

N° d'ordre

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran
Faculté des sciences de la Terre, de Géographie et d'Aménagement du Territoire

Laboratoire, Eau et Environnement

Mémoire

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

Option : Hydrogéologie

HYDROGEOLOGIE DE LA REGION DE BEL HACEL

Par

BOURSALI Tewfik

Soutenu le _____, devant la commission d'examen :

BELLAREDJ B.	Professeur	Université d'Oran	Président
BENALI A.	Maître de conférences	Université d'Oran	Rapporteur
BAICHE A.	Chargé de cours	Université d'Oran	Co-rapporteur
HAYANE S.M.	Maître de conférences	Université d'Oran	Examineur
HASSANI M.I.	Maître de conférences	Université d'Oran	Examineur

DEDICACES

Tout d'abord je dédie ce modeste travail à mes parents où tous les mots restent faibles pour exprimer ma profonde reconnaissance pour leur soutien et l'aide indéniable prodigués durant mes années d'études. Sans oublier mes frères et sœurs chacun par son nom...

Je dédie aussi ce travail aux Amours de ma vie, Hanane, Ghizlène, le petit Adlane et enfin à ma femme pour son sacrifice et son soutien moral surtout dans les moments difficiles, qu'elle puisse témoigner ici ma plus grande considération.

MERCI

AVANT PROPOS

Au terme de cette étude, il m'est agréable d'adresser mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé à parvenir à la fin de ce travail.

Je m'adresserai tout d'abord à mon directeur de recherche, Monsieur A. BENALI qui a bien voulu m'encadrer. Je tiens à le remercier pour les nombreuses heures passées avec nous afin de nous inculquer toutes les connaissances en hydrogéologie. Ses enseignements sur les approches mathématiques appliquées à l'hydrogéologie nous ont donné une vision plus réaliste sur le fonctionnement des aquifères.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide précieuse de mon Co-rapporteur A. BAICHE. Je le remercie sincèrement pour ses conseils, ses orientations et surtout l'aide prodiguée auprès des différents organismes et tout cela en empiétant très souvent sur son emploi du temps très chargé.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs S.M. HAYANE et M.I. HASSANI qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail et à Monsieur B. BELLAREDJ de bien vouloir présider le jury.

J'adresse également mes sincères remerciements aux cadres de l'A.N.R.H d'Oran, de la D.H.W. de Mostaganem et de la D.H.W. de Relizane.

Je tiens aussi à remercier tous les collègues du département des sciences de la terre d'Oran ainsi que tous les amis de m'avoir soutenu durant la réalisation de cet ouvrage, en particulier, H. BOUZA, K.F.T. ATIF, A. NEBATI, A. OUALI MEHADJI, B. BOUTERFA, M.H. MANSOURI, B. MANSOUR, M. TABLIOUNA, O. KHEDDOUM, A. BEKRITI, N.L. MEBROUK, M. BENABDELLAH, B. SAHRAOUI, A. SEDDIKI, K. LAGRAA, M. HAMIDI, M. FOUKRACHE, D. BOURAS, et bien d'autres.

RÉSUMÉ

La région de Bel Hachel, à vocation agricole, est située au Nord-Ouest de l'Algérie à environ 77 km à vol d'oiseau à l'Est d'Oran. Cette région est limitée au Nord par la vallée du Chéelif et Ain Tedles, à l'Ouest par la ligne Kheir-dine/Mesra, au Sud par la plaine d'el Merouana et Djebel Mouzaia, et à l'Est par l'Oued Mina. Ce secteur est caractérisé par une succession de plis à faible rayon de courbure orientés Nord-Est/Sud-Ouest avec une altitude moyenne de 270 m. Ces reliefs deviennent progressivement importants vers le Sud-Est (525 m au niveau de l'anticlinal de Bel Hachel). Cet aspect nous donne un réseau hydrographique très modeste. Ainsi, toutes les précipitations tombées sur cette région sont infiltrées ou évaporées.

Sur le plan hydroclimatologique, la région est caractérisée par un climat méditerranéen semi aride, tempéré en hiver, chaud et sec en été. Le bilan hydrologique a été étudié en vue d'un important recours aux eaux souterraines dans la région. Ainsi, l'utilisant de l'abaque de P. Verdeil pour le calcul de la lame d'eau infiltrée est la seule méthode qui donne un résultat satisfaisant.

L'étude géologique a été menée dans le but d'identifier l'aquifère qui correspond aux formations gréseuses de l'Astien, du Pliocène Continental, du Calabrien et enfin aux sables du Quaternaire. L'évolution de l'épaisseur de ces formations a été mise en évidence afin de donner une idée sur la géométrie de l'aquifère dans toute la région.

Une carte piézométrique a été réalisée pour déterminer les différents sens d'écoulements des eaux souterraines de la région que nous serons amenés à individualiser et les zones d'alimentations de la nappe. Les méthodes d'interprétations des pompages d'essai nous ont conduits à fixer l'ordre de grandeur des transmissivités, des coefficients d'emmagasinement et des perméabilités. Ces résultats comparés à ceux obtenus par l'étude granulométrique, confirment la méthode utilisée. Cependant, ils auraient gagné à être confrontés à ceux des paramètres T et S obtenus par les méthodes de la remontée.

La qualité des eaux de la région de Bel Hachel a été élaborée grâce à 30 prélèvements répartis dans notre région. Le résultat de cette étude permettra de faire ressortir l'influence de la roche sur la composition chimique de ces eaux, leurs répartitions à travers toute la région ainsi que leur sens d'écoulement.

Mots-clés : Algérie - Bel Hachel – Hydroclimatologie – Bilan hydrologique – Aquifère - Astien – Pliocène – Calabrien – Quaternaire – évolution – Piézométrie – Transmissivité – coefficient d'emmagasinement – perméabilité – Pompages d'essai - Granulométrie – Qualité de l'eau.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE

AVANT PROPOS.....	I
RESUMÉ.....	II
TABLE DES MATIERES.....	III

INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
-----------------------------	---

CHAPITRE I – GÉNÉRALITÉ

1. INTRODUCTION.....	5
2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE	5
3. ASPECT GÉOMORPHOLOGIQUE	8
3.1 ZONE NORD-OUEST	8
3.2 ZONE SUD-EST	8
3.2.1 SYNCLINAL DE BOUGUIRAT.....	8
3.2.2 LA VALLÉE DE LA SOIF	9
4. HYDRGRAPHIE	10
5. CONCLUSION	10

CHAPITRE II – HYDROCLIMATOLOGIE

1. INTRODUCTION.....	12
2. PLUVIOMÉTRIE.....	12
2.1 L'ÉVOLUTION SÉCULAIRE DE LA PLUVIOSITÉ	13
2.2 ÉTUDE DES PRÉCIPITATIONS	13
2.2.1 STATIONS DE MESURES	13
2.2.2 PRÉCIPITATIONS MENSUELLES	15
2.2.2.1 STATION DE MOSTAGANEM.....	15
2.2.2.2 STATION DE OUED EL KHEIR	15
2.2.2.3 STATION DE KHEIREDDINE.....	15

2.2.2.4 STATION DE BOUGUIRAT	16
2.2.2.5 STATION DE BLED TOUAHRIA	16
2.2.2.6 STATION DES DUNES CULTIVÉES	16
2.2.2.7 STATION DE BEL HACEL.....	17
2.2.3 PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES	21
2.2.4 PRÉCIPITATIONS ANNUELLES.....	22
3. ÉTUDE DES TEMPÉRATURES	25
4. LE RÉGIME CLIMATIQUE	26
4.1 REPRÉSENTATION GRAPHIQUE	27
4.1.1 MÉTHODE PLUVIOTHERMIQUE	27
4.1.2 MÉTHODE OMBROTHERMIQUE	27
4.2 INDICES CLIMATIQUES	30
4.2.1 INDICES D'ARIDITÉ DE DE MARTONNE.....	30
4.2.1.1 INDICE D'ARIDITÉ ANNUEL	30
4.2.1.2 INDICE D'ARIDITÉ MENSUEL	30
4.2.2 INDICE DE STEWART	31
4.2.3 INDICE CLIMATIQUE DE L. EMBERGER	33
4.3 CONCLUSION	34
5. ÉVAPOTRANSPIRATION ET DÉFICIT D'ÉCOULEMENT	34
5.1 ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	
(MÉTHODE DE THORNTHAITE)	34
5.2 ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE	35
5.2.1 MÉTHODE DE L.TURC	35
5.2.2 MÉTHODE DE COUTAGNE	35
5.2.3 MÉTHODE DE WUNDT	36
5.2.4 MÉTHODE DE P.VERDEIL.....	36
5.2.5 MÉTHODE DE THORNTHWAITE	39
5.2.5.1 ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE	39
5.2.5.2 DÉFICIT AGRICOLE.....	39
5.2.5.3 L'EXCEDENT	39
5.2.5.4 L'ÉCOULEMENT	39
5.2.5.5 RÉSERVE UTILE.....	39
5.2.6 RÉSULTATS DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION	42
6. RUISSELEMENT	42

7. BILAN HYDROLOGIQUE	42
7.1 BILAN HYDROLOGIQUE SELON THORNTHWAITE	43
7.2 MÉTHODE RATIONNELLE	43
8. CONCLUSION	43

CHAPITRE III – GÉOLOGIE

1. INTRODUCTION	45
2. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET APERCU STRUCTURAL GÉNÉRAL	45
2.1 PARTIE OCCIDENTALE	46
2.2 PARTIE ORIENTALE	46
3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL	48
3.1 LES FORMATIONS ALLOCHTONES	48
3.1.1 LE DIAPIRISME	48
3.1.2 LES NAPPES DE CHARRIAGES	51
3.2 LES FORMATIONS AUTCHTONES	51
3.2.1 MIOCÈNE	53
3.2.1.1 MIOCÈNE INFÉRIEUR	53
3.2.1.2 MIOCÈNE SUPÉRIEUR	54
3.2.2 PLIOCÈNE	54
3.2.3 QUATÉRNAIRE	54
4. CADRE GÉOLIQUE ET MORPHOSTRUCTURAL DE LA RÉGION D'ÉTUDE	54
4.1 LITHOSTRATIGRAPHIE	55
4.1.1 MIOCÈNE SUPÉRIEUR	55
4.1.2 PLIOCÈNE	55
4.1.3 QUATÉRNAIRE	56
4.2 CADRE STRUCTURAL	59
5. ÉVOLUTION DES ÉPAISSEURS DES FORMATIONS	63
5.1 FORAGES	63
5.1.1 FORAGE SOUR KELMITOU (F1)	63
5.1.2 FORAGE AIN SOLTANE (F2)	63
5.1.3 FORAGE SIDI KHATAB (F3)	65
5.1.4 FORAGE MEKHALIA (F4)	66

5.1.5 FORAGE 143/129 (F5)	66
5.1.6 FORAGE BLED MTA FERNANA (F6)	67
5.1.7 FORAGE SAF-SAF (F7)	68
5.1.8 FORAGE MANSOURAH (F8)	68
5.1.9 FORAGE SOUAFLIA (F9)	68
5.2 EVOLUTION DES EPAISSEURS DES FORMATIONS	69
5.2.1 TRANSECT F3-F7	69
5.2.2 TRANSECT F2-F9	72
5.2.3 TRANSECT F1-F8	72
5.2.4 TRANSECT F1-F3	72
5.2.5 TRANSECT F5-F7	72
5.2.6 TRANSECT F8-F9	72
6. ANALYSE DE LA VARIATION DES EPAISSEURS	78
7. ETUDE GRANULOMETRIQUE	80
7.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES PRELEVEMENTS	80
7.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE NOS ECHANTILLONS	80
7.3 PARAMETRES GRANULOMETRIQUES	82
7.3.1 LA MEDIANE ET LA MOYENNE	82
7.3.2 INDICE DE TRI-CLASSEMENT	82
7.3.3 INDICE D'ASYMETRIE (S_{ki})	83
7.3.4 COEFFICIENT D'ACUITE (K_g)	84
7.4 RECONSTITUTION DES ENVIRONNEMENTS SEDIMENTAIRES D'APRES DOEGLAS (1968)	85
7.4.1 ETABLISSEMENT DES DIAGRAMME Q_1 Md Q_3 (DOEGLAS)	85
7.4.2 DIAGRAMME « C.M. DE PASSEGA »	85
7.5 RECAPITULATION DES RESULTATS	86
8. CONCLUSION	88

CHAPITRE IV – HYDROGÉOLOGIE

1. INTRODUCTION	90
2. CARACTERISTIQUE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA REGION	90
2.1 MIOCÈNE SUPERIEUR ET LE PLIOCÈNE INFÉRIEUR	90

2.2 CALABRIEN OU LE PLIOCÈNE INFÉRIEUR	90
2.3 QUATÉRNAIRE.....	91
3. AQUIFÈRES	92
3.1 SYNCLINAL DE BOUGUIRAT.....	92
3.2 VALLÉE DE LA SOIF	92
4. ÉTUDE DE LA CARTE PIEZOMÉTRIQUE	93
4.1 TYPE DE Puits RENCONTRE DANS LA RÉGION ET LEUR UTILISATION.....	93
4.2 CARTE PIEZOMÉTRIQUE	93
4.2.1 INTERPRÉTATION DE LA CARTE PIEZOMÉTRIQUE	95
4.2.2 GRADIENT HYDRAULIQUE.....	96
5. ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES	98
5.1 DÉFINITION	98
5.1.1 LA TRANSMISSIVITÉ.....	98
5.1.2 LE COEFFICIENT D'ÉMMAGASINEMENT	98
5.2 MÉTHODE D'INTERPRÉTATION	98
5.2.1 MÉTHODE DE THEIS	98
5.2.1.1 PIEZOMÈTRE 142/129	99
5.2.1.2 FORAGE MEKHALIA (SAF-SAF)	100
5.2.1.3 FORAGE SOUAFLIA	101
5.2.2 MÉTHODE DE JACOB.....	102
5.2.2.1 PIEZOMÉTRIE 142/129.....	103
5.2.2.2 FORAGE MEKHALIA.....	104
5.2.2.3 FORAGE SOUAFLIA	105
5.2.3 MÉTHODE DE LA REMONTÉE DE THEIS	105
5.2.3.1 PIEZOMÈTRE 142/129	106
5.2.3.2 FORAGE MEKHALIA.....	107
5.2.3.3 FORAGE SOUAFLIA	108
5.2.4 MÉTHODE DE BOULTON	109
5.2.4.1 PIEZOMÈTRE 142/129	111
5.2.4.2 FORAGE MEKHALIA.....	111
6. TABLEAU REGROUPANT LES RÉSULTATS DE T ET S CALCULÉS PAR LES QUATRE MÉTHODES	113
7. CALCUL DES PERMEABILITÉS	114

7.1 PERMEABILITES CALCULEES A PARTIR DES TRANSMISSIVITES	114
7.2 PERMEABILITES CALCULEES A PARTIR DE L'ETUDE GRANULOMETRIQUE	115
8. CONCLUSION	116

CHAPITRE V – HYDROCHIMIE

1. INTRODUCTION	118
2. PARAMÈTRES CHIMIQUES	118
2.1 DOSAGE DU Cl^-	118
2.2 DOSAGE DU SO_4^-	118
2.3 DOSAGE DU HCO_3^-	118
2.4 DOSAGE DU Mg^{++}	120
2.5 DOSAGE DU Ca^{++}	120
2.6 DOSAGE DU Na^+ ET DE K^+	120
2.7 TITRE OU DEGRÉ HYDROMÉTRIQUE (TH) OU DURETÉ TOTALE.....	120
2.8 LA MINÉRALISATION ET LE RESIDU SEC	120
3. PARAMÈTRES PHYSIQUES.....	121
3.1 LE PH	121
3.2 LA TEMPÉRATURE.....	121
3.3 LA CONDUCTIVITÉ	121
4. EXEMPLE DE NORMES FRANCAISE POUR L'EAU DESTINÉE A LA CONSOMMATION HUMAINE	122
5. ÉVOLUTION SPATIALE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES	122
5.1 MINÉRALISATION	122
5.2 TENEUR EN CALCIUM.....	123
5.3 TENEUR EN MAGNÉSIUM	123
5.4 TENEUR EN SODIUM	127
5.5 TENEUR EN POTASSIUM	127
5.6 TENEUR EN CHLORURE	127
5.7 TENEUR EN SULFATE	127
5.8 TENEUR EN BICARBONATE.....	132

5.9 TENEUR EN NITRATE	132
6. ÉTUDE DE RAPPORTS CARACTÉRISTIQUES	132
6.1 RAPPORT rMg^{++} / rCa^{++}	132
6.2 RAPPORT rSO_4^{-} / rCl^{-}	136
6.3 RAPPORT rNa^{+} / rCl^{-}	136
7. FACIÈS HYDROCHIMIQUES ET REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES ANALYSES D'EAU	136
7.1 CLASSIFICATION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES	139
7.1.1 FACIÈS CHLORURÉ CALCIQUE.....	141
7.1.2 FACIÈS CHLORURE MAGNÉSIEN	142
7.1.3 FACIÈS BICARBONATÉ CALCIQUE.....	142
7.1.4 FACIÈS CHLORURÉ SODIQUE	142
7.1.5 FACIÈS SULFATÉ CALCIQUE.....	143
7.1.6 FACIÈS BICARBONATÉ MAGNÉSIEN	143
7.1.7 FACIÈS BICARBONATÉ SODIQUE	143
7.2 INTERPRÉTATION	143
7.3 REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES ANALYSES D'EAU	144
7.3.1 LE DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF	144
7.3.2 LE DIAGRAMME DE PIPER.....	144
8. POURCENTAGE (%) D'ERREUR DES ANALYSES CHIMIQUES	145
9. INDICE DE SATURATION.....	149
10. ETUDE STATISTIQUE DES DONNEES HYDROCHIMIQUES.....	151
10.1 PARAMETRES REPRESENTATIFS	152
10.2 MATRICE DE CORRELATION.....	152
10.3 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (A.C.P.).....	153
10.3.1 ETUDE DES VARIABLES	154
10.3.2 ETUDE DES INDIVIDUS.....	154
11. QUALITÉ DE L'EAU	155
11.1 POTABILITÉ DE L'EAU.....	155
11.2 QUALITÉ DES EAUX D'IRRIGATIONS	156
11.2.1 CLASSIFICATION AMERICAINE.....	157
11.2.1.1 LA SALINITÉ.....	157
11.2.1.2 ALCALINISATION.....	158
11.2.2 CLASSIFICATION DE LA F.A.O.	163

11.2.2.1 APPLICATION	164
11.2.2.1.1 LA SALINITÉ.....	165
11.2.2.1.2 TOXICITÉ DUE AU SODIUM.....	165
11.2.2.1.3 TOXICITÉ DUE AU CHLORE.....	165
12. CONCLUSION	166
CONCLUSION GÉNÉRALE	168
BIBLIOGRAPHIE.....	172
LISTE DES FIGURES	175
LISTE DES TABLEAUX	180
ANNEXES.....	183

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau est le principal constituant des êtres vivants et l'élément indispensable à toute forme de vie et rien ne peut la remplacer. Sans eau aucun organisme ne peut vivre. Le seul problème est qu'elle n'est pas disponible de façon uniforme sur la planète. A cet effet, l'accès à cette précieuse denrée est un des plus grands défis du nouveau millénaire en particulier dans le continent africain où elle devient de plus en plus rare pour devenir une source de conflits entre les peuples.

Pour cela, les exigences accrues en eau d'un pays à la fois méditerranéen et africain comme le notre en plein développement, ont contribué à une prise de conscience de la gravité du problème. C'est dans ce sens qu'on veut apporter une contribution utile grâce à l'étude hydrogéologique qui a pour but de rechercher les niveaux aquifères dans la région de Bel Hacer, de préciser la géométrie de la nappe, d'évaluer les paramètres hydrodynamiques et de mettre en évidence les zones de meilleurs transmissivités.

Pour atteindre cet objectif, notre étude s'articulera en cinq parties principales :

- Localisation et géomorphologie : située au Nord-Ouest d'Algérie à environ 77 km à vol d'oiseau à l'Est d'Oran, notre secteur d'étude présente sur le plan géomorphologique une succession de plis à faibles rayons de courbure orientés Nord-Est/Sud-Ouest avec une altitude moyenne de 270 m environ. Cet aspect nous donne un réseau hydrographique très modeste.
- Le climat de la région est connu à partir des données de précipitation et de température représentant les deux facteurs indispensables pour la réalisation de cette partie. Tous les calculs des autres paramètres climatiques dépendent de ces deux facteurs. Le bilan hydrologique sera utilisé afin de quantifier la lame d'eau écoulee ou infiltrée et échappée à l'évapotranspiration.
- La géologie de la région, pour mettre en évidence les principales formations susceptibles de contenir de l'eau ainsi que la nature lithologique du substratum. La géométrie de ces formations ou l'évolution spatiale de leurs épaisseurs sera réalisée à partir des corrélations

de quelques logs de forage. Une analyse granulométrique sera mise en oeuvre pour pouvoir comparer les paramètres hydrodynamiques dans des conditions assez particulières par rapport à la lithologie du complexe aquifère.

- L'hydrogéologie de la région sera traduite par l'établissement d'une carte piézométrique où la morphologie de sa surface nous donnera des indications précieuses sur l'évolution du sens de l'écoulement et des zones d'alimentations de la nappe. Des pompages d'essai sont effectués afin d'évaluer les paramètres hydrodynamiques à savoir les transmissivités et les coefficients d'emmagasinement. Toutefois, à partir des différentes méthodes d'interprétations des pompages d'essai, nous allons comparer ces paramètres pour mettre en évidence ceux qui sont les plus adéquats avec la nature du complexe aquifère.

- Enfin, la dernière partie sera basée sur une étude géochimique des eaux souterraines. Les analyses physico-chimiques des eaux de la région seront effectuées au laboratoire de l'A.N.R.H. Les résultats nous donneront, d'une part, l'influence de la lithologie sur ces eaux afin de confirmer les formations réservoirs, les corrélations qui existent entre les éléments chimiques et, d'autre part, la qualité de l'eau d'irrigation qui sera probablement affectée par une pollution due probablement à l'utilisation excessive des engrais artificiel du fait que la région est à vocation très agricole.

CHAPITRE I

Généralités

1. INTRODUCTION :

D'après la carte topographique au 1/200 000^e de Mostaganem, la région d'étude commence immédiatement à partir du 11^{ème} kilomètre (vol d'oiseau) à l'Est de la ville de Mostaganem et qui se termine plus loin jusqu'à la Montagne de Bel Hacel soit encore 26 kilomètres à vol d'oiseau.

Sur le plan géomorphologique, cette zone est affectée par de faibles ondulations qui deviennent de plus en plus importantes vers l'Est. Orientées NE-SW, ces structures s'élèvent pour atteindre une altitude de 500 m (région de Bel Hacel). Notons que la plus basse altitude est de 50 m environ (région du douar Zebédia).

Enfin, le réseau hydrographique dans notre secteur est insignifiant. Les cours les plus importants sont l'oued Mekrallouf qui prend fin au sud de Bouguirat vers la Plaine de la Macta, Oued El Kheir, limité au Nord-Est par l'oued Chelif, alimenté par Ain Hallouf et Ain Soltane et celui de la Vallée de la soif qui est sans aucun ruissellement superficiel.

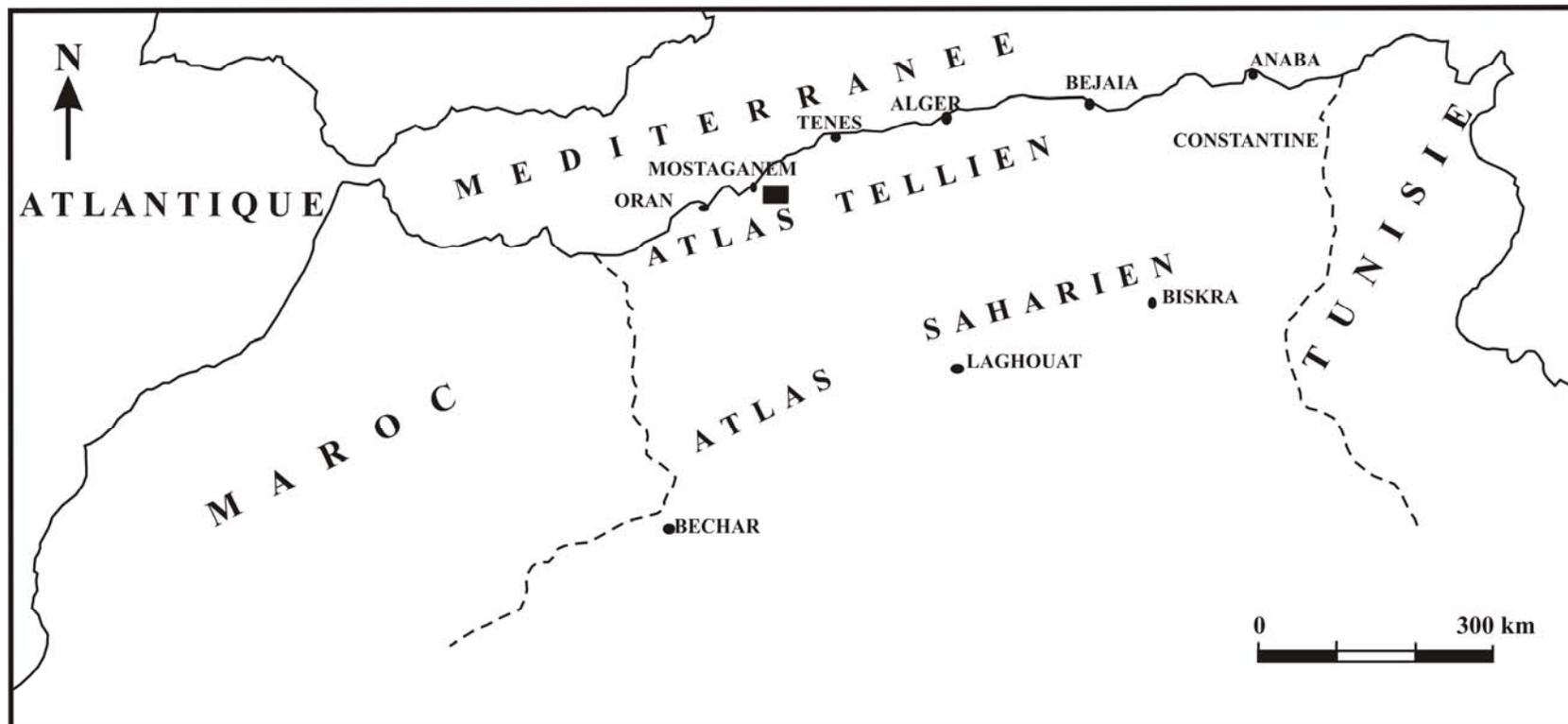
2. SITUATION GEOGRAPHIQUE :

Notre région est située au Nord-Ouest de l'Algérie à une quarantaine de kilomètres à l'Est de la ville de Mostaganem (fig. 1).

Sur le plan administratif, elle fait partie à la fois de la Wilaya de Mostaganem (dans sa majeure partie) et de la Wilaya de Relizane. Elle occupe ainsi toute la carte topographique n°129 (Bel Hacel : 1/50 000).

Sur le plan géographique, le secteur d'étude est limité (fig.2):

- Au Nord, de l'Est vers l'Ouest par l'Oued Chlef et Ain Tatlès.
- Au Sud par la Plaine d'el Merouana et Djebel Mouzaïa.
- A l'Est par l'Oued Mina.
- A l'Ouest par la ligne Kheir-Dine – Mesra.



■ Secteur d'étude.

Figure 1: Plan de situation générale.

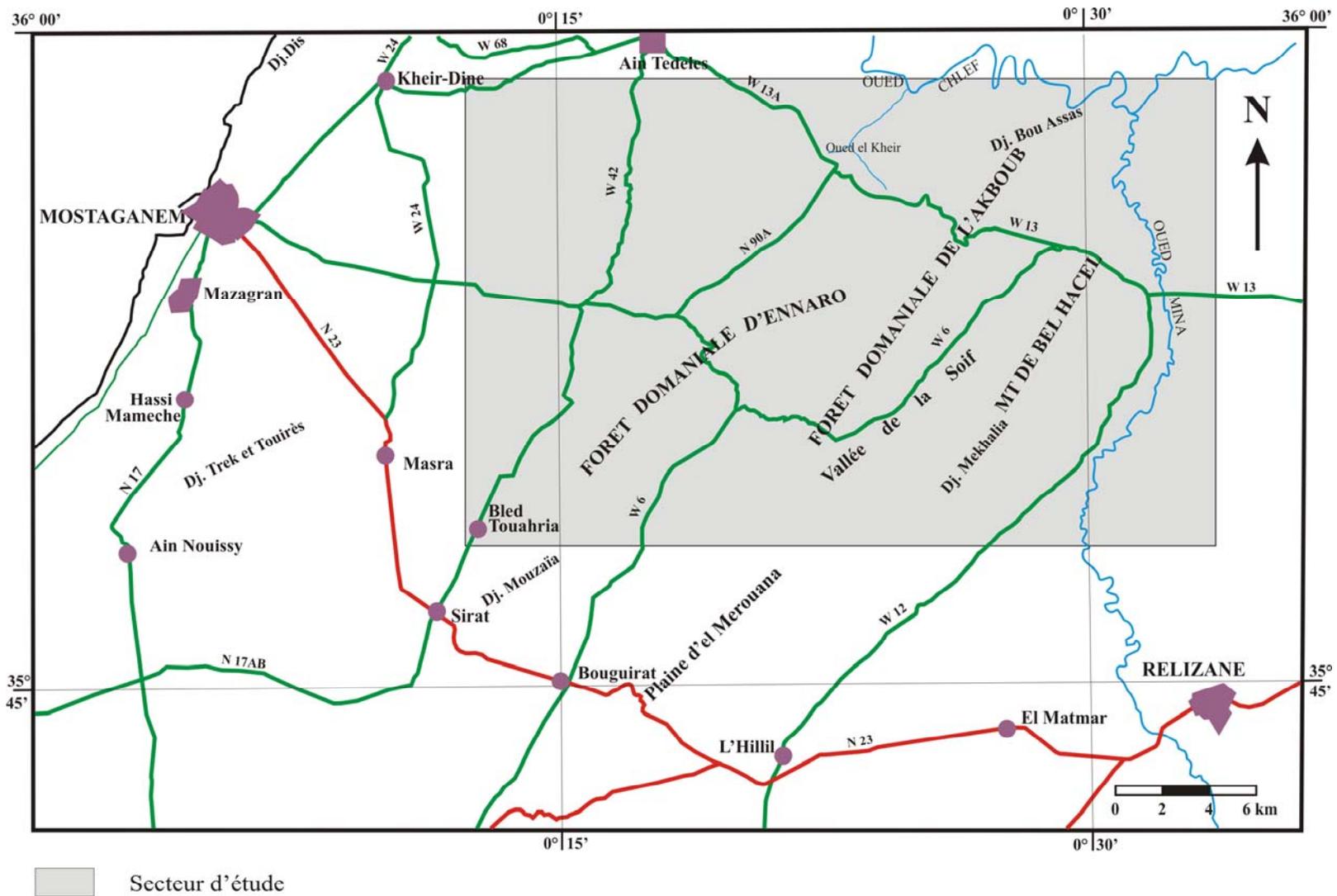


Fig. 2: Situation géographique de la région d'étude.

Avec une superficie de plus 600 km² notre secteur d'étude se présente dans sa partie Ouest avec des structures subtabulaires donnant des petites ondulations délimitants des cuvettes. Vers l'Est ces structures se resserrent et deviennent de plus en plus accentuées pour donner une succession de plis importants qui se termine enfin par la Montagne de Bel Hael.

3. ASPECT GÉOMORPHOLOGIQUE : (fig. 3)

Du point de vue géomorphologique, la région d'étude est subdivisée en deux zones : l'une formée par des petites ondulations (zone Nord-Ouest) et l'autre par de fortes ondulations (zone Sud-Est). L'ensemble forme une succession de plis orientés NE-SW délimitants des cuvettes dont les fonds sont parfois marécageux. L'altitude varie selon l'endroit, entre 50 m dans la région du douar Zebédia Nord de la vallée de la soif et plus de 500 m au niveau de la Montagne de Bel Hael.

3.1 ZONE NORD-OUEST :

Cette partie est affectée par de faibles ondulations. Son altitude, comprise entre 200 m (à l'Ouest) et 350 m (à l'Est) décroît d'Est en Ouest.

3.2 ZONE SUD-EST :

Dans la partie Sud-Est apparaissent de véritables collines, orientées NE-SW dont les plus importantes sont de l'Ouest à l'Est : Forêt domaniale de l'Akboube, forêt domaniale d'Ennaro et la Montagne de Bel Hael. Entre ces collines se forment des cuvettes de même direction, l'une entre l'Akboube et Ennaro (Synclinal de Bouguirat), et l'autre, entre Ennaro et la Montagne de Bel Hael (Vallée de la Soif).

3.2.1 SYNCLINAL DE BOUGUIRAT :

Est une cuvette allongée de direction NE-SW qui s'élève de 140 m au dessus du niveau de la mer dans sa partie Sud-Ouest et de 290 m dans sa partie Nord-Est.

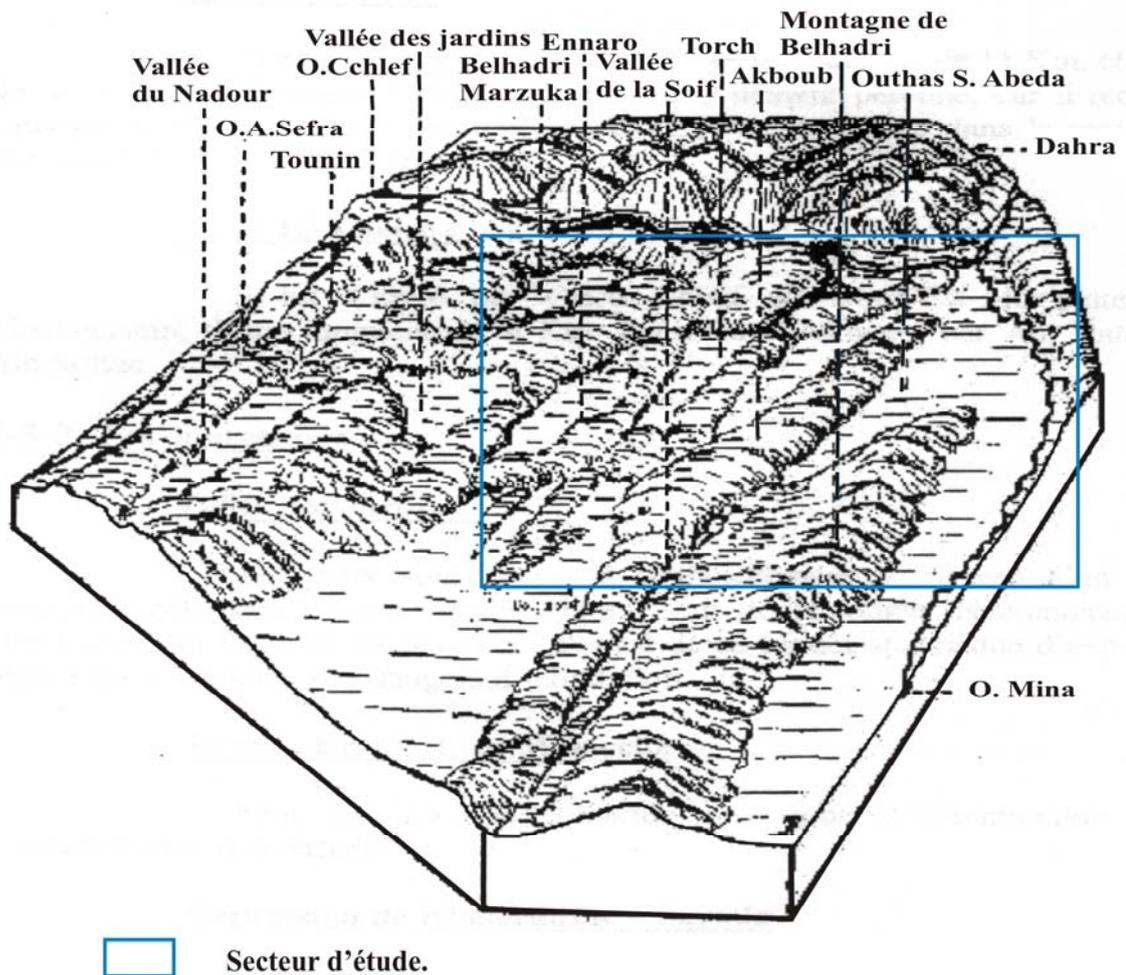


Figure 3 : Bloc diagramme du Plateau de Mostaganem (d'après TINTHOIN).

Le synclinal de Bouguirat est limité au Nord-Ouest par la Forêt domaniale d'Ennaro avec une altitude comprise entre 200 et 400 m environ et au Sud-Est par la forêt domaniale de l'Akboube qui surplombe le synclinal avec une altitude allant de 350 à 480 m.

3.2.2 LA VALLEE DE LA SOIF :

Entre la forêt de l'akboube dont l'altitude varie de 350 à 450 m et la Montagne de Bel Hacel qui est à plus de 500 m, apparaît une dépression abrupte et allongée

de direction NE-SW appelée « Vallée de la Soif ». Cette dernière débute dans la région de Saf-Saf avec une altitude de 380 m pour s'ouvrir après au Nord-Est vers la Mina en s'abaissant jusqu'à 50 m d'altitude (région de Zebédia). Les pentes vers la Vallée de la Soif sont élevées.

4. HYDROGRAPHIE :

Le réseau hydrographique est insignifiant. Il n'existe pas de cours d'eau important seulement un oued qui prend naissance dans la partie méridionale du synclinal de Bouguirat et tarie vers la plaine de la Macta (Sud-Ouest de Bouguirat) : c'est l'oued Mekrallouf qui est complètement sec en été. Les chutes diluviennes, exceptionnelles alimentent les ruissellements superficiels périodiques sur les pentes des Djebels. Un autre oued : Oued El Kheir, long de six kilomètres, limité au Nord-Est par l'oued Chelif, alimenté par Ain Hallouf et Ain Soltane. Et enfin, la vallée de la soif est sans aucun ruissellement superficiel. La Mina délimite la région au Nord-Est, et s'y jette dans le Chélif.

5. CONCLUSION :

Sur le plan administratif, notre secteur d'étude appartient à la fois à la Wilaya de Mostaganem et à la Wilaya de Relizane. Située au Sud-Est du Plateau de Mostaganem, cette région est représentée par la carte topographique n°129 au 1/50 000. L'altitude moyenne est de 270 m environ et ses structures sont marquées par des ondulations de direction Nord-Est/Sud-Ouest à faibles rayons de courbure qui prennent de l'importance vers le Sud-Est où la Montagne de Bel Hacel devient un grand anticlinal en s'élevant à plus de 500 m au dessus du niveau de la mer. Cet aspect morphologique tel que décrit auparavant, nous informe sur la modestie du réseau hydrographique de notre région.

CHAPITRE II

Hydroclimatologie

1. INTRODUCTION:

La quantification des apports en eau sous forme de précipitations est très importante dans cette région à vocation agricole où l'exploitation de cette précieuse denrée est mise à rude épreuve par les nombreux puits et forages creusés dans la région.

Pour cela, nous serons donc amenés avant tout de préciser les conditions climatiques qui règnent sur notre région. Les paramètres climatiques, en particulier les précipitations et les températures sont les deux facteurs indispensables pour la réalisation de cette étude.

Il y a donc un intérêt certain d'utiliser les relevés effectués au niveau de la station de Mostaganem qui est la seule qui fournit des données fiables surtout de températures en même temps que les précipitations. Tous les calculs des autres paramètres climatiques en découlent.

Et enfin, pour exploiter au mieux ces données, nous terminerons cette partie avec un essai de bilan hydrologique afin de quantifier la part des précipitations échappée à l'évapotranspiration qui s'écoule ou alimente la nappe souterraine.

2. PLUVIOMÉTRIE:

Le régime pluvial en Algérie a été étudié, en différentes périodes allant de 1913 à 1963, par de nombreux auteurs en particulier P. SELTZER, CHAUMONT et PAQUIN. Dans une période plus récente comprise entre 1969 et 1972, l'Institut National de Cartographie (I.N.C.) a dressé une carte des précipitations moyennes annuelles (figure 4). Cette dernière montre une variation pluviométrique comprise entre 300 mm (à l'Ouest) et 500 mm (à l'Est).

D'après cette carte, notre région d'étude se situe dans le secteur le plus arrosé de la région avec des précipitations élevées comprises entre 500 et 700 mm. Au delà et vers l'Est l'intensité des précipitations diminue jusqu'à atteindre la fourchette de 300 à 500 mm.

Cette situation peut s'expliquer, vraisemblablement, par la présence des reliefs assez élevés dans cette région (la forêt domaniale d'Ennaro, forêt domaniale de l'Akboube et enfin plus à l'Est la Montagne de Bel Hacel avec ses 500 mètres d'altitude) qui constituent probablement une barrière aux nuages entraînant la présence du microclimat.

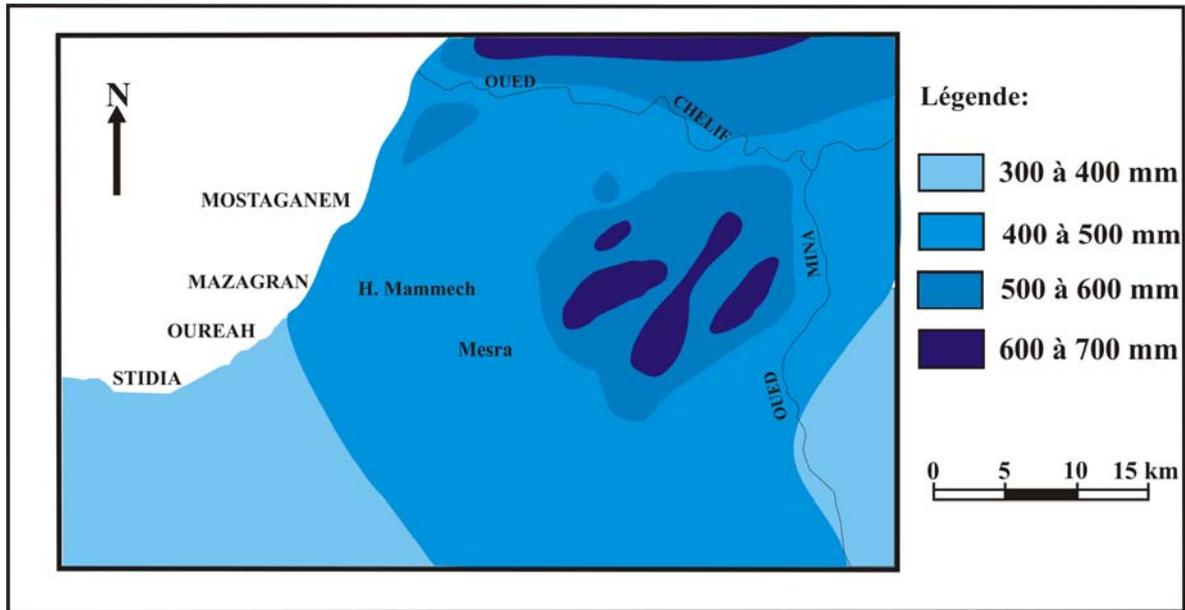


Figure 4: Carte des précipitations moyennes annuelles de la période 1969/1972 (I.N.C.).

2.1 L'ÉVOLUTION SÉCULAIRE DE LA PLUVIOSITÉ: (fig. 5)

Pendant une longue période allant de 1942 à 2003 (sauf lacunes: de 1962 à 1964 et de 1968 à 1976), les données anciennes et récentes de la pluviométrie relevées à la station de Mostaganem, permettent de nous donner une vision globale des différents aspects pluviométriques caractérisant toute la région. Celle-ci est malheureusement marquée par deux périodes de sécheresse:

- Première période de 1959 à 1967.
- Deuxième période de 1986 à 2003, exception pour l'année 1986 et 2000.

2.2 ÉTUDE DES PRÉCIPITATIONS:

2.2.1 STATIONS DE MESURES:

Pour notre région, nous avons pu disposer des données de 07 stations pluviométriques dont 03 situées à l'intérieur de notre secteur.

Les données résumées dans le tableau n°1, proviennent des fichiers hydroclimatologiques mensuels de l'Agence National des Ressources Hydraulique d'Oran. (A.N.R.H.).

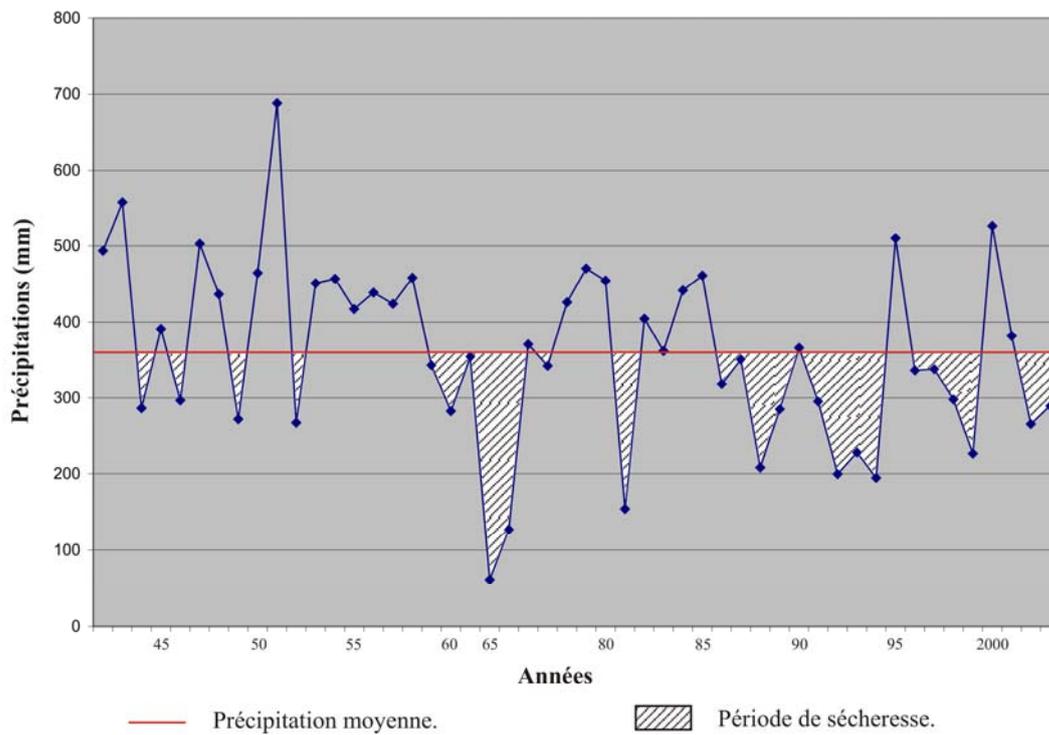


Figure 5: Evolution séculaire de la pluviosité sur la région de Mostaganem (Période de 1942-2003).

Noms de station	Numéros de station	coordonnées			Paramètres étudiés
		X (km)	Y (km)	Z (m)	
Mostaganem	40612	266.4	293.4	145	P et T
Oued El Kheir	13606	291.0	296.8	240	P
Kheireddine	40602	271.7	300.8	185	P
Bougirat	111609	279.3	275.0	75	P
Bled Touahria	1116612	277.0	284.6	120	P
Dunes Cultivées	40611	274.0	288.3	190	P
Bel Hacel	-	298.6	281.725	70	P

Tableau 1: Les différentes stations utilisées.

2.2.2 PRÉCIPITATIONS MENSUELLES:

2.2.2.1 STATION DE MOSTAGANEM (1989-2003): (fig. 6)

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D	Année
P(mm)	45.9	41.4	29.5	35.0	23.8	03.4	01.6	03.0	16.8	24.4	56.4	34.7	315.9

Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Mostaganem.

- Le module pluviométrique est de 315.9 mm.
- Le minimum apparaît en juillet et août avec respectivement 1.6 et 3 mm.
- Le maximum en novembre avec 56.4 mm.

2.2.2.2 STATION DE L'OUED EL KHEIR (1989-2003): (fig. 7)

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D	Année
P(mm)	39.0	34.1	27.3	34.4	21.2	01.2	0.2	02.3	16.2	30.0	46.0	33.6	285.5

Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles à la station de l'Oued El Kheir.

- Le module pluviométrique annuel est de 285.5 mm.
- Le minimum apparaît en juin, juillet et août respectivement 1.2, 0.2 et 2.3 mm.
- Le maximum en novembre avec 46 mm.

2.2.2.3 STATION DE KHEIREDDINE (1989-2003): (fig. 8)

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D	Année
P(mm)	46.6	41.3	25.6	34.6	20.5	02.0	0.6	02.0	13.7	25.8	55.5	35.0	303.2

Tableau 4: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Kheireddine.

- Le module pluviométrique est de 303.2 mm.
- Le minimum apparaît en juin, juillet et août avec respectivement 2, 0.6 et 2 mm.
- Le maximum en novembre avec 55.5 mm.

2.2.2.4 STATION DE BOUGUIRAT (1989-2003): (fig. 9)

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D	Année
P(mm)	38.0	34.1	29.2	37.9	24.3	03.4	01.6	01.7	14.1	22.4	52.6	33.2	292.5

Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Bouguirat.

- Le module pluviométrique annuel est de 292.5 mm.
- Le minimum apparaît en juillet et août avec respectivement 3.4 et 1.6 mm.
- Le maximum en novembre avec 52.6 mm.

2.2.2.5 STATION DE BLED TOUAHRIA (1989-2003): (fig. 10)

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D	Année
P(mm)	41.9	35.3	31.2	33.8	22.4	02.1	01.0	01.4	11.1	22.8	51.2	29.4	283.6

Tableau 6: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Bled Touahria.

- Le module pluviométrique annuel est de 283.6 mm.
- Le minimum est enregistré en juillet et août avec 1 et 1.4 mm.
- Le maximum en novembre avec 51.2 mm.

2.2.2.6 STATION DUNES CULTIVÉES (1989-2003): (fig. 11)

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D	Année
P(mm)	37.7	32.9	31.0	29.9	19.6	02.5	01.0	02.2	13.8	22.6	48.4	29.5	274.1

Tableau 7: Précipitations moyennes mensuelles à la station des Dunes cultivées.

- Le module pluviométrique annuel est de 274.1 mm.
- Le minimum est enregistré en juillet et août avec respectivement 1 et 2.2 mm.
- Le maximum en novembre avec 48.4 mm.

2.2.2.7 STATION DE BEL HACEL (1989-2003): (fig. 12)

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D	Année
P(mm)	32.7	33.2	31.6	33.5	25.3	02.0	01.5	02.5	15.9	24.7	42.5	31.1	276.4

Tableau 8: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Bel Hacer.

- Le module pluviométrique annuel est de 276.4 mm.
- Le minimum apparaît en juillet et août avec respectivement 2, 1.5 et 2.5 mm.
- Le maximum en novembre avec 42.5 mm.

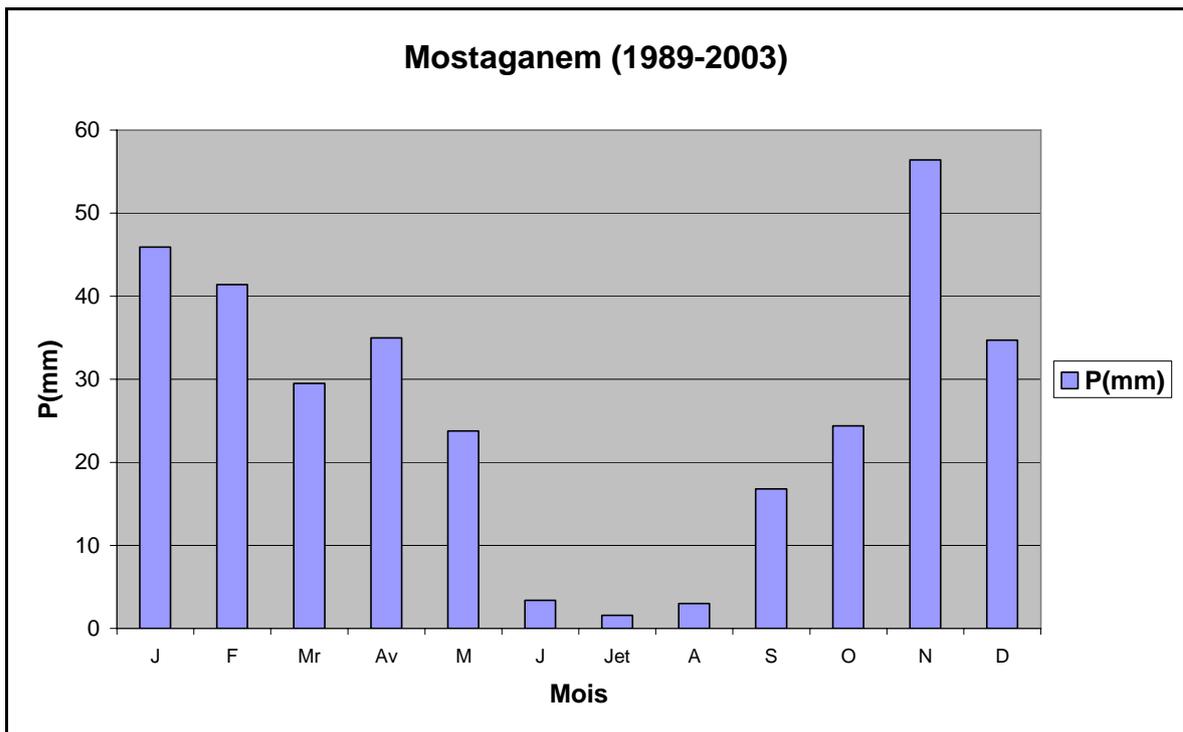


Figure 6 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Mostaganem.

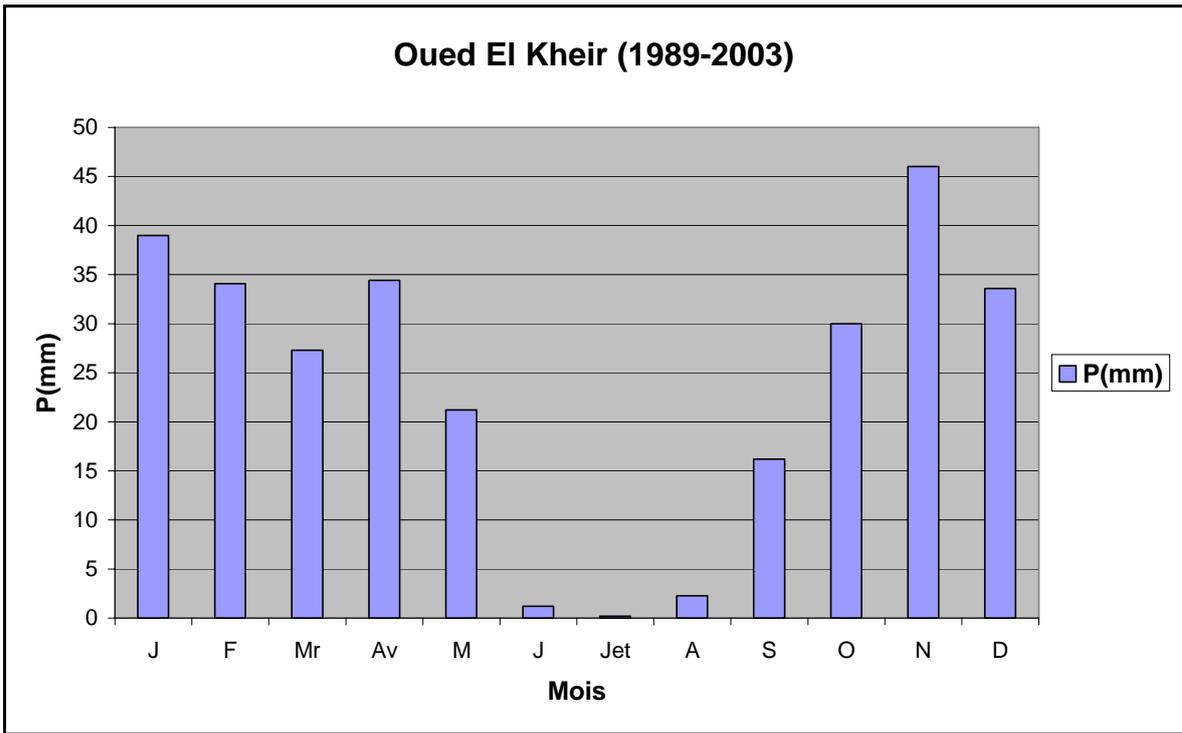


Figure 7 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Oued El kheir.

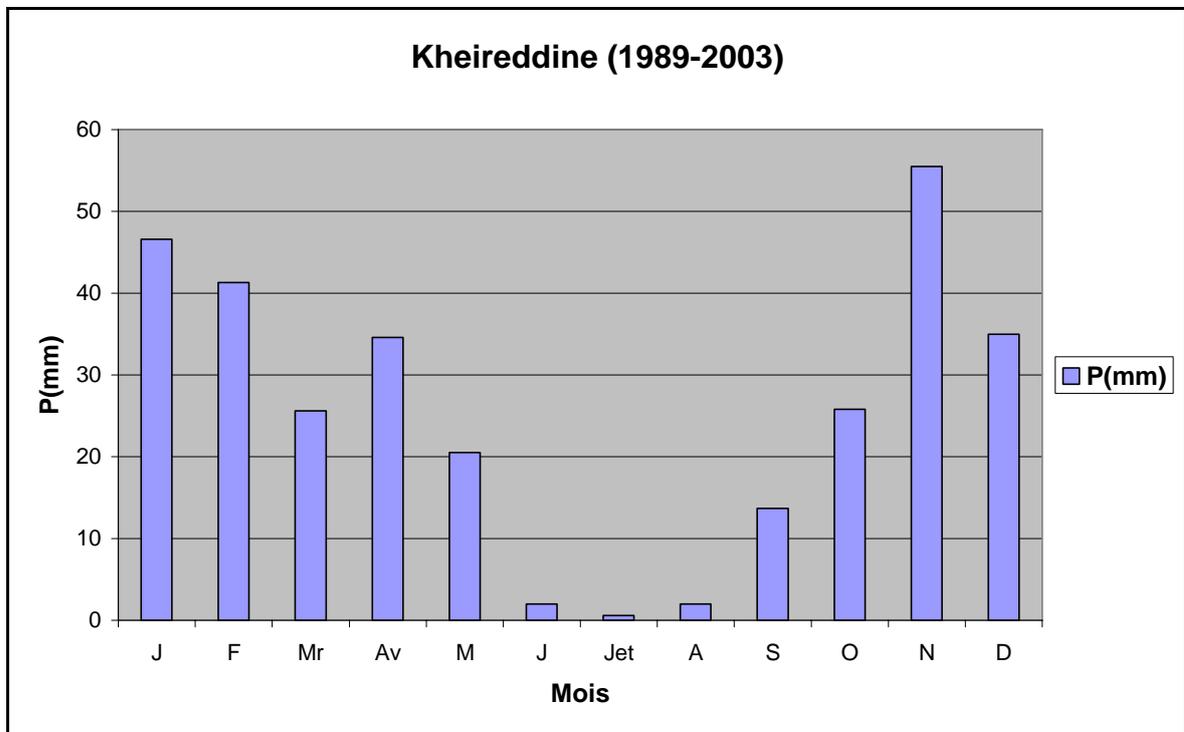


Figure 8 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Kheireddine.

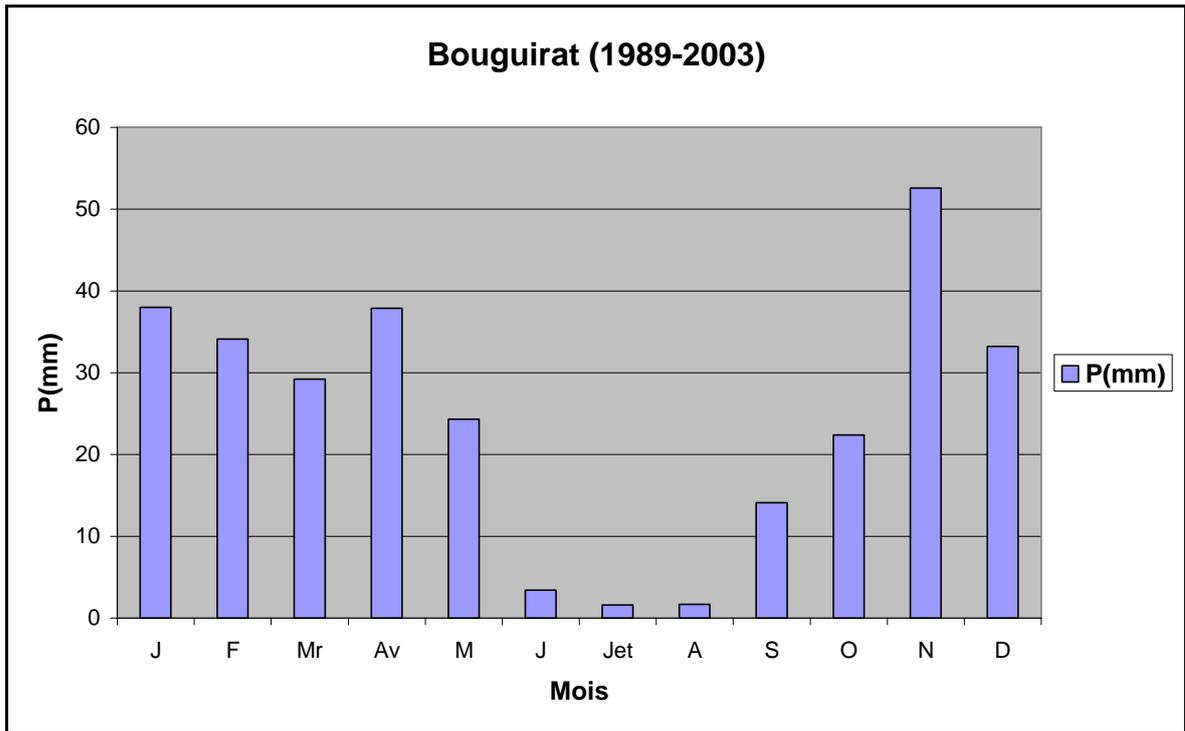


Figure 9 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Bouguirat.

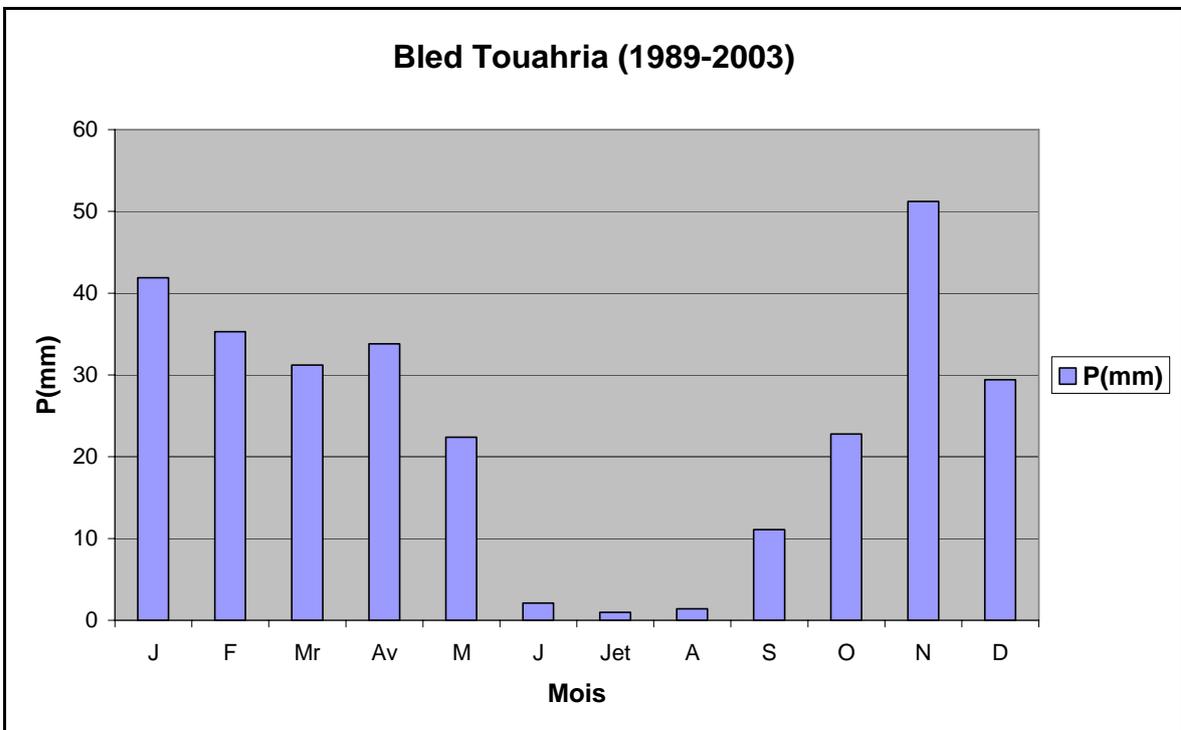


Figure 10 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Bled Touahria.

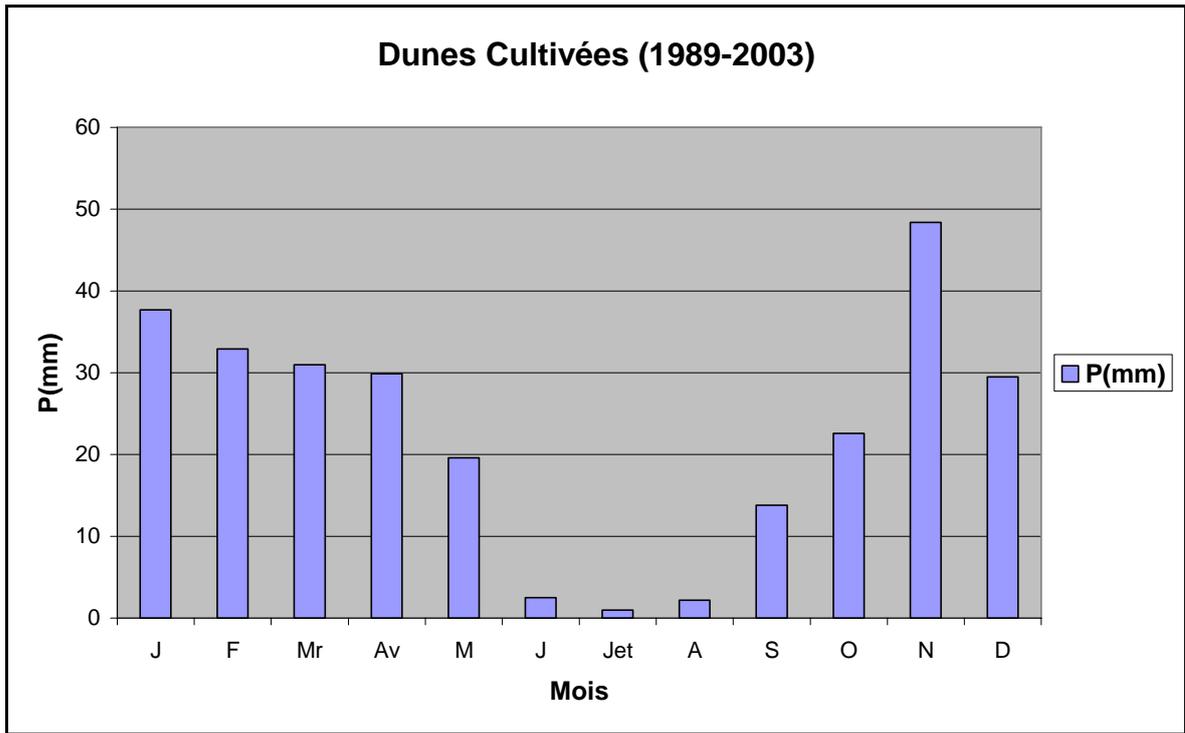


Figure 11 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station des Dunes Cultivées.

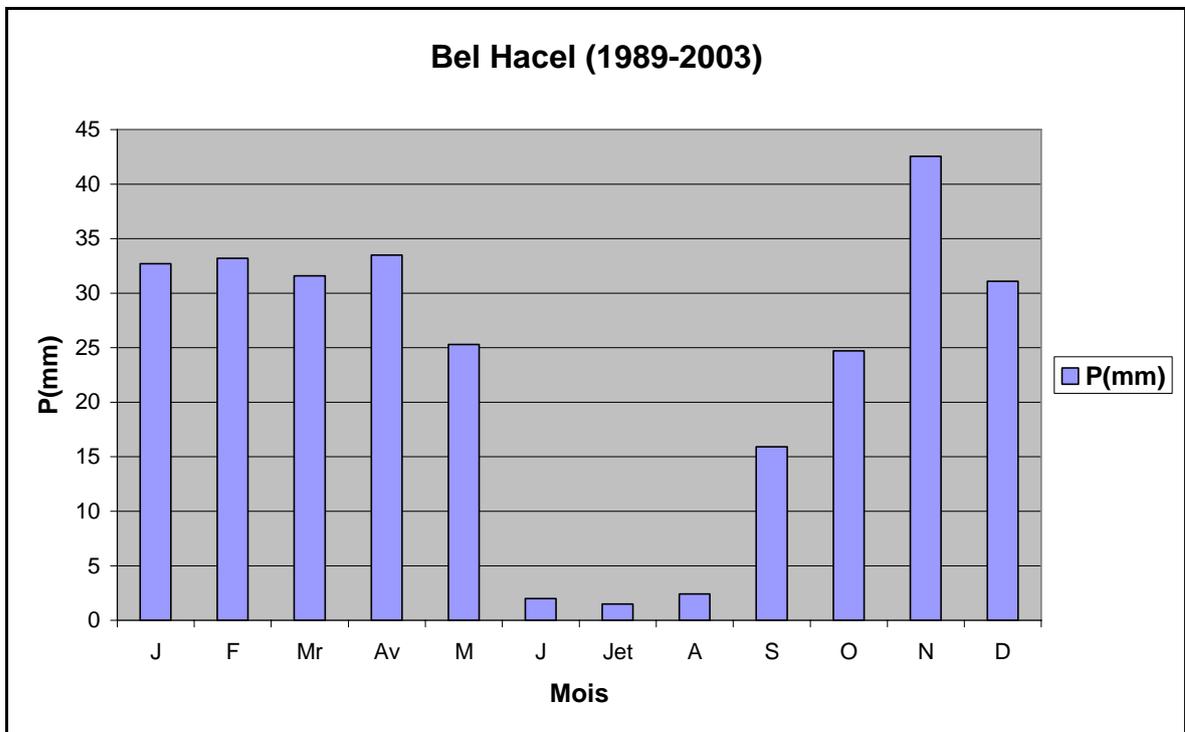


Figure 12 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Bel Hael.

2.2.3 PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES: (fig. 13)

Pour apprécier la variation des précipitations ou le régime pluviométrique saisonnier de la région étudiée, nous avons calculé le total des précipitations de chaque saison de la même période (1989-2003), au niveau des 07 stations utilisées (tableau 9).

Le calcul ainsi fait montrer que malgré les grandes irrégularités des précipitations, les pluies d'hiver sont toujours les plus importantes devant celles du printemps et de l'automne avec des pourcentages allant de 36% à 40.53%. Tandis que la saison d'été est la moins pluvieuse; cette période estivale est marquée par des pourcentages très faibles pouvant atteindre la valeur de 1.29% à la station de Oued El Kheir par exemple.

Noms de stations	Moyenne saisonnière	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Indice saisonnier
Mostaganem	mm	97.6	122	88.3	8	H.A.P.E
	%	30.89	38.61	27.95	2.53	
Oued El Kheir	mm	92.2	106.7	82.9	3.7	H.A.P.E
	%	32.29	37.37	29.03	1.29	
Kheireddine	mm	95	122.9	80.7	4.6	H.A.P.E
	%	31.33	40.53	26.61	1.51	
Bougairat	mm	89.1	105.3	91.4	6.7	H.P.A.E
	%	30.46	36	31.24	2.29	
Bled Touahria	mm	85.1	106.6	87.4	4.5	H.P.A.E
	%	30	37.58	30.81	1.58	
Dunes cultivées	mm	84.8	100.1	80.5	5.7	H.A.P.E
	%	31.27	36.92	29.69	2.10	
Bel Hael	mm	83.1	97.5	90.4	5.9	H.P.A.E
	%	30.06	35.27	32.70	2.13	

Tableau 9: Précipitations saisonnières.

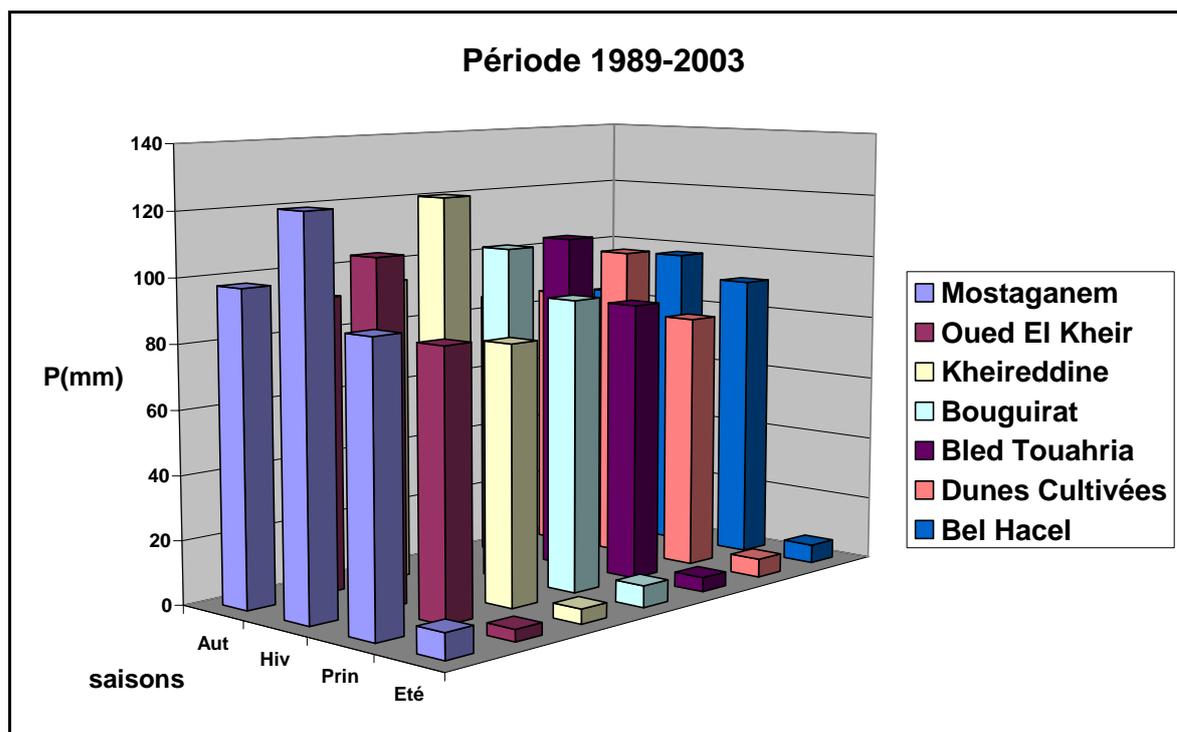


Figure 13: Histogramme des précipitations saisonnières des stations utilisées.

2.2.4 PRÉCIPITATIONS ANNUELLES: (tableau 10)

La confrontation des courbes des précipitations annuelles (fig. 14) des sept (07) stations durant la période 1989-2003, révèle le phénomène de fluctuation qui se traduit par une variabilité assez importante de la pluviométrie d'une année à une autre.

L'allure de l'ensemble des courbes est globalement la même avec cependant quelques pics dépassant les 500 mm à la station de Mostaganem durant l'année 1995 et 2000, mais jamais deux années successives. Deux (02) autres pics de même importance sont signalés aussi en 1995 dans les deux stations de Kheireddine et Bouguirat. Par contre, l'année 1992 a été caractérisée par une sécheresse assez sévère avec des précipitations annuelles de 151.4 mm à la station des Dunes Cultivées et de 171.1 mm à la station de Bel Hacer. La sécheresse marque également en 1999 la station des Dunes Cultivées avec 180.4 mm, la station de Kheireddine et celle de Bled Touahria avec chacune 174.2 mm.

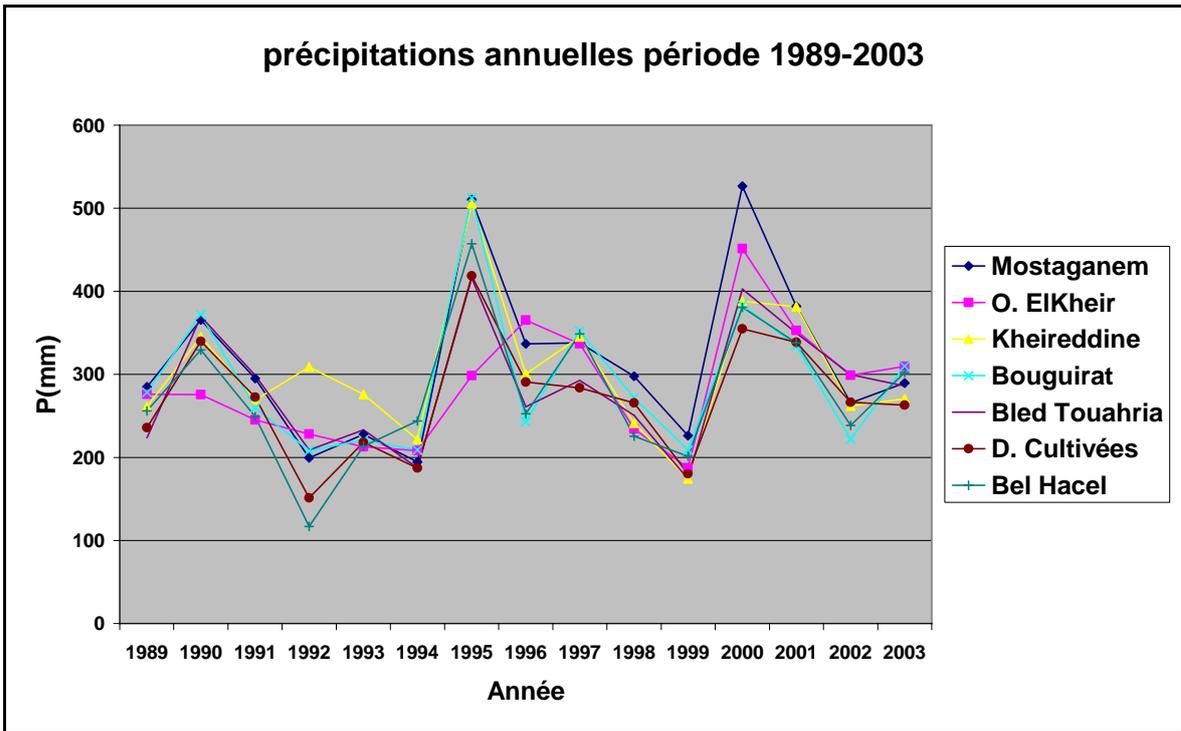


Figure 14: Fluctuation des précipitations annuelles des sept stations.

Stations Années	Mostaganem	O. El Kheir	Kheireddine	Bougirat	B. Touahria	D. Cultivées	Bel Hacer
1989	285	275.9	261.1	278.4	223.7	236.1	255.9
1990	365.8	275.7	345.0	372.0	369.5	339.6	329.3
1991	295.1	245.0	269.2	259.8	298.9	272.7	249.1
1992	199.6	228.1	308.7	208.1	209.0	151.4	117.1
1993	227.9	212.9	276.0	220.9	233.2	218.3	213.6
1994	194.7	208.2	221.8	209.0	187.8	187.2	243.9
1995	510.4	298.6	505.3	512.4	415.9	418.4	457.1
1996	336.5	365.4	300.4	243.0	261.1	290.6	252.4
1997	338.0	336.6	345.1	352.2	292.6	283.8	348.6
1998	297.8	234.5	241.4	271.7	250.4	265.6	225.4
1999	226.3	187.5	174.2	208.8	174.2	180.4	201.5
2000	526.6	451.2	388.0	383.5	402.7	355.0	380.8
2001	381.7	353.0	381.3	334.4	349.7	338.8	337.8
2002	265.5	299.0	261.6	222.0	299.7	266.4	238.7
2003	289.7	309.7	270.5	309.5	286.1	262.9	302.3
Moyenne	316.04	285.42	303.30	292.28	283.63	271.14	276.9

Tableau 10: Précipitations annuelles dans les différentes stations.

3. ÉTUDE DES TEMPÉRATURES :

L'indisponibilité des données en matière de mesures thermométriques dans notre région, nous oblige à prendre en compte les températures relevées à la station de Mostaganem pour l'étude du climat régnant sur la région. Les maximums et les minimums ainsi que leurs moyennes pour la période 1989-2003 sont résumés dans le tableau 11. La moyenne des températures annuelles de la période de 1989 à 2003 est de 17.75 °C au niveau de cette station.

Mois	T °C minimum (m)	T °C maximum (M)	M + m / 2
Janvier	5.79	16.32	11.05
Février	5.99	17	11.49
Mars	7.74	19.4	13.57
Avril	9.28	20.64	14.96
Mai	13.03	24	18.51
Juin	16.69	27.94	22.33
Juillet	19.22	31.12	25.17
Août	20.44	32.07	26.25
Septembre	17.72	28.58	23.15
Octobre	14.19	24.46	19.32
Novembre	9.95	19.84	14.89
Décembre	7.51	17.31	12.41
Moyenne annuelle	12.29	23.22	17.75

Tableau 11: Moyennes mensuelles et annuelles des températures à la station de Mostaganem (1989-2003).

La figure 15, représente les variations mensuelles des minima, des maxima et de leurs moyennes à la station de Mostaganem pour la période 1989-2003.

Aucune valeur négative n'apparaît au niveau de la courbe des minima. Les valeurs débutent par 5.79 °C en Janvier pour croître régulièrement et atteindre un maximum de 20.44 °C en Août, suivie ensuite d'une décroissance jusqu'à Décembre avec un minimum de 7.51°C. La courbe représentative des maximums est comprise entre 16.32 °C en Janvier et

32.07 °C en Août. En résumé, sur une série d'année comprise entre 1989 et 2003, le mois le plus froid est Janvier avec une moyenne mensuelle de 11.05 °C et le mois le plus chaud et Août avec une moyenne mensuelle de 26.25 °C.

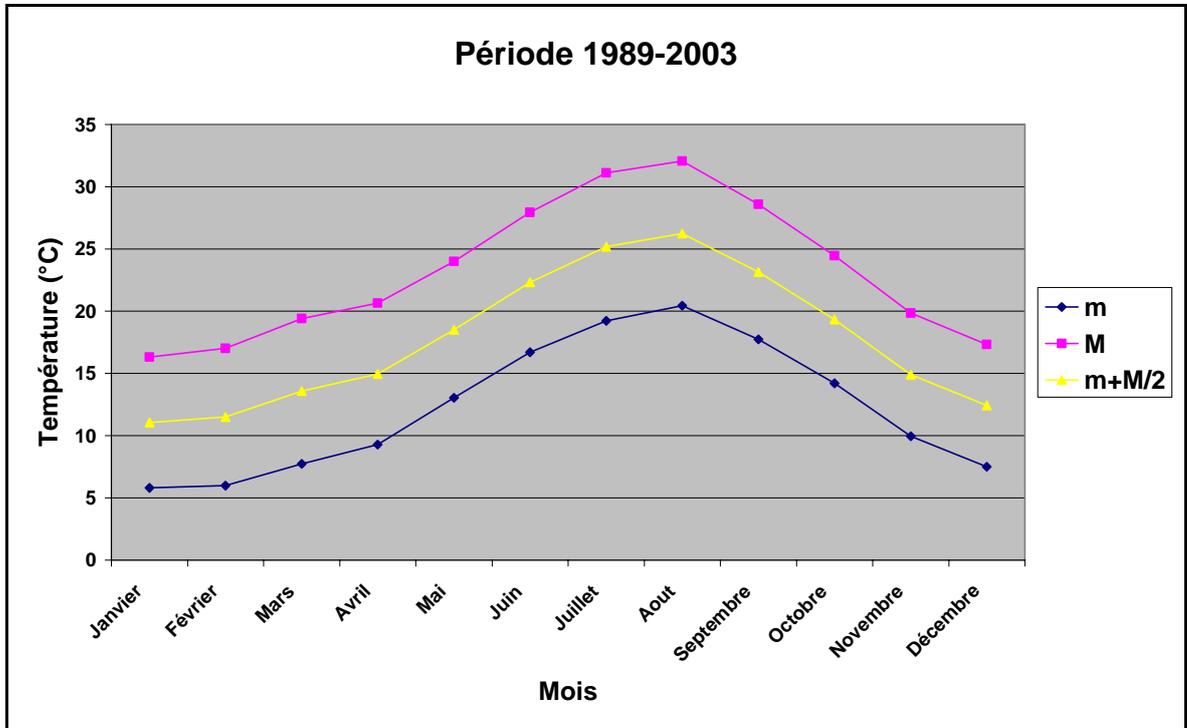


Figure 15: Représentation graphique des variations des moyennes mensuelles des températures, station de Mostaganem (1989-2003).

4. LE RÉGIME CLIMATIQUE:

Dans un pays comme l'Algérie caractérisé par le contraste entre le climat méditerranéen au Nord et le climat désertique au Sud, il est nécessaire de préciser le type du climat qui règne dans notre région.

Les méthodes possibles sont nombreuses. Elles reposent soit sur une visualisation graphique des paramètres; soit sur le calcul d'indices permettant de préciser le climat qui domine la région.

4.1 REPRÉSENTATION GRAPHIQUE:

4.1.1 METHODE PLUVIOTHERMIQUE (Tabl. 12):

Selon F. Bagnouls et H. Gaussen, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations est inférieur ou égal au double de la température moyenne:

$$P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Cette relation permet d'établir un diagramme pluviothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations. La courbe des températures passe au dessus de celle des précipitations pendant les mois secs.

A la station de Mostaganem, la saison sèche débute à la mi-avril et se termine au début d'octobre (figure 16).

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D
P (mm)	45.9	41.4	29.5	35.0	23.8	03.4	01.6	03.0	16.8	24.4	56.4	34.7
T (°C)	11.05	11.49	13.57	14.96	18.51	22.33	25.17	26.25	23.15	19.32	14.89	12.41

Tableau 12: Températures et précipitations moyennes mensuelles, station de Mostaganem (1989-2003).

4.1.2 MÉTHODE OMBROTHERMIQUE:

Par cette méthode, on considère l'action de la chaleur et de l'humidité vis à vis de l'action biologique. En effet les besoins en eau des plantes suivent une progression exponentielle et pour un accroissement de température de 6 °C, les besoins en eau doublent. On établit les diagrammes ombrothermiques en adoptant une échelle arithmétique pour les températures et logarithmique pour les précipitations:

- Lorsque la courbe des précipitations et celle des températures se recoupe, les besoins en eau sont couverts.
- Si la courbe des précipitations passe au dessus de celle des températures, la période est humide.
- Si au contraire c'est la courbe des températures qui passe au dessus de celle des précipitations, la période correspondante est déficitaire.

Pour la station de Mostaganem (fig. 17), la courbe des températures passe au dessus de celle des précipitations entre le mois de Mars et mi-octobre, la période correspondante est déficitaire.

L'étude du rapport P / T (tableau ci-dessous) à l'échelle mensuelle permet de définir une succession de trois (03) sous climats.

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D
P / T	4.15	3.6	2.17	2.33	1.28	0.15	0.06	0.11	0.72	1.26	3.78	2.79

Tableau 13: Rapport de P / T des précipitations et des températures moyennes mensuelles, station de Mostaganem (1989-2003).

- **Si $P / T < 1$** : station très sèche Eu méditerranéenne (Juin, Juillet, Août et Septembre).
- **Si $1 < P / T < 3$** : station sèche subméditerranéenne (Mars, Avril, Mai, Octobre et Décembre).
- **Si $P / T > 3$** : station humide tendance océanique (Janvier, Février et Novembre).

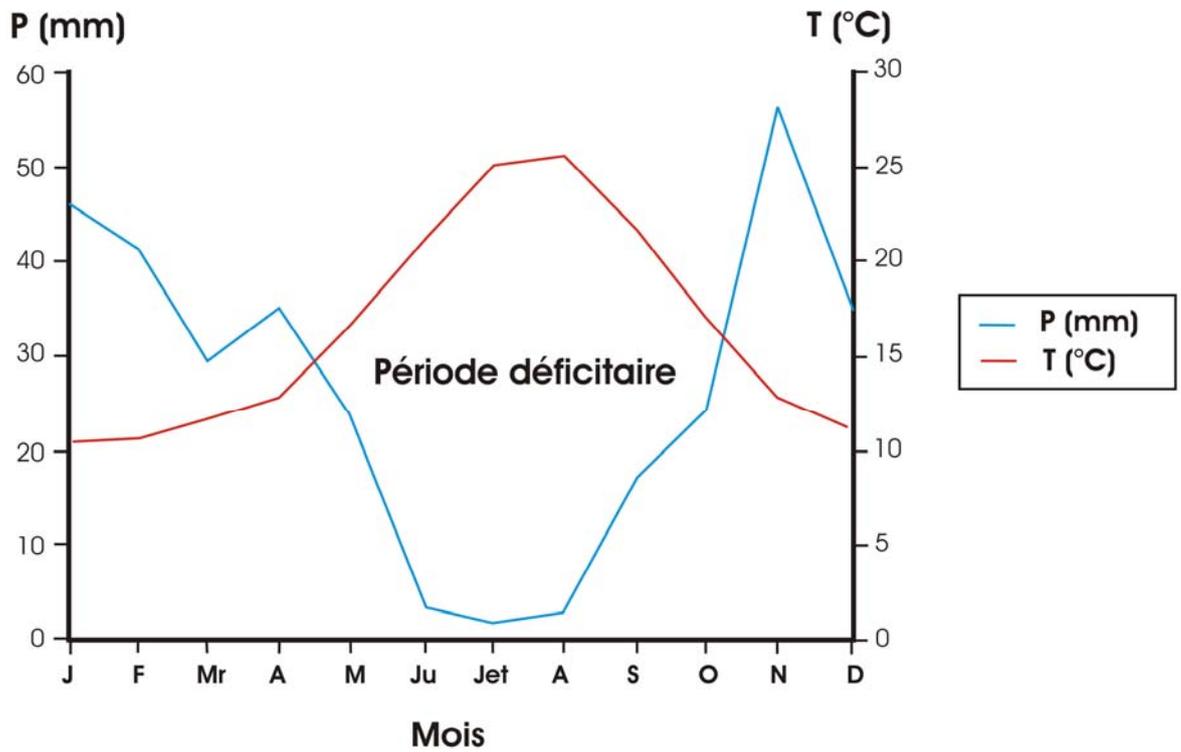


Fig. 16: Diagramme pluviothermique (Mostaganem).

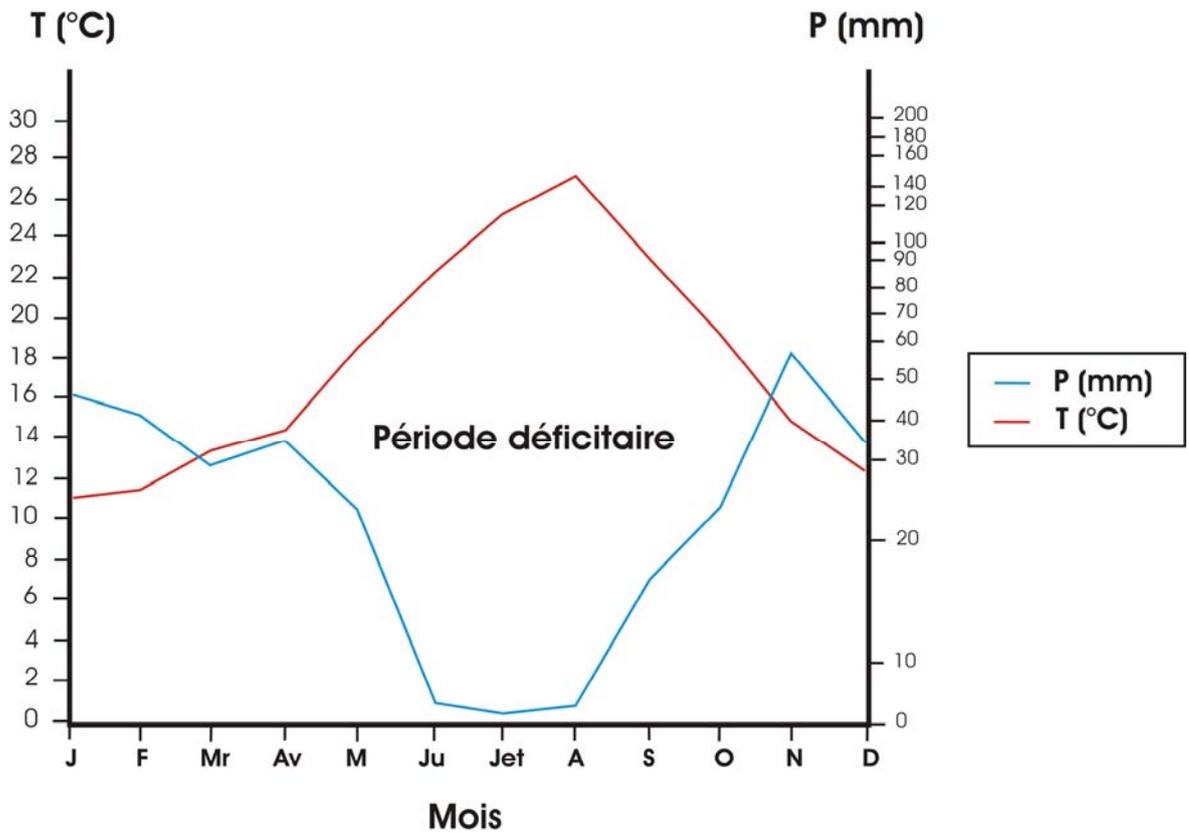


Fig. 17: Diagramme ombrothermique (Mostaganem).

4.2 LES INDICES CLIMATIQUES :

4.2.1 INDICE D'ARIDITÉ DE DE MARTONNE :

C'est en 1923 que le géographe De Martonne, se fondant sur la distribution des précipitations et des températures proposa de classer les stations d'observation suivant un indice d'aridité.

4.2.1.1 INDICE D'ARIDITÉ ANNUEL :

$$I = P / T + 10$$

I : Indice d'aridité annuel.

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Températures moyennes annuelles (°C).

Pour :

- $20 < I < 30$: climat tempéré.
- $10 < I < 20$: climat semi aride.
- $7.5 < I < 10$: climat steppique.
- $5 < I < 7.5$: climat désertique.
- $I < 5$: climat hyperaride.

Avec :

$$P = 316.04 \text{ mm}$$

$$T = 17.75 \text{ °C}$$

$$I = \underline{\underline{11.38}}$$

Pour la station de Mostaganem (période 1989-2003), l'indice d'aridité annuel « I » est compris entre 10 et 20, dénotant un climat semi aride. Ceci est vérifié graphiquement par la représentation de la station sur le diagramme de De Martonne (figure 18).

Pour préciser l'influence de la température estivale, les élèves de De Martonne ont proposé d'utiliser un indice d'aridité mensuel « i ».

4.2.1.2 INDICE D'ARIDITÉ MENSUEL (Tabl. 14) :

Etabli à partir de la relation suivante :

$$i = 12 p / t + 10$$

i : indice d'aridité mensuel.

p : représente les précipitations du mois considéré multipliées par 12 (mm).

t : température moyenne annuelle (°C).

Nous obtenons pour la station de Mostaganem :

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D
P(mm)	45.9	41.4	29.5	35.0	23.8	03.4	01.6	03.0	16.8	24.4	56.4	34.7
T(°C)	11.05	11.49	13.57	14.96	18.51	22.33	25.17	26.25	23.15	19.32	14.89	12.41
i	26.16	23.11	15.01	16.82	10.01	01.26	0.54	0.99	06.08	09.98	27.19	18.58

Tableau 14 : Indices d'aridités mensuels à la station de Mostaganem.

En Janvier et Février, le climat est tempéré. De Mars à Mai le climat est semi aride avec une tendance vers un climat steppique vers le moi de Mai. En Juin, le climat devient hyperaride, la situation se dégrade en Juillet et Août où le climat est aréique. On revient à la semi aridité en Septembre et Octobre grâce à une baisse de température, puis en Novembre et Décembre le climat redevient tempéré.

La présentation graphique de cette évolution mensuelle de l'aridité est donnée par la figure 19.

4.2.2 INDICE DE STEWART :

En se basant sur l'écart entre les températures moyennes maximales du mois le plus chaud et celles minimales du mois le plus froid, Stewart a défini un indice d'aridité :

$$Q = 3.43 P / M - m$$

P : précipitations moyennes annuelles (315.9 mm).

M : moyenne de température maximale du mois le plus chaud (32.07 °C).

m : moyenne de température minimale du mois le plus froid (5.79 °C).

Avec :

10 < Q < 50 climat semi aride.

2 < Q < 10 climat désertique.

Q < 2 climat insaturé.

Pour notre station (Mostaganem) **Q = 41.23**, cette valeur est comprise entre 10 et 50 ce qui correspond à un climat semi aride selon Stewart.

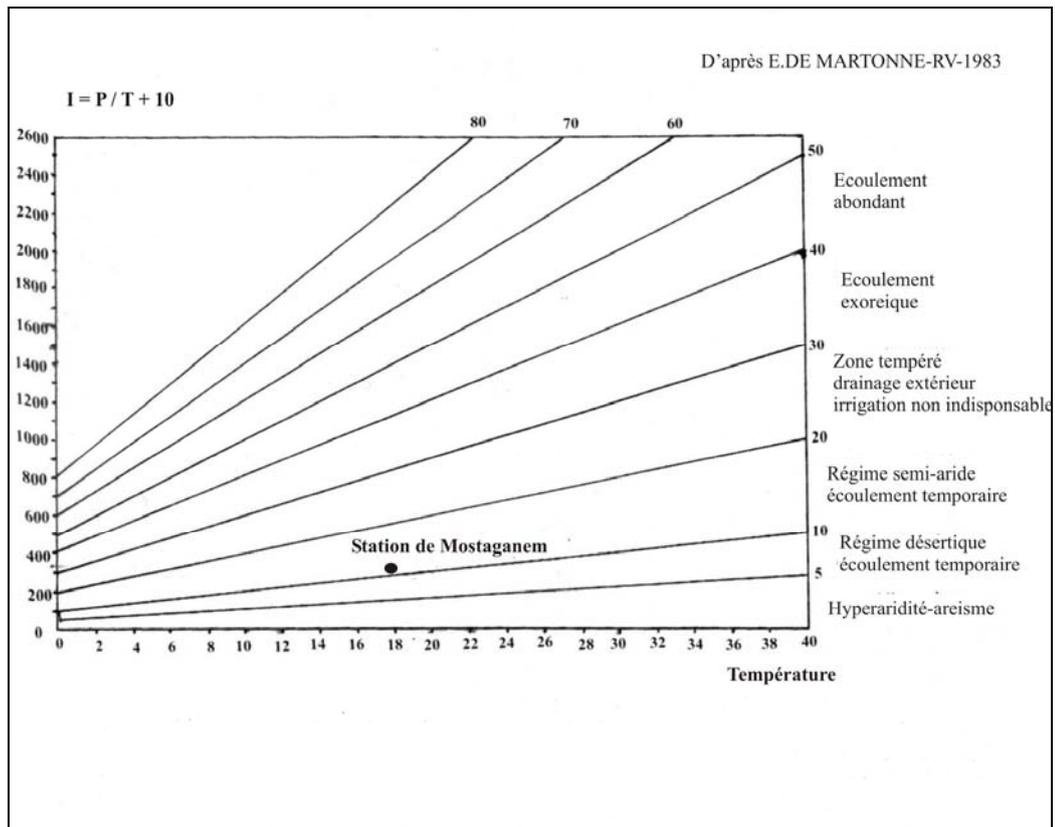


Figure 18 : Indice d'aridité annuel à la station de Mostaganem (1989-2003).

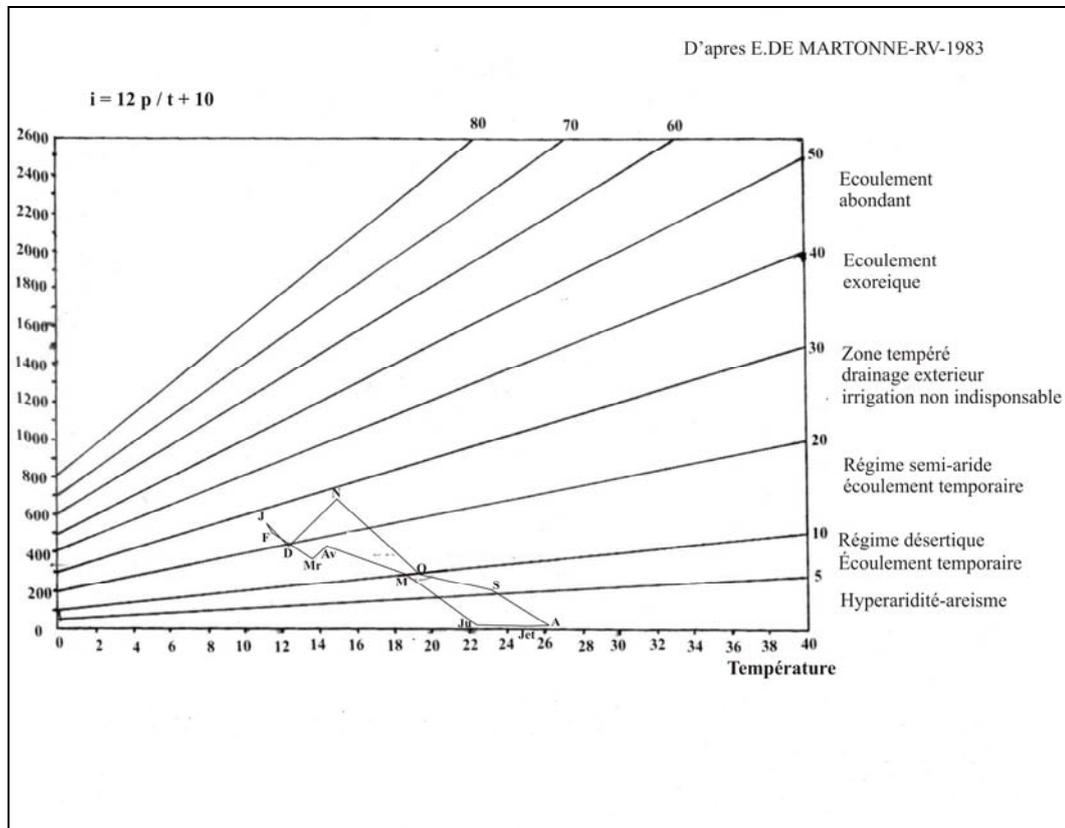


Figure 19 : Indice d'aridité mensuel à la station de Mostaganem (1989-2003).

4.2.3 INDICE CLIMATIQUE DE L. EMBERGER :

Le quotient L. Emberger (Q) est spécifique du climat méditerranéen, il est le plus fréquemment utilisé en Afrique du Nord. Il propose d'utiliser la relation suivante :

$$Q = 1000 \cdot P / (M+m/2) (M - m)$$

P : précipitations moyennes annuelles.

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en °K.

m : moyenne des minima du mois le plus froid en °K.

Les stations sont ensuite reportées sur le climagramme qui comporte en ordonnée Q et en abscisse la moyenne des minima du mois le plus froid en °C. Ce diagramme permet la délimitation de zones ou compartiments régionaux bioclimatiques. Il s'agit également d'unités morpho climatiques et pédologiques (fig. 20).

Notre station admet un **Q = 41.15** avec une température minimale de **m = 5.79 °C**, le régime climatique est semi aride à tendance aride à hiver tempéré.

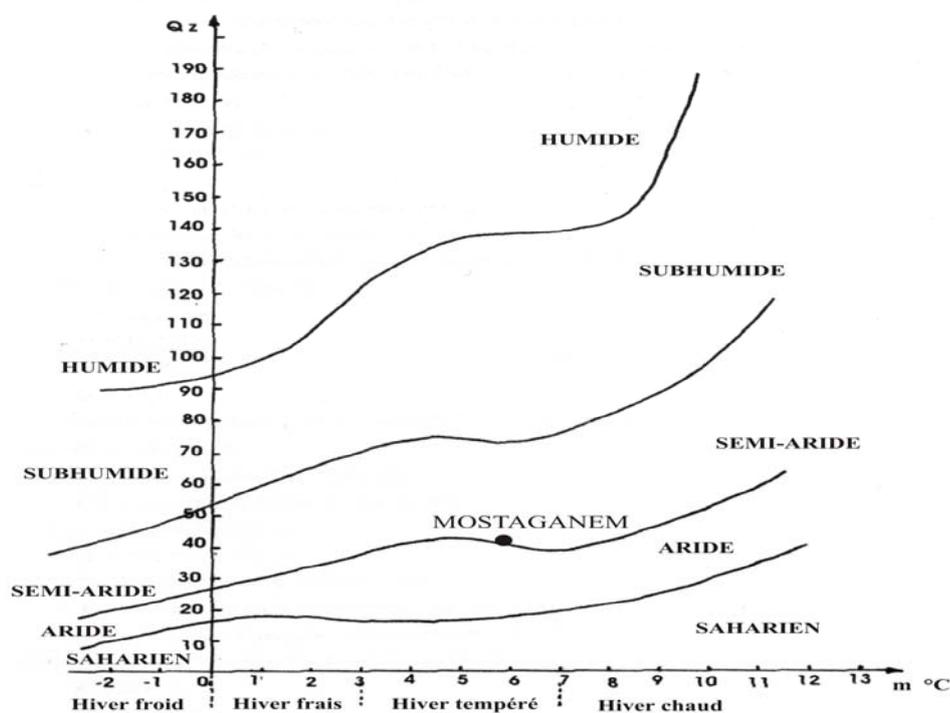


Figure 20 : Climagramme d'après L. Emberger

4.3 CONCLUSION :

Le secteur d'étude se caractérise par un climat méditerranéen semi aride selon les indices de De Martonne, de Stewart et de L. Emberger, avec toutefois à hiver tempéré pour ce dernier.

5. ÉVAPOTRANSPIRATION ET DÉFICIT D'ÉCOULEMENT :

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation du sol et par la transpiration des plantes.

Nous distinguons :

- L'évapotranspiration potentielle (E.T.P) :

Quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant. La valeur limite de l'évapotranspiration potentielle est fonction de l'énergie disponible.

- L'évapotranspiration réelle (E.T.R) :

Réponse, en terme de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'évapotranspiration potentielle, compte tenu de la quantité d'eau disponible.

5.1 EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (méthode de Thornthwaite):

Cette méthode consiste à calculer pour chaque mois une évapotranspiration potentielle. Thornthwaite en 1944, a estimé l'évapotranspiration potentielle par la relation suivante :

$$ETP = 1.6 \times (10 \times t / I)^a$$

En adoptant certaines simplifications, la valeur de « a » est donnée par l'expression :

$$a = 1,6 / 100 \times I + 0.5$$

ETP : évapotranspiration.

t : température moyenne mensuelle en °C du mois considéré.

I : somme de tous les indices mensuelles « i », avec $i = (t / 5)^{1,514}$.

Pour la station de Mostaganem et l'ensemble de la région étudiée nous obtenons les résultats suivants (tableau 15) :

Mois	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	N	D
T°C	11.05	11.49	13.57	14.96	18.51	22.33	25.17	26.25	23.15	19.32	14.89	12.41
i	3.32	3.52	4.53	5.25	7.25	9.63	11.55	12.31	10.17	7.74	5.21	3.96
ETP (mm)	26.3	28.2	38.4	46	68.3	96.7	120.6	130.4	103.3	73.9	45.6	32.6
K	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
ETPc(mm)	22.88	23.97	39.55	50.14	82.64	117	148.33	151.26	106.39	71.68	39.21	27.71

Tableau 15 : Valeurs de l'ETP corrigées d'après la méthode de Thornthwaite.

5.2 EVAPOTRANSPIRATION REELLE :

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle nous avons utilisé plusieurs méthodes de calcul.

5.2.1 METHODE DE L. TURC :

L. Turc a établi une formule permettant de calculer l'évapotranspiration réelle (ETR) par l'expression suivante :

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + (P / L)^2}$$

ETP : évapotranspiration réelle (mm).

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

L : pouvoir évaporant a pour expression $L = 300 + 25 T + 0.05 T^2$.

T : température moyenne annuelle (°C).

Pour la station de Mostaganem (1989-2003).

$$T = 17.75 \text{ °C}$$

$$P = 315.9 \text{ mm}$$

$$L = 1023.36$$

$$\underline{\underline{ETR = 316.64 \text{ mm.}}}$$

5.2.2 METHODE DE COUTAGNE :

L'évapotranspiration réelle ou le déficit d'écoulement est calculée à partir de la relation suivante :

$$D = P - \lambda P^2$$

D : évapotranspiration réelle (m).

P : précipitation moyenne annuelle (m).

$$\lambda = 1 / 0.8 + 0.14 T. \quad \text{Avec} \quad \lambda = 0.3$$

Cette formule n'est applicable que si les précipitations sont comprises entre $1/8 \lambda$ et $1/2 \lambda$, c'est à dire entre **416 mm** et **1666 mm**.

Vu que les précipitations « P » ne vérifient pas l'expression : $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$, la formule de Coutagne citée ci-dessus n'est pas applicable, $P < 1/8 \lambda$: le déficit d'écoulement est égal aux précipitations

$$\underline{\underline{D = 0.3159 \text{ m}}}$$

5.2.3 METHODE DE WUNDT :

Nous obtenons après report direct sur l'abaque de Wundt des précipitations en fonction de la température moyenne, un déficit d'écoulement qu'on peut assimiler à l'ETR de **331.25 mm**, dépassant les précipitations avec un quotient d'écoulement très inférieur à 10% (fig. 21).

5.2.4 : METHODE DE P. VERDEIL :

P. Verdeil a établi en Algérie un abaque pour déterminer le déficit d'écoulement « D » (ou ETR) ; la valeur est obtenue directement d'après l'abaque (fig. 22).

Pour la station de Mostaganem le déficit d'écoulement, **D = 300 mm**.

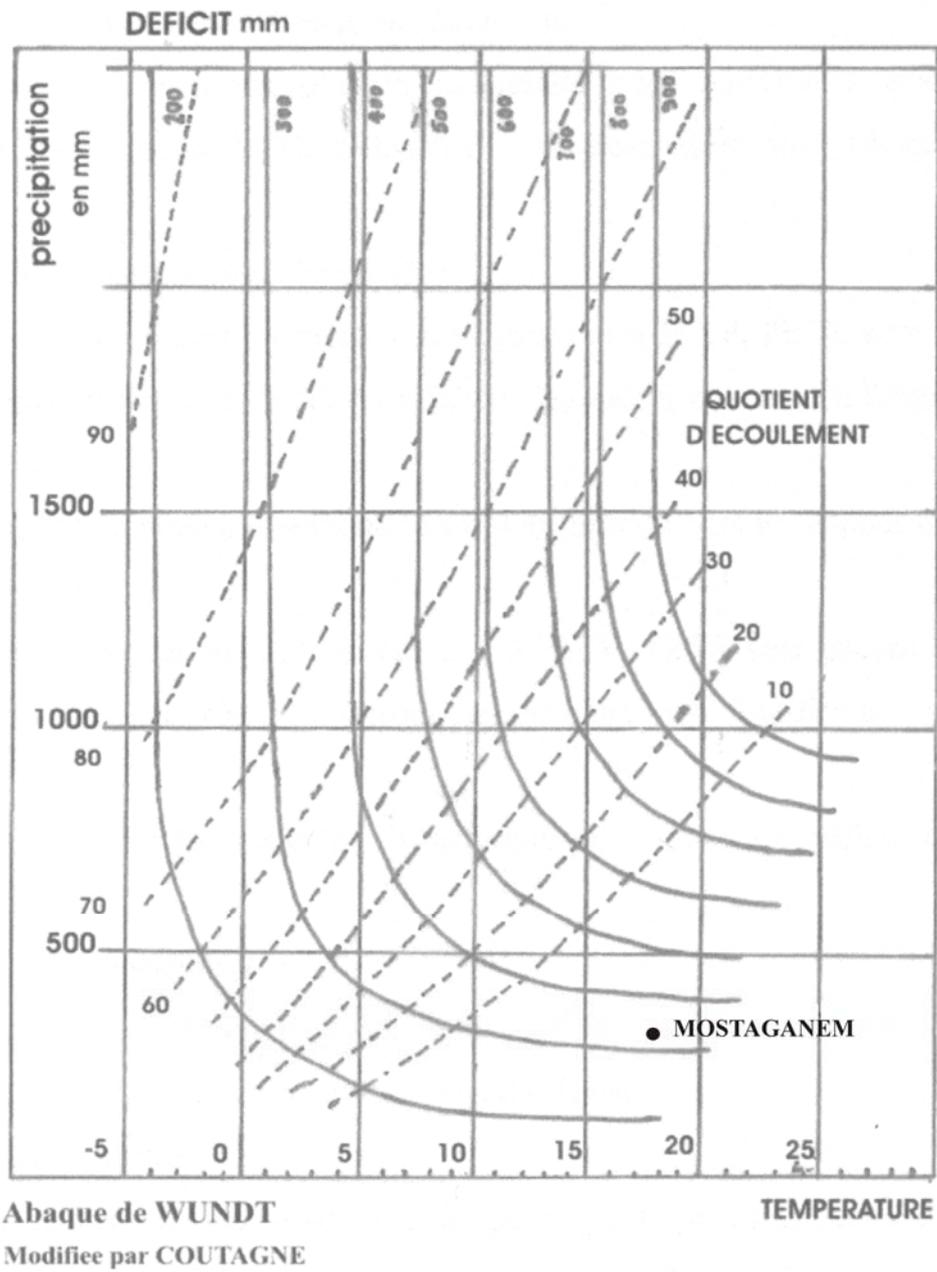
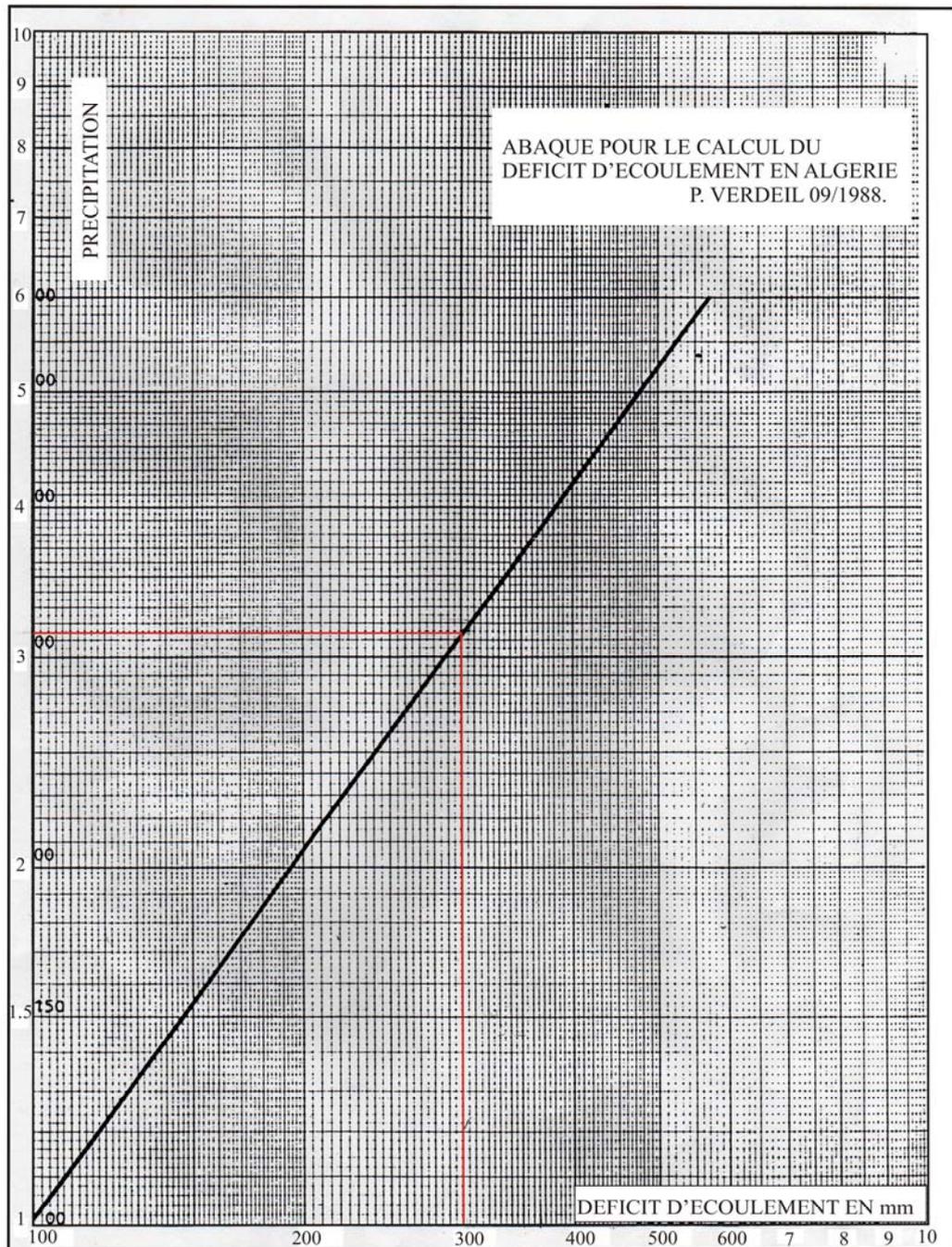


Fig. 21 : Abaque de Wundt



**Figure 22 : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie
P. Verdeil 09/1988.**

5.2.5 MÉTHODE DE THORNTHWAITE (Tabl. 16) :

5.2.5.1 ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE :

Deux cas sont envisageables pour calculer l'évapotranspiration réelle :

- Si les précipitations du mois sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle ($P > ETP$), l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle. L'excédant sera emmagasiné dans le sol dont il augmentera les réserves jusqu'à saturation, au delà, l'eau disponible alimentera soit l'écoulement de surface soit les nappes profondes.
- Si les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle ($P < ETP$), l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle aussi longtemps que les réserves seront en mesure de fournir les quantités d'eau complémentaire. Lorsque la réserve deviendra insuffisante, l'évapotranspiration réelle sera inférieure à l'évapotranspiration potentielle, il y aura déficit.

5.2.5.2 DEFICIT AGRICOLE (D_a) :

C'est la différence entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle.

5.2.5.3 L'EXCEDENT (E_x) :

C'est une quantité d'eau en excès qui ne peut pas être emmagasiné dans la réserve utile et qui va par conséquent alimenter l'écoulement superficiel ou l'infiltration.

5.2.5.4 L'ÉCOULEMENT (E_c) :

Selon Thornthwaite, la moitié de l'excédent s'écoule le mois même, le reste s'infiltré.

5.2.5.5 RESERVE UTILE :

C'est la quantité d'eau du réservoir d'un sol pouvant être plus ou moins facilement utilisée par les racines d'une plante. Pour Hallaire, la réserve utile (RU) peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$RU = C - F / 100 \times h \times D + 30 \text{ mm}$$

RU : capacité de rétention ou réserve d'eau utile.

C : capacité au champ.

F : capacité au point de flétrissement.

h : profondeur du sol en mm.

D : densité apparente du sol = 1.

30 mm : enracinement capillaire.

C – F : 5% pour les sols sableux.

10 – 15% pour les sols limoneux.

15 – 20% pour les sols argilo-limoneux.

Pour le secteur d'étude à sol sableux, C – F = 5%, et en admettant que la profondeur des sols moyenne rencontrée est de 1.5 m, on obtient :

$$RU = 5\% / 100 \times 1500 \times 1 + 30$$

$$\mathbf{RU = 105 \text{ mm}}$$

Pour la station de Mostaganem, le calcul du bilan est donné dans le tableau 16. On constate que l'année hydrologique débute en Novembre où les précipitations deviennent supérieures à l'évapotranspiration potentielle et où les réserves du sol commencent à se reconstituer. L'évapotranspiration réelle serait de 315.9 mm ce qui correspond aux précipitations.

Le déficit agricole est de 564.86 mm allant de Mai à Octobre. La réserve utile se constitue de Novembre à Avril. De ce fait aucun excédant n'est dégagé.

Mois	N	D	J	F	Mr	Av	M	Ju	Jet	A	S	O	Année
Précipitation (mm)	56.4	34.7	45.9	41.4	29.5	35.0	23.8	03.4	01.6	03.0	16.8	24.4	315.9
ETP corrigée	39.21	27.71	22.88	23.97	39.55	50.14	82.64	117	148.33	151.26	106.39	71.68	880.68
Variation réserve	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	
Réserve utile	17.19	24.18	47.2	64.63	54.58	39.44	0	0	0	0	0	0	
ETP réelle	39.21	27.71	22.88	23.97	39.55	50.14	63.24	03.4	01.6	03.0	16.8	24.4	315.9
Déficit agricole	0	0	0	0	0	0	19.4	113.6	146.73	148.26	89.59	47.28	564.86
Excédent	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecoulement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P – ETP	17.19	6.99	23.02	17.43	-10.05	-15.14	-58.84	-113.6	-146.73	-148.26	-89.59	-47.28	

Tableau 16 : Bilan hydrologique selon la méthode Thornthwaite (station de Mostaganem, 1989-2003).

5.2.6 RÉSULTATS DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION :

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle et réelle obtenues par les différentes méthodes sont résumées dans le tableau 17.

Méthodes	ETP (mm)	ETR ou déficit d'écoulement (mm)
Thornthwaite	880.68	315.9
Turc	-	316.64
Coutagne	-	315.9
Wundt	-	331.25
Verdeil	-	300

Tableau 17 : Comparaison des valeurs d'évapotranspiration.

6. RUISSELLEMENT :

En 1961, Tixeront et Berkaloff ont donné une relation permettant le calcul du ruissellement à partir des précipitations moyennes annuelles et de l'évapotranspiration calculée suivant la méthode de Thornthwaite.

$$R = P^3 / 3 \cdot ETP^2$$

R : ruissellement en mètre.

Avec :

P : précipitation en mètre.

$$P = 0.3159 \text{ m}$$

ETP : évapotranspiration potentielle en mètre.

$$ETP = 0.88068 \text{ m}$$

$$\underline{R = 0.01354 \text{ m} = 13.54 \text{ mm, soit 4.28\% des précipitations.}}$$

7. BILAN HYDROLOGIQUE :

L'équation générale du bilan peut s'écrire :

$$P = E + R + I$$

P : précipitations en mm

E : évapotranspiration réelle ou déficit d'écoulement.

R : ruissellement.

I : infiltration.

7.1 BILAN HYDROLOGIQUE SELON THORNTHWAITE :

En appliquant la méthode de Thornthwaite l'évapotranspiration réelle au niveau de la station de Mostaganem est de 315.9 mm ce qui correspond exactement aux précipitations. Par conséquent l'infiltration est égale à 0 (**I = 0 mm**) ; aucun excédent n'est cependant dégagé et encore moins de ruissellement.

7.2 METHODE RATIONNELLE :

- La lame d'eau infiltrée selon la méthode de Turc :

$$I = P - (E + R) \quad I = 315.9 - (316.64 + 13.54) \quad \underline{I < 0}$$

Donc la méthode est inapplicable.

- la lame d'eau infiltrée selon la méthode de Coutagne :

$$I = 315.9 - (315.9 + 13.54) \quad \underline{I < 0}$$

Donc la méthode est inapplicable.

- la lame d'eau infiltrée selon la méthode de Wundt :

$$I = 315.9 - (331.25 + 13.54) \quad \underline{I < 0}$$

Donc la méthode est inapplicable.

- la lame d'eau infiltrée selon P. Verdeil :

$$I = 315.9 - (300 + 13.54)$$

$$\underline{I = 2.35 \text{ mm}}, \text{ soit } 0.74\% \text{ des précipitations.}$$

Le calcul de l'infiltration à partir du déficit d'écoulement estimé par la méthode de P.Verdeil donne un résultat satisfaisant du fait que l'abaque utilisé a été établi en 1988 pour l'Algérie. Théoriquement la valeur obtenue est fiable.

8. CONCLUSION :

Le climat de la région étudiée est caractérisé par un climat méditerranéen semi aride avec un hiver tempéré et un été chaud. Les précipitations à l'échelle de toute la région de Mostaganem ont été estimées entre 400 et 500 mm d'après la carte des précipitations de

l'I.N.C. pour la période 1969/72. Cette valeur a baissé à 315.9 mm pour la période 1989-2003 avec une température estimée à 17.75 °C à la station climatologique de Mostaganem.

L'utilisation des différentes méthodes pour le calcul du bilan donne des valeurs d'évapotranspirations ou déficits d'écoulements soit égales ou supérieures aux précipitations. Seule la méthode de P. Verdeil, se basant sur la lecture directe sur l'abaque établi pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie, donne un déficit inférieur aux précipitations. La valeur de l'infiltration est assez faible et estimée à 2,35 mm, soit 0.74% des précipitations.

CHAPITRE III

Géologie

1. INTRODUCTION :

Le bassin du bas Chélif dans lequel s'insère la région de Bel Hachel (Sud-Est du plateau de Mostaganem), qui fait l'objet de ce travail, et à l'instar des autres bassins du Nord-Ouest Algérien, a été l'objet de plusieurs conquêtes géologiques. Ainsi et à partir de l'année 1830 on assiste à des grandes explorations et reconnaissances de terrains et de ce fait les premières précisions stratigraphiques commencent déjà à se dessiner. Au début du 19^{ème} siècle jusqu'à 1950, on assiste à une période marquée surtout par les publications de cartes géologiques au 1/50 000e couvrant la région de bas Chélif réalisées par A. BRIVES, F. DOUMERGUE et M. DALLONI (1936), et une autre carte géologique au 1/200 000e établie en 1936 par R.V. ANDERSON couvre la région de Mostaganem. A partir des années 50, A. PERRODON contribua le plus à l'étude de ce bassin (stratigraphie, sédimentologie, structurale et paléogéographie). Par la suite, dans les années 1970-80, d'autres études ont été réalisées pour le compte de la SONATRACH par N. KAZI TANI qui entreprend en 1972 ses premières prospections pétrolières sur le bassin néogène du Chélif. Enfin, une autre réalisée par G. THOMAS en 1985 dont il a apporté de nombreuses précisions sur la stratigraphie et la néotectonique du Quaternaire de l'Oranie.

2. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET APERCU STRUCTURAL GÉNÉRAL :

Le secteur d'étude se rattache à un ensemble plus vaste : Le bassin du bas Chélif qui fait partie intégrante des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie. Il se présente sous la forme d'une vaste dépression (200 x 600 Km : ROUCHY, 1982) et orienté Est-nord-est / Ouest-sud-ouest. Il est limité au Nord par la partie occidentale de la chaîne côtière du Dahra, le Golfe et le massif d'Arzew. Au sud, il est bordé par l'extrémité occidentale des Monts de Tessala, l'Ouarsenis et des Beni-Chougranne (fig. 23).

D'après DELFAUD et al, 1973, le bassin du bas Chélif se positionne dans le sillon médian (fig. 24). Il s'agit d'un bassin intramontagneux, synorogénique lié aux phases paroxysmales de l'orogénèse Alpine (A. PERRONDON, 1957) dont il définit aussi deux ensembles distincts (figure 25) :

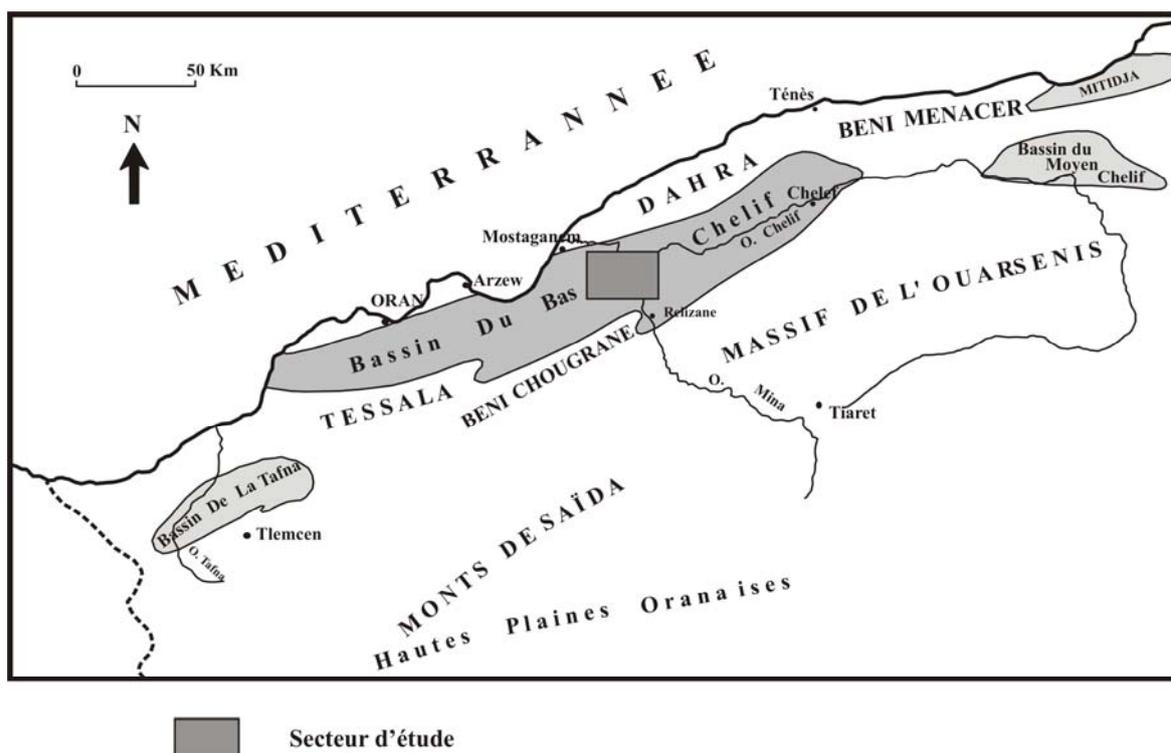


Figure 23 : Situation géographique du bassin du bas Chélif (d'après Perrodon, 1957).

2.1 PARTIE OCCIDENTALE :

Limitée au Nord-Ouest par l'alignement des Horsts du littoral Oranais, cette partie a joué un grand rôle dans la paléogéographie du Miocène. Elle est fortement marquée par un substratum rigide engendrant une tectonique cassante.

2.2 PARTIE ORIENTALE :

Limitée par le Massif du Dahra et de l'Ouarsenis, elle constitue un étroit sillon subsident, dont la majeure partie est occupée par un ensemble de formations plissées donnant plusieurs structures anticlinales.

Ces structures situées le long de la bordure du Dahra, du Plateau Mostaganem jusqu'à celle des Beni-Chougrane et du Tessala, suivent une direction N 50° Est (Nord-Est/Sud-Ouest). Entourées à leur tour par des aires plus stables comme l'Ouarsenis au Sud-Est et le Plateau de Mostaganem et Oran au Nord.

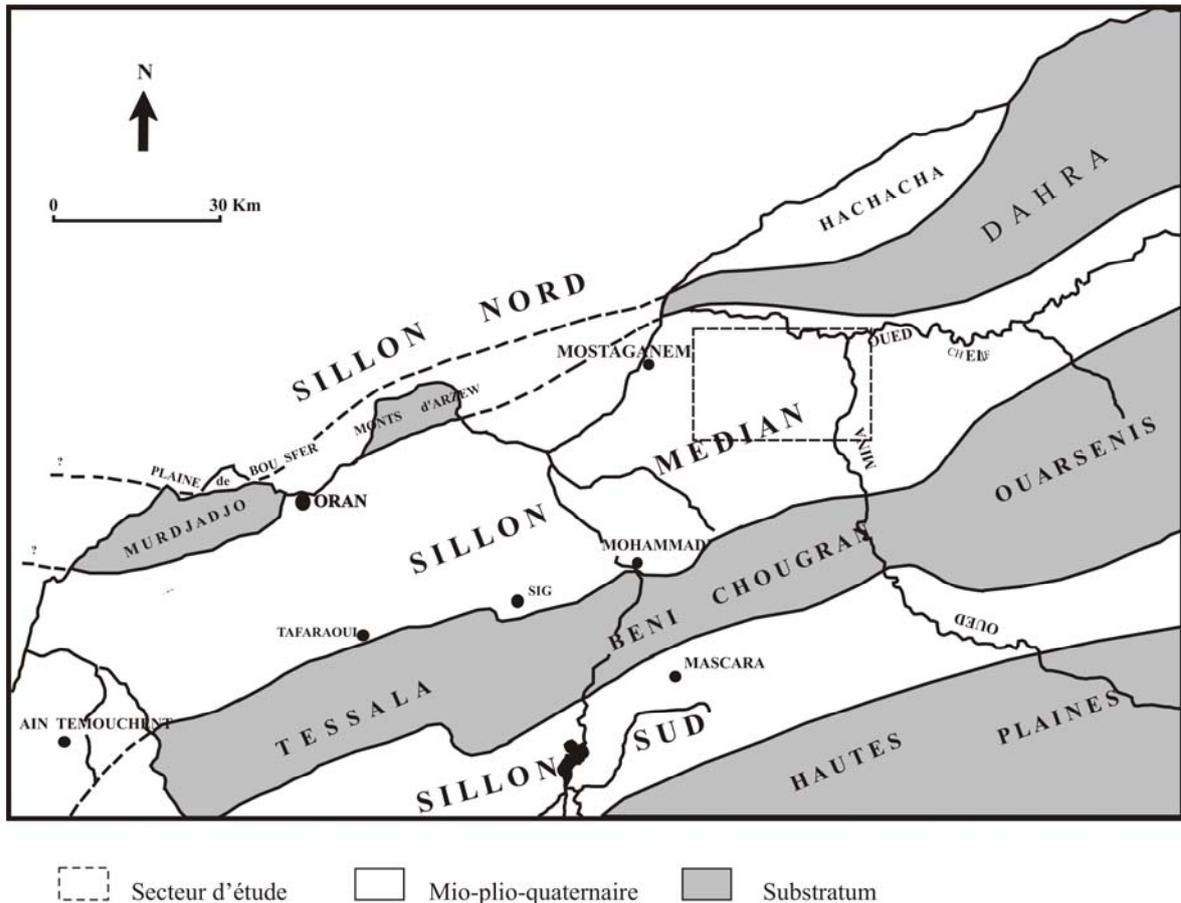


Figure 24 : Structure générale du bassin du bas Chélif (d'après Delfaud et al, 1973).

La tectonique dans le bas Chélif s'exprime principalement par des accidents de direction $N50^{\circ}-70^{\circ}$ et se superpose à l'alignement des grandes structures paléogéographiques. Cependant, deux autres directions importantes existent (fig. 26) :

- **Direction $N10-30^{\circ}E$** : Mise en évidence par, B.FENET, 1975 dans les Massifs Littoraux Oranais au cours du Miocène. Elle correspond à de grands décrochements transverses à jeu sénestre (G.THOMAS 1985).
- **Direction $N140^{\circ}E$** : Correspond à des failles à décrochement dextre associées à des structures plissées.

D'après G.THOMAS, 1985, ce bassin est très subsident où les sédiments peuvent atteindre une épaisseur d'environ 6000 m dans la zone axiale. Les dépôts miocènes et pliocènes y sont bien représentés.

3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL :

J.GAUCHEZ, 1981 a subdivisé les formations géologiques affleurant dans la région de Mostaganem en deux types de formation :

- Formations allochtones anté-Miocène.
- Formations autochtones Miocène et post-Miocène.

3.1 LES FORMATIONS ALLOCHTONES :

Ce sont les terrains les plus anciens. Il y a deux types de formations allochtones :

- Diapirs.
- Nappes de charriage.

3.1.1 LE DIAPIRISME :

Il se manifeste à l'Est d'Aïn Nouissy où affleure un diapir de gypse traversé par des roches volcaniques du Djebel Chegga. Ce diapir est situé sur la transversale Nord 50°W mis en évidence par L. GLANGEAUD avec les diapirs du Djebel Milar et du Djebel Rhirane.

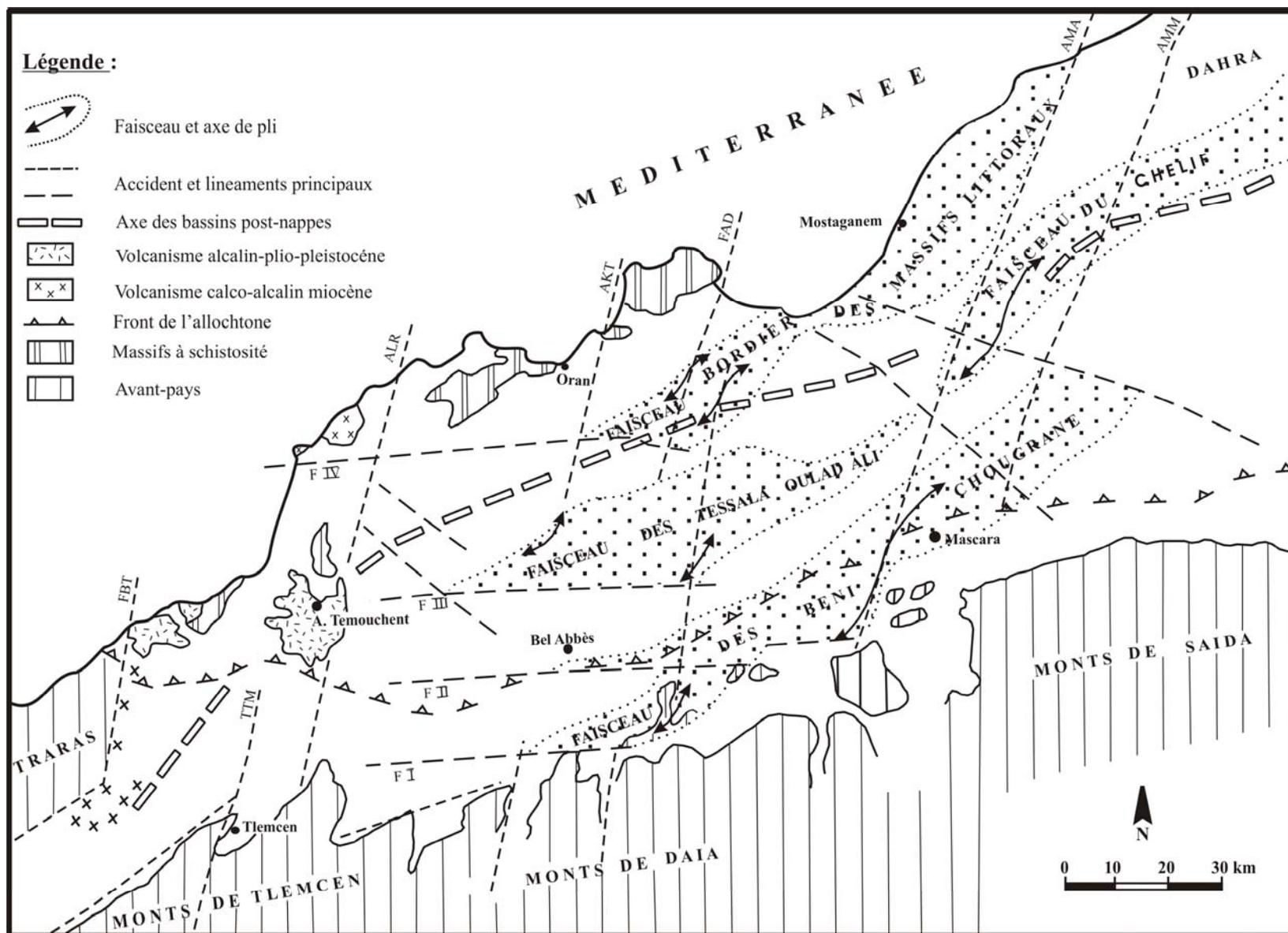


Figure 26 : La trame structurale du bassin du bas Chélif occidental (d'après G. Thomas, 1985).

3.1.2 LES NAPPES DE CHARRIAGES :

Au Nord de Mostaganem (Karouba et Djebel Diss) et la vallée de Chélif apparaît tout un ensemble de terrain appartenant aux nappes et qui sont les suivants :

- Argiles et grès numidien : Constitué par des bancs argilo-marneux gris noirs alternant avec des bancs de grès à ciment siliceux. Toute cette formation constitue le Djebel Diss (Aïn Bou Dinar) et le Djebel Bahara (Sidi Ali).

- Marnes et Marno-calcaires : Ces marnes grises renferment des niveaux plus calcaires, de couleur clair.

- Gypse du Trias : Il renferme des ophites, de la dolomie noire fétide, des marnes vertes ou roses, des cristaux de dolomites, de muscovite et de pyrite. D'autres affleurements le long de la côte entre Karouba et l'ancien centre de vol à voile ont été signalés par J.DELTEIL en 1971. Cependant, J. GAUCHEZ, a découvert, pour sa part, trois affleurements de ce gypse.

- Le flyche vert : Il est constitué de petits bancs de calcaire ferrugineux avec pélites vert sombre et beaucoup de grès quartziques à patine rouille et à cassure en éclats de couleur gris-vert très claire.

- Le flyche violacé (Albien) : Il comporte des pélites bleues- claires avec des petits bancs de calcaires ferrugineux.

3.2 LES FORMATIONS AUTOCHTONES (MIOCÈNE ET PLIOCENE):

L'étude du Miocène du bassin du bas Chélif intéresse beaucoup d'auteurs. La majorité de ces derniers ont subdivisé le Miocène en deux cycles sédimentaires (tableau 18).

Selon les travaux de A. PERRODON (1957) dans le contexte d'une synthèse générale du bassin du bas Chélif, on peut subdiviser l'ensemble des formations en deux grands cycles sédimentaires : le Miocène et le Pliocène, ainsi que le cycle Quaternaire qui est leur prolongement immédiat (fig. 27).

A. PERRODON, 1957		J.DELFAUD ET ALL 1975	B. FENET, 1975		G. THOMAS, 1985			LOG SYNTHETIQUE						
Vill. Récent= Thyrennien	Couches à Strombus bubonius		Pléistocène moyen et supérieur		Holocène	Lunettes éoliennes sables éolien Limons gris			Limons gris					
Vill. Intermédiaire					Pléistocène supérieur	Pléistocène moyen	G	IV	Formation d'oued Oggaz(Soltanien)	Terrasses limoneuses rouges + dalles				
Villafran-chien	Formations rouges		Calabrien-Villafran-chien	4 Cycle M4	Formations dunaires et formations rouges continentales	Pléistocène inférieur		B	Formation de la Mekerra	Limons et conglomérats rouges				
Calabrien	Grès et Lumachelles Conglo-limoneux				Lumachelles + dalles calcaires	Calabrien	P II	A	Formation Mettmoura-golfe d'Arzew	Grès lumachéliques et sables dunaires				
Pliocène continental	Astien: grés marin Plaisancien: marnes	Astien	Plaisancien	3 Cycle M3	Formations détritiques	Tabianien			P I A.B	Formation du bas-Chélif	Grés			
Pliocène marin					Formations marneuses		Messinien	D			F. Évaporitiques	Marnes bleues Conglomérats et sables Evaporites		
Miocène supérieur (Vindobonien)	Formations terminales	Méga Séquence 2	Messinien	2 Cycle post nappe M2	Calcaire messinien	Tortonien II	2 Cycle M III	C	Formations du Murdjadjo	Calcaires Tripolis				
Miocène inférieur	Formations médianes				Messinien marneux			Tortonien I	Grés de base	Serravalien	1 Cycle M II	B	F. des marnes bleues médianes	Marnes bleues
	Formations de base				Formations rouges continentales de Tafaroui							Langhien	A	F. Grés roux
Miocène inférieur	Continental: Conglomérats Marin: Marnes grises	Tortonien	1 cycle M1	Série de Mers-El kabir et O.Hammedj				F. de Bouhanifia Tafaraoui F. de Debbi	Marnes pélagique					
Miocène inférieur		Mégaséquence 1	Miocène anté ou synchro nappe			Miocène anté ou synchro nappe M1			Schistes Marno-schistes					

Tableau 18 : Nomenclature des termes utilisés dans le découpage du Néogène de l'Oranie (in M.I. Hassani, 1987).

Ères	Séries	Étages	Lithologies		Épaisseur
			Sud-Ouest	Nord-Est	
QUATERNAIRE	Holocène	Pleistocène à Holocène	Dunes		50 à 70 m
			Pleistocène	Continental	
	Villafranchien II	Sables et argiles (couche rouge)			100 m
	Calabrien	Grès à Grès calcaire, lumachelique			20 à 30 m
TERTIAIRE	Pliocène	Pliocène continental	Grès et limons à Helix	Lacune stratigraphique	100 m
		Astien	Grès marins		100 m
		Plaisancien	Marnes bleues avec grès de base		400 à 500 m
	Miocène	Miocène supérieur	Gypses et argiles		50 à 300 m
			Tripolis et marno-argiles à Tripolis, Cinérites et biotites		50 à 200 m
			Marnes bleues avec intercalation des niveaux lenticulaires des grès argileux.		600 à 800 m

Figure 27 : Découpage lithostratigraphique des séries géologiques du Bassin du Bas Chélif (d'après A. Perrondon, 1957).

3.2.1 MIOCÈNE :

3.2.1.1 MIOCÈNE INFÉRIEUR :

Caractérisé par des dépôts continentaux gréseux (bordure orientale du Dj. Diss et Oued Bou Kramel), ensuite par des faciès détritiques saumâtres, fluviaux ou subcontinentaux. Les dépôts continentaux sont caractérisés par des niveaux rouges, et subcontinentaux par les marnes à gravelles et à gypse. Le tout, surmonté par les dépôts marins profonds représentés par des marnes brunes (Est du Djebel Aizeub, Est du Djebel Diss et

Oulad Bou Kramel). Après une régression importante de la mer vient se déposer un conglomérat à galets d'argile et de grès.

3.2.1.2 MIOCÈNE SUPERIEUR :

Il est marqué par une transgression marine. Le dépôt des marnes bleues à gypse fer de lance est affecté par un volcanisme intermittent responsable de la formation des cinérites présente dans toute la région de Mostaganem. Après la régression de la mer, il se dépose des évaporites. Ce niveau est attribué au Miocène supérieur qui constitue la limite approximative Miocène supérieur Pliocène inférieur.

3.2.2 PLIOCÈNE :

Il est représenté, au début, par le même cycle sédimentaire que celui du Miocène supérieur et traduit par des faciès identiques : Marnes bleues. Le cycle Pliocène est, cependant, interrompu par le retrait progressif de la mer avec une reprise simultanée de l'érosion qui entraîne une sédimentation détritique représentée par les Grès marins de l'Astien. Cette formation perméable représente un intérêt hydrogéologique important, elle est représentée par une série marine sableuse de couleur jaune renfermant des grès peu argileux à ciment calcaire. Surmonté ensuite par des dépôts fluviatiles et lacustres du Pliocène continental (sable grossier et graviers avec des passées conglomératiques).

3.2.3 QUATERNAIRE :

Cette formation débute par des micropoudingues, formés par des graviers et de grès quartzueux rouges ou verts et de ciment calcaire, surmontés par des grès grossiers et vacuolaire du Calabrien qui se termine par des lumachelles, ils sont présents sur toute la superficie du Plateau de Mostaganem. C'est le niveau aquifère le plus perméable. Ensuite, vient les grès à Hélix, dunes consolidées et sols rouges en alternance du Villafranchien. Le tout coiffé par des terrains récents constitués par une carapace calcaréo-gréseuse, des dunes de sables et des sables limoneux ainsi que du tuf.

4. CADRE GÉOLOGIQUE ET MORPHOSTRUCTURAL DE LA ZONE D'ÉTUDE : (fig. 28)

En général, la région d'étude est marquée par une succession de plis dissymétriques accompagnés d'accidents. Ces structures sont orientées, en majeure partie, Sud-Ouest / Nord-

Est où affleure, à la surface, un Mio-pliocène situé le plus souvent sur les flancs des anticlinaux tandis que le Quaternaire se trouve en général au centre des synclinaux.

4.1 LITHOSTRATIGRAPHIE :

4.1.1 MIOCÈNE SUPÉRIEUR :

Il est représenté par des marnes bleues avec quelques fines passées calcaires, cinéritiques et gréseuses. Il affleure au cœur des structures de l'Akboube et de Bouguirat. Le forage réalisé au niveau de l'anticlinal de Bouguirat n°8 (S.N.REPAL) a traversé les marnes bleues d'une puissance de près de 800 m.

Ces marnes sont surmontées par des Tripolis et argiles à tripolis. Cette formation est représentée par des alternances de couches de tripolis blancs et de marnes bleues, de cinérites et de calcaires siliceux. Elle affleure sur les flancs des structures de Bouguirat et de l'Akboube. D'après les nombreux forages réalisés dans la région, l'épaisseur de cette formation varie de 60 à 200 m et elle a tendance à croître du Nord-Ouest au Sud-Est.

Au sommet des tripolis, les couches passent progressivement au gypse et des marnes grises. Cette formation est bien visible sur le flanc Nord-Ouest de l'anticlinal de Bouguirat. Les forages de Djebel Milar, Lalla-Okba, Berercha, Bsibissa et de la Montagne de Bel Hacel ont traversés cette formation sur une épaisseur allant de 100 à 300 m. D'après A. PERRODON (1957), la couche gypseuse s'étend sur toute la région d'étude et elle forme un horizon repère excellent.

4.1.2 PLIOCÈNE :

Le Pliocène débute par un Plaisancien marneux de couleur bleue. Trois anciens sondages réalisés dans l'anticlinal de Bel Hacel dont le cœur est formé par les Marnes Bleues ont montré que l'épaisseur de cette formation était de 500 m. environ. Il est complètement érodé vers le Sud-Ouest de la forêt domaniale de l'Akboube.

Ces marnes passent progressivement à une série marine sableuse ou gréseuse de couleur jaune d'âge Astien. Cette formation a été traversée par les forages l'Hillil n° 1 et 2 (S.N.REPAL) dans la plaine de la Mina sur une épaisseur de 30 m. Dans la région de Bel Hacel les Grés Astien débute par un niveau fossilifère, lumachelique. C'est des Grés calcaires

jaunes, avec une épaisseur de 100 m. Ils sont aussi développés dans la région méridionale du synclinal de Bouguirat.

Des intercalations de calcaires lacustres et l'apparition des moules internes d'Helix dans ces grés forment le passage au Pliocène continental représenté par des limons gris alternant avec des grés et des calcaires lacustres. Ce Pliocène est représenté surtout sur le flanc oriental de la Montagne de Bel Hael.

4.1.3 QUATERNAIRE :

Au Nord-Ouest de la Montagne de Bel Hael on observe en discordance sur les terrains sous-jacents, une formation lumachelique débutant souvent par un cordon de galets surmonté par des grés calcaires. Ces niveaux transgressifs dont l'épaisseur varie de 15 à 20 m sont donc attribués au Calabrien. Cette formation est présente sur toute la région d'étude sauf au Nord-Est de la vallée de la soif (fig. 31). Le tout surmonté par un Villafranchien caractérisé par des dépôts d'argiles ou de calcaire lacustre de couleur grise, de sables et d'argiles roux ou brunes. Le Villafranchien est en contact tantôt avec le Pliocène continental tantôt avec le Calabrien (fig. 29).

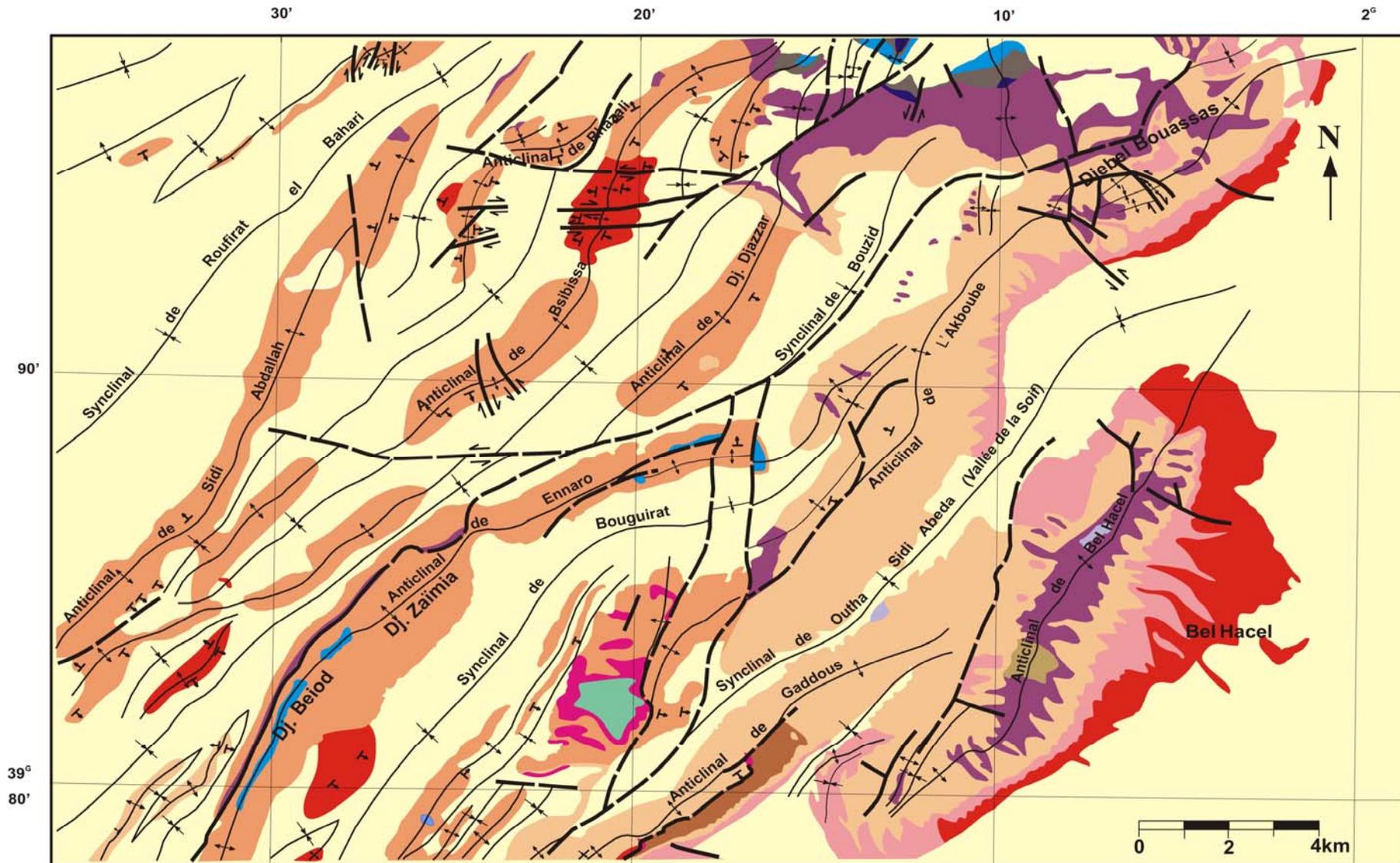


Figure 28 : Carte géologique et structurale de la région de Bel Hacer (SONATRACH : Division hydrocarbures, direction exploration).

Légende:

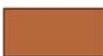
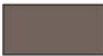
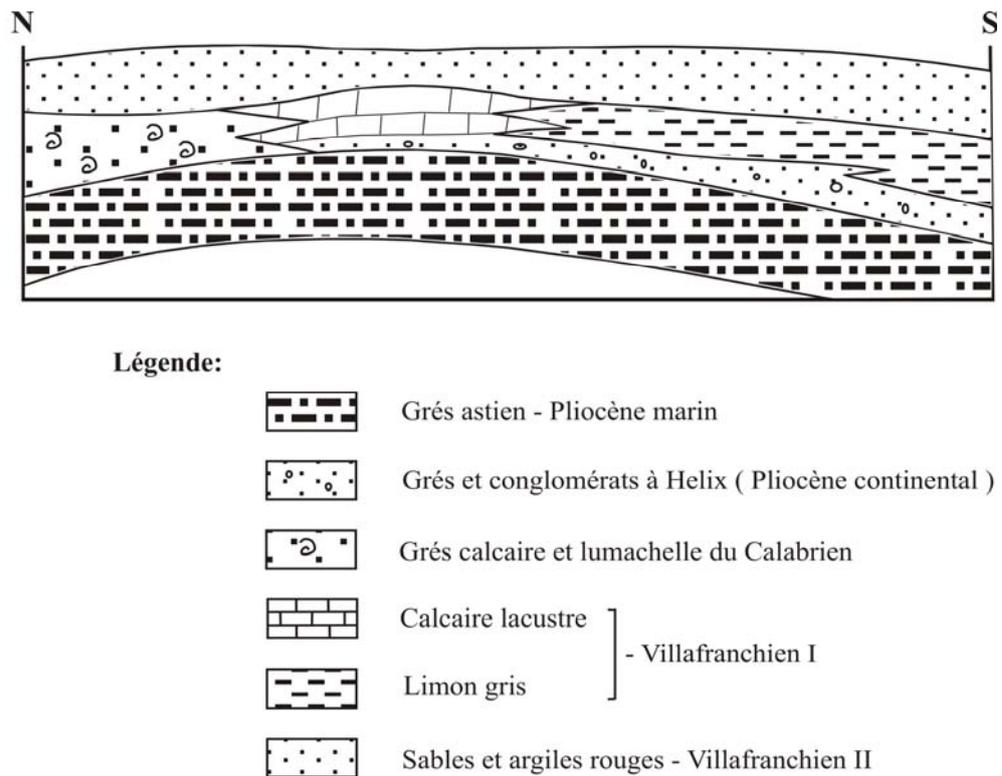
	Alluvions indifférenciés et sables du Quaternaire.		Marnes à tripoli du Miocène supérieur.
	Glissement		Marnes bleues à niveaux de cinérites du miocène moyen.
	Série continentale rouge, post villafranchien.		Alluvions indifférenciés et sable du quaternaire ou Marnes du Plaisancien.
	Calcaire gréseux,conglomérats,carapace calcaire pré villafranchien(Calabrien).		Alluvions indifférenciés et sable du Quaternaire ou Marnes bleues à niveaux de cinérites.
	Grés et limons continentaux à Helix (Astien).		Failles
	Grés et marnes (Astien).		Failles supposées
	Séries gréseuses Astien-Plaisancien		Axe d'Anticlinal
	Marnes du Plaisancien		Axe de synclinal
	Grés, gypse bréchique, rare du Plaisancien		
	Marnes et gypse du Miocène supérieur		

Figure 28 : Carte géologique et structurale de la région de Bel Hael (SONATRACH : Division hydrocarbures, direction exploration).



**Figure 29 : Schéma stratigraphique du Pleistocène de Bel Hachel
(D'après A. Perrodon, 1957).**

4.2 CADRE STRUCTURAL :

Faisant partie de Bassin du bas Chélif, le Néogène de la région de Bel Hachel , nous montre plusieurs structures de plis parallèles, marquées en général par des reliefs allongés en directions Nord-Est / Sud-Ouest. La morphologie engendrée par la dernière phase tectonique, de la région d'étude, est structurée du Nord-Ouest au Sud-Est par les ensembles suivants : l'Anticlinal d'Ennaro, Synclinal de Bouguirat, l'Anticlinal de l'Akboube, synclinal de la vallée de la soif et enfin par l'Anticlinal de la Montagne de Bel Hachel.

L'anticlinal d'Ennaro est un pli dissymétrique dans sa partie Sud-Ouest où le flanc Sud-Est plonge d'une dizaine de degrés et celui du Nord-Ouest d'une trentaine. Il est cependant affecté d'une faille importante dans sa partie Nord-Ouest où son flanc Nord-Ouest plonge à la verticale.

Le synclinal de Bougirat est parallèle à l'anticlinal d'Ennaro et caractérisé par des couches de plus en plus récentes (du Nord-Est au Sud-Ouest) allant du Miocène supérieur à l'Astien affleurant sous les alluvions (fig. 30).

La structure de l'Akboube est un large anticlinal très aplati limité au Nord-Ouest par une faille importante qui longe presque la totalité de la largeur du secteur d'étude. Ses flancs sont marqués par des flexures qui peuvent dresser le Calabrien à la verticale.

Orienté du Sud-Ouest au Nord-Est, le synclinal de la Vallée de la Soif est bordé à l'Ouest par l'anticlinal de l'Akboube et à l'Est par l'anticlinal de la Montagne de Bel Hacer. Dans sa partie septentrionale l'axe de ce synclinal est incliné vers le Nord-Est et il plonge sous les alluvions de la Plaine de la Mina (fig. 31).

L'anticlinal de la Montagne de Bel Hacer est un relief qui borde la Plaine de Chéelif, se présente sous forme d'un pli simple légèrement dissymétrique. Son flanc Nord-ouest plonge plus fort que le flanc Sud-Est.

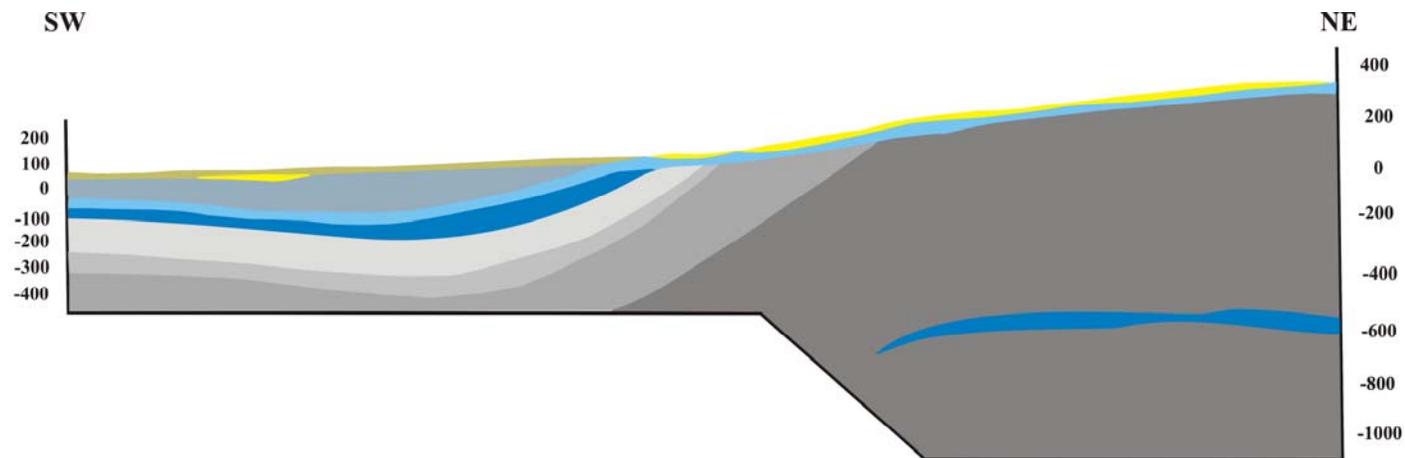
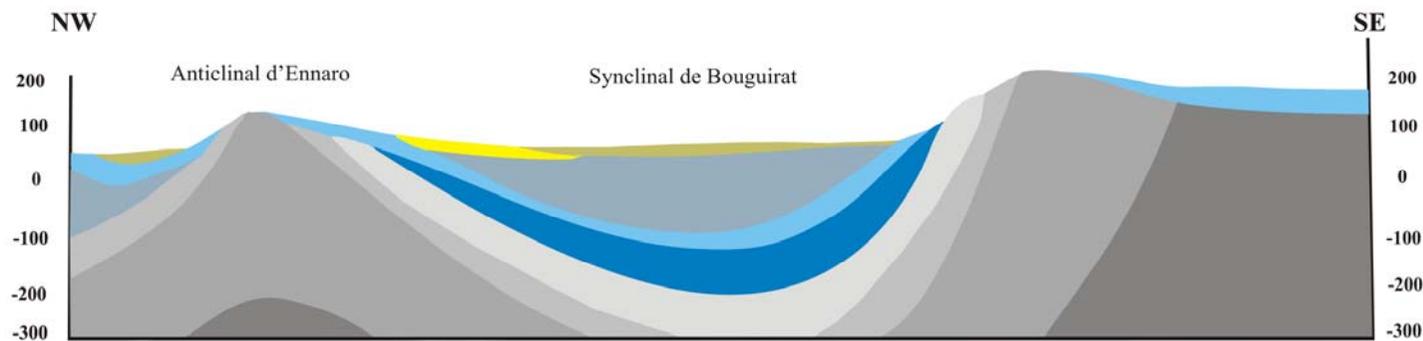
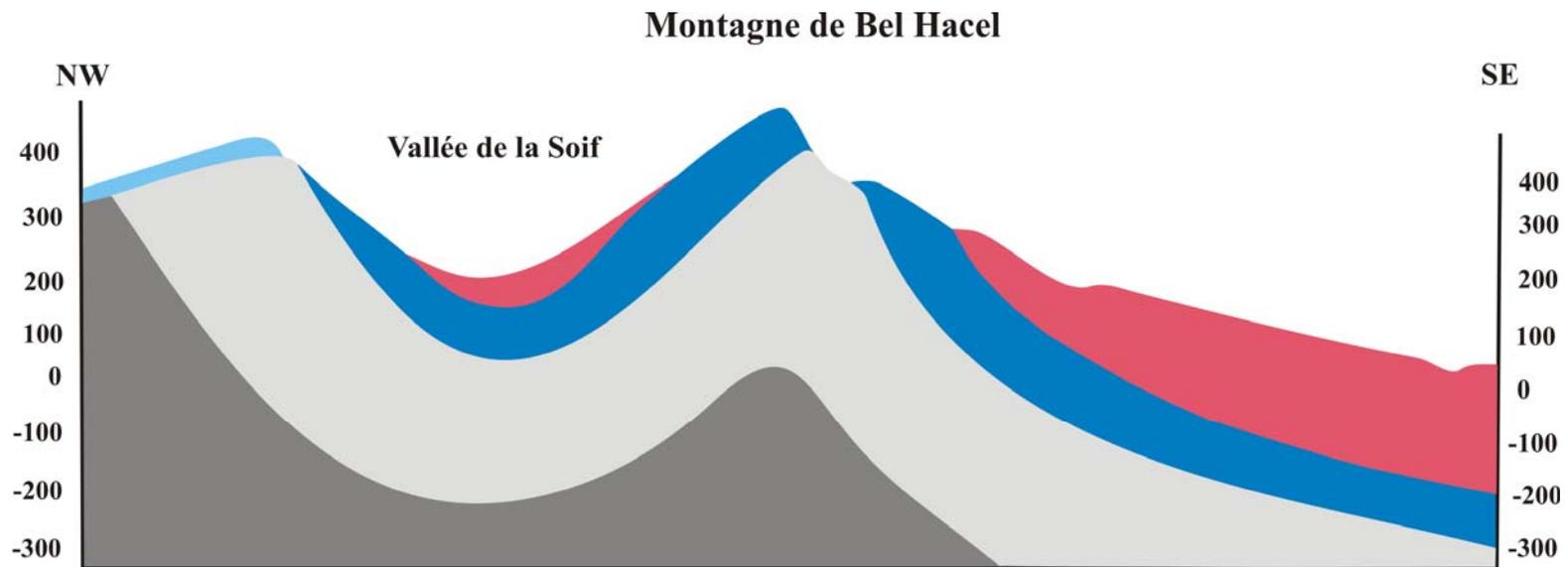


Fig. 30 : Coupes géologiques du synclinal de Bouguirat (d'après Perrodon, 1957).



Légende:

- | | | |
|--|---|--|
|  Alluvions récents |  Sables Calabrien |  Miocène supérieur, gypse et marnes gypseuses |
|  Sables quelquefois dunaire |  Astien, grès |  Miocène supérieur, marnes à tripoli |
|  Quaternaire récents |  Pliocène, plaisancien, marnes |  Miocène supérieur, marnes bleues |



Légende:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Pliocène supérieur continental et Villafranchien sables et argiles rouges Sables calabrien Astien, grés | <ul style="list-style-type: none"> Pliocène plaisancien, marnes Miocène supérieur, marnes bleues |
|---|---|

Figure 31 : Coupe géologique dans la Montagne de Bel Hael (d'après A. Perrodon, 1957).

5. ÉVOLUTION DES ÉPAISSEURS DES FORMATIONS :

Nous disposons des données de 09 forages hydrauliques réalisés dans notre secteur (figure 32), à partir desquels, nous avons essayé d'établir des corrélations entre les différentes formations géologiques rencontrées. Grâce à ces forages répartis à travers la zone d'étude, nous avons pu suivre en profondeur la variation latérale des épaisseurs de ces formations tout en se basant sur le Plaisancien marneux ; formation considérée en hydrogéologie comme écran imperméable, sur le Pliocène supérieur et sur le Quaternaire ; considérés tous les deux comme complexe aquifère (cf. Chap IV). Notons que les corrélations ont été établies tantôt par un découpage réalisé par l'ANRH tantôt par une subdivision réalisée par nous même, en se basant surtout sur l'aspect lithologique des formations, sur la carte géologique et sur les coupes réalisées par A. PERRONDON (1957) au niveau du synclinal de Bouguirat (fig. 30) et au niveau de la Montagne de Bel Hael (fig. 31).

5.1 FORAGES :

5.1.1 FORAGE SOUR KELMITOU (F1) (x = 289 ; y = 300) :

Dans cette zone le substratum n'a pas été atteint et nous rencontrons de bas en haut les formations suivantes :

- Calcaire lumachellique du Calabrien (11 m).
- Grés friable (8 m).
- Sables fins blanchâtres (3 m).
- Grés à ciment calcaire (4 m).
- Sables avec quelques passages argileux (7 m).
- Grés blanchâtres à ciment calcaire (6 m).
- Terre végétale (1 m).

5.1.2 FORAGE AIN SOLTANE (F2) (x = 293 ; y = 295.5) :

Au niveau de ce forage la série débute par :

- Sables fins jaunâtres du Pliocène supérieur (12 m).

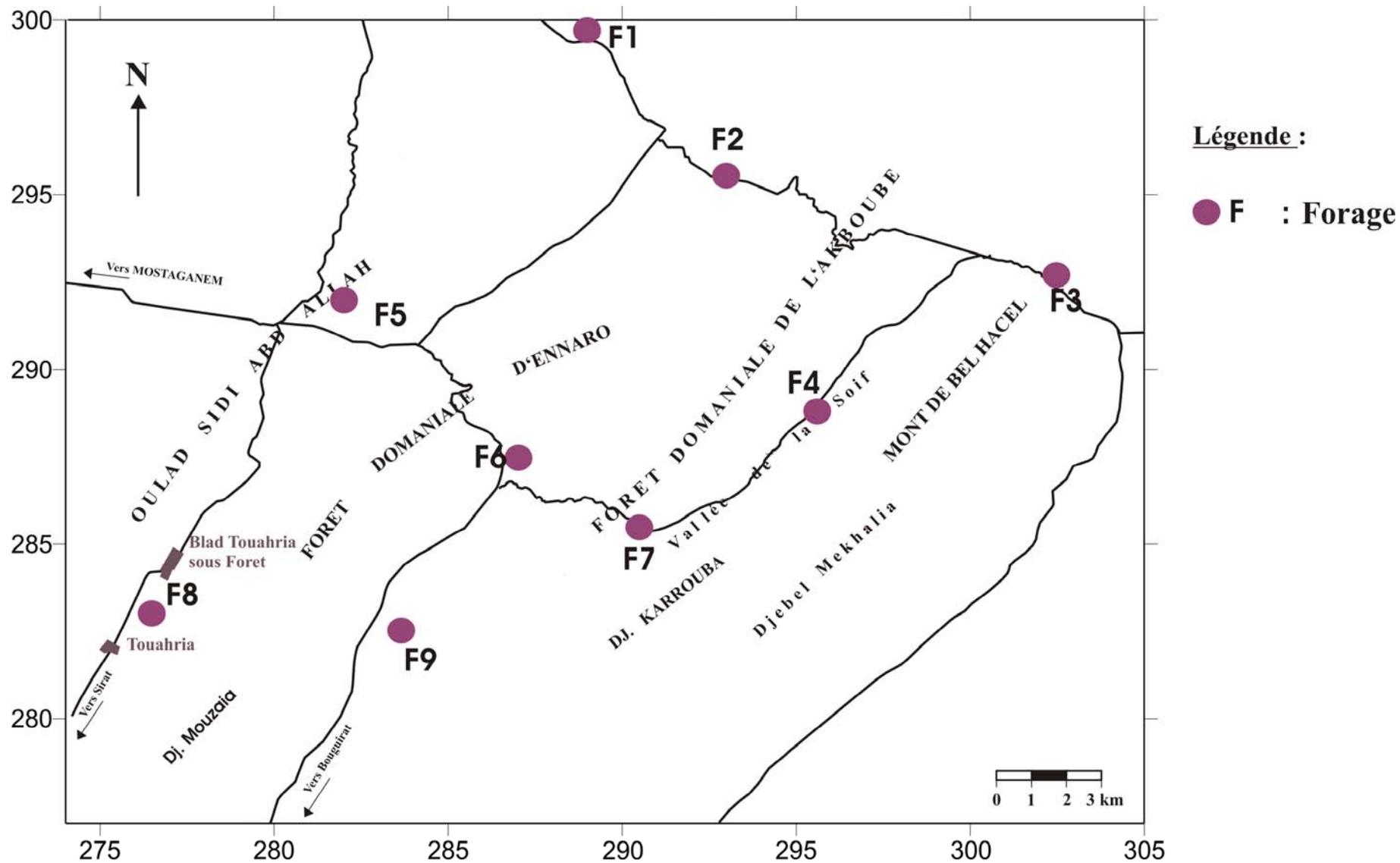


Figure 32 : Localisation des forages hydrauliques.

- Grés friable (5 m).
- Sables grossiers (8 m).
- Sables fin plus ou moins argileux (11 m).
- Sables jaune (7 m).
- Grés blanchâtres à ciment calcaire (6 m).
- Terre végétale (1 m).

5.1.3 FORAGE SIDI KHATAB (F3) (x = 302.5 ; y = 292.25) :

Profond de 350 m, il débute de bas en haut par les séries suivantes :

- Marnes bleues imperméable du Plaisancien (2 m)
- Grés marneux (14 m).
- Marnes (12 m).
- Marnes sableuses (13 m).
- Marnes grise (40 m).
- Grés marneux (13 m).
- Marnes jaunâtre (10 m).
- Grés marneux (8 m).
- Marnes jaunâtres à grise (20 m).
- Marnes jaunâtres à grise parfois sableuse avec des niveaux gréseux (23 m).
- Marnes grise (12 m).
- Marnes jaunâtre (11 m).
- Marnes jaunâtres à grise parfois sableuse avec des niveaux gréseux (46 m).
- Grés marneux (12 m).
- Grés probablement de l'Astien (7 m).
- Marnes parfois sableuse (28 m).
- Marnes jaunâtre sableuse avec passées gréseux (8 m).
- Grés moyens (8 m).
- Argile plastique (4 m).
- Argiles jaunâtre sableuse (18 m).
- Sables argileux (8 m).
- Argiles jaunâtre sableuse (8 m).
- Argiles jaunâtres plastique (5 m)

- Sables (4 m).
- Argiles jaunâtre, plastique et sableuse par endroit (14 m).
- Croûte calcaire blanchâtre avec argile jaunâtre (2 m).

5.1.4 FORAGE MEKHALIA (F4) (x= 295.55 ; y = 288.85) :

La série rencontrée dans ce forage profond de 95 m débute de bas en haut par :

- Marnes bleues du Plaisancien (10 m).
- Grés calcaires jaunâtres (29 m).
- Argiles bleues (1 m).
- Grés (2 m).
- Argiles bleues (1 m).
- Grés argileux jaunâtre (5 m).
- Grés beiges (12 m).
- Sables grossiers avec intercalations de grés beige (5 m).
- Grés calcaires rougeâtre (11 m).
- Sables rouges (19 m).

5.1.5 FORAGE 143/129 (F5) (x = 282.03 ; y = 292) :

Le forage 143/129 atteint les marnes bleues imperméable du Plaisancien à 107 m de profondeur, la série rencontrée débute de bas en haut par :

- Marnes bleues du Plaisancien (9 m).
- Sables argileux à grains de quartz de diamètre inférieur à 0.1 mm (4 m).
- Grés plus ou moins consolidé à ciment calcaire et à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm de diamètre avec des débris de coquilles Foraminifères (Elphidium) (4 m).
- Sables blonds à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm du diamètre (9 m).
- Sables jaunâtres à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre (1 m).
- Sables jaunâtres à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm de diamètre (2 m).
- Sables blonds à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre (9 m).
- Sables jaunâtres à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm de diamètre (2 m).
- Sables blonds à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre (2 m).

- Sables bords à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre, quelquefois de 0.3 mm avec des Foraminifères (Globigerinida et Rotaliacea) (17 m).
- Sables blond plus ou moins consolidé à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm de diamètre (3 m).
- Grés plus ou moins consolidé à grains de quartz de 0.1 à 0.5 mm de diamètre (7 m).
- Sable blond à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre (6 m).
- Grés à ciment calcaire et à grains de quartz de 0.1 à 0.5 mm de diamètre (5 m).
- Sable jaunâtre plus ou moins consolidé à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm de diamètre (4 m).
- Sables blonds à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre (2 m).
- Sables jaunâtres à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm de diamètre (6 m).
- Sables blonds à grains de quartz de 0.1 à 0.5 mm de diamètre (1 m).
- Sable blond à grains de quartz de 0.1 à 0.3 mm de diamètre (5 m).
- Sables jaunâtres à grains de quartz de 0.1 à 0.5 mm de diamètre (1 m).
- Sables jaunes à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre avec des Foraminifères (Rotalia) (2 m).
- Sables grisâtres à jaunâtre à grains de quartz de 0.1 à 0.5 mm de diamètre avec des foraminifères (Elphidium et Rotalia) (12 m).

5.1.6 FORAGE BLAD MTA FERNANA (F6) (x = 287 ; y = 287.5) :

Dans cette région comprise entre la forêt d'Ennaro et celle de l'Akboube, la série débute de bas en haut par :

- Grés friables à lumachelle du Calabrien (11 m).
- Sables jaunâtre (8 m).
- Grés jaune consolidé (3 m).
- Sables fin plus ou moins argileux (4 m).
- Grés friable (7 m).
- Grés blanchâtres à ciment calcaire (6 m).
- Terre végétale (1 m).

5.1.7 FORAGE SAF-SAF (F7) (x = 290.4 ; y = 285.6) :

Dans la région Saf-Saf, le forage atteint les marnes du Plaisancien à 32 m. La série débute de bas en haut par :

- Marnes bleues avec des débris calcaires (12 m).
- Sables jaunes avec présence de graviers calcaires (7 m).
- Calcaires gréseux avec des intercalations sableuses et des passées argileuses (17 m).
- Sables rouges (8 m).

5.1.8 FORAGE MANSOURAH (F8) (x= 276.4 ; y = 283) :

Le forage réalisé dans la région de Mansourah a traversé les marnes bleues imperméable du Plaisancien sur une épaisseur de 110 m. La série rencontrée débute de bas en haut par :

- Marnes bleues plastiques (65 m).
- Argiles gréseuses de couleur jaunâtre (5 m).
- Sables argileux de couleur jaunâtre (2 m).
- Grés moyennement durs (2 m).
- Grés à passées sableuses (2 m).
- Grés argileux (6 m).
- Grés plus ou moins durs de couleur beige (6 m).
- Grés beiges tendre (5 m).
- Sables grossiers (2 m).
- Sables (10 m).
- Terre végétale (5 m).

5.1.9 FORAGE SOUAFLIA (F9) (x = 283.7 ; y = 282.5) :

La série rencontrée débute de bas en haut par :

- Marnes bleues avec grés du Plaisancien (9 m).
- Grés calcaires à mélange d'argile sableuse jaunâtre (13 m).
- Grés calcaires blanchâtres avec des sables jaunâtres (4 m).
- Grés calcaires grossiers avec quelques passées de sable argileux (11 m).

- Grés calcaires blanchâtres avec des argiles plus ou moins jaunâtres et couches rouges de limons (16 m).
- Croûte grésocalcaire blanchâtre, avec couche rouge du Quaternaire ancien (10 m).
- Grés grossier à très grossier plus ou moins consolidé à ciment calcaire avec quelques passées de sable et limons beige à jaunâtre (5 m).
- Grés grossier plus ou moins consolidé à ciment argileux calcaires avec quelques passées de sable jaunâtre (10 m).
- Grés sableux rouges, limons et quelques graviers remaniés du Quaternaire récent (6 m).
- Grés grossiers plus ou moins consolidés à ciment calcaire blanchâtre avec quelques passées de sable jaunâtre (13 m).
- Croûte grésocalcaire, sable et tout venant du Quaternaire récent (6 m).

5.2 ÉVOLUTION DES ÉPAISSEURS DES FORMATIONS (fig. 33) :

5.2.1 TRANSECT F7-F3. (fig. 34) :

De l'amont vers l'aval, les forages Hydrauliques implantés dans la vallée de la soif, montrent une augmentation de l'épaisseur du Pliocène supérieur et du Quaternaire. Le forage Sidi Khatab situé sur la bordure Nord-Est du piémont de l'anticlinal de Bel Hacel enregistre des épaisseurs maximales.

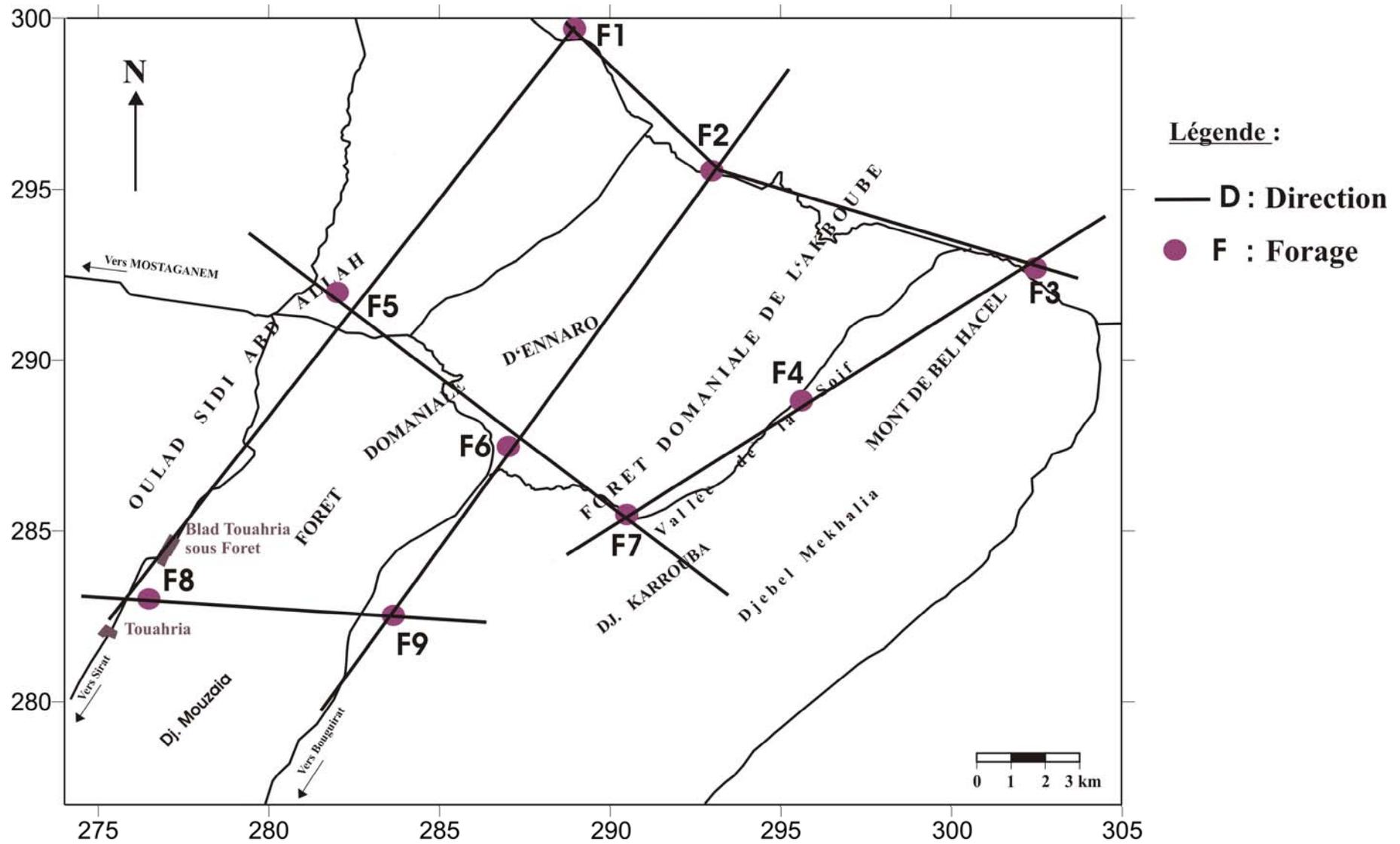


Figure 33 : Localisation des différentes directions.

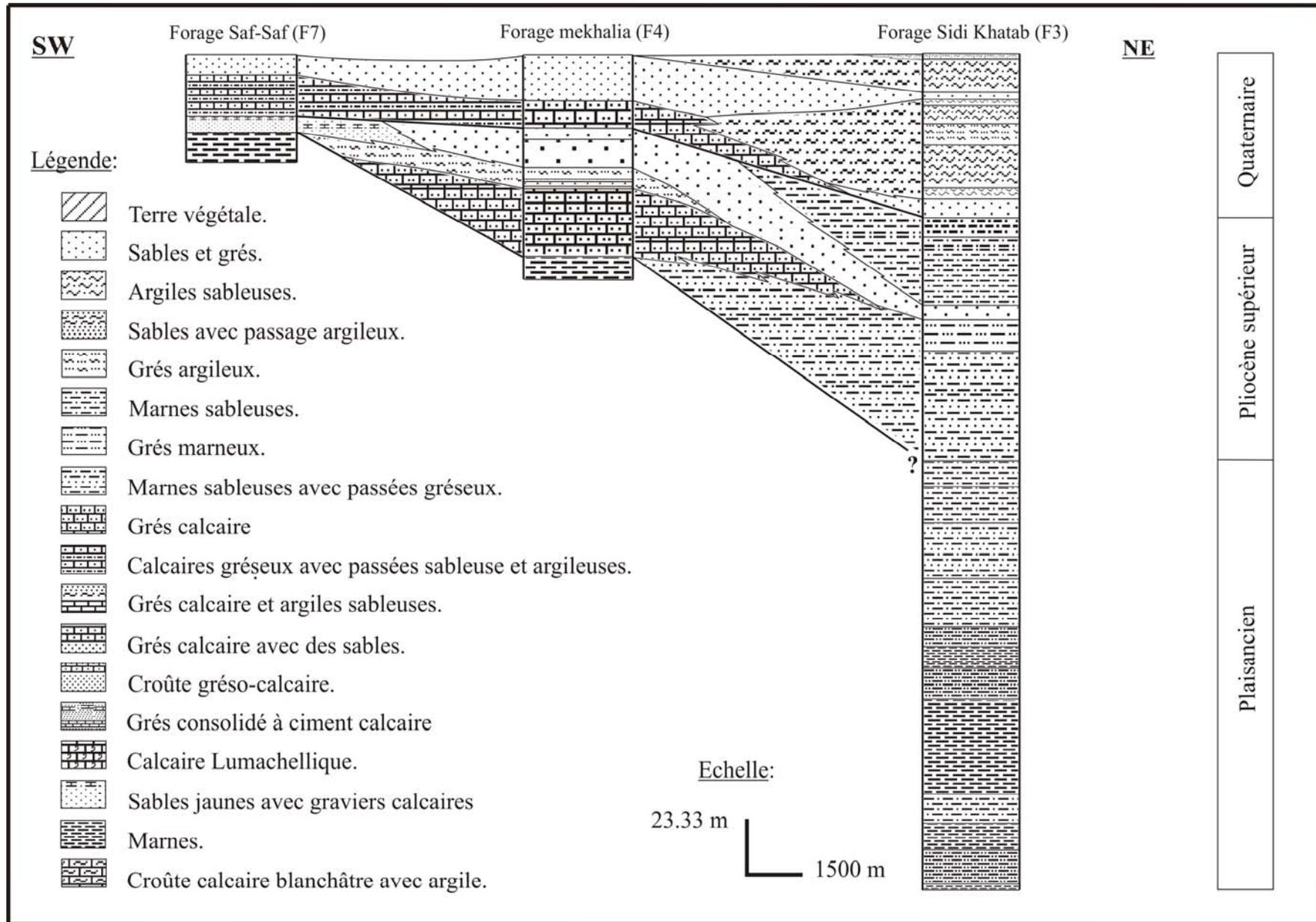


Figure 34 : Transect F7-F3.

5.2.2 TRANSECT F9-F2 (fig. 35) :

Cette direction nous indique une réduction de l'épaisseur des formations du Quaternaire vers le Nord-Est (la limite inférieure du pliocène supérieur n'est pas atteinte au niveau du forage Fernana et Ain Soltane). Au Sud-Ouest vers Bouguirat, le Quaternaire devient plus épais.

5.2.3 TRANSECT F8-F1 (fig. 36) :

Dans le secteur de Oulad Sidi Abdellah, le forage de Bel Hacer donne un Pliocène supérieur et un Quaternaire plus développés, tandis que sur les bords, nous avons des valeurs minimales.

5.2.4 TRANSECT F1-F3 (fig. 37) :

Elle présente presque la même physionomie que la première direction. Nous constatons que l'épaisseur du Pliocène supérieur et du Quaternaire augmente toujours vers la Mina (Nord-Est). Nous avons les valeurs maximales au niveau du forage Sidi Khatab.

5.2.5 TRANSECT F5-F7 (fig. 38) :

C'est au niveau du forage de Bel Hacer (Oulad Sidi Abdellah) qu'on retrouve les épaisseurs maximales du Pliocène supérieur et du Quaternaire. Vers le Sud-Est les épaisseurs diminuent surtout vers la région de Saf-Saf.

5.2.6 TRANSECT F8-F9 (fig. 39) :

Nous constatons, au niveau de cette direction, une augmentation brutale des épaisseurs des formations vers l'Est au niveau du synclinal de Bouguirat. Notons que cette évolution touche surtout le Quaternaire avec une épaisseur dépassant les 80 mètres au niveau du forage Souafliya,

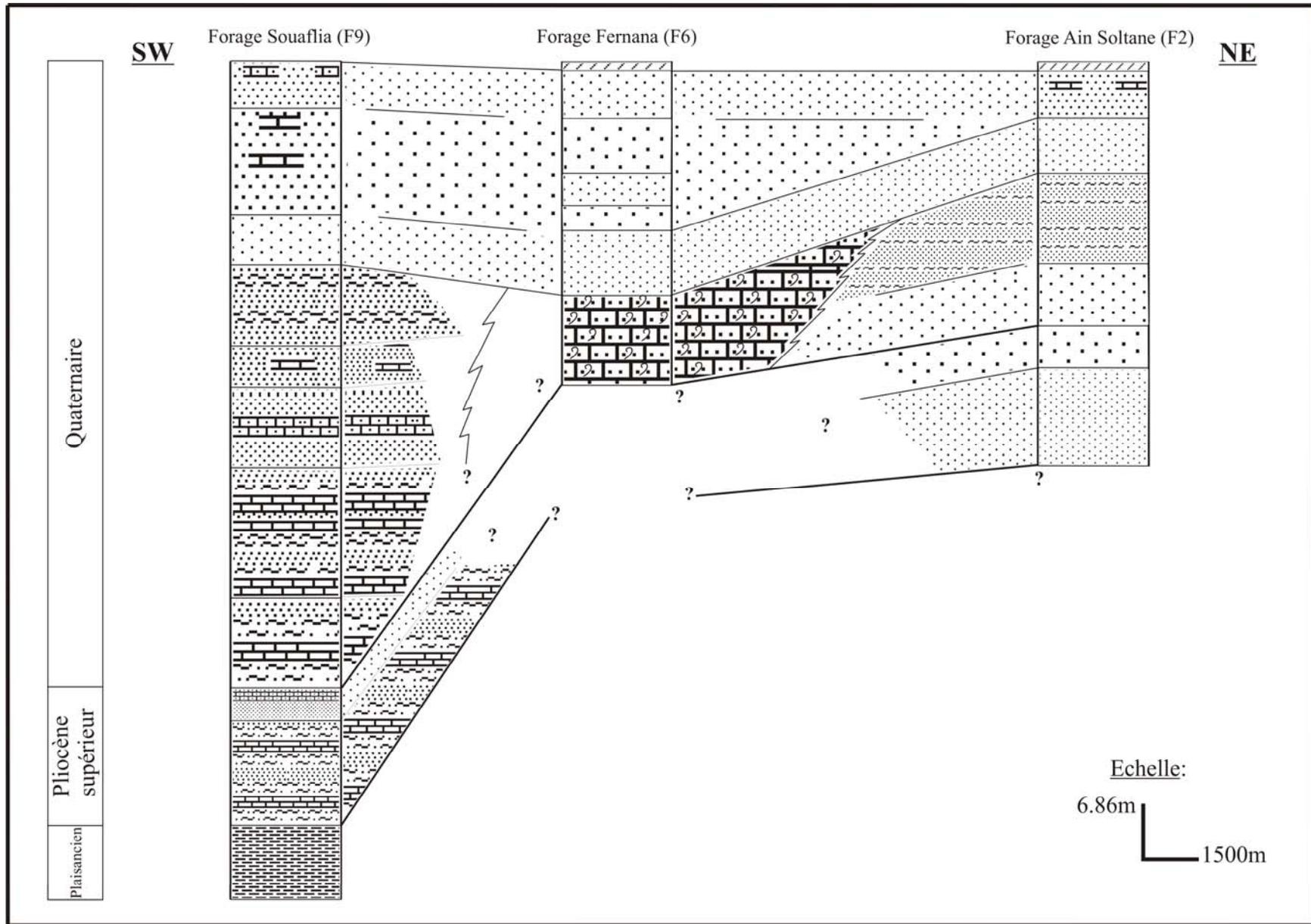


Figure 35 : Transect F9-F2.

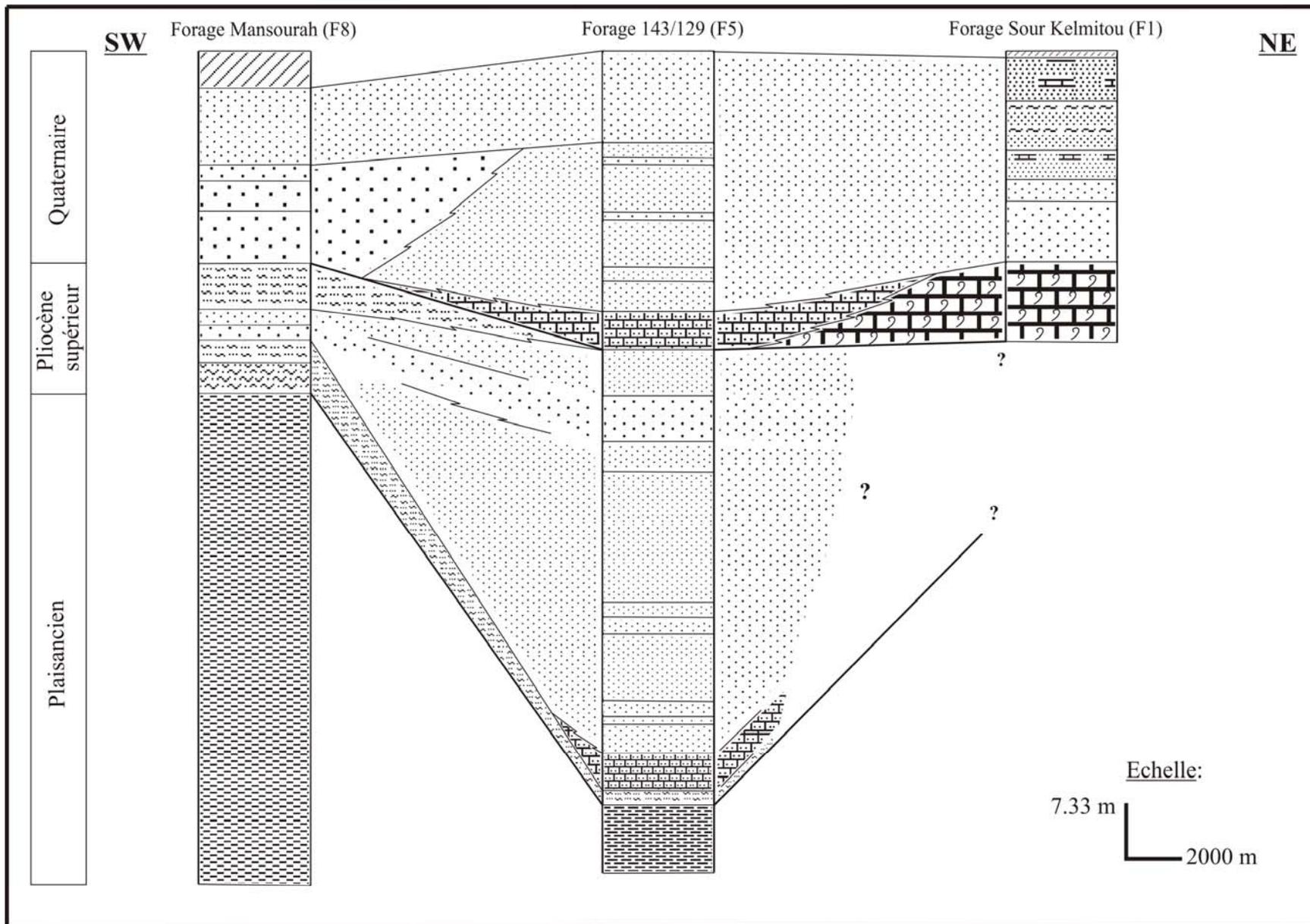


Figure 36 : Transect F8-F1.

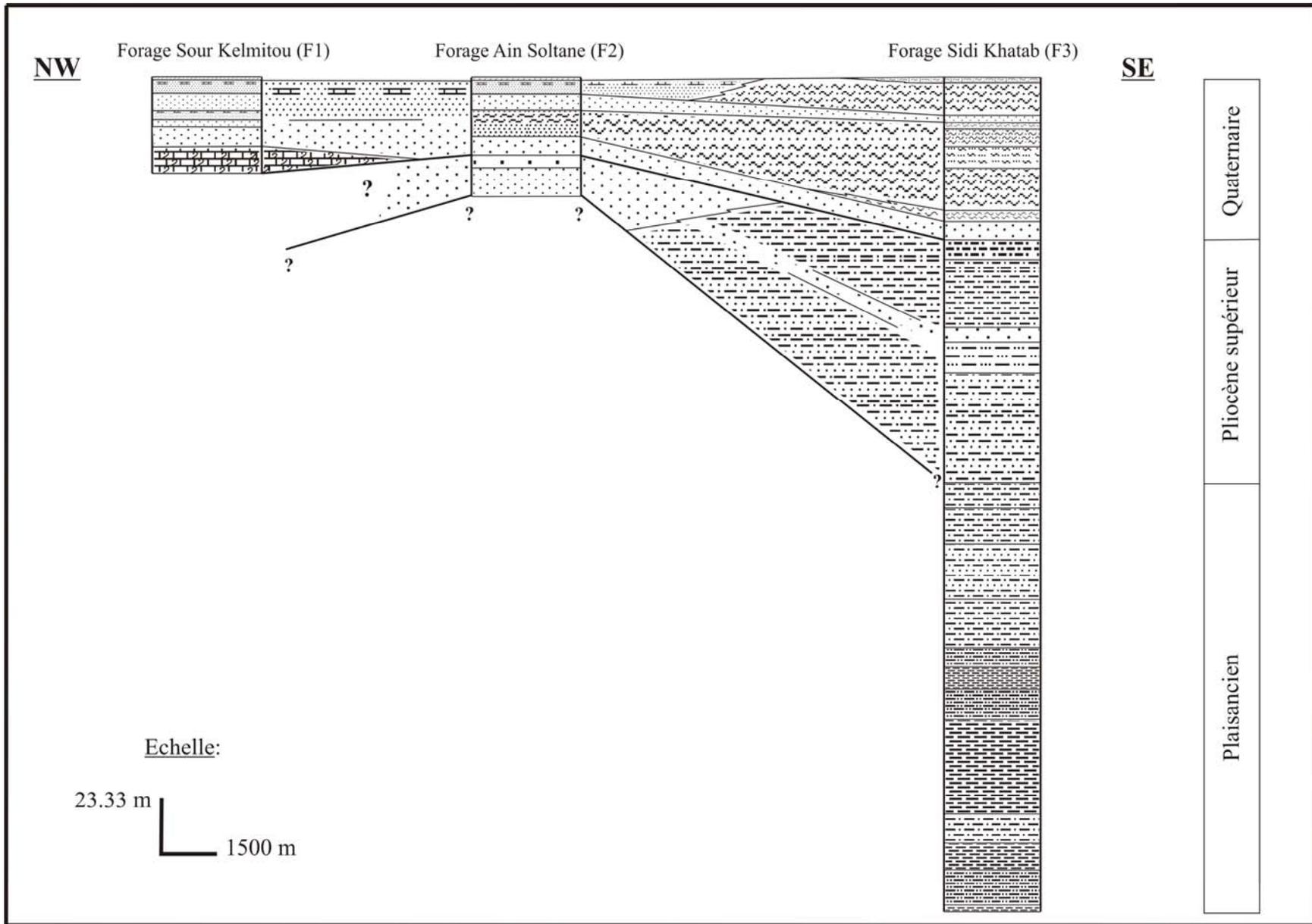


Figure 37 : Transect F1-F3.

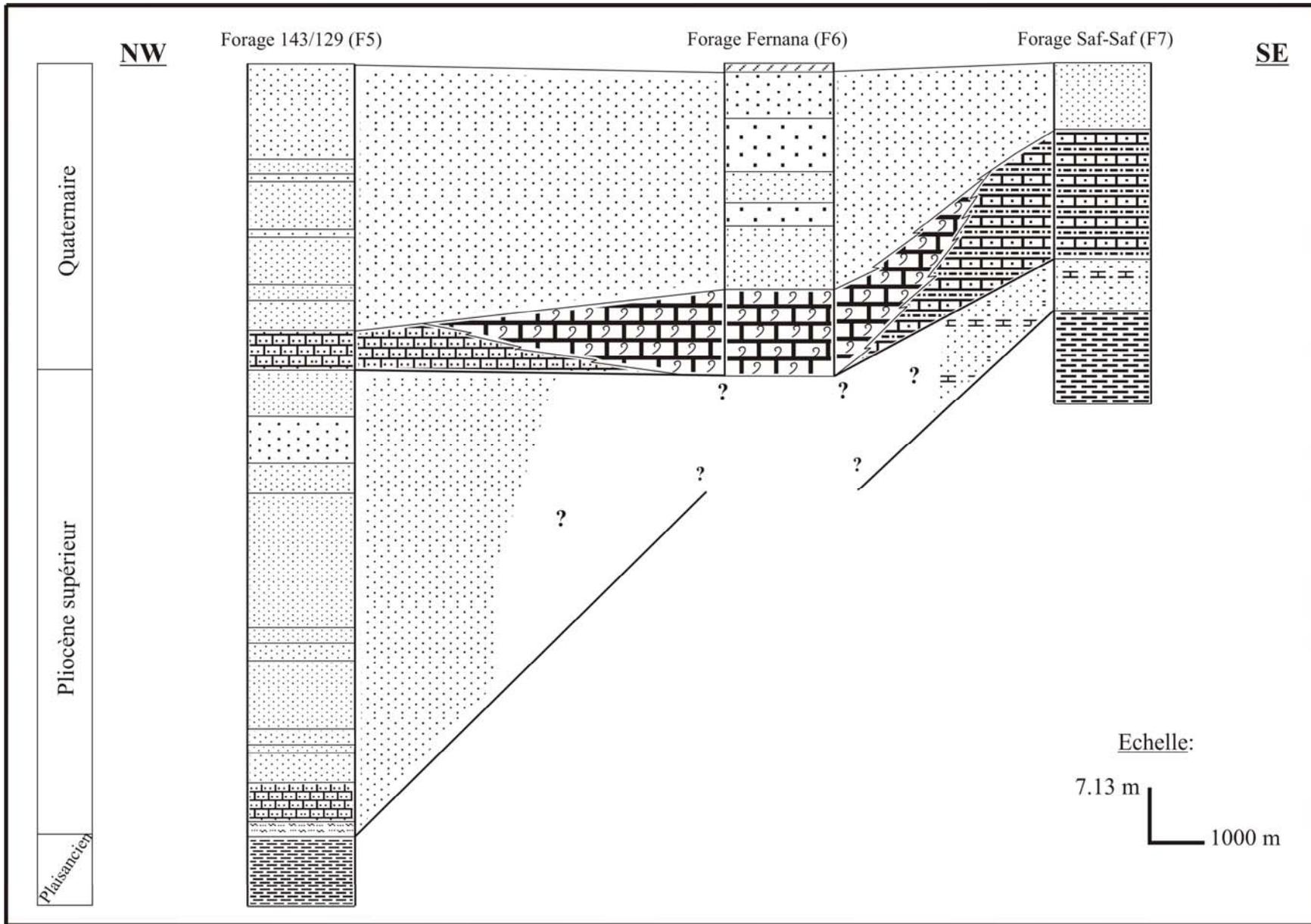


Figure 38 : Transect F5-F7.

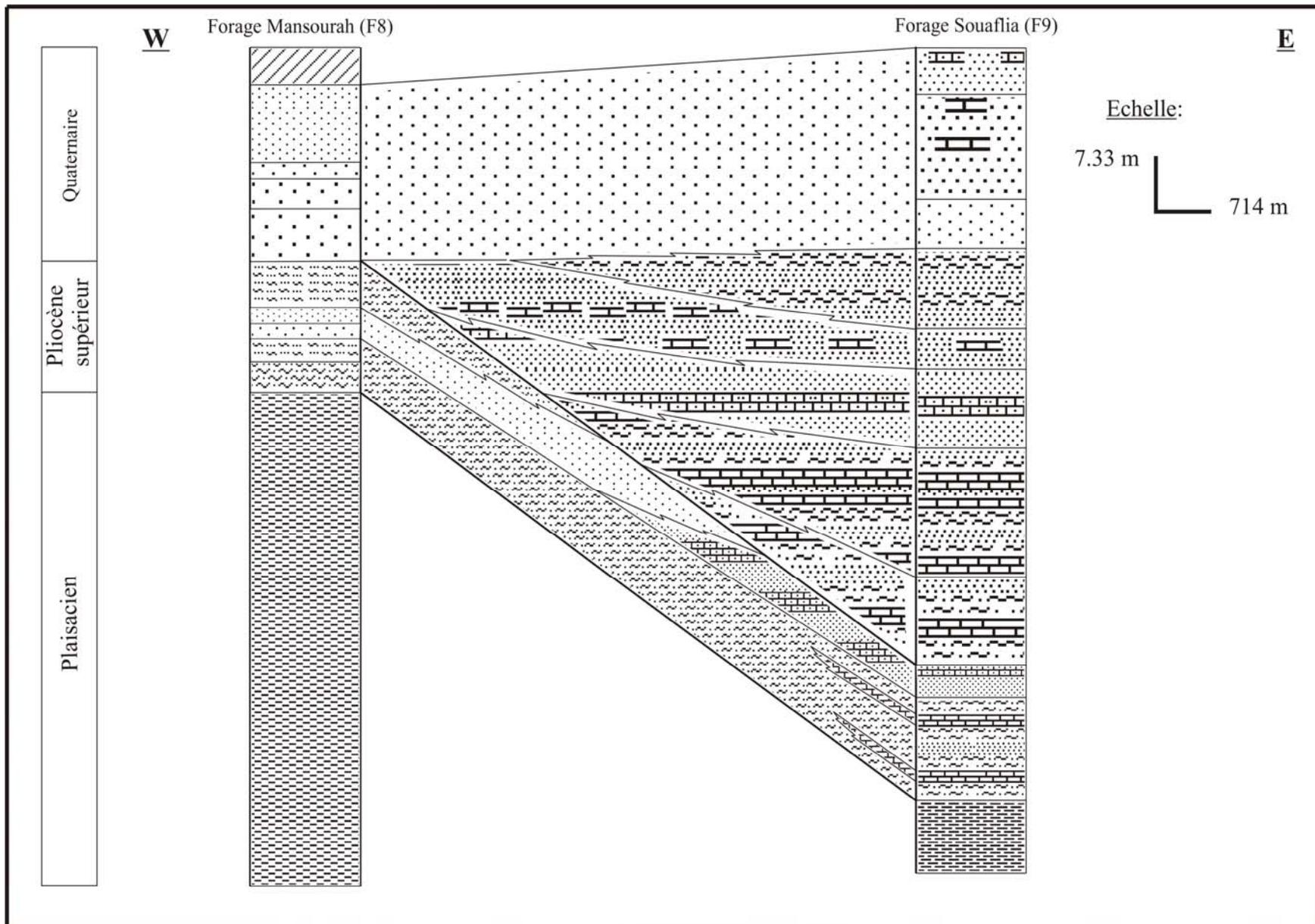


Figure 39 : Transect F8-F9.

6. ANALYSE DE LA VARIATION DES ÉPAISSEURS :

L'analyse de la variation des épaisseurs de la pile sédimentaire représentant successivement les périodes du Pliocène supérieur et du Quaternaire, à partir des cartes isopaques (figures 40 et 41), fait ressortir :

1. Deux depocentres (positionnés à Oulad Sidi Abd Allah à l'Ouest et dans la région de Bel Hacer à l'Est) au Pliocène supérieur, séparés par une ride Nord-Sud qui pourrait correspondre aux accidents Nord-Sud qui affectent le synclinal de Bouguirat. Il est fort probable que la tectonique ait joué un rôle important en délimitant des zones basses par un jeu de faille et/ou éventuellement par l'amorce des plissements.

2. Deux depocentres au Quaternaire ; celui du synclinal de Bouguirat (partie Sud-Ouest) et un autre vers le Nord-Est de la vallée de la Soif. Ces deux zones isopiques sont séparées par une languette orientée Nord-Sud (direction de la double fracture oblique au niveau du synclinal de Bouguirat (voir fig. 28).

- Le passage de la configuration du Pliocène supérieur au Quaternaire semble se produire par un mouvement à résultante compressive avec une rotation sénestre (voir la position des deux depocentres au Pliocène supérieur et au Quaternaire).

L'application de cette analyse pour notre étude intervient donc dans la délimitation des faciès potentiellement aquifères (Cf. Chap. VI) : en effet, pour l'aquifère du Pliocène supérieur, il est recommandé de concentrer les futures exploitation vers l'axe de la vallée de la Soif et dans la région de Oulad Sidi Abd Allah, par contre pour l'aquifère du Quaternaire, il serait intéressant de focaliser l'attention sur la bordure Nord-Est et Sud-Est du piémont de l'anticlinal de Bel Hacer et la partie longeant le synclinal de Bouguirat.

7. ÉTUDE GRANULOMÉTRIQUE :

En se référant aux Logs stratigraphiques des forages implantés dans notre région d'étude et à la carte géologique de Bel Hachel, nous remarquons que les formations sableuses occupent une place importante sur le plan géologique dans le secteur. En hydrogéologie, ces formations du Quaternaire et du Pliocène supérieur peuvent former un grand complexe aquifère. Pour cette raison, nous avons jugé nécessaire d'introduire une étude granulométrique afin d'en tirer le maximum d'informations utiles pour la suite de notre travail.

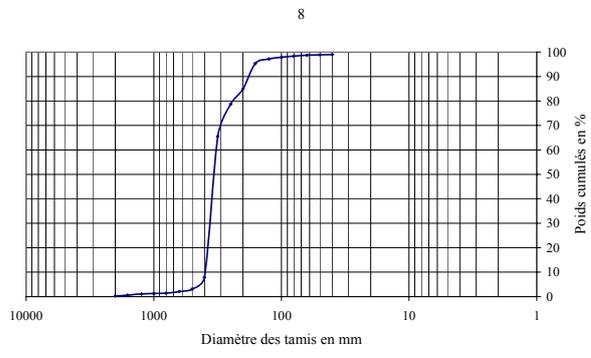
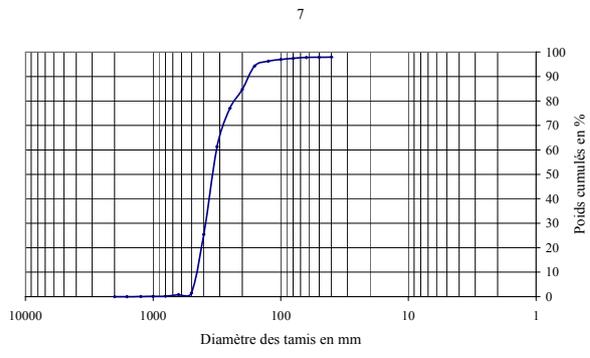
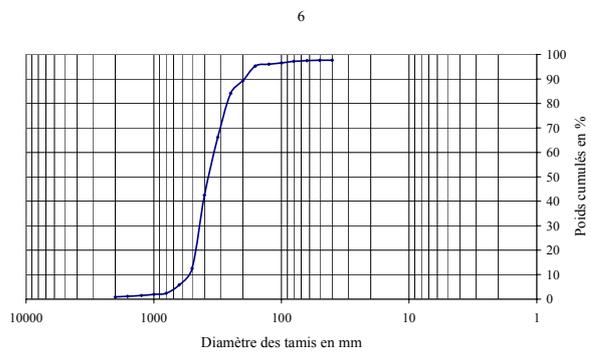
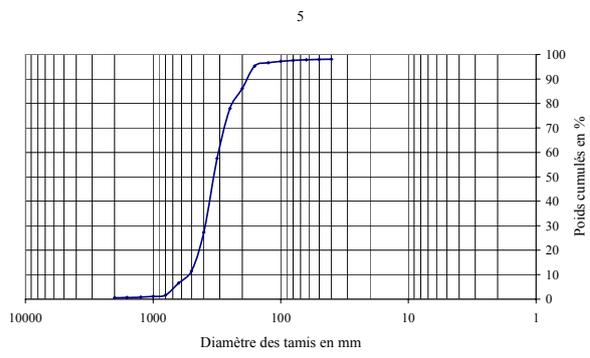
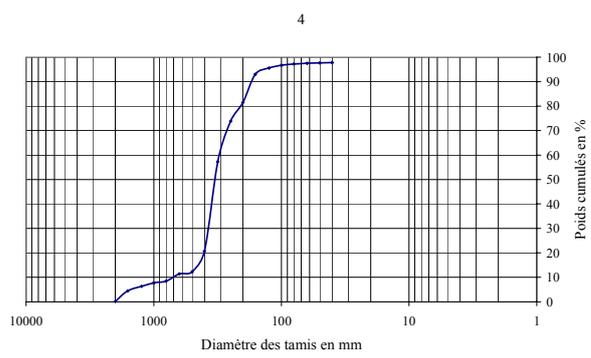
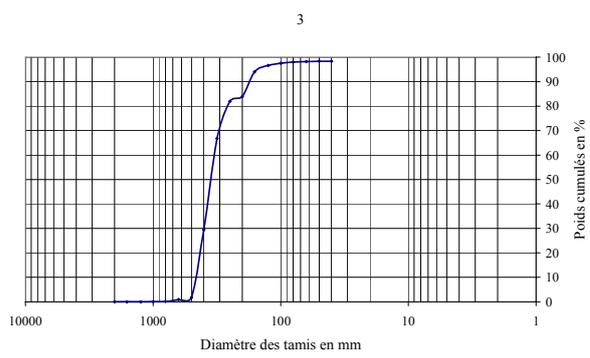
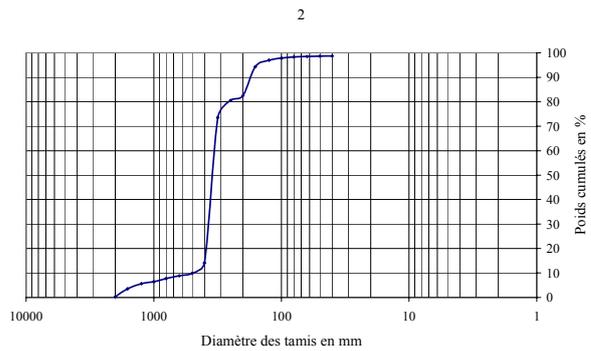
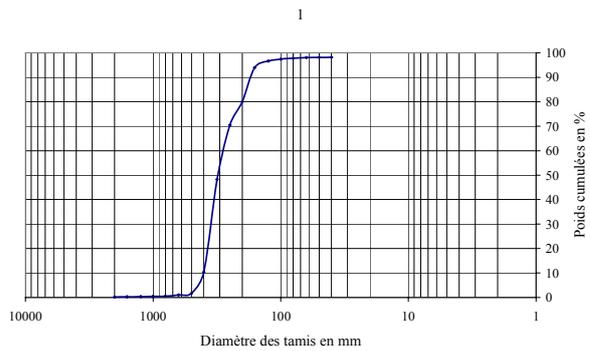
7.1 LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DES PRÉLEVEMENTS :

11 prélèvements ont été effectués au niveau de l'ensemble des synclinaux localisés dans notre région d'étude. Les échantillons traités correspondent aux sables, largement répandus à travers tout le secteur. Les coordonnées des prélèvements sont les suivant :

1 : X = 292.24	Y = 285.25	7 : X = 289.25	Y = 293.75
2 : X = 299.62	Y = 292.70	8 : X = 286.50	Y = 285.51
3 : X = 292.85	Y = 294.68	9 : X = 282.25	Y = 290.48
4 : X = 290.50	Y = 289.79	10 : X = 276.68	Y = 289.74
5 : X = 284.25	Y = 285.00	11 : X = 281.41	Y = 296.67
6 : X = 282.12	Y = 285.41		

7.2 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DE NOS ÉCHANTILLONS :

Pour apprécier la granulométrie du sédiment de l'ensemble de nos échantillons, ces sables ont été soumis à un tamisage mécanique. Cette méthode est basée sur l'emploi de tamis et convient pour des dimensions de particules allant de 0.04 à 2 mm. Nous avons dressé, à partir d'un graphe semi-logarithmique, des courbes de fréquences cumulatives en prenant en abscisse le diamètre des tamis en μ et en ordonné le poids (g) respectif de chacune des classes cumulées en pourcent (%) (fig. 42). De nombreux auteurs tels que CAILLEUX, FOLK, INMAN,..., ont établi des indices à partir des valeurs lues sur ces courbes L'ensemble des paramètres lus et les résultats des calculs des différents indices sont regroupés dans les tableaux 1 et 2 donnés en annexe.



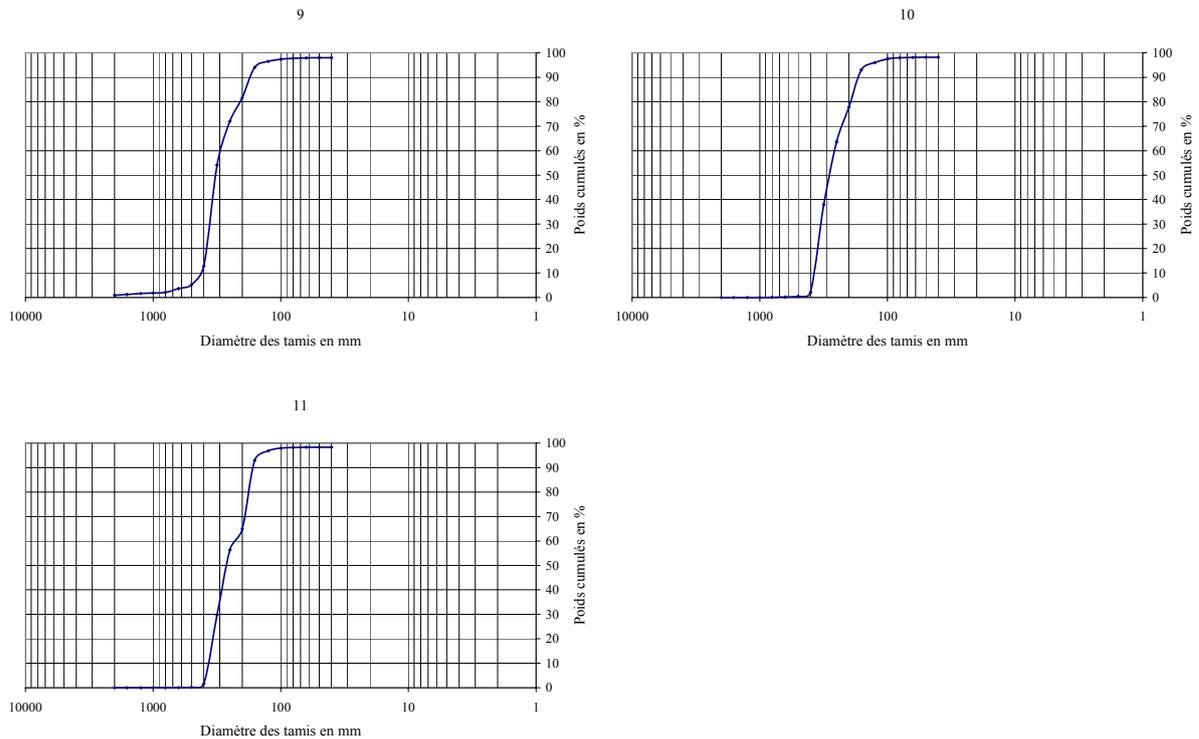


Figure 42 : De 1 à 11, Courbes cumulatives de nos échantillons.

7.3 PARAMÈTRES GRANULOMÉTRIQUES :

7.3.1 LA MEDIANE ET LA MOYENNE :

La moyenne (M), de formule $\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84} / 3$ et la médiane (Md), taille correspondant à 50% des grains sur la courbe cumulative. Moyenne et médiane reflètent l'énergie cinétique moyenne et la distribution granulométrique du sédiment (voir tableau porté en annexe).

7.3.2 INDICE DE TRI-CLASSEMENT :

L'indice de classement (γ_i) indique la qualité du classement (l'indice décroît avec le classement) : $\phi_{84} - \phi_{16} / 4 + \phi_{95} - \phi_5 / 6.6$. Le classement est lié à l'hydrodynamisme et dépend du mode de dépôt des sédiments.

Un tableau de classement de γ_i établi en 1957 par FOLK et WARD (in Thèse de BAICHE) nous permet de situer nos échantillons.

Valeurs de Folk et Ward (γ_i)	Termes de classement	Situation des échantillons par rapport au classement
$\gamma_i < 0.35$	Très bien classé	
$0.35 < \gamma_i < 0.5$	Bien classé	1, 8, 10 et 11
$0.5 < \gamma_i < 0.71$	Moyennement bien classé	2, 3, 5, 6, 7 et 9
$0.71 < \gamma_i < 1$	Moyennement classé	4
$1 < \gamma_i < 2$	Mal classé	
$2 < \gamma_i < 4$	Très mal classé	
$\gamma_i > 4$	Extrêmement mal classé	

Tableau 19 : tableau de classement de γ_i .

La totalité de nos échantillons se situe entre 0.35 et 0.71 sauf pour l'échantillon n°4 qui est égal à 0.735 très bien collé à l'extrémité 0.71. On peut dire donc que la totalité de nos prélèvements est moyennement bien classée à bien classée.

7.3.3 INDICE D'ASYMETRIE (Ski) :

Il met en évidence une symétrie ou une asymétrie dans la distribution par rapport à la médiane : $[\phi_{84} + \phi_{16} - \phi_{50} / 2 (\phi_{84} - \phi_{16})] + [(\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{95} - \phi_5)]$.

- Ski = 0 la courbe est symétrique.
- Ski > 0 la courbe est dissymétrique avec un encombrement des particules fines.
- Ski < 0 la courbe est dissymétrique avec un encombrement des particules grossières.

Ce paramètre est souvent présenté comme un indicateur de l'environnement de dépôt sédimentaire.

FOLD et WARD ont donné des valeurs repères, ainsi qu'un classement de Ski (tab.20).

Valeur de Ski (Ward et Fold)	Terminologie d'asymétrie	Situations des échantillons
$-1 < \text{Ski} < -0.3$	Asymétrie très forte	
$-0.3 < \text{Ski} < -0.1$	Asymétrie moyenne	
$-0.1 < \text{Ski} < 0.1$	Asymétrie très faible	5
$0.1 < \text{Ski} < 0.3$	Asymétrie moyenne	2, 4, 6 et 11
$0.3 < \text{Ski} < 1$	Asymétrie très forte	1, 3, 7, 8, 9 et 10

Tableau 20 : Tableau de classement de Ski.

D'après FRIEDMAN (1961) :

- Lorsque **Ski est > 0** les sédiments seraient dunaires.
- Lorsque **Ski est < 0** les sédiments seraient marins (plage).

Pour nos échantillons, la majorité des sédiments serait marin sauf pour l'échantillon n° 5 (- 0.024) où les sédiments correspondants seraient dunaires.

7.3.4 : COEFFICIENT D'ACUITE (Kg):

Il sert à mesurer le caractère aigu ou l'intensité de la distribution :

$$\mathbf{Kg = \phi_{95} - \phi_5 / 2.44 (\phi_{75} - \phi_{25}).}$$

- Si la distribution apparaît plus plane qu'une distribution normale, elle est décrite comme étant platikurtique.
- Si elle est plus prononcée ou plus avec un pic, elle est nommée leptokurtique.
- Une distribution normale est appelée mésokurtique.

D'après le tableau 21, la majorité de nos échantillons montre un coefficient « Kg » compris entre 0.9 et 1.5. Ceci implique une distribution normale à plus prononcée (mésokurtique à leptokurtique).

Valeurs de Kg (Folk-Ward)	Terminologie	Situation des échantillons
Kg < 0.67	Très platikurtique	11
0.67 < Kg < 0.9	Platikurtique	10
0.9 < Kg < 1.11	Mésokurtique	1, 4 et 9
1.11 < Kg < 1.50	leptokurtique	2, 3, 5, 6 et 8
1.50 < Kg < 3	Très leptokurtique	4
Kg > 3	Extrêmement leptokurtique	

Tableau 21 : Tableau de classement de Kg.

7.4 RECONSTITUTION DES ENVIRONNEMENTS SEDIMENTAIRES

D'APRES DOEGLAS (1968) :

7.4.1 ETABLISSEMENT DES DIAGRAMMES Q_1MdQ_3 (DOEGLAS):

Les valeurs de Q_1 et Q_3 correspondant respectivement à 25 et 75% sont prises en échelle ϕ (phi millimètre conversion table, Harry G. Page). En ordonnée la dimension des mailles des tamis, en abscisse le numéro de l'échantillon. La médiane en phi est reportée sur la diagonale. Les valeurs de Q_1 et Q_3 sont placées sur une verticale de part et d'autre de la valeur Md.

Pour notre cas, les sables sont fins à moyens (2.43 – 1.15 ϕ) avec 54.54% de sables moyens et 45.46% de sables fins.

7.4.2 DIAGRAMME « C.M. DE PASSEGA » :

Le dynamisme d'un agent de transport se reflète dans la valeur médiane du grain ainsi que dans la valeur du plus gros grain transporté. PASSEGA emploie donc le premier centile qui correspond ici à 1%, et Md la médiane donnée en micron. Il a établi un diagramme C.M. sur papier bi-log, Md en abscisse et C en ordonnée.

La ligne C.M. correspond à $C = M$ à un sédiment où tous les grains auraient la même taille, ce qui n'existe pas dans la nature. Les points s'approchent plus ou moins de cette ligne mais, ne pourront se trouver au dessous.

Dans notre cas, C est compris entre 500 μ et 1900 μ , par contre M varie de 270 μ à 1890 μ , donc les points sont plus éparpillés dans la partie grossière que dans la partie fine.

7.5 RÉCAPITULATION DES RESULTATS :

Les différents indices calculés ainsi que les diagrammes fournis ont donné les résultats suivants :

- La valeur moyenne de la médiane de l'ensemble de nos échantillons varie de 1.4 à 1.89.
- Indice de tri classement : 36.36% des sédiments sont bien classés, 54.54% des sédiments sont moyennement bien classés et le reste représenté par un seul échantillon (n°4) est moyennement classé.
- Indice d'asymétrie : 54.54% des échantillons présentent une asymétrie très forte, 36.36% des échantillons présentent une asymétrie moyenne et un échantillon (n°5) présente une asymétrie très faible. D'après FRIEDMAN (1961), presque la totalité des sédiments serait marin.
- Coefficient d'acuité : il est compris entre 0.9 et 1.5. La majorité de nos échantillons présente une distribution normale à plus prononcée (mésokurtique à leptokurtique).
- Diagramme Q_1MdQ_3 de DOEGLAS: Les sables sont fins à moyens (2.43 – 1.15 ϕ) avec 54.54% de sables moyens et 45.46% de sables fins.
- Diagramme C.M. de PASSEGA : C est compris entre 500 μ et 1900 μ , par contre M varie de 270 μ à 1890 μ , donc les points sont plus éparpillés dans la partie grossière que dans la partie fine.

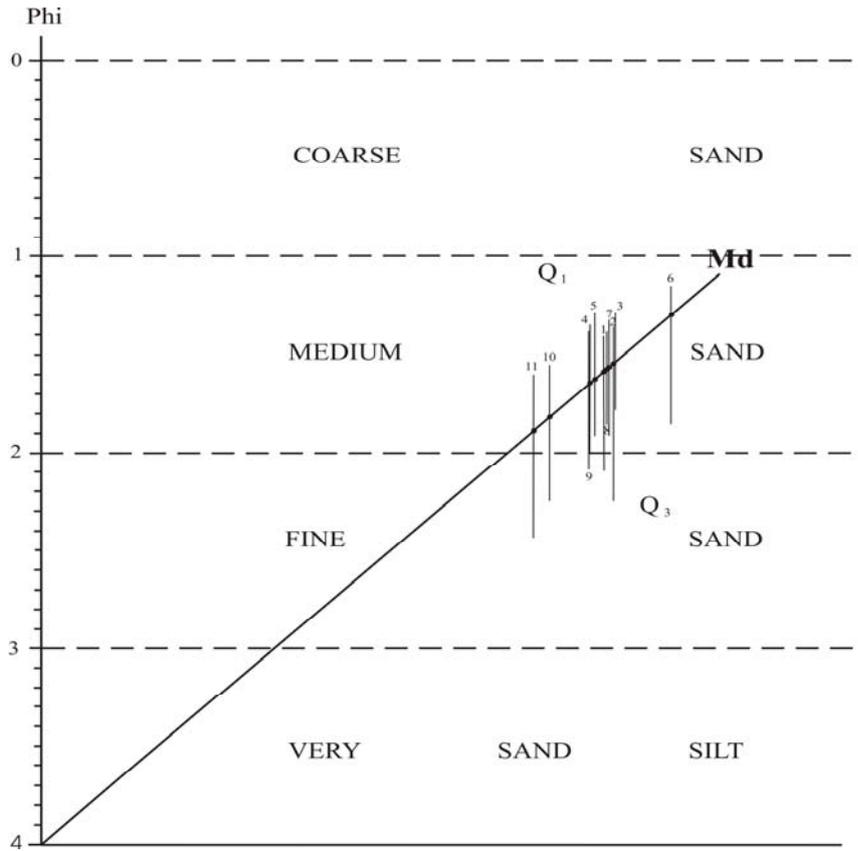


Figure 43 : Q_1 Md Q_3 Diagramme de DOEGLAS (1968).

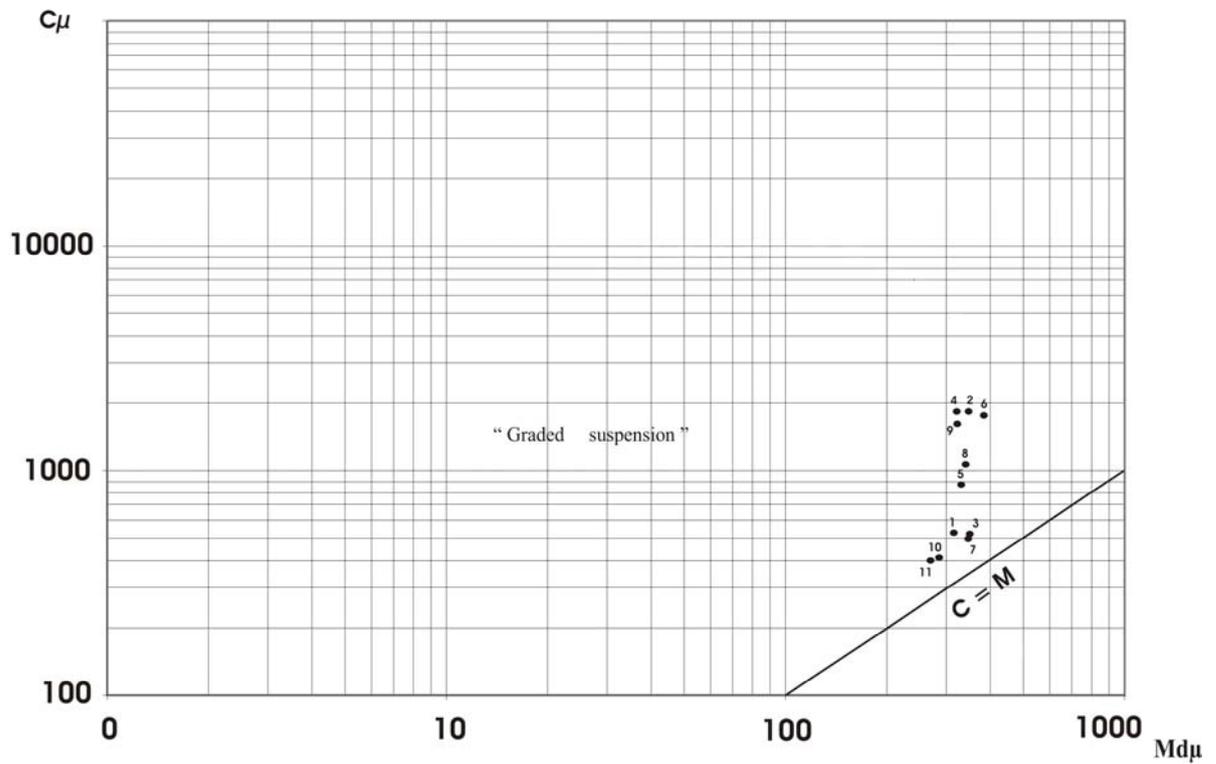


Figure 44 : C M Diagramme de PASSEGA.

8. CONCLUSION :

L'étude géologique de la région de Bel Hacer a mis en évidence une structure constituée par trois grands ensembles :

- Un Miocène Caractérisé au début par des dépôts continentaux gréseux, ensuite par des faciès détritiques saumâtres et fluviatiles ou subcontinentaux. Le tout, surmonté par des dépôts marins profonds représentés par des marnes brunes. Après une régression importante de la mer vient se déposer un conglomérat à galets d'argile et de grès. Le passage vers le Miocène supérieur est marqué par une transgression marine en déposant des marnes bleues à gypse affectées par des dépôts cinéritiques présents dans toute la région de Mostaganem dus à des activités volcaniques. Une autre régression de la mer va déposer des évaporites attribuées au Miocène supérieur constituant ainsi la limite approximative Miocène supérieur Pliocène inférieur.

- Un Pliocène débutant par une transgression, il est formé par deux grands ensembles de faciès qui se superposent : Les marnes bleues interrompues par le retrait de la mer et les grés marin de l'Astien. Le tout coiffé par des dépôts fluviatiles et lacustres du Pliocène continental.

- Un Quaternaire représenté à sa base par une formation lumachellique transgressive sur les terrains sous-jacents d'épaisseur comprise entre 15 et 20m attribuée au Calabrien. Cette formation est surmontée par un Villafranchien caractérisé par des dépôts d'argiles ou de calcaires lacustres, des dunes de sables et des sables limoneux.

Sur le plan structural, notre région faisant partie du bassin du bas Chéelif, est affectée par une succession de plis dissymétriques orientée Sud-Ouest/Nord-Est accompagnée d'accidents, en général, de même direction.

L'étude de la variation des épaisseurs des formations géologiques nous donne une idée globale sur l'évolution spatiale de celles-ci. Pour le Pliocène supérieur on enregistre des épaisseurs maximales surtout vers le Nord-Ouest (Oulad Sidi Abd Allah) et vers l'Est

(Montagne de Bel Hael). Par contre, les épaisseurs maximales du Quaternaire sont localisées au Sud-Ouest au niveau du synclinal de Bouguirat et vers l'Est du secteur d'étude.

D'après l'analyse granulométrique établie à partir de quelques échantillons prélevés à travers le secteur, les sédiments sont, en général, bien classés à moyennement bien classés avec une asymétrie très forte à moyenne et une distribution normale à plus prononcée. D'après les diagrammes, 54.54% des sables sont moyens et 45.46% sont fins.

CHAPITRE IV

Hydrogéologie

1. INTRODUCTION :

L'étude hydrogéologique passe essentiellement par la réalisation de la carte piézométrique ou de la carte hydrogéologique de la région d'étude et par le calcul, à partir des pompages d'essai de quelques forages, des paramètres hydrodynamiques des aquifères ou des couches peu perméables. Il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes afin de déterminer ces paramètres, de comparer les valeurs obtenues et de faire ressortir les plus intéressantes ou les plus adéquates avec la lithologie de l'aquifère. En vue de la nature des terrains, les perméabilités calculées à partir des transmissivités sont comparées à celles calculées à partir de l'analyse granulométrique des diverses formations de la région de Bel Hael.

2. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES DE LA REGION (fig. 32) :

De façon générale, notre région d'étude comporte un substratum marneux imperméable (Miocène supérieur et Pliocène inférieur) qui constitue le Mur de la nappe surmonté par des Grés à passées sableuses ou argilo-sableuses (Calabrien) qui contiennent l'aquifère principal. Le tout recouvert par des sables, et localement par une croûte calcaro-gréseuse.

2.1 MIOCENE SUPERIEUR ET PLIOCENE INFERIEUR :

Caractérisé par des marnes bleues avec quelques niveaux gypseux qui passe au marnes bleues et vertes vers le Pliocène inférieur. Ces formations constituent le substratum imperméable de la nappe.

2.2. CALABRIEN OU LE PLIOCENE SUPERIEUR :

Il renferme l'aquifère principal de la région d'étude, les formations sont donc perméables, et nous avons de bas en haut :

- des grés marins de l'Astien.
- des grés et limons à Hélix du Pliocène continental.
- grés à ciment calcaire lumachellique du Calabrien.

2.3 QUATERNAIRE :

Le Quaternaire est transgressif et discordant sur les séries antérieures, on distingue de bas en haut des formations plus ou moins perméables :

- sables et argiles rougeâtres.
- carapace calcaire recouvrant des dépôts divers.
- croûte calcaréo-gréseuse.
- Sable et dunes.

Eres	Séries	Etages	Lithologies		Horizons Aquifères	Epaisseur	
			Sud-Ouest	Nord-Est			
QUATERNAIRE	Holocène	Pleistocène à Holocène	Dunes		[Bonne perméabilité]	50 à 70 m	
			Bas-fonds salés à peu salés marécageux quelque fois encroustement calcaire en général Alluvions récentes				
	Pleistocène	Continental	Postvillafranchien	Carapace Calcaire		[Faible perméabilité]	5 à 10 m
			Villafranchien II	Sables et argiles (couche rouge)		[Faible perméabilité]	100 m
Calabrien			Grès à Grès calcaire, lumachelique		[Bonne perméabilité]	20 à 30 m	
TERTIAIRE	Pliocène	Pliocène continental	Grès et limons à Helix		[Faible perméabilité]	100 m	
		Astien	Grès marins		[Bonne perméabilité]	100 m	
		Plaisancien	Marnes bleues avec grés de base		[Imperméable]	400 à 500 m	
	Miocène	Miocène supérieur	Gypses et argiles		[Imperméable]	50 à 300 m	
Tripolis et marno-argiles à Tripolis, Cinérites et biotites			[Imperméable]	50 à 200 m			
Marnes bleues avec intercalation des niveaux lenticulaires des grés argileux.			[Imperméable]	600 à 800 m			

Légende:

- Bonne perméabilité.
- Faible perméabilité.
- Imperméable.

Fig. 45 : Formations géologiques générales et leurs perméabilités.

3. AQUIFERE :

3.1 SYNCLINAL DE BOUGUIRAT :

Bien limité au Nord-Ouest par l'anticlinal d'Ennaro au Sud-Est par la forêt de l'Akboube, le synclinal de Bouguirat comporte dans sa partie méridionale deux nappes superposées, l'une captive formée par des Grés de l'Astien et Calabrien, l'autre libre formée par des niveaux détritiques du Quaternaire de 10 à 20 m d'épaisseur. Ces formations quaternaires mettent généralement en charge la nappe des grés. Elles sont constituées par des alternances des niveaux argilo-gréseux ou argilo-sableux qui régressent vers le Nord-Est pour devenir plus sableux (dunes et grés Calabrien).

Au Nord-Est de Bouguirat, les deux nappes superposées se réunissent pour donner une seule nappe libre formée par les niveaux détritiques du Quaternaire (sable récent et grés Calabrien) où les Grés Astien sont érodés (fig. 30, Chap. géologie).

3.2 VALLEE DE LA SOIF :

La nappe libre s'étend sur toute la région est contenue dans les Grés du Pliocène continental et du Villafranchien, alors que dans sa partie méridionale elle est aussi contenue dans les grés du Calabrien. De nombreux puits peu profonds sont creusés dans la région de Saf-Saf où les affleurements des marnes imperméables sont près de la surface. Tandis que vers l'aval vers Sidi Khettab, les points d'eau deviennent moins nombreux et les puits très profonds. Dans cette région l'absence des sources, de part et d'autre de la Vallée de la Soif, s'explique par le fait que les couches aquifères et celles du substratum s'inclinent vers la Mina (Nord-Est) pour s'affaisser et atteindre dans la région de Sidi Khettab 60 m par rapport à la surface du sol. Le forage de Mekhalia (4671 F4) a été arrêté à 61 m sans qu'il ait traversé les grés du Pliocène continental. Les marnes Plaisanciennes au dessous des grés Astien devraient être atteintes à 250 m de profondeur d'après Vignat, 1960.

Au dessous de cette nappe, une autre captive cette fois ci contenue dans les grés Astien. Ces grés affleurent sur les flancs de la Montagne de Bel Hacel et de la forêt de l'Akboube (fig. 31, Chap. III) leur texture est très favorable à l'infiltration et devrait renfermer par conséquent une nappe importante, leur épaisseur est de 100 m. Cependant, aucun forage n'a pu atteindre ces grés dans le versant de la vallée de la soif.

4. ETUDE DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE :

L'étude piézométrique, intéressant les formations du Plio-Quaternaire, se localise en particulier au niveau de la vallée de la soif comprise entre la Montagne de Bel Hacel et la Forêt de l'Akboube, et le synclinal de Bouguirat compris entre les deux forêts de l'Akboube et Ennaro. Cette étude s'est étendue aussi vers l'Ouest dans la région de Oulad Sidi Abd Allah en allant vers Mostaganem.

4.1 TYPE DE PUIITS RENCONTRES DANS LA REGION ET LEUR UTILISATION :

Nous distinguons deux sortes d'ouvrages :

- **Ouvrages peu profonds :** Captant la nappe libre, il s'agit de puits traditionnels construits généralement en brique destinés à l'alimentation humaine, bétail et irrigation de petites parcelles.

- **Ouvrages profonds :** Captant la nappe profonde (nappe des grès Astien et Calabrien), il s'agit de puits sondés, généralement de plus de 50 mètres de profondeur, très abondant dans notre région. Ils sont destinés essentiellement à l'irrigation.

4.2 CARTE PIEZOMETRIQUE :

Nous avons réalisé une campagne piézométrique en Juin 2007. Les mesures effectuées sur 150 puits, bien réparties sur notre région (fig. 46), ont permis de dresser une carte en courbes isopièzes de la région de Bel Hacel en utilisant la méthode de Krigeage à l'aide du logiciel « Surfer ». Cette carte a contribué à définir les différents sens d'écoulement souterrain et les principales zones d'alimentations rencontrés dans la région.

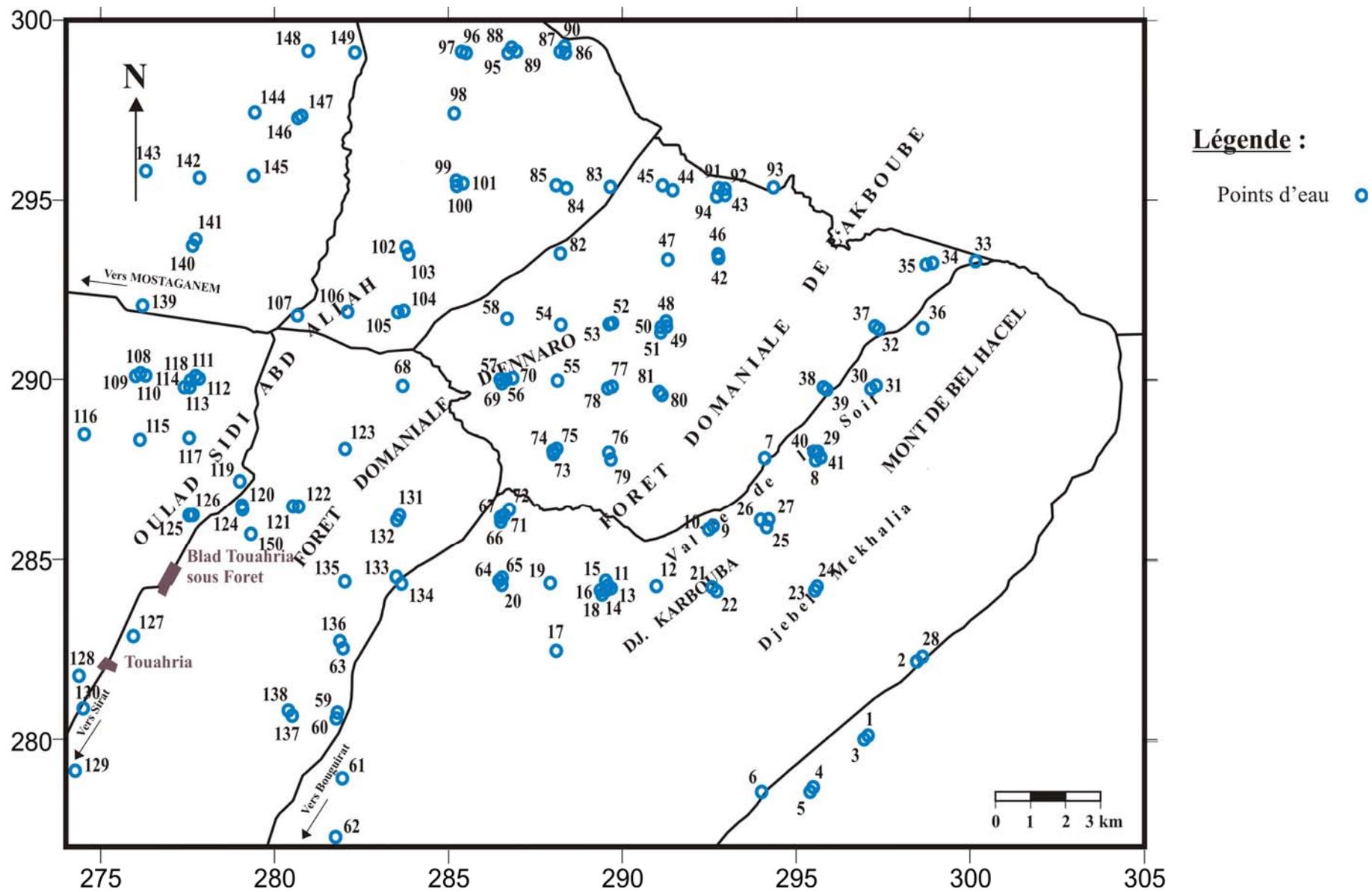


Figure 46 : Carte de localisation des points d'eau.

4.2.1 INTERPRETATION DE LA CARTE PIEZOMETRIQUE :

L'étude de la carte piézométrique de la région de Bel Hacer permet de distinguer un système hydrogéologique complexe dans lequel quatre bassins hydrogéologiques constituant la nappe aquifère de la région, ont tendance à s'individualiser (figure 47) :

- Un écoulement vers l'Ouest permettant de suralimenter la région de Oulad Sidi Abd Allah (vers Mostaganem). Les zones d'alimentations de cette région sont constituées par des petits bombements existant dans la région. Le gradient hydraulique étant particulièrement faible.

- Un écoulement vers le Sud-Est (vers la plaine de la Mina) à partir du piémont Sud de la Montagne de Bel Hacer, Djebel Mekhalia et Djebel Karrouba. Le resserrement des courbes isohypses indique un gradient hydraulique important sur ces flancs.

- Un écoulement vers le Sud-Ouest à partir du piémont Sud de la forêt domaniale d'Ennaro matérialisé par un sens d'écoulement vers Bled Touahria et Sirat puis un autre écoulement en direction de Bouguirat à partir du piémont Sud-Ouest du Djebel Karrouba. Le gradient hydraulique décroît légèrement vers ces localités. Notons que l'alimentation, de ce bassin, se fait aussi à partir du Djebel Mouzaia plus en aval.

- Un écoulement important vers le Nord-Est matérialisé par un axe de drainage qui permet de suralimenter l'Oued Mina par l'intermédiaire de son affluent et où l'interaction Oued Nappe joue un rôle fondamental. Dans cette zone, le gradient hydraulique décroît vers la Mina. L'alimentation se fait principalement à partir du versant Nord de la Montagne de Bel Hacer, le versant Sud de la forêt domaniale de l'Akboube et par la ligne de crête située au Nord-Est de notre région d'étude. Il faut noter l'existence d'un autre écoulement, cette fois-ci, vers le Nord en direction de l'Oued El Kheir où le sens d'écoulement souterrain coïncide globalement avec la direction de cet Oued.

Notons que les lignes de partage des eaux souterraines s'identifient soit à un relèvement du substratum dans les zones de hautes altitudes (par exemple : Forêt domaniale d'Ennaro, Forêt domaniale de l'Akboube et la Montagne de Bel Hacer) soit à des structures faillées non identifiées dans le cas des zones dépressionnaires.

4.2.2 GRADIENT HYDRAULIQUE :

Le gradient hydraulique ou pente de la surface piézométrique est donné par la relation suivante :

$$i = \Delta H / \Delta L$$

Avec :

ΔH : différence de hauteur entre deux courbes équipotentiellles.

ΔL : différence de distance correspondante sur terrain.

L'espacement ou le resserrement des courbes piézométrique est en fonction du gradient hydraulique. Le gradient est d'autant plus fort que les courbes sont plus serrées et inversement. Notons que les zones à faible gradient hydraulique représentent un grand intérêt pour l'exploitation de la nappe.

Le gradient hydraulique au niveau du versant Sud de la Montagne de Bel Hacer et Djebel Mekhalia est important, il est compris entre 0.05 au niveau du Djebel Karrouba et 0.1 vers Djebel Mekhalia. Sur le versant Nord le gradient devient moins important vers l'aval de la Vallée de la Soif (0.03) et plus ou moins faible en allant vers la Mina (0.006).

Entre la Forêt domaniale d'Ennaro et la forêt domaniale de l'Akboube le gradient hydraulique décroît sensiblement vers le Sud-Ouest. Vers Blad Touahria il décroît d'amont en aval de 0.026 à 0.017. En direction de Bouguirat il diminue d'amont en aval de 0.042 à 0.017.

Notons que toute la zone Nord-Ouest du secteur d'étude (vers le Plateau de Mostaganem) est caractérisée par un gradient hydraulique plus ou moins faible estimé à 0.005 environ. L'implantation d'ouvrage de prélèvement d'eau, dans cette zone, donnera certainement les meilleurs rendements. Ce qui confirme la concordance avec l'analyse des variations des épaisseurs (cf. Chap. III).

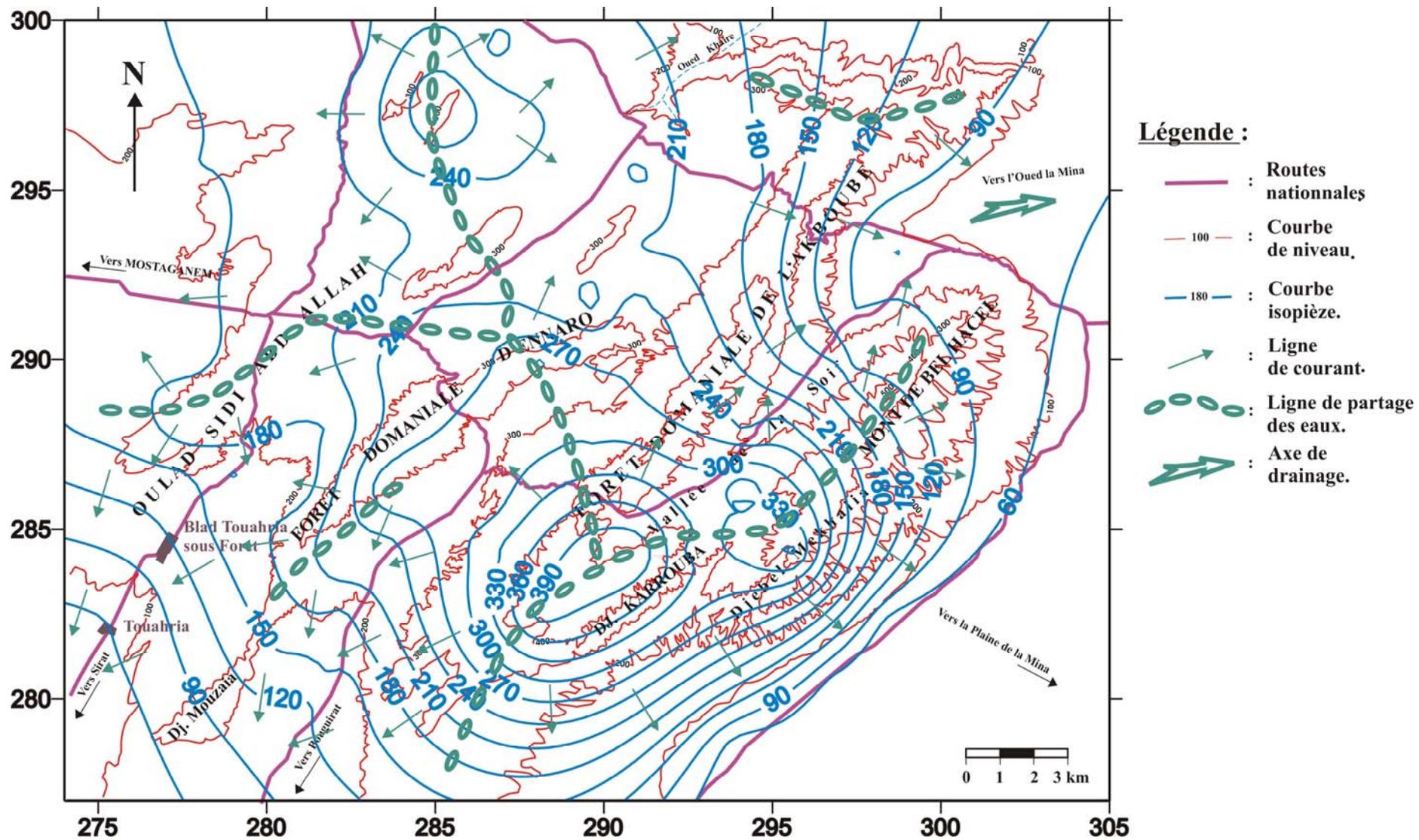


Figure 47 : Carte piézométrique de la région de Bel Hachel (Juin 2007).

5. ETUDE DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES :

Deux paramètres hydrodynamiques caractérisent les aquifères : La transmissivité (T) d'où on peut déduire la perméabilité (K) et le coefficient d'emmagasinement (S). Certains forages ont fait l'objet d'essai de pompage afin d'estimer ces paramètres. La plupart des mesures permettant le calcul de ces paramètres sont relevées dans les forages.

5.1 DEFINITION :

5.1.1 LA TRANSMISSIVITE :

La transmissivité **T** (**m²/s**) correspond, en représentation bidimensionnelle, au produit de la conductivité ou perméabilité « **K** » par l'épaisseur de l'aquifère « **e** » et on la détermine par essai de pompage. C'est le débit qu'une couche aquifère peut fournir sur toute son épaisseur et sur un mètre carré de section horizontale. Elle a la dimension **L² T⁻¹** :

$$\underline{\mathbf{T = K \cdot e}}$$

5.1.2 LE COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT :

C'est le volume d'eau libéré ou emmagasiné par un prisme vertical de la couche aquifère, de section égale à l'unité, pour une baisse unitaire de niveau piézométrique. Ce coefficient se rapporte surtout aux aquifères à nappes captives dont la limite supérieure est constituée par une formation imperméable. Le coefficient d'emmagasinement (S) est un nombre sans dimension.

5.2 METHODES D'INTERPRETATION :

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour le calcul des paramètres hydrodynamiques à savoir la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S). Les figures 1, 2 et 3 représentant les logs des forages utilisés sont portées en annexe.

5.2.1 METHODE DE THEIS :

THEIS (1935) établit les premières expressions de l'écoulement de l'eau souterrain vers les ouvrages de captage :

$$\mathbf{S = (Q / 4 \pi) w (u)} \quad \text{avec} \quad \mathbf{u = r^2 S / 4Tt}$$

- s : rabattement en mètre.
- Q : débit constant de pompage en m³/s.
- t : temps de pompage en seconde.
- r : distance séparant le forage du piézomètre.
- T : transmissivité en m²/s.
- S : coefficient d'emmagasinement, sans dimension.

Pour une réalisation graphique, il est indispensable de construire deux courbes ; l'une appelée courbe standard ou type de THEIS, obtenue sur feuille bi-logarithmique en portant les valeurs de w (u) en fonction de 1/u, l'autre appelée courbe expérimentale, obtenue sur feuille bi-logarithmique, de même module, en portant les valeurs des rabattements (s) en fonction du temps (t). Ces deux courbes réalisées doivent être superposées tout en maintenant leurs axes (x et y) parallèles entre eux et chercher la meilleure coïncidence possible entre les deux courbes. Enfin, choisir un point arbitraire ou point pivot (A) dans la zone de chevauchement des deux feuilles. On introduisant les coordonnées de ce point, lues sur les deux feuilles, dans les équations de THEIS, nous donne la valeur de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S).

5.2.1.1 PIEZOMETRE 142 / 129 :

De coordonnées : x = 277.42 ; y = 291.875 ; et avec un niveau statique égal à 1.57m, ce piézomètre est distant de 8.25 m du forage 142/129. L'essai de pompage au niveau du forage a été exécuté le 05/07/1971 et a duré 78 heures avec un débit de 42.5 l/s. Le calcul de T et S est le suivant :

$$\begin{array}{lll} \mathbf{A} : s = 0.285 \text{ m} & \mathbf{A}' : w(u) = 0.7 & \text{et } r = 8.25 \text{ m} \\ t_0 = 700 \text{ s} & 1/u = 10 & \end{array}$$

A : coordonnées lues sur les axes de la courbe type de THEIS.

A' : coordonnées lues sur les axes de la courbe expérimentale.

$$\mathbf{T = 8.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}}$$

$$\mathbf{S = 3.43 \cdot 10^{-2}}$$

Interprétation de la courbe (fig. 48):

Le rabattement (s) dans le piézomètre, au début du pompage, est important (1m de rabattement en 50 minutes), au-delà il devient faible entre 50 minutes et 78 heures, soit environ un rabattement de 0.8 m en 77 heures ; se qui représente un temps très important qui peut être expliqué probablement par un phénomène d'alimentation retardée de la nappe.

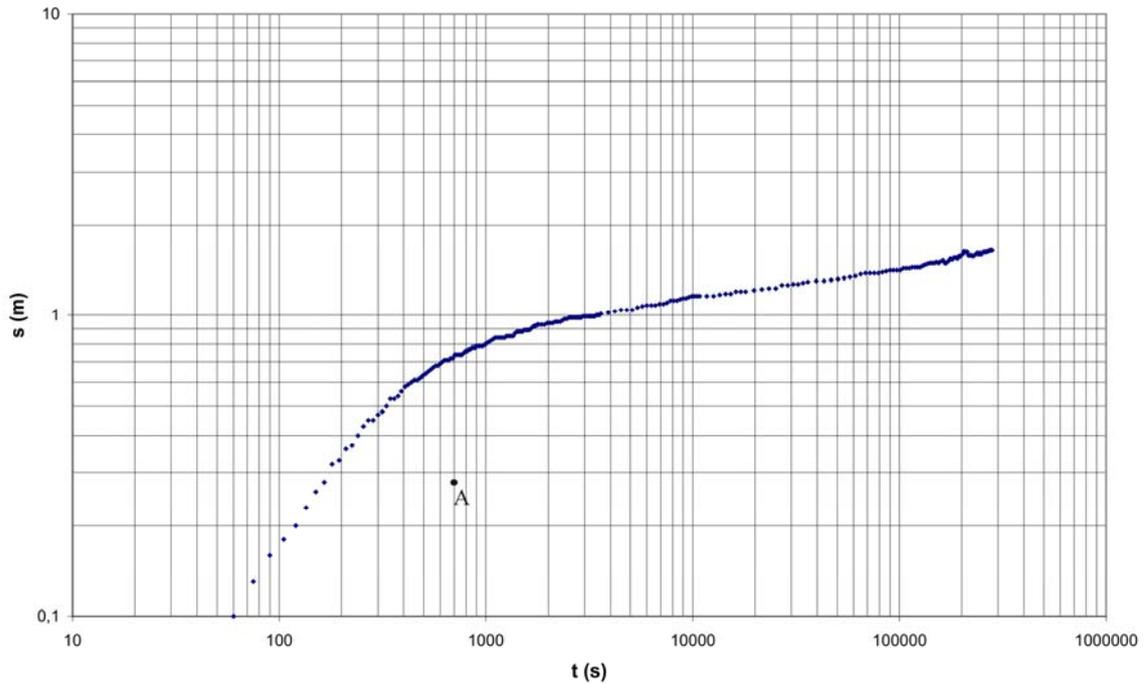


Figure 48 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Theis (Piézomètre 142/129).

5.2.1.2 FORAGE MEKHALIA (SAF-SAF) :

L'essai de pompage a été effectué le 05/06/04 sur le forage Saf-Saf de coordonnées $x = 295.55$; $y = 288.85$ avec un niveau statique de 28.30 m. La durée de cet essai est de 39 heures avec un débit constant de 15 l/s. Notons l'inexistence de piézomètre ce qui nous permet pas de calculer S.

$$\begin{aligned} \text{A} : s &= 1.8 \text{ m} & \text{A}' : w(u) &= 0.7 \\ t_0 &= 425 \text{ s} & 1/u &= 10 \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{T = 4.66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}}$$

Interprétation de la courbe (fig. 49) :

Au début de pompage et durant un temps relativement court, le rabattement dans le forage Mekhalia est important (environ 7 m en 16 minutes seulement). Au-delà de ce temps le rabattement se fait progressivement pour atteindre 15 m en 27,5 heures et à partir de cette heure la courbe de descente se stabilise jusqu'à la fin du pompage pourtant avec le même débit de pompage. Notons que ce phénomène est sensiblement le même que celui constaté dans le piézomètre 142/129.

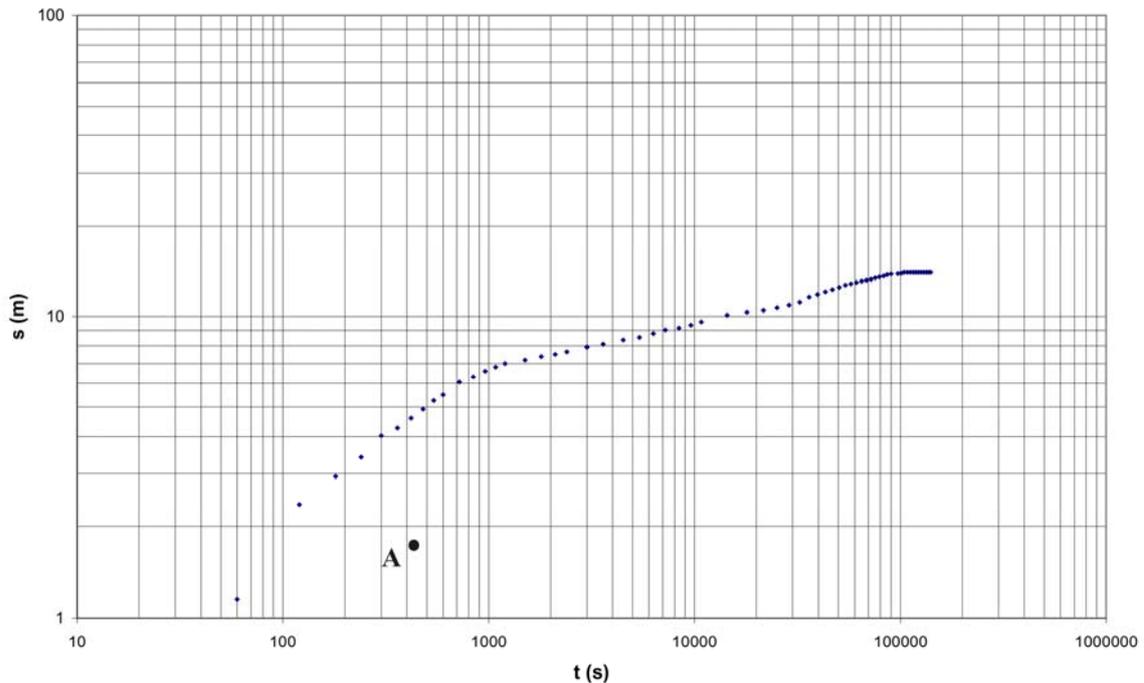


Figure 49 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Theis (Forage Mekhalia : Saf-Saf).

5.2.1.3 FORAGE SOUAFLIA :

L'essai de pompage a débuté le 01/08/92 sur ce forage de coordonnées : $x = 283.70$; $y = 282.50$. Son niveau statique est égal à 11.80 m avec une durée d'essai de 28 heures et un débit constant de 14 l/s. Les calculs sont les suivants :

$$A : s = 14 \text{ m}$$

$$A' : w(u) = 3$$

$$t_0 = 10050 \text{ s}$$

$$1/u = 100$$

$$\underline{T = 2.40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}$$

Interprétation de la courbe (fig. 50) :

L'essai réalisé au niveau de ce forage n'a duré que 28 heures. Du début du pompage jusqu'à environ 2.77 heures, le rabattement est important, soit environ 18 m. Au-delà de ce temps le rabattement se fait progressivement d'une façon moins prononcée, soit 11 m en un temps estimé à 25.23 heures, se qui traduit toujours le même phénomène déjà signalé dans les deux courbes précédentes.

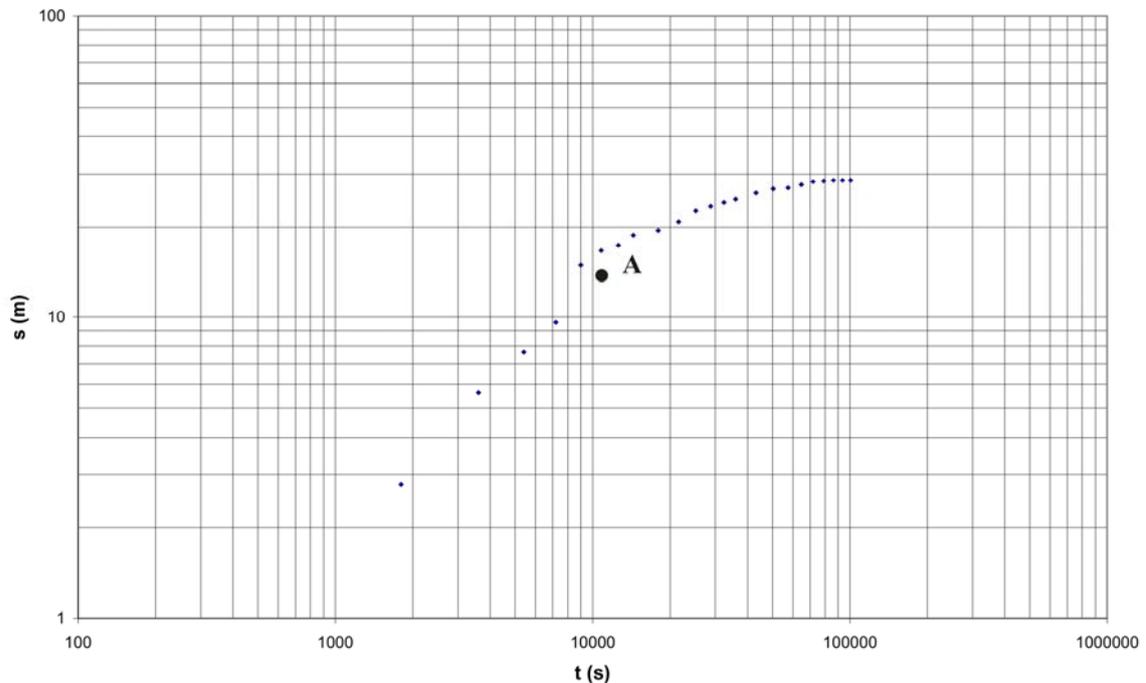


Figure 50 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Theis (Forage Souafli).

5.2.2 METHODE DE JACOB :

La méthode de JACOB (1946) s'appuie elle aussi sur la formule de THEIS, cependant les conditions de son application sont plus restrictives que celle de la méthode de THEIS. L'expression générale de la méthode graphique de JACOB est :

$$S = (0.183 Q / T) \text{Log} (2.25 T t / r^2 S)$$

La transmissivité (T) peut être calculée par la méthode d'approximation logarithmique de JACOB :

$$T = 0.183 Q / \Delta s$$

Le coefficient d'emmagasinement (S), déterminé à partir des courbes de piézomètres, est donné par la formule suivante :

$$S = 2.25 T t_0 / r^2$$

- Avec** :
- s : rabattement en mètre.
 - Q : débit de pompage en m³/s.
 - T : transmissivité en m²/s.
 - t : temps de pompage en seconde.
 - t₀ : le temps d'intersection entre la droite de descente et l'axe des x.
 - r² : distance du piézomètre au puits ou forage pompé en mètre.
 - Δs : variation du rabattement pour un cycle logarithmique.

Pour la réalisation graphique, on porte sur un graphe semi-logarithmique les valeurs des rabattement en échelle arithmétiques en fonction du temps en échelle logarithmique. On prolonge la ligne droite passant par les points obtenus jusqu'à l'axe des abscisses et l'intersection de cette droite avec cet axe nous donne le t₀. Δs est obtenu par un cycle logarithmique de temps.

5.2.2.1 PIEZOMETRE 142/129 (fig. 51):

Pour la droite (a) : $\underline{T_a = 1.21 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}}$ avec : Δs = 0.64 m
 $\underline{S_a = 2.24 \cdot 10^{-2}}$ t₀ = 56 s

Pour la droite (b) : $\underline{T_b = 2.50 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}}$ avec : Δs = 0.31 m
 $\underline{S_b = 2.64 \cdot 10^{-3}}$ t₀ = 3.2 s

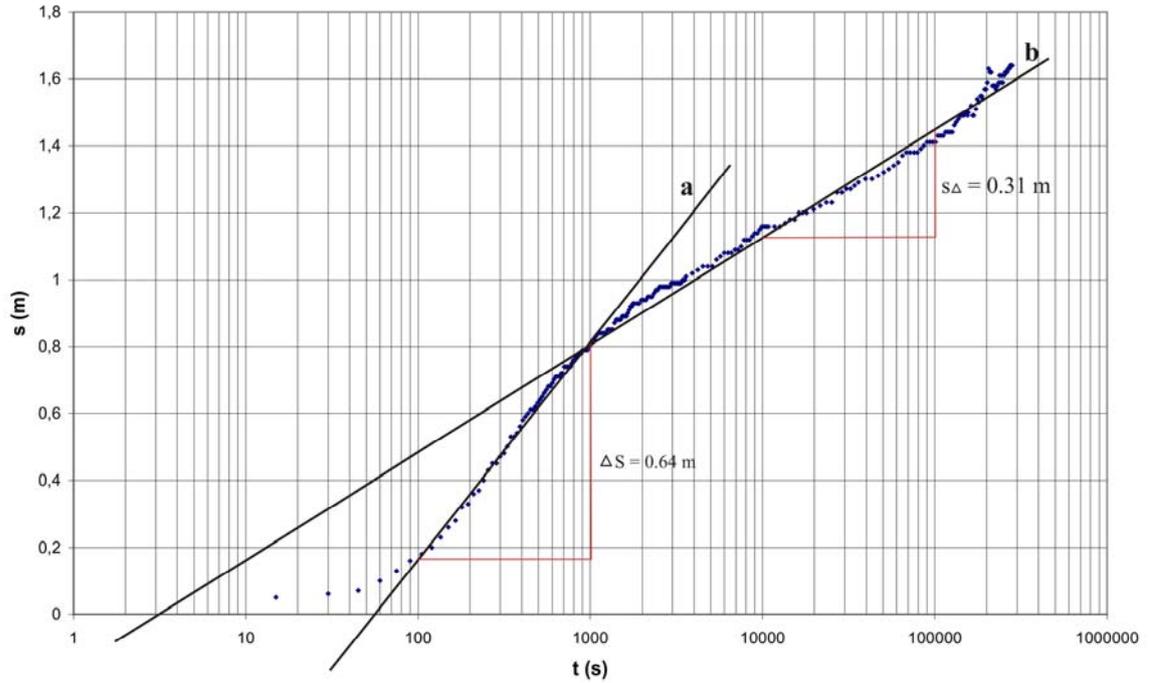


Figure 51 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Jacob (Piézomètre 142/129).

5.2.2.2 FORAGE MEKHALIA (SAF-SAF) (fig. 52) :

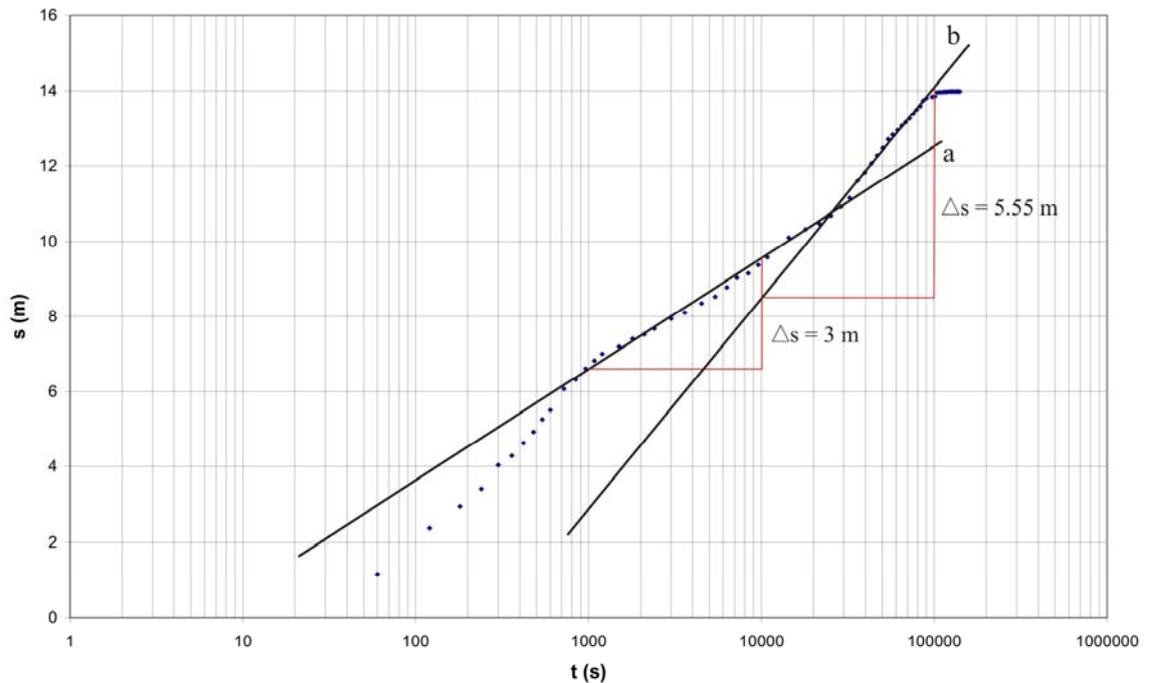


Figure 52 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Jacob (Forage Mekhalia : Saf-Saf).

Pour la droite (a) : $T_a = 9.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec : $\Delta s = 3 \text{ m}$
 Pour la droite (b) : $T_b = 4.94 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec : $\Delta s = 5.55 \text{ m}$

5.2.2.3 FORAGE SOUAFLIA (fig. 53) :

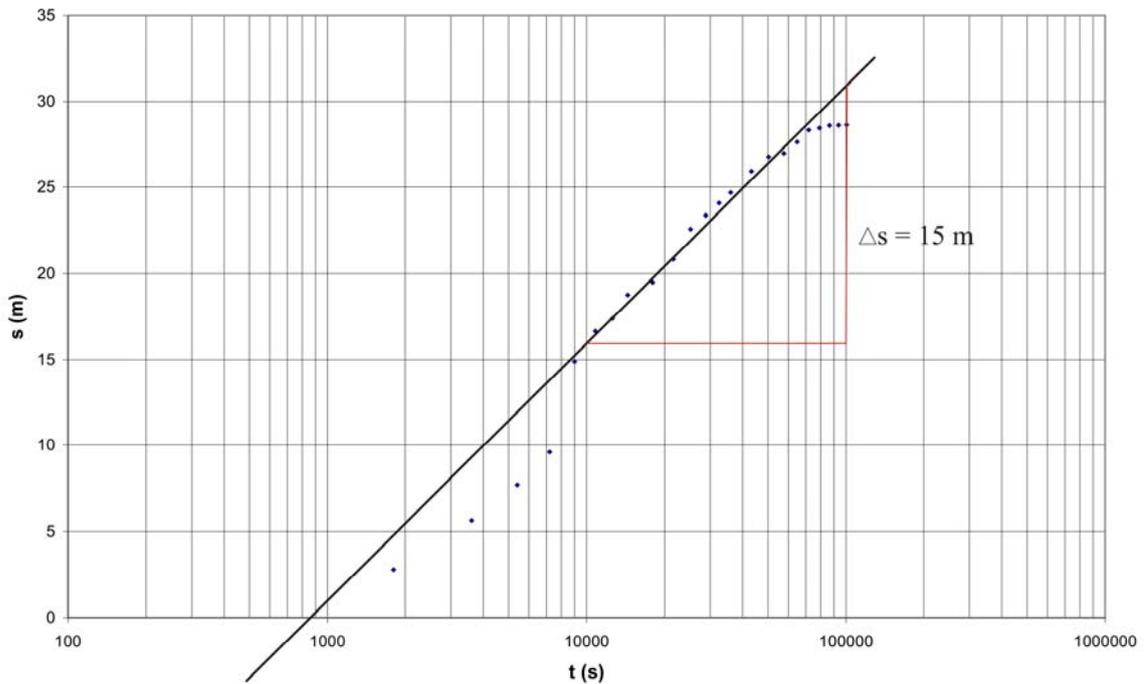


Figure 53 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Jacob (Forage Souaflia).

$$T = 1.70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{avec : } \Delta s = 15 \text{ m}$$

Notons que les deux ouvrages (piézomètre 142/129 et forage Mekhalia) présentent, après un certain temps de pompage, un dédoublement de la pente de la droite. Ce phénomène est dû probablement à l'existence de limites latérales étanches provoquées par les nombreuses failles signalées dans notre région.

5.2.3 METHODE DE LA REMONTÉE DE THEIS :

Une fois le pompage achevé, le niveau cesse de descendre pour remonter vers sa position d'origine. On mesure la remontée par le rabattement résiduel Δs , c'est-à-dire la différence entre le niveau original de l'eau avant le pompage et le niveau mesuré à un certain moment t' de la remontée ; t' représente le temps écoulé depuis l'arrêt de pompage. Le rabattement résiduel de la remontée selon THEIS s'exprime :

$$\Delta s = 0.183 Q / T (\log 2.25 tT / r^2 S - \log 2.25 t'T / r^2 S')$$

Δs : rabattement résiduel en mètre.

Q : débit de remontée = débit de pompage en m^3/s .

T : transmissivité en m^2/s .

t : temps en seconde depuis le début de pompage.

t' : temps en seconde depuis l'arrêt de pompage.

r : distance en mètre entre le piézomètre de mesure et le puits de pompage.

S : coefficient d'emménagement durant le pompage.

S' : coefficient d'emménagement de la remontée.

Si : $S = S'$, l'expression devient :

$$\Delta s = 0.183 Q / T \text{ Log } t/t'$$

Sur une feuille semi-logarithmique on porte les valeurs des rabattements résiduels (Δs) en échelle arithmétique en fonction du t/t' en échelle logarithmique et on trace une droite passant par l'ensemble des points. On pourra lire sur le graphe la valeur de Δs pour un cycle logarithmique de t/t' . L'équation devient :

$$T = 0.183 Q / \Delta s$$

Cette méthode, a des inconvénients évidents dont celle de ne pas permettre d'accéder au calcul du coefficient d'emménagement.

5.2.3.1 PIEZOMETRE 142/129 (fig. 54):

Pour la droite (a) : $T_a = 1.14 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ Avec : $\Delta s = 0.68 \text{ m}$.

Pour la droite (b) : $T_b = 3.53 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ Avec : $\Delta s = 0.22 \text{ m}$.

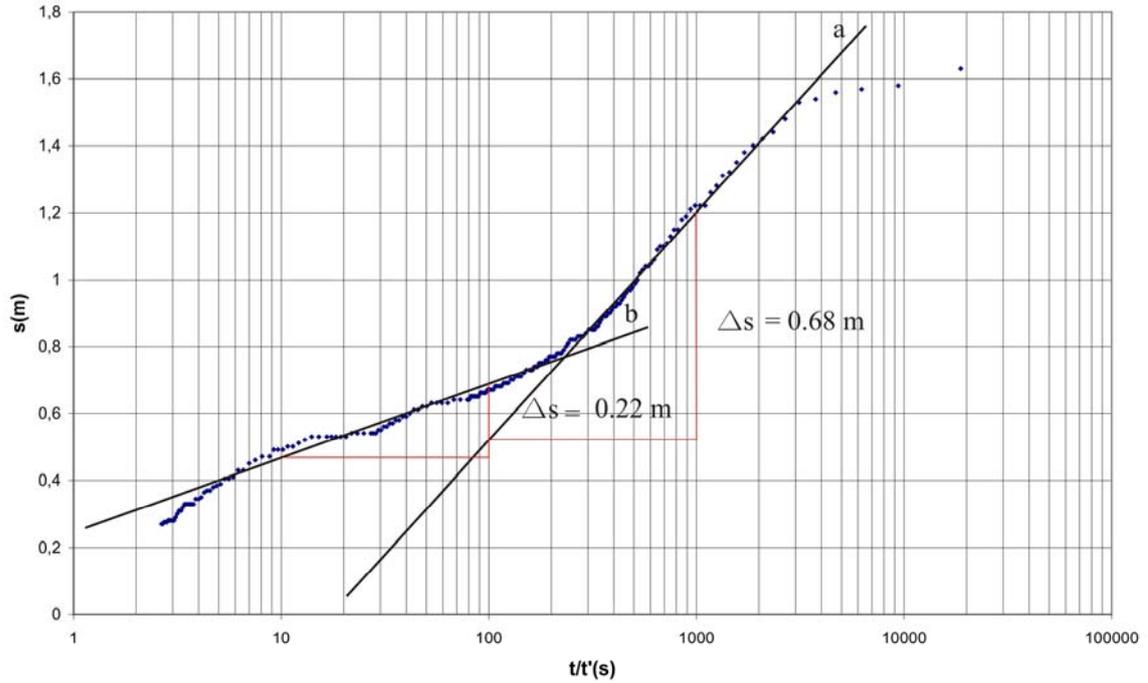


Figure 54 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de la remontée de Theis (Piézomètre 142/129).

5.2.3.2 FORAGE MEKHALIA (SAF-SAF) (fig. 55) :

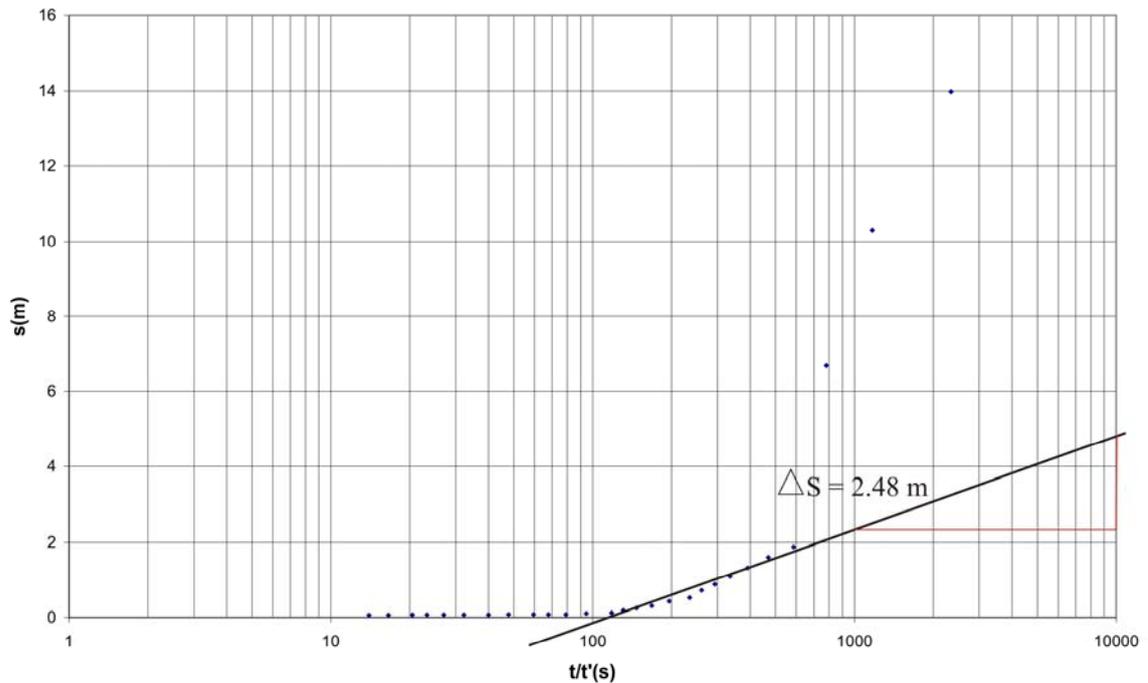


Figure 55 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de la remontée de Theis (Forage Mekhalia :Saf-Saf).

$$\underline{T = 1.10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}}$$

avec : $\Delta s = 2.48 \text{ m}$

5.2.3.3 FORAGE SOUAFLIA (fig. 56) :

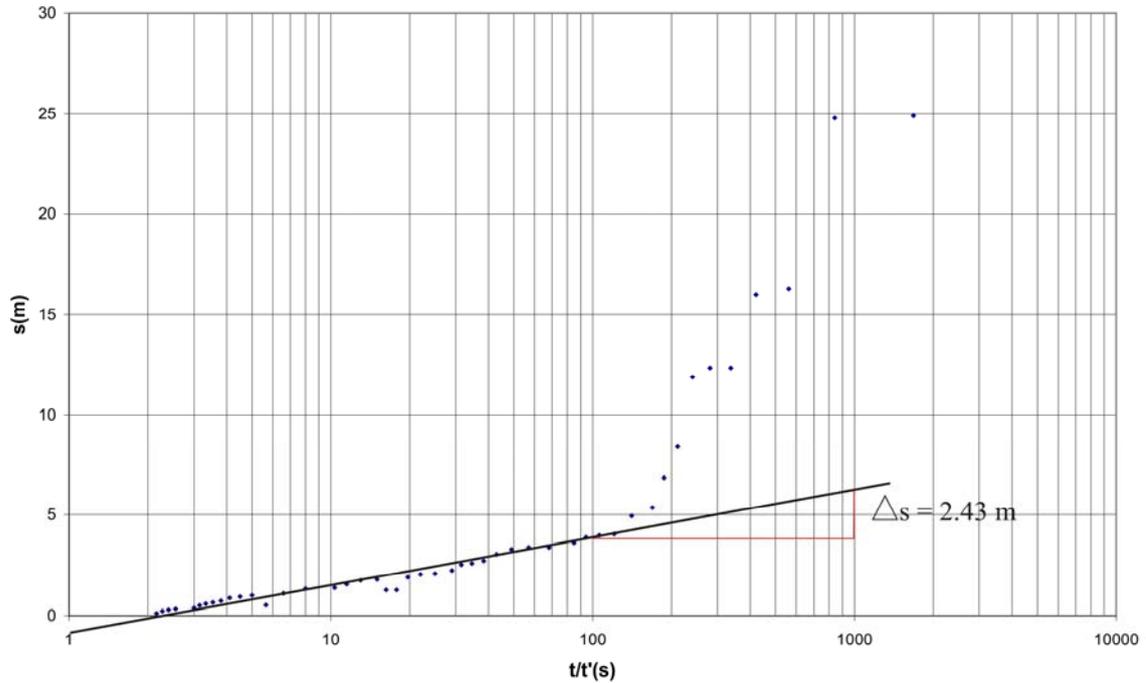


Figure 56 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de la remontée de Theis (Forage SouafLIA).

$$\underline{T = 1.05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}}$$

avec : $\Delta s = 2.43 \text{ m}$

Remarque : En utilisant ces méthodes et surtout celle de Theis, nous avons constaté que l'allure des courbes des descentes des deux premiers forages présente en général trois segments. Au début de pompage, ce qui correspond au premier segment, la nappe réagit comme le ferait une nappe captive. Au second segment et durant un temps relativement long la pente de la courbe devient plus faible, due probablement à la recharge gravitaire provenant des formations sus-jacentes. En se rapportant aux logs des forages, on remarque que l'aquifère est contenu dans des grés surmontés par des sables à granulométrie fine (cf. Chap. III), ce qui confirme en général le phénomène d'égouttement des nappes libres. Pour cette raison nous allons également utilisé la méthode de BOULTON. Le troisième segment se stabilise et se superpose à la courbe de THEIS.

5.2.4 METHODE DE BOULTON (fig. 57) :

La solution générale de l'équation de l'écoulement est une équation différentielle que l'on peut symboliser par analogie avec l'équation de THEIS :

$$s = [Q / 4 \pi T] W (U_{AY}, r/B)$$

- $W (U_{AY}, r/B)$ est la fonction de puits de Boulton.
- Si le temps est faible, l'équation est celle du premier segment de la courbe de descente :

$$s = [Q / 4 \pi T] W (U_A, r/B) \quad \text{où} \quad U_A = r^2 S_A / 4 T t$$

- Si le temps est important, l'équation est celle du troisième segment de la courbe de descente :

$$s = [Q / 4 \pi T] W (U_Y, r/B) \quad \text{où} \quad U_A = r^2 S_Y / 4 T t$$

Le facteur d'égouttement est défini par :

$$B = \sqrt{T / \alpha S_Y} \quad \text{et s'exprimé en mètres.}$$

$1 / \alpha$ est une constante empirique, elle s'appelle « indice de retard de Boulton » et s'exprime en jours. On l'utilise en association avec la courbe d'indices de retard de Boulton (figure 58) pour déterminer le temps t_{wt} à partir duquel l'égouttement retardé cesse d'influer sur les rabattements.

La réalisation graphique se fait sur une feuille bi logarithmique de même module que celui des courbes types, en portant la valeur du rabattement s en fonction du temps correspondant t . On cherche la meilleure coïncidence entre la courbe de type A (fig. 61) et la première partie de la courbe d'essai en maintenant les axes des deux feuilles parallèles entre eux. Relever la valeur de r/B de la courbe type A correspondante et choisir ensuite un point arbitraire A dans la zone de chevauchement et lire les coordonnées correspondantes sur les deux feuilles (s , t , $1/U_A$ et $W (U_A, r/B)$). Répéter la même chose avec la dernière partie de la courbe d'essai avec la courbe type Y, tout en gardant la même valeur de r/B , choisir un autre point arbitraire A' et lire les valeurs correspondantes (s , t , $1/U_Y$, et $W (U_Y, r/B)$).

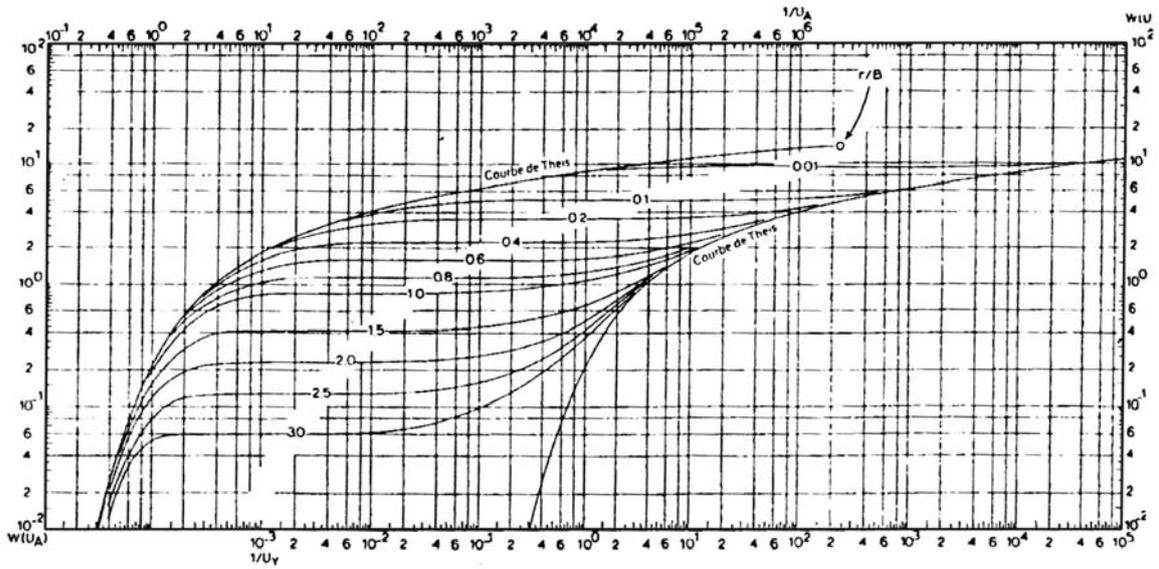


Figure 57 : Famille de courbes type de Boulton : $W(U_A, r/B)$ fonction de $1/U_A$ et $W(U_Y, r/B)$ fonction de $1/U_Y$, pour différentes valeurs de r/B .

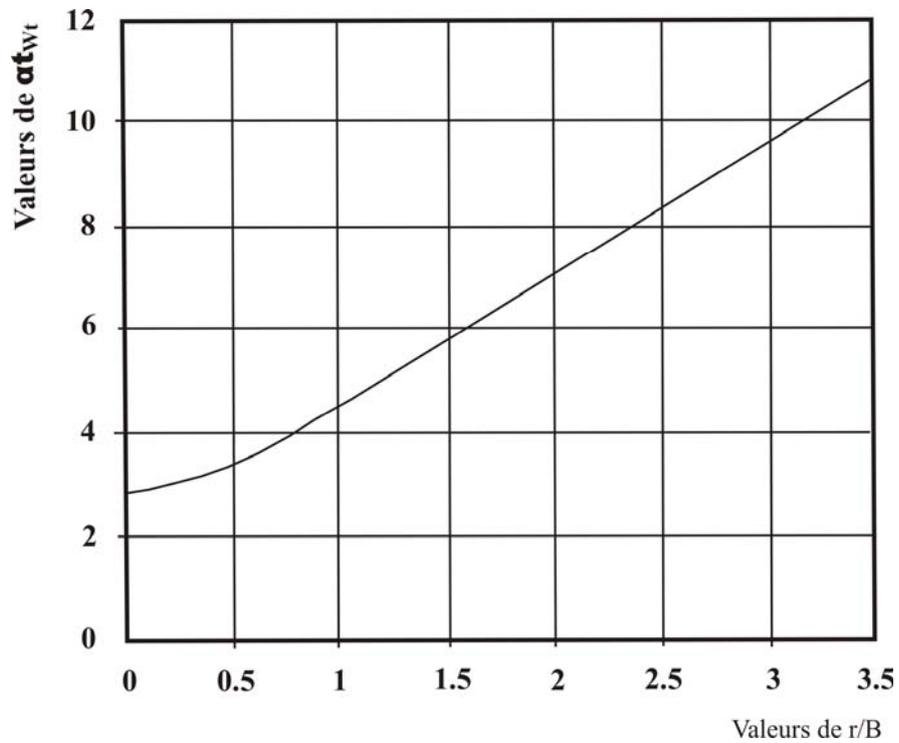


Figure 58 : Courbe des indices de retard de Boulton (1963).

5.2.4.1 PIEZOMETRE 142/129 (fig. 59) :

Les coordonnées lues après superposition des deux courbes au niveau de la première partie (A) et de la deuxième partie (A') de la courbe d'essai sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{A} : \quad r / B &= 0.4 & s &= 0.5 \text{ m} \\ W(U_A) &= 1 & t &= 800 \text{ s} \\ 1 / U_A &= 10 \end{aligned}$$

$$\underline{\mathbf{T}_A = 6.76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\underline{\mathbf{S}_A = 3.17 \cdot 10^{-2}}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}' : \quad r / B &= 0.4 & s &= 1 \text{ m} \\ W(U_Y) &= 1 & t &= 50\,000 \text{ s} \\ 1 / U_Y &= 10 \end{aligned}$$

$$\underline{\mathbf{T}_Y = 3.38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\underline{\mathbf{S}_Y = 9.93 \cdot 10^{-1}}$$

- Le calcul de B :

$$\mathbf{B} = r / r/B \quad \underline{\mathbf{B} = 20.62 \text{ m}}$$

Comme $r = 8.25 \text{ m}$

- Calculons maintenant α :

$$\mathbf{\alpha} = \mathbf{T} / \mathbf{S}_Y \mathbf{B}^2 \quad \mathbf{\alpha} = 0.69 \text{ j}^{-1}$$

Pour $r / B = 0.4$, la courbe des indices de retard de Boulton (fig. 58) donne $\alpha t_{wt} = 3.21$, soit :

$$t_{wt} = 3.21 / \alpha = 3.21 / 0.69$$

$$\underline{\mathbf{t}_{wt} = 4.65 \text{ jours}}$$

Temps pour lequel l'égouttement retardé cesse d'influer sur les rabattements.

5.2.4.2 FORAGE MEKHALIA (fig. 60) :

Les coordonnées lues après superposition des deux courbes au niveau de la première partie (A) et de la deuxième partie (A') de la courbe d'essai sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{A} : \quad r / B &= 0.2 & s &= 5.25 \text{ m} \\ W(U_A) &= 2 & t &= 4000 \text{ s} \\ 1 / U_A &= 100 \end{aligned}$$

$$\underline{\mathbf{T}_A = 4.54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\mathbf{A}' : \quad r / B = 0.4 \quad s = 13 \text{ m}$$

$$W(U_Y) = 4$$

$$t = 100\,000 \text{ s}$$

$$1 / U_Y = 100$$

$$\underline{T_Y = 3.67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}$$

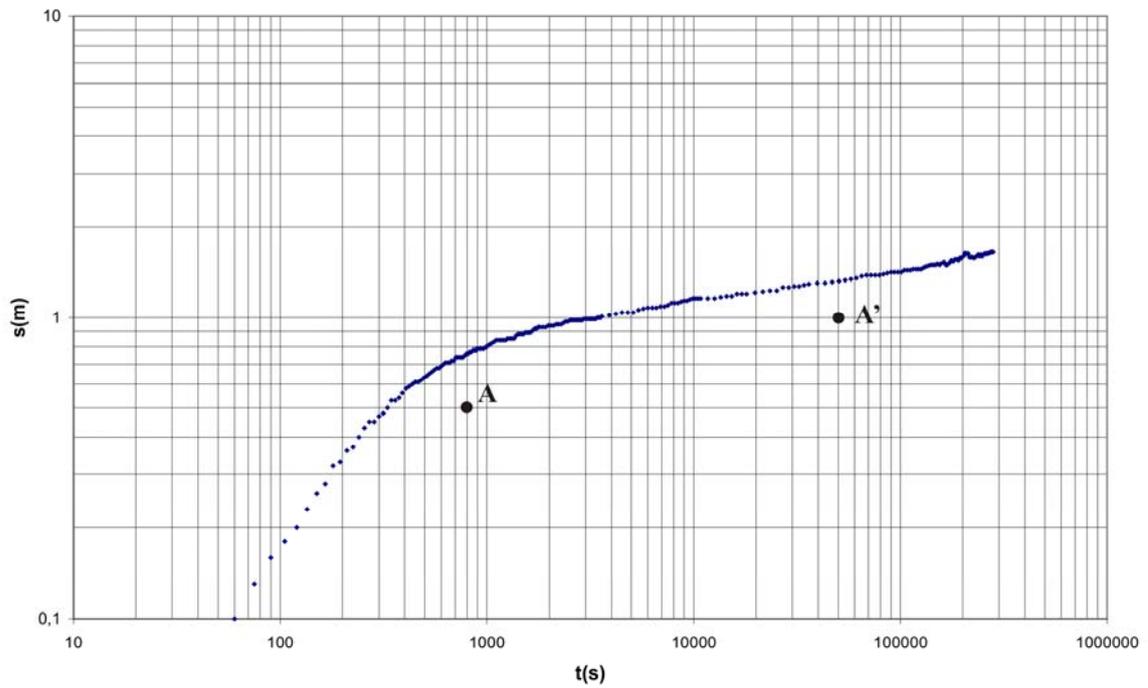


Figure 59 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Boulton « descente » (Piézomètre 142/129)

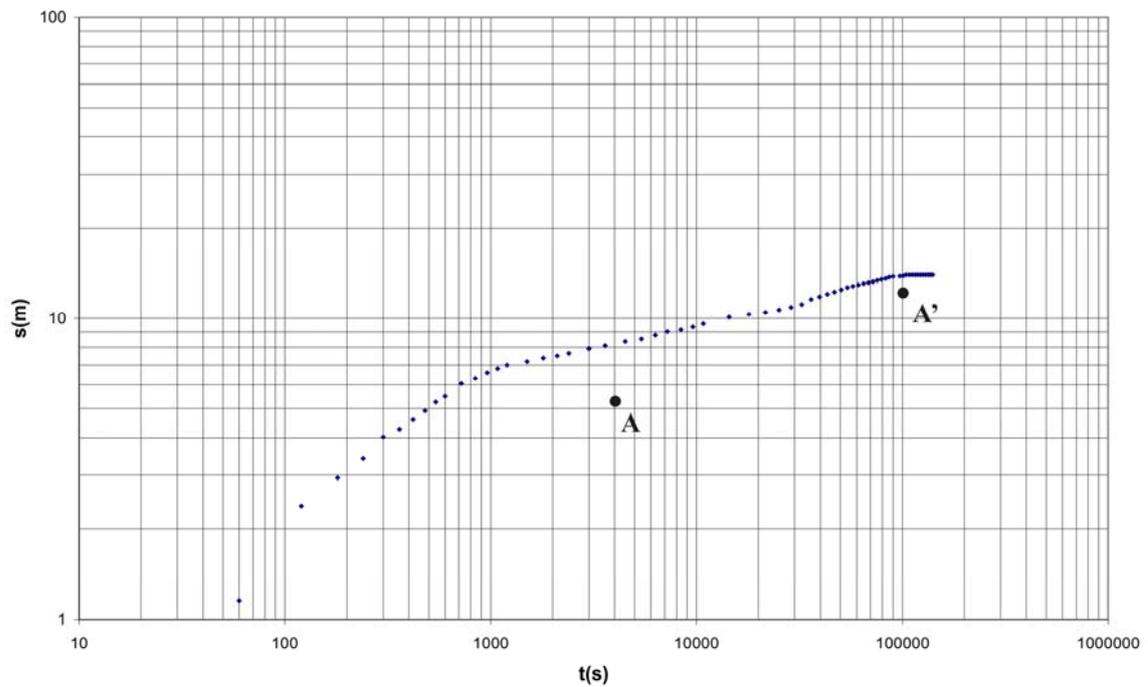


Figure 60 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Boulton « descente » (Forage Mekhalia).

6. TABLEAU REGROUPANT LES RESULTAS DE T ET S CALCULES PAR LES QUATRE METHODES :

Les transmissivités calculées à partir des différentes méthodes (tableau 22) sont comprises entre $1,70.10^{-4}$ et $3,53.10^{-2}$ m²/s avec des coefficients d'emmagasinement qui varient dans l'ensemble de $2,64.10^{-3}$ à $3,43.10^{-2}$, d'après ces valeurs il s'agit bien d'une nappe libre à semi libre. Notons que nous n'avons pas pu calculer S_A et S_Y au niveau du forage Mekhalia car il s'agit d'un puits de pompage. Le forage Souafliia présente une courbe dont l'allure ne permet pas l'ajustement sur les courbes types de Boulton et dont le premier tronçon correspondrait à une nappe captive (voir figure 50).

Methodes	Piézomètre 142/129	Forage Mekhalia	Forage Souafliia
Theis	$T = 8.35.10^{-3}$ m ² /s $S = 3.43.10^{-2}$	$T = 4.66.10^{-4}$ m ² /s	$T = 2.40.10^{-4}$ m ² /s
Jacob	$T_a = 1.21.10^{-2}$ m ² /s $S_a = 2.24.10^{-2}$ $T_b = 2.50.10^{-2}$ m ² /s $S_b = 2.64.10^{-3}$	$T_a = 9.15.10^{-4}$ m ² /s $T_b = 4.94.10^{-4}$ m ² /s	$T = 1.70.10^{-4}$ m ² /s
Remontée de Theis	$T_a = 1.14.10^{-2}$ m ² /s $T_b = 3.53.10^{-2}$ m ² /s	$T = 1.10.10^{-3}$ m ² /s	$T = 1.05.10^{-3}$ m ² /s
Boulton	$T_A = 6.76.10^{-3}$ m ² /s $S_A = 3.17.10^{-2}$ $T_Y = 3.38.10^{-3}$ m ² /s $S_Y = 9.93.10^{-1}$	$T_A = 4.54.10^{-4}$ m ² /s $T_Y = 3.67.10^{-4}$ m ² /s	

Tableau 22 : Valeurs de T et S selon les quatre méthodes.

7. CALCUL DES PERMEABILITES :

7.1 PERMEABILITES CALCULEES A PARTIR DES TRANSMISSIVITES :

Nous allons estimer les valeurs de la perméabilité à partir des logs des forages utilisés lors des pompages d'essai. Ces valeurs sont représentées dans le tableau 23.

$$T = K \cdot e$$

avec :

T : Transmissivité en m^2/s .

K : perméabilité en m/s .

e : épaisseur de l'aquifère en mètre.

Points d'eau	Perméabilités(K) (méthode de Theis) en m/s	Perméabilités(K) (méthode de Jacob) en m/s	Perméabilités(K) (méthode remontée de Theis) en m/s	Perméabilités(K) (méthode de Boulton) en m/s
Piézomètre 142/129	$K = 1.09.10^{-4}$	$K_a = 1.59.10^{-4}$ $K_b = 3.28.10^{-4}$	$K_a = 1.5.10^{-4}$ $K_b = 4.64.10^{-4}$	$K_A = 8.89.10^{-5}$ $K_Y = 4.44.10^{-5}$
Forage Mekhalia	$K = 5.5.10^{-6}$	$K_a = 1.08.10^{-5}$ $K_b = 5.8.10^{-6}$	$K = 1.30.10^{-4}$	$K_A = 5.4.10^{-6}$ $K_Y = 4.3.10^{-6}$
Forage Souafli	$K = 2.60.10^{-6}$	$K = 1.80.10^{-6}$	$K = 1.14.10^{-5}$	

Tableau 23 : Perméabilités calculées à partir des transmissivités.

Les perméabilités calculées à partir des différentes méthodes sont comprises entre $4.3. 10^{-6}$ et $4.64. 10^{-4}$ m/s, traduisant ainsi une mauvaise perméabilité (sable très fin) et type de formation : semi perméable, selon CASTANY (1982).

7.2 PERMEABILITES CALCULEES A PARTIR DE L'ETUDE GRANULOMETRIQUE :

Hazen a choisi le paramètre d_{10} pour le fait que la perméabilité est conditionnée par le grain le plus fin qui remplit les interstices des gros grains, déterminant la section effective des canaux interstitiels (Baiche, 1993). L'expression s'écrit :

$$K = 100 d_{10}^2$$

Les perméabilités de l'ensemble de nos échantillons calculées à partir de la formule de Hazen sont reportées sur le tableau suivant :

N° Echantillon	d ₁₀	K
1	0.0003	9. 10 ⁻⁶
2	0.00049	2.4. 10 ⁻⁵
3	0.00048	2.3. 10 ⁻⁵
4	0.0007	4.9. 10 ⁻⁵
5	0.00052	2.7. 10 ⁻⁵
6	0.000525	2.75. 10 ⁻⁵
7	0.00045	2. 10 ⁻⁵
8	0.000395	1.5. 10 ⁻⁵
9	0.000415	1.7. 10 ⁻⁵
10	0.00038	1.44. 10 ⁻⁵
11	0.000375	1.4. 10 ⁻⁵

Tableau 24 : Détermination des perméabilités à partir de la formule de Hazen.

En comparant les résultats des perméabilités du tableau 23 et 24, on remarque qu'avec la méthode de BOULTON les résultats sont plus cohérents avec la nature lithologique de l'aquifère. Les perméabilités calculées à partir de la formule de HANZEN sont du même ordre de grandeur que celle calculées à partir des pompages d'essai par la méthode de BOULTON :

K (méthode de Boulton) : 4.3.10⁻⁶ à 8.89.10⁻⁵ m/s.

K (Analyse granulométrique) : 9.10⁻⁶ à 4.9.10⁻⁵ m/s.

8. CONCLUSION :

Notre région d'étude comporte un ensemble de formations perméable à peu perméable. Ces formations correspondent, en général, à un Calabrien ou Pliocène supérieur gréseux à passées sableuses, surmontées par un Quaternaire sableux former localement par une croûte calcaro-gréseuse. Le tout reposant sur un substratum marneux imperméable du miocène supérieur et du pliocène inférieur.

La campagne piézométrique réalisée en juin 2007 sur 150 points dans la région de Bel Hacer, a permis de donner une carte en courbe isopièzes délimitant quatre bassins hydrogéologiques. La direction du sens de l'écoulement des eaux souterraines se fait dans diverses directions selon le bassin hydrogéologique avec un gradient hydraulique compris entre 0.1 (Djebel Mekhalia) et 0.005 (vers le Plateau de Mostaganem). L'alimentation de la nappe se fait à partir des différents reliefs de la région dont les plus importants sont : la Montagne de Bel Hacer, la forêt de L'akboube et la forêt d'Ennaro.

Les transmissivités calculées à partir des différentes méthodes (tableau 22) sont comprises entre $1,70.10^{-4}$ et $3,53.10^{-2}$ m²/s avec des coefficients d'emmagasinements qui varient dans l'ensemble de $2,64.10^{-3}$ à $3,43.10^{-2}$. La méthode de BOULTON, nous semble la plus représentative et la plus cohérente avec la nature des terrains. Les perméabilités ainsi calculées avec l'expression de HAZEN, à partir de l'analyse granulométrique et celles calculées à partir des transmissivités par la méthode de BOULTON sont de même ordre de grandeur (10^{-6} à 10^{-5} m/s).

CHAPITRE V

Hydrochimie

1. INTRODUCTION :

Lors des précipitations, l'eau ruisselle ou s'infiltré et se charge en composants des sols et des roches mères. Ceci lui donne une identité de base. Cependant, l'étude hydrochimique permet de préciser d'une part la répartition de ces composants après leur dissolution, de suivre leur évolution spatio-temporelle et de compléter les résultats de l'étude hydrogéologique. D'autre part, la qualité et la quantité de ces divers constituants définissent une eau, précisent et limitent son aptitude aux diverses utilisations à savoir les besoins de l'homme, besoin industriel, irrigation etc....

L'étude de cette partie est basée sur deux campagnes de prélèvements qui ont eu lieu l'une en Septembre 2006 et l'autre en septembre 2007 avec cependant quelques autres forages (fig. 61).

Les échantillons prélevés ont été analysés au laboratoire d'hydrochimie de l'A.N.R.H. d'Oran. Les paramètres physiques mesurés sont le PH, le résidu sec, la minéralisation et la conductivité. Les paramètres chimiques sont les cations Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+ ; les anions sont Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- et NO_3^- (tabl. 3 et 4 en Annexe).

2. PARAMETRES CHIMIQUES :

2.1 DOSAGE DU Cl^- :

Dosés par la méthode de Mohr, les chlorures sont dosés en milieu neutre avec une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium.

2.2 DOSAGE DE SO_4^- :

Ils sont dosés par la méthode gravimétrique par l'acide chlorhydrique.

2.3 DOSAGE DU HCO_3^- :

Les bicarbonates sont dosés par un acide minéral dilué (acide chlorhydrique); en présence d'un indicateur coloré (vert de bromotynol).

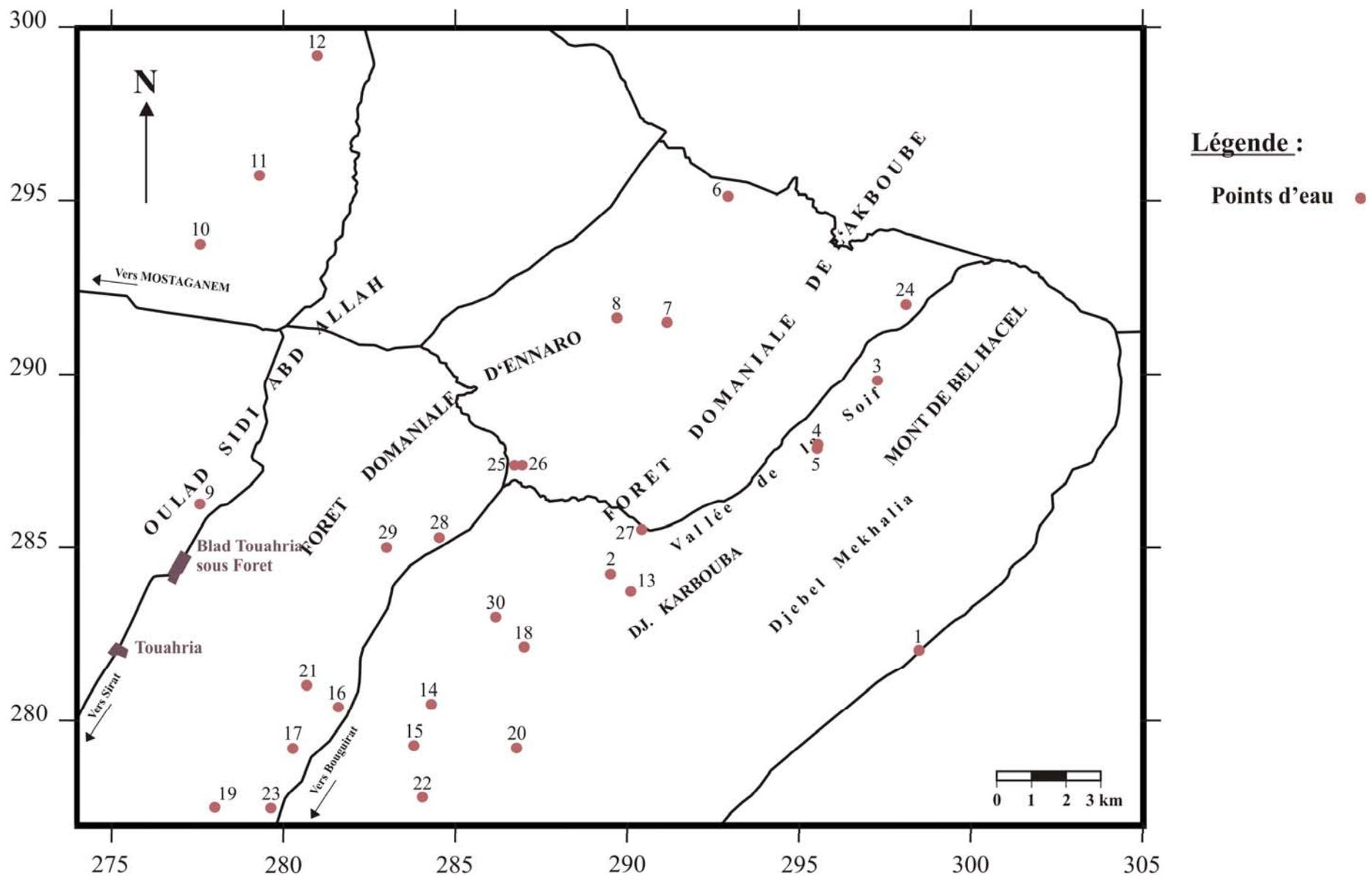


Figure 61 : Localisation des points d'eau destinés à l'analyse physico-chimique.

2.4 DOSAGE DU Mg⁺⁺ :

La teneur en Mg⁺⁺ est obtenue par la différence des valeurs du TH (titre hydrotimétrique) et du Calcium en (mg/l).

2.5 DOSAGE DU Ca⁺⁺ :

L'ion calcium est dosé par complexométrie avec l'acide ethydamine tétracétique (E.D.T.A.) en présence d'hydroxyde de sodium et d'un indicateur coloré (Murixide).

2.6 DOSAGE DU Na⁺ ET DE K⁺ :

Ils sont dosés par un photomètre de flamme lorsque les atomes d'un élément sont excités par une flamme, ils émettent des radiations de longueur d'onde déterminée dont l'intensité peut être mesurée par spectrométrie. La concentration initiale du cation à doser est déduite de la valeur absolue de l'intensité de l'émission spectrale mesurée.

2.7 TITRE OU DEGRÉ HYDROTIMÉTRIQUE (TH) OU DURETÉ

TOTALE :

La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations calciques et magnésiennes, elle est déterminée par complexométrie (E.D.T.A.) en présence d'une solution tampon et d'un indicateur coloré (noir d'ériochrome). Le degré hydrotimétrique s'exprime en degré Français (°F) et peut être calculé comme suit :

$$dh^{\circ} = 2.5 \times r C \text{ (mg/l)} + 4.1 \times r Mg \text{ (mg/l)} / 10$$

2.8 LA MINÉRALISATION ET LE RÉSIDU SEC:

C'est la mesure de la quantité de matières minérales contenues dans l'eau. Une bonne eau ne doit pas contenir plus de 2 g/l en minéralisation globale, sinon elle entraînera des troubles physiologiques surtout chez l'enfant.

Les eaux minérales se divisent en trois (03) catégories identifiables à partir de la pesée du résidu sec :

- **Les eaux faiblement minéralisées :** le résidu sec pèse moins de 500 mg/l. Elles sont particulièrement indiquées pour les très jeunes enfants.
- **Les eaux moyennement minéralisées :** Le résidu sec pèse entre 500 et 1500 mg/l. Elles peuvent être consommées à tout âge.

- **Les eaux fortement minéralisées** : Le résidu sec pèse plus de 1500 mg/l. Elles sont consommées lors de déficits importants de minéraux dans l'organisme.

3. PARAMÈTRES PHYSIQUES :

3.1 LE pH :

Le pH (potentiel hydrogène) mesure la concentration en ion H⁺ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. La valeur 7 étant le pH de neutralité (autant d'ions H⁺ que d'ions OH⁻). Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. Par définition, le pH est le cologarithme de la concentration en ion hydrogène. Il est calculé à l'aide d'un pH-mètre au Laboratoire.

$$\text{pH} = -\text{Log} [\text{H}_3\text{O}^+]$$

Classification des eaux d'après le pH :

- pH < 7 : Eau Acidité.
- pH = 7 : PH neutre (l'eau est neutre).
- pH > 7 : Eau Basique.

3.2 LA TEMPÉRATURE :

La température a été mesurée sur terrain à l'aide d'un thermomètre. Elle permet d'apprécier l'origine plus au moins profonde de l'eau.

3.3 LA CONDUCTIVITÉ :

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plus part des matières dissoutes dans l'eau se trouve sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sel dissous dans l'eau. Les résultats de mesure sont présentés en terme de conductivité équivalente à 25°C :

- Conductivité < 100 µ mhos/cm : minéralisation très faible.
- 100 µ mhos/cm < Conductivité < 200 µ mhos/cm : minéralisation très faible.
- 200 µ mhos/cm < Conductivité < 333 µ mhos/cm : minéralisation moyenne accentuée.

- $333 \mu \text{ mhos/cm} < \text{Conductivité} < 666 \mu \text{ mhos/cm}$: minéralisation moyenne.
- $\text{Conductivité} > 1000 \mu \text{ mhos/cm}$: minéralisation excessive.

4. EXEMPLE DE NORMES FRANCAISE POUR L'EAU DESTINÉE A LA CONSOMMATION HUMAINE.

Les eaux destinées à la consommation humaine doivent respecter des valeurs inférieures ou égales aux limites de qualité définies ci-après.

Paramètres	Limites de qualité	Unités
Magnésium	50	mg/l
Sodium	200	mg/l
Potassium	12	mg/l
Conductivité	≥ 200 ou/et ≤ 1100	$\mu\text{S/cm}$ à 25°C
Chlorure	250	mg/l
Sulfate	250	mg/l
Nitrate	50	mg/l
Nitrite	0.5	mg/l
Température	25	degré Celsius ($^\circ\text{C}$)
pH	6.5-9	unité PH
Dureté	50	degré français ($^\circ\text{F}$)
Résidu sec	1500	mg/l

Tableau 25 : Normes Française pour la potabilité des eaux.

5. ÉVOLUTION SPATIALE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES :

Dans cette partie, nous avons établi des cartes d'isoteneurs des éléments chimiques afin de mieux suivre leurs évolutions à travers toute la région de Bel Hacer.

5.1 MINÉRALISATION (fig. 62) :

La minéralisation est comprise entre 509 et 1898 mg/l, elle est moins importante au niveau de la montagne de Bel Hacer et Djebel Karrouba. Les eaux deviennent plus chargées

entre la Forêt d'Ennaro et de l'Akboube et dans la partie Sud-Ouest de notre secteur. À cet endroit, la minéralisation augmente selon le sens d'écoulement des eaux, où plus loin, les circulations deviennent plus lentes et les eaux restent plus longtemps en contact avec la roche, ceci est bien confirmé par la baisse du gradient hydraulique de la carte piézométrique. Le même phénomène est observé dans la partie Nord-Ouest de notre secteur où la concentration devient plus importante pouvant atteindre 1800 mg/l.

5.2 TENEUR EN CALCIUM (fig. 63) :

L'origine de cet élément est lié généralement à la lithologie du terrain. Les eaux souterraines au contact avec les roches se chargent en Calcium qui provient surtout de la mise en solution de la calcite (CaCO_3), de la dolomite, de l'anhydrite et du gypse. Sur la figure 50, l'évolution de cet élément devient importante vers le Nord-Ouest et le Sud-Ouest de notre région. Sa concentration évolue dans le même sens que le gradient hydraulique de la nappe.

5.3 TENEUR EN MAGNÉSIUM (fig. 64) :

La teneur en Magnésium varie de 8 mg/l à 60 mg/l, elle évolue de la même façon que celle du calcium, mais avec des valeurs moins importantes. Sauf au niveau de la montagne de Bel Hacer et Dj. Karrouba où les fortes concentrations de Mg peuvent être rattachées à la présence des Grés Astien.

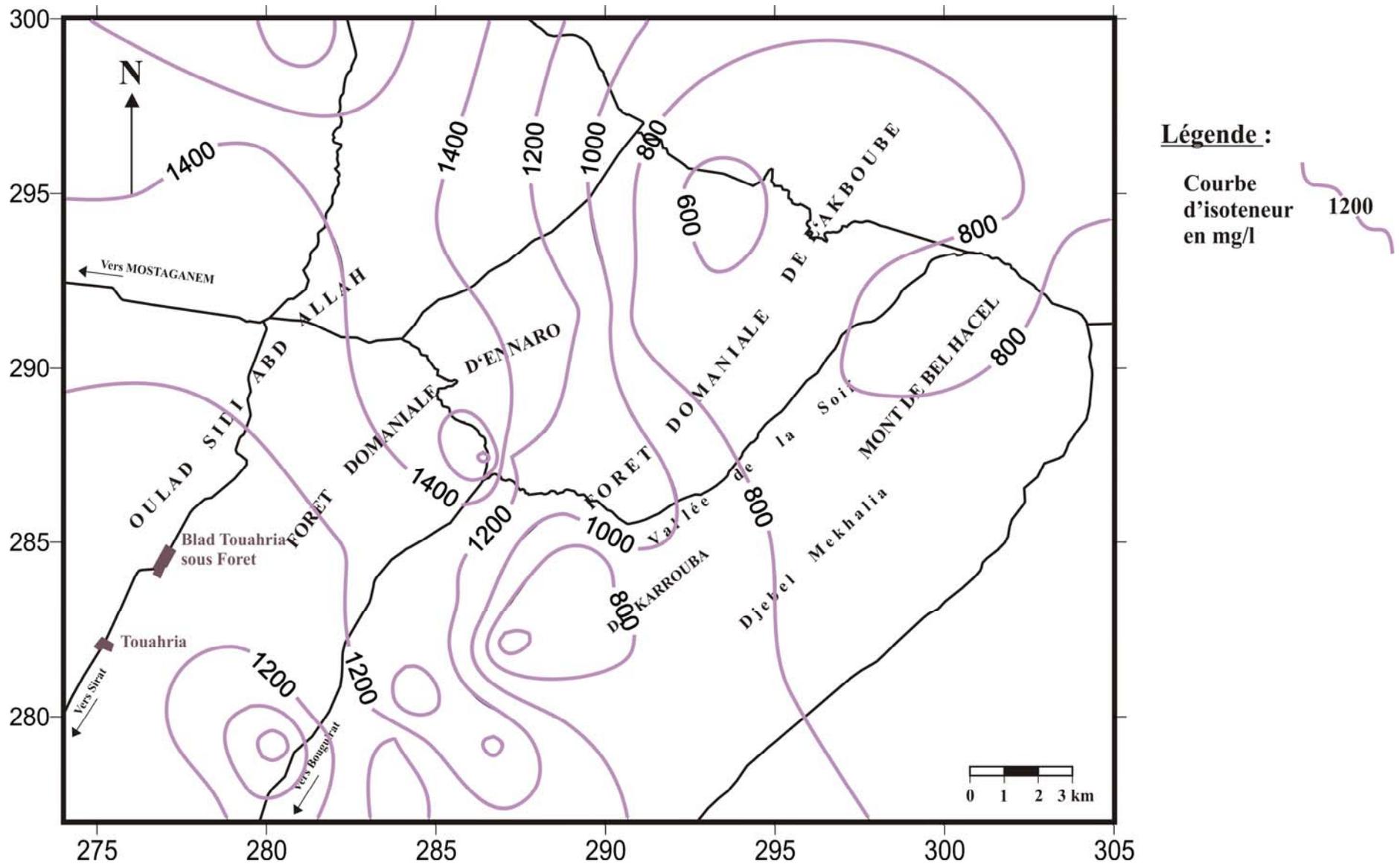


Figure 62 : Carte d'isoteneur des minéralisations.

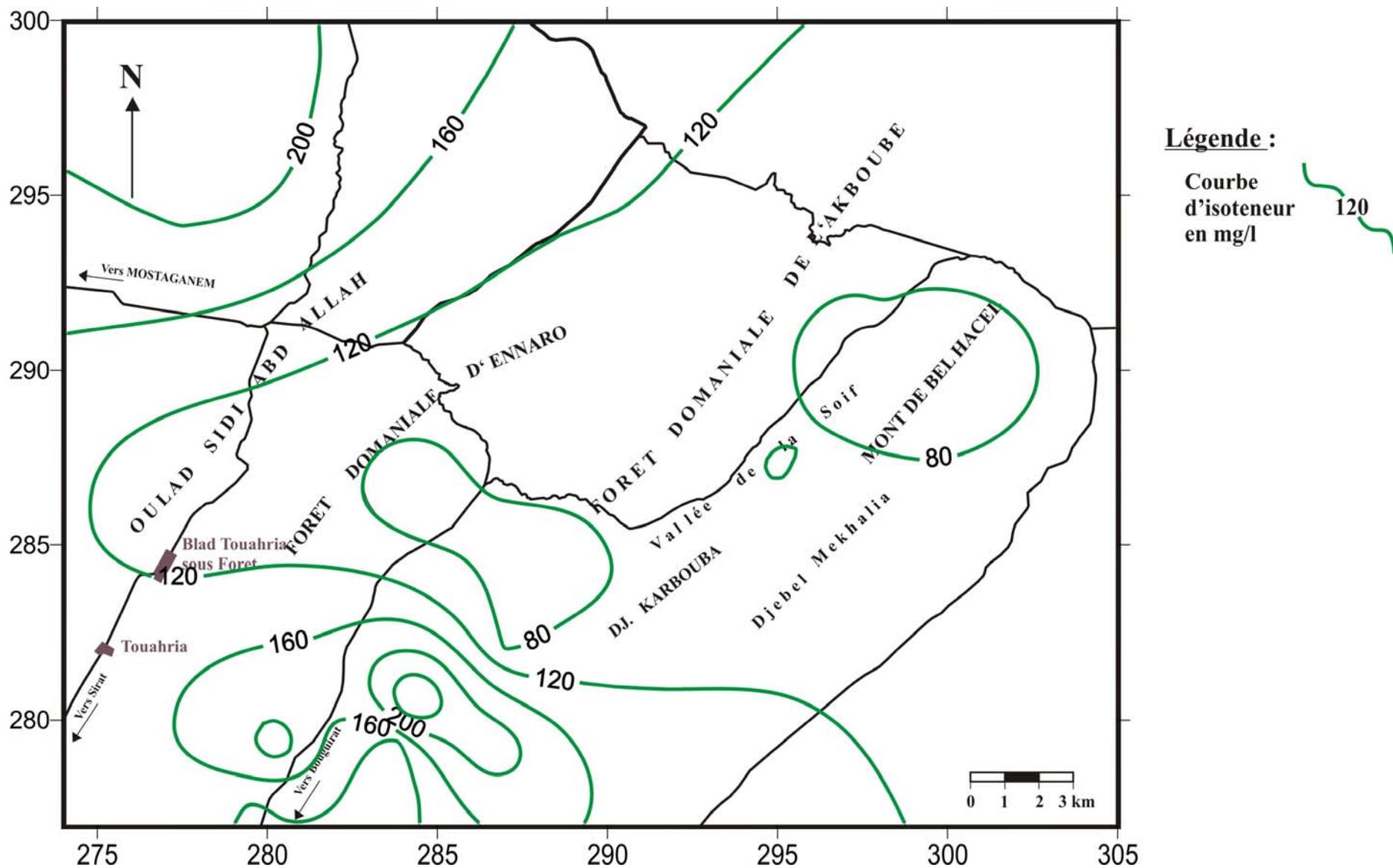


Figure 63 : Carte d'isoteneur en Calcium.

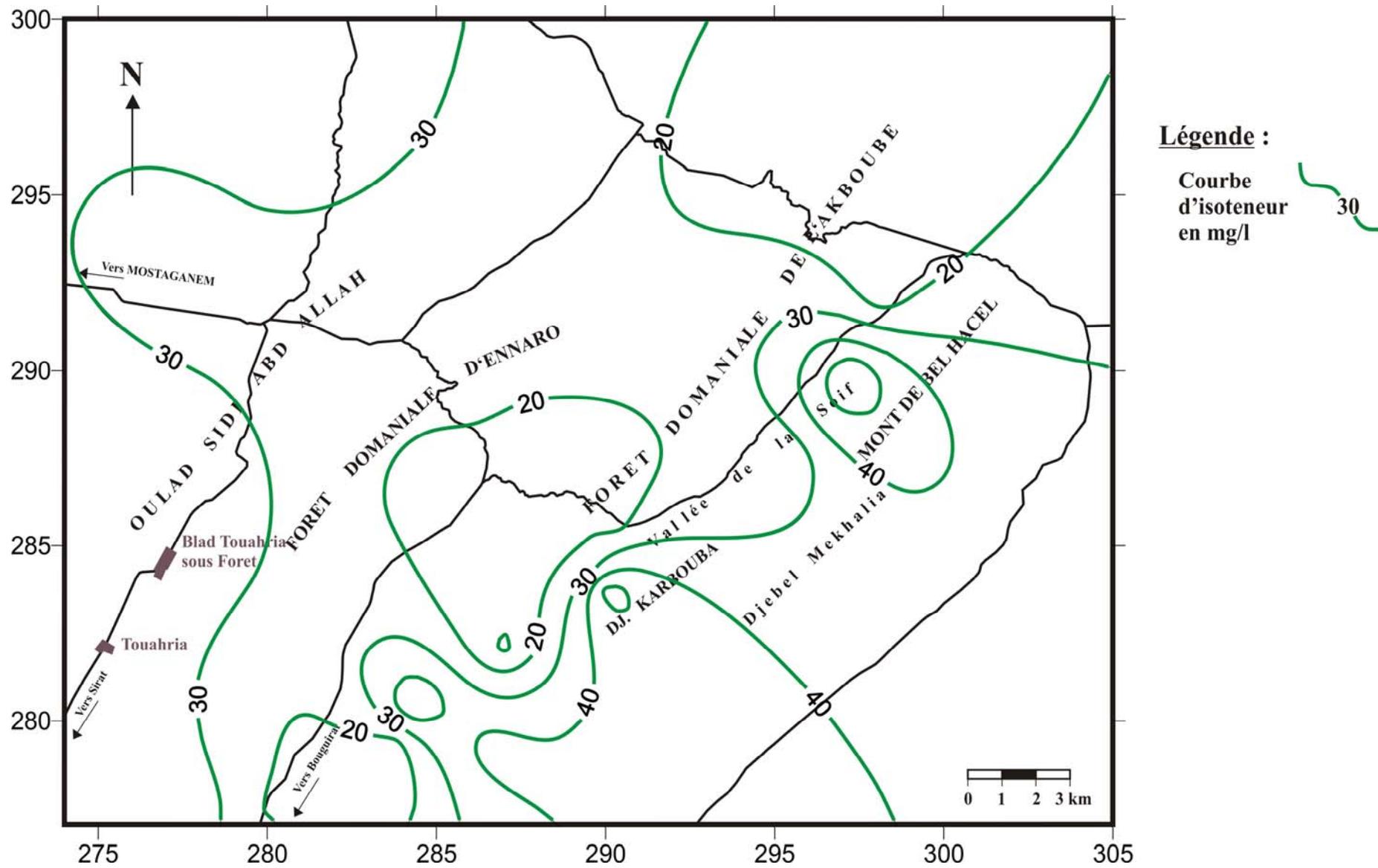


Figure 64 : Carte d'isoteneur en Magnésium.

5.4 TENEUR EN SODIUM (fig. 65) :

La teneur en Sodium varie de 55 mg/l à 511mg/l. Sa présence est due probablement à la circulation des eaux dans les sables et les sables argileux des formations alluvionnaires du Quaternaire. La forte variation de cet élément d'un endroit à un autre est due certainement soit au lessivage des sables argileux très abondant, soit aux perméabilités de ces formations. Son évolution se fait en général dans le même sens de l'écoulement de la nappe. Les valeurs les plus importantes sont localisées dans la partie Nord et Nord-Ouest de notre secteur où on note une baisse du gradient hydraulique de la carte piézométrique. Ils sont d'un degré moindre vers le Sud-Ouest en allant vers Bouguirat.

5.5 TENEUR EN POTASSIUM (fig. 66):

La teneur en potassium varie de 1 mg/l à 8 mg/l. la concentration en Potassium évolue dans le même sens de l'écoulement de la nappe. Elle devient importante dans la partie Nord-Ouest et Sud-Ouest de la région de Bel Hachel. La concentration la plus importante est localisée dans le point d'eau n° 12 et 23 avec respectivement 7 et 8 mg/l.

5.6 TENEUR EN CHLORURE (fig. 67):

La carte des concentrations en chlorure présente de forte similitude avec la carte des minéralisations. L'évolution de cet élément se fait dans le même sens de l'écoulement de la nappe. Ces ions chlorurés peuvent avoir plusieurs origines dont les plus importantes sont :

- la nature lithologique, dans notre cas, les marnes et gypse du Miocène supérieur et les gypses bréchiques du Plaisancien.
- origine liée à l'activité humaine.
- intense évaporation des eaux.

5.7 TENEUR EN SULFATE (fig. 68) :

Les teneurs en Sulfates varient de 27.4 mg/l à 468 mg/l. la valeur la plus élevée est enregistrée au point d'eau n°12 situé dans la partie Nord-Ouest de notre secteur. L'origine

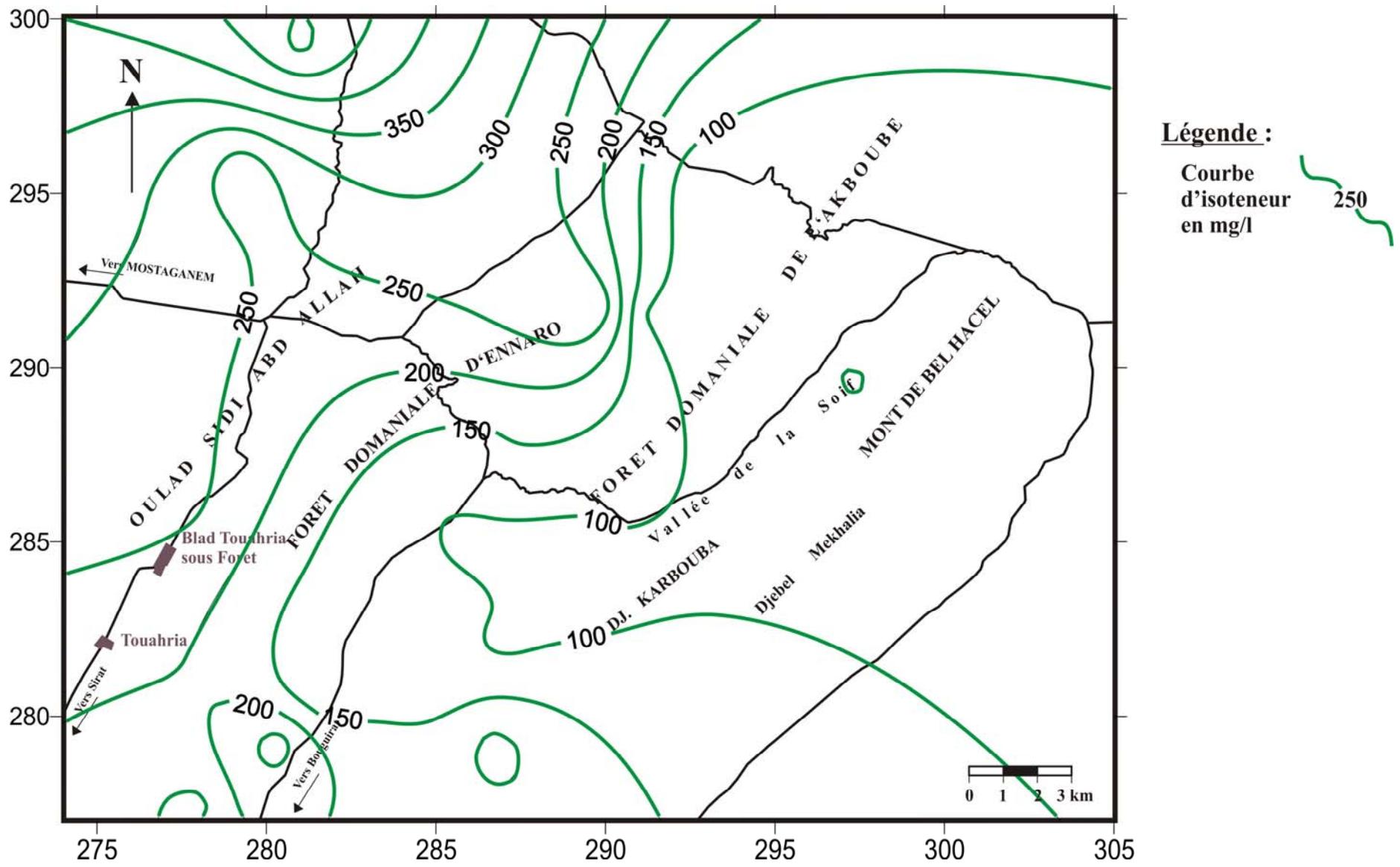


Figure 65 : Carte d'isoteneur en Sodium.

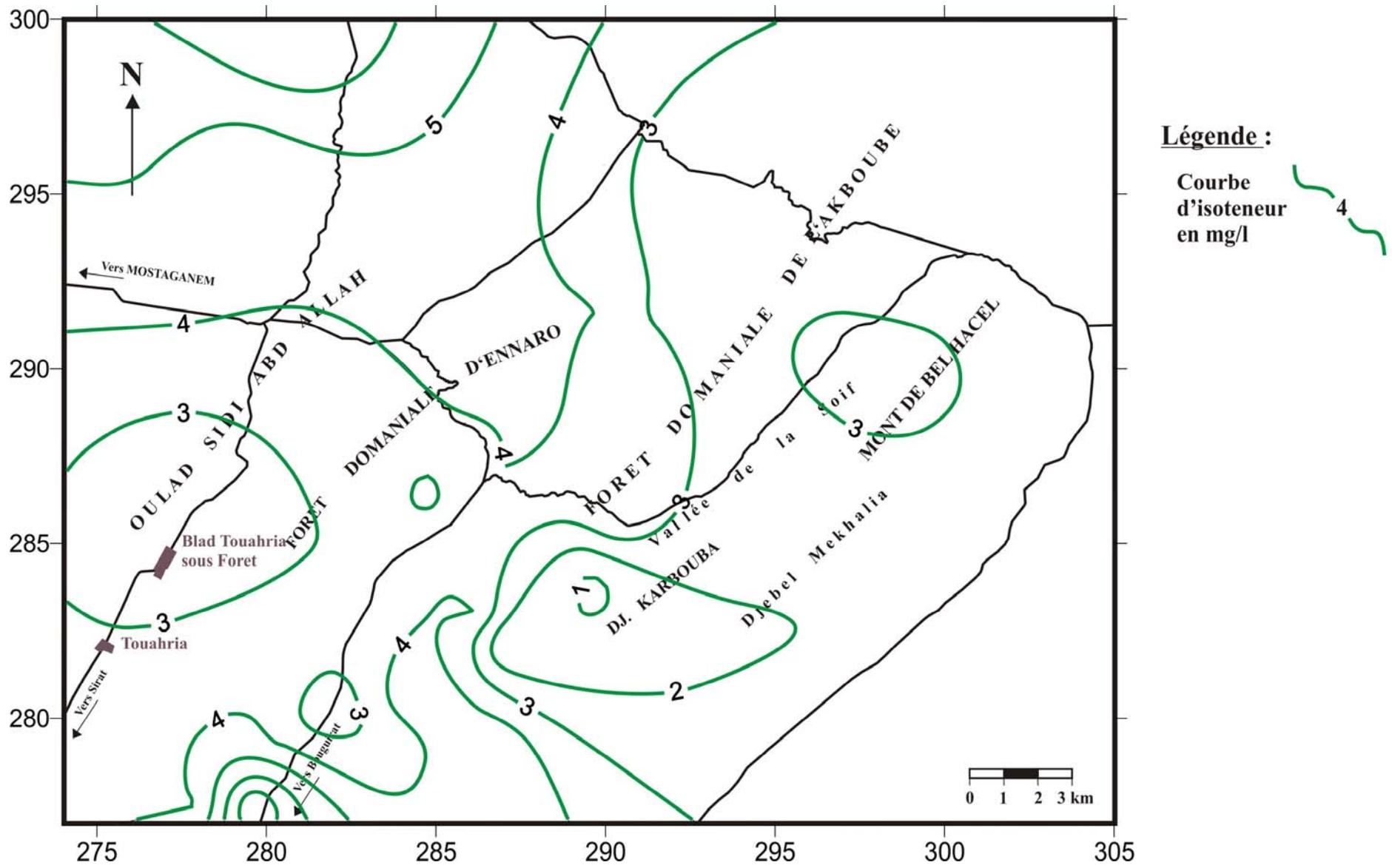


Figure 66 : Carte d'isoteneur en Potassium.

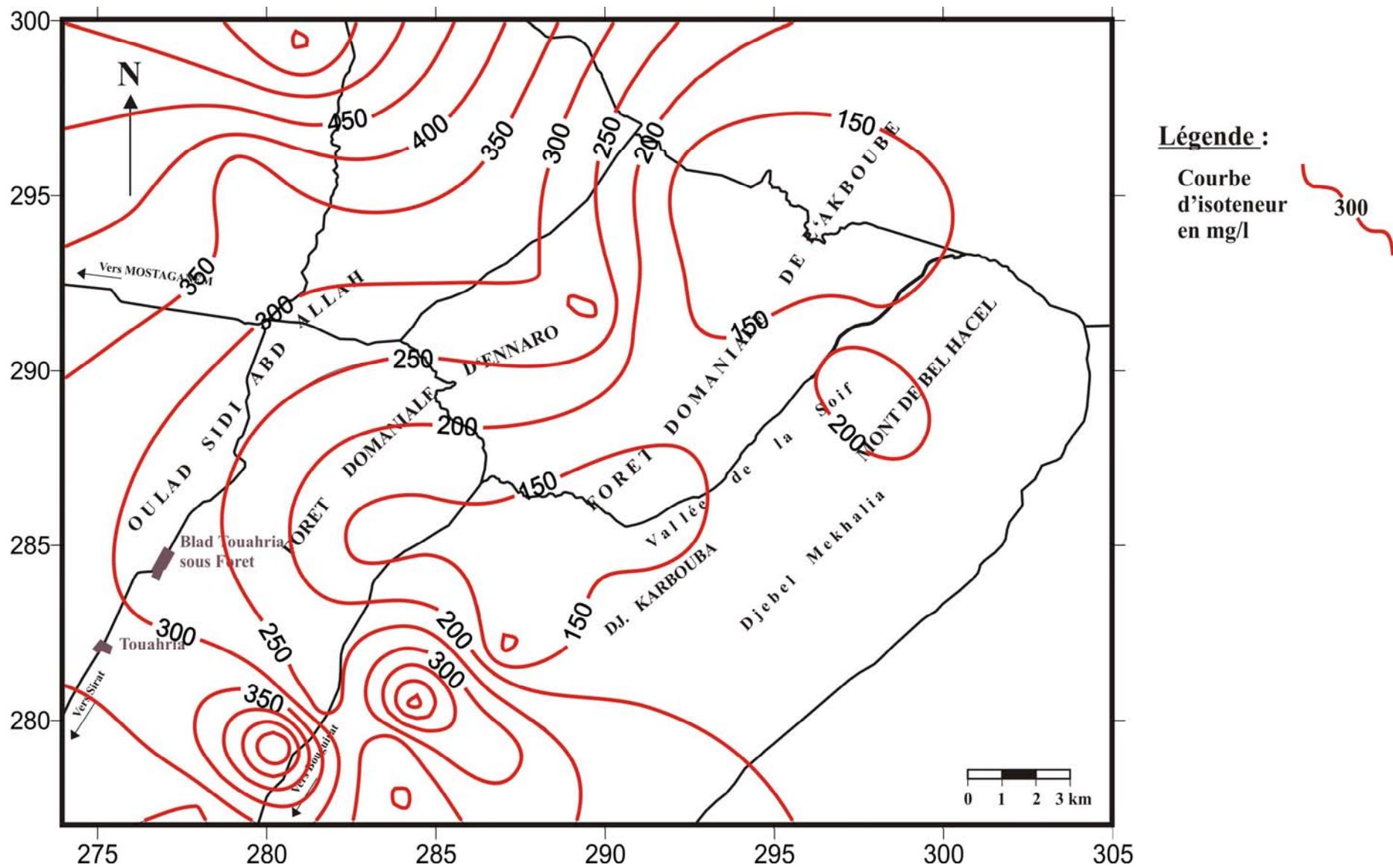


Figure 67 : Carte d'isoteneur en Chlorure.

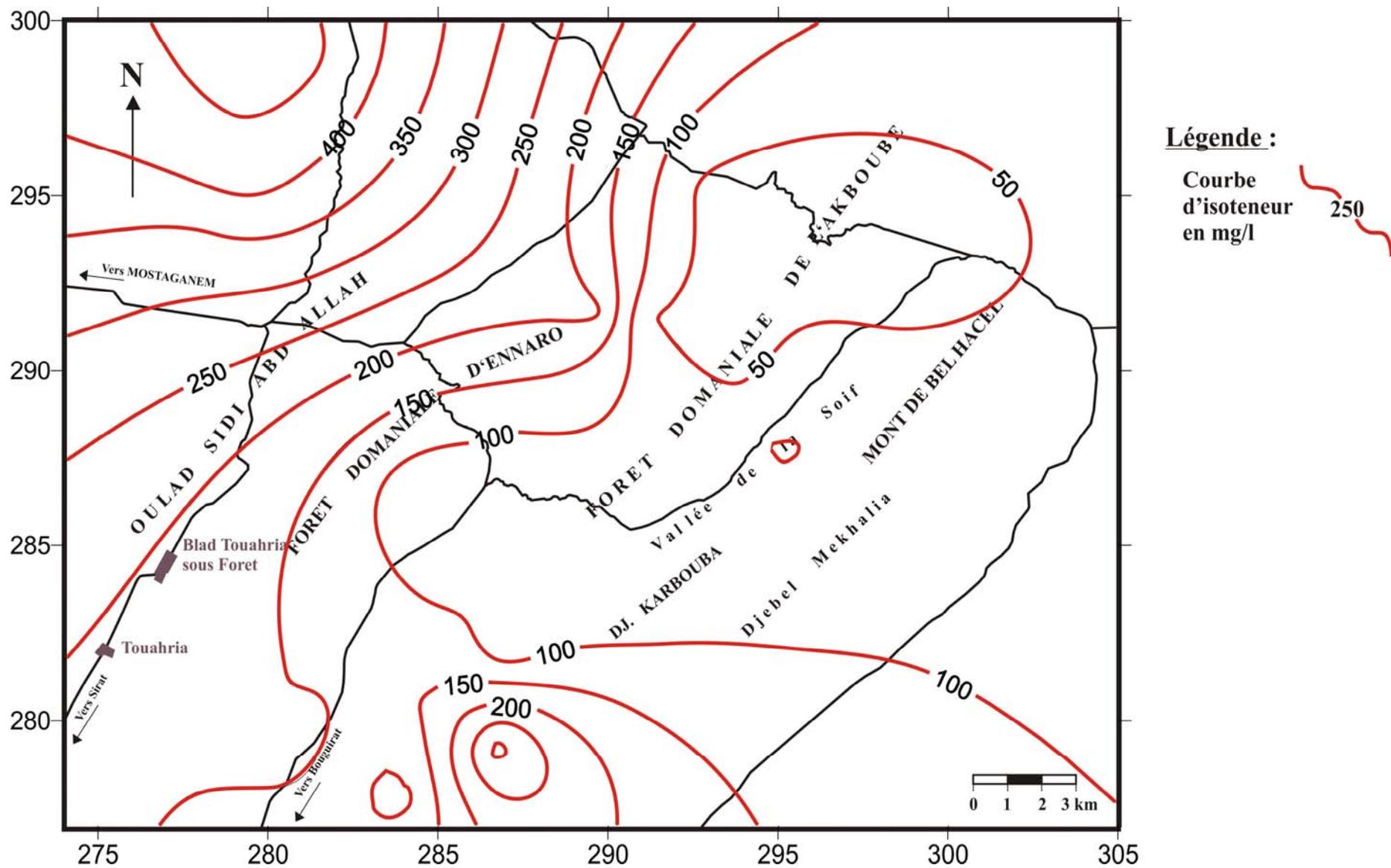


Figure 68 : Carte d'isoteneur en Sulfate.

des sulfates est liée à la lithologie (gypse et marnes gypseuses) et/ou à la pollution artificielle par les engrais sulfatés utilisés en agriculture.

Sur la carte nous observons des zones correspondantes à des fortes teneurs en Sulfates (points d'eau n° 09, 10, 11, 12 et n° 15, 16, 17, 19, 21, 23, 29), en effet ces zones correspondent à des zones de cultures maraîchères, à forte utilisations d'engrais.

5.8 TENEUR EN BICARBONATE (fig. 69) :

Les bicarbonates sont des dérivés de l'acide carbonique formés par la réaction d'un CO₂ sur un carbonate en présence d'eau. Leurs présences sur notre secteur sont dues probablement au lessivage des formations sableuses du Quaternaire ou des grés du Calabrien. Sa concentration varie de 201 mg/l à 403 mg/l et son évolution se fait en général suivant le sens d'écoulement de la nappe.

5.9 TENEUR EN NITRATE (fig. 70):

Les concentrations en nitrates augmentent avec l'activité humaine, comme par exemple l'industrie et surtout l'agriculture. Une sur-fertilisation des récoltes pour l'intensification de l'activité agricole ou une grande répartition des récoltes qui exige de hautes doses d'engrais, laisse un excédant dans le sol.

56.66 % de nos prélèvements dépassent les normes admissibles (50 mg/l). Les plus élevés sont localisés dans les points d'eaux n° 12 et 14 et les moins élevés dans les points n° 27 et 29. L'évolution des Nitrates est importante dans la partie Nord-Ouest et Sud-Ouest en allant vers Bouguirat, qui correspond à des zones à grande concentration de cultures maraîchères, d'où forte consommation d'engrais.

6. ETUDE DES RAPPORTS CARACTÉRISTIQUES (Tabl. 5 en annexe) :

6.1 RAPPORT rMg^{++}/rCa^{++} (fig. 71) :

D'après cette figure, l'ensemble des eaux de la région sont plus calcique que magnésienne, le rapport rMg/rCa étant inférieur 1 sur toute la région, sauf au niveau de la montagne de Bel Hacel où les eaux deviennent magnésiennes.

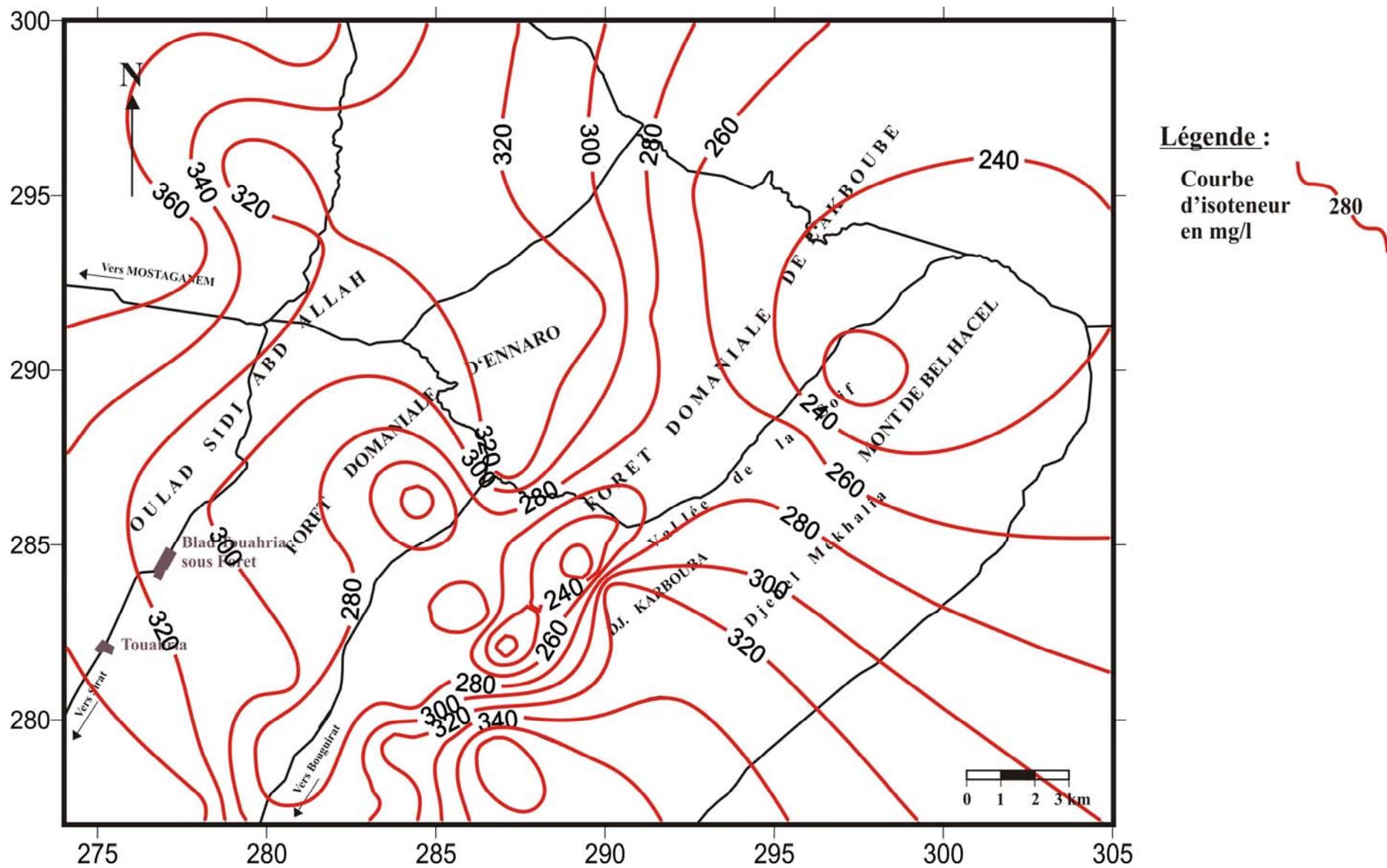


Figure 69 : Carte d'isoteneur en Bicarbonate.

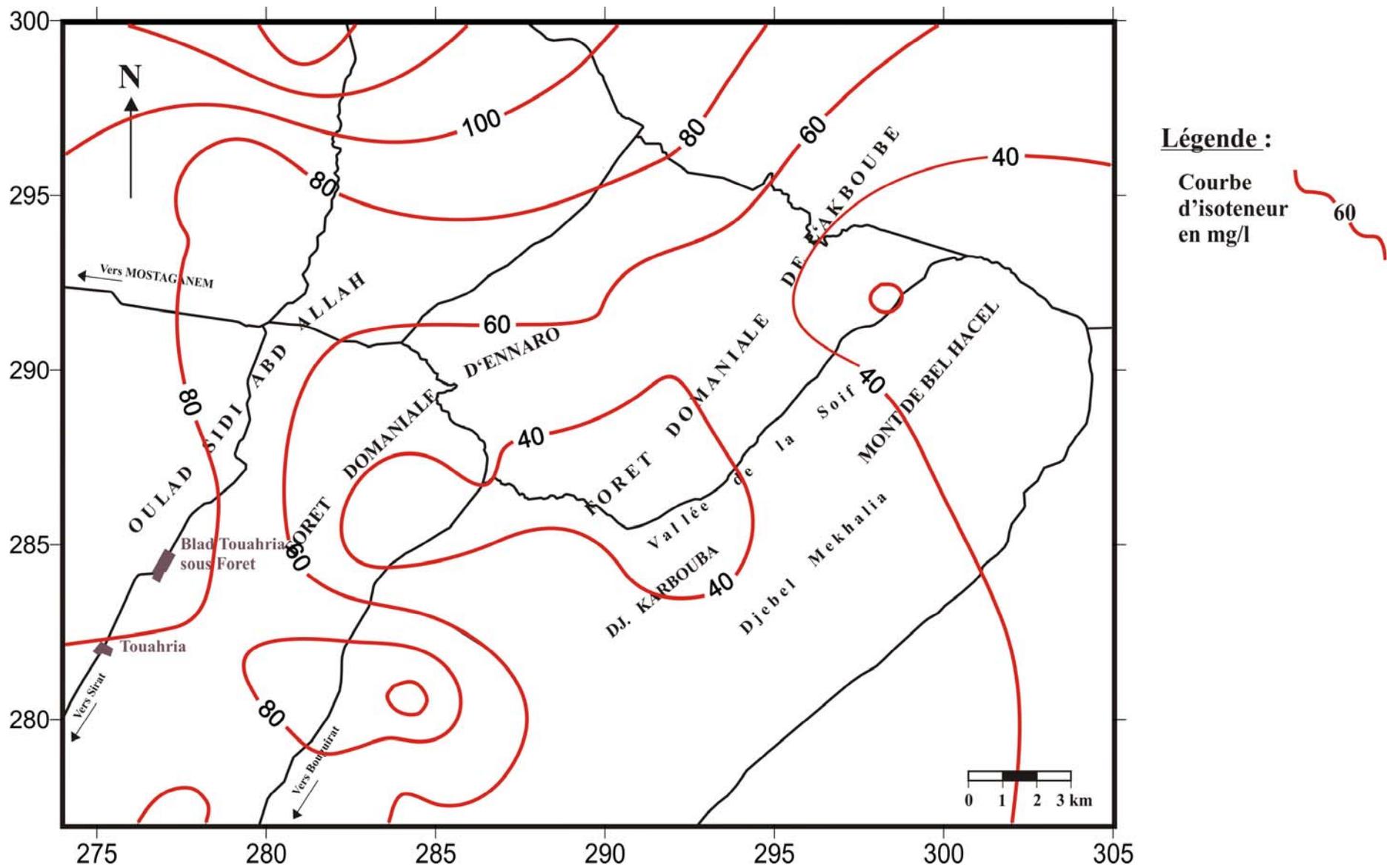


Figure 70 : Carte d'isoteneur en Nitrate.

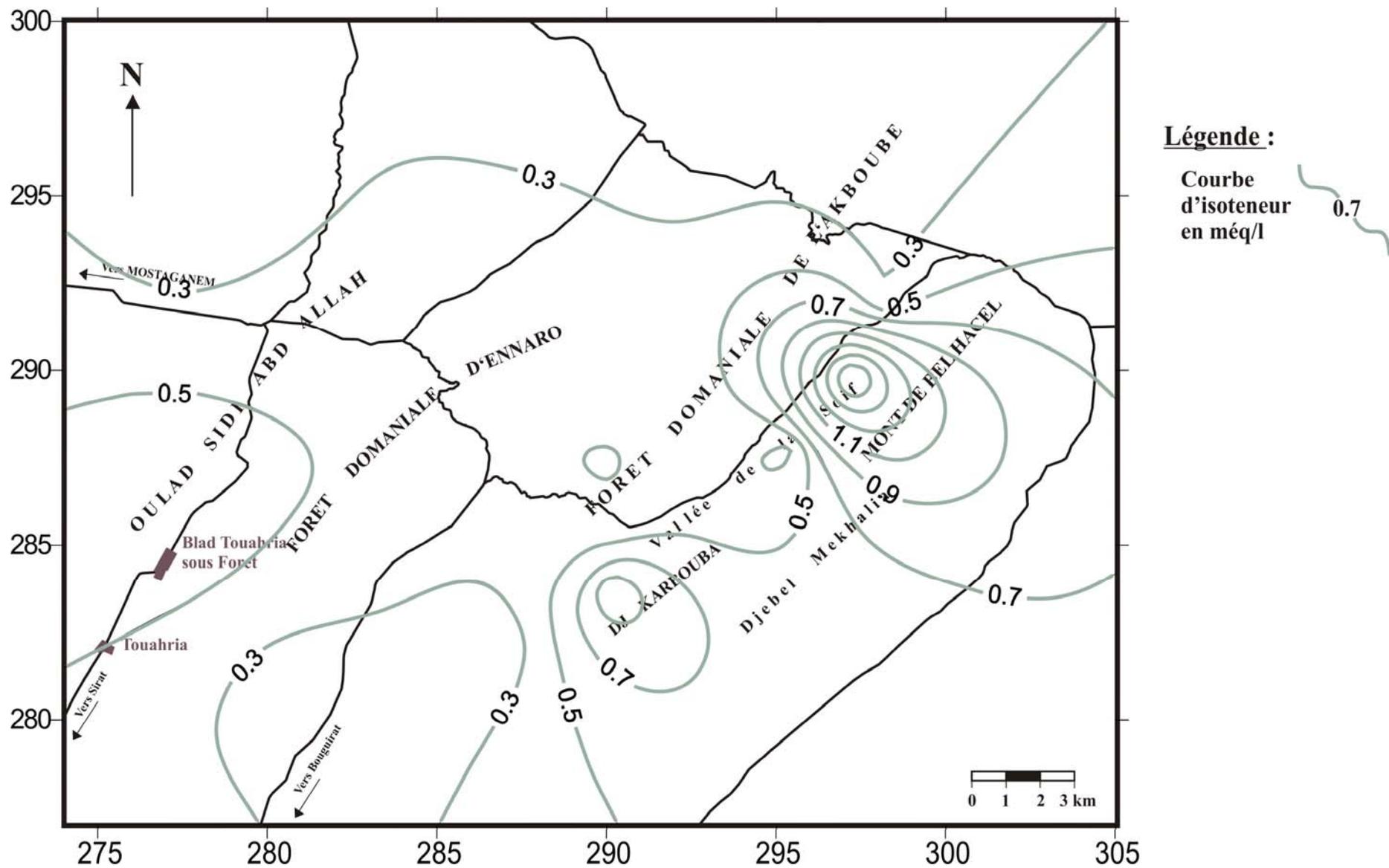


Figure 71 : Carte d'isorapport de rMg^{++}/rCa^{++} .

6.2 RAPPORT $r\text{SO}_4^- / r\text{Cl}^-$ (fig. 72) :

Le rapport $r\text{SO}_4 / r\text{Cl}$ est toujours inférieur à 1 sauf au point d'eau n°11 (égal à 1), il varie de 0.18 à 1. Ceci permet de dire que l'eau de la région est plus chlorurée que sulfatée. D'autre part, l'augmentation anormale de ce rapport dans le secteur Nord-Ouest est liée directement par l'utilisation excessive des engrais artificiels.

6.3 RAPPORT $r\text{Na}^+ / r\text{Cl}^-$ (fig. 73) :

Avec des valeurs inférieures ou très proches de 1, la majorité des eaux de la région ont tendance à être plus chlorurées que sodiques. Le rapport est supérieur à 1 entre la forêt d'Ennaro et de l'Akboube, il diminue inversement au sens d'écoulement général de la nappe.

7. FACIES HYDROCHIMIQUES ET REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES ANALYSES D'EAU :

Les calculs et les comparaisons sont facilités en transformant ou en convertissant les poids de chaque composant chimique en milliéquivalent « méq » (tabl. 4 en Annexe).

La masse de l'équivalent de chaque ion se calcule en divisant sa masse atomique par sa valence.

$$\text{Equivalent chimique} = \text{Masse atomique} / \text{Valence}$$

Le nombre de milliéquivalents d'un ion s'obtient en divisant sa concentration en milligrammes par l'équivalent. Les résultats obtenus représentent les quantités en réaction, désignées par STABLER par la lettre (r) :

$$\text{Quantité en réaction « r » (méq/l)} = \text{Poids de l'élément (mg/l)} / \text{Equ. Chimique}$$

Dans une analyse complète des éléments dissous dans l'eau, la somme des quantités en réaction des cations doit être sensiblement égale à celle des anions : $\Sigma r \text{ cations} = \Sigma r \text{ anions}$. Le pourcentage (%) d'erreur dû à une exactitude d'analyse ou à la non détermination de certains ions est donné par la relation suivante :

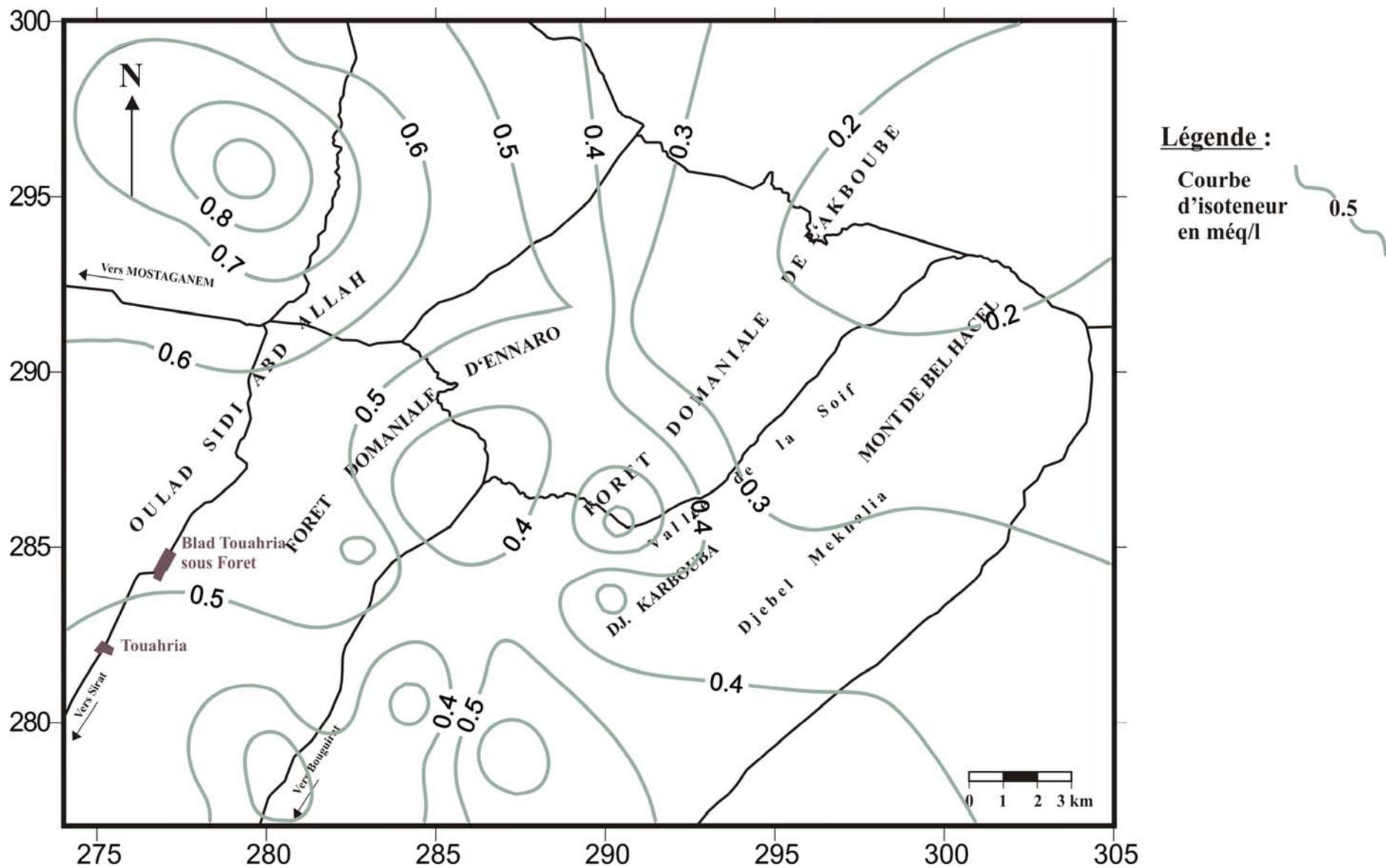


Figure 72 : Carte d'isorange de rSO_4^- / rCl^- .

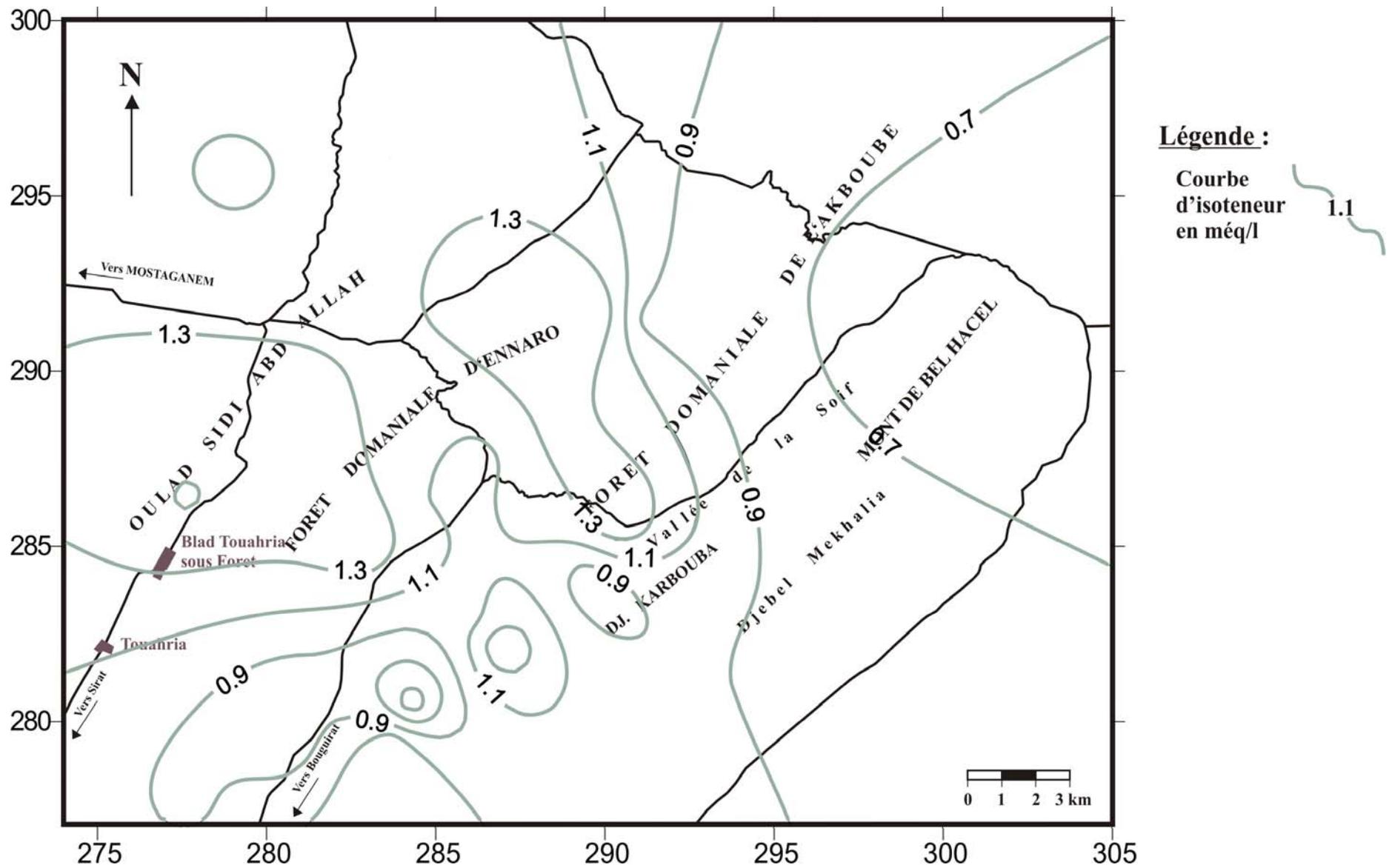


Figure 73 : Carte d'isorapport de rNa^+ / rCl^- .

$$e\% = [\Sigma r \text{ cations} - \Sigma r \text{ anions} / \Sigma r \text{ cations} + \Sigma r \text{ anions}] \times 100$$

si : $e < 2\%$: très bonne analyse.
 $2\% < e < 5\%$: analyse acceptable.
 $e > 5\%$: analyse mauvaise.

Les comparaisons ioniques reposent essentiellement sur l'établissement de la formule ionique. Celle-ci est obtenue en classant de gauche à droite, par ordre décroissant des quantités en réaction (r), d'abord le groupe des anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), puis celui des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+). Ainsi la formule ionique permet de définir clairement les types d'eau. Les quantités en réactions en pourcent (%) s'obtiennent en appliquant la formule suivante :

$$r \% = 100.r / C \quad \text{Avec : } C = \Sigma r$$

r : Quantité en réaction de chaque élément en méq/l.

7.1 CLASSIFICATION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES :

Les résultats des analyses physico-chimiques ainsi que tous les autres calculs permettant de donner les différentes formules caractéristiques de l'eau sont résumés dans les tableaux 3 et 4 portés en annexe. Le tableau 26 représente les différents faciès chimique de l'eau rencontrés dans notre région.

Tableau 26 : Formules caractéristiques et faciès chimiques de l'eau.

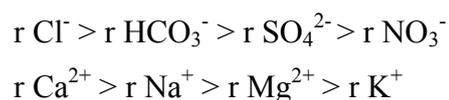
Point d'eau	Formules caractéristiques	Faciès chimique
01	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
02	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
03	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Mg}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Magnésienne
04	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$	Chlorurée Calcique

	$r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	
05	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
06	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{NO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-}$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Calcique
07	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée calcique
08	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
09	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
10	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^- > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
11	$r \text{SO}_4^{2-} > r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Sulfatée Calcique
12	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^- > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
13	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Magnésienne
14	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
15	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
16	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
17	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
18	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Sodique
19	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
20	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique

21	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
22	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
23	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
24	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Ca}^{2+} > r \text{Na}^+ > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Calcique
25	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Sodique
26	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Sodique
27	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Sodique
28	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Chlorurée Sodique
29	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Sodique
30	$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{NO}_3^-$ $r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+} > r \text{K}^+$	Bicarbonatée Sodique

7.1.1 FACIÈS CHLORURÉ CALCIQUE :

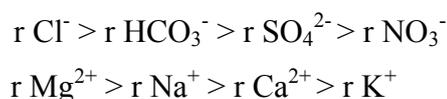
Représenté par les échantillons : 01, 02, 04, 05, 07, 14, 16, 19, 20, 21 et 24. Ce faciès caractérise la majorité des points d'eau de notre région (36.66%). Leur formule caractéristique chimique est :



Ce faciès est caractérisé par une prédominance des bicarbonatés sur les sulfates et du sodium sur le magnésium.

7.1.2 FACIÈS CHLORURÉ MAGNESIEN :

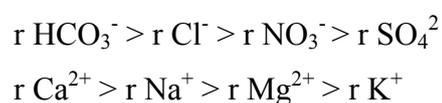
Ce faciès est représenté par un seul point d'eau n° 03, sa formule caractéristique chimique est :



Il est caractérisé par la prédominance des bicarbonatés sur les sulfates et le sodium sur le calcium.

7.1.3 FACIÈS BICARBONATÉ CALCIQUE :

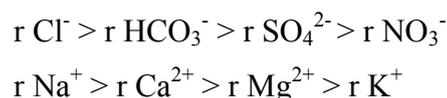
Ce faciès est représenté lui aussi par un seul point d'eau n° 06, sa formule caractéristique chimique est la suivante :



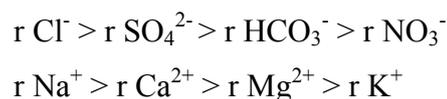
Avec cependant une prédominance des chlorures sur les nitrates et le sodium sur le magnésium.

7.1.4 FACIÈS CHLORURÉ SODIQUE :

Ce sont les eaux de puits n° 08, 09, 10, 12, 15, 17, 22, 23 et 28. Leur formule caractéristique est :



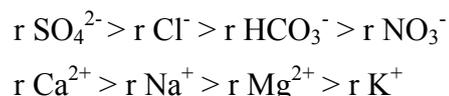
Ces eaux représentent, sur les 30 prélèvements, 30 % des échantillons. Elles sont caractérisées par une prédominance des bicarbonatés sur les sulfates et le calcium sur le magnésium, sauf pour le cas de l'échantillon n° 10 et le n° 12 où on note l'existence d'un sous faciès représenté par la formule caractéristique suivante :



Ce sous faciès est caractérisé cette fois par une prédominance des sulfates sur les bicarbonatés et le calcium sur le magnésium.

7.1.5 FACIÈS SULFATÉ CALCIQUE :

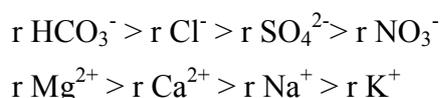
Représenté par un seul point d'eau n° 11. Sa formule caractéristique est :



On note une prédominance des chlorures sur les bicarbonatés et du sodium sur le magnésium.

7.1.6 FACIÈS BICARBONATÉ MAGNÉSIEN :

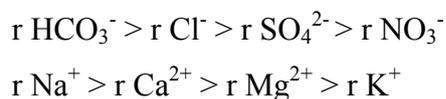
Sa formule caractéristique est :



Ce faciès a été rencontré au point d'eau n°13. Il est caractérisé par une prédominance des chlorures sur les sulfatés et le calcium sur le sodium.

7.1.7 FACIÈS BICARBONATÉ SODIQUE :

Ces eaux correspondent à la formule caractéristique suivante :



Plusieurs échantillons correspondent à ce faciès (n°18, 25, 26, 27, 29 et 30). Ils représentent 20% de l'ensemble des prélèvements et ils sont caractérisés par une prédominance des chlorures sur les sulfates et le calcium sur le magnésium.

7.2 INTERPRÉTATION :

36.66% de l'ensemble des points d'eau analysés dans notre région d'étude sont chlorurés calciques, 30% sont chlorurés sodiques et 20% sont bicarbonatés sodiques. Les quatre autres familles restantes représentent 13.34% de l'ensemble de nos échantillons. Dans notre secteur le faciès hydrochimique change du Nord-Ouest au Sud-Est, du faciès chloruré sodique dans la région de Oulad Sidi Abd Allah au faciès chloruré calcique dans la vallée de la soif en passant par un faciès bicarbonaté sodique entre la forêt d'Ennaro et

la forêt de l'Akboube. Vers Bouguirat les eaux deviennent de plus en plus chargées en sel dissous.

7.3 REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES ANALYSES D'EAU :

7.3.1 LE DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF :

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff est une représentation graphique semi-logarithmique. Sur l'axe des abscisses sont représentés les différents ions. Pour chacun de ces ions la teneur réelle en mg/l est reportée sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites qui donneront le faciès de l'eau ou de l'échantillon concerné.

Sur les figures n°74, 75 et 76 nous remarquons que la majorité des échantillons prélevés dans la région de Bel Hacel et malgré les écarts de concentrations relatives en un ou plusieurs éléments, présentent deux pôles de minéralisations soit Ca et Cl soit Ca et Na. Ces eaux deviennent, par endroit, Bicarbonatés sodiques dans la zone Sud-Ouest de notre secteur d'étude.

7.3.2 LE DIAGRAMME DE PIPER :

Le diagramme de Piper permet une représentation des cations et des anions sur deux triangles spécifiques (cations pour le triangle de gauche et anion pour le triangle de droite). La position du résultat des analyses chimiques de chaque échantillon sur chacun des deux triangles permet de préciser la dominance anionique et cationique. A ces deux triangles est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse chimique de l'échantillon, sa position sur ce losange permet de préciser le faciès de cette eau.

Sur les figures n° 77, 78 et 79 nous constatons que la majorité des échantillons analysés soit 66.66 % se situent dans le pôle faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien. Le faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique représente 30 % de l'ensemble des échantillons analysés, tandis que le faciès bicarbonaté calcique et magnésien est représenté par un seul échantillon n°27.

8. POURCENTAGE (%) D'ERREUR DES NANALYSES CHIMIQUES :

D'après le tableau 4 porté en annexe, nous remarquons que la majorité des résultats des analyses de nos échantillons sont acceptables à très bonnes, sauf pour les échantillons n°25, 27, 29 et 30 où on note une mauvaise analyse chimique.

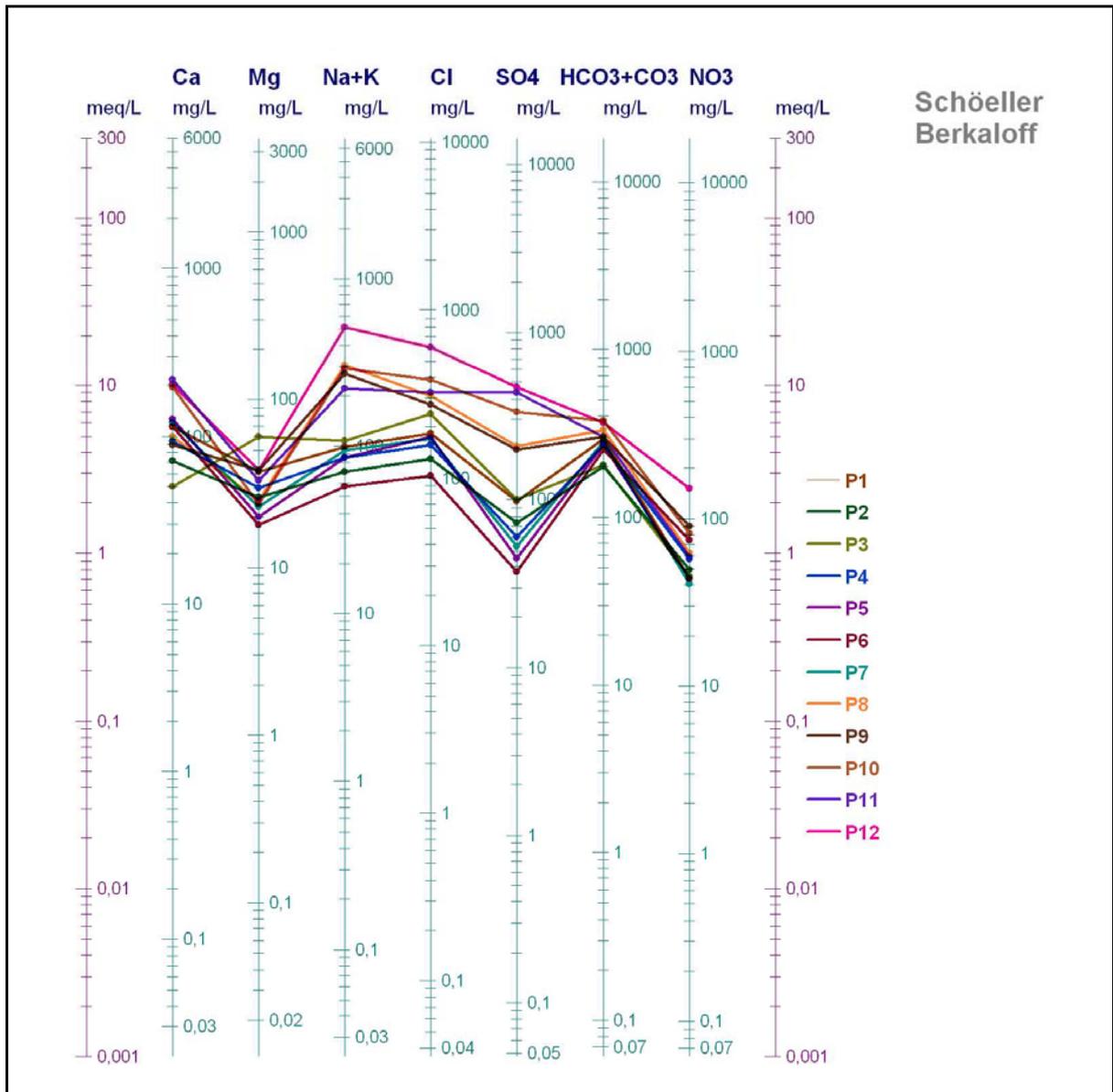


Figure 74 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (1).

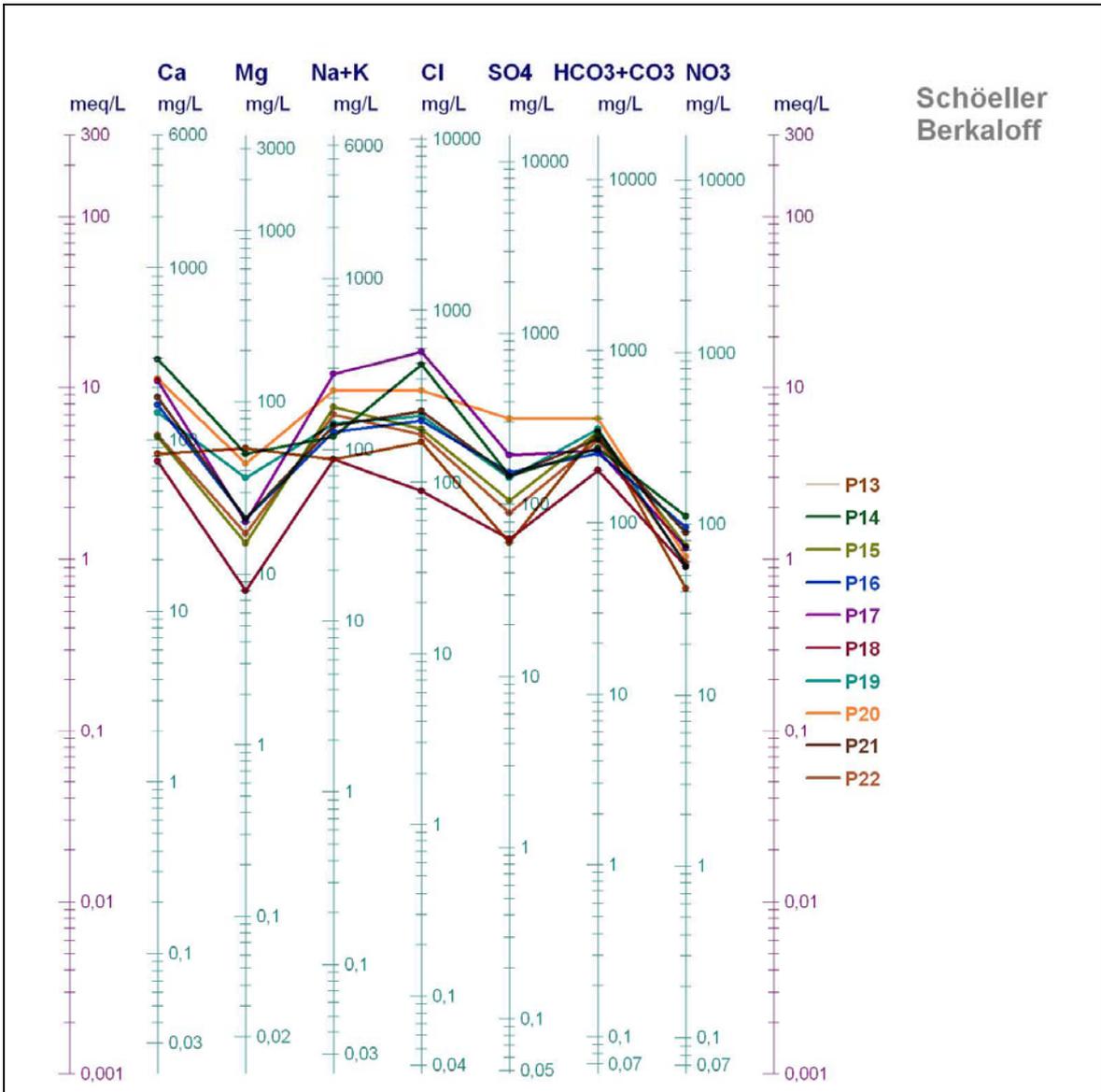


Figure 75 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (2).

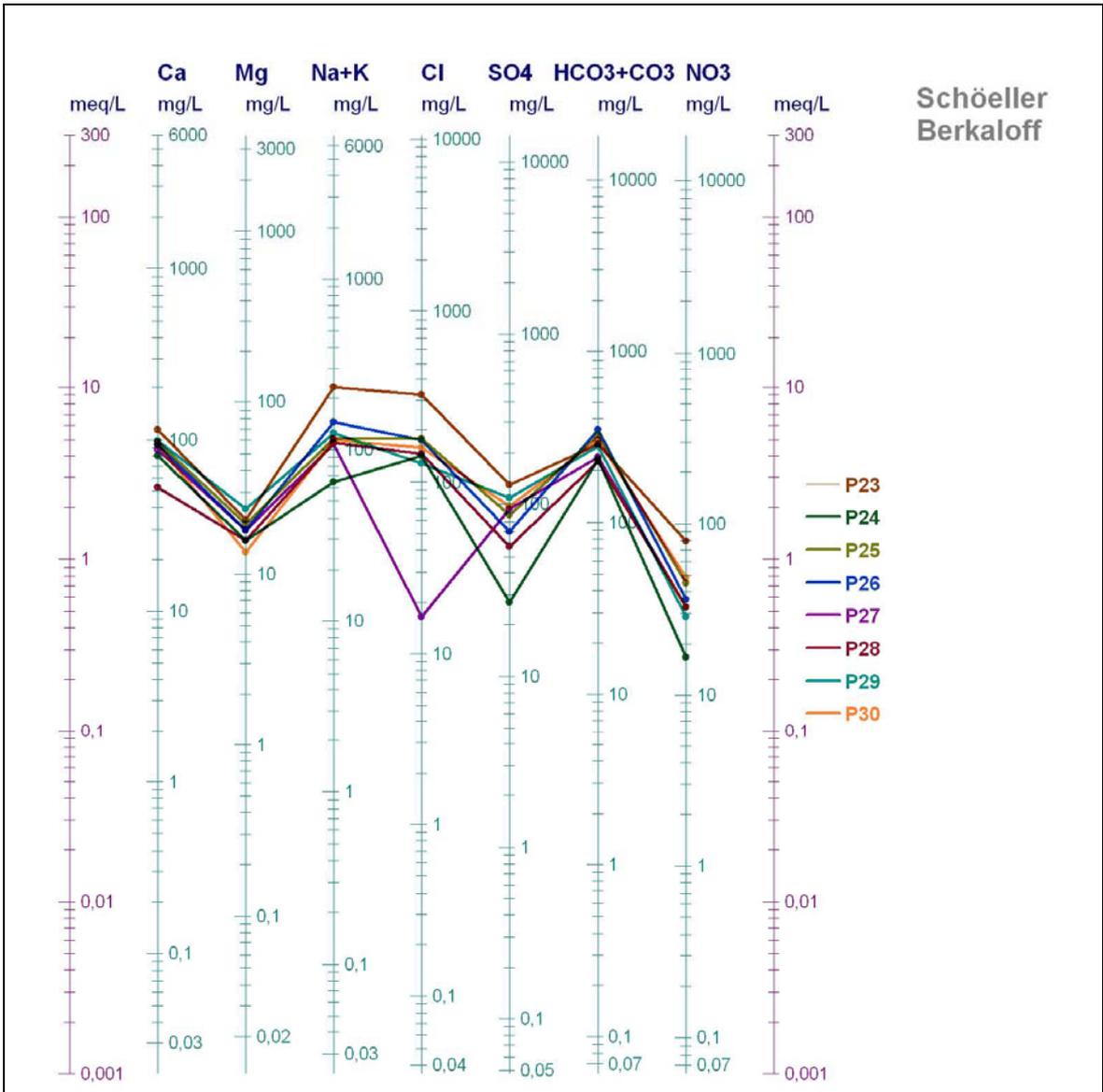


Figure 76 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (3).

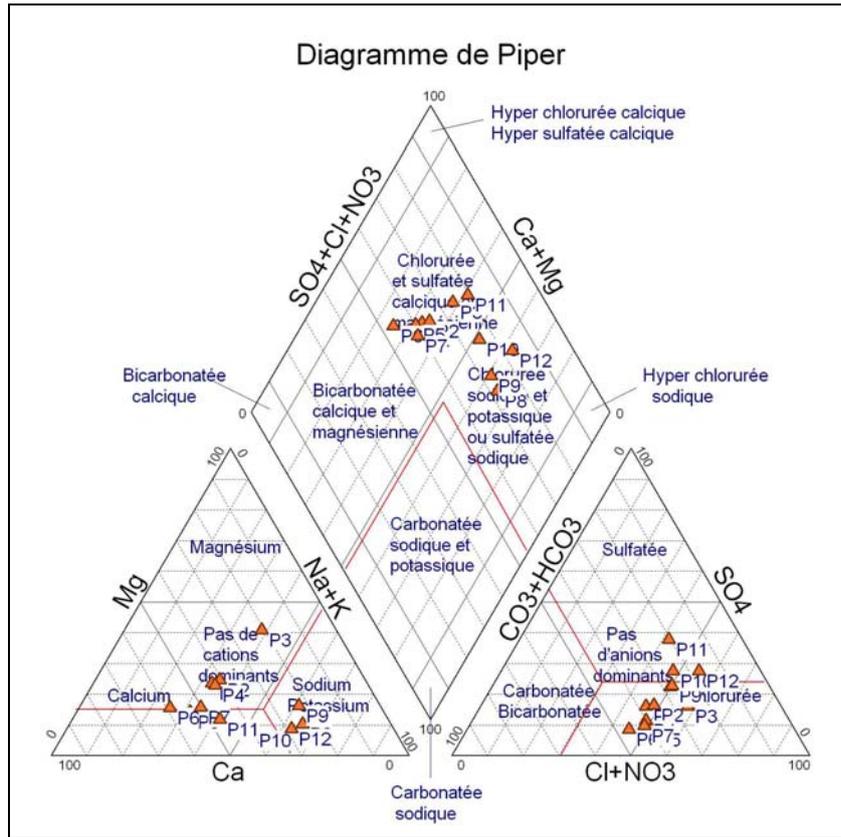


Figure 77 : Diagramme de Piper (1).

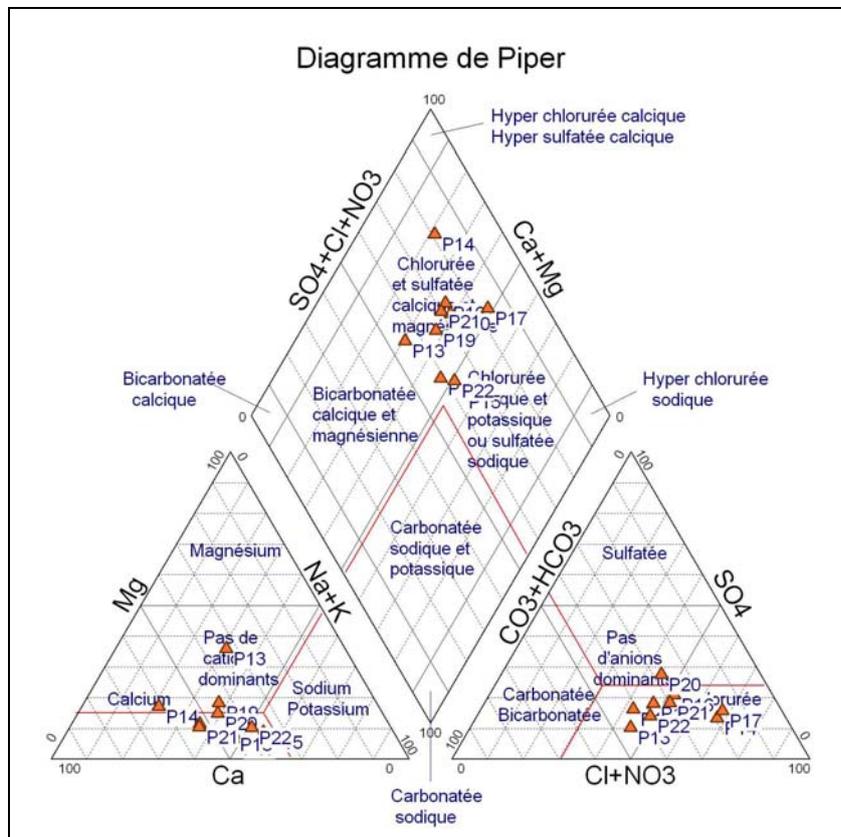


Figure 78 : Diagramme de Piper (2).

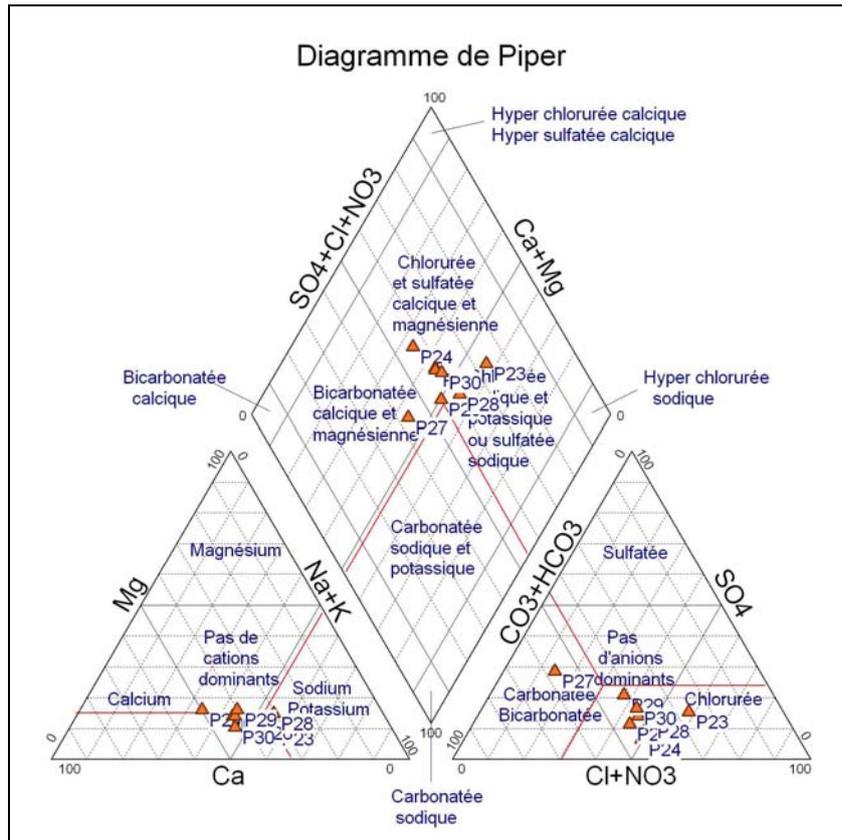


Figure 79 : Diagramme de Piper (3).

9. INDICE DE SATURATION :

L'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à ces minéraux peut être révélé par l'étude des indices de saturation.

L'état de l'indice de saturation (I.S.) est défini par le logarithme du rapport des produits d'activité ionique (PAI) sur le produit de solubilité (K) lors de l'échantillonnage :

$$IS = \log PAI / K$$

Nous prenons, par exemple, en considération la présence de la calcite ($CaCO_3$) en solution :



Donc le produit d'activité ionique est :

$$PAI = aCa^{2+} \cdot aCO_3^{2-}$$

($a_{Ca^{2+}}$ = activité de l'ion Ca^{2+})

A l'état d'équilibre thermodynamique le produit de solubilité de la calcite (K_{CaCO_3}) est :

$$K_{CaCO_3} = a_{Ca^{2+}} \cdot a_{CO_3^{2-}} / a_{CaCO_3}$$

L'indice de saturation exprimé est :

$$IS = \log PAI / K_{CaCO_3}$$

$IS = 0$, l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite.

$IS > 0$, l'eau est sursaturée par rapport à la calcite.

$IS < 0$, l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite.

De la même manière, les indices de saturations vis-à-vis de l'aragonite, de la dolomite, du gypse et de l'anhydrite sont calculés. Les résultats de calcul des indices de saturation sont donnés dans le tableau 27.

Points d'eaux	Cl (mg/l)	IS Calcite	IS Aragonite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Anhydrite
P1	184	0,01	-0,13	-0,65	-1,39	-1,61
P2	130	-0,32	-0,46	-1,27	-1,66	-1,88
P3	239	-0,5	-0,64	-1,11	-1,73	-1,95
P4	157	-0,09	-0,24	-0,87	-1,66	-1,88
P5	177	0,03	-0,11	-0,92	-1,66	-1,88
P6	102	-0,02	-0,16	-1,03	-1,76	-1,98
P7	171	0,04	-0,11	-0,84	-1,61	-1,83
P8	307	-0,03	-0,17	-0,85	-1,18	-1,4
P9	273	-0,12	-0,26	-0,79	-1,25	-1,47
P10	382	0,29	0,14	-0,53	-0,74	-0,96
P11	320	0,23	0,09	-0,55	-0,59	-0,81
P12	607	0,25	0,11	-0,42	-0,65	-0,87
P13	171	-0,06	-0,21	-0,5	-1,74	-1,96
P14	484	0,32	0,17	-0,33	-0,92	-1,15
P15	205	0,02	-0,12	-0,98	-1,41	-1,63
P16	225	0,08	-0,06	-0,91	-1,08	-1,3
P17	579	0,18	0,04	-0,87	-0,92	-1,14
P18	89	-0,28	-0,34	-1,73	-1,69	-1,91
P19	245	0,16	0,02	-0,46	-1,17	-1,39
P20	341	0,37	0,23	-0,16	-0,71	-0,93
P21	259	0,2	0,06	-0,72	-1,07	-1,29

P22	191	0	-0,14	-0,99	-1,46	-1,68
P23	319,5	-0,02	-0,17	-0,98	-1,3	-1,52
P24	142	-0,19	-0,33	-1,28	-2,02	-2,24
P25	177,8	0	-0,14	-0,89	-1,49	-1,72
P26	177,5	0,01	-0,13	-0,89	-1,61	-1,83
P27	106,5	-0,15	-0,29	-1,19	-1,46	-1,68
P28	146,3	-0,39	-0,53	-1,5	-1,89	-2,11
P29	127,8	-0,06	-0,21	-0,94	-1,39	-1,67
P30	159	-0,04	-0,19	-1,12	-1,45	-1,67

Tableau 27 : Les indices de saturation de la nappe de la région de Bel Hacer.

D'après ce tableau, les indices les plus faibles étant ceux de la dolomite, du gypse et l'anhydrite tandis que ceux de la calcite et l'aragonite montrent dans leurs majorité une saturation ou presque, ce qui confirme le faciès essentiellement chloruré de la nappe de la région de Bel Hacer.

10. ETUDE STATISTIQUE DES DONNEES HYDROCHIMIQUES :

Parmi les méthodes statistiques multidimensionnelles, nous avons opté pour l'Analyse en Composante Principale, qui est une méthode mathématique d'analyse de données qui consiste, d'une part, à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre l'ensemble des variables, d'autre part, de mieux suivre l'évolution du chimisme de l'eau et la détermination des caractères dominants dans le milieu. Pour cela, nous avons entrepris cette étude sur les 30 points d'eaux et 10 variables définies comme suit :

- Les éléments chimiques majeurs en mg/l, (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- , NO_3^-).
- Le pH.
- La conductivité.

10.1 PARAMETRES REPRESENTATIFS :

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Variables	Max. (mg/l)	Min. (mg/l)	Moyenne (mg/l)	Ecart-type
Ca	294	50	134.24	61.11
Mg	60	8	29.90	13.45
Na	511	55	164.56	106.65
K	8	1	3.45	1.79
Cl	607	89	255.79	138.84
SO ₄	468	37	157.04	119.02
HCO ₃	403	201	294.27	55.24
NO ₃	150	41	67.78	0.33
pH	8.2	6.78	7.27	0.34
Cond.	2.5	0.711	1.35	0.24

Tableau 28 : Paramètres statistiques élémentaires.

10.2 MATRICE DE CORRELATION :

Les coefficients de corrélation entre les différents éléments sont regroupés dans le tableau 29. La matrice de corrélation montre une étroite relation entre la conductivité et le potassium (0.73), entre la conductivité et les chlorures (0.71) et, avec un degré moindre, entre le sodium (0.63). C'est donc ces derniers éléments qui seraient probablement les principaux responsables de la minéralisation des eaux souterraines. D'autre part, il existe une bonne relation entre Cl-NO₃ (0.73) et, avec un degré moindre entre SO₄-NO₃ (0.62) suggérant une origine superficielle, probablement due à la pollution par l'utilisation des engrais agricoles.

Cette matrice montre aussi une bonne corrélation entre Na-SO₄ (0.84), Na-Cl (0.80), Ca-Cl (0.78), Cl-SO₄ (0.74). En général, ces éléments font ressortir les faciès chimiques les plus importants de la région (cf. tabl. 26).

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	pH	Cond.
Ca	1									
Mg	0,27	1								
Na	0,45	0,16	1							
K	0,44	0,09	0,61	1						
Cl	0,78	0,37	0,80	0,63	1					
SO ₄	0,66	0,31	0,84	0,53	0,74	1				
HCO ₃	0,42	0,20	0,54	0,42	0,41	0,55	1			
NO ₃	0,63	0,23	0,69	0,42	0,73	0,62	0,33	1		
pH	-0,36	-0,42	-0,11	0,29	-0,23	-0,34	-0,01	-0,31	1	
Cond.	0,56	0,09	0,63	0,73	0,71	0,59	0,46	0,42	0,31	1

Tableau 29 : Matrice de corrélation.

10.3 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (A.C.P.) :

10.3.1 ETUDE DES VARIABLES :

La figure 80, représente l'espace des variables chimiques considérées. L'ensemble de l'information est bien représenté par les axes 1 et 2 puisque, à eux seuls, ils constituent 71% de la variance totale. Les éléments représentés par le cercle rouge regroupent les variables qui sont liés par une bonne corrélation. Le pH et avec un degré moindre le magnésium se détachent nettement du groupe et confirment ainsi leur non corrélation (cf. tab. 29 matrice de corrélation). Le pH et le magnésium peuvent avoir donc une origine totalement différente.

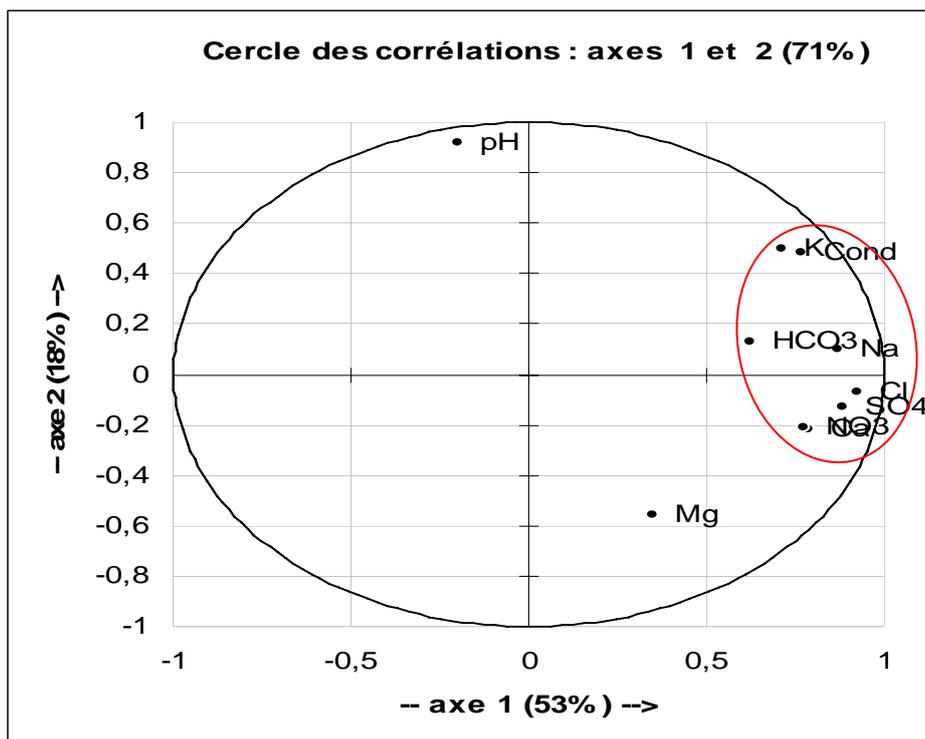


Figure 80 : Cercle des corrélations.

10.3.2 ETUDE DES INDIVIDUS (fig. 81):

Pour l'étude des individus, on se limite au plan principal formé par l'axe 1 et 2 (71%) puisque la majorité des variables sont bien représentées. On remarque sur ce plan que la majorité des points d'eau de la région sont regroupé dans une seule zone montrant ainsi une bonne homogénéité chimique des eaux, sauf pour le point d'eau P23 et P12.

La projection des individus sur ce plan montrent aussi une évolution progressive de la minéralisation dans le sens de la flèche. La figure 81 nous permet de distinguer deux groupes principaux : les eaux les moins minéralisées à gauche de l'axe 1 s'opposant aux eaux les plus minéralisées à droite donc plus chargées en chlorures.

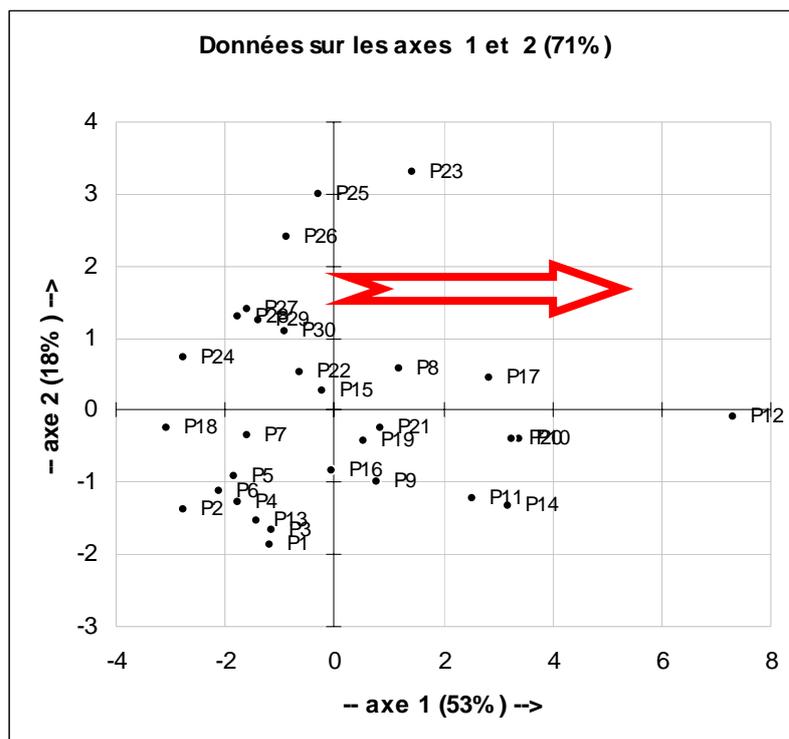


Figure 81 : Etude des individus.

11. QUALITÉ DE L'EAU :

11.1 POTABILITÉ DE L'EAU :

Des exigences ont été définies par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) pour ce qui concerne les paramètres physico-chimiques définissant une eau salubre et propre destinée à la consommation humaine. Les teneurs acceptables indiquées dans le tableau 30, définissent une eau généralement acceptable par le consommateur ; par contre les teneurs admissibles représentent les limites, à partir desquelles la potabilité de l'eau est nettement diminuée.

D'après les résultats des analyses physico-chimiques des points d'eau, la concentration en mg/l de l'ensemble des éléments chimiques (tabl. 3 en Annexe) est généralement en dessous des teneurs admissibles exigée par l'O.M.S. Dans notre cas, la concentration des éléments chimiques dépassant les teneurs admissibles sont représentés par le Calcium (Ca) avec 16.66 % de l'ensemble de nos points d'eaux, les Sulfates (SO₄) avec 6.66 % des points d'eaux et le Chlore (Cl) avec 3.33 % des points d'eaux. Par contre pour les nitrates on enregistre un taux plus important dépassant de moitié la totalité des prélèvements (56.66 %). Les points d'eau n°12, 14 et 16 donnent des concentrations

respectives de 150, 111 et 96, mg/l en nitrate, représentant ainsi un danger non négligeable du point de vue santé humaine.

Eléments	Teneurs acceptables (mg/l)	Teneurs admissibles (mg/l)
Ca²⁺	75	200
Mg²⁺	50	120
SO₄²⁻	200	400
Cl⁻	200	600
NO₃⁻	/	50
PH	7 < PH < 8.5	6.7 < PH < 9.2
Résidu sec	500	1500

Tableau 30 : potabilité de l'eau « Normes de l'O.M.S. ».

11.2 QUALITÉ DES EAUX D'IRRIGATION :

Dans plusieurs pays en voie de développement, l'irrigation représente jusqu'à 90 % de toutes les utilisations d'eau et joue un rôle important dans la production de nourriture et la sécurité alimentaire. Les normes de qualité chimique de cette eau tiennent compte de la nature des cultures, du type du sol, du climat, de la méthode d'irrigation et des caractéristiques chimiques de l'eau. Cette dernière est très importante et peut augmenter ou diminuer la fertilité du sol selon la quantité des sels minéraux qu'elle lui apporte.

Pour parer à toute éventualité, nous avons procédé dans cette partie à un certain nombre de calcul afin de déterminer avec exactitude la qualité de l'eau et d'en juger de son utilisation ou non pour l'irrigation. Pour cela nous avons utilisé deux méthodes de classification :

- Classification Américaine.
- Classification établie par la F.A.O. (Food and Agriculture Organization).

11.2.1 CLASSIFICATION AMERICAINE :

Le laboratoire d'analyse des eaux du département d'agriculture Américain préconise l'adoption du taux d'absorption de Sodium par le sel dénommé le S.A.R. Cette méthode fait intervenir la salinité et le risque d'alcalinisation des sols.

11.2.1.1 LA SALINITÉ : (Tabl. 31)

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de Calcium (Ca) de Magnésium (Mg), de Sodium (Na), les Chlorures (Cl), les Sulfates (SO₄) et les Bicarbonates (HCO₃). Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires aux plantes dues à une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend difficile l'absorption des éléments minéraux par les plantes. La salinité est mesurée couramment par la conductivité électrique. La relation qui existe entre la conductivité électrique (C.E. à 25°C) de l'eau et celle de l'extrait saturé de l'eau, nous a permis la détermination de quatre classes d'eau :

- C.E. < 250 µmhos/cm : Eau de faible salinité, classe (C₁).
- 250 < C.E. < 750 µmhos/cm : Eau de salinité moyenne, classe (C₂).
- 750 < C.E. < 2250 µmhos/cm : Eau de forte salinité, classe (C₃).
- C.E. > 2250 µmhos/cm : Eau de très forte salinité, classe (C₄).

N° du point d'eau	Conductivité (µmhos)	Classes	Qualité de l'eau
01	959	C ₃	Eau à forte salinité
02	782	C ₃	Eau à forte salinité
03	1080	C ₃	Eau à forte salinité
04	858	C ₃	Eau à forte salinité
05	894	C ₃	Eau à forte salinité
06	734	C ₂	Eau de faible salinité
07	878	C ₃	Eau à forte salinité
08	1530	C ₃	Eau à forte salinité
09	1360	C ₃	Eau à forte salinité
10	1820	C ₃	Eau à forte salinité
11	1690	C ₃	Eau à forte salinité
12	2490	C ₄	Eau de très forte salinité
13	1040	C ₃	Eau à forte salinité
14	2080	C ₃	Eau à forte salinité
15	1280	C ₃	Eau à forte salinité

16	1370	C ₃	Eau à forte salinité
17	2280	C ₄	Eau de très forte salinité
18	711	C ₂	Eau de faible salinité
19	1400	C ₃	Eau à forte salinité
20	1920	C ₃	Eau à forte salinité
21	1520	C ₃	Eau à forte salinité
22	1160	C ₃	Eau à forte salinité
23	1800	C ₃	Eau à forte salinité
24	1100	C ₃	Eau à forte salinité
25	2500	C ₄	Eau de très forte salinité
26	1600	C ₃	Eau à forte salinité
27	1600	C ₃	Eau à forte salinité
28	1700	C ₃	Eau à forte salinité
29	1600	C ₃	Eau à forte salinité
30	1500	C ₃	Eau à forte salinité

Tableau 31 : Classement de l'eau selon la conductivité électrique.

On constate que la majorité des échantillons (83.33%) prélevés dans notre secteur d'étude sont caractérisés par des eaux à forte salinité. Les eaux à très forte salinité sont représentées par les points d'eau n°12, 17 et 25 qui représentent 10% de l'ensemble des échantillons et seulement deux points d'eau n° 06 et 18 sont caractérisés par une eau à faible salinité (6.66%).

11.2.1.2 ALCALINISATION :

Le danger d'alcalinisation est évalué à partir de la quantité de sodium (Na) absorbé par le sol. Le Sodium (Na) est l'un des éléments le plus indésirable dans l'eau d'irrigation. Si sa quantité est forte le danger sera imminent et les sols peuvent devenir alcalins. La concentration du Sodium dans l'eau d'irrigation est exprimée par le ratio d'absorption du sodium (S.A.R.) qui décrit la quantité du sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium. On devra tenir compte du taux d'absorption de cet élément par la relation suivante :

$$\text{S.A.R.} = \text{Na} / (\text{Ca} + \text{Mg} / 2)^{0.5}$$

Si : S.A.R. < 10 : Eau excellente.
10 < S.A.R. < 18 : Eau bonne.

18 < S.A.R. < 26 : Eau convenable.

S.A.R. > 26 : Eau médiocre.

D'après le calcul du S.A.R. (tabl. 32), la majorité des eaux prélevées au niveau de notre secteur sont bonnes à convenables pour l'irrigation (66.66%). Elles sont excellentes avec seulement 16.66% de l'ensemble des échantillons. Malheureusement médiocre pour les points d'eaux n° 08, 09, 10, 12 et 23 qui représentent eux aussi 16.66% de la totalité de nos échantillons.

N° du point d'eau	S.A.R.	Qualité de l'eau
01	11.20	Bonne
02	9.91	Excellente
03	14.03	Bonne
04	10.62	Bonne
05	9.75	Excellente
06	6.79	Excellente
07	10.84	Bonne
08	38.10	Médiocre
09	33.92	Médiocre
10	27.48	Médiocre
11	19.32	Convenable
12	46.45	Médiocre
13	10.55	Bonne
14	8.77	Excellente
15	22.90	Convenable
16	13.03	Bonne
17	24.79	Convenable
18	13.59	Bonne
19	14.58	Bonne
20	18.63	Convenable
21	13.50	Bonne
22	20.02	Convenable
23	27.09	Médiocre

24	8.86	Excellente
25	14.67	Bonne
26	18.79	Bonne
27	14.27	Bonne
28	18.13	Convenable
29	15.55	Bonne
30	15.11	Bonne

Tableau 32 : Classification de la qualité de l'eau selon la valeur du S.A.R.

En utilisant la méthode américaine, on reporte les deux paramètres déjà calculés (S.A.R. et conductivités) sur un diagramme (fig. 82). Celui-ci est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols. Il utilise pour cela la conductivité électrique ou la charge totale dissoute et l'indice d'absorption du sodium (S.A.R.) qui est une mesure de la sodisation du sol du fait de l'irrigation. Le diagramme est découpé en quatre classes de salinité (axe des abscisses) et quatre classes de risques de sodisation (axe des ordonnées). L'intersection de ces points sur ce diagramme permet de donner une classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation.

Dans notre cas, plusieurs catégories ou classes d'eaux sont à signaler :

- Première catégorie : Dans cette catégorie on note la présence d'un seul point d'eau n° 06 qui appartient à la classe de couple SAL2-SOD2 et qui correspond à une eau de qualité moyenne à médiocre. À utiliser avec précaution. Nécessité de drainage avec doses de lessivage et/ou apport de gypse.

- Deuxième catégorie : (SAL3-SOD2) : points d'eau n° 01, 02, 04, 05, 07, 13, 14 et 24) correspond aux eaux de qualité médiocre à mauvaises. Exclure les plantes sensibles et les sols lourds. Utilisable avec beaucoup de précaution dans les sols légers et bien drainés avec doses de lessivage et/ou apports de gypse. La même chose pour le point d'eau n° 18 qui appartient à la classe de couple SAL2-SOD3.

- troisième catégorie : (SAL3-SOD3 : points d'eau n° 03, 16, 19, 21, 27, 29 et 30) correspond aux eaux de mauvaise qualité. A n'utiliser avec beaucoup de précaution, que dans les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes, risque élevé. Lessivage et apport de gypse indispensable.

- Quatrième catégorie : (SAL3-SOD4 : points d'eau n° 8, 9, 10, 11, 15, 20, 22, 23, 26 et 28) correspond aux eaux de qualité très mauvaise. A n'utiliser que dans des circonstances exceptionnelles.

- Cinquième catégorie : Les points d'eau n°12, 17 et 25 correspondants au couple salinité-sodicité SAL4-SOD4, sont déconseillée pour l'irrigation.

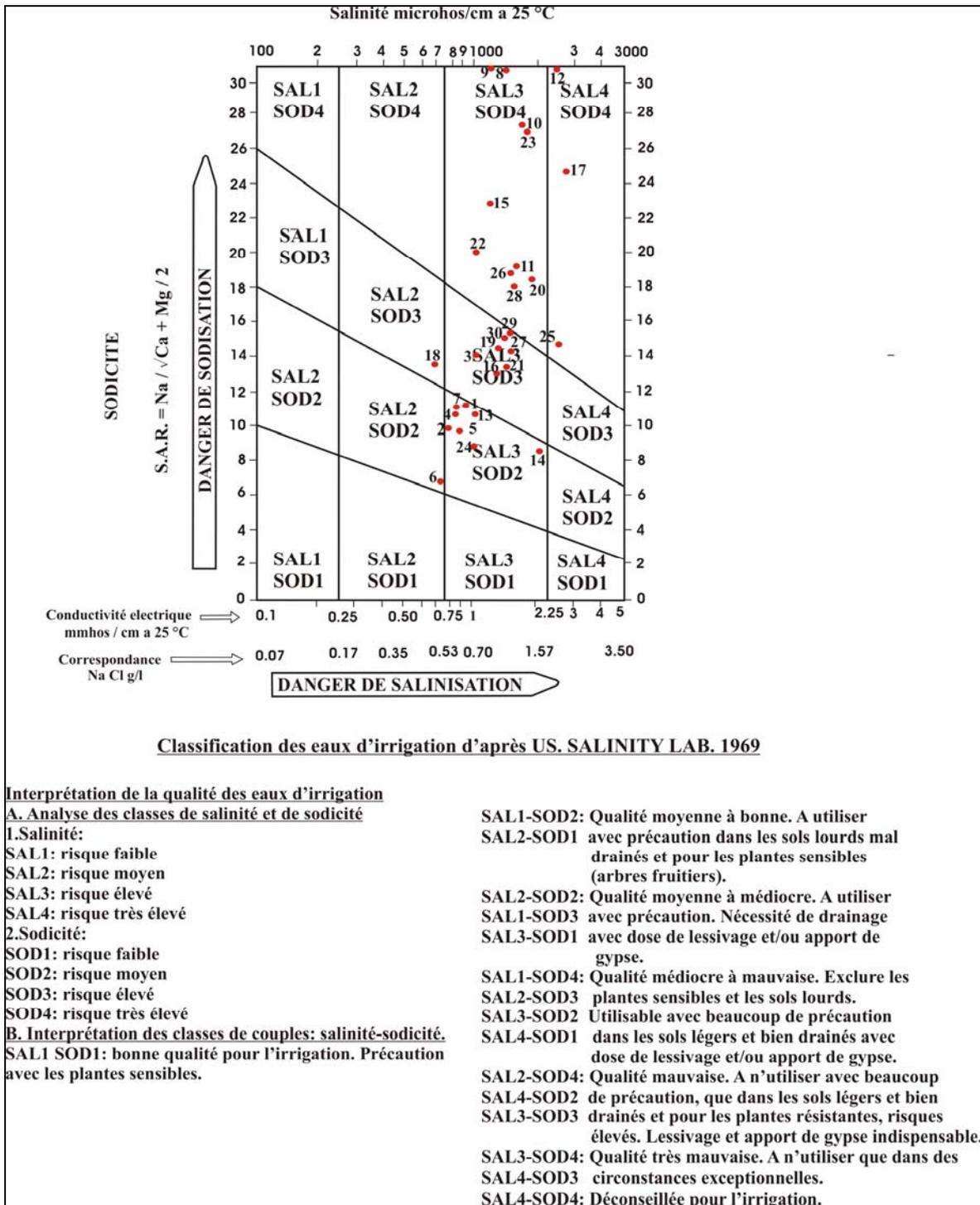


Figure 82 : Interprétation de la qualité des eaux d'irrigation.

11.2.2 CLASSIFICATION DE LA F.A.O :

L'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (F.A.O. : Food and Agriculture Organization) a été créée en octobre 1945 dans le but d'améliorer l'état nutritionnel, le niveau de vie, la productivité agricole et le sort des population rurales en général.

Selon les estimation de la F.A.O., l'accumulation du sel dans le sol a gravement endommagé 30 millions d'hectares de terres irriguées, sur les 250 millions d'hectares qui existent dans le monde. La surface irriguée pourrait en fait diminuer dans le monde à un moment où elle devrait au contraire augmenter afin de répondre à la demande. Pour cela, cette organisation a émis certaines directives permettant d'évaluer la qualité de l'eau d'irrigation (tabl. 33) afin de mieux aider le praticien à comprendre, identifier et surtout à améliorer la réaction du sol et des végétaux.

Nature du problème	Paramètres et unités	Restriction pour l'irrigation		
		Aucune	Légère à modéré	Forte
Salinité (influe sur l'eau disponible pour la plante)	C (mmhos)	< 0.7	0.7 – 3	> 3
Toxicité de certains ions (affecte les cultures sensibles)				
Sodium (Na)				
• Irrigation de surface	S.A.R	< 3	3 – 9	> 9
• Irrigation par aspersion	(még/l)	< 3	> 3	
Chlorure (Cl)				
• Irrigation de surface	még/l	< 4	4 – 10	> 10
• Irrigation par aspersion	még/l	< 3	> 3	

Tableau 33 : Restrictions des eaux d'irrigation d'après la F.A.O.

11.2.2.1 APPLICATION :

Tout en respectant les directives de la F.A.O., nous avons reporté sur le tableau 34 tous les calculs nécessaires pour identifier la qualité des eaux d'irrigation de la région de Bel Hacer.

N°du point d'eau	C.E.	S.A.R	Cl	Toxicité (Na)		Toxicité (Cl)	
				Irrigation de surface	Irrigation par aspersion	Irrigation de surface	Irrigation par aspersion
01	0.959	2.02	5.18	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
02	0.782	1.78	3.66	A.R.	A.R.	A.R.	R.L.M.
03	1.08	2.34	6.73	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
04	0.858	1.92	4.42	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
05	0.894	1.81	4.98	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
06	0.734	1.27	2.87	A.R.	A.R.	A.R.	A.R.
07	0.878	2.01	4.81	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
08	1.53	6.99	8.64	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
09	1.36	6.05	7.69	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
10	1.82	5.17	10.76	R.L.M.	R.L.M.	F.R.	R.L.M.
11	1.69	3.61	9.01	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
12	2.49	8.60	17.09	R.L.M.	R.L.M.	F.R.	R.L.M.
13	1.04	1.83	4.81	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
14	2.08	1.63	13.63	A.R.	A.R.	F.R.	R.L.M.
15	1.28	4.29	5.77	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
16	1.37	2.45	6.34	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
17	2.28	4.70	16.31	R.L.M.	R.L.M.	F.R.	R.L.M.
18	0.711	2.57	2.51	A.R.	A.R.	A.R.	A.R.
19	1.4	2.67	6.9	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
20	1.92	3.45	9.6	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
21	1.52	2.54	7.3	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
22	1.16	3.74	5.38	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
23	1.8	5.00	9.00	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
24	1.1	1.66	4.00	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.

25	2.5	2.75	5.00	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.
26	1.6	3.50	5.00	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
27	1.6	2.63	3.00	A.R.	A.R.	A.R.	R.L.M.
28	1.7	3.30	4.10	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.	R.L.M.
29	1.6	2.86	3.60	A.R.	A.R.	A.R.	R.L.M.
30	1.5	2.85	4.5	A.R.	A.R.	R.L.M.	R.L.M.

Avec : **A.R.** : **Aucune Restriction.**
 R.L.M. : **Restriction Légère à Modéré.**
 F.R. : **Forte Restriction.**

Tableau 34 : Restriction des eaux d'irrigation dans la région de Bel Hacer.

11.2.2.1.1 LA SALINITÉ :

D'après les valeurs des conductivités électriques de nos échantillons, les eaux analysées présentent toutes des valeurs comprises entre 0.7 et 3 mmhos. Elles présentent, cependant, une restriction légère à modéré pour l'irrigation.

11.2.2.1.2 TOXICITÉ DUE AU SODIUM :

Aucune restriction pour l'irrigation de surface ou d'aspersion n'est signalée pour les 60 % des eaux de notre région. Les autres points d'eau (40 %) sont caractérisés par une restriction légère à modéré.

11.2.2.1.3 TOXICITÉ DUE AU CHLORURE :

Pour l'irrigation de surface les points d'eau n° 02, 06, 18, 27 et 29 soit 16.66 % de la totalité de nos échantillons ne présentent aucune restriction pour l'irrigation. Par contre, les points d'eau n° 10, 12, 14 et 17 (13.33%) sont caractérisés par des eaux très chlorurées et donc une forte restriction pour l'irrigation de surface. Les 70 % restants présentent une restriction légère à modéré.

Pour l'irrigation par aspersion, presque la totalité des points d'eau présente une restriction légère à modérer pour l'irrigation. Sauf pour les points d'eau n° 06 et 18 où il n'y a aucune restriction.

12. CONCLUSION :

Les résultats des analyses chimiques des points d'eau prélevés dans notre secteur ont permis de dresser plusieurs cartes donnant la répartition spatiale des éléments chimiques majeurs et leurs évolutions à travers toute la région d'étude. En plus de la composition chimique des eaux de la région, ces cartes renseignent et confirment le sens de l'écoulement de la nappe.

Dans la région d'étude, les faciès chimiques des eaux les plus dominant sont : Le faciès Chloruré Calcique et le faciès Chloruré Sodique bien réparti dans la région avec cependant, un faciès Bicarbonaté Sodique localisé entre la forêt Domanial d'Ennaro et la forêt Domanial de l'Akboube. Les eaux de notre secteur sont caractérisées par une minéralisation moyennement élevée (allant de 509 à 1898 mg/l).

L'analyse en composante principale montre que tous les éléments chimiques sont liés par une bonne corrélation sauf pour l'élément pH et le Magnésium qui se détachent du lot et confirme ainsi leur non corrélation.

L'étude de la qualité des eaux d'irrigation selon les deux méthodes, Américaine et celle établie par la F.A.O., a montré que ces eaux sont en générale bonnes à convenables pour la première méthode et présente une restriction légère à modérer pour la deuxième.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail, arrivé à sa fin, n'est qu'une introduction à une meilleure connaissance de certains paramètres hydroclimatologiques, géologiques, hydrodynamiques et hydrochimiques de la région de Bel Hachel.

Située au Nord-Ouest de l'Algérie à environ 77 km à vol d'oiseau à l'Est d'Oran et à l'extrémité Est du Plateau de Mostaganem, la région de Bel Hachel occupe toute la carte topographique n°129 avec une altitude moyenne de 270 m. Sur le plan géomorphologique cette région est affectée par des petites ondulations orientées Nord-Est/Sud-Ouest devenant de plus en plus importantes vers le Sud-Est où l'altitude passe brutalement à plus de 500 m au niveau de la Montagne de Bel Hachel. Le réseau hydrographique dans notre secteur est insignifiant.

Sur le plan hydroclimatologique, la région est caractérisée par un climat méditerranéen semi aride avec un hiver tempéré selon L. Emberger. Les précipitations à l'échelle de toute la région de Mostaganem d'après la carte des précipitations de l'I.N.C. pour la période 1969/72 sont comprises entre 400 et 500 mm (au niveau de notre secteur). Cette valeur a baissé à 315.9 mm pour la période 1989-2003 avec une température estimée à 17.75 °C à la station climatologique de Mostaganem. L'alimentation de la nappe de la région de Bel Hachel se fait principalement par les eaux de pluie vu l'absence d'un réseau hydrographique bien organisé. Le calcul du bilan hydrique donne des valeurs d'évapotranspirations ou déficits d'écoulements soit égales ou supérieures aux précipitations (315.9 mm). Seul la méthode de P. Verdeil, donne un déficit inférieur aux précipitations ($D = 300$ mm). Le calcul de l'infiltration est fondamental pour le calcul du bilan hydrique. Sa valeur est estimée dans notre cas à 2.35 mm, soit 0.74% des précipitations, ce qui représente une faible valeur pour l'infiltration.

Pour l'étude géologique, nous avons essayé de donner une petite synthèse des travaux déjà réalisés par plusieurs auteurs à l'échelle du bassin du bas Chélif. Ainsi l'étude

lithostratigraphique montre que les formations perméables intervenants dans notre système sont les Grés marin de l'Astien et les sables grossiers du Pliocènes continental, le tout surmonté par un Quaternaire débutant par un Calabrien gréseux, par des dunes consolidées et sols rouges en alternance du Villafranchien. Puis arrivent les terrains récents constitués par une carapace calcaréo-gréseuse, des dunes de sables et des sables limoneux. Toutes ces formations reposent sur un substratum imperméable caractérisé par des marnes bleues avec quelques niveaux gypseux du Miocène supérieur surmonté par un Pliocène inférieur marneux. Sur le plan structural, la région fait partie du bassin du bas Chéelif, elle est affectée par une succession de plis dissymétriques orientés Sud-Ouest/Nord-Est accompagnée d'accidents, en général, de même direction (N50°-70°). Cette partie a été complétée par l'étude de la variation des épaisseurs des formations géologiques à travers tout le secteur en utilisant les données de quelques logs de forage implantés dans la région. Ces variations ont données des épaisseurs maximales du Pliocène supérieur à L'Ouest au niveau de la région de Oulad Sidi Abd Allah (30 à 55 m) et vers l'Est au niveau de la Montagne de Bel Hacer (30 à 50 m). Par contre, les épaisseurs maximales du Quaternaire sont localisées au Sud-Ouest au niveau du synclinal de Bouguirat (40 à 70 m) et vers l'Est du secteur d'étude (40 à 75 m). L'analyse granulométrique étudiée conformément avec la nature des terrains donne des sédiments, en général, bien classés à moyennement bien classés avec une asymétrie très forte à moyenne et une distribution normale à plus prononcée. D'après les diagrammes, 54.54% des sables sont moyens et 45.46% sont fins.

L'étude hydrogéologique est matérialisée par une carte piézométrique réalisée en juin 2007 à partir de 150 points de mesures. Cette carte semble délimiter quatre bassins hydrogéologiques avec un gradient hydraulique compris entre 0.005 (zone favorable pour l'implantation des forages) et 0.1. Les zones d'alimentation sont localisées surtout aux niveaux des reliefs les plus importants (forêt domaniale d'Ennaro, forêt domaniale de l'Akboube et la Montagne de Bel Hacer). Les transmissivités calculées selon les différentes méthodes, à partir des pompages d'essai de quelques forages, ont donné des valeurs plus ou moins rapprochées (T compris entre $1,70.10^{-4}$ et $3,53.10^{-2}$ m²/s et S compris entre $2,64.10^{-3}$ et $3,43.10^{-2}$). La méthode de BOULTON a donné des perméabilités comprises entre $4,3.10^{-6}$ et $8,89.10^{-5}$ m/s. Ces valeurs sont de même ordre de grandeur que celles calculées par l'expression de HANZEN (9.10^{-6} à $4,9.10^{-5}$ m/s), à partir des échantillons de

sable collectés en différents endroits du secteur d'étude. Ceci confirme la nature lithologique de la majorité de nos formations.

L'hydrochimie de la nappe de la région de Bel Hacer permet d'apprécier la qualité chimique de ses eaux très sollicitées surtout pour l'irrigation. Les eaux de cette région sont principalement chlorurées calciques et chlorurée sodique avec un faciès bicarbonaté sodique localisé surtout entre la Forêt domaniale d'Ennaro et la Forêt domaniale de l'Akboube. La minéralisation augmente selon le sens de l'écoulement de la nappe et où le gradient hydraulique de la carte piézométrique devient moins important à plus ou moins faible dans certaines régions. Notons que la concentration en sel dissous dans la région de Oulad Sidi Abd Allah est au maximum et peut atteindre 1400 mg/l. En général, la répartition spatiale des éléments chimiques à travers notre région est due surtout au lessivage des terrains encaissant. L'analyse en composante principale montre que tous les éléments chimiques sont liés par une bonne corrélation sauf pour l'élément pH et le Magnésium qui se détachent du lot et confirme ainsi leur non corrélation.

Enfin, la qualité des eaux d'irrigation selon les deux méthodes, Américaine et celle établie par la F.A.O., ont montré que ces eaux sont en générale bonnes à convenables pour la première méthode et présente une restriction légère à modéré pour la deuxième.

En conclusion, nous souhaitons qu'à l'avenir nous pourrions avec ce modeste travail, approfondir nos connaissances par d'autres méthodes d'investigations afin de mieux gérer et maîtriser les ressources en eau de la région de Bel Hacer.

BIBLIOGRAPHIE

- BAGNOULS F. et GAUSSEN H. (1952)** – Les climats biologiques et leur classification. Ann. de Géog., n°288.
- BAICHE A. (1993)** – Hydrogéologie de la région de Mostaganem. Magister, Oran, 422p., 158 fig., 102 tabl.
- BRIVE A. et DALLONI M. (1913)** – Carte géologique de Mostaganem-Belle-côte. 1/50 000 (102-108). Service géologique de l'Algérie. Imp. A. Jourdan, Alger.
- CASTANY G. (1982)** – Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition Dunod, Paris
- CHAUMONT et PAQUIN (1971)** – Carte pluviométrique de l'Algérie nord occidentale au 1/50 000. Notice explicative.
- COUTAGNE (1935)** – Le déficit d'écoulement et l'évaporation réelle. Mesure et interprétation dans les conditions naturelles, La Météorologie, 4, 379-401.
- DELFAUD J. et THOMAS G. (1973)** – Place de quelques industries préhistoriques dans les dépôts Quaternaire de l'Oranie. C.R. Acad. Sci. Paris, (D), t. 277, p. 133-136.
- DELTEIL J. (1971)** – Les flyschs du Dahra et leurs relations paléogéographiques. Bull. Soc. Géol. France, Paris, 10 p., 2 fig.
- FENET B. (1975)** – Recherches sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du Bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'Orogène nord-maghrébin : les Monts du Dj. Tessala et les massifs du littoral oranais. Thèse Doctorat ès Science, Nice, 301 p., 101 fig., 4 pl., cartes.
- GAUCHEZ J. (1981)** – Etude hydrogéologique du Plateau de Mostaganem (Algérie). Thèse Doctorat de troisième cycle de géologie des ensembles sédimentaires. Tome 1 texte, 125 p., 44 fig., 22 tabl., 20 ph.

- HASSANI M.I. (1987)** – Hydrogéologie d'un bassin endoréïque semi-aride, le bassin versant de la grande Sebkha d'Oran (Algérie). Thèse 3^{ème} cycle, Grenoble, 304 p., 128 fig., 65 tabl.
- PERRODON A. (1957)** – Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. Mém. Serv. Carte géol. Algérie. Nouvelle série, n°12, Alger, 343p.
- RIVIERE A. (1977)** – Méthode granulométrique. Techniques et interprétation. Edition Masson, Paris.
- ROUCHY J.M. (1982)** – La genèse des évaporites messiniennes de Méditerranée. Mém. Mus. ntn. Hist. nat. , Paris, NS, sér. C, L, 267 p.
- S.N. REPAL (1952)** – Le bassin néogène de Cheliff. XIXe Congrès Géologique International, Alger, 1^{er} série, Algérie n°16, 54 p., 2 pl.
- SCHOLLER H. (1962)** – Les eaux souterraines, Edition Masson, Paris.
- SELTZER P. (1946)** – Le climat de l'Algérie, Etude publiée avec le Concours de LASSERRE A., Mle GRAND JEAN A., AUBERTY R., et FOUREY A., I.M.P.G.A., Alger.
- VERDEIL P. (1989)** – Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie. Séminaire des Sciences de la Terre, Alger.
- VIGNAT B. (1960)** – C.R. de visite au forage. - Alimentation en eau potable du Douar Mekhalia. S.E.S., Alger.
- THOMAS G. (1985)** – Géodynamique d'un bassin intra-montagneux, le bassin du Bas Chélif occidental (Algérie) durant le Mio-Plio-Quaternaire. Thèse Doctorat ès-Science, Pau, 594 p., 162 fig., 32 tabl., 3 pl h. t.
- TINTHOIN R. (1948)** – Les aspects physiques du Tell oranais. Edition Facque, Oran.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Plan de situation générale.....	6
Figure 2 : situation géographique de la région d'étude.....	7
Figure 3 : Bloc diagramme du Plateau de Mostaganem (d'après TINTHOIN).....	9
Figure 4: Carte des précipitations moyennes annuelles de la période 1969/1972 (I.N.C.).....	13
Figure 5: Evolution séculaire de la pluviosité sur la région de Mostaganem (Période de 1942-2003).....	14
Figure 6 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Mostaganem.....	17
Figure 7 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Oued El kheir.....	18
Figure 8 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Kheireddine.	18
Figure 9 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Bouguirat.	19
Figure 10 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Bled Touahria.	19
Figure 11 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station des Dunes Cultivées.	20
Figure 12 : Histogramme des précipitations mensuelles à la station de Bel Hacel.	20
Figure 13: Histogramme des précipitations saisonnières des stations utilisées.....	22
Figure 14: Fluctuation des précipitations annuelles des sept stations.....	23
Figure 15: Représentation graphique des variations des moyennes mensuelles des températures, station de Mostaganem (1989-2003).....	26
Figure 16 : Diagramme pluviothermique (Mostaganem).	29
Figure 17 : Diagramme ombrothermique (Mostaganem).	29
Figure 18 : Indice d'aridité annuel à la station de Mostaganem (1989-2003).	32
Figure 19 : Indice d'aridité mensuel à la station de Mostaganem (1989-2003).	32
Figure 20 : Climagramme d'après L. Emberger.	33
Figure 21 : Abaque de Wundt.....	37
Figure 22 : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie P. Verdeil 09/1988.....	38
Figure 23 : Situation géographique du bassin du bas Chélif (d'après Perrodon, 1957).	46
Figure 24 : Structure générale du bassin du bas Chélif (d'après Delfaud et al, 1973).	47
Figure 25 : Esquisse structurale des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale (d'après Perrodon, 1957).	49

Figure 26 : La trame structurale du bassin du bas Chélif occidental (D'après G. Thomas, 1985).	50
Figure 27 : Découpage lithostratigraphique des séries géologiques du bassin du Bas Chélif (d'après A. Perrondon).....	53
Figure 28 : Carte géologique et structurale de la région de Bel Hachel (SONATRACH, division hydrocarbures, direction exploration	57
Figure 29 : Schéma stratigraphique du Pleistocène de Bel Hachel (D'après Perrondon, 1957).	59
Figure 30 : Coupes géologiques du synclinal de Bouguirat (d'après Perrondon, 1957).	61
Figure 31 : Coupe géologique dans la Montagne de Bel Hachel (d'après Perrondon, 1957).....	62
Figure 32 : Localisation des forages hydrauliques	64
Figure 33 : Localisation des différentes directions	70
Figure 34 : Transect F7-F3	71
Figure 35 : Transect F9-F2	73
Figure 36 : Transect F8-F1	74
Figure 37 : Transect F1-F3	75
Figure 38 : Transect F5-F7	76
Figure 39 : Transect F8-F9	77
Figure 40 : Isopaque du Pliocène supérieur dans le secteur d'étude	79
Figure 41 : Isopaque du Quaternaire dans le secteur d'étude	79
Figure 42 : De 1 à 8, Courbes cumulatives de nos échantillons	81
Figure 42 : De 9 à 11, Courbes cumulatives de nos échantillons	82
Figure 43 : Q ₁ Md Q ₃ Diagramme de DOEGLAS (1968).....	87
Figure 44 : C M Diagramme de PASSEGA	87
Figure 45 : Formations géologiques générales et leurs perméabilités.	91
Figure 46 : Carte de localisation des points d'eau.	94
Figure 47 : Carte piézométrique de la région de Bel Hachel (Juin 2007).....	97
Figure 48 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Theis (Piézomètre 142/129).....	100
Figure 49 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Theis (Forage Mekhalia : Saf-Saf).....	101
Figure 50 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Theis (Forage Souaflia)	102
Figure 51 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Jacob	

(Piézomètre 142/129).....	104
Figure 52 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Jacob (Forage Mekhalia : Saf-Saf).....	104
Figure 53 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Jacob (Forage Souafli)	105
Figure 54 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de remontée de Theis (Piézomètre 142/129)	107
Figure 55 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de remontée de Theis (Forage Mekhalia : Saf-Saf).....	107
Figure 56 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de remontée de Theis (Forage Souafli).....	108
Figure 57 : Famille de courbes type de Boulton : $W(U_A, r/B)$ fonction de $1/U_A$ et $W(U_Y, r/B)$ fonction de $1/U_Y$, pour différentes valeurs de r / B	110
Figure 58 : Courbe des indices de retard de Boulton (1963)	110
Figure 59 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode de Boulton (Piézomètre 142/129).....	112
Figure 60 : Courbe interprétative de l'essai de pompage d'après la méthode (Forage Mekhalia : Saf-Saf).....	112
Figure 61 : Localisation des points d'eau destinés à l'analyse physico-chimique.	119
Figure 62 : Carte d'isoteneur des minéralisations.....	124
Figure 63 : Carte d'isoteneur en Calcium.	125
Figure 64 : Carte d'isoteneur en Magnésium.....	126
Figure 65 : Carte d'isoteneur en Sodium.	128
Figure 66 : Carte d'isoteneur en Potassium.	129
Figure 67 : Carte d'isoteneur en Chlore.....	130
Figure 68 : Carte d'isoteneur en Sulfate.	131
Figure 69 : Carte d'isoteneur en Bicarbonate.	133
Figure 70 : Carte d'isoteneur en Nitrate.	134
Figure 71 : Carte d'isoteneur de rMg^{++} / rCa^{++}	135
Figure 72 : Carte d'isoteneur de rSO_4^- / rCl^-	137
Figure 73 : Carte d'isoteneur de rNa^+ / rCl^-	138
Figure 74 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (1).....	145
Figure 75 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (2).....	146
Figure 76 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (3).....	147

Figure 77 : Diagramme de Piper (1).	148
Figure 78 : Diagramme de Piper (2).	148
Figure 79 : Diagramme de Piper (3).	149
Figure 80 : Cercle des corrélations	154
Figure 81 : Etude des individus	155
Figure 82 : Interprétation de la qualité des eaux d'irrigation.....	162

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les différentes stations utilisées.....	14
Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Mostaganem.	15
Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Oued El Kheir.....	15
Tableau 4: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Kheireddine.	15
Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Bouguirat.	16
Tableau 6: Précipitations moyennes mensuelles à la station Bled Touahria.....	16
Tableau 7: Précipitations moyennes mensuelles à la station des Dunes cultivées.....	16
Tableau 8: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Bel Hacel.	17
Tableau 9: Précipitations saisonnières.....	21
Tableau 10: Précipitations annuelles dans les différentes stations.....	24
Tableau 11: Moyennes mensuelles et annuelles des températures à la station de Mostaganem (1989-2003).....	25
Tableau 12: Températures et précipitations moyennes mensuelles, station de Mostaganem (1989-2003).	27
Tableau 13: Rapport de P / T des précipitations et des températures moyennes mensuelles, station de Mostaganem (1989-2003).	28
Tableau 14 : Indices d'aridités mensuels à la station de Mostaganem.....	31
Tableau 15 : Valeurs de l'ETP corrigées d'après la méthode de Thornthwaite.....	35
Tableau 16 : Bilan hydrologique selon la méthode Thornthwaite (station de Mostaganem, 1989-2003).....	41
Tableau 17 : Comparaison des valeurs d'évapotranspiration.....	42
Tableau 18 : Nomenclature des termes utilisés dans le découpage du Néogène de L'Oranie (in M.I. Hassani, 1987).....	52
Tableau 19 : Tableau de classement de γ_i	83
Tableau 20 : Tableau de classement de Ski.....	84
Tableau 21 : Tableau de classement de Kg.....	85
Tableau 22 : Valeurs de T et S selon les quatre méthodes.....	113
Tableau 23 : Perméabilités calculées à partir des transmissivités.....	114
Tableau 24 : Détermination des perméabilités à partir de la formule de Hazen.....	115
Tableau 25 : Normes Française pour la potabilité des eaux.....	122

Tableau 26 : Formules caractéristiques et faciès chimique de l'eau.	139
Tableau 27 : les indices de saturation de la nappe de la région de Bel Hachel	151
Tableau 28 : Paramètres statistiques élémentaires	152
Tableau 29 : Matrice de corrélation.....	153
Tableau 30 : potabilité de l'eau « Normes de l'O.M.S. ».....	156
Tableau 31 : Classement de l'eau selon la conductivité électrique.	158
Tableau 32 : Classification de la qualité de l'eau selon la valeur du S.A.R.....	160
Tableau 33 : Restrictions des eaux d'irrigation d'après la F.A.O.	163
Tableau 34 : Restriction des eaux d'irrigation dans la région de Bel Hachel.	165

ANNEXES

	1%	5%	10%	16%	25%	50%	60%	75%	84%	95%
1	mm = 0.52 φ = 0.94	0.45 1.15	0.3 1.74	0.39 1.36	0.375 1.41	0.31 1.69	0.29 1.79	0.235 2.09	0.19 2.4	0.16 2.64
2	mm = 1.9 φ = /	1.4 /	0.49 1.03	0.395 1.34	0.39 1.36	0.345 1.54	0.32 1.64	0.21 2.25	0.19 2.4	0.16 2.64
3	mm = 0.52 φ = 0.94	0.495 1.02	0.48 1.05	0.445 1.17	0.41 1.29	0.345 1.54	0.32 1.64	0.29 1.79	0.2 2.32	0.16 2.64
4	mm = 1.9 φ = /	1.6 /	0.7 0.51	0.44 1.18	0.395 1.34	0.32 1.64	0.31 1.69	0.25 2	0.19 2.4	0.14 2.84
5	mm = 0.88 φ = 0.18	0.69 0.54	0.52 0.94	0.48 1.06	0.41 1.29	0.325 1.62	0.31 1.69	0.26 1.91	0.22 2.18	0.165 2.6
6	mm = 1.8 φ = /	0.66 0.6	0.525 0.93	0.49 1.03	0.45 1.15	0.38 1.4	0.325 1.62	0.275 1.86	0.25 2	0.165 2.6
7	mm = 0.5 φ = 1	0.485 1.05	0.45 1.15	0.44 1.18	0.4 1.32	0.34 1.56	0.32 1.64	0.26 1.91	0.2 2.32	0.16 2.64
8	mm = 1.15 φ = /	0.42 1.25	0.395 1.34	0.39 1.36	0.385 1.38	0.335 1.58	0.32 1.64	0.275 1.86	0.205 2.29	0.165 2.6
9	mm = 1.75 φ = /	0.505 0.99	0.415 1.27	0.395 1.34	0.385 1.38	0.32 1.64	0.3 1.74	0.235 2.09	0.19 2.4	0.155 2.69
10	mm = 0.41 φ = 1.29	0.395 1.34	0.38 1.4	0.375 1.41	0.34 1.56	0.285 1.81	0.27 1.89	0.21 2.25	0.18 2.47	0.14 2.84
11	mm = 0.4 φ = 1.32	0.385 1.38	0.375 1.41	0.35 1.51	0.33 1.6	0.27 1.89	0.225 2.15	0.185 2.43	0.175 2.51	0.155 2.69

Tableau 1 : Paramètres lus de l'ensemble des échantillons.

	d₅₀	d₁₀	Cu	γ_i	Qdφ	Ski	Kg	Mz
1	1.69	1.74	0.96	0.483	0.34	0.316	0.903	1.81
2	1.54	1.03	0.65	0.665	0.44	0.231	1.216	1.76
3	1.54	1.05	0.66	0.532	0.25	0.357	1.327	1.67
4	1.64	0.51	0.44	0.735	0.33	0.045	1.763	1.74
5	1.62	0.94	0.59	0.592	0.31	- 0.024	1.364	1.62
6	1.4	0.93	0.62	0.545	0.35	0.218	1.156	1.47
7	1.56	1.15	0.71	0.525	0.29	0.345	1.111	1.68
8	1.58	1.34	0.81	0.437	0.24	0.518	1.153	1.74
9	1.64	1.27	0.72	0.522	0.35	0.333	0.982	1.79
10	1.81	1.4	0.71	0.492	0.34	0.308	0.892	1.89
11	1.89	1.41	0.6	0.448	0.41	0.230	0.648	1.97

Tableau 2 : Résultats des calculs des paramètres granulométriques.

N° du point d'eau	X	Y	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	PH	RS (mg/l) 110°C	Miné. (mg/l)	Cond.25 (mms)
01	298.47	282.07	113	37	97	2	184	98	295	44	0.01	6.78	860	728	0.959
02	289.46	284.25	71	26	69	1	130	73	201	49	0.01	7.05	600	560	0.782
03	297.24	289.79	50	60	104	4	239	100	203	45	0.01	7.00	970	820	1.08
04	295.57	287.98	92	30	83	2	157	60	269	57	0.02	7.01	700	651	0.858
05	295.52	287.91	125	20	83	2	177	45	269	44	0.01	7.02	900	679	0.894
06	292.91	295.16	113	18	55	2	102	37	255	74	0.01	7.01	700	526	0.734
07	291.17	291.52	121	23	92	3	171	53	282	41	0.01	7.21	800	666	0.878
08	289.73	291.69	100	25	301	4	307	208	329	62	0.01	7.36	1380	1160	1.53
09	277.59	286.27	88	38	269	2	273	201	302	90	0.01	7.18	1280	1032	1.36
10	277.60	293.72	196	24	288	5	382	334	376	81	0.01	6.85	1680	1381	1.82
11	279.32	295.72	217	33	216	4	320	434	302	59	0.01	6.84	1580	1283	1.69
12	280.99	299.19	204	38	511	7	607	468	369	150	0.04	7.00	2360	1890	2.49
13	290.10	283.75	82	54	87	1	171	60	336	42	0.02	7.22	800	789	1.04
14	284.3	280.50	294	50	115	5	484	147	269	111	0.35	7.05	1540	1579	2.08
15	283.75	279.30	102	15	175	3	205	105	336	74	0.06	7.26	1020	972	1.28
16	281.60	280.40	160	21	124	2	225	153	255	96	1.00	7.16	1100	1040	1.37
17	280.30	279.25	221	20	272	4	579	194	262	72	0.02	7.25	1800	1731	2.28
18	287.00	282.10	74	8	87	1	89	63	201	56	0.01	7.36	660	509	0.711
19	278.00	277.50	143	36	138	4	245	143	349	56	0.01	7.13	1140	1063	1.40
20	286.75	279.20	225	44	216	5	341	316	403	64	0.01	7.12	1580	1457	1.92
21	280.70	281.05	176	21	134	4	259	148	309	88	0.02	7.11	1140	1154	1.52
22	284.05	277.80	106	17	157	4	191	89	302	59	1.6	7.34	900	880	1.16
23	279.60	277.50	113.4	20.8	221.9	8	319.5	131	284.9	78.8	0	8.20	1489	1366	1.80
24	298.10	292.00	80.4	15.7	61.4	2.7	142	27.4	232.4	16.6	0	7.50	846	835	1.10
25	286.70	287.40	97	19.6	112	3.7	177.8	86.4	323.3	45	0.02	8.10	1902	1898	2.50
26	286.90	287.40	93	17.8	139.8	4.1	177.5	69.6	347.7	36.5	0.02	8.00	1226	1215	1.60
27	290.40	285.60	87.6	17.8	103.5	3.9	106.5	94.6	239.1	32.6	0	7.60	1220	1214	1.60
28	284.50	286.30	52.6	15.7	105.9	4.1	146.3	56.6	225.7	32.7	0	7.40	1285	1290	1.70
29	283.00	285.00	97.8	23.8	121.2	3.1	127.8	109	276.3	28.5	0	7.70	1262	1214	1.60
30	286.20	283.00	93	13.4	110.2	4	159	97.4	301.3	48.6	0	7.40	1178	1139	1.5

Tableau 3 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la Région de Bel Hachel.

N° du point d'eau	r%Ca ²⁺ (még/l)	r%Mg ²⁺ (még/l)	r%Na ⁺ (még/l)	r%K ⁺ (még/l)	Σr Cations	r%Cl ⁻ (még/l)	r%SO ₄ ²⁻ (még/l)	r%HCO ₃ ⁻ (még/l)	r%NO ₃ ⁻ (még/l)	Σr Anions	% d'erreur (e %)	Analyse
01	43.62	23.47	32.50	0.38	12.95	40.59	15.98	37.85	05.56	12.76	0.73	Très bonne
02	40.75	24.56	34.44	0.22	08.71	39.56	16.43	35.56	08.54	09.25	3.00	Acceptable
03	20.72	40.96	37.47	0.82	12.06	52.37	16.18	25.83	05.60	12.85	3.17	Acceptable
04	42.95	22.96	33.61	0.46	10.71	40.21	11.37	40.03	08.37	10.99	1.24	Très bonne
05	54.15	14.21	31.19	0.43	11.54	45.19	08.43	39.92	06.44	11.02	2.30	Acceptable
06	59.03	15.46	24.97	0.52	09.57	31.85	08.54	46.39	13.20	09.01	3.01	Acceptable
07	50.37	15.73	33.30	0.58	12.01	42.98	09.83	41.28	05.89	11.19	3.50	Acceptable
08	24.71	10.13	64.65	0.49	20.23	44.62	22.36	27.84	05.16	19.36	2.19	Acceptable
09	22.84	16.19	60.69	0.25	19.26	42.09	22.87	27.09	07.93	18.27	2.63	Acceptable
10	40.14	08.07	51.29	0.49	24.41	42.74	27.61	24.47	05.16	25.17	1.53	Très bonne
11	47.07	11.75	40.73	0.43	23.05	37.60	37.72	20.65	03.96	23.96	1.93	Très bonne
12	28.56	08.73	62.19	0.50	35.71	48.39	27.61	17.13	06.85	35.31	0.56	Très bonne
13	33.22	35.98	30.63	0.16	12.34	39.26	10.20	44.97	05.55	12.25	0.36	Très bonne
14	61.40	17.16	20.88	0.54	23.94	59.44	13.51	19.23	07.80	22.93	2.15	Acceptable
15	36.40	08.77	54.24	0.57	14.01	39.35	14.93	37.58	08.11	14.66	2.26	Acceptable
16	52.77	11.34	35.55	0.32	15.16	41.54	20.90	27.39	10.15	15.26	0.32	Très bonne
17	44.90	06.66	48.02	0.40	24.61	63.21	15.65	16.62	04.49	25.80	2.36	Acceptable
18	45.39	07.97	46.38	0.24	08.15	31.29	16.33	41.14	11.22	08.02	0.80	Très bonne
19	44.10	18.26	37.01	0.61	16.21	41.81	18.06	34.66	05.45	16.50	0.88	Très bonne
20	46.12	14.84	38.49	0.53	24.39	40.31	27.63	27.71	04.32	23.81	1.20	Très bonne
21	53.52	10.46	35.40	0.60	16.44	43.24	18.26	30.01	08.42	16.86	1.26	Très bonne
22	38.94	10.21	50.11	0.73	13.61	40.97	14.08	37.69	07.23	13.13	1.82	Très bonne
23	33.13	09.88	55.81	1.16	17.20	50.84	15.25	26.55	07.34	17.70	1.43	Très bonne
24	49.56	16.10	33.45	0.86	08.07	45.97	06.89	43.67	03.44	08.70	3.75	Acceptable
25	42.10	14.03	42.98	0.87	11.40	39.06	14.06	41.40	05.46	12.80	5.78	Mauvaise
26	37.39	12.19	49.59	0.81	12.30	39.37	11.02	44.88	04.72	12.70	1.60	Très bonne
27	41.90	14.28	42.85	0.95	10.50	31.91	21.27	41.48	05.31	09.40	5.52	Mauvaise
28	30.23	15.11	53.48	1.16	08.60	43.15	12.63	38.94	02.26	09.50	4.97	Acceptable
29	39.83	16.26	43.08	0.81	12.30	33.33	21.29	41.66	03.70	10.80	6.49	Mauvaise
30	43.39	10.37	45.28	0.94	10.60	36.88	16.39	40.16	06.55	12.20	7.01	Mauvaise

Tableau 4 : Pourcentages des éléments chimiques en még, leurs balances ioniques et leur % d'erreurs.

Tableau 5 : Résultats des rapports caractéristiques.

N° du point d'eau	rMg²⁺ / rCa²⁺	rSO₄²⁻ / rCl⁻	rNa⁺ / rCl⁻
01	0.53	0.39	0.81
02	0.60	0.41	0.81
03	1.97	0.30	0.67
04	0.53	0.28	0.81
05	0.26	0.18	0.72
06	0.26	0.26	0.83
07	0.31	0.22	0.83
08	0.41	0.50	1.51
09	0.70	0.54	1.52
10	0.20	0.64	1.16
11	0.24	1.00	1.04
12	0.30	0.57	1.29
13	1.08	0.25	0.78
14	0.27	0.22	0.36
15	0.24	0.37	1.31
16	0.21	0.50	0.85
17	0.14	0.24	0.72
18	0.17	0.52	1.50
19	0.41	0.43	0.86
20	0.32	0.68	0.97
21	0.19	0.42	0.79
22	0.26	0.34	1.26
23	0.29	0.30	1.06
24	0.32	0.15	0.67
25	0.33	0.36	0.98
26	0.32	0.28	1.22
27	0.34	0.66	1.5
28	0.5	0.29	1.12
29	0.40	0.63	1.47
30	0.23	0.44	1.06

Epaisseur (m)	Coupe	Description lithologique	Age	
0		Sable blond à grains de quartz de 0.1 à 0.2 mm de diamètre, Foraminifères.	Pliocène supérieur- Quaternaire	
4		Grès à ciment calcaire plus ou moins consolidé		
11		Sable blond plus ou moins argileux, Foraminifères		
17		Grès à ciment calcaire		
27		Sable blond à grains de quartz de diamètre compris entre 0.1 et 0.2 mm.		
29		Grès jaunâtre à ciment calcaire plus ou moins consolidé		
32		Sable ocre à grains de quartz de diamètre compris entre 0.1 et 0.2 mm.		
38		Sable blond fin à grains de quartz de 0.1 mm de diamètre.		
56		Sable blond à grains de quartz de diamètre compris entre 0.4 et 0.2 mm.		
63		Grès à ciment calcaire, à grains de quartz entre 0.1 à 0.06 mm de diamètre.		
73		Marnes bleues		Pliocène moyen
78				

Figure 1 : Piézomètre 142/129.

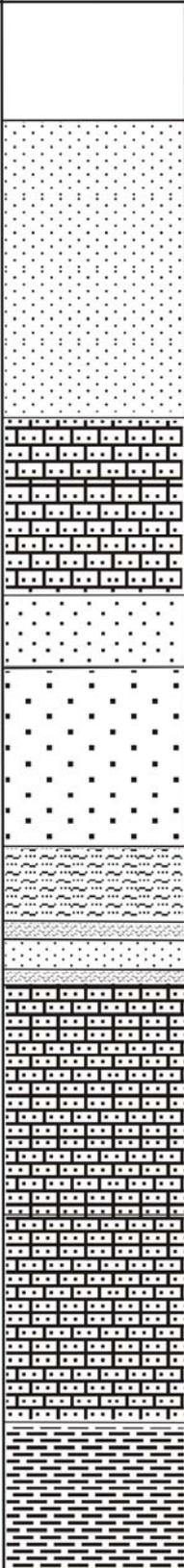
Epaisseur (m)	Coupe	Description lithologique	Age
0		Sables rouges	Quaternaire
19		Calcaire gréseux rougeâtres	
30		Sables grossiers avec intercalations de grés beige	Pliocène supérieur
		Grés beige	
		Grés argileux jaunâtre	
56		Grés Argiles bleues	
		Grés calcaire jaunâtre durs	Plaisancien
85		Marnes bleues	
95			

Figure 2 : Forage Mekhalia.

Epaisseur (m)	Coupe	Description lithologique	Age
0		Croûte grésocalcaire, sable et tout venant du Quaternaire récent.	Quaternaire
11		Grès grossiers plus ou moins consolidés à ciment calcaire blanchâtre avec quelques passées de sable jaunâtre.	
19		Grès sableux rouges, limons et quelques graviers remaniés.	
25		Grès grossiers plus ou moins consolidés à ciment argileux calcaires avec quelques passées de sables jaunâtres.	
35		Grès grossier à très grossier plus ou moins consolidés à ciment calcaire avec quelques passées de sables et limons beige à jaunâtre.	
40		Croûte grésocalcaire blanchâtre, avec couche rouge du Quaternaire ancien.	
50		Grès calcaire blanchâtre avec des argiles plus ou moins jaunâtres et couches rouges de limons.	
66		Grès calcaires grossier avec quelques passées de sables argileux.	
77		Grès calcaires blanchâtres avec des sables jaunâtres.	
81		Grès calcaire à mélange d'argiles sableuses jaunâtre.	
94	Marnes bleues avec grés du Plaisancien .	Plaisancien	
103			

Figure 3 : Forage Souafli.