude (m)	Niveau piézométrique
9	F150	142	-	39	396	87	82
9'	152	158	-	40	400	92	-
9"	151	172	123	40'	402	88	84
10	155	172	147	41	393	86	-
11	FCOCA	160	107	41'	369	86	-
12	156	154	-	42	142	86	-
13	126	180	137	42'	387	87	83
13'	124	155	130	43	141	91	82
14	128	200	150	43'	382	88	83
14'	274	180	-	44	386	101	96
15	130	185	100	45	374	93	133
15'	239	194	-	45'	53	87	-
16	156	236	83	46	36	100	81
17	163	125	87	47	378	128	81
18	164	133	85	48	363	151	83
19'	180	133	-	48	411	89	82
21	229	99	82	50	361	86	-
23	165	90	-	51'	348	96	83
24	167	88	85	54	356	99	81
25	168	108	-	55	340	91	-
26	169	94	-	55'	338	89	83
27	173	89	-	56	334	84	-
29	197	96	88	56'	332	108	80
30	284	109	-	57	155	92	80
30'	259	116	84	58	131	113	81
32	62	129	83	59	120	87	80
33	136	125	84	60'	118	105	-
33'	141	120	85	60"	95	87	72
34	195	106	86	61	118	86	-
34'	196	99	83	61'	114	88	72
35	190	99	-	62	109	92	-
36	405	10	-	62'	105	87	81
37	403	94	83	63	105	89	-
38	174	88	-	64	148	97	84

Annexe 11 : Tableau des niveaux piézométriques des puits de la plaine de la M'leta
(Campagne réalisée en mars 2001)

N°	X	Y	N° inventaire (A,N,R,H)	Altitude (m)	Niveau piézométrique
1	190,83	249,50	328,00	99,99	92,58
2	186,92	236,63	182,00	158,76	148,42
3	189,35	240,44	181,00	133,35	123,50
4	187,56	241,13	126,00	127,11	116,50
5	189,01	242,72	0,00	117,11	111,00
6	195,20	247,59	109,00	99,51	87,00
7	194,84	243,74	120,00	137,17	129,70
8	200,94	247,90	90,00	104,17	95,49
9	204,90	247,71	75,00	138,13	103,95
10	210,80	250,32	35,00	136,48	108,98
11	205,60	250,10	79,00	131,10	109,80
12	209,99	253,68	25,00	119,99	120,60
13	206,22	252,11	55,00	118,86	104,67
14	204,80	254,45	63,00	110,00	100,71
15	209,27	255,06	4,00	112,28	101,51
16	208,76	256,31	3,00	105,22	103,25
17	202,22	251,35	104,00	103,29	98,47
20	185,69	246,66	357,00	99,51	95,48
21	185,08	239,41	350,00	133,02	125,51
30	185,94	244,27	351,00	107,99	105,55
18	162,41	244,10	229,00	103,98	103,22
19	184,04	248,79	360,00	99,16	93,34
22	182,06	236,25	190,00	154,34	133,77
23	179,35	238,35	296,00	138,66	123,13
24	178,59	240,77	221,00	118,35	113,15
25	175,17	241,01	199,00	105,44	104,75
26	171,27	242,62	274,00	98,98	92,02
27	167,80	246,88	259,00	84,48	80,20
28	174,83	244,21	365,00	93,85	91,08
29	182,61	241,10	318,00	120,85	117,99
31	176,87	246,60	366,00	99,97	86,93
32	179,08	242,97	325,00	108,57	104,15
33	169,17	243,65	268,00	92,99	88,79
34	166,70	244,64	235,00	92,53	86,00
35	168,11	243,94	267,00	95,78	86,00
36	165,19	245,35	233,00	87,41	87,00
37	160,77	245,67	222,00	99,98	96,34
38	172,98	241,28	208,00	108,96	94,31

Nom	OT5	OT3	
X	207, 046	207, 5	
Y	258,652	257,3	
Z	100	100	
Année de réalisation	1989	1984	
G é o l o g i e	Argiles beiges, carbonatées, parfois sableuse avec passage de marne grises 41m Intercalation de marnes grises, gypse blanc translucide et gravier millimétriques	Argiles grises, sableuses, plastiques avec traces de fossiles 23 Argiles brunes et marnes grises sur des galets roulés polymétriques 47 Argiles grises, sableuses, plastiques avec traces de gypse 66 Grès et graviers calcaires millimétriques 75	Alluvions quaternaires
	88 m Alternance d'argile grise sableuse parfois briques plastique avec graviers hétérométriques polygéniques	Argiles, brunes, grises, beiges, plastiques à sableuses, gypseuses à la base, avec passages de grès et graviers calcaires millimétriques	Alluvions pliocènes
	191 m Calcaire blanc crayeux Argiles beiges, grises et sableuse 208 m Grès beiges et blanc très fin à moyen à ciment calcaire 224 m Grès blanc très fin à moyen friable à ciment argileux, parfois calcaire avec q'q niveau d'argiles beiges sableuses	195 Calcaires blanc crayeux et grès fin à très fin à ciment argilo-carbonaté 216 Grès, gris, beiges, fin à moyen parfois friables avec passage d'argiles sableuses 240 Argiles avec passages de grès	Pliocène inférieur
	280 m Marnes blanches et Silte-stone blanc 291 m Sables et grès blancs, beiges, gris et rosâtres fin à moyen, mal consolidé, avec des passages de marnes grises et verdâtres.	262 Alternance de grès blancs, beiges, friables à ciment argilo-calcaire et d'argile beiges sableuses	
	364 m Grès avec passage de calcaire blanc crayeux 377 m Calcaire blanc, gris, microcristallin et rarement vacuolaire 416 m Anhydrites blanches 420 m	368 Marnes grises sableuses 374 Calcaires crayeux blancs à gris 382 Marnes Grès gris friables à ciment argileux 387 396 Grès et marnes 417	Miocène sup
			Miocène

Nom	OT6		OT7	
X	210,75		203,5	
Y	256,7		257,7	
Z	105		90	
Année de réalisation	1989		1989	
G é o l o g i e	Sol argileux brun	4	Alternances de marnes indurées et gypses blancs massifs	Quaternaire
	Argiles beiges sableuses avec éléments calcaires + ou - bien consolidés	25		
	Argiles marrons sableuses avec grés à ciments calcaires	44	Intercalations d'argiles beiges, plastiques parfois sableuses et sables fins à moyens avec calcaires blancs crayeux	Quaternaire
	Argiles marrons claires friables sableuses avec rares éléments de calcaires	67		
	Argiles marrons plastiques	78	Intercalations de sables beiges fins à moyen grés à ciment argileux, argiles et gypses	Villafranchien
	Marnes vertes plastiques avec passées de calcaires blancs crayeux	91		
	Grés beiges à ciment calcaire rarement consolidé blanc vers la base	102	Intercalation de sables, grés, gypses et marnes grises indurées à passées de calcaires blancs crayeux	Abtien
	Argiles marrons indurées avec passées de grés à ciment calcaire friable	114		
	Argiles plastiques vertes rarement sableuses	125	Grés consolidés à passées d'argiles grises et calcaires parfois à fossiles	Abtien
	Calcaires gréseux consolidés à débris de coquilles	140		
	Grés à ciment calcaire moyennement consolidés à passées d'argiles	153	Grés blancs moyens avec intercalations de calcaires gréseux fossilifères et argiles grises indurées	Abtien
	Argiles vertes plastiques indurées à rares passées gréseuses	160		
	Grés au sommet avec argile plastiques	169	Intercalation de calcaires oolithiques, silt-stones blancs à ciment calcaires et argiles grises et beiges	Miocène
	Calcaires gréseux + ou - friables à éléments moyens à fin avec très rares passées d'argiles beiges	191		
	Marnes verdâtres sableuses avec rares passées de calcaires	206	Alternances de calcaires blancs vacuolaires à ciment parfois dolomitique avec des grés	Miocène
	Marnes vertes plastiques	226		
			Alternance de calcaires gris et de grés	Miocène
			Cuttings non prélevés	
			Marnes grises avec calcaires et grés c.c.d	Trias
			Anhydrites blanches, gypse blancs, gris, translucide à transparent et marnes	

Nom	S5A	Douar Saida	S1A
X	200.79	195.2	197.06
Y	247.6	239.2	243.41
Z	104.83	132	154.51
Année de réalisation	1983	1960	1983
G é o l o g i e	Argiles rouges à passées sableuses et gréseuses ———— 60 ————	Argiles brunes ———— 18 ————	Argiles rouges à galets ———— 10 ————
	Marnes compactes brunes claires localement sableuses et galets calcaires isolés ———— 141 ————	Argiles briques avec intercalations de graviers ———— 87 ———— Argiles brique sableuses ———— 95 ———— Argiles jaunâtres ———— 126 ————	Argiles bariolées brunes claires à rouges localement gréseuses et carbonatées avec galets calcaires isolés
	Mame bariolées brunes à bleues verdâtres et calcaires fortement gréseux ———— 180 ————	Argiles brunes parfois verdâtres	———— 196 ————
	Calcaires gris localement gréseux et argileux ———— 273 ————	———— 223 ———— Argiles vertes à lentilles de gypses ———— 241 ————	

Nom	S2A		S3A
X	201,53		203,11
Y	245,89		247,37
Z	161		151
Année de réalisation	1983		1983
G é o l o g i e	Argiles brunes et galets	P l i o - Q u a t e r n a i r e	Argiles et galets calcaires
	14		27 Argiles rouges
			42
			Conglomérats à ciment argileux
			80
	Argiles beiges et rouges localement gréseuses et graveleuses		Argiles beiges compactes localement gréseuses
			189
			Calcaires fissurées
			222
	Calcaires gris clairs localement gréseux et fissurés	M i o c è n e s u p é r i e u r	Calcaires compacts oolithiques
236	289		
			M i o c è n e s u p é r i e u r
348			

Liste des tableaux

Tableau n° 01 : Coordonnées des stations climatiques d'ES-Sénia et de Tamzourah..	05
Tableau n° 02 : Précipitations saisonnières pour la période 1990-2005.....	07
Tableau n° 03 : Précipitations mensuelles pour la période 1990-2005.....	07
Tableau n° 04 : Températures moyennes mensuelles pour la période 1990-2005....	08
Tableau n° 05 : Humidité mensuelle (1990-2005).....	09
Tableau n° 06 : Vitesses moyennes mensuelles du vent (1990 - 2005).....	09
Tableau n° 07 : Evaporations mensuelles (1990-2005).....	10
Tableau n° 08 : Evaporations annuelles (1992-2002).....	10
Tableau n° 09 : Caractéristiques de l'aquifère carbonaté capté par les forages de la plaine de la M'leta (Hassani M.I., 1987)	33
Tableau n° 10 : Valeurs de T et S d'après la méthode de Jacob (Δ en fonction $\log t/r^2$).	42
Tableau n°11 : Paramètres physiques.....	47
Tableau n°12 : Paramètres chimiques.....	48
Tableau n° 13 : Comparaison des eaux des puits P1 et P2 (campagne 2011) avec celles des puits P16, P15 et P23, P25, P27 (campagne 1986)....	58
Tableau n°14 : Paramètres physiques.....	60
Tableau n°15 : Paramètres chimiques.....	60
Tableau n°16 : Caractéristiques des forages échantillonnés (campagne d'octobre 2011).	63
Tableau n°17: Paramètres physiques.....	64
Tableau n°18: Paramètres chimiques.	64
Tableau n°19: Principaux paramètres physico-chimiques des eaux du forage OT7..	67
Tableau n°20 : Principaux paramètres physiques des eaux du complexe mio-pliocène.	67
Tableau n°21 : Teneurs des éléments chimiques des eaux du complexe mio-pliocène.	67
Tableau n°22 : Faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène.	68
Tableau n° 23 : Paramètres physiques.....	69
Tableau n° 24 : Paramètres chimiques.	70
Tableau n° 25 : Composition isotopique (^{13}C et ^{14}C) des eaux du bassin de la Grande Sebka d'Oran (Projet CMEP "AGSOEH", 2005)	81
Tableau n° 26 : Age radiométrique moyen des eaux du bassin de la Grande Sebka d'Oran (Projet CMEP "AGSOEH", 2005)	83
Tableau n° 27 : Statistique descriptive des eaux de la nappe libre.....	87
Tableau n° 28 : Matrice de corrélation des variables.	88

Tableau n° 29 : Valeurs propres et variabilité en % des axes factoriels.	88
Tableau n° 30 : Corrélations entre les variables et les facteurs.....	90
Tableau n°31 : Contribution des variables en (%).	90
Tableau n° 32 : Subdivision des puits à l'aide de la CHA.	91
Tableau n° 33 : Comparaison des subdivisions des individus entre l'ACP et la CHA.	92
Tableau n° 34 : Statistique descriptive des eaux des forages.	92
Tableau n° 35 : Matrice de corrélation des variables.	93
Tableau n° 36 : Valeurs propres et variabilité en % des axes factoriels.	93
Tableau n° 37 : Corrélations entre les variables et les facteurs.....	94
Tableau n° 38 : Contribution des variables en %.....	94
Tableau n° 39 : Classification des forages à l'aide de la CHA.	97

Liste des figures

Figure n° 01: Situation géographique de la région d'étude.....	02
Figure n° 02: Situation géographique du secteur d'étude.....	03
Figure n° 03 : Représentation graphique de l'allure morphologique générale de l'Oranie (HASSANI M.I., 1987)	04
Figure n° 04 : Carte pluviométrique de la région d'Oran pour la période 1913-1963. (Précipitations moyennes en mm d'après Chaumont M. et Paquin C., 1968).....	06
Figure n° 05 : Précipitations annuelles pour la période 1990-2005.....	06
Figure n° 06 : Précipitations saisonnières pour la période 1990-2005.....	07
Figure n° 07 : Précipitations mensuelles pour la période 1990-2005.....	08
Figure n° 08 : Températures mensuelles pour la période 1990-2005.....	09
Figure n° 09 : Diagramme pluviothermique de la station d'ES-Sénia (1990-2005)	11
Figure n° 10 : Diagramme ombrothermique de la station d'ES-Sénia (1990-2005)...	12
Figure n° 11 : Carte géologique du bassin versant de la grande Sebkha d'Oran. (Tomas G., 1985; modifiée par Hassani M.I., 1987)	14
Figure n° 12 : Coupe géologique de secteur Arbal-Tamzourah.....	16
Figure n° 13 : Emplacements des forages (in Hassani M.I., 1987, modifiée).....	18
Figure n° 14 : Corrélation des logs de forage selon une coupe Nord-Sud à travers la plaine de la M'leta (Hassani M.I., 1987)	19
Figure n° 15: Coupe géologique de la plaine de la M'leta selon la répartition spatiale des forages (Hassani M.I.,	19
Figure n° 16 : Log géologique synthétique de la grande Sebkha d'Oran (Tomas G., 1985; extrait de Hassani M.I., 1987).....	21
Figure n° 17 : Esquisse structurale de l'Oranie centrale (Fenet, 1975).....	22
Figure n° 18 : Emplacement des profils et des sondages électriques (in Hassani M.I., 1987).....	23
Figure n° 19 : Coupes géoélectriques de la partie orientale de la plaine de la M'leta (in Hassani M.I., 1987)	25
Figure n° 20 : Coupes géoélectriques de la partie orientale de la plaine de la M'leta (in Hassani M.I., 1987).....	26
Figure n° 21 : Carte du toit du complexe carbonaté.....	28
Figure n° 22 : Coupe géologique interprétative de la partie sud du bassin de la Sebkha d'Oran.....	29
Figure n° 23 : Carte des affleurements calcaires et des forages de la plaine de la M'leta (Hassani M.I., 1987).....	32
Figure n°24 : Charge de la nappe par rapport aux formations aquifères de la plaine de la M'leta (Hassani M.I., 1987)	33

Figure n° 25 : Carte piézométrique de la nappe libre de la plaine de la M'leta (avril 1986) (Hassani M.I., 1987).....	36
Figure n° 26 : Carte piézométrique de la nappe libre de la plaine de la M'leta (mars 2001) (réalisée à l'aide des données de l'A.N.R.H	37
Figure n° 27 : Courbe interprétative de l'essai de pompage (descente) du puits Carillot d'après la méthode de Jacob (Hassani M.I., 1987)	40
Figure n° 28 : Courbe interprétative de l'essai de pompage (descente) du forage OT 2 d'après la méthode de Jacob (Hassani M.I., 1987).....	41
Figure n° 29 : Courbes interprétatives des essais de pompage (descente) des forages : F38, F39 et F40 d'après la méthode de Jacob (Δ en fonction $\log t/r^2$)...	42
Figure n° 30 : Emplacement des puits captant la nappe libre de la plaine de la M'leta.	47
Figure n° 31: Faciès hydrochimiques des eaux de la nappe libre (campagne de mars 1986)	50
Figure n° 32 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (P9 – P32) (Campagne de mars 1986).....	51
Figure n° 33 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (P33 - P68) (Campagne de mars 1986).....	52
Figure n° 34 : Carte des minéralisations des eaux de la nappe libre.....	53
Figure n° 35 : Carte des chlorures des eaux de la nappe libre.....	54
Figure n° 36 : Carte des sulfates des eaux de la nappe libre.....	55
Figure n° 37 : Carte du sodium des eaux de la nappe libre.....	55
Figure n° 38 : Carte des nitrates des eaux de la nappe libre.....	57
Figure n° 40 : Faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène (campagne de mars 1986).....	62
Figure n° 41 : Représentation graphique des eaux du complexe mio-pliocène selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (campagne de mars 1986)	62
Figure n° 42 : Faciès hydrochimiques des eaux du complexe mio-pliocène (campagne d'octobre 2011)	66
Figure n° 43 : Représentation graphique des eaux du complexe mio-pliocène selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (campagne d'octobre 2011)	66
Figure n° 44 : Représentation graphique des moyennes des éléments chimiques majeurs des eaux du complexe mio-pliocènes pour les campagnes de 1986 et 2011.	68
Figure n° 45 : Faciès hydrochimiques des eaux de la nappe intermédiaire (campagne d'octobre 2011).....	71

Figure n° 46 : Représentation graphique des eaux de la nappe intermédiaire selon la méthode de Schoeller-Berkaloff (campagne d'octobre 2011)	71
Figure n° 47 : Evolution spatiale de la minéralisation des eaux échantillonnées en octobre 2011.....	72
Figure n° 48 : Relation $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).....	79
Figure n° 49 : Relation minéralisation globale - $\delta^{18}\text{O}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).	80
Figure n° 50 : Corrélation $\delta^{13}\text{C} / \delta^{18}\text{O}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).....	82
Figure n° 51 : Relation $\delta^{13}\text{C} - \text{A}^{14}\text{C}$ (Projet CMEP "AGSOEH", 2005).....	82
Figure n° 52 : Représentation graphique des variables (A) et des Individus (B).....	90
Figure n° 53 : Dendrogramme des puits de la nappe libre.....	91
Figure n° 54 : Représentation graphique des variables et des individus.....	95
Figure n° 55 : Dendrogrammes des forages échantillonnées en octobre 2011.....	96
Figure n° 56 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre sur le diagramme de dispersion de Datta et Tyagi. (1996)	99
Figure n° 57 : Représentation graphique des eaux des forages sur le diagramme de dispersion de Datta et Tyagi. (1996)	101
Figure n° 58 : Représentation graphique des eaux de la nappe libre sur le diagramme de Gibbs (1970)	102
Figure n° 59 : Diagramme de Gibbs pour les eaux des forages.....	103
Figure n° 60 : Indices de saturation en fonction des chlorures.....	105
Figure n° 61 : Diagramme d'équilibre du système $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$	107
Figure n° 62 : Diagramme d'équilibre du système $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$	108
Figure n° 63 : Diagramme d'équilibre du système $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$	108
Figure n° 64 : Diagramme d'équilibre du système $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$	109

Références bibliographiques

Ayeneu T., Fikre S., Wisotzky F., Demlie M. and Wohnlich S. (2009). Hierarchical cluster analysis of hydrochemical data as a tool for assessing the evolution and dynamics of groundwater across the Ethiopian rift. *International Journal of Physical Sciences*. Vol. 4 (2), February 2009 : pp. 76-90.

Bacha S., Boukra S. (2009). Contribution à l'établissement de la carte hydrogéologique de la feuille d'Ain El Berd au 1/50.000, N°210, coupure 1-2 : Utilisation de la cartographie automatique. Mémoire d'ingénieur, Université d'Oran, 93p.

Batayneh A., Al-Momani I.F., Jaradat R. A., Awawdeh M.M., Rawashdeh A.M., Ta'any R.A. (2002). weathering processes effects on the chemistry of the main springs of the yarmouk basin, North Jordan. *Journal of Environmental Hydrology*. Vol. 16, 20 June 2008 : pp. 1-11.

Belkhiri L., Boudoukha A., Mouni L., Baouz T. (2010). Statistical categorization: Geochemical modeling of groundwater in Ain Azel plain (Algeria). *Journal of African Earth Sciences* 59 (2011) : pp. 140–148.

Benziane A., Boualla N.1., Derriche Z. (2012). Aptitude des eaux du bassin de la Grande Sebkhia d'Oran à l'irrigation. *Journal of applied biosciences* 56: pp. 4066-4074.

Charlton S.R., Macklin C.L. and Parkhurst D.L. (1997). PHREEQC, a graphical user interface for the geochemical computer program PHREEQC. U.S. geological survey, Water-resources investigations report 97-4222, 9p.

Chenini I., Khemiri S. (2009). Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *Int. J. Environ. Sci. Tech*, 6 (3) : pp. 509-519.

Condom N. (2000). Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols : Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse de doctorat, école nationale agronomique de Montpellier, 189 p.

Couture G. (1997). Hydrogéochimie des eaux souterraines dans la ceinture métasédimentaire centrale de la province géologique du Grenville, Québec. Thèse de doctorat, Université du Québec, 112p.

Descoknets J.C., Taupin J.D., Lebel T. (1993). Le rôle des mares dans le bilan hydrologique d'une région Sahélienne, Niamey, Niger. *Yokohama Symposium : Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales*. IAHS. Publ n° 212, July 1993: pp. 307, 308.

Drever J.M. (1997). The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environment, 3^{ed} edition, prentice hall, New Jersey : pp. 197 -213.

Durand C. (2009). L'analyse de classification hiérarchique et de nuées dynamiques. Cours Sol6210, Analyse quantitative avancée. Université de Montréal, 18p.

Duchez J., Loy M. (2005). Projet d'Analyse de données : La classification ascendante Hierarchique. Cours de statistique, INSA, Rouen, 21p.

E.R.E.M. (1975). Etude hydrogéologique dans la région du gisement de sel d'Arbal. Rapport interne. Unité Sidi Bel Abbès.

Fabre S. (2010). Altération continentale et sédimentation marine au Précambrien: marqueurs de l'évolution chimique des enveloppes fluides terrestres. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 205p.

Gebretsadik A. (2010). Extent, sources and evolution of groundwater salinization in Lower Shire area, Malawi. Mémoire de master, Université d'Oslo, 93p.

Giroud J.P., Bottero A. (1972). Influence des propriétés physico-chimiques des argiles monominérales sur leur comportement mécanique. Article, laboratoire de mécanique des sols, Université de Grenoble : pp. 105-116.

Haile E. (2005). Groundwater chemistry and recharge rate in crystalline rocks: case study from the Eritrean highland. KTH land and water engineering. TRITA-LWR.LIC 2031, December 2005 : pp. 1-47.

Hassani M.I. (1987). Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi-aride : le bassin versant de la grande Sebkhia d'Oran (Algérie). Thèse de doctorat, Université Scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble, 303p

Helstrup T. & Jørgensen N. O. & Yakubo B.B. (2007). Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater from the Cretaceous-Eocene limestone aquifer in southern Ghana and southern Togo using hierarchical cluster analysis. Hydrogeology Journal 15 (2007) : pp. 977-989.

Hsissou Y., Bouchaou L., Krimissa M., Mudry J. (2001). Caractérisation de l'origine de la salinité des eaux de la nappe côtière d'Agadir (Maroc). First international conference on saltwater intrusion and coastal aquifers monitoring, modeling, and management. Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001 : pp.1-11.

Hsueh-Yu L. & Tsung-Kwei L. & Wen-Fu C. & Tsung-Ren P. & Chung-Ho W. & Meng-Hsun T. & Tai-Sheng L. (2007). Use of geochemical modeling to evaluate the hydraulic connection of aquifers: a case study from Chianan Plain, Taiwan. Hydrogeology Journal 16 (2008) : pp. 139-154.

Kannan N. and Sabu J. (2010). Quality of groundwater in the shallow Aquifers of a paddy dominated agricultural river basin, Kerala, India. International Journal of civil and environmental engineering 2:3(2010) : pp. 160-168.

Kebede S., Travi Y., Alemayehu T., Ayenew T. (2005). Groundwater recharge, circulation and geochemical evolution in the source region of the Blue Nile River, Ethiopia. Applied Geochemistry 20 (2005) : pp. 1658-1676.

Kumar A., Rout S., Narayanan U., Mishra M.K., Tripathi R.M., Singh J., Kumar S. and Kushwaha H.S. (2011). Geochemical modeling of uranium speciation in the subsurface

aquatic environment of Punjab State in India. *Journal of Geology and Mining Research*. Vol. 3(5). May 2011 : pp. 137-146.

Kumar M., Kumari K., Kumar U., Ramanathan AL. (2008). Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: conventional graphical and multivariate statistical approach. *Environ Geol*, DOI 10.1007/s00254-008-1367-0 (original article).

Kumar S. K., Rammohan V., Sahayam J. D., Jeevanandam M. (2008). Assessment of groundwater quality and hydrogeochemistry of Manimuktha River basin, Tamil Nadu, India. *Environ Monit Assess* 159 (2009) : pp. 341-351.

Lakhdari M., Kadi M.Y., Hammadi S. (2011). Caractérisation et état de connaissance du bassin de la Grande Sebkhia d'Oran. Projet de fin d'étude (Licence), Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, 92p.

Launay J. et Fontes J.C. (1985). Les sources thermales de Prony (Nouvelle-Calédonie) et leurs précipités chimiques, exemple de formation de brucite primaire. *Géologie de la France*, n° 1, 1985 : pp. 83-88

Mateos A.L. (2010). Structure géométrique des distances Hiérarchiques. *Revue Modulad* (2010), numéro 41 : pp. 27-37.

Mebarek S., Elhousseyn R. (2008). Utilisation des méthodes géoélectriques pour l'étude hydrogéologique dans les régions de Chott Chergui et la plaine de la M'leta. Mémoire d'ingénieur, Université d'Oran, 96p.

Mebrouk N. (2007). Etude hydrochimique et isotopique des eaux de la vallée de la Saoura (Sahara nord occidental). Thèse de doctorat, Université d'Oran, 306p.

Meliani F. (1993). Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de la M'leta, Wilaya d'Oran. Mémoire d'ingénieur, Centre Universitaire de Mascara, 100p.

Mondal N.C., Singh V.P., Singh V.S., Saxena V.K. (2010). Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry. *Journal of Hydrology*, 388 (2010) : pp. 100–111.

Newcomer D. R., Thornton E. C., Liikala T. L. (2002). Groundwater chemistry and hydrogeology of the upper saddle Mountains basalt-confined aquifer, South and Southeast of the Hanford site. Pacific Northwest national laboratory report, prepared for the U.S. department of energy, November, 2002 : pp. 3-13.

Ouali A., Azrib C., Medhioubb K., Ghrabia A. (2008). Descriptive and multivariable analysis of the physico-chemical and biological parameters of Sfax wastewater treatment plant. Meda water international conference on sustainable water management, Tunis, March 21-24, 2007.

Parkhurst D.L. and Appelo C.A.J. (1999). User's guide to PHREEQC (version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. U.S. geological survey, water-resources investigations report 99-4259. 312p.

Projet CMEP.AGSOEH. (2005) : "Aménagement de la Grande Sebkhah d'Oran, étude hydrologique"

Reeder Ph. (2002). Karst landscapes: the interaction of groundwater and rock. Environmental science and policy program presentation, Department of Geography, University of South Florida, Tampa, Florida : pp.8-22.

Ribolzi O., Valles V., Barbier L. (1993). Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical, arguments d'équilibre et argument de bilan. Science du sol. Vol. 31. (1993) : pp. 77-95.

Sharif M.U., Davis R.K., Steele K.F., Kim B., Kresse T.M., Fazio J.A. (2008). Inverse geochemical modeling of groundwater evolution with emphasis on arsenic in the Mississippi River Valley alluvial aquifer, Arkansas (USA). Journal of Hydrology 350 (2008) : pp. 41- 55.

Sicard E., Caron J M., Potdevin J L., Dechomets R. (1986). Transfert de matière et déformation synmétamorphique dans un pli: Pseudomorphoses de lawsonite et caractérisation des fluides interstitiels. Bull Mineral 109 (1986) : pp. 411-422.

Swanson S.K., Bahra J. M., Schwar M.T., Potter K.W. (2001). Two-way cluster analysis of geochemical data to constrain spring source waters. Chemical Geology, 179 (2001) : pp.73-91.

Tremillon B. (1975). Diagrammes d'équilibre potentiel-acidité (e-p02) dans les sels et hydroxydes alcalins fondus. Cours de chimie analytique, Ecole nationale supérieure de chimie, Paris 5eme, France : pp. 395-427.

Vogt W.P. (1993). Dictionary of statistics and methodology : A nontechnical guide for the social sciences. Newbury Park, CA Sage, 365p.

Wang Y., Ma T., Luo Z. (2001). Geostatistical and geochemical analysis of surface water leakage into groundwater on a regional scale: a case study in the Liulin Karst system, Northwestern China. Journal of Hydrology 246 (2011) : pp. 223-234.

Wen X., Wu Y., Su J., Zhang Y., Liu F. (2005). Hydrochemical characteristics and salinity of groundwater in the Ejina basin, Northwestern China. Environ Geol. DOI 10.1007/s00254-005-0001-7 48 (2005) : pp. 665-675.

Yidana S. M. (2008). Groundwater classification using multivariate statistical methods: Southern Ghana. Journal of African Earth Sciences 57 (2010) : pp. 455-469.

Yidana S. M., Yakubo B.B., Akabzaa T.M. (2010). Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. Journal of African Earth Sciences 58 (2010) : p. 220-234.

Zaitra S. (2000). Application de la télédétection, des modèles numériques de terrains et des systèmes d'information géographiques à la caractérisation du milieu physique. Mémoire d'ingénieur, Université d'Oran, 85p.

RESUME

Dans la plaine de la M'leta, bordant au Sud la Grande Sebkhah d'Oran (Nord West algérien), trois aquifères majeurs sont présents, à savoir, la nappe libre (les alluvions quaternaires), la nappe intermédiaire (les niveaux plio-quaternaires) et le complexe mio-pliocène (calcaires/ calcaires gréseux). La caractérisation des eaux de ces trois aquifères a été réalisée en combinant les informations hydrogéologiques et hydrochimiques (méthodes graphiques conventionnelles), les méthodes statistiques multivariées (ACP et CHA) et la modélisation géochimique. Les résultats obtenus ont montré que la minéralisation des eaux de la plaine de la M'leta augmente généralement en allant du Sud vers le Nord. Ils ont également mis la lumière sur le grand rôle que jouent l'altération climatique et les interactions eau/roche dans l'acquisition de la minéralisation des eaux de la plaine de la M'leta.

Mots clés :

Plaine De La M'leta; Sebkhah d'Oran; Aquifère; Nappe Libre; Nappe Intermédiaire; Complexe Mio-Pliocène; Hydrochimie; Méthodes Graphiques Conventionnels; Méthodes Statistiques Multivariées; Modélisation Géochimique.

Soutenu le : 20 Novembre 2013