

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



**Université de MOSTEPHA BEN BOULAIID
BATNA 2**

Institut des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département de Géologie



THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de
DOCTORAT DE TROISIÈME CYCLE

OPTION
Gestion des ressources en eau

Thème

**ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN NEOGENE DE TIMGAD
(WILAYA DE BATNA -- NORD-EST ALGERIEN)**

Présentée par:

LEBCEK SOUMIA

Soutenue publiquement le : **28 /01 / 2021**

Devant le jury composé de :

BRINIS Nafaa	MCA	Président	Université de BATNA 2
MENANI Med Redha	Prof	Rapporteur	Université de BATNA 2
DRIAS Tarek	Prof	Examineur	Université de BATNA 2
KHEDIDJA Abdelhamid	MCA	Examineur	Université de BATNA 2
CHABOUR Nabil	Prof	Examineur	Université de Constantine 1
HADJI Rihab	MCA	Examineur	Université de Sétif 1



Dédicace

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude

A ma chère maman ;

A la mémoire de mon cher père ;

A la mémoire de mon très cher frère Yousef ;

A la mémoire de ma chère sœur Saliha ;

A mon oncle Abdelhakim ;

A mes sœurs et mes frères;

A mes belles-sœurs et mes beaux-frères;

A mes chères nièces et mes chers neveux: Raoua Assil, Med Anes, Abederrahim safi, Ali Zakarya, Meriem Dalia, Adam, Meriem, Hibat errahmane et Djaoued Ibrahim ;

A toute ma famille ;

A mes chers amis.

Remerciement

Je voudrai, en premier lieu, témoigner mes vifs et sincères remerciements à dieu tout Puissant de m'avoir permis de mener à terme ce travail.

En préambule à cette thèse, je souhaite adresser ici tous mes remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce travail.

Précisément mon directeur de thèse de doctorat professeur MENANI Med Redha, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

A Mr. Brinis. N, Docteur à l'université du Batna pour ses conseils précieux et son aide scientifique.

A mes enseignants de Graduation d'avoir enrichi mes connaissances et m'avoir guidé durant toutes ces dernières années.

Le staff de la direction DRE de la wilaya de Batna, Précisément à l'ingénieur hydrogéologue Mr. Zakaria.

Mes remerciements vont également à messieurs les maires des communes : Timgad, Ayoun el Assafir, Oued Taga, Foum Tob, Touffana, Yabous et Taouazianet qui n'ont épargné aucun effort afin que je réussisse mon travail sur terrain.

Ainsi que tous ceux qui ont aidé de près ou loin à la réalisation de ce travail, sans oublier mes collègues.

Je remercie les membres du jury qui ont bien voulu accepter, et ce, malgré leurs lourdes responsabilités pour procéder à l'évaluation de ce modeste travail.

Hydrogeological study of Neogene' Timgad basin (Batna province -- Northeastern Algeria)

Abstract

Timgad Basin is a part of the North-East Algerian Saharan Atlas. It is located at the Northern of the Aurès Mountain. It is bordered in the North by Bou Arif, Amrane and Tagratine mountains, while in the South it is limited by Chelia, Rdam and Nerdi Bouhmar mountains. It is shaped as a synclinal gutter oriented East-West and covers an area of about 1000 Km². The climate is semi-arid (cold winter and hot summer) with average annual rainfall not exceeding 350 mm.

The basin is composed by varied lithology, showing large folded structures down sloping towards the center, which favor groundwater storage where the Miocene sandstone aquifer is the most important. It is characterized by a wavy shape, which forms series of shale-marl filling depressions. Recent wells drilled in the basin edges and center, showed its artesian character.

The piezometric survey shows a groundwater convergent flow oriented towards its East outlet (Bou el Freis), likewise the sandstone aquifer is marked by the presence of a West-East drainage axis, which separates the basin in northern part, characterized by a low reservoir hydraulic capacity, and southern part distinguished by groundwater relative abundance.

The physico-chemical analyzes carried out on the sandstone aquifer groundwater samples showed the dominance of bicarbonate facies (81%), of which 67% is calcium, and the appearance of evaporate facies (19%) towards the basin' outlet. The combination of geology study and hydrochemistry study explains the development of the groundwater mineralization through the basin along the flow direction and has permit to identify the chemical families characterizing these waters.

Keywords Timgad Miocene Basin, sandstone aquifer, shale-marl filling, hydrous potentials, Chemical facies, carbonates, evaporates.

Étude hydrogéologique du bassin Néogène de Timgad **(Wilaya de Batna -- nord-est algérien)**

Résumé

Le bassin de Timgad appartient à l'Atlas saharien nord-oriental, à la terminaison septentrionale du massif des Aurès. D'une superficie de 1000 Km², il a la forme d'une gouttière de direction Est-Ouest, limitée au nord par les massifs Bou Arif, Amrane et Tagratine, et au sud par les massifs Chelia, Rdam et Nardi Bouhmar. Le bassin est soumis au climat semi-aride (hiver froid et été chaud) avec des précipitations annuelles moyennes n'excédant pas les 350 mm.

L'étude géophysique a montré la présence de deux niveaux géologiques gréseux et carbonaté (d'âge miocène et crétacé) relativement résistants affectés par un réseau de fracturation et qui constituent très probablement des aquifères en charge. En effet, des forages récents réalisés en bordure et au centre du bassin, ont montré le caractère artésien de l'aquifère gréseux.

Les mesures piézométriques indiquent un écoulement convergent orienté vers l'est du bassin, marqué par la présence d'un axe drainant de direction Ouest-Est. Ce dernier sépare la partie nord du bassin, marquée une faible capacité hydraulique des réservoirs, de la partie sud, caractérisée quant à elle par une relative abondance.

Les analyses physico-chimiques réalisées sur les eaux souterraines de l'aquifère gréseux ont montré la dominance de faciès bicarbonaté (81%) dont 67% sont calciques, et l'apparition de faciès évaporitique (19%) vers l'exutoire. La combinaison entre la géologie et l'hydrochimie permet d'expliquer le développement de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin suivant le sens d'écoulement et d'identifier les familles chimiques caractérisant ces eaux

Mots-Clés : Bassin néogène de Timgad, aquifère gréseux, le remplissage argilo-marneux, potentialités hydriques, faciès chimique, carbonates, évaporites.

دراسة هيدروجيولوجية لحوض تيمقاد النيوجيني (ولاية باتنة - شمال شرق الجزائر)

ملخص

ينتمي حوض تيمقاد للاطلس الصحراوي الشمالي الشرقي بالتحديد على الجهة الشمالية لجبال الاوراس. حيث يتربع على مساحة قدرها 1000 كيلومتر مربع ، وهو على شكل مزراب ذو اتجاه شرق غرب ، يحده من الجهة الشمالية كل من جبال؛ بوعريف، عمران و تاغراطين ، ومن الجنوب جبال؛ شيليا و ردم و نردي بوحمار . يتميز الحوض بمناخ شبه جاف (شئاء بارد وصيف حار) بمعدل تساقط سنوي لا يتجاوز 350 ملم.

أظهرت الدراسة الجيوفيزيائية للحوض وجود طبقتين جيولوجيتين مشكلتين من الصخور الرملية والكلسية مقاومين نسبياً، متأثرة هاتين الاخيرتين بشبكة من الصدوع ومن المرجح جدا احتواءها على المياه الجوفية. في الواقع ، أظهرت أعمال الحفر للأبار العميقة على حافة و وسط الحوض الطابع الارتوازي لطبقة الصخور الرملية الحاوية للمياه الجوفية.

اشارت قياسات مستوى المياه الجوفية (المستوى البيزومتري) إلى تدفق المياه بشكل متقارب موجه نحو شرق الحوض ، حيث يتميز بوجود محور تصريف ذو اتجاه غرب - شرق. هذا الأخير يفصل الجزء الشمالي من الحوض ، والذي يتميز بضعف القدرة الهيدروليكية للخزانات(الصخور الرملية) ، عن الجزء الجنوبي ، والذي يتميز بوفرة نسبية للمياه الجوفية.

وأظهرت التحاليل الفيزيوكيميائية التي أجريت على المياه الجوفية لخزان المياه الرملية هيمنة الطابع الكربوني للمياه (81 ٪) ، حيث تعتبر 67 ٪ منها كاربونية مشبعة بالكالسيوم ، بالنسبة للمياه ذات الطابع التبخري (19 ٪) فيتمركز ظهورها نحو منفذ الحوض بالجهة الشرقية. الجمع بين دراسة التركيبية الجيولوجية والكيميائية لخزانات المياه الجوفية يمكننا من شرح ظاهرة التمعدن للمياه الجوفية عبر الحوض باتباع اتجاه التدفق وتحديد العائلات الكيميائية التي تميز هذه الاخيرة.

الكلمات الجوهرية: حوض تيمقاد ؛ خزان المياه الجوفية (الصخور الرملية)؛ تشكيلة الملاء الطينية الصلصالية ؛ القدرة الهيدروليكية؛ الطابع الكيميائي؛ الصخور الكربونية و الصخور التبخرية.

Sommaire	Page
Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Abstract.....	III
Résumé.....	IV
ملخص	V
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIII
Introduction générale.....	XV

Chapitre I : LE CADRE GENERAL DU MILIEU PHYSIQUE

1. Situation géographique.....	2
2. Description géomorphologique.....	3
2.1. Le relief.....	3
2.2. Le couvert végétal.....	3
2.3. Le réseau hydrographique.....	3
2.4. Le climat.....	4
3. Aperçu socio-économique de la région.....	4
3.1. Population et démographie.....	4
3.2. Secteur de l'Agriculture.....	5

Chapitre II : LE CADRE GEOLOGIQUE

1. Introduction.....	8
2. Cadre géologique régional.....	8
2.1. La chaîne des Maghrébides.....	8
2.1.1. Le domaine interne.....	9
2.1.2. Le domaine des flyschs.....	9
2.1.2.1. Les flyschs Maurétaniens.....	9
2.1.2.2. Les flyschs Massyliens.....	9
2.1.2.3. Les flyschs Numidiens.....	9
2.1.3. Un domaine externe.....	10
2.1.3.1. Les séries telliennes.....	10
2.1.3.2. L'avant-pays allochtone.....	10
2.1.3.3. L'avant pays atlasique autochtone.....	12
3. Géologie locale.....	13
3.1. Cadre lithostratigraphique.....	13
3.1.1. Les formations du secondaire.....	13
3.1.1.1. Le crétacé.....	14
Aptien.....	14
Albien.....	14
Cénomaniens.....	15
Turonien.....	16
Coniacien.....	17
Santonien.....	17
Campanien.....	17

Maestrichtien.....	17
3.1.2. Les formations du tertiaire.....	17
3.1.2.1. Le Paléogène.....	17
L’Eocène	18
3.1.2.2 le Néogène.....	18
Le miocène.....	18
Aquitano-Burdigalien	18
Serravalien.....	19
Tortonien	19
Messinien.....	20
3.1.3. Les formations du quaternaire	20
3.1.3.1. Les formations dunaires (lunettes)	20
3.1.3.2. Villafranchien probable : croûtes calcaires.....	20
3.1.3.3. Glacis polygéniques nappant les reliefs	21
3.1.3.4. Terres arables et alluvions anciennes	21
3.1.3.5. Les éboulis	21
4. Tectonique et paléogéographie	24
4.1. Introduction.....	24
4.2. Le domaine Atlasique	24
4.3. Les événements paléogéographiques et structuraux	25
4.4. Les structures	25
4.4.1. L’anticlinal du Djebel Bou Arif.....	26
4.4.2. Anticlinal de Djebel Igguèdlène	26
4.4.3. Le synclinal du Djebel Tagratine	26
4.4.4. L’anticlinal du Djebel Amrane	26
4.4.5. La zone synclinale Nerd-Bouhmar	27
4.4.6. L’anticlinal du Djebel Chelia et le synclinal du Djebel Aourès.....	27
4.4.7. Le synclinal du bassin miocène de Timgad.....	27
5. Conclusion.....	29

Chapitre III : LE CADRE GEOPHYSIQUE

1. Introduction	31
2. But de l’étude	32
3. Méthode utilisée (méthode du sondage électrique vertical)	32
3.1. Principe de la méthode	32
3.2. Technique de mesure	32
4. Interprétation des coupes géoélectriques	35
4.1. Le site de TIMGAD	35
Coupes A et B.....	35
Coupe I.....	36
Coupe K.....	36
4.2. Le site d’OULED FADHEL	37
Coupe 1	37
Coupe 2.....	37
Coupe 3.....	37
Coupe 4.....	38
Coupe 5.....	38
Coupe 6.....	40
Coupes 7 et 8.....	40
Coupe 9	40
Coupe 10.....	40

4.3. Interprétation des coupes transversales	42
Coupe I.....	42
Coupe II.....	42
Coupe III.....	43
Coupe IV.....	43
5. Carte du toit du Miocène gréseux	46
6. Conclusion	46

Chapitre IV : LE CADRE HYDROCLIMATIQUE

1. Introduction	49
Partie A : Caractéristiques morphométriques	50
2. Caractéristiques morphométriques.....	50
2.1. Aire et périmètre.....	52
2.2. Indice de compacité.....	52
2.3. Le rectangle équivalent.....	53
2.4. Caractéristiques topographiques.....	53
2.4.1. Le relief.....	53
2.4.2. Altitudes caractéristiques.....	56
2.4.3. Dénivelée simple « D »	56
2.4.4. Les Indices de pentes	57
a) Indice de pente globale (I _g)	57
b) Indice de pente moyenne (I _m)	58
c) Indice de pente de roche (I _p)	58
d) dénivelée spécifique (D _s)	59
2.5. Les caractéristiques du réseau hydrographique	60
2.5.1. Densité de drainage (D _d)	60
2.5.2. Temps de concentration (T _c)	60
2.5.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (V _c)	61
Partie B : Caractéristiques hydroclimatiques	63
3. Caractéristiques hydroclimatiques.....	63
3.1. Introduction	63
3.2. Réseau d'observation	63
3.3. Analyse des paramètres climatiques	63
3.3.1. Pluviométrie.....	63
3.3.1.1. Carte des précipitations moyennes annuelles.....	63
3.3.1.2. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles.....	66
3.3.1.3. Variation interannuelle de la pluviométrie.....	68
3.3.1.4. Variations mensuelles des précipitations	69
3.3.2. Température	71
3.4. Le régime climatique	73
3.4.1. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN ET BAGNOULS.....	73
3.4.1.1. Indice d'aridité	73
3.4.2. Indice de Martonne	75
3.5. L'évapotranspiration	75
3.5.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)	75
3.5.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)	78
3.5.2.1. Méthode de Turc.....	78
3.5.2.2. Méthode de Coutagne.....	79
3.5.2.3. Méthode de Wundt.....	79
3.5.2.4. Méthode de Verdeil	80

3.6. Calcul du bilan hydrique	82
3.7. Le ruissellement « R »	84
3.7.1. Méthode de TIXERONT- BERKALOFF	85
3.8. Bilan hydrologique global.....	85
3.9. Conclusion	86

Chapitre V : LE CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

1. Caractérisation géométrique des aquifères de bassin de Timgad	88
1.1.Introduction.....	88
1.2.Géométrie et identification des aquifères du bassin de Timgad.....	88
1.2.1. Interprétation des coupes hydrogéologiques	90
1.2.1.1.L'aquifère gréseux du Miocène.....	90
1.2.1.2.L'aquifère calcaire du Crétacé supérieur	90
1.2.1.3.L'aquifère des calcaires du Crétacé inférieur.....	91
1.2.2. Communication entre aquifères	91
2. Piézométrie.....	96
2.1.Les bordures du bassin de Timgad.....	96
2.2.Rôle des bordures dans la recharge du système aquifère.....	98
3. Caractérisation hydrodynamique du système aquifère du bassin de Timgad	102
3.1.Introduction.....	102
3.2.Propriétés hydrodynamiques et pétrophysiques	102
3.2.1. La porosité.....	102
3.2.2. La perméabilité.....	104
3.2.3. La transmissivité.....	106
3.3.Détermination des transmissivités	107
3.3.1. Interprétation des essais de pompage en régime transitoire (THEIS 1935)...	107
3.3.1.1.Conditions d'application	108
3.3.1.2.Mode opératoire	108
3.3.2. L'approximation de Cooper-Jacob.....	109
3.3.2.1.Étude de rabattement pendant le pompage (la descente).....	109
3.3.2.2.Étude de rabattement pendant le pompage (la remonté)	111
3.4.Estimation et répartition des paramètres hydrodynamiques des aquifères du bassin de Timgad.....	112
3.4.1. Essais de pompages effectués sur le bassin de Timgad.....	112
3.4.2. Interprétation des résultats des essais	115
4. Conclusion	118

Chapitre VI : LE CADRE HYDROCHIMIQUE

1. Introduction	120
2. Méthodologie de travail.....	120
3. Présentation et interprétation des paramètres physico-chimiques des eaux du bassin de Timgad	122
3.1. Analyse d'ensemble.....	122
3.1.1. Présentation de la qualité des eaux souterraines.....	122
3.1.2. Résultats de la statistique descriptive.....	123
3.2. Analyse détaillée.....	124
3.2.1. Le Calcium (Ca ⁺²).....	124
3.2.2. Le Magnésium (Mg ⁺²)	125

3.2.3. Le Sodium (Na^+).....	126
3.2.4. Le Potassium (K^+)	127
3.2.5. Les Chlorures (Cl^-).....	128
3.2.6. Sulfates (SO_4^{-2})	128
3.2.7. Bicarbonates (HCO_3^-)	129
3.2.8. Nitrates (NO_3)	129
3.2.9. Conductivité électrique	130
3.2.10. Le potentiel d'hydrogène (pH)	132
4. Faciès chimiques des eaux.....	133
4.1. Type des faciès chimiques	133
4.2. Relation entre les faciès chimiques des eaux souterraines.....	133
4.3. L'évolution des faciès chimiques	137
4.3.1. Évolution du rapport HCO_3/SO_4	138
4.3.2. Évolution du faciès bicarbonaté.....	138
4.3.3. Évolution du faciès sulfaté.....	139
4.4. Synthèse de la répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines..	139
5. Analyse statistique des paramètres physico-chimiques.....	141
5.1. Corrélation entre des paramètres physico-chimiques.....	141
5.2. Analyse en composantes principales ACP.....	142
6. Origines du chimisme des eaux souterraines	144
6.1. Relation HCO_3/SO_4 – conductivité	144
6.2. Origine du Calcium et du Magnésium	145
6.3. Origine du sodium.....	146
7. Processus géochimiques de l'acquisition de la salinité des eaux souterraines.....	147
8. Conclusion.....	150
Conclusion générale	153
Bibliographie	158
Annexe	164

Liste des figures

N° de figure	Titre	Page
Figure N° 1	Situation et limites administratives du bassin de Timgad.....	2
Figure N° 2	Situation géographique du bassin de Timgad.....	4
Figure N° 3	Position des différentes unités géologiques des Maghrébides.....	8
Figure N° 4	Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des maghrébides...	10
Figure N° 5	Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien (région du Constantinois).....	12
Figure N° 6	Carte géologique du bassin Néogène de Timgad (d'après Laffite).....	13
Figure N° 7	Carte lithostratigraphique de la zone d'étude. (VILA & GUELLAL 1973).....	22
Figure N° 8	Coupes interprétatives A et B, (J.M.VILA & S.GUELLAL 1973).....	23
Figure N° 9	Schéma structural simplifié du bassin de Timgad (J.M.VILLA & S.GUELLAL 1973).....	26
Figure N° 10	Coupes représentant les structures plissées du bassin de Timgad (Ghandriche, 1991).....	28
Figure N° 11	Carte de position des sondages électriques dans le bassin de Timgad (ENAGEO-1993).....	34
Figure N° 12	Coupes géoélectriques (A.B) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993).....	35
Figure N° 13	Coupes géoélectriques (I.K) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993).....	36
Figure N° 14	Coupes géoélectriques (1.2.3.4.5) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993).....	39
Figure N° 15	Coupes géoélectriques (6.7.8.9.10) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993).....	41
Figure N° 16	Coupes géoélectriques (I.II.III.VI) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993).....	44
Figure N° 17	Superposition des coupes géoélectriques transversales de bassin de Timgad.....	45
Figure N° 18	Carte en isobathes du toit du miocène gréseux (ENAGEO-1993).....	47
Figure N° 19	Situation géographique des sous bassins (Oued Chemorah et Oued Boulfreis)...	50
Figure N° 20	Les sous bassins d'Oued Chemorah et d'Oued Boulfreis.....	51
Figure N° 21	Courbe hypsométrique de sous bassin d'Oued Chemorah.....	54
Figure N° 22	Courbe hypsométrique de sous bassin d'Oued Boulefreis.....	55
Figure N° 23	Répartition des surfaces des sous bassins en fonction de l'altitude.....	57
Figure N° 24	Extrait de la carte pluviométrique du nord-Est de l'Algérie. (ANRH).....	64
Figure N° 25	Carte pluviométrique des sous bassin d'Oued Chemorah et d'Oued Boulfreis...	65
Figure N° 26	Ellipses de BOIS sur les pluies annuelles (1982-2012).....	67
Figure N° 27	Variation interannuelle des précipitations (1982-2012).....	68
Figure N° 28	Variation des précipitations moyennes mensuelles (1982-2012).....	70
Figure N° 29	Variation saisonnière des précipitations (1982-2012).....	70
Figure N° 30	Températures moyennes mensuelles (1982-2012).....	72
Figure N° 31	Diagramme Ombrothermique (1987-2017)	74
Figure N° 32	Évaluation du déficit d'écoulement en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations (Wundt)	80
Figure N° 33	Évaluation du déficit d'écoulement en fonction des précipitations (Verdeil.1988)	81
Figure N° 34	Carte de position des coupes hydrogéologiques.....	89
Figure N° 35	Coupes hydrogéologiques transversales du bassin de Timgad.....	93
Figure N° 36	Corrélation des logs stratigraphiques des forages de bassin de Timgad.....	94
Figure N° 37	Coupe hydrogéologique représente le contact entre les différents aquifères de bassin de Timgad.....	95

Figure N° 38	Carte piézométrique de l'aquifère gréseux de Miocène (bassin de Timgad Avril 2015)	99
Figure N° 39	Carte des conditions aux limites de l'aquifère gréseux de Miocène (bassin de Timgad Avril 2015)	100
Figure N° 40	Schéma explicatif de la structure de l'aquifère gréseux de miocène.....	101
Figure N° 41	La porosité des milieux gréseux.....	103
Figure N° 42	Schématisation des relations porosité/perméabilité dans les roches	106
Figure N° 43	Carte d'inventaire des points d'eau (essais de pompage).....	113
Figure N° 44	Application de la méthode de Theis sur le forage de Chorfa.....	114
Figure N° 45	Application de la méthode de JACOB sur le forage de Chorfa (durant la descente)	114
Figure N° 46	Application de la méthode de JACOB sur le forage de Chorfa (durant la remontée)	115
Figure N° 47	Répartition de la transmissivité dans le bassin de Timgad.....	117
Figure N° 48	Taux de coefficient de variation des variables physico-chimiques mesurées des eaux souterraines.....	123
Figure N° 49	Variation de l'ion calcium dans les eaux souterraines	125
Figure N° 50	Variation de l'ion Magnésium dans les eaux souterraines.....	126
Figure N° 51	Variation de l'ion Sodium dans les eaux souterraines.....	127
Figure N° 52	Variation de l'ion Potassium dans les eaux souterraines.....	127
Figure N° 53	Variation des chlorures dans les eaux souterraines.....	128
Figure N° 54	Variation des sulfates dans les eaux souterraines.....	129
Figure N° 55	Variation des bicarbonates dans les eaux souterraines.....	129
Figure N° 56	Variation des nitrates dans les eaux souterraines.....	130
Figure N° 57	Répartition spatiale de la conductivité électrique dans les eaux souterraines du bassin de Timgad ($\mu.S/cm$)	131
Figure N° 58	Variation de conductivité dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	132
Figure N° 59	Variation du potentiel d'hydrogène dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	132
Figure N° 60	Familles de faciès chimique selon le diagramme de Piper.....	134
Figure N° 61	Répartition du faciès chimiques à travers le bassin de Timgad.....	134
Figure N° 62	Évolution du rapport (HCO_3/SO_4) dans les eaux du bassin de Timgad.....	136
Figure N° 63	Évolution du rapport (Ca/Na) dans les eaux du bassin de Timgad.....	136
Figure N° 64	Évolution du rapport (Ca/Mg) dans les eaux du bassin de Timgad.....	137
Figure N° 65	Carte représentant l'axe de suivi des faciès dans le bassin de Timgad.....	137
Figure N° 66	Évolution des bicarbonates et des sulfates.....	138
Figure N° 67	Évolution des bicarbonates, de calcium, de magnésium et de sodium.....	138
Figure N° 68	Évolution des sulfates, de calcium et de sodium.....	139
Figure N° 69	Répartition spatiale de Faciès chimique sur le bassin de Timgad.....	140
Figure N° 70	Projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1/F2.....	143
Figure N° 71	Relation HCO_3/SO_4 – conductivité.....	144
Figure N° 72	La relation $Ca - (HCO_3/SO_4)$	145
Figure N° 73	La relation $Mg - (HCO_3/SO_4)$	146
Figure N° 74	La relation $Na-Cl$	146
Figure N° 75	Évolution des cations Ca, Mg et Na	147
Figure N° 76	Diagrammes de concentration.....	149

Liste des tableaux

N° de tableau	Titre	Page
Tableau N° 1	Répartition de la population et densité par commune (Bassin de Timgad).....	5
Tableau N° 2	Surface irriguée par commune.....	6
Tableau N° 3	Répartition des surfaces du B.V d'Oued Chemorah par tranches d'altitudes....	54
Tableau N° 4	Répartition des surfaces du B.V d'Oued Boulefreis par tranches d'altitudes....	55
Tableau N° 5	Altitudes caractéristiques.....	56
Tableau N° 6	Classification de l'O.R.S.T.O.M.	59
Tableau N° 7	Récapitulatif Des Paramètres Morphométriques.....	62
Tableau N° 8	Situations Géographiques Des Stations pluviométriques.....	63
Tableau N° 9	Synthèse des résultats des tests d'homogénéité sur les pluies annuelles.....	66
Tableau N° 10	Années sèches et années humides	69
Tableau N° 11	Précipitations moyennes Mensuelles & saisonnières.....	69
Tableau N° 12	Variation de la moyenne mensuelle des températures (1987/2017).....	71
Tableau N° 13	Indice D'Aridité De Martonne.....	75
Tableau N° 14	Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Timgad, a=1,82).....	76
Tableau N° 15	Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Touffana, a=1,80).....	77
Tableau N° 16	Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de A.B.T a=1,65).....	77
Tableau N° 17	Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Baiou, a=1,51).....	77
Tableau N° 18	Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Chelia, a=1,26).....	77
Tableau N° 19	Évapotranspiration Réelle Mensuelle selon Turc.....	78
Tableau N° 20	Évapotranspiration Réelle Mensuelle selon M.Coutagne.....	79
Tableau N° 21	Évapotranspiration Réelle Mensuelle selon Wundt.....	79
Tableau N° 22	Évapotranspiration Réelle Mensuelle selon Verdeil.....	81
Tableau N° 23	Bilan hydrique de la station de Timgad.....	83
Tableau N° 24	Bilan hydrique de la station de Touffana.....	83
Tableau N° 25	Bilan hydrique de la station d'Ali Ben Tenoun.....	83
Tableau N° 26	Bilan hydrique de la station de Baiou.....	83
Tableau N° 27	Bilan hydrique station de Chelia.....	84
Tableau N° 28	Calcul de ruissèlement selon TIXERONT- BERKALOFF.....	85
Tableau N° 29	Les Différentes Composantes Du Bilan Hydrologique.....	86
Tableau N° 30	Unités hydrogéologiques de bassin de Timgad.....	92
Tableau N° 31	Porosité totale et efficace de quelque formation sédimentaire (René, 1988)....	104
Tableau N° 32	Classification de porosité (René, 1988)	104
Tableau N° 33	Classification des perméabilités (René, 1988)	105
Tableau N° 34	Classification des transmissivités (Kouassi et al., 2012).....	107
Tableau N° 35	Description des forages	113
Tableau N° 36	Transmissivités obtenues selon Theis et Cooper-Jacob	116
Tableau N° 37	Données statistiques des éléments physico-chimiques des eaux souterraines....	122
Tableau N° 38	Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine (Normes algériennes, journal officiel de la république Algérienne N° 18, 2011).....	124
Tableau N° 39	Statistique élémentaire de l'ion calcium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	125
Tableau N° 40	Statistique élémentaire de l'ion Magnésium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	126

Tableau N° 41	Statistique élémentaire de l'ion Sodium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	126
Tableau N° 42	Statistique élémentaire de l'ion Potassium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	127
Tableau N° 43	Statistique élémentaire des chlorures dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	128
Tableau N° 44	Statistique élémentaire des Sulfates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	128
Tableau N° 45	Statistique élémentaire des Bicarbonates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	129
Tableau N° 46	Statistique élémentaire des Nitrates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	130
Tableau N° 47	Statistique élémentaire de la conductivité électrique dans les eaux souterraines du bassin de Timgad	131
Tableau N° 48	Statistique élémentaire du potentiel d'hydrogène dans les eaux souterraines du bassin de Timgad.....	132
Tableau N° 49	Types de faciès chimiques des eaux souterraines du bassin de Timgad.....	135
Tableau N° 50	Matrice de corrélation des variables.....	141

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est la base de toute forme de vie. Elle est à la fois habitat, aliment, moyen de production, de transport et bien marchand. L'eau tisse naturellement un vaste réseau de connections : elle est liée aux autres ressources naturelles (sol, forêt, biodiversité, etc.) ; les systèmes aquatiques sont interconnectés ; les problèmes environnementaux se répercutent d'un bout à l'autre d'un bassin hydrographique ; différents groupes d'intérêts l'utilisent pour subvenir à leurs besoins. L'eau est à la fois internationale, nationale, régionale et locale, elle occupe des échelles de temps et d'espace variées. Ce réseau complexe ne facilite pas la mise en place de mesures de gestion appropriées. La croissance démographique, l'urbanisation et les progrès réalisés en termes d'industrialisation se combinent pour créer une demande en eau toujours plus importante. (RUTH et AL, 2003).

La rareté de l'eau douce est aujourd'hui une réalité incontestable, elle est plus accentuée en Algérie à cause de la prédominance d'un climat de type semi-aride à aride à l'intérieur du pays, une sécheresse importante et une perturbation du régime des précipitations. D'un autre côté, la demande est en nette augmentation dans tous les secteurs, principalement l'agriculture.

Le bassin de Timgad se trouve au Nord-Est algérien, s'étend sur deux Wilayas (Wilayas de Batna et Khenchela). Il inclue sept communes abritant plus de 79500 habitants avec un taux d'accroissement de 1.6 (ONS, 2008 stat). Le bassin est en premier lieu marqué par son agriculture (DPAT, 2008), « depuis l'Antiquité, le jardinage constitue la plus grande source de revenus des gens de l'Aurès surtout ceux de la partie septentrionale » (DELARTIGUE, 1904).

L'activité agricole dans le bassin a connu une grande expansion ces dernières années, plus de 3000 ha de la surface du bassin présente des terrains irrigués (2978 ha à Batna et 1221 ha à Khenchela) ce qui a provoqué une exploitation excessive et anarchique des ressources en eaux souterraines, leur mobilisation est assurée par un grand nombre de forages et de sources captées ou non captées, réparties à travers tout le bassin (DRE, 2015).

Afin de répondre aux besoins agricoles en eau, il demeure nécessaire la mise en œuvre d'une politique de gestion des ressources en eau qui doit être fondée sur une étude hydrogéologique du bassin. En effet, les études géologiques et géophysiques réalisées ont confirmés la présence des formations réservoirs d'âge miocène et crétacé, dont la plus importante est l'aquifère gréseux d'âge miocène, d'une allure ondulée formant une suite de dépressions de remplissage argilo-marneux gréseux. Les eaux souterraines de cet aquifère sont en général facilement accessible, à

l'exception de la partie nord du bassin, là où le remplissage argilo-marneux est plus épais (plus de 1000m) et l'eau devient plus rare et son exploitation plus chère.

Les eaux souterraines du bassin sont en générale de bonne qualité à l'exception de la partie orientale du bassin, là où la salinité des eaux augmente influant directement sur la qualité des revenus agricoles.

Plusieurs auteurs ont effectué des études géologiques sur le massif de l'Aurès (Laffitte, 1933 et 1939 ; Guiraud, 1968 ; Guellal & Vila, 1973 ; Vila, 1980 ; Aissaoui, 1984 ; Ghandriche, 1987 et 1991 ; Marmi 1994 et 1995 ; Djaiz, 2011...), ces études ont porté sur la stratigraphie, la tectonique et sur la sédimentologie des régions étudiées.

Le bassin a été aussi la cible de plusieurs études hydrauliques (Guidoum, 2004 ; Boudoukha, 2010 et ...) et Géophysique (ENAGEO, 1993).

L'étude a pour objet l'exploitation des données géologiques et géophysiques de la zone d'étude, afin de déterminer la lithologie, la géométrie et l'extension des différents aquifères et évaluer leurs caractéristiques hydrodynamiques, à la base des cartes piézométriques et l'interprétation des données des essais de pompages. Il s'agira également d'établir une caractérisation hydrochimique des eaux souterraines à travers tout le bassin afin de comprendre les différents facteurs responsables de leur minéralisation.

A cet effet, L'étude s'articule sur six chapitres:

Premier chapitre :

Présente un aperçu général sur le bassin de Timgad

Deuxième chapitre :

Expose les différentes formations géologiques, la nature géomorphologique et les caractéristiques structurales du bassin; ce qui nous permet d'établir un document de base pour les étapes suivantes.

Troisième chapitre :

A pour objet, l'interprétation des données géophysiques, afin de mettre en évidence les formations géologiques susceptibles d'être aquifères et de connaître leurs géométries.

Quatrième chapitre :

S'intéresse à l'étude des principaux paramètres hydrologiques et climatiques, afin de déterminer les caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de la région et l'établissement du bilan hydrique.

Cinquième chapitre :

Ce chapitre s'articule en deux parties principales :

La première partie est consacrée à la caractérisation géométrique des aquifères et l'étude de l'écoulement des eaux souterraines du bassin de Timgad.

La deuxième partie consiste à l'interprétation des résultats des essais de pompages pour identifier les caractéristiques hydrodynamiques des différents aquifères.

Sixième chapitre :

Présentation et interprétation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du bassin afin de comprendre les différents facteurs responsables de leur minéralisation.

Chapitre I :

LE CADRE GENERAL DU MILIEU PHYSIQUE

1. Situation géographique

Le bassin de Timgad se trouve au Nord-Est algérien à une trentaine de kilomètres à l'est de la ville de Batna, et à 400 km au sud-est d'Alger, (Fig.1)

Le bassin s'étend sur deux Wilayas (Batna et Khenchela), occupant la partie orientale de la Wilaya de Batna jusqu'à le nord-ouest de la Wilaya de Khenchela, selon le découpage administratif, ses confins sont:

- Au nord, les communes d'El Madher et Chemora ;
- Au sud, les communes de Arris, Ichemoul, Inoughissen et Bouhamama ;
- À l'ouest, les communes de Tazoult;
- À l'est, la commune de Kais et Rémila.

Le bassin de Timgad appartient à l'Atlas saharien nord-oriental, à la terminaison septentrionale du massif des Aurès. Il a la forme d'une gouttière de direction Est-Ouest, limitée au nord par les massifs Bou Arif, Amrane et Tagratine, et au sud par les massifs Chelia, Rdam et Nardi Bouhmar (Fig.2).

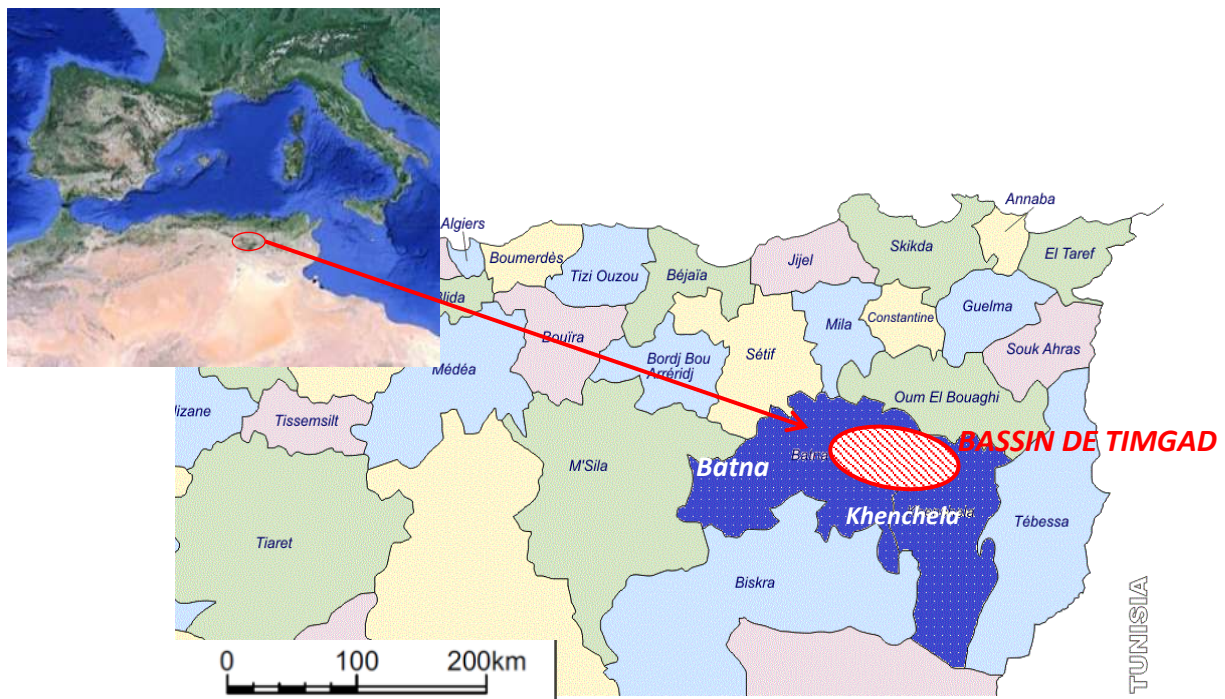


Figure N° 01 : Situation et limites administratives du bassin de Timgad

2. Description géomorphologique

2.1. Le relief

La jonction des deux Atlas (tellien et saharien) constitue la particularité de bassin et organise en même temps la répartition des différents milieux physiques définis comme suit:

Les hautes plaines, qui, à travers l'Algérie, s'intercalent entre les deux Atlas, ne constituent pas un ensemble uniforme, mais sont souvent coupées par des chaînons qui les compartimentent. Ainsi au nord du massif de l'Aurès qui culmine à 2328 m (dj. Chelia) émerge en quelque sorte une longue arête montagneuse dont l'élément principal, le dj. Bou Arif atteint 1.746 m au Ras Fourar. Entre les deux s'allonge le bassin de Timgad, il s'agit d'une plaine étroite qui vers l'est ne dépasse guère une vingtaine de kilomètres de large et qui, à l'ouest, de Timgad à Batna, n'est le plus souvent qu'un assez étroit couloir. Cette plaine est à une altitude moyenne d'un millier de mètres (Timgad : 1.040 au musée, 1.080 au fort).

2.2. Le couvert végétal

Le couvert végétal, est constitué principalement de forêts en bordure de la plaine (cèdre, chêne vert, pin d'alpe et maquis), les vergers et jardins, cultures céréalière, cultures maraîchère de montagne intermittentes.

Ce couvert végétal vient ajouter son influence à celle de la géologie et la topographie pour accentuer la rapidité du ruissellement des eaux, l'évapotranspiration et la capacité de rétention du bassin. Le reste, présente des affleurements rocheux, un sol très érodé, une maigre végétation ou sol nu. Les parcours sont constitués d'étendus d'Alfa et de prairies et de terres argilo-marneuses improductives.

2.3. Le réseau hydrographique

Le bassin de Timgad est drainé par un réseau hydrographique constitué de deux branches séparées par Djebel Amrane : (l'Oued Chemora et l'Oued Boulfreis), qui prennent naissance dans le massif des Aurès. Les écoulements de surface ne sont vraiment perceptibles que lors des averses en raison d'une aridification du climat.

A l'ouest de Sidi Maancer, les eaux de surface se dirigent vers la dépression de Batna. La partie ouest du réseau, rejoint au nord-est l'Oued Chemora, lui-même tributaire vers le nord des chotts

des hautes plaines constantinoises. A l'est du bassin toutes les eaux de surface de dirigent vers le nord-est (Garaat et Tarf) (Fig. 2).

2.4. Le climat

Le climat dominant est continental, sub-aride avec des écarts considérables de température. Le vent dominant est le sirocco, vent chaud et sec venant du sud. Il imprime aux arbres isolés des zones basses une inclinaison très caractéristique.

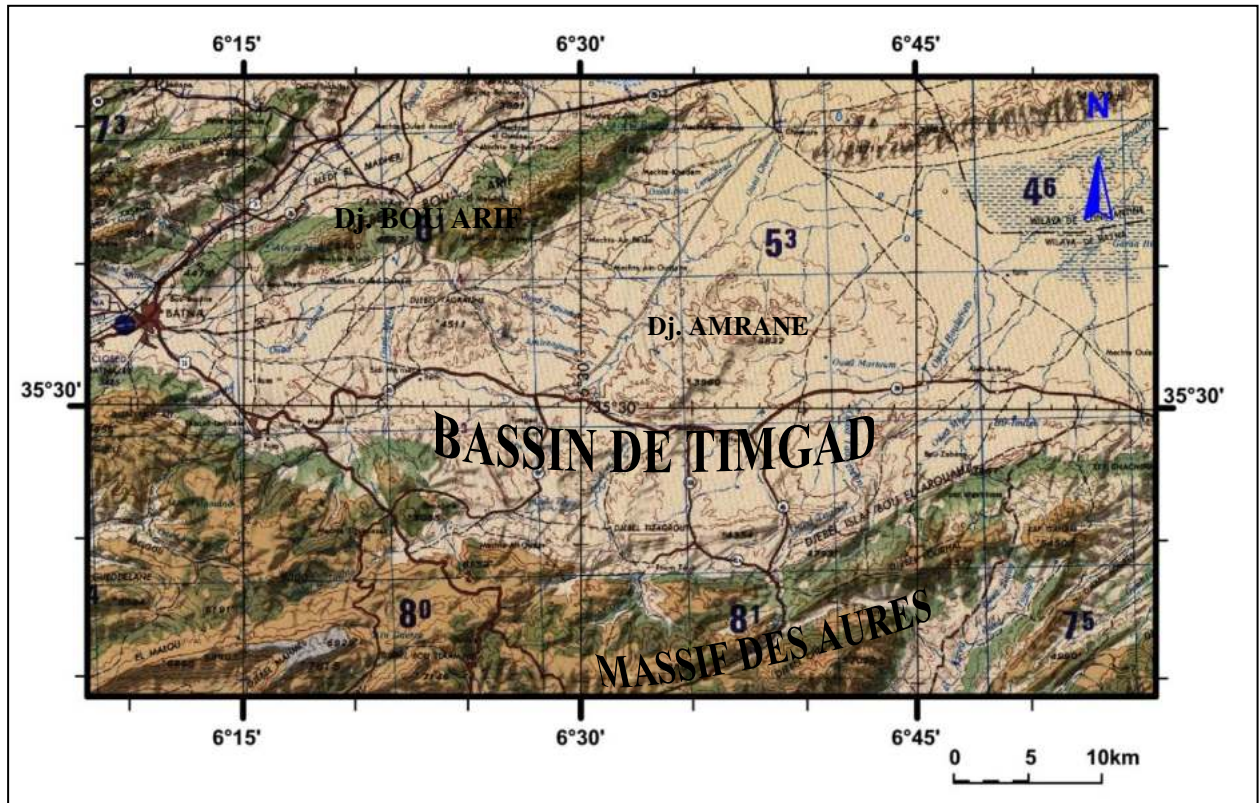


Figure N°02 : Situation géographique du bassin de Timgad

3. Aperçu socio-économique de la région

3.1. Population et démographie

Le bassin de Timgad compte sept communes dont cinq appartiennent à la Wilaya de Batna et deux à la Wilaya de Khenchela.

Les sept communes abritent 79 482 habitants selon la dernière opération de recensement effectuée en 2008 (les services de l'office nationale de statistique).

Tableau 01: Répartition de la population et densité par commune (Bassin de Timgad)*(Monographie des Wilayas de Batna et Khenchela, 2013)*

Wilaya	Daïra	Commune	Coordonnées	Superficie (km ²)	Population (hab) 2008	Densité (hab/km ²)
BATNA	Tazoult	Ouyoun el Assafir	35° 31' 16" N 06° 22' 47" E	164	11 503	70
	Timgad	Timgad	35° 29' 45" N 06° 28' 02" E	224	11 828	53
	Timgad	Ouled Fadel	35° 29' 03" N 06° 37' 29" E	205	10 860	53
	Teniet El Abed	Oued Taga	35° 20' N 06° 14' E	249,97	18 116	72
	Ichmoul	FoumToub	35° 24' 18" N 06° 32' 59" E	108,39	6 025	56
KHENCHELA	Kais	Taouzient	35° 30' 55" N 06° 45' 10" E	167	10 748	64
	Bouhmama	Yabous	35° 24' 29" N 06° 38' 31" E	160	10 402	65

3.2. Secteur de l'Agriculture

Le bassin de Timgad est en premier lieu marqué par son agriculture, depuis l'Antiquité, le jardinage constitue la plus grande source de revenus des gens de l'Aurès surtout ceux de la partie septentrionale, Les cultures des jardins diffèrent généralement avec l'altitude de chaque village et la nature du sol des vallées (DELARTIGUE, 1904).

La présence de nombreuses ruines de passoirs dans tout le massif aurésien jusqu'à l'altitude de 1500m semble indiquer que la culture des oliviers était très développée dans l'Antiquité (PIERRE, 1993).

Le bassin est à vocation agro-sylvo-pastorale avec une prédominance pour la céréaliculture et L'arboricultures, spécialement la culture du pommier qui est la principale activité de la population de la région pour sa rentabilité économique et les conditions pédologiques et climatiques favorables.

La superficie irriguée qui lui est affectée est de 2978 Ha de la Wilaya de Batna et 1221 Ha de la Wilaya de Khenchela.

L'élevage ovin est conjugué avec l'apiculture et l'aviculture. Il est à signaler que l'aviculture est devenue d'envergure nationale puisqu'elle participe avec un taux appréciable à la production nationale.

Tableau 02 : surface irriguée par commune (DSA, Batna et Khenchela, 2015).

Commune	SAU	Forage	Puits	Sup Irrig
	(Ha)	Nbre	Nbre	Ha
Tazoult	4873	86	62	306
Ouledfadhel	15271	85	200	801
Ayoune el assafir	5912	107	10	485
Timgad	11385	13	60	180
Oued taga	9296	88	172	344
Foumtoub	7784	50	335	862
Taouzianet	/	109	0	878
Yabous	/	136	318	343

Chapitre II :

LE CADRE GEOLOGIQUE

1. Introduction

L'étude des matériaux constituant le bassin d'étude et ses structures géologiques permet d'identifier la distribution et le mode de gisement, les modalités de l'écoulement et les propriétés physico-chimiques de l'eau.

Pour bien comprendre et apprécier le rapport géologique du bassin d'étude, il vaut mieux le mettre dans son contexte géologique régional.

2. Cadre géologique régional

La description de géologie régionale a été basée sur les études des auteurs : Bouillin J.P. (1986), Laffite R. (1933), Delga M. (1969), Villa J.M. (1980), Wildi W. (1983), Guandriche H. (1991), Djaiz F. (2011) et Chabou C. (2012).

2.1. La chaîne des Maghrébides

La chaîne alpine d'Afrique du nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin péri méditerranéen (Durand.D, 1969) d'âge tertiaire qui s'étend de l'ouest à l'est sur 2000 km depuis l'Espagne du sud à l'arc calabro-sicilien. Elle résulte de la tectonisation alpine du « Bassin maghrébin » (Bouillin, 1992) ou « Téthys maghrébine » et de ses marges.

Dans ce domaine en forme d'anneau très aplati, on distingue classiquement les zones internes, situées à l'intérieur de l'anneau et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne et les zones externes situées à sa périphérie.

Le domaine de la chaîne des Maghrébides a connu des phases de déformations méso-cénozoïques aboutissant à la mise en place de nappes de charriages. C'est le domaine des nappes ou domaine allochtone.

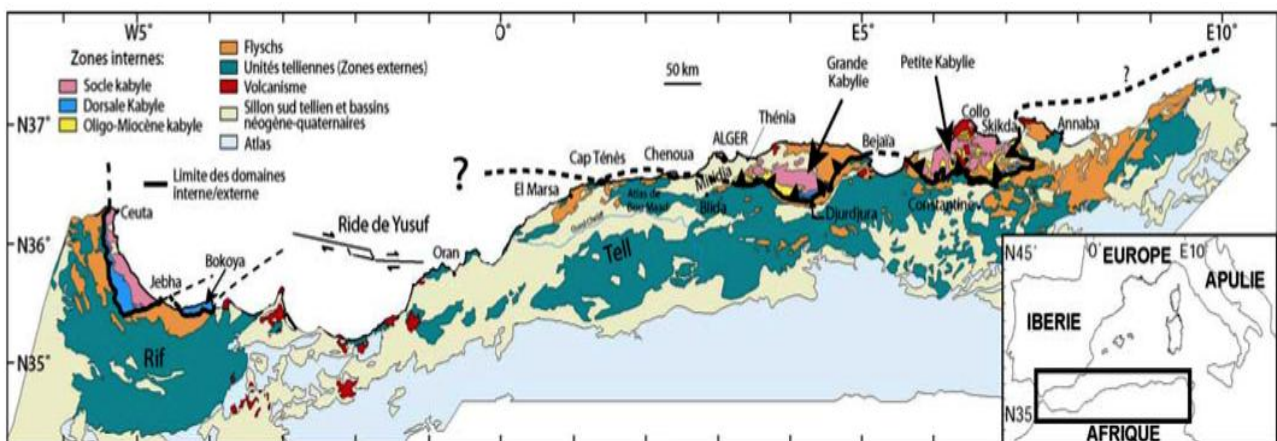


Figure N° 03 : Positon des différentes unités géologiques des Maghrébides (D'après Domzig. 2006)

En Algérie, la chaîne des Maghrébides montre du nord au sud les domaines suivants:

2.1.1. Un domaine interne

Appelé aussi **socle kabyle** ou **Kabylide**, est composé de massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique. Ce socle affleure d'ouest en est dans les massifs du Chenoua (à l'ouest d'Alger), d'Alger, de Grande Kabylie et de Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda). Ce dernier, avec 120 km de long et 30 km de large, constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie. Le socle est par endroits recouvert en discordance par des dépôts détritiques (principalement des molasses conglomératiques) d'âge oligocène supérieur–Miocène inférieur, appelés **Oligo-Miocène Kabyle**.

2.1.2. Le domaine des flyschs

Il est constitué par des nappes de flyschs créacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long, entre Mostaganem et Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités.

On distingue du nord au sud deux grands groupes de flyschs, les flyschs Maurétaniens et les flyschs Massyliens auxquels s'ajoutent un troisième groupe de flyschs plus récent, les flyschs Numidiens d'âge oligocène supérieur – burdigalien inférieur.

5.1.2.1. Les flyschs Maurétaniens :

Sont relativement épais et occupent une position interne dans le domaine des flyschs. Ils sont composés d'alternances de bancs argileux, calcaires et gréseux. La série débute par des radiolarites rouges du Dogger-Malm et se termine par des niveaux conglomératiques du Paléocène.

5.1.2.2. Les flyschs Massyliens :

Occupent une position externe dans le domaine des flyschs et comportent une série périto-quartzitique d'âge Crétacé inférieur surmontée par une série périto-micro-bréchrrique d'âge Crétacé supérieur.

5.1.2.3. Les flyschs Numidiens :

Constitués de niveaux gréseux d'âge oligocène terminal–aquitaniens épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites versicolores oligocènes. Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.

2.1.3. Un domaine externe

Le domaine externe est représenté par les séries telliennes, les séries de l'avant pays allochtone et les séries de l'avant pays Atlasique autochtone.

2.1.3.1. Les séries telliennes :

Le domaine tellien constitué par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement de marnes d'âge crétacé moyen à néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le sud. On distingue du nord au sud :

- Les nappes Ultra-telliennes**, aux formations bathyales du Crétacé et de l'Eocène et une série plus détritique au Sénonien et à l'Eocène, ne sont connues que dans l'Est algérien et en Tunisie. Elles présentent des caractères proches de ceux du flysch Massylien.
- Les nappes Telliennes** sensu-stricto formées de Lias de plate-forme surmonté de Jurassique plus marneux, puis par le Crétacé qui, détritique, devient marneux à argilo-calcaire et enfin, l'Eocène aux marnes épaisses.
- Les nappes Péni-Telliennes** dont les séries néritiques du Crétacé à l'Oligocène sont carbonatées et marneuses. Les nappes péni-telliennes, définies dans l'Est algérien, présentent des caractères proches de ceux du néritique constantinois.

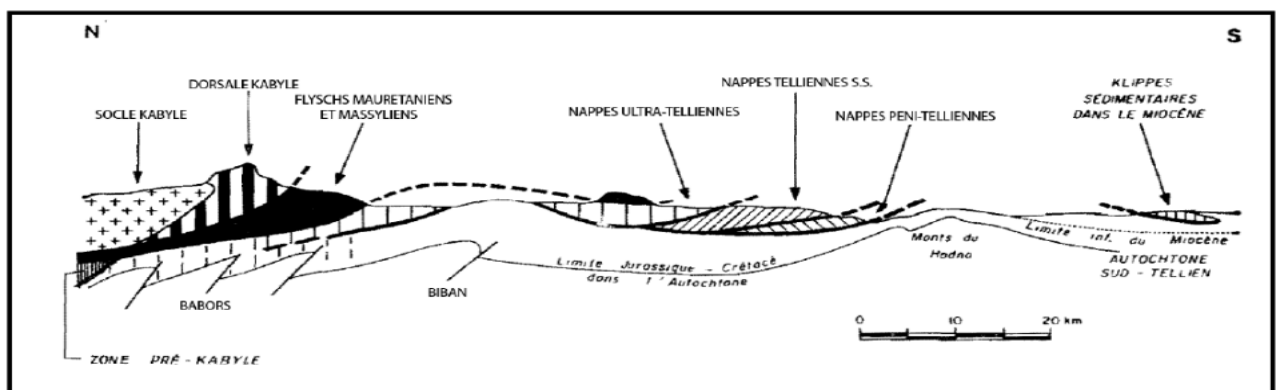


Figure N° 04 : Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des maghrébides (modifiés d'après Delga M. 1969)

2.1.3.2. L'Avant-pays allochtone

Dans le domaine externe existe des unités encore plus externes et d'allochtonie notable, mais moindre, structurées au Miocène moyen qu'on appelle séries de l'Avant-pays allochtone et se placent entre les nappes telliennes au nord et l'autochtone ou para-autochtone atlasique au sud. On distingue ainsi d'ouest en est :

a) L'ensemble allochtone sud-sétifien :

Ce sont les séries des djebels Guergour, Anini, Zdimm, Youssef, Braou, Tnoutit, Sékirine, Tafourer, Agmérrouel, Zana, Azraouat, Hammam, Ain el Ahdjar, KoudiatTella et série supérieure du djebel Kalaoun, à matériel carbonaté et marneux du Jurassique au Miocène, et qui apparaît plus à l'ouest dans la fenêtre des Azerou dans la région des Biban. Il se présente sous la forme d'un vaste empilement d'écailles limité par des accidents cisailant

b) Le Môle néritique constantinois :

Il se caractérise par une plate-forme carbonatée allant du Jurassique au Cénomanién, surmontée d'une couverture marneuse du Crétacé supérieur pouvant atteindre l'Oligocène supérieur (Coiffait, 1992). La superposition de cette couverture sur les calcaires néritiques dans les monts de Ain M'lila, par l'intermédiaire d'une surface durci d'extension régionale (Chadi, 1991), correspond le plus souvent, à un arrêt de sédimentation. (Vila, 1980).

c) Les unités des Sellaoua :

Ces unités affleurent au sud-est des massifs composant le môle néritique constantinois et comprennent essentiellement des terrains marno-calcaires crétacés avec un léger apport détritique au Crétacé inférieur.

d) Zone de convergence Môle néritique constantinois – Aurès :

Les hautes plaines constantinoises, définies comme une entité morpho-structurale, font partie de cette zone de convergence. Les Sebkhass, qui appartiennent aussi à ce domaine, forment des alignements en gouttières s'étendent sur environ 120 Km, orientées globalement NE-SW, constituant une vaste dépression à écoulements endoréique.

Les limites naturelles de cette zone coïncident avec les traits morpho-paléogéographiques représentés au nord-ouest par l'allochtone sud-sétifien (Vila, 1980) et le môle néritique constantinois (Durozoy, 1960). Au sud, elle est bordée par le « bâti pré-saharien » (Savornin, 1920) regroupant à son tour, d'est en ouest, les monts de Batna- Belezma, le massif de l'Aurès. Cette zone, avec une altitude moyenne de 900 m, est accidentée par une série de chaînons à ossature calcaire crétacée. Le Trias, qui affleure fréquemment sur les bordures des Djebels de la limite septentrionale, souligne des contacts anormaux. Le Mio-Plio- Quaternaire continental détritique comble les dépressions synclinales dont le centre est occupé le plus souvent par des Sebkhass (ou Garaâ) inondables en saisons humides.

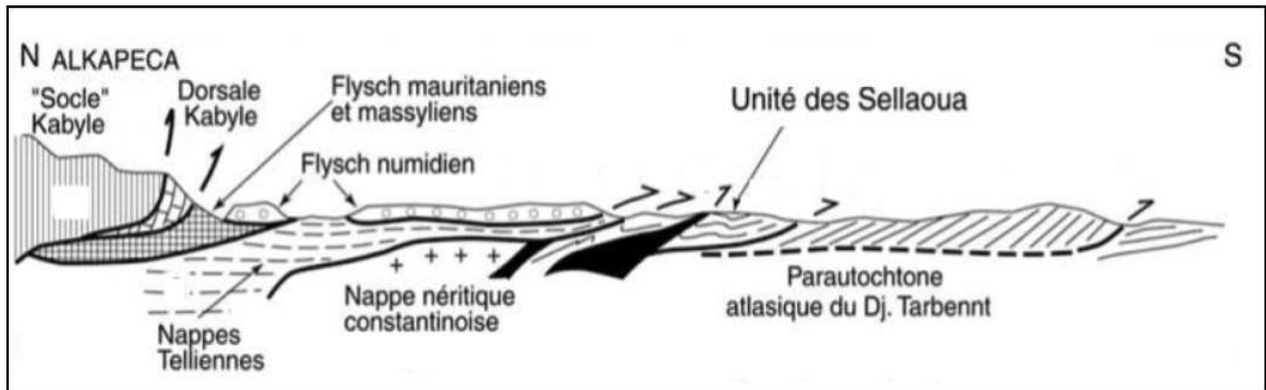


Figure N° 05 : Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien, région du Constantinois (D'après VILA. 1980)

2.1.3.3. L'avant pays atlasique autochtone

Ce domaine est subdivisé en deux zones, séparées par une ligne Batna-Timgad-Garaet El Tarf. La partie nord est caractérisée par une organisation des structures plissées bien apparente mais perd un peu de sa régularité dans les monts de Bélezma, Ain Yagout et Oum el Bouagui. Au sud de cette ligne, les structures plissées du Nord aurèsiens ont régulières et analogues à ceux des confins Algéro-Tunisiens. Ce domaine paléogéographique est subdivisé en plusieurs unités morpho-structurales.

- a) **Les Monts de AinYagout** : a. Dj Toumbaït, b. Dj Tafraout, c. Dj Azem-Gountas,
- b) **Les Monts de Batna-Belezma** : a. Anticlinal de Bellezma- Batna, b. Anticlinal du Metlili, c. Le synclinal de Batna - Ain Touta, d. Le synclinal de Seggana,
- c) **Le massif de l'Aurès** : a. Anticlinal du Djebel Bou Arif, b. Anticlinal de Djebel Ich-Ali, c. Anticlinal de Djebel Igguèdlène ; entre la flexure et les mégastructures de l'Aurès, se dessine une bande comportant de petites culminations orientées E-W où le Mio-Pliocène est sensiblement concordant sur le substratum et plissé avec lui. (Ghandriche, 1991). Là où se localise le bassin de Timgad.

Bassin de Timgad

C'est une gouttière de direction Est-Ouest, formée essentiellement par des sédiments autochtones tortoniens, post-tortoniens et probablement pliocènes (Guiraud, 1973). Cette dépression syn-orogénique est située à la limite nord des Aurès et au sud des massifs de Ain yagout, Bou Arif, Fedjouj, Tarf et Amrane (Laffitte, 1939). La direction des axes des plis anticlinaux du bassin miocène de Timgad est N 55° E incurvant à N 75° E. Ces plis sont le résultat d'une phase tectonique anté- miocène probablement éocène terminal.

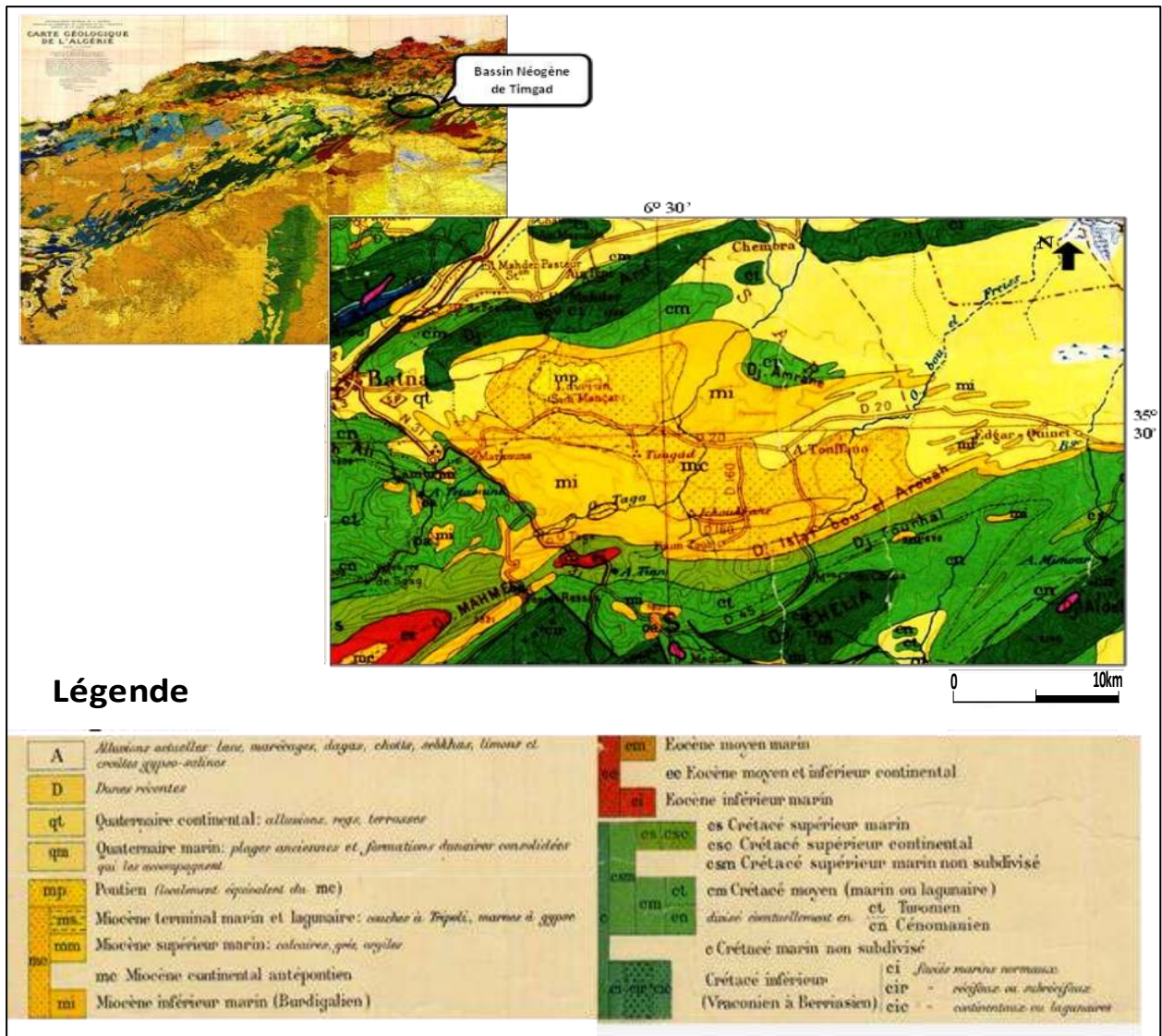


Figure N° 06 : Carte géologique du bassin Néogène de Timgad (d'après Laffite)

3. Géologie locale

La description de géologie locale a été basée sur les études des auteurs : COQUAND, M.H., (1862), LAFFITE, R., (1933 & 1939). DURAND-DELGA, M., (1969), GUIRAUD, R., (1968), GUELLAL, M. & VILA, J.M., (1973), VILA, J.M., (1980), WILDI.W., (1983), GUANDRICHE. H, (1987&1991), MARMI, R., (1994), DJAIZ.F, (2011).

3.1. Cadre lithostratigraphique

3.1.1. Les formations du secondaire

Ces formations sont caractérisées par l'association de deux types de faciès; les dépôts marno-carbonatés et les dépôts gréseux. Les premiers affleurent largement dans les massifs qui bordent

le bassin de Timgad, tel que, Dj. Bou Arif, Dj. Amrane et le massif du Chelia, et sont recouverts en discordance par un Miocène gréseux.

Les affleurements sont formés essentiellement par du Crétacé qui constitue les crêtes (carbonates-grès) ou les creux (argiles-marnes) des anticlinaux. Les forages pétroliers qui démarrent souvent dans ces formations (AMR 1) n'ont jamais atteint le jurassique.

3.1.1.1. Le crétacé

Le Crétacé très développé dans l'Aurès constitue une succession concordante allant du Berriasien au Danien. Coquand (1862) caractérisa à la fois le Crétacé inférieur dans l'Aurès près de Batna, en attribuant le Néocomien aux marnes surmontant le Jurassique et l'Aptien du nord de l'Aurès, dans le massif de Bou Arif et les environs de Khenchela.

- **Aptien de Djebel bou Arif : série à dominante calcaire, bien litée à Orbitolines avec au sommet le niveau-repère à « Ovalveolinareicheli ».**

Ces formations occupent les parties de voûte des soulèvements anticlinaux de Bou Arif.

L'Aptien est représenté par l'association d'une assise marneuse basale surmontée par des formations de calcaires (rapport ORGM, 1972), de bas en haut :

- A la base de l'assise, au passage du Barrémien à l'Aptien apparaît un ensemble marneux de 70 m d'épaisseur de teinte beige-verdâtre et grise, plus haut, on distingue deux barres calcaire-dolomitiques riches en débris de Lamellibranches et Brachiopodes dont le mur et le toit sont noduleux.
- Au-dessus des calcaires épais d'environ 300 m, ils sont représentés par des variétés massives pélitomorphes et organogènes. La coupe se caractérise par l'abondance des calcaires à orbitolinidés. Leur présence se renforce graduellement du NW au SE.
- **Albien de Djebel bou Arif : argiles, marnes et grès ferrugineux avec un hard-ground au sommet.**

Les dépôts de cet âge affleurent sous forme de termes étroits discontinus (50-70m) soulignant la périphérie des soulèvements anticlinaux. Ils sont représentés par des calcaires, marnes, grès blancs ferrugineux, grès quartzeux fins et dolomies. Les calcaires prédominent largement les autres faciès.

La limite inférieure de l'étage est difficile à préciser, cependant, elle a été définie à la base de Koudiat Tenoun Knine (Dj Bou Arif) par des bancs de calcaires et de marnes à *Acanthoplites aschiltaensis* (ANTHULA), au sommet par des alternances de calcaire à débris de coquilles contenant des *Orbitolines* et de marne avec des nodules d'oxydes de fer (Laffitte, 1935). La limite supérieure est visible car elle correspond à une rupture de pente de relief due à l'érosion des marnes cénomaniennes. L'absence des dépôts albiens dans les flancs périclinaux de Bou Arif et l'apparition des faciès détritiques avec la glauconite, au contact du Crétacé témoignent de la présence d'une lacune stratigraphique locale de sédimentation.

L'Atlas saharien est souligné à cette époque par une sédimentation marine néritique qui devient sub-bathyale aux extrémités W et E, tandis que dans sa partie centrale s'accumule des sédiments continentaux dans un fossé subsident. A la base apparaissent des calcaires grumeleux, sub-récifaux, organogènes et bioclastiques, au sommet, ils deviennent pélitomorphes, argileux, oolithique, organogènes et bioclastiques. (VILA & GUELLAL, 1973)

- **Cénomanién**

Cet étage apparaît dans les anticlinaux du Dj Bou Arif, Il est caractérisé par une sédimentation marneuse à la base surmontée par des marno-calcaires riches en faune. L'épaisseur de cet étage est de l'ordre de 1000 mètres.

Cénomanién moyen : marnes grises.

Sur le flanc sud du Djebel Bou Arif, c'est une épaisse (350m) et monotone série de marnes grises ou plus rarement beiges exceptionnellement riches en fossiles avec des *Ammonites* : *Acanthoceras newboldi* KOSSM, *Tyrrilites costatus* LMK, des Oursins, des Huitres, des pectons, des *Plicatules*, de nombreux autres lamellibranches.

Sur Djebel Amrane ou dans l'anticlinal du Djebel Chelia. Ce sont des marnes grises d'au moins 150m d'épaisseur au sud avec de petites intercalations calcaires. La microfaune contient : *Rotalipora greenhornensis*, *Praeglobotruncanastephani*, *Globigerinelloides bentonensis*, *Cythereisma ghrebensis* et d'autres Ostracodes. Au Djebel Amrane cette formation atteint 300m de puissance avec des faciès et des microfaunes comparables. (VILA & GUELLAL, 1973)

Cénomanién supérieur : calcaires marneux gris-bleu à cassure noirâtre en bancs métriques.

Dans les anticlinaux du Djebel Chelia et Au Djebel Amrane, les sommets sont franchement calcaires avec des alternances de micrites gris-bleu à cassure noirâtre ou sombre en bancs épais de

1 à 3m. La microfaune à *Thalmaninellabrotzeni* SIGAL, *Rotalipora appenninica* RENZ et à Ostracodes indique le Cénomaniens.

Sur le versant sud de l'anticlinal de Djebel bou Arif. Il s'agit d'alternance où apparaissent des calcaires marneux gris-bleu ou beiges en bancs métriques avec de petits niveaux de calcaires zoogènes et des intercalations marneuses dégagées uniquement dans les lits d'oueds. (VILA & GUELLAL, 1973)

- **Turonien**

Il s'observe dans les massifs de Dj Bou Arif, Le Turonien est l'étage qui occupe les aires les plus étendues, en affleurement notamment au nord-ouest de l'Aurès Laffitte (1939). A la périphérie du massif, affleurent des récifs composés de calcaires à Rudistes (100 à 300 m), à l'intérieur du massif dominant des marno-calcaires (80 m) peu fossilifères à rares Céphalopodes.

C'est un ensemble de 150 m d'épaisseur qui affleure sur les versants nord et sud de la partie SW du massif de Bou Arif. Il est à dominante marneuse avec des niveaux de calcaires marneux en plaquettes bitumineuses. (VILA & GUELLAL, 1973)

Turonien « moyen et supérieur » : alternances de marnes beiges et de calcaires zoogènes noduleux.

Le sommet du Turonien constitue une des barres de l'anticlinal du Djebel Amrane et l'essentiel du relief de la terminaison orientale de l'anticlinal du Djebel Chelia. Ce sont 150m d'alternances composées de calcaires zoogènes noduleux riches en débris de mollusques (lamellibranches et Echinodermes), de marnes beiges et de petits bancs de calcaires organodétritiques noduleux. (VILA & GUELLAL, 1973)

Turonien basal : marno-calcaires bitumineux en plaquettes et alternances de marnes bleues et de petits bancs marno-calcaires fins.

A la base de la série, des marno-calcaires bitumineux à patine blanchâtre, cassure noire et fétide forment la limite avec une nette dominance pour les marnes, des marnes bleues et de petits bancs de marno-calcaires, centimétriques ou décimétriques. La microfaune où abondent les Pithonelles, *Globotruncanahelvetica* Bolli. (VILA & GUELLAL, 1973)

- **Coniacien : alternances de marnes grises et de marno-calcaires à Inocérames.**

Sa répartition est analogue à celle du Santonien. Sur 150m, il est constitué par des alternances de marnes grises et de marno-calcaires zoogènes à Inocérames. A la base la microfaune des marnes est assez pauvre avec *Protobuntonianumidica*, *Ammomarginulina*...

- **Santonien : marnes noires ou gris-bleu et calcaires à Inocérames à la base.**

Le Santonien est représenté, comme au Djebel Amrane, plus à l'Est dans le Synclinal du Djebel Aourès, par plus de 200m de marnes noires ou gris-bleu à rares intercalations biomicrites à Inocérames, et sur le flanc nord de l'anticlinal du Djebel Chelia à la base et au sommet, des marno-calcaires en bancs décimétriques ou métrique, riches en débris d'Inocérames et organisés en barres décimétriques. A la base la microfaune contient : *Globotruncanalapparenti*, *concovata*...(VILA & GUELLAL, 1973)

- **Campanien : marnes grises ou noires.**

Le Campanien est marneux et n'affleure que très peu :

- Au bord septentrional de synclinal R'dam. Il s'agit de 350 à 400m de marnes grises analogues à celles d'El Kantara. Leur microfaune benthonique à *Ammodiscoidesturbinatus*, *Ammobaculites*...
- Au cœur du synclinal du Djebel Aourès, et sur le flanc nord de l'anticlinal du Djebel Chelia. 170m de marnes noires sont visibles et contiennent de rares intercalations de calcaires ocre noduleux, légèrement phosphatés, en bancs décimétriques. La microfaune est riche avec : *Globotruncanalevata*, *Protobuntonianumidica*...(VILA & GUELLAL, 1973).

- **Maestrichtien supérieur : calcaires massifs cristallins.**

Le maestrichtien supérieur peut atteindre 300m d'épaisseur et est localisé au bord septentrional de synclinal de R'dam. Ce sont des calcaires massifs cristallins peu fossilifères.

3.1.2. Les formations du tertiaire

3.1.2.1. Le paléogène

Le Paléogène est décrit dans tous les synclinaux du versant sud du massif de l'Aurès, avec une variation de faciès et diminution de son épaisseur du NW au SE.

a) L'Eocène

- **Eocène inférieur : calcaires à Huitres silicifiées**

Deux minuscules affleurements sont représentés par des couches marneuses et marno-calcaires blanchâtres à *Ostreamulticostata* DESH. Silicifiées. Ces affleurements représentent le prolongement septentrional de ceux du synclinal de R'dam. (VILA & GUELLAL, 1973)

3.1.2.2 le néogène

Le Néogène regroupe les formations continentales souvent rubéfiées d'âge mio-pliocène (Kilian, 1931). La série néogène en affleurement repose souvent en discordance sur des formations d'âge différents (Oligocène, Eocène, Crétacé supérieur). Elle comporte plusieurs ensembles lithostratigraphiques formant des séquences dont les limites sont souvent hétérochrones.

a) Le miocène

Le Miocène inférieur est caractérisé par une transgression marine, où se déposent des formations sur un fond affecté par des mouvements épirogéniques. Les sédiments miocènes marins vont acquérir des épaisseurs considérables et seront recouverts par des sédiments continentaux postérieurs constituant les grands bassins mio-pliocènes. Ces derniers se développent et prennent de l'ampleur dans les vallées et les dépressions Anté-miocène sur les bords nord et ouest du massif qui constituent les limites du bassin de Timgad.

Les assises les plus puissantes de cet étage sont localisées dans le bassin de Timgad (Djebel Tagratine, le massif de Bouhmar et kef Lakhal), atteignant des épaisseurs de 300 à 400 m selon Laffitte (1939) et Marmi (1995) qui leur attribuent un âge Burdigalien ou langhien, et Miocène supérieur à Pliocène pour les formations de teinte rouge qui sont concordantes sur les assises marines miocènes.

- **Aquitano-Burdigalien : argiles, conglomérats et marnes rouges.**

Ce sont des formations détritiques souvent continentales de couleurs rouges passant à des formations lacustres et évaporitiques dans certains endroits. Elles reposent en discordance sur l'Oligocène, l'Eocène ou le Crétacé. Ces formations sont bien développées dans notre terrain d'étude.

Ces formations débutent par des calcaires surmontant une couche de conglomérat rouge polygénique à galets de taille variables (1 à 40 cm) à la base. Ces derniers reposent soit en concordance sur des calcaires graveleux avec des galets, soit directement sur le Crétacé.

Dans la partie sud du massif de Bou Arif, le Miocène est nettement discordant. Il est formé par des calcaires gréseux à ciment calcaro-dolomitique, son flanc sud-est formé d'une série de 1000 m d'épaisseur d'argiles silteuses beiges ou vertes, gypsifères, des alternances d'argiles silteuses et de grès fins argilo-carbonatés en plaquettes centimétriques. Ces formations sont constituées essentiellement par des bancs de grès métriques assez étalés et façonnés en corniches.

Les grès de Djebel Tagratine, de Bouhmar et kefLakhal sont de teinte jaunâtre, micritiques, micassés, glocaunieux et azoïque. Ils sont constitués par des grains grossiers plus ou moins brillants. (VILA & GUELLAL, 1973)

- **Serravalien: marnes, conglomérats et calcaires à Mélobésiées.**

Cette formation repose directement sur les couches crétacées et ne dépasse pas 40m d'épaisseur. Au-dessus de niveaux conglomératiques lenticulaires, ce sont des marnes et des biomicrites jaunâtres riches en Mélobésiées, Bryozoaires, Mollusques, visibles par exemple au Kef Tagoust, versant sud de Dj. Bou Arif, Dj.Amraneet au Djebel Stah.

- **Tortonien gréseux blanc grossier :**

Au bord méridional de Djebel Amrane, sont sporadiquement discordants sur le Turonien terminal, le Coniacien et le Santonien inférieur, ailleurs ce sont les argiles silteuses à grès blancs grossiers du Tortonien qui surmontent en apparente concordance le Crétacé supérieur.

Entre les Djebels Amrane et Bou Arif et vers le sud, le Tortonien gréseux très épais est représenté de bas en haut comme suit (VILA & GUELLAL, 1973):

- 10m de glauconites et grès glauconieux grossiers en bancs décimétriques et à intercalations de marnes gypseuses.
- 350m d'argiles verdâtres gypsifères, devenant très vite silteuses, à bancs décimétriques ou métriques de grès blancs argilo-glauconieux.
- 400m d'alternances d'argiles silteuses beige-verdatre et de grès blancs souvent coquilliers.

Les grés du Tortonien forment des cordons pluri-hectométriques avec des chenaux orientés sensiblement SW-NE qui s'amincissent latéralement vers l'Est et l'Ouest. Cette formation est

discordante et peut reposer directement sur le Crétacé supérieur à la terminaison septentrionale de l'anticlinal du Djebel Chelia. Elle est composée de grès blancs grossiers, en bancs plurimétriques, à abondantes dragées de quartz (diamètre allant jusqu'à 2cm). La disposition en chenaux hectométriques est fréquente. De rares intercalations argileuses existent. Cette formation a une puissance d'environ 300m, aisément estimable au Djebel bouDjeza ou au Kef Mezouat sur le flanc nord de l'anticlinal du Djebel Chelia. (VILA & GUELLAL, 1973).

- **Tortonien supérieur continental argileux ou gréseux, violacé ou rouge :**

Le cœur du vaste synclinal de Timgad est occupé par une épaisse formation (350 à 400m) argilo-gréseuse violacée ou rouge. Les formations de Tortonien s'étalent sur de grandes étendues constituant des gisements d'exploitation. Elles reposent soit sur des calcaires altérées, rubéfiées, érodées et parfois perforées, soit sur des niveaux rouges, surmontés par une série détritiques, conglomératiques à tendance calcareuse avec une présence des lithothamniées des Pectens et des spatangues. (VILA & GUELLAL, 1973)

- **Messénien**

Il est formé de grès moyens à grossiers rouges avec des lits graveleux, conglomératiques et des intercalations d'argiles. Cet ensemble est discordant sur les argiles rouges du Tortonien.

3.1.3. Les formations du quaternaires

3.1.3.1. Formations dunaires (lunettes)

Ce sont des agglomérats de poussières et de sables fins localisés autour des sebkhas, actuellement corrodés par l'érosion.

3.1.3.2. Villafranchien probable : croûtes calcaires

Ces formations, perchées par rapport aux surfaces précédentes sont très faciles à repérer. Entaillées par les cycles qui ont suivi, leurs témoins forment de petites mesas très caractéristiques. Leur abrupt périphérique est suffisamment marqué pour que le fond topographique le représente presque systématiquement. L'aspect le plus fréquemment réalisé est celui des croûtes massives développées au-dessus d'horizons tuffacés surmontant eux-mêmes des niveaux à pouppées calcaires.

Ces formations sont habituellement rapportées au Villafranchien, bien daté plus au nord dans les régions de Sétif (à El Eulma, ex : Saint-Arnaud) et de Constantine (Oued Seguin).

3.1.3.3. Glacis polygéniques nappant les reliefs

Ces glacis couvrent de très vastes surfaces. Leur organisation en pente douce est tout à fait caractéristique. Ils ravinent le cycle antérieur de glacis, facile à reconnaître puisqu'il est caractérisé par des croutes massives. C'est un nappage complexe à débris bien calibrés, parfois encroutés. L'aspect est alors celui des croutes rosâtres feuilletées classiquement attribuées au Tensiftien.

3.1.3.4. Terres arables et alluvions anciennes

Elles sont installées sur des alluvions anciennes et supportent un sol brun.

3.1.3.5. Eboulis :

S'observent au niveau des versants à forte pente, installés sur des talus marneux et dominés par des reliefs calcaires ou gréseux qui alimentent de vastes nappes d'éboulis, pour la plupart peu actifs, sauf à leur partie supérieure. Le type de morphologie réalisé tend vers la réalisation de glacis.

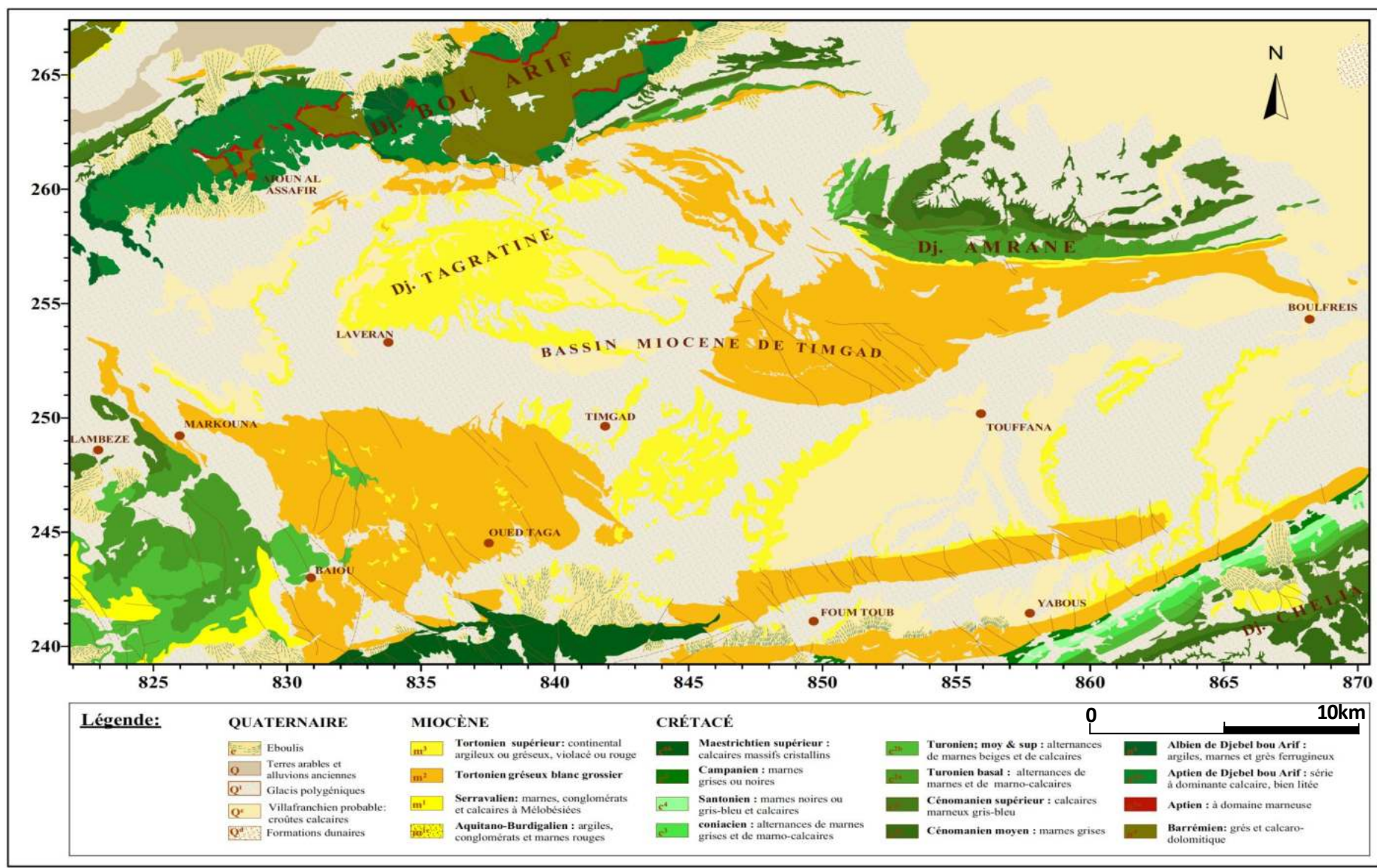


Figure N° 07 : Carte lithostratigraphique de la zone d'étude. (Assemblage réalisé à partir des cartes géologiques de Tazoult, Touffana, Ain el ksar, et Boulhelet. Cartes géologiques initiales réalisées par VILA & GUELLAL (1973)

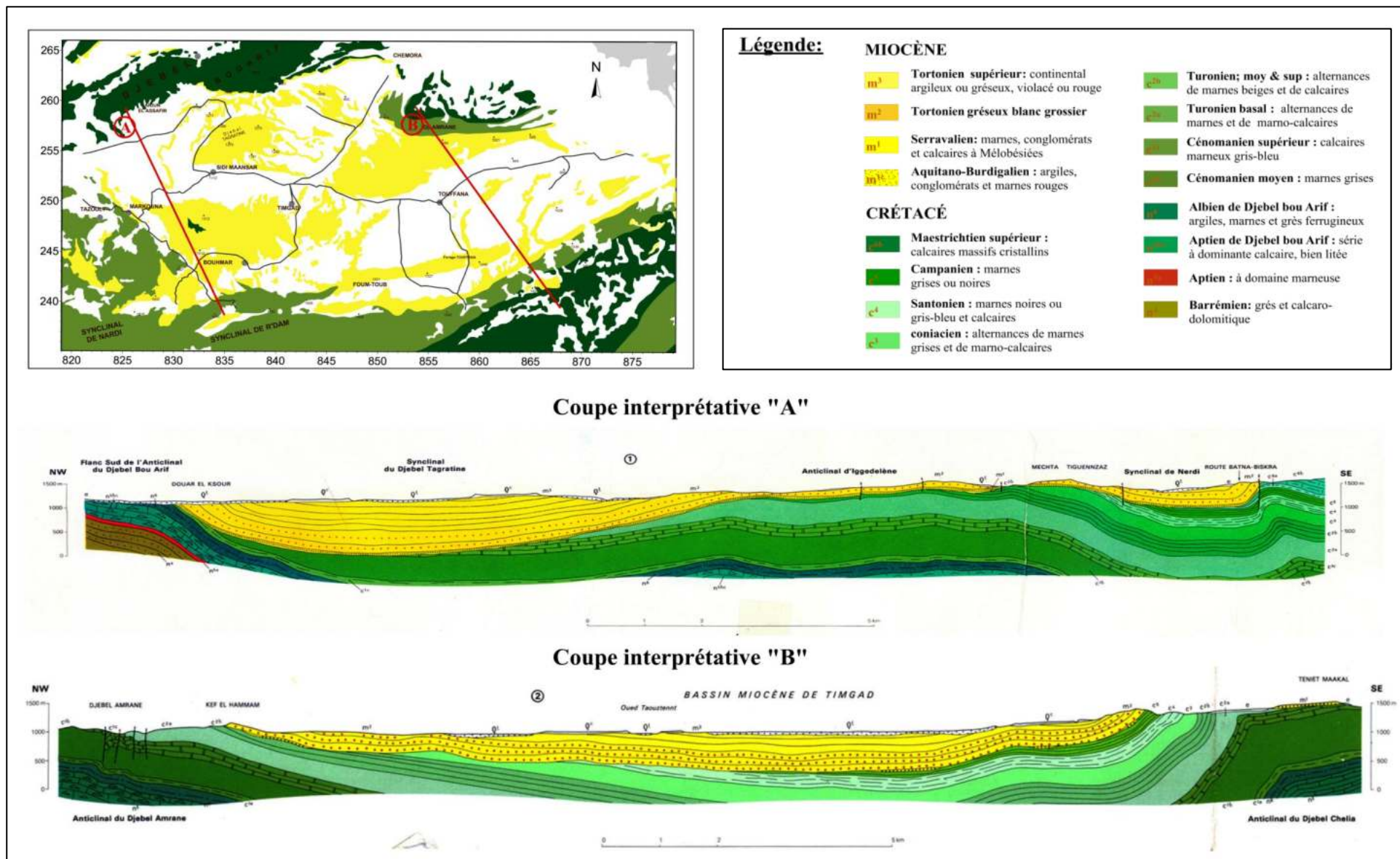


Figure N° 08 : Coupes interprétatives A et B, (J.M.VILA & S.GUELLAL 1973)

4. Tectonique et paléogéographie

4.1 Introduction

Les terrains néogènes superposés au système montagneux des Atlas sahariens, et en particulier des Aurès, sont classiquement considérés comme « post-tectonique », (R.Laffitte, 1939 ; Guiraud, 1973 ; J.M.Vila, 1980), cependant, il a été mis en évidence une importance tectonique cisailante d'âge tortonien en bordure du Constantinois, responsable de superpositions anormales qu'il est possible de mettre en évidence dans le secteur du Dj. Chelia. C'est dans ce contexte tectonique que sera replacée l'évolution structurale de la dépression de Timgad-Khenchela, (Ghandriche ; 1991).

Le bassin de Timgad est influencé essentiellement par la tectonique alpine vu son appartenance et du domaine actif se localisant à la convergence du domaine allochtone au nord et du domaine para-autochtones au sud. Son évolution structurale est liée à des événements tectoniques se succédant au cours des temps, depuis la fin du Paléozoïque jusqu'à nos jours (Guiraud, 1997).

4.2 Le domaine Atlasique

Le domaine atlasique correspond à deux grands ensembles morpho-structuraux bien individualisés :

Au Nord, le domaine pré-atlasique faiblement tectonisé et au sud le domaine atlasique fortement tectonisé où on observe des accidents dextres et des plissements de direction atlasique (phase post miocène), (Djaiz 2011). Les principales structures rencontrées dans cette région sont regroupées comme suit :

- L'accident sud – atlasique (ou flexure saharienne) au sud
- Le faisceau de failles sur lesquelles s'interposent les plis de l'Aurès, entre Kef Nsara et Foug el Kherza.
- L'accident de Roumana- Chaiba à l'ouest
- L'accident nord – atlasien qui longe tout d'abord le flanc sud du Djebel Meharga, et ensuite légèrement décalé de façon senestre à partir de l'Oued el Melah et se poursuit au nord des djebels Saoura et Fozna en direction de la pointe nord –occidentale du Djebel Metlili.
- L'accident NW-SE Négrine-Béjaia dextre passant par Khangat Sidi Nadji et Khenchela – Meduine – Gafsa. Il fut signalé par Laffite (1939) et Dubordieu (1956) ; Vila (1981), Ghandriche (1991) et Marmi (1995).
- L'accident NE-SW senestre passant par Souk Ahras- Batna-Outaya. (Glangeaud, 1951) qui se prolonge vers Béja en Tunisie (Delteil et Al Turki, 1986).

Le bassin de Timgad est donc limité par deux grands accidents régionaux orientés NW-SE, l'un à l'ouest passant par Batna – Oued Mellague, l'autre à l'est l'accident, celui de Négrine-Béjaia, (Djaiz 2011). Il est d'apparence relativement peu complexe. Pourtant ses structures plissées assez lourdes sont le résultat de plusieurs événements successifs.

4.3 Les événements paléogéographiques et structuraux

Les premiers mouvements sont peu discernables dans le bassin de Timgad et se rapportent à la phase atlasique fini-éocène. Comme l'Oligocène est connu par ses microfaunes marines remaniées, le vrai hiatus correspond bien à l'Eocène.

Il est probable que dès cette époque les grands plis ont été ébauchés. En effet la formation rouge conglomératique (Aquitano-Burdigalien ?) repose ici directement sur le Turonien (Kef el Hamman).

La phase « Alpine » n'est pas directement perceptible. En fait, le Tortonien repose ici sur des niveaux plus anciens que les couches rouges. Il est donc probable que cette phase a accentué les plis déjà formés. Plus au nord, cette phase a embouti les structures atlasiques, ce qui est net au Djebel bou Arif par exemple.

Les structures actuelles sont donc le résultat d'une orogénèse récente qui a accentué et surélevé le dispositif tortonien. En effet le relief est surtout conforme : le Miocène forme les dépressions et le Crétacé forme l'essentiel des hauteurs (VILA & GUELLAL, 1973).

4.4 Les structures

Du Nord au Sud, se succèdent les plis suivants :

- L'anticlinal du Djebel Bou Arif.
- Le synclinal du Djebel Tagratine.
- L'anticlinal d'Igguedelène et son prolongement apparent l'anticlinal du Djebel Amrane.
- Le synclinal du bassin miocène de Timgad.
- La zone synclinale Nerdi-Bouhmar.
- L'anticlinal du Djebel Chelia.
- Le synclinal du Djebel Aourès.

Cette succession de plis se poursuit encore vers le sud-est par l'anticlinal de Khenchela.

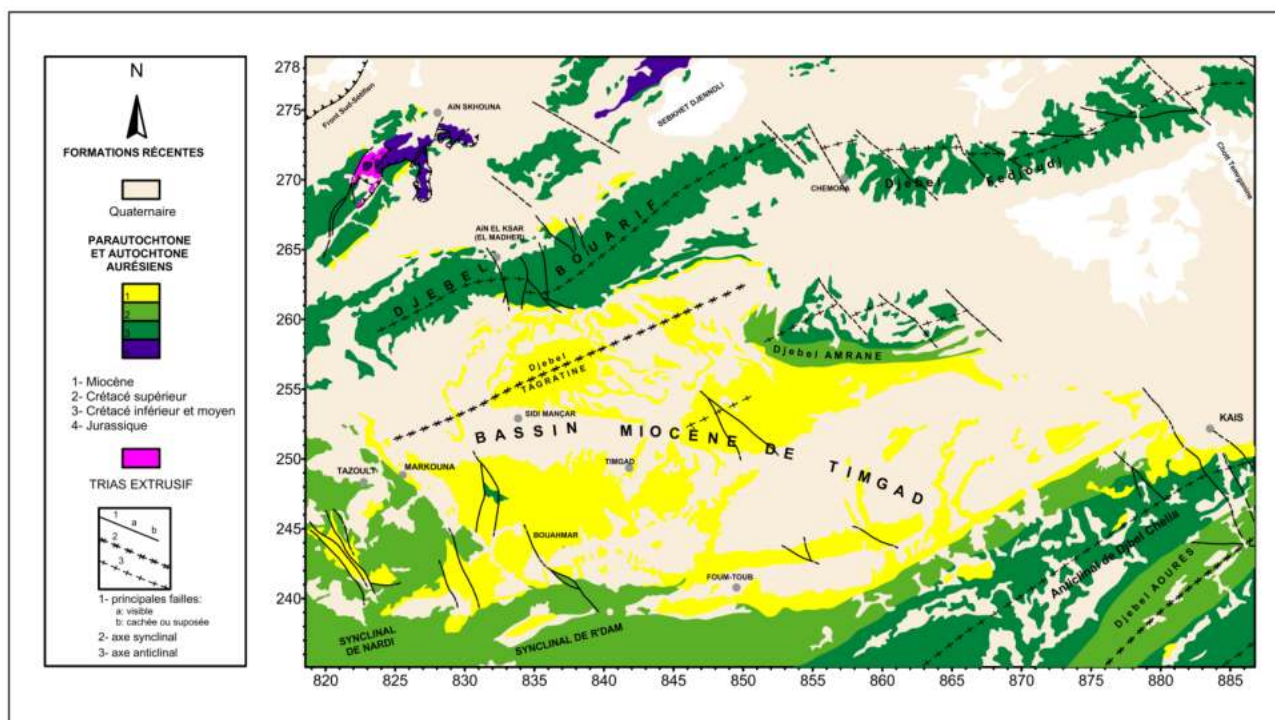


Figure N° 09 : Schéma structural simplifié du bassin de Timgad (*J.M.VILLA & S.GUELLAL 1973*)

4.4.1. L'anticlinal du Djebel bou Arif

C'est la structure la plus complexe. La phase Alpine l'a déformé en baïonnette à la faveur d'un système de décrochement dextres de direction N120 ou N140°.

En coupe, c'est un pli coffré, avec un flanc nord nettement verticalisé parfois légèrement déversé et un flanc sud sub-vertical.

4.4.2. Anticlinal de Djebel Igguedlène

Il présente une structure semblable à celle de Ich- Ali, séparé de celui-ci par le synclinal très étroit de Oued Fedhala. Il montre un cœur céno-manien flanqué par le Turonien et le Sénonien et un axe de direction NE-SW qui s'infléchit au SE (Tadjra, Kef Tounfikt) puis se prolonge dans la même direction. Après cette courbure, l'axe est constitué principalement par le Turonien jusqu'au niveau du Djebel Djebrount, séparant le Sénonien formant le flanc Sud de Tinouriste et le Turono - Sénonien du flanc nord du Djebel Akhal (Guiraud, 1975).

4.4.3. Le synclinal du Djebel Tagratine : est une structure très lourde de direction SW-NE.

4.4.4. L'anticlinal du Djebel Amrane

La plupart de ses fractures ne passent pas dans le Tortonien. D'autre part son flanc sud présente des compartiments plissotés entre des fractures.

Ce sont des fractures qui évoquent clairement les pincées jurassiennes. Elles enregistrent fidèlement une compression nord-sud postérieure à la fracturation. Le caractère polyphasé de cet anticlinal ressort donc bien de son analyse détaillée.

4.4.5. La zone synclinale Nerdi-Bouhmar

Possède une fracturation plus confuse avec notamment des failles sub-directionnelles de faible rejet qui correspondent en fait à une flexure faillée.

4.4.6. L'anticlinal du Djebel Chelia et le synclinal du Djebel Aurès

Sont des plis typiquement coffrés. Ce style et les discordances successives des formations miocènes attestent de son polyphasage. La terminaison périclinale de cet anticlinal est associée à des failles dont au moins une possède une composante décrochante dextre et qui ne passe pas dans le Tortonien gréseux. C'est celle qui va de l'Ain Habib au Ras Tifortassine. La composante décrochante horizontale ne dépasse certes pas quelques centaines de mètres et cette faille n'existe plus au Ras IchFortatou.

On peut l'interpréter comme la zone d'amortissement d'un accident de part et d'autre duquel la série se plisse de façon différentielle. Le compartiment nord-est est davantage plissé. Le compartiment Sud-Ouest, mis à l'abri de la compression, l'Est nettement moins. Les accidents alpins décrochants qui tronçonnent largement l'autochtone nord-Arlésien sont venus mourir au pied de ce qui sera le futur massif de l'Aurès.

4.4.7. Le synclinal du bassin miocène de Timgad

Le bassin de Timgad occupe une aire géographique d'un millier de Km² environ et orientée globalement E - W. Il se trouve à la convergence du domaine pré-atlasique qui se caractérise par un style tectonique marqué par des chevauchements des massifs septentrionaux (Monts de Bélezma-Chânon de Bou Arif) et du domaine atlasique autochtone (Massif de l'Aurès). Il est bien individualisé et bordé par des accidents diagonaux NE-SW et NW-SE, lui conférant une forme globalement losangique. Cette structuration est le résultat des différentes phases tectoniques du Mésozoïque et du Cénozoïque. (DJAIZ, 2011).

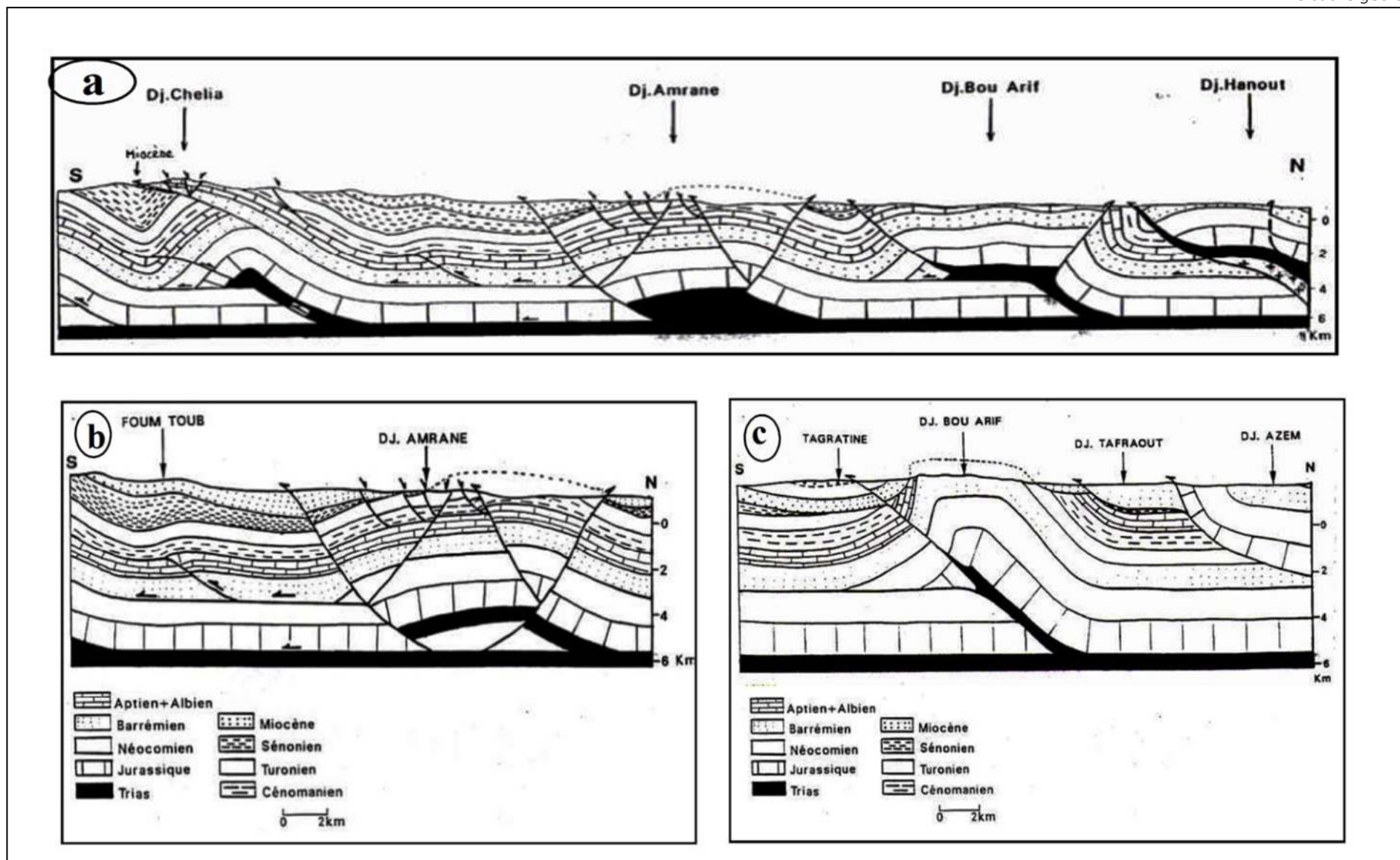


Figure N° 10 : Coupes représentant les structures plissées du bassin de Timgad avec la base chevauchante vers le sud ; a : Front du chevauchement, b : Anticlinaux de Fountoub et Dj. Amrane, c : Anticlinal de Bou Arif et Synclinal de Tagratine ;(Ghandriche, 1991)

5. Conclusion

Le bassin de Timgad appartient à l'Atlas saharien nord-oriental, à la terminaison septentrionale du massif des Aurès. Il s'agit d'un synclinal de direction Est-Ouest, formé essentiellement par des formations autochtones détritiques du Miocène (tortoniens, post-tortoniens), argilo gréseuses, qui s'étalent sur de grandes étendues constituant des gisements d'exploitation des argiles rouges (briqueteries et usine de fabrication de matériaux en céramique essentiellement). Elles reposent en discordance sur les séries du Crétacé (Turonien-Cénomaniens-Campanien) par l'intermédiaire de niveaux détritiques le plus souvent grossiers.

Au centre de bassin, on peut bien observer l'apparition des formations du Secondaire marno-calcaires au niveau des massifs isolés (Djebel Tagratine, Koudiate Safia, Kef Lakhal, le massif de Bouhmar et Dj. Amrane)

Les contreforts des reliefs qui bordent le bassin de Timgad au Sud sont formés localement d'affleurements miocènes. En revanche, le quaternaire les recouvre dans toute la partie NW et partiellement dans le centre du bassin.

Les bordures septentrionales et méridionales du bassin de Timgad sont aussi généralement de nature marno-carbonaté, représentant ainsi la partie visible de substratum du bassin de Timgad

Structuralement, Le bassin de Timgad est influencé essentiellement par la phase atlasique qui a tracé ses structures plissées ; (L'anticlinal du Dj. Bou Arif, Le synclinal du Dj. Tagratine, L'anticlinal Dj. Amrane, La zone synclinale Nerdi-Bouhmar, L'anticlinal du Dj. Chelia et Le synclinal du Dj. Aourès) ces dernières sont réactivées par la phase post-miocène. Produisant ainsi des anticlinaux affectés par un réseau de failles d'orientation NW-SE et NW-SE.

Chapitre III :

LE CADRE GEOPHYSIQUE

1. Introduction

La reconnaissance des eaux souterraines exige des données précises, tant sur la nature lithologique des formations géologiques que sur leur localisation et leur disposition, dont la synthèse aboutit à la définition et à l'identification des structures hydrogéologiques. Ces dernières définissent à leur tour la forme et les dimensions des aquifères.

Les méthodes géophysiques représentent aujourd'hui les principales méthodes de prospection et de détection des aquifères souterrains.

L'entreprise nationale de géophysique (ENAGEO) a entrepris une campagne géophysique par la méthode de sondage électrique sur les sites de Tazoult, Timgad et Ouled Fadhel. Cette campagne menée du 25.01.1993 au 26.06.1993, a permis la réalisation de 294 sondages électriques en ligne AB=4000m ; (A et B étant les électrodes d'émission de courant).

On ne va prendre que 222 sondages qui se trouvent au sein de terrain d'étude, ces sondages sont répartis comme suit :

- Site TIMGAD : 80 sondages AB=4000m dont 01 étalon.
- Site OULED FADHEL : 121 sondages AB=4000m dont 02 étalons.
- Site TAZOULT : 33 sondages AB=4000m dont 04 étalons

Le site de TIMGAD :

08 coupes géo-électriques ont été établi dont 04 sont orientées Nord-Sud et 04 sont orientées Est-Ouest en prolongement avec le site de Ouled Fadhel.

Le site d'OULED FADHEL

Le site d'Ouled Fadhel est étudié par un ensemble de 14 coupes géo-électriques orientées Est-Ouest dont 04 sont des coupes transversales.

Le site de TAZOULT

Pour la région de Tazoult on ne prendra que 3 coupes traversant le terrain d'étude orientée Nord-Sud (Fig. 11).

2. But de l'étude

Le but de cette campagne géophysique consiste, à identifier :

- La nature des différentes formations géologiques en vue de localiser celles qui sont favorables à l'accumulation des eaux souterraines ainsi que la nature et la géométrie du socle.
- La présence éventuelle d'accidents d'origine tectoniques pouvant guider les écoulements souterrains.

3. Méthode utilisée (méthode du sondage électrique vertical)

C'est une méthode qui permet l'étude indirecte du sous-sol en se basant sur la mesure de la résistivité des formations traversées par un courant électrique continu injecté à partir de la surface de sol.

3.1. Principe de la méthode

On envoie dans le sous-sol, par l'intermédiaire d'électrodes d'émission A et B, un courant électrique continu et on mesure entre deux électrodes de réception M et N la différence de potentiel DV produite. Connaissant l'intensité du courant émis et la tension DV enregistrée. On déduit alors la résistivité de la formation traversée par ce courant grâce à la relation suivante :

$$R_a = K \cdot DV / I$$

Avec :

R_a : résistivité apparente en Ohm-mètre

K : coefficient géométrique dépendant de la position des électrodes AMNB

I : intensité du courant émis

DV : tension enregistrée

L'examen des variations de la résistivité apparente en fonction du demi-allongement AB. Conduit à la connaissance des résistivités vraies des différentes couches et de leurs épaisseurs respectives.

3.2. Technique de mesure

Pour exécuter les mesures de résistivités apparentes correspondant à des tranches de terrains de plus en plus profonds, on utilise un quadripôle SCHLUMBERGER AMNB dont le centre

reste fixe et la distance entre les électrodes de réception MN inférieur ou égale au tiers de la distance entre les électrodes d'émission ($MN \leq AB/3$).

Après avoir réalisé une mesure entre M et N et obtenu une résistivité R_a , on éloigne les prises d'émission A et B en A' et B' et on effectue avec le même MN une deuxième mesure et ainsi de suite jusqu'à atteindre une distance AB donnée au préalable (4000 mètres dans le cas de cette étude) en fonction de la profondeur d'investigation.

Plus les électrodes d'émission AB sont éloignées de leur centre O, plus le courant électrique pénètre profondément dans le sol.

On obtient une courbe terrain effectuée au centre du dispositif en fonction de la demi-longueur AB soit, $R_a = f(AB/2)$ représentative des couches en profondeur.

Le diagramme électrique est obtenu en portant R_a en ordonnées et $AB/2$ en abscisses sur échelle bilogarithmique.

La profondeur d'investigation varie le plus souvent entre $AB/4$ et $AB/10$ en fonction de la nature lithologique des terrains.

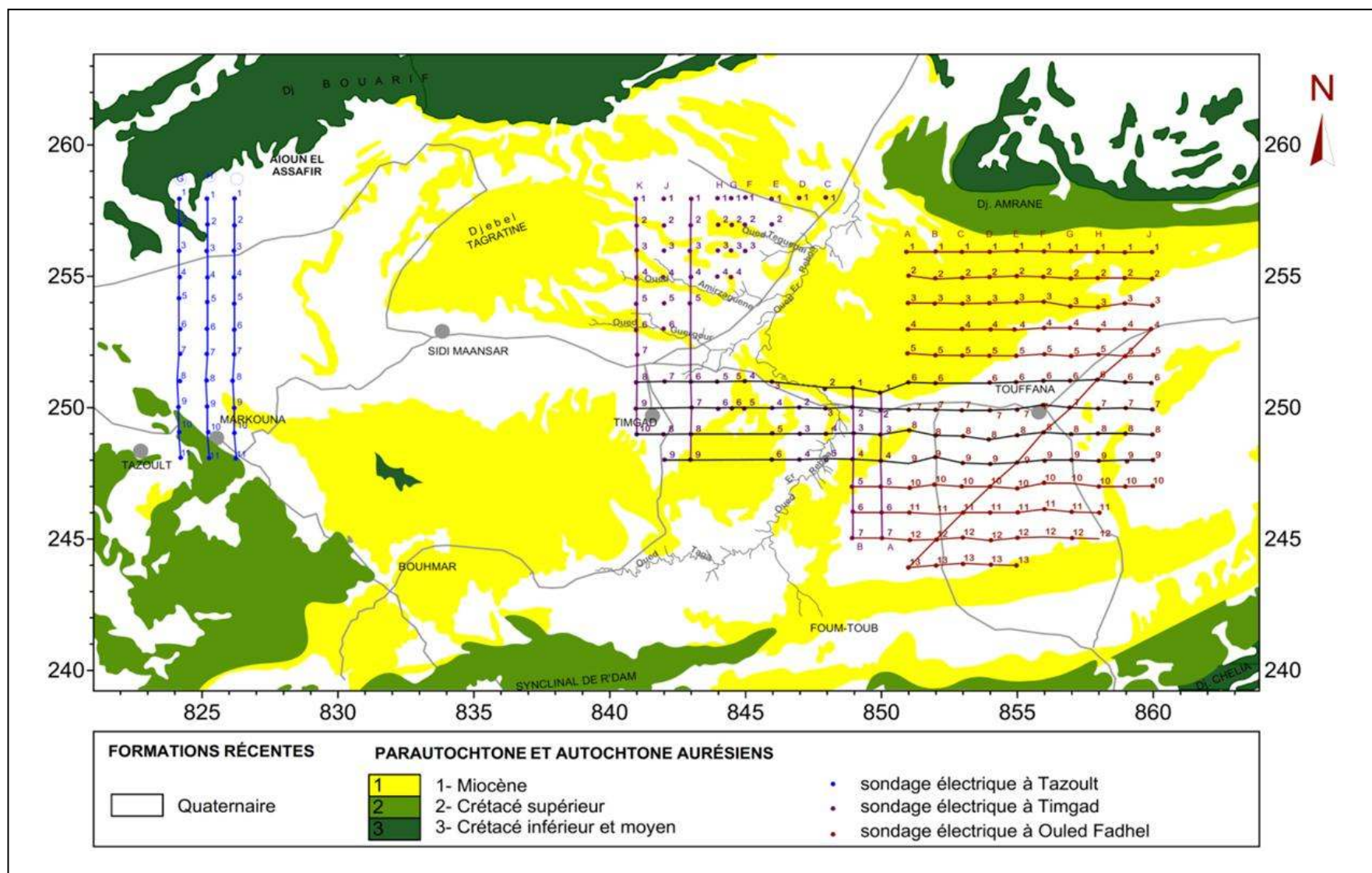


Figure N° 11 : Carte de position des sondages électriques dans le bassin de Timgad (ENAGEO-1993)

4. Interprétation des coupes géoélectriques

Les coupes seront corrélées et identifiées grâce aux logs stratigraphiques des forages existants et aux informations géologiques contenues dans les cartes de la région et au niveau du terrain (ENAGEO-1993). On a procédé à habillage des coupes par la représentation des formations géologiques probables pour qu'elles soient plus représentatives.

L'examen des coupes géo-électrique nous montre ainsi que l'épaisseur, la morphologie et la résistivité de chaque formation varient d'un endroit à l'autre.

4.1 . Le site de TIMGAD

- Coupes A et B

Les deux coupes A et B sont orientées Nord-Sud couvrant la partie sud-est de la région de Timgad ont mis en évidence la succession des terrains suivants :

- Une couche superficielle d'épaisseur très variable allant de 20 à 150 mètres et de résistivité très faible n'excédant pas 10 Ohm-mètre.
- Une deuxième couche relativement conductrice probablement très épaisse de résistivité moyenne de 40 à 50 Ohm-mètre.
- Une troisième couche résistante dont seul le toit est atteint, apparait aux sondages A1, A7 et B1.

Du point de vue géologique, les deux premiers terrains peuvent être attribués au Miocène marneux et le substratum résistant au Miocène gréseux.

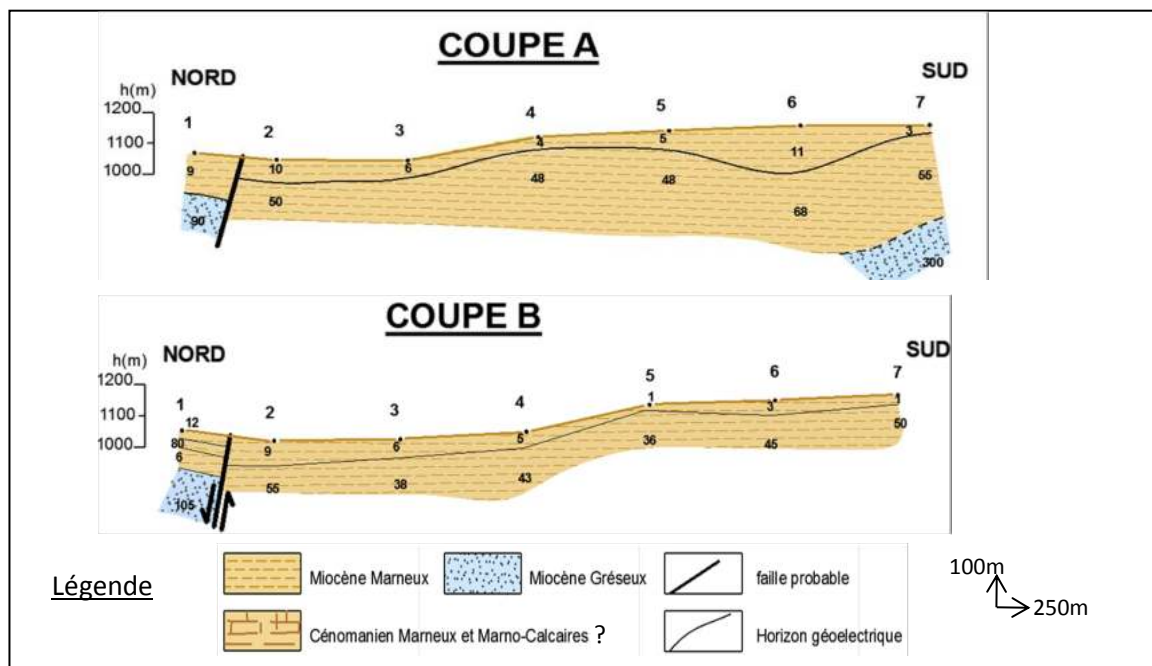


Figure N° 12 : Coupes géoélectriques (A.B) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993)

- **Coupe I**

D'orientation nord-sud, traversant l'est de Timgad. La coupe montre une structure synclinale, comblée par des sédiments marneux d'une profondeur importante pouvant aller jusqu'à 500mètres entre les deux sondages I5 et I6.

Cette couche marneuse repose sur les grès du Miocène qui se biseautent entre les sondages I3 et I4. La formation gréseuse atteint une épaisseur d'environ 150mètres.

A la partie Nord de la coupe, les sondages 1, 2 et 3 indiquent une couche conductrice très épaisse qui dépasse les 500mètres qui correspondrait au Cénomaniens marneux et marno-calcaire.

- **Coupe K**

La coupe est orientée nord-sud, traversant la partie Nord-Est de la région de Timgad. Elle montre la présence de deux failles, formant une structure de remplissage marneux du Miocène très épais, dépassant les 500 mètres avec une très faible résistivité variant entre 2 et 46 Ohm mètres, séparé par un milieu plus résistant correspondant à un substratum gréseux du Miocène.

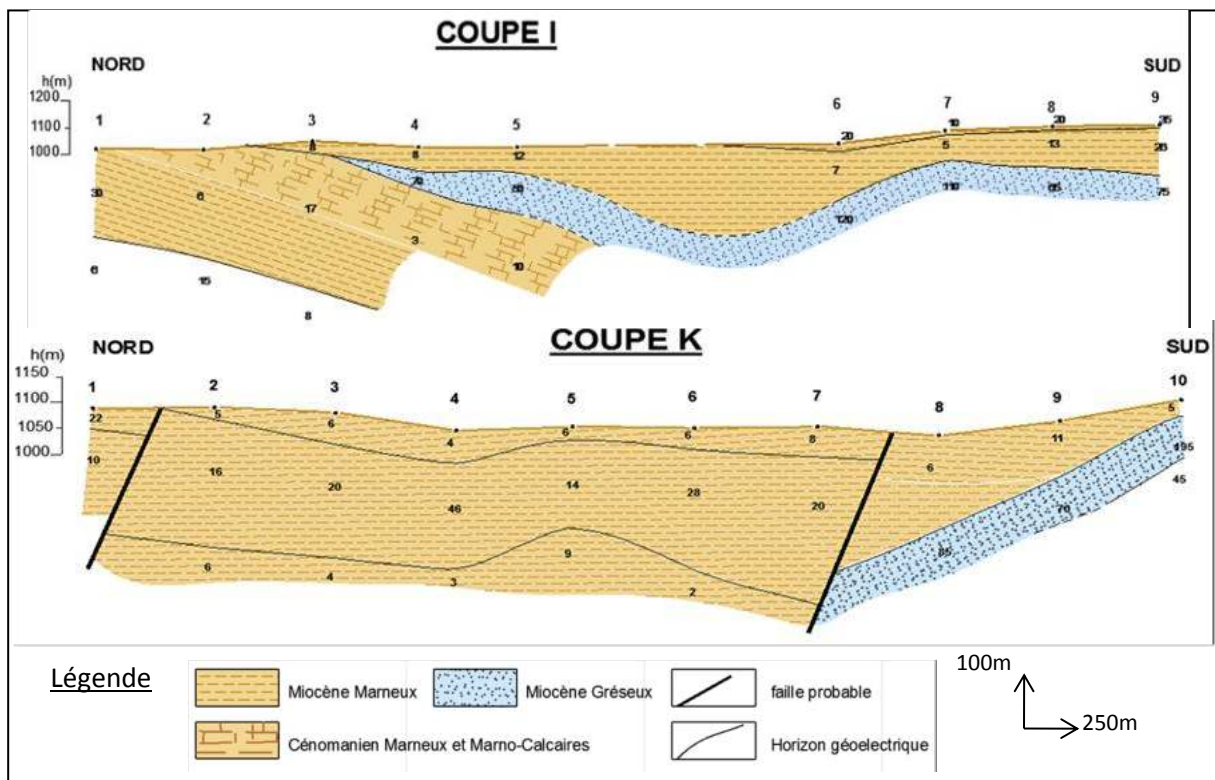


Figure N° 13 : Coupes géométriques (I.K) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993)

4.2. Le site d'Ouled Fadhel

Le site d'Ouled Fadhel est concerné par un ensemble de 10 coupes géoélectriques orientées est-ouest et 04 coupes transversales.

- Coupe 1

A partir de cette coupe on peut distinguer les formations suivantes :

Une formation relativement conductrice de résistivité variant entre 09 et 50 Ohm-mètre et d'une épaisseur également variable qui peut atteindre les 700 mètres. Cette couche est constituée par les dépôts marneux du Miocène surmontant un substratum résistant correspondant au Miocène gréseux, d'une résistivité moyenne d'environ 70 Ohm-mètre.

On peut distinguer également au niveau des sondages A1, B1 et C1 un substratum qui peut être attribué aux dépôts calcaires de l'Aptien.

- Coupe 2

La coupe montre la présence d'une faille séparant deux terrains différents.

A l'Ouest de la coupe, nous rencontrons de haut en bas la succession des formations suivantes :

- Un dépôt marno-calcaire du Miocène d'une épaisseur moyenne de 100 mètres, avec l'affleurement d'une bande gréseuse au niveau du sondage E2.
- Le Cénomaniens marneux et marno-calcaire possède une épaisseur pouvant dépasser 500 mètres.

Cette succession forme une structure anticlinale dont la charnière se trouve au niveau du sondage C2.

A l'Est de la faille, le Miocène se trouve sous forme d'un synclinal dont le cœur est marqué par la subsidence des dépôts marneux avec une épaisseur qui peut atteindre les 400 mètres, surmontant un substratum gréseux résistant.

- Coupe 3

A l'Est de la coupe, est mise en évidence une forte subsidence du Miocène marneux d'épaisseur qui avoisine 700 mètres.

Ces dépôts reposent sur un substratum résistant correspondant au grès du Miocène.

A l'ouest de la coupe, l'épaisseur du Miocène marneux devient très faible ce qui permet l'apparition des grès sous-jacents. Ces derniers reposent sur les dépôts marneux et marno-calcaire du Cénomaniens.

A l'ouest du sondage B3, la présence d'une faille marque l'affleurement des grès du Miocène à la surface au niveau du sondage A1, reposant sur le Cénomaniens marneux et marno-calcaire.

Au-dessous des dépôts du Cénomaniens se trouve un substratum résistant correspondant aux calcaires Aptien.

- **Coupe 4**

Cette coupe présente les mêmes caractéristiques que la coupe précédente à savoir :

- La forte subsidence des dépôts marneux dont l'épaisseur pourrait dépasser 800 mètres au sondage H4.
- Affleurement du Miocène gréseux aux points D4 et E4.
- Affleurement du Cénomaniens à l'Ouest de la faille.

- **Coupe 5**

Dans la partie st de la coupe, on remarque également un épais dépôt marneux reposant sur les grès résistants du Miocène qui affleurent au niveau des sondages B5 et D5 dans la partie ouest de la coupe.

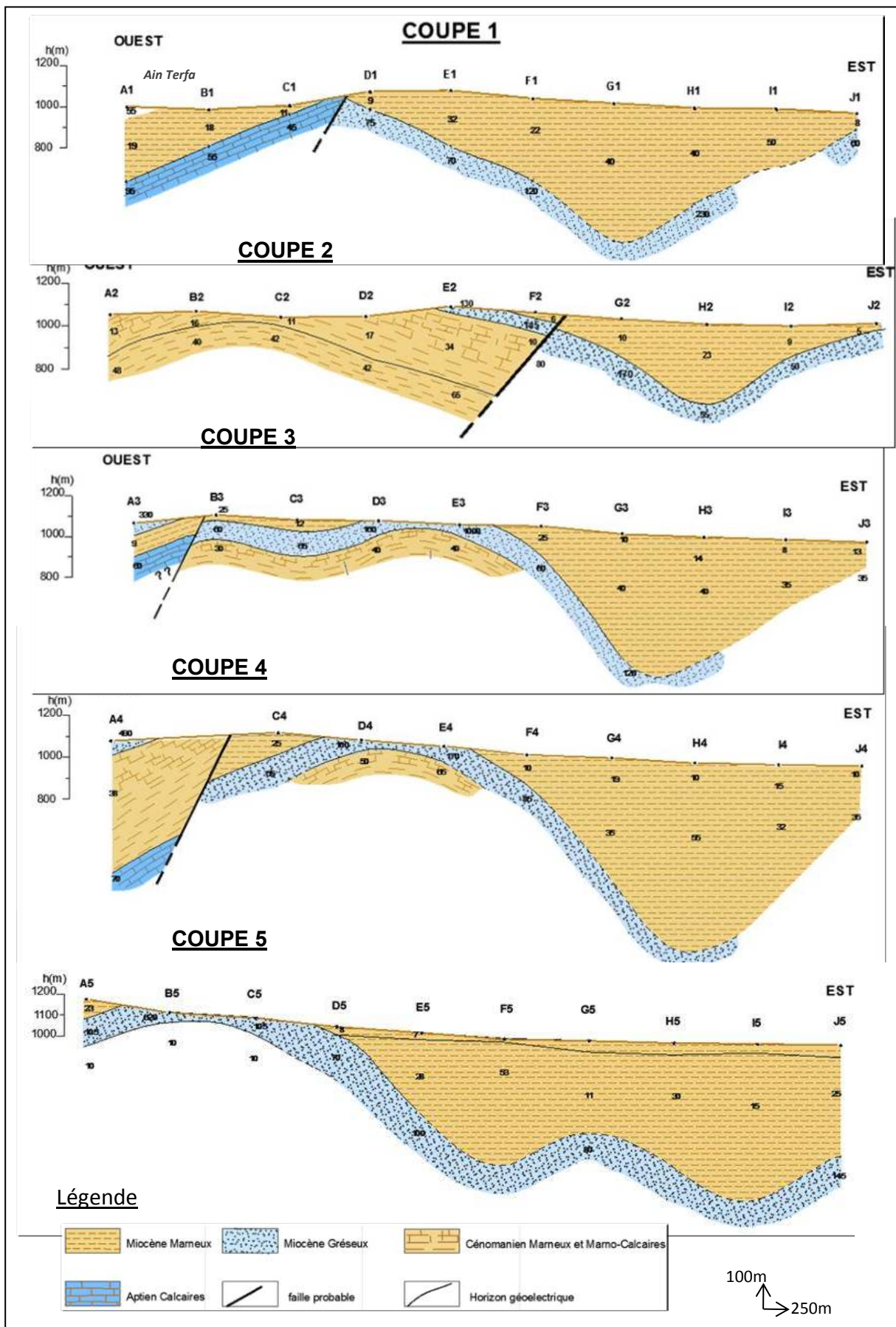


Figure N° 14 : Coupes géoelectriques (1.2.3.4.5) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993)

- **Coupe 6**

La faille décelée entre les sondages F10 et G10, subdivise cette coupe en deux parties géologiquement similaires, où on rencontre les mêmes dépôts marneux, d'épaisseur importante, reposant sur un substratum formé par les grès du Miocène, affleurant au bord ouest de la coupe.

- **Coupes 7 et 8**

Les deux coupes sont presque identiques, montrant les dépôts marneux du Miocène surmontant un substratum gréseux résistant, traversés par deux failles qui ont fait remonter les compartiments qui se trouvent dans la partie Est.

- **Coupe 9**

Cette coupe montre l'existence de trois terrains :

Un terrain conducteur se présentant de part et d'autre du point C13 sous forme de deux structures synclinales remplies par les dépôts du Miocène marneux.

Un deuxième terrain résistant correspondant au Miocène gréseux.

Enfin un troisième terrain, dont le toit est atteint par le sondage E13 qui correspond au Cénomaniens.

- **Coupe 10**

Cette coupe orientée SW-NE, montre une couverture marneuse d'épaisseur constante entre les sondages A13 et E9 qui s'épaissit à partir du sondage E9, allant vers les 600 mètres.

La faille a fait remonter la partie nord-est de la coupe où l'on assiste vraisemblablement à l'érosion de presque la totalité des dépôts du Miocène.

Les faibles résistivités affichées par le terrain sous-jacent nous permettent de supposer qu'il s'agit de grès légèrement marneux.

Le troisième terrain de résistivité 15 Ohm-mètre mis en évidence par le sondage 15 correspondrait au Cénomaniens marneux.

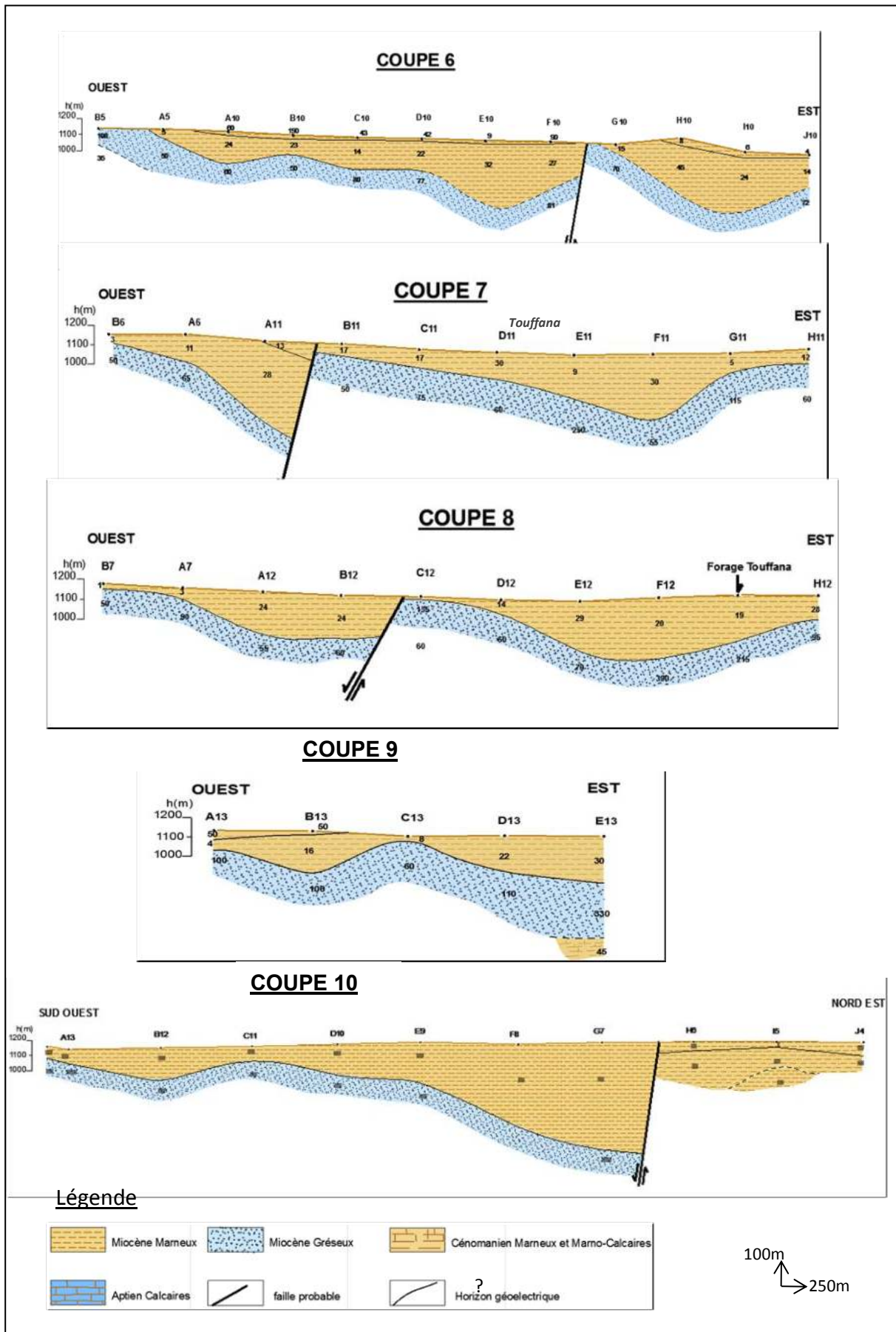


Figure N° 15 : Coupes géoélectriques (6.7.8.9.10) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993)

4.3. Interprétation des coupes transversales

Dans le but d'avoir un aperçu géologique global des terrains en place le long de l'axe Touffana-Timgad, 04 coupes transversales, sont établies selon une orientation est-ouest couvrant les sites de Timgad et d'Ouled Fadhel.

- Coupe I

Mis à part l'affleurement du Miocène gréseux au niveau du point B6 vu sa forme anticlinale, le Miocène marneux constituant le premier terrain, présente une épaisseur presque constante jusqu'à la faille localisée entre les points G5 et H6.

Le Miocène gréseux formant le substratum résistant peut se présenter comme un aquifère potentiel.

Au sondage B6, nous remarquons la présence d'un troisième terrain de résistivité 350hm-mètre correspondant probablement au Cénomaniens marneux.

A l'Est de la faille, les terrains en place correspondent aux dépôts marneux du Miocène, les grès n'étant pas atteints.

- Coupe II

La partie ouest de la faille, allant du forage Timgad jusqu'au point C3, montre un terrain conducteur formé par les dépôts marneux du Miocène, leur épaisseur est légèrement diminuée par rapport à la coupe I. Il repose sur le substratum résistant (les grès de Miocène).

Dans la partie centrale de la coupe, comprise entre les sondages C3 et A7, on remarque une diminution sensible des résistivités pouvant s'expliquer par un changement latéral de faciès : on passe d'un faciès marneux à un faciès marno-gréseux.

Dans la partie Est de la coupe, à partir du point A7, on constate que le premier terrain constitué par les dépôts du Miocène marneux, devient de plus en plus épais en allant vers l'Est, son épaisseur dépasserait 600 mètres aux points G7 et H7. Les grès forment le deuxième terrain, ils plongent ainsi vers l'Est pour atteindre des profondeurs très importantes.

Le troisième terrain conducteur décelé par le sondage B7 peut être attribué au Cénomaniens marneux.

- **Coupe III**

Cette coupe est affectée par deux failles, localisées, l'une entre les points C4 et B3 et l'autre entre les points E8 et F8.

La première faille a fait remonter, dans la partie Ouest de coupe, les dépôts gréseux du Miocène permettant ainsi l'apparition du Cénomaniens marneux au niveau des points K10 et J8.

La partie centrale de la coupe, délimitée par les deux failles, présente une épaisseur très importante des dépôts marneux du Miocène.

Le substratum gréseux commence son apparition au point C8 pour amorcer une allure anticlinale au point E8.

A l'Est de la deuxième faille nous assistons également à une forte subsidence des dépôts marneux du Miocène pouvant dépasser 700 mètres.

Ces dépôts reposent sur un substratum résistant correspondant au Miocène gréseux.

- **Coupe IV**

Cette coupe montre uniquement les terrains du Miocène. Il s'agit des dépôts marneux reposant sur le substratum gréseux résistant, ce dernier est d'une allure ondulée faisant penser à une ancienne surface d'érosion remplie par les dépôts marneux du Miocène.

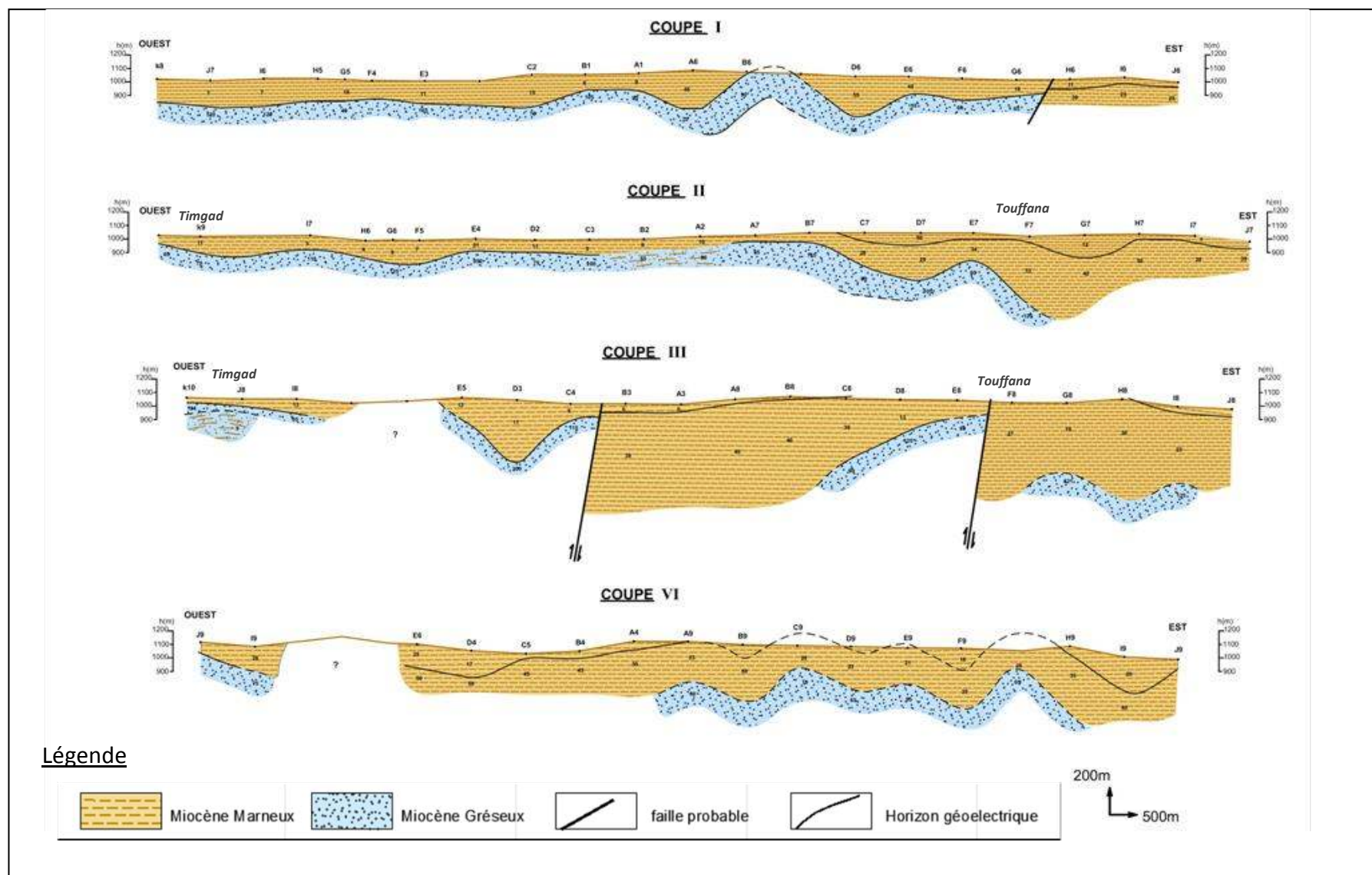
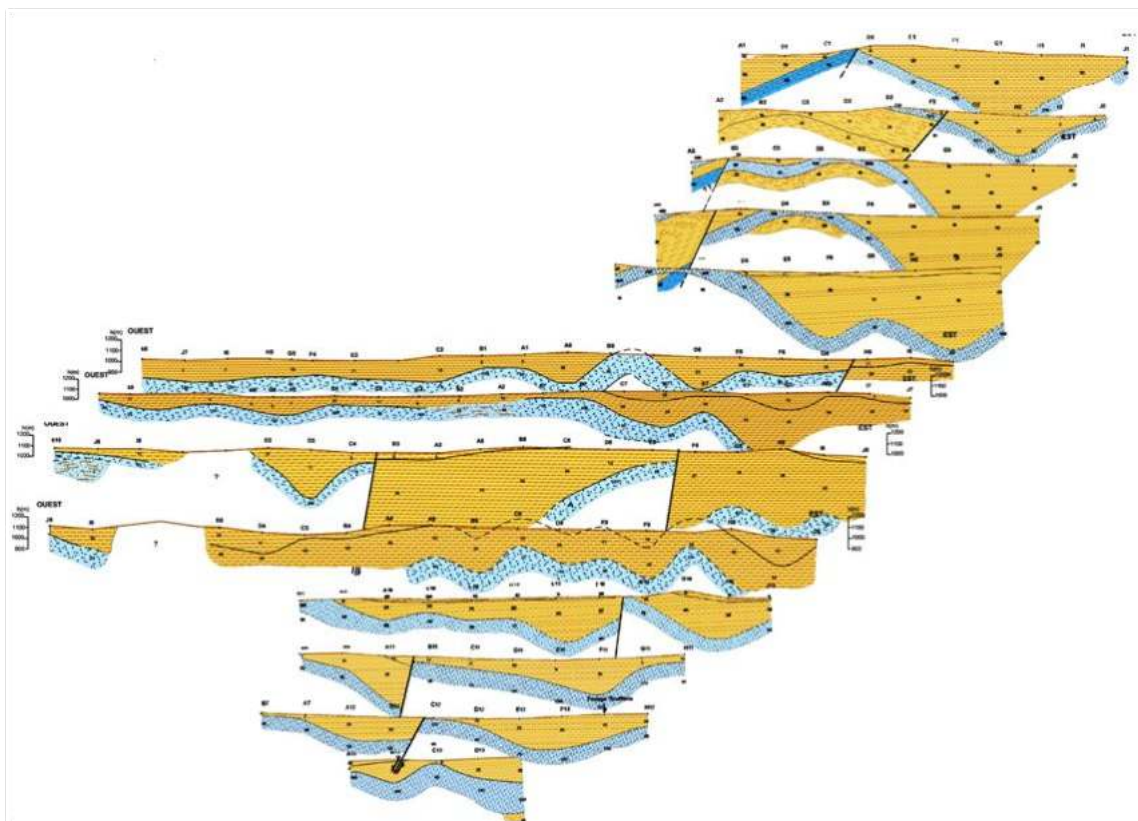
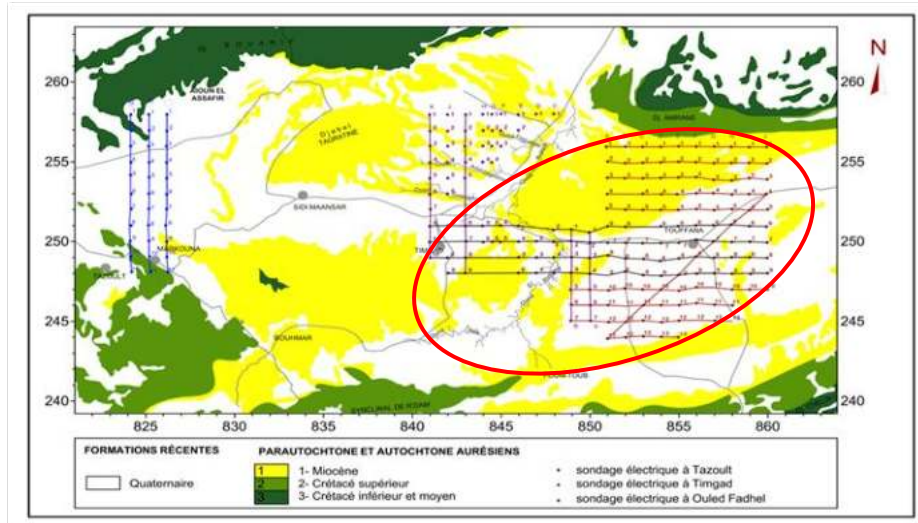


Figure N° 16 : Coupes géoélectriques (I.II.III.VI) bassin de Timgad, (ENAGEO-1993)



Légende



Figure N° 17 : Coupes géologiques sériees établis sur la base des coupes géoelectriques transversales du bassin de Timgad

5. Carte du toit du Miocène gréseux

Cette carte montre que le toit du Miocène gréseux a une allure ondulée formant ainsi une succession de structures tantôt positives, tantôt négatives affectées parfois par des accidents tectoniques.

Les structures synclinales les plus importantes sont observées de part et d'autre de Touffana présentée comme un anticlinal.

Les profondeurs maximales respectives sont enregistrées par les sondages C8 et H 4.

Au nord-ouest de Touffana, la profondeur du Miocène gréseux varie entre 0 et 25 mètres, autrement dit cet horizon affleure par endroits.

Le resserrement des courbes de niveau, visible principalement dans la partie traversée par les profils F et G montre qu'on est dans une zone à très fort pendage.

Dans la partie nord de Timgad, nous remarquons l'absence totale du Miocène gréseux due certainement au remplissage important du miocène marneux.

6. Conclusion

L'examen de l'ensemble des coupes géo-électriques nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- L'activité tectonique a fait apparaître les terrains du Crétacé au niveau des flancs du Djebel Amrane.
- Le Crétacé est représenté par les dépôts épais du Cénomaniens marneux et marno-calcaire reposant sur les calcaires de l'Aptien.
- Du point de vue structural et d'une façon générale, le Miocène s'est déposé sur une surface d'érosion formant ainsi une suite de dépressions parfois très profondes.
- La présence de nombreuses failles témoigne d'une intense activité tectonique affectant à la fois les formations du Miocène et du Crétacé.
- Le Miocène est constitué d'une première couche très épaisse, caractérisée généralement par de faibles résistivités reposant le plus souvent sur un substratum gréseux résistant.
- Sur le plan hydrogéologique, les horizons susceptibles d'être aquifères sont les grès du Miocène et les calcaires du Crétacé. On remarque que les grès sont présents dans toutes les coupes géoélectriques tandis que les calcaires aptiens ne sont atteints que sur les flancs nord et sud du bassin.

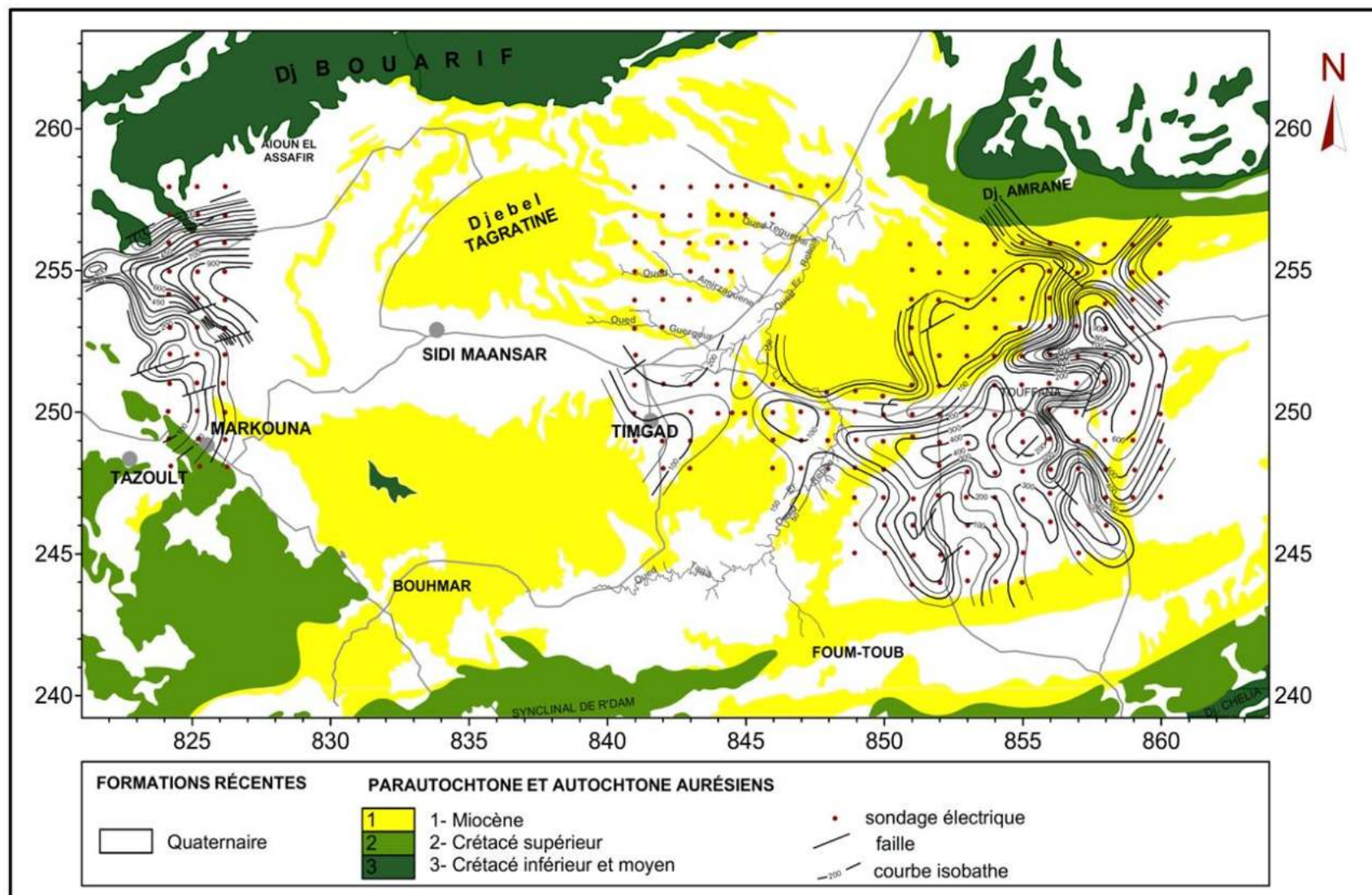


Figure N°18 : Carte en isobathes du toit du miocène gréseux (ENAGEO-1993)

Chapitre IV :

LE CADRE HYDROCLIMATOLOGIQUE

1. Introduction

L'eau souterraine constitue une partie du cycle hydrologique, qui est rechargée par les précipitations. Le cycle hydrologique est principalement régi par l'équilibre entre l'entrée (Précipitations) et la sortie (évapotranspiration, ruissellement et décharge).

Les composantes du bilan des eaux souterraines consistent en la recharge (recharge directe et flux inter-aquifère) et la décharge (écoulement des nappes vers les cours d'eau, les sources, des prélèvements d'eau souterraine, l'évapotranspiration,...). La différence entre la recharge et la décharge détermine le changement dans le volume de l'eau souterraine.

Toute variation climatique peut potentiellement affecter le flux d'entrée vers les eaux souterraines (recharge) et de sortie dans les plans d'eau de surface comme le débit de base et les sources (décharge), soit directement, soit indirectement, puisque la vapeur retourne dans l'atmosphère.

Pour cela, une caractérisation hydroclimatologique du bassin de Timgad est impérative pour évaluer le contexte hydrologique du bassin et établir un bilan hydrique.

Le diagnostic physico-géographique, qui présente la première étape de la connaissance des bassins versants, permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans les processus de l'écoulement superficiel : facteurs orographiques, morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques. Leur interaction est déterminante dans le comportement hydrologique des bassins (BABA HAMED.K et al)

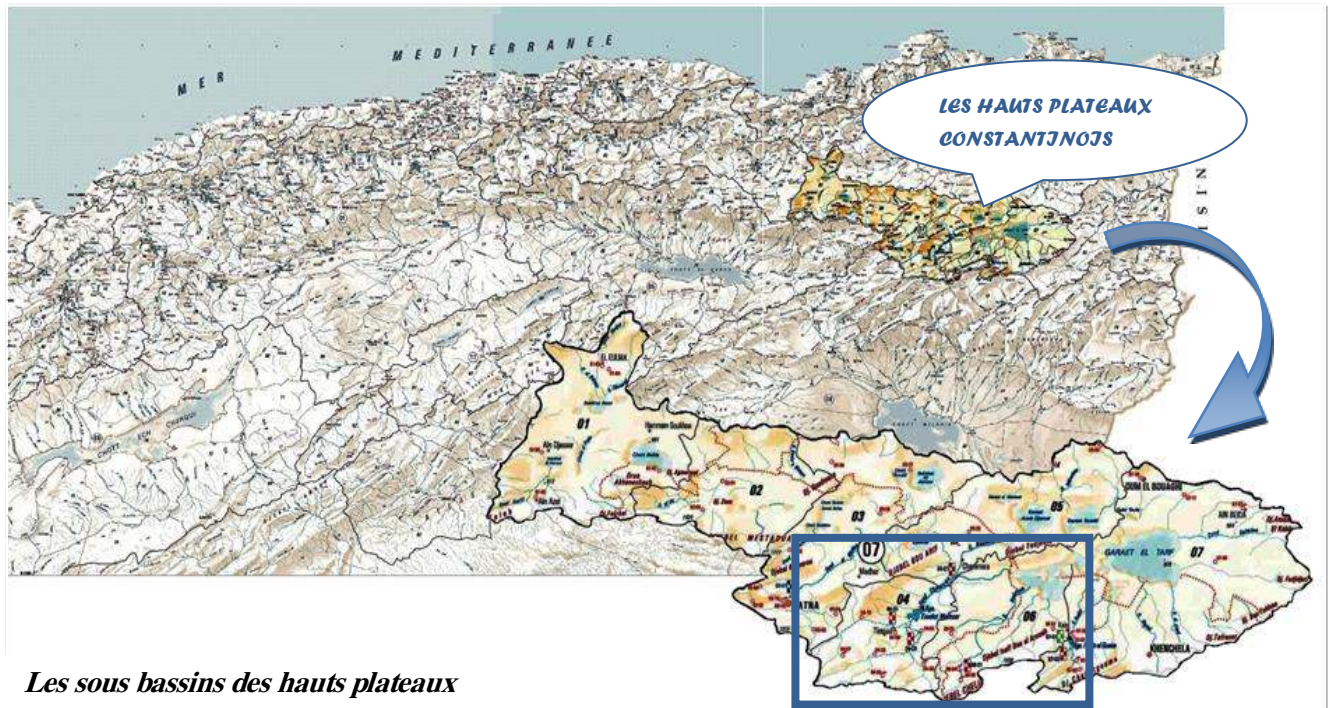
De ce fait, ce chapitre s'articule en deux parties principales :

Partie A : Caractéristiques morphométriques.

Partie B : Caractéristiques hydroclimatiques.

2. Caractéristiques morphométriques

Le bassin de Timgad appartient au bassin versant des hauts plateaux constantinois, il est composé de deux sous-bassins versant : Oued Chemorah et Oued Boulefreis qui sont séparés par Dj. Amrane.



Les sous bassins des hauts plateaux constantinois sont :

1. Chott Beida
2. Merdja Zana
3. Sebket Ezzemoul
4. Oued Chemorah
5. GaraetAinDjemel
6. Oued Boulefreis
7. Garaet Et tarf

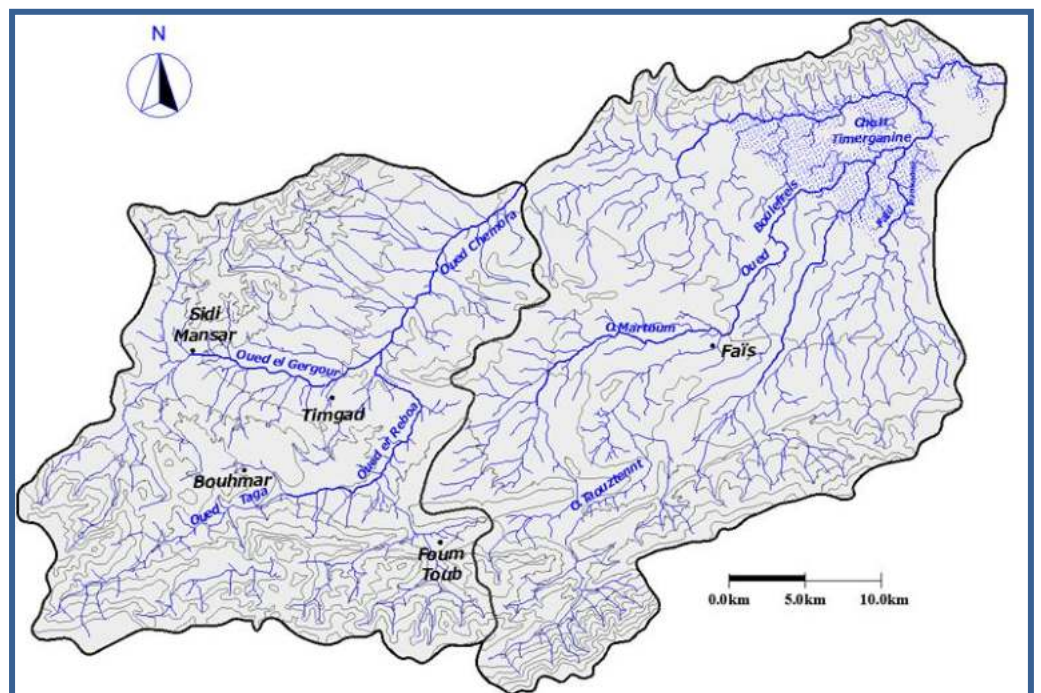


Figure N° 19: Situation géographique des sous bassins (Oued Chemorah et Oued Boulefreis)

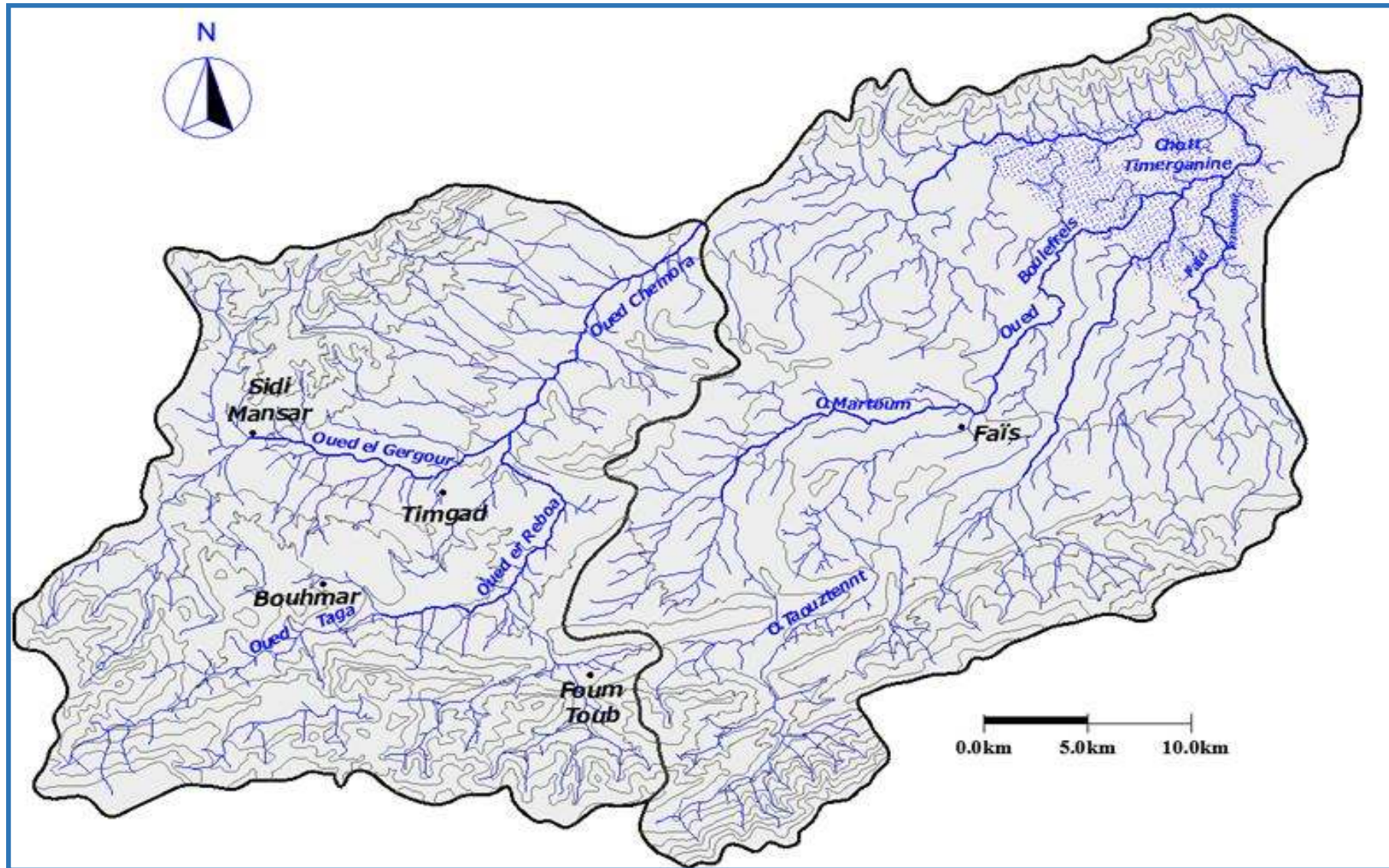


Figure N° 20 : Les sous bassins d'Oued Chemorah et d'Oued Boulfreis

2.1. Aire et périmètre

L'aire est la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre ou à l'aide de logiciels de cartographie, et elle est généralement exprimée en km².

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km, de la ligne de contour du bassin; sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre ou à l'aide de logiciels de cartographie. Pour certaines applications, on trace le périmètre stylisé du bassin en lissant son contour.

Aire « A » (Km²):

L'aire du sous bassin versant l'Oued Chemorah est d'ordre de **766 Km²**.

L'aire du sous bassin versant l'Oued Boulefreis est d'ordre de **960 Km²**.

Périmètre « P » (Km):

Le périmètre du sous bassin l'Oued Chemorah est de **140 km**.

Le périmètre du sous bassin l'Oued Boulefreis est de **155 km**.

2.2. Indice de compacité « Kc »: (Coefficient de Gravelius)

L'indice de compacité est le rapport du périmètre " P" au périmètre d'un cercle ayant la même surface, il donne des informations importantes sur la concentration de l'écoulement à l'exutoire et sur la forme du bassin.

Si:

Kc < 1 => bassin versant de forme circulaire ;

Kc = 1,12 => bassin versant a une forme d'un carré ;

Kc > 1,12 => bassin versant allongé.

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où : A : Superficie de B.V en Km²

P : Périmètre de B.V en Km

- Sous bassin d'Oued Chemorah : **Kc=1.42** => Kc>1.12 donc le bassin est de forme allongée
- Sous bassin d'Oued Boulefreis : **Kc=1.40** => Kc>1.12 donc le bassin est de forme allongée

2.3. Le rectangle équivalent

C'est un rectangle de même superficie « A », même périmètre « P », même indice de compacité « Kc » et même hypsométrie que le bassin versant étudié.

La longueur et la largeur du rectangle équivalent sont calculées par les formules suivantes :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$$

Où : **L** : Longueur du rectangle équivalent en Km

Kc : Indice de compacité

A : Superficie du B.V en Km²

La largeur de rectangle équivalent est donnée par la relation suivante : **l=A/L**

Où **A** : Surface du rectangle équivalent ainsi que du B.V (Km²)

L : Longueur du rectangle équivalent en Km

l : Largeur du rectangle équivalent en Km

Application numérique :

- Le sous bassin d'Oued Chemorah :
A= 766 Km², Kc= 1.42 ⇒ **L=48.35 Km** ⇒ **l= 15.84 Km**.
- Le sous bassin d'Oued Boulefreis:
A= 960 Km², Kc= 1.40 ⇒ **L= 52.67Km** ⇒ **l=18.23 Km**.

2.4. Caractéristiques topographiques

2.4.1. Le relief

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. Elle est tracée sur les figures 20 et 21, en reportant en ordonnée l'altitude *Y*, et, en abscisse le pourcentage de la surface du bassin dont l'altitude est supérieure ou égale à *Y*, rapportée à la surface totale du bassin. La répartition hypsométrique est donnée par le pourcentage de la surface comprise entre les différentes courbes de niveau à la surface totale (tab. 3 et 4).

Les allures des deux courbes (fig 21,22) montrent que le relief dans le bassin de Boulefreis est sénile comparé à celui de Chemora.

Tableau N° 03 : Répartition des surfaces du B.V d'Oued Chemorah par tranches d'altitudes

Sous bassin d'Oued Chemorah				
Classe d'altitude (m)	Surface partielle (km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée	Surface cumulée (%)
2250-2000	5,8	0,60	5,8	0,60
2000-1900	4,4	0,46	10,2	1,06
1900-1800	4,6	0,48	14,8	1,54
1800-1700	5,2	0,54	20	2,08
1700-1600	9,8	1,02	29,8	3,10
1600-1500	21,8	2,27	51,6	5,38
1500-1400	33,3	3,47	84,9	8,84
1400-1300	39,3	4,09	124,2	12,94
1300-1200	41,4	4,31	165,6	17,25
1200-1100	73,5	7,66	239,1	24,91
1100-1000	130,7	13,61	369,8	38,52
1000-900	216,2	22,52	586	61,04
800-900	374	38,96	960	100,00
total	960	100,00		

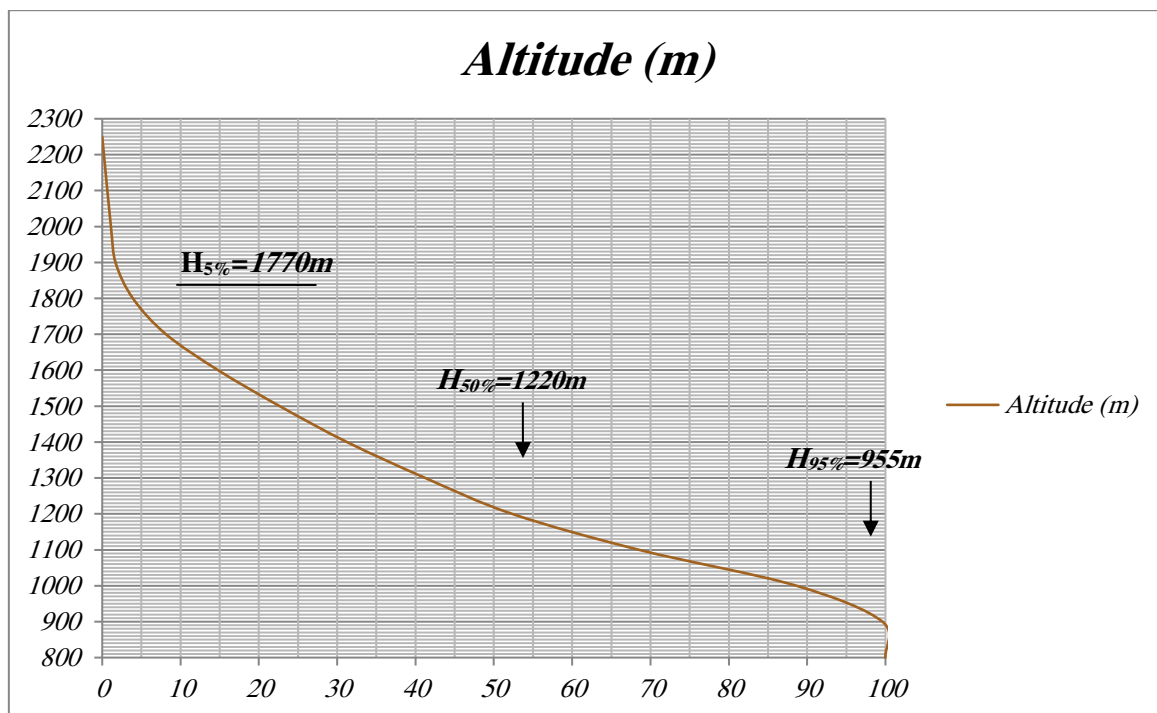


Figure N° 21 : Courbe hypsométrique du sous bassin d'Oued Chemorah

Tableau N° 04 : Répartition des surfaces du B.V d'Oued Boulefreis par tranches d'altitudes

Sous bassin d'Oued Boulefreis				
Classe d'altitude (m)	Surface partielle (km ²)	Surface partielle(%)	Surface cumulée	Surface cumulée(%)
2250-2000	8,5	1,11	8,5	1,11
2000-1900	4,5	0,59	13	1,70
1900-1800	17	2,22	30	3,92
1800-1700	32,4	4,23	62,4	8,15
1700-1600	51	6,66	113,4	14,80
1600-1500	60,2	7,86	173,6	22,66
1500-1400	65,8	8,59	239,4	31,25
1400-1300	76,6	10,00	316	41,25
1300-1200	85	11,10	401	52,35
1200-1100	124	16,19	525	68,54
1100-1000	154	20,10	679	88,64
1000-900	84	10,97	763	99,61
800-900	3	0,39	766	100,00
total	766	100,00		

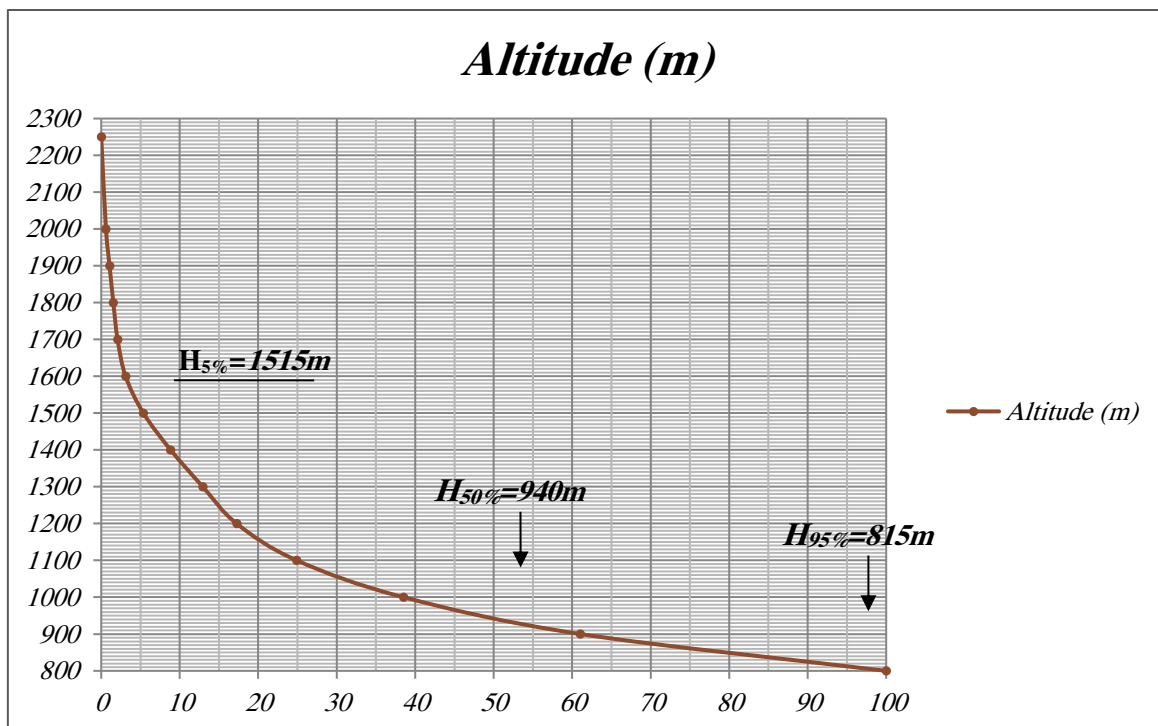


Figure N° 22 : Courbe hypsométrique du sous bassin d'Oued Boulefreis

2.4.2. Altitudes caractéristiques

- L'altitude moyenne

Étant utile dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques, l'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique.

- L'altitude médiane (de fréquence)

C'est l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin versant, sur la courbe hypsométrique.

- L'altitude des extrêmes

Les principales altitudes extrêmes sont les suivantes :

- L'altitude minimale ;
- L'altitude maximale ;
- La hauteur à 5 % de la surface totale ;
- La hauteur à 95 % de la surface totale.

Tableau N° 05 : Altitudes caractéristiques

Altitudes Caractéristiques	Symboles	Valeurs	
		Oued Chemorah	Oued Boulfreis
Altitude maximale (m)	H_{\max}	2250	2320
Altitude minimale (m)	H_{\min}	800	800
Altitude moyenne (m)	H_{moy}	1525	1560
Altitude de fréquence (m)	$H_{1/2} (H_{50\%})$	1220	940
Altitude du 5% de la surface (m)	$H_{5\%}$	1770	1515
Altitude du 95% de la surface (m)	$H_{95\%}$	955	815
Dénivelée simple (m)	D	815	700

2.4.3. Dénivelée simple « D »

On prend la distance verticale en (m) sur la courbe hypsométrique, qui sépare les altitudes ayant 5% et 95% de la surface totale du B.V.

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \text{ d'où ; } D : \text{dénivelée simple ;}$$

Application numérique :

- Le sous bassin d'Oued Chemorah : $D = 1770 - 955 = 815$ **D = 815m.**
- Le sous bassin d'Oued Boulefreis : $D = 1515 - 815 = 700$ **D = 700m.**

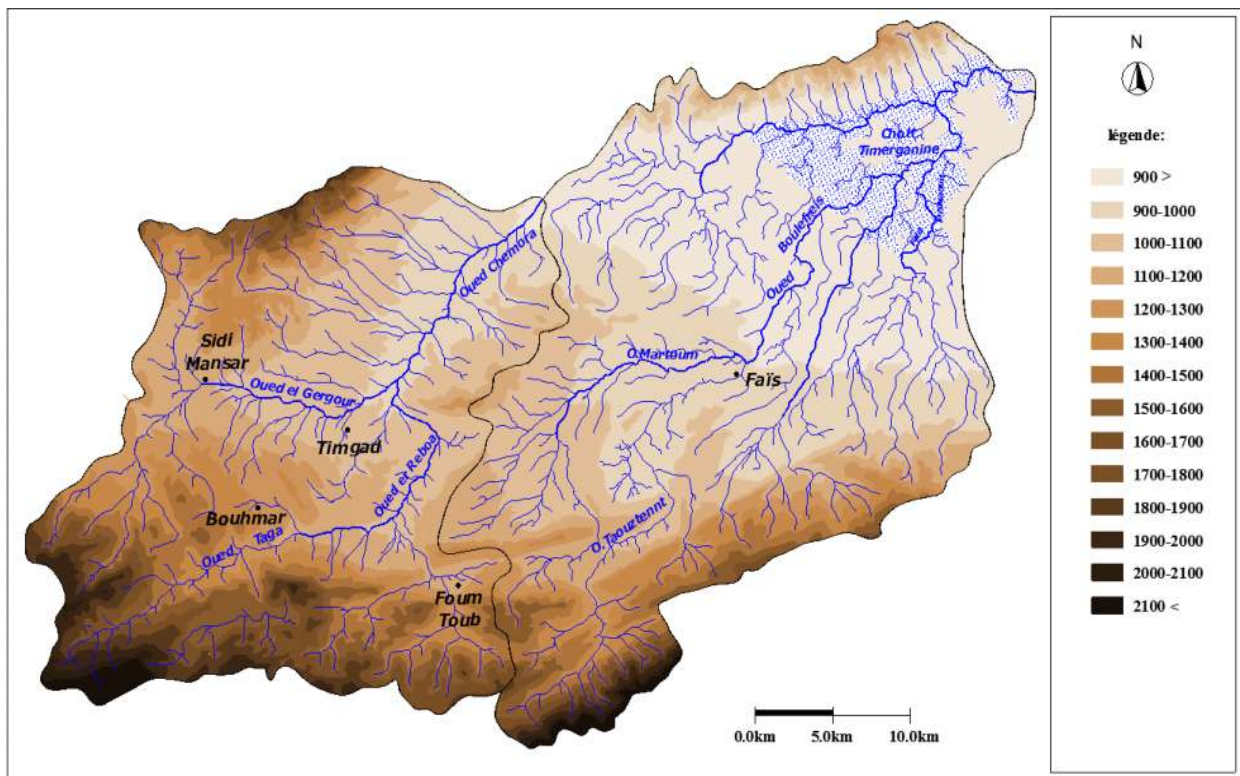


Figure N° 23 : Répartition des surfaces des sous bassins en fonction de l'altitude

2.4.4. Les Indices de pentes

a) Indice de pente globale (I_g) :

L'indice de pente globale est déterminé, à partir de la courbe hypsométrique en éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90 % de l'aire du sous bassin. Cet indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = D/L$$

Avec :

D : Dénivelée simple en m ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) ;

L : Longueur du rectangle équivalent (km) ;

I_g : Indice de pente globale ;

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah : $I_g = 815 / 48.35 = 16.86 \Rightarrow I_g = 16.86 \text{ m/km}$
- Sous bassin d'Oued Boulefreis : $I_g = 700 / 52.67 = 13.29 \Rightarrow I_g = 13.29 \text{ m/km}$

Selon les valeurs de I_g , on classe le relief selon la classification de L'ORSTOM) :

- Si $I_g > 35$ m/km relief assez fort
- Si $20 < I_g < 35$ m/km relief fort
- Si $I_g < 20$ m/km relief modéré

Pour les deux sous bassins $I_g < 20$ donc le relief est modéré

b) **Indice de pente moyenne (I_m):**

La pente moyenne est une caractéristique importante du bassin, elle donne une bonne indication sur le temps de ruissellement des eaux.

Par définition I_m est exprimé par le rapport :

$$I_m = (H_{\max} - H_{\min}) / L$$

Avec:

H_{\max} : l'altitude maximale du bassin versant (m) ;

H_{\min} : l'altitude minimale du bassin versant (m) ;

L : longueur du rectangle équivalent (km).

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah : $I_m = (2250 - 800) / 48.35 = 30 \Rightarrow I_m = 30$ m/km
- Sous bassin d'Oued Boulefreis : $I_m = (2320 - 800) / 52.67 = 28.85 \Rightarrow I_m = 28.85$ m/km

c) **Indice de pente de roche (I_p) :**

L'indice de pente de roche est calculé par l'une des deux formules suivantes :

$$I_p = \sqrt{\frac{I_g}{0.8}} \quad \text{ou} \quad I_p = \sqrt{\frac{a_i \cdot b_i}{L}}$$

Avec :

I_g : Indice de pente globale ;

I_p : Indice de pente de Roche ;

L : Longueur du rectangle équivalent ;

a_i : Surface partielle entre deux courbes de niveau par rapport au total $\sum a_i$;

b_i : L'équidistance entre deux courbes de niveau.

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah : $I_p = \sqrt{\frac{16.86}{0.8}} \Rightarrow I_p = 4.59 \text{ m/km}$
- Sous bassin d'Oued Boulefreis : $I_p = \sqrt{\frac{13.29}{0.8}} \Rightarrow I_p = 4.07 \text{ m/km}$

d) Dénivelée spécifique(Ds) :

L'indice I_g décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction du paramètre dénivelée spécifique (Ds). Elle est définie comme étant le produit de l'indice de pente globale par la racine carrée de la surface du bassin versant, cet indice indique l'état du relief.

$$D_s = I_g \sqrt{A} \quad \text{où} \quad D_s = \frac{D}{L} \sqrt{A}$$

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah : $D_s = 16.86 \sqrt{766} \Rightarrow D_s = 466.63 \text{ m}$
- Sous bassin d'Oued Boulefreis : $D_s = 13.29 \sqrt{960} \Rightarrow D_s = 411.78 \text{ m}$

Tableau N° 06 : Classification de l'O.R.S.T.O.M.

Classe	Désignation	Ds
R1	Relief très faible	$D_s < 10\text{m}$
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25\text{m}$
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50\text{m}$
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100\text{m}$
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250\text{m}$
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500\text{m}$
R7	Relief très fort	$D_s > 500\text{m}$

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M : $250 < D_s < 500\text{m}$ le sous bassin versant appartient à R6 c'est -à- dire **un relief fort**.

2.5. Les caractéristiques du réseau hydrographique

2.5.1. Densité de drainage (D_d)

La densité de drainage peut donner un aperçu sur la lithologie du bassin versant et permet de comparer l'écoulement superficiel au niveau de plusieurs bassins.

Elle est définie comme le rapport entre la longueur totale de tous les cours d'eau et la superficie du bassin versant.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} (\text{km/km}^2) \quad (L_i = \text{Longueur des talwegs, en km}).$$

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah : $D_d = \frac{750}{766} = 0.98 \Rightarrow D_d = \mathbf{0.98 \text{ km/km}^2}$
- Sous bassin d'Oued Boulefreis : $D_d = \frac{770}{960} = 0.80 \Rightarrow D_d = \mathbf{0.80 \text{ km/km}^2}$

2.5.2. Temps de concentration (T_c)

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe sur le point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire.

Le temps de concentration est composé de :

- **Temps d'humectation T_h** : temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.
- **Temps de ruissellement et d'écoulement T_r** : temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'au système de collecte d'eau naturel.
- **Temps d'acheminement T_a** : temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Théoriquement, on considère que le temps de concentration est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement, elle peut être déduite de mesures de terrain ou estimée à l'aide des formules comme :

Formule de TURAZZA :

$$T_c = (0.108 \sqrt{AL_p}) I_m$$

Avec

A : superficie du bassin (km²) ;

L_p : longueur du thalweg principal (km) ;

I_m : indice de pente moyenne du thalweg principal en km

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah (A= 766 km², L_p = 69 km) : **T_c = 9.87 heures**
- Sous bassin d'Oued Boulefreis (A= 960 km², L_p = 76.25 km) : **T_c = 9.28 heures**

Formule de GIANDOTTI

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec

A : superficie du bassin (km²) ;

L_p : longueur du thalweg principal (km);

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah (A= 766 km², L_p = 69 km) : **T_c = 9.93 heures**
- Sous bassin d'Oued Boulefreis (A= 960 km², L_p = 76.25 km) : **T_c = 11 heures**

2.5.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (V_c)

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_c = \frac{L_p}{T_c}$$

Avec :

V_c : Vitesse d'écoulement de l'eau en m/s ;

L_p : Longueur du talweg principal (m) ;

T_c : Temps de concentration (heures).

Application numérique :

- Sous bassin d'Oued Chemorah ($T_c = 9.87$ h, $L_p = 69$ km) : $V_c = 1.94$ m/s
- Sous bassin d'Oued Boulefreis ($T_c = 9.28$ h, $L_p = 76.25$ km) : $V_c = 2.28$ m/s

Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres morphométriques des deux sous bassins versant (Oued Chemorah et Oued Boulefreis)

Tableau N° 07 : Récapitulatif Des Paramètres Morphométriques

<i>Caractéristiques</i>	<i>unité</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeurs</i>	
			<i>Oued Chemorah</i>	<i>Oued Boulefreis</i>
<i>Superficie du sous bassin</i>	<i>km²</i>	<i>A</i>	766	960
<i>Périmètre</i>	<i>km</i>	<i>P</i>	140	155
<i>Indice de compacité</i>		<i>K_c</i>	1.42	1.40
<i>Longueur du RE</i>	<i>km</i>	<i>L</i>	48.35	52.67
<i>Largeur du RE</i>	<i>km</i>	<i>l</i>	15.84	18.23
<i>Altitude maximale</i>	<i>m</i>	<i>H_{max}</i>	2250	2320
<i>Altitude minimale</i>	<i>m</i>	<i>H_{min}</i>	800	800
<i>Altitude de fréquence</i>	<i>m</i>	<i>H_{1/2}</i>	1220	940
<i>Altitude moyenne</i>	<i>m</i>	<i>H_{moy}</i>	1525	1560
<i>Dénivelée simple</i>	<i>m</i>	<i>D</i>	815	700
<i>Indice de pente de globale</i>	<i>m/km</i>	<i>I_g</i>	16.86	13.29
<i>Indice de pente moyenne</i>	<i>m/km</i>	<i>I_m</i>	30	28.85
<i>Indice de pente de roche</i>	<i>m/km</i>	<i>I_p</i>	4.60	7.08
<i>Dénivelée spécifique</i>	<i>m</i>	<i>D_s</i>	467	412
<i>Densité de drainage</i>	<i>km/km²</i>	<i>D_d</i>	0.98	0.80
<i>Temps de concentration</i>	<i>heures</i>	<i>T_C</i>	9.87	9.28
<i>Vitesse d'écoulement d'eau</i>	<i>m/s</i>	<i>V_C</i>	1.94	2.28

3. Caractéristiques hydroclimatiques

3.1. Introduction

D'une année à l'autre, les archives climatologiques ne cessent de croître. C'est en faisant appel à un ensemble de méthodes statistiques qu'on parvient à extraire toutes les informations nécessaires que contiennent les bases de données, et ce à l'aide d'un nombre relativement faible de valeurs. Par un choix judicieux et une application soignée de processus statistiques, (OMM, 2011).

L'étude climatique nous permet de définir le bilan hydrique en se basant sur les données de précipitations, températures, et l'étude de l'évaporation et du ruissellement, afin de donner un aperçu sur leurs répartitions dans le temps et dans l'espace.

3.2. Réseau d'observation

Plusieurs stations pluviométriques constituent le réseau qui contrôle le bassin de Timgad. On a choisi cinq stations bien réparties dans tout le bassin afin d'assurer la meilleure couverture possible. On a pris en considération les séries de données les plus complètes disponibles. Les lacunes dans les données ont été traitées par comblement.

Tableau N° 08 : Situations Géographiques Des Stations pluviométriques

station	Code station	Coordonnées Lambert		Altitude (m)	Appareil de mesure utilisé	Date de mise en service
		X (km)	Y (km)			
Timgad	070409	841,75	250,9	1000	Pluviomètre	1970
Touffana	070605	856,1	249,75	1040	Pluviomètre	1970
Ali ben Tenoun	070304	827,4	254,9	1180	Pluviomètre	1970
Baiou	070407	829,65	242,65	1510	Pluviomètre	1970
Chelia	070606	858,85	237,1	1260	Pluviomètre	1970
Références des stations pluviométriques/Bassin de Timgad (Source ANRH)						

3.3. Analyse des paramètres climatiques

3.3.1. Pluviométrie

3.3.1.1. Carte des précipitations moyennes annuelles

L'extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du nord (Fig.24) de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) pour la période 1965-95, montre une répartition

géographique des précipitations caractérisée par une décroissance orientée essentiellement du sud vers le nord-est.

Sur la base de cette carte et des précipitations moyennes annuelles enregistrées par les différentes stations réparties sur les deux sous-bassins (Chemora et Boulefreis), une carte pluviométrique plus détaillée a pu être établie.

Le bassin de Timgad de par sa position géographique est soumis essentiellement à l'influence de deux régimes climatiques :

- **Le versant méridional** humide, il représente 1/4 de la superficie totale des deux sous bassins versants qui compose le bassin de Timgad (Fig.25) et comprend la terminaison septentrionale du massif des Aurès. Il est soumis à un climat de type méditerranéen et reçoit en moyenne une lame d'eau estimée entre 400-500 mm/an.
- **Le versant septentrional**, occupe les 3/4 restants de la superficie du bassin, et comprend essentiellement les plaines de Timgad et de Touffana. Il est soumis à un climat semi aride et reçoit en moyenne 250-350 mm/an.

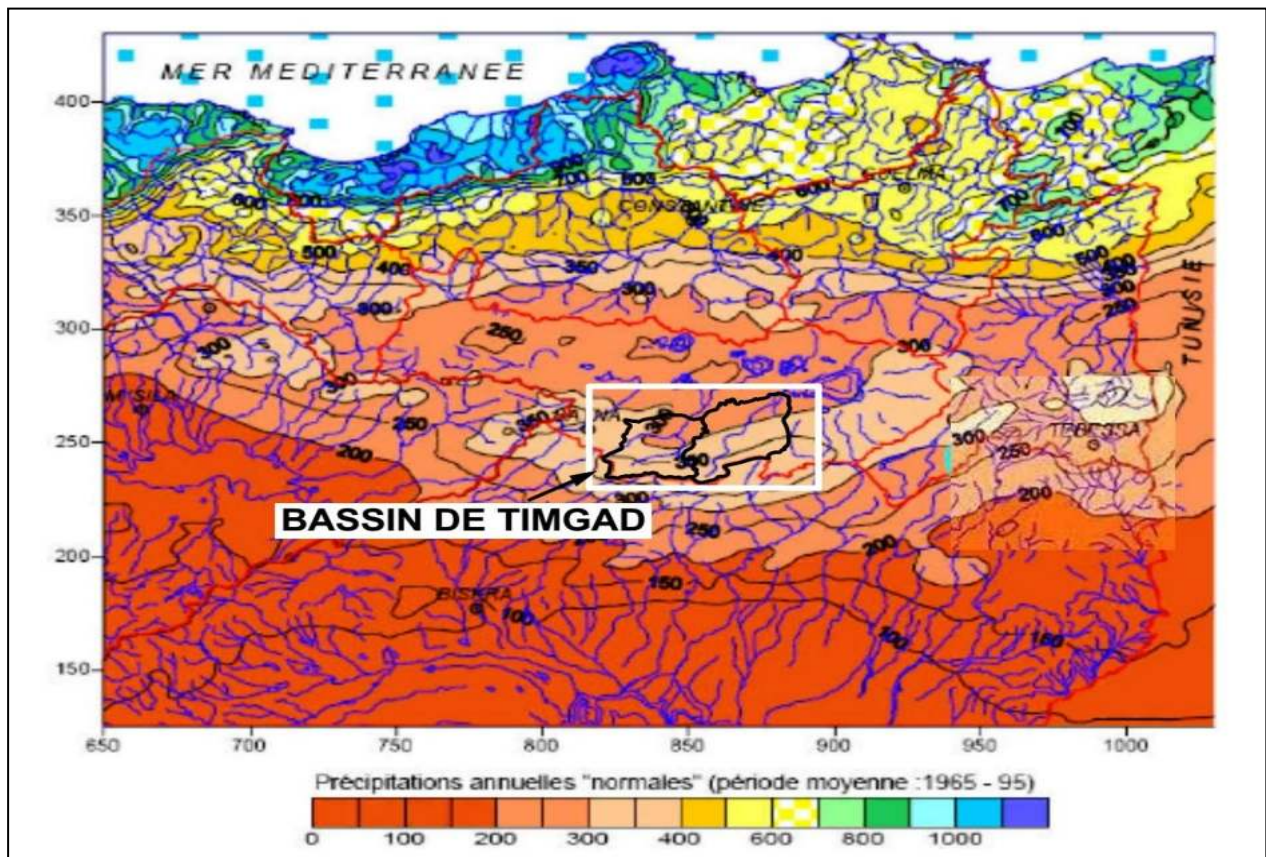


Figure N° 24: Extrait de la carte pluviométrique du nord-Est de l'Algérie. (ANRH-GTZ, 1965-95)

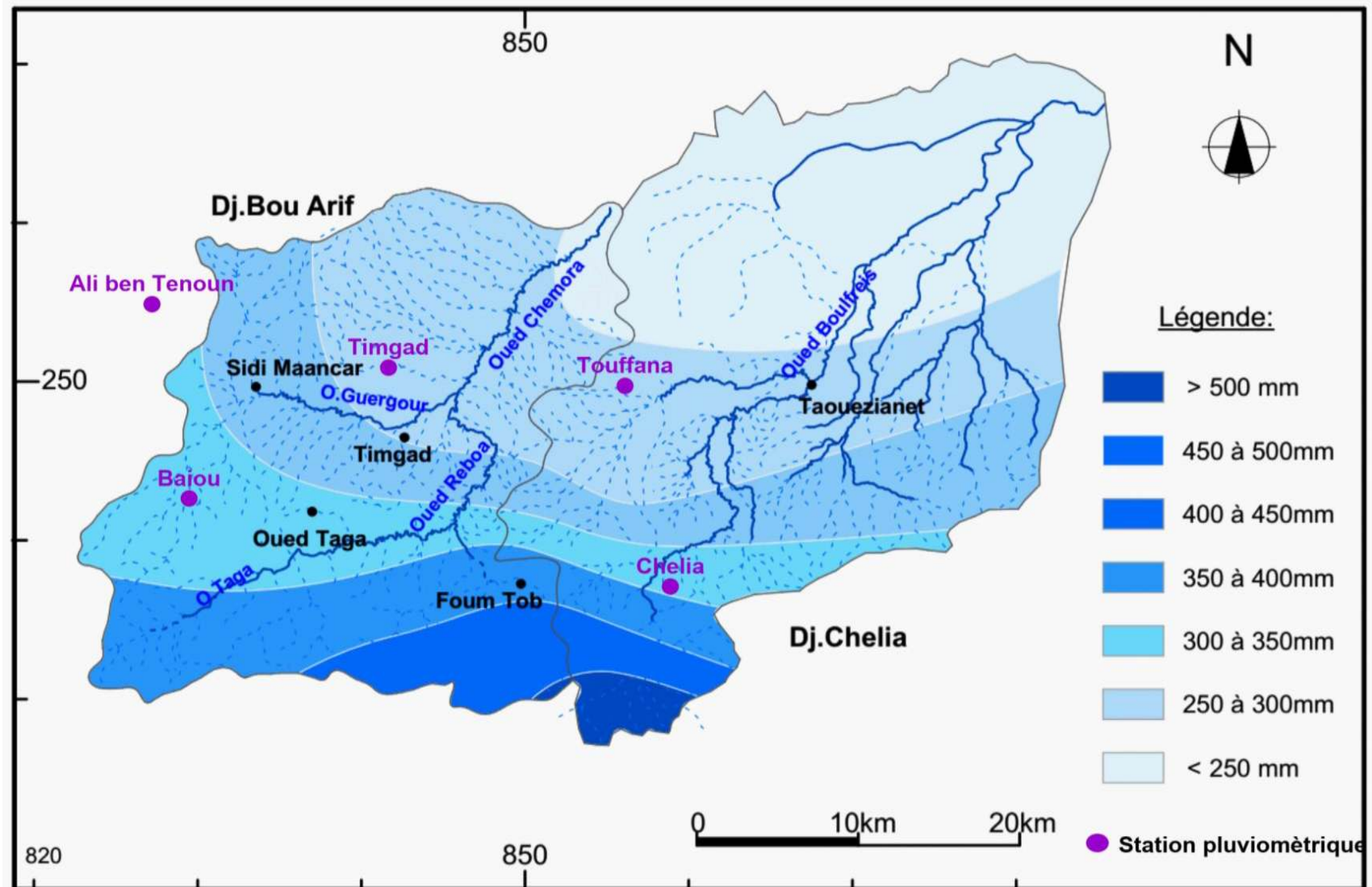


Figure N° 25: Carte pluviométrique des sous bassin d'Oued Chemorah et d'Oued Boulfreis

3.3.1.2. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

Les séries pluviométriques annuelles ont été analysées à l'aide du logiciel KhronoStat (IRD, 1998) en vue de détecter une éventuelle rupture, c'est un logiciel regroupe différents tests statistiques (test de MANN WHITNEY modifié par A.N. PETTITT (1979), statistique U de T.A. BUIHAND (1982, 1984), procédure de A.F.S. LEE et S.A. HEGHINIAN (1977), ellipse de contrôle de P. BOIS (1971, 1986) et méthode de segmentation de HUBERT). Ces tests sont spécifiques d'un changement de comportement de la variable dans la série temporelle.

Les résultats des tests (Lee & Heghinian et Hubert) sont synthétisés dans le tableau N° 09 et la figure N° 26 présente les ellipses de BOIS. L'examen de ces résultats permet de constater que toutes les séries analysées présentent des ruptures dans deux périodes essentielles (1982/1983 et 2001/2002).

Tableau N° 09 : Synthèse des résultats des tests d'homogénéité sur les pluies annuelles (1982-2012)

Série pluviométrique (1982/2012)	Ruptures selon LEE et HEGHINIAN	HUBERT	
		moyenne	Ecart type
TIMGAD	2001	277.329	101.934
TOUFANA (1982-2002)	2002	236.252	90.59
TOUFANA (2003-2012)		330.09	69.522
A.B.TENOUN	1983	344.532	116.892
BAIOU	1982	368.439	101.702
CHELIA	1982	505.958	134.441

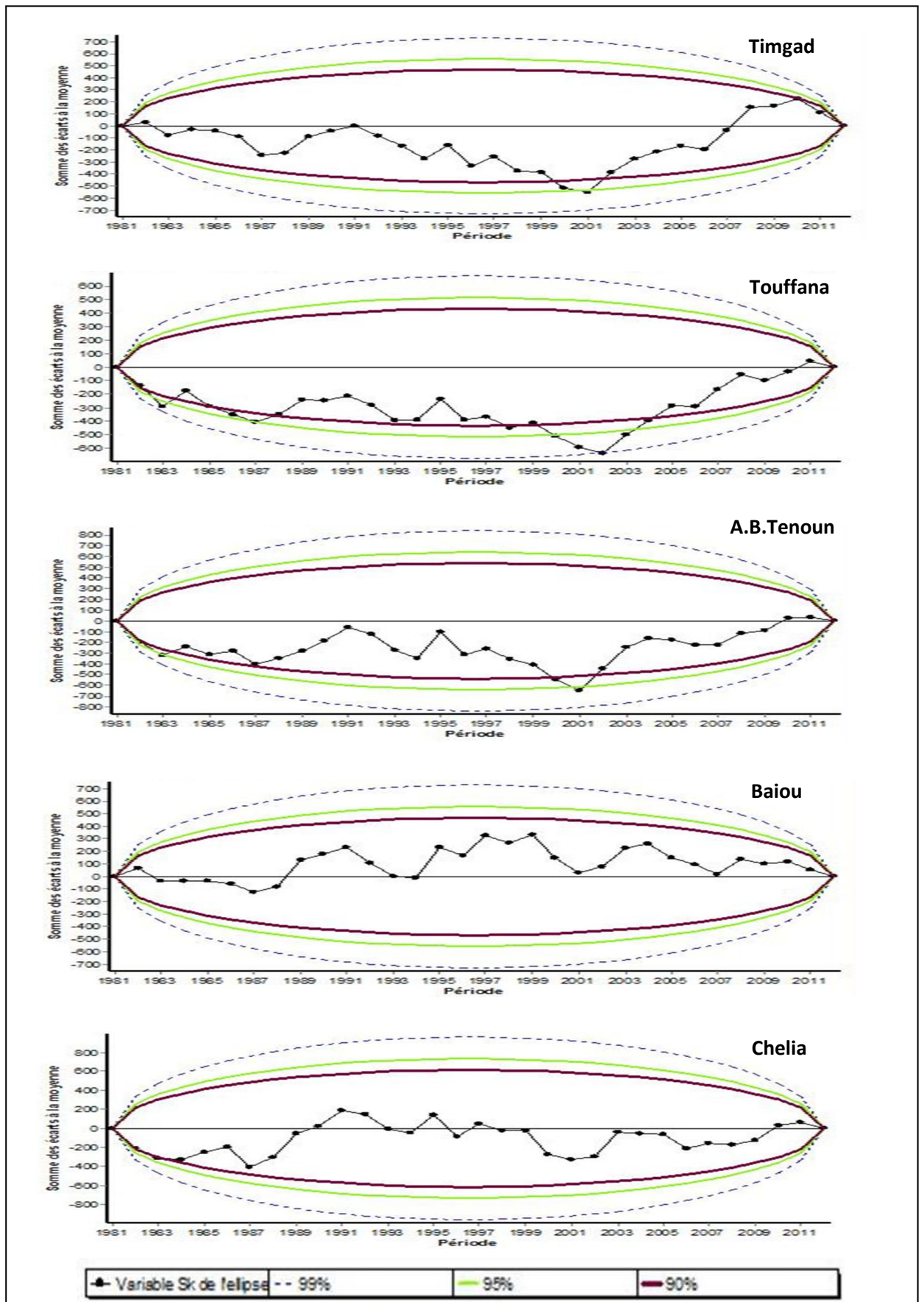


Figure N° 26 : Ellipses de BOIS sur les pluies annuelles (1982-2012)

3.3.1.3. Variation interannuelle de la pluviométrie

Les courbes de la variation interannuelle des précipitations des différentes stations du bassin de Timgad (Fig. 27) sur une période commune (1982-2012) montrent presque la même évolution, avec un régime pluviométrique caractérisé par une irrégularité interannuelle.

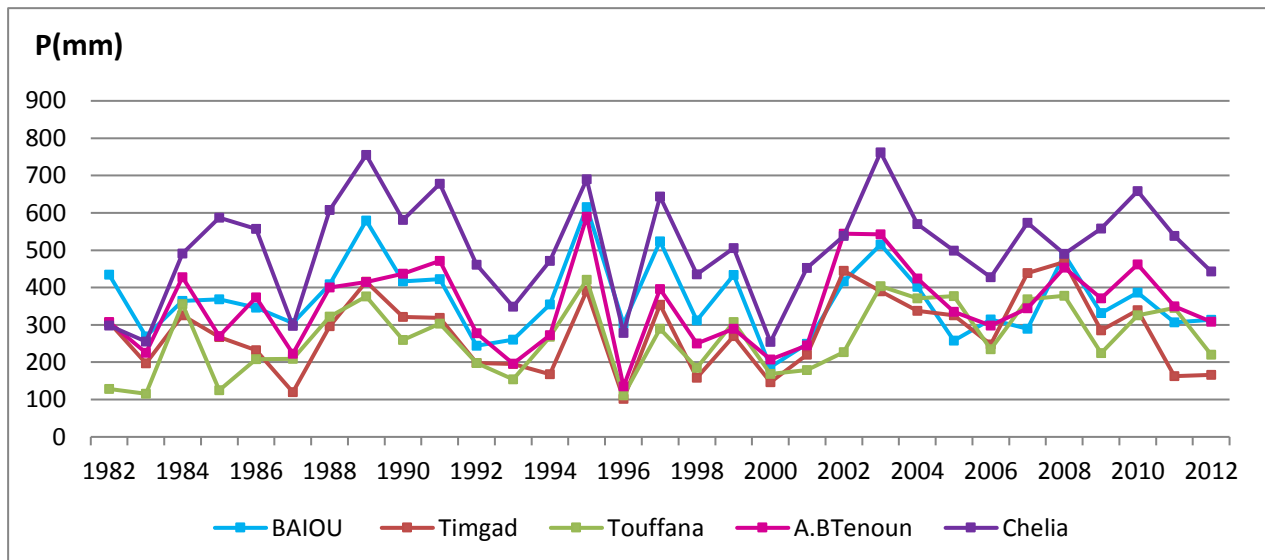


Figure N° 27 : Variation interannuelle des précipitations

Stations : Timgad, Touffana, A.B Tenoun, Baiou et Chelia (1982-2012)

L'irrégularité interannuelle du régime pluviométrique est exprimée par le rapport : P/P_{moy}

Où

P : pluie moyenne annuelle en mm ;

P_{moy} : pluie moyenne interannuelle en mm

Si

$P/P_{moy} < 1$ _____ année sèche;

$P/P_{moy} > 1$ _____ année humide.

Le classement des années humides et sèches et la valeur caractérisant la période sont reportées dans le tableau N°10.

Pour la majorité des stations, les années déficitaires par rapport à la moyenne sont supérieures à celles excédentaires; l'écart n'étant cependant pas important.

Pour la station de Chelia, on observe un équilibre entre les années excédentaires et celles déficitaires, qui s'explique par sa localisation en altitude dans les zones montagneuses qui alimentent le bassin de Timgad.

Tableau N° 10 : Années sèches et années humides

	BAIOU	Timgad	Touffana	A.B Tenoun	Chelia
Pmoy (mm)	368,44	277,73	263,18	349,80	506,67
Pmin (mm)	187,10	102,10	111,30	134,90	254,30
Pmax (mm)	615,10	468,30	420,90	590,00	762,10
écart type	101,70	101,37	93,87	111,11	139,44
CV	27,60	36,50	35,67	31,76	27,52
année sèche	17	16	16	17	15
année humide	13	14	14	13	15

3.3.1.4. Variations mensuelles des précipitations

La variation mensuelle de la précipitation pour la période de 1982 à 2012 est représentée dans le tableau suivant :

Tableau N° 11 : Précipitations moyennes Mensuelles & saisonnières

Station	P (mm)	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
TIMGAD	277,73	31,20	22,45	22,67	25,23	26,61	18,87	27,85	29,70	36,79	11,57	8,80	15,98
		Automne			Hiver			Printemps			Eté		
		76,33			70,71			94,34			36,35		
TOUFANA	263,18	30,77	24,48	21,84	22,84	27,45	18,54	27,11	25,02	33,59	13,95	5,41	12,19
		Automne			Hiver			Printemps			Eté		
		77,09			68,82			85,72			31,55		
ALI BEN TENOUN	349,80	41,79	27,99	29,56	45,15	35,83	25,58	36,20	32,67	33,54	19,63	7,58	14,27
		Automne			Hiver			Printemps			Eté		
		99,35			106,56			102,40			41,48		
BAIOU	366,17	34,95	30,71	37,47	36,61	30,36	22,78	39,69	41,54	36,77	22,87	9,13	23,27
		Automne			Hiver			Printemps			Eté		
		103,14			89,76			118,01			55,27		
CHELIA	506,67	47,92	41,93	49,73	49,33	51,84	33,44	59,39	42,85	52,79	26,84	16,48	34,13
		Automne			Hiver			Printemps			Eté		
		139,58			134,61			155,03			77,45		

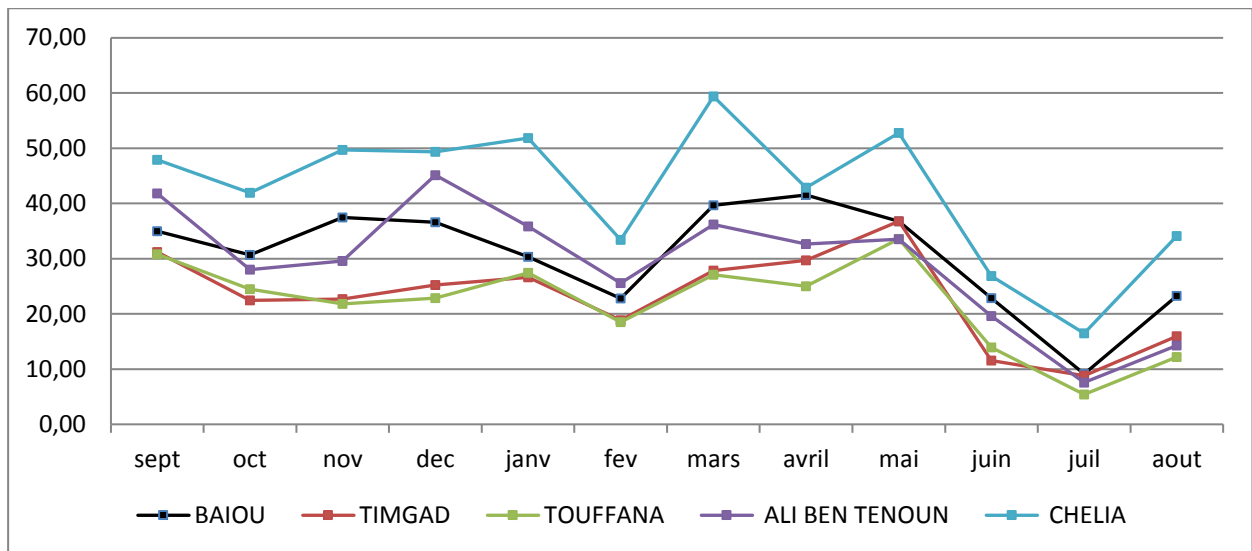


Figure N° 28 : Variation moyennes mensuelles des précipitations
Stations : Baiou, Timgad, Touffana, A.B Tenoun et Chelia (1982-2012)

D'après le graphe de la variation saisonnière des précipitations (Fig. 29), les cinq (05) stations montrent le même régime pluviométrique, où les saisons les plus arrosées, sont le printemps (mars, avril et mai) et l'automne-hiver (de septembre à février).

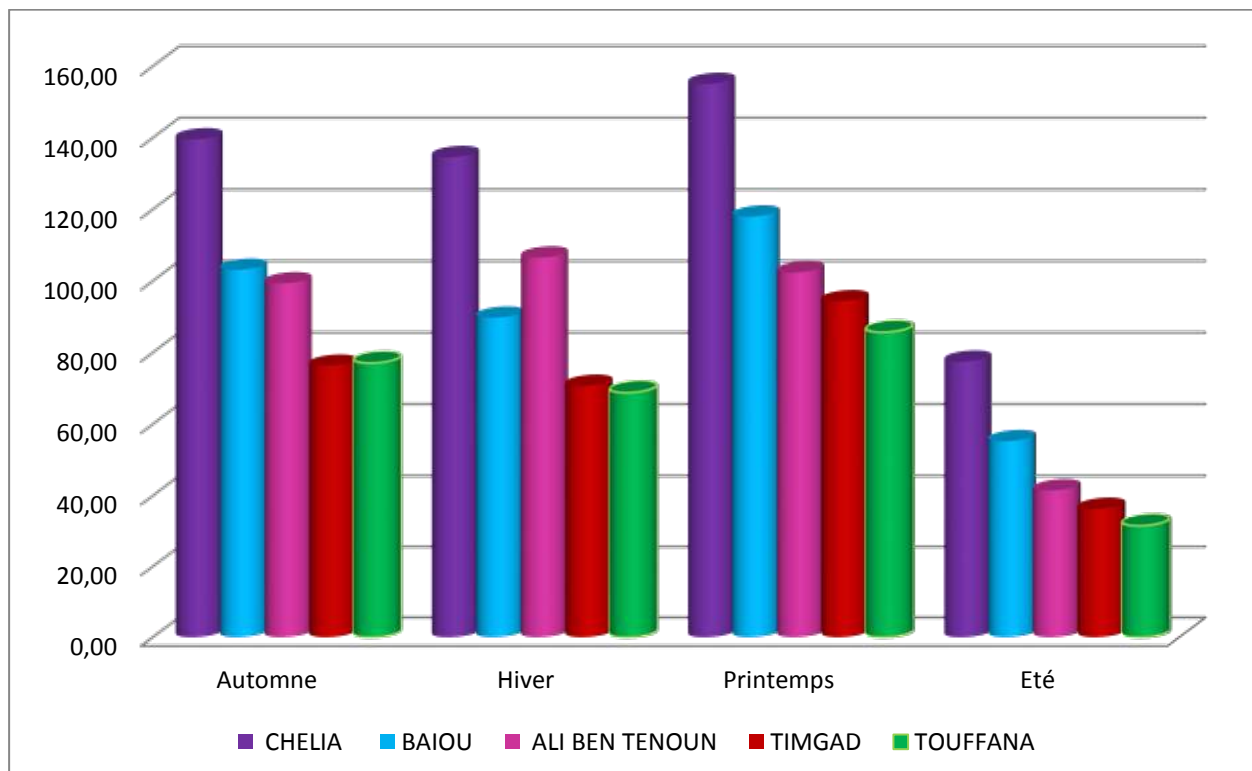


Figure N° 29 : Variation saisonnière des précipitations
Stations : Timgad, Touffana, A.B Tenoun, Baiou et Chelia (1982-2012)

3.3.2. Température

Ce paramètre joue un rôle essentiel dans l'évaluation du déficit d'écoulement qui intervient dans l'estimation du bilan hydrologique. Le tableau N° 12 résume les données de la température qui sont basées sur 30 ans de simulations au niveau des cinq stations par le service météorologique meteoblue qui est créé à l'université de Bale, en suisse, en coopération avec les états unis (Administration nationale océanique et atmosphérique).

L'observation de la figure 30 montre que les mois les plus froids sont janvier et février alors que les mois les plus chauds sont juillet et Août.

Les cinq courbes représentatives des températures (min, moy, max) montrent pratiquement la même allure avec chacune un axe de symétrie (mois de Juillet), ceci nous laisse supposer la présence de deux périodes bien distinctes :

- Une phase allant du mois de Janvier à Juillet marquée par une nette progression des températures (min, moy, max).
- Une seconde période qui débute au mois de Juillet où les températures baissent pour atteindre leur minimum en Décembre.

Tableau N° 12 : Variation de la moyenne mensuelle des températures

Stations : Baiou, Timgad, Touffana, A.B Tenoun et Chelia (Meteoblue : 1987/2017)

Stations	Mois	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec	Moy annuelle
Timgad	T _{max} (°C)	11	13	16	20	25	30	34	33	28	23	17	12	22
	T _{moy} (°C)	7,5	8,5	11,5	14,5	19,5	24,5	28	27,5	23	19	13	8,5	17
	T _{min} (°C)	4	4	7	9	14	19	22	22	18	15	9	5	12
Touffana	T _{max} (°C)	12	14	17	21	26	32	35	35	29	24	18	13	23
	T _{moy} (°C)	7,5	8,5	11	14,5	19	24,5	27,5	27,5	23	18,5	12,5	8,5	17
	T _{min} (°C)	3	3	5	8	12	17	20	20	17	13	7	4	11
Ali Ben Tenoun	T _{max} (°C)	11	12	16	19	24	30	34	33	28	23	16	12	22
	T _{moy} (°C)	6,5	7	10	12,5	17,5	22,5	26	26	21,5	17,5	11	7,5	15
	T _{min} (°C)	2	2	4	6	11	15	18	19	15	12	6	3	9
Baiou	T _{max} (°C)	8	10	13	17	22	27	31	30	25	20	13	9	19
	T _{moy} (°C)	4,5	5,5	8,5	11,5	16,5	21,5	25	24,5	20	16	9,5	5,5	14
	T _{min} (°C)	1	1	4	6	11	16	19	19	15	12	6	2	9
Chelia	T _{max} (°C)	6	7	10	14	19	25	28	27	22	17	11	6	16
	T _{moy} (°C)	2	2,5	5,5	8,5	13,5	19	22	21,5	17,5	13	7	2,5	11
	T _{min} (°C)	-2	-2	1	3	8	13	16	16	13	9	3	-1	6

Références : données de températures /Bassin de Timgad Source : service météorologique « Meteoblue »

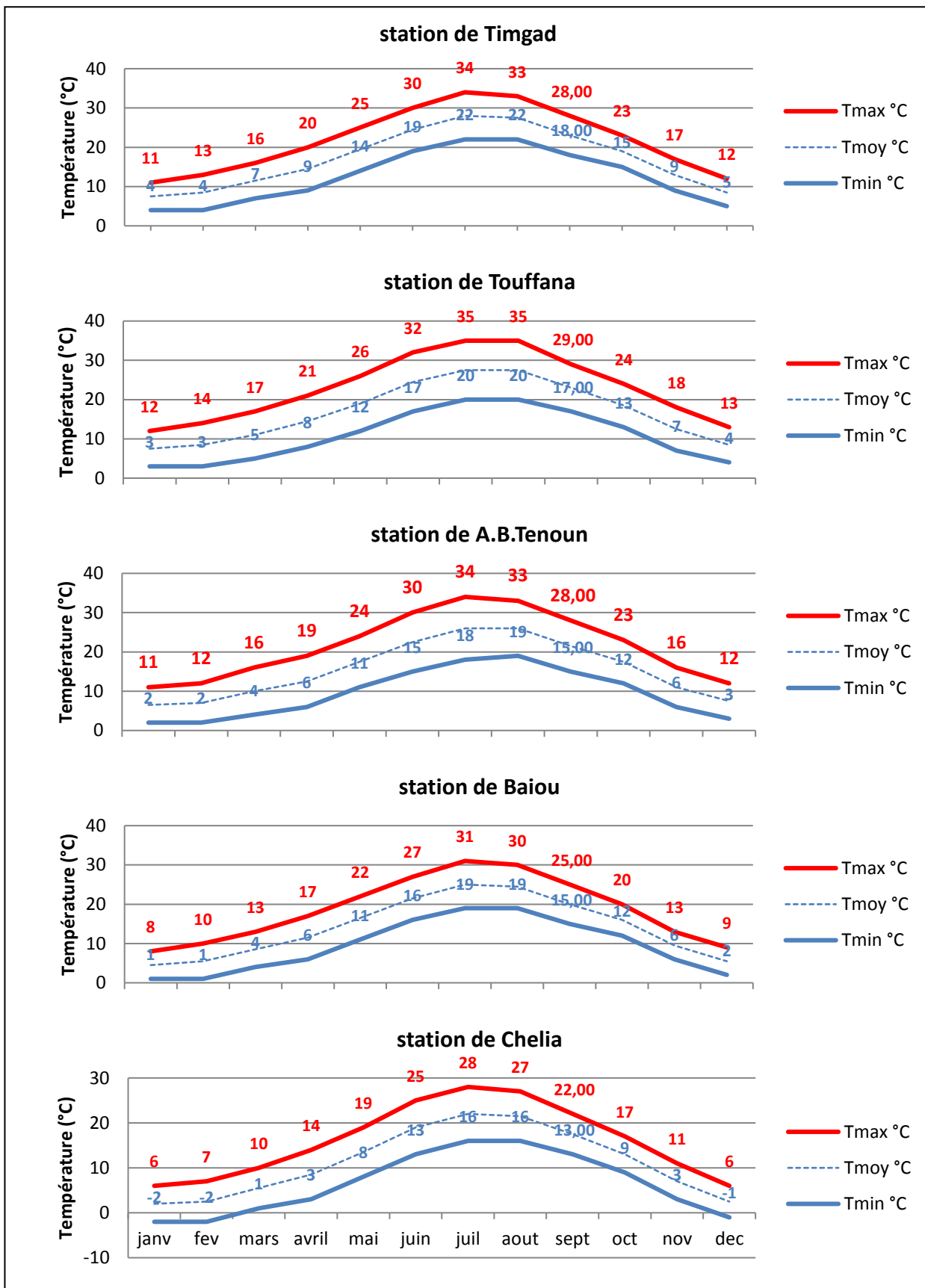


Figure N° 30 : Températures moyennes mensuelles Stations : Timgad, Touffana, A.B Tenoun, Baiou et Chelia (1987-2017)

3.4. Le régime climatique

A fin de préciser les conditions climatiques de la région de notre étude ; nous avons utilisé plusieurs méthodes :

- Diagramme Ombrothermique de Gaussen Bagnouls ;
- Indice d'aridité de Martonne ;
- Diagramme d'Emberger.

3.4.1. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN ET BAGNOULS

On utilise cette méthode pour déterminer la période sèche et la période humide. Pour Gaussen et Bagnouls le climat sec est celui où la totalité des précipitations exprimé en (mm) est inférieure ou égale au double des températures moyennes ($P \leq 2 T^{\circ}\text{C}$).

Cette relation permet d'établir un graphique Ombrothermique sur lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations.

Les graphes des stations Touffana et Timgad présentent pratiquement la même période sèche qui s'étale de la moitié du mois de Mai jusqu'à la moitié du mois de Novembre, ceci témoigne du caractère semi-aride de la partie septentrionale du bassin ;

Tandis que les autres stations qui se trouvent dans les zones montagneuses présentent des périodes sèches plus courtes, c'est le cas essentiellement de la station de Chelia qui représente la zone la plus arrosée et la moins chaude dans le bassin de Timgad, cette dernière est caractérisée par une courte période sèche qui s'étale du mois de Juin jusqu'au mois d'Août.

3.4.1.1. Indice d'aridité

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par différents indices d'aridité conventionnels et empiriques, la plupart sont un simple rapport hydro thermique fondé principalement sur des grandeurs de P et T qui sont utilisés pour définir les degrés d'aridité et les conditions de l'écoulement fluvial.

On distingue trois degrés d'aridité :

- hyperaride
- aride
- semi aride

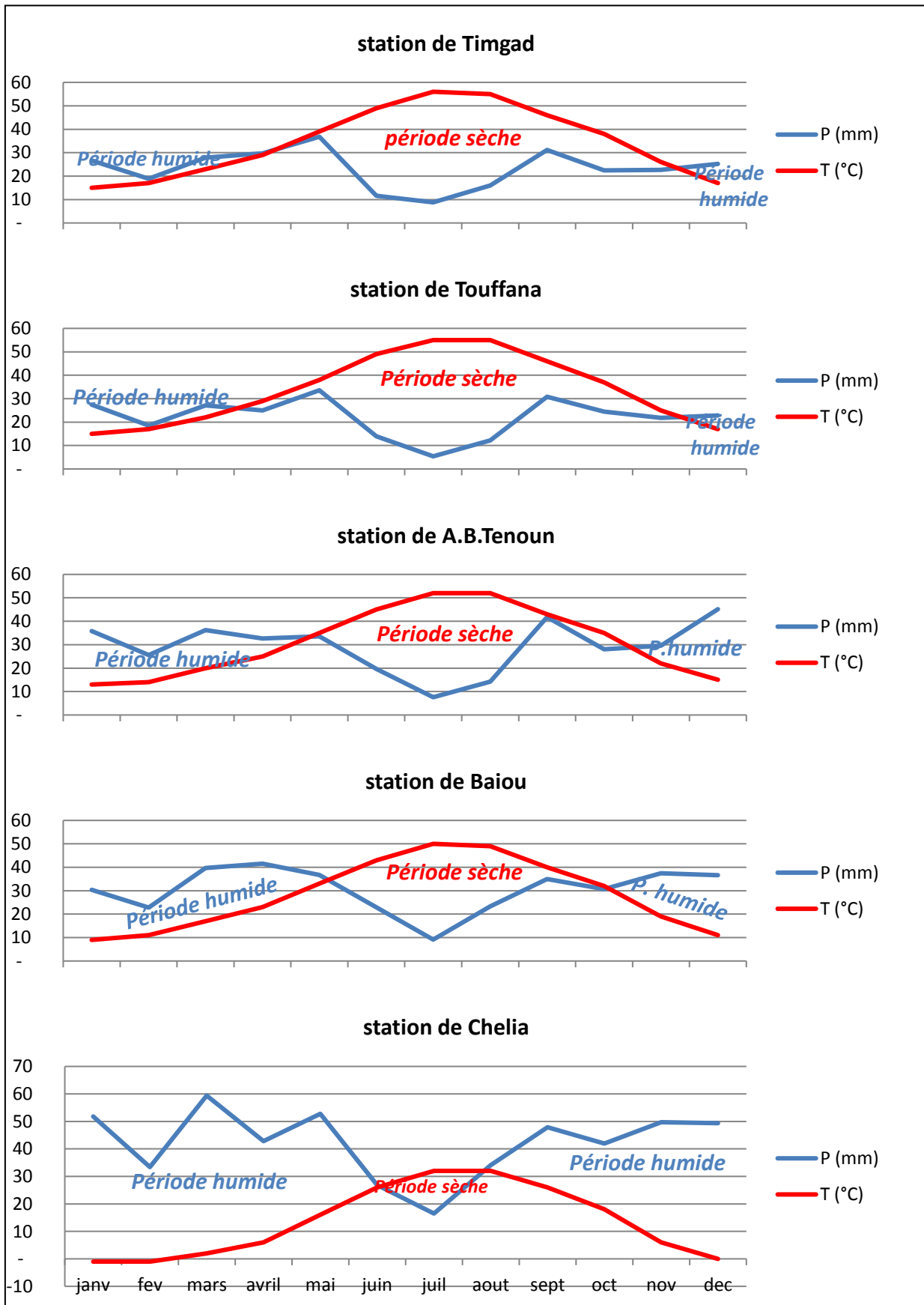


Figure N° 31 : Diagramme Ombrothermique

Stations : Timgad, Touffana, A.B Tenoun, Baiou et Chelia (1987-2017)

3.4.2. Indice de Martonne

Le géographe De Martonne (1989) définit un indice d'aridité I, selon la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \text{ Où : } \begin{array}{l} P : \text{ Représente les précipitations moyennes annuelles ;} \\ T : \text{ Représente les températures moyennes annuelles.} \end{array}$$

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

Les résultats du calcul de l'indice d'aridité sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau N° 13 : Indice D'Aridité De Martonne

stations	P (mm)	T°c	I	Régime
TIMGAD	277,73	17,08	10,25	climat semi aride
TOUFFANA	263,18	16,88	9,79	climat steppique
A.B.TENOUN	349,80	15,46	13,74	climat semi aride
BAIOU	366,17	14,04	15,23	climat semi aride
CHELIA	506,67	11,21	23,89	climat tempéré

3.5.L'évapotranspiration

La connaissance du bilan d'eau d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations entre l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation.

On regroupe sous le terme d'évapotranspiration ou déficit d'écoulement l'ensemble des phénomènes physiques et biologiques qui restituent l'humidité des sols à l'atmosphère. Il convient de distinguer: *l'évapotranspiration potentielle* et *l'évapotranspiration réelle*

3.5.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle représente la quantité d'eau maximale qui pourrait s'évaporer au niveau d'un sol saturé. C'est un élément très important pour l'établissement du

bilan hydrique, et dépend de plusieurs paramètres : la température, les précipitations, l'humidité de l'air, le couvert végétal...

Plusieurs formules ont été établies pour le calcul de L'ETP. Compte tenu du manque de données, nous adopterons celle de THORNTHWAITE appliquée à des régions sub-humides qui permet d'estimer le pouvoir évaporant de l'atmosphère, elle est basée sur les précipitations et les températures moyennes mensuelles.

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

Avec :

ETP: l'évapotranspiration potentielle en (mm).

T: la température moyenne mensuelle en (C°).

I: l'indice thermique obtenu par la formule : $I = \sum i$, ou $i = (T/5)^{1.514}$

a: Indice liée à la température qui est calculé par la formule:

$$a = 67,5(10^{-8} I^3) - 77,1(10^{-6} I^2) + 0,01797 I - 0,492$$

Cependant **G. Serra** (1954) Suggère de retenir: $a = 0.016 I + 0,5$

L'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée est obtenue à partir de la formule suivante :

$$ETP \text{ corrigée} = ETP.K$$

K: Coefficient de correction qui dépend du mois et de la latitude du lieu.

Les résultats de calcul de l'ETP par la méthode de Thornthwaite sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau N° 14 : Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Timgad, a=1,82)

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total & moy
T (°c)	23,00	19,00	13,00	8,50	7,50	8,50	11,50	14,50	19,50	24,50	28,00	27,50	Z
i	10,08	7,55	4,23	2,23	1,85	2,23	3,53	5,01	7,85	11,09	13,57	13,21	/
ETP_{calculée}	104,16	73,92	37,12	17,12	13,44	17,12	29,44	45,12	77,60	117,44	149,12	144,48	826,08
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	/
ETP_{corrigée}	107,28	71,70	31,92	14,55	11,69	14,55	30,32	49,18	93,90	142,10	183,42	167,60	918,22

Tableau N° 15 : Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Touffana, a=1,80)

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total & moy
T (°c)	23,00	18,50	12,50	8,50	7,50	8,50	11,00	14,50	19,00	24,50	27,50	27,50	16,88
i	10,08	7,25	4,00	2,23	1,85	2,23	3,30	5,01	7,55	11,09	13,21	13,21	/
ETP_{calculée}	104,64	70,40	34,72	17,44	14,08	17,44	27,84	45,60	74,40	116,80	144,80	144,80	812,96
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	/
ETP_{corrigée}	107,78	68,29	29,86	14,82	12,25	14,82	28,68	49,70	90,02	141,33	178,10	167,97	903,62

Tableau N° 16: Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de A.B.Tenoun, a=1,65)

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total & moy
T (°c)	21,50	17,50	11,00	7,50	6,50	7,00	10,00	12,50	17,50	22,50	26,00	26,00	15,46
i	9,10	6,66	3,30	1,85	1,48	1,66	2,85	4,00	6,66	9,75	12,13	12,13	/
ETP_{calculée}	97,44	69,28	32,32	17,12	13,44	15,20	27,52	39,84	69,12	105,12	132,96	132,96	752,32
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	/
ETP_{corrigée}	100,36	67,20	27,80	14,55	11,69	12,92	28,35	43,43	83,64	127,20	163,54	154,23	834,90

Tableau N° 17: Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Baiou, a=1,51)

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total & moy
T (°c)	20,00	16,00	9,50	5,50	4,50	5,50	8,50	11,50	16,50	21,50	25,00	24,50	14,04
i	8,15	5,82	2,64	1,15	0,85	1,15	2,23	3,53	6,09	9,10	11,43	11,09	/
ETP_{calculée}	91,20	65,28	29,76	12,96	9,60	12,96	25,12	39,84	68,48	101,92	128,32	124,32	709,76
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	/
ETP_{corrigée}	93,94	63,32	25,59	11,02	8,35	11,02	25,87	43,43	82,86	123,32	157,83	144,21	790,76

Tableau N° 18: Résultats de l'ETP selon Thornthwaite (station de Chelia, a=1,26)

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Total & moy
T (°c)	17,50	13,00	7,00	2,50	2,00	2,50	5,50	8,50	13,50	19,00	22,00	21,50	11,21
i	6,66	4,23	1,66	0,35	0,25	0,35	1,15	2,23	4,50	7,55	9,42	9,10	/
ETP_{calculée}	83,68	57,76	26,40	7,20	5,44	7,20	19,52	33,76	60,32	92,96	111,84	108,48	790,76
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	/
ETP_{corrigée}	86,19	56,03	22,70	6,12	4,73	6,12	20,11	36,80	72,99	112,48	137,56	125,84	687,66

3.5.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle désigne la quantité d'eau effectivement évaporée par le sol, les végétaux et les surfaces d'eau. Elle se manifeste de fait en conditions naturelles dans un site donné, compte tenu de la demande climatique de l'air et de la disponibilité en eau du sol.

Elle a été estimée par différentes méthodes :

3.5.2.1.Méthode de Turc :

La formule du Turc est déduite du bilan hydrologique de 254 bassins versants du globe, cette relation est applicable à tous les climats, elle est fonction des précipitations et des températures moyennes annuelles.

La formule est la suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \text{Où :}$$

Avec :

P : Précipitation moyenne mensuelle, en mm ;

L = 300 + 25 T + 0,05 T³: pouvoir évaporant de l'atmosphère ;

T : Température moyenne mensuelle, (en °C) ;

ETR: Évapotranspiration réelle annuelle, en mm

Tableau N° 19 : Évapotranspiration Réelle Annuelle selon Turc

stations	P(mm)	T°c	L	ETR (mm)	ETR (%P)
TIMGAD	277,73	17,08	976,22	281,10	101,21
TOUFFANA	263,18	16,88	962,36	267,46	101,63
ALI BEN TENOUN	349,80	15,46	871,21	339,94	97,18
BAIOU	366,17	14,04	789,42	348,73	95,24
CHELIA	506,67	11,21	650,64	412,60	81,43

3.5.2.2.Méthode de M. Coutagne :

Cette méthode fait intervenir les températures et les précipitations. Elle s'écrit de la manière suivante :

$$D_e = ETR = P - \lambda P^2 \quad \text{Avec : } \lambda = \frac{1}{0.8+0.14T}$$

D_e : Déficit d'écoulement (ETR), en mm ;

P : Précipitation moyenne annuelle en mm pour l'application numérique et en m pour la condition d'utilisation de la formule;

T : Température moyenne annuelle, (en °C).

Cette formule ne sera valable qu'après la vérification de la condition suivante : $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$

Tableau N° 20 : Évapotranspiration Réelle Annuelle selon M. Coutagne

STATIONS	P(m)	T°c	λ	$1/8\lambda$	$1/2\lambda$		ETR (m)	ETR (%)
TIMGAD	0,278	17,08	0,31	0,40	1,60	inapplicable	/	/
TOUFFANA	0,263	16,88	0,32	0,40	1,58	inapplicable	/	/
A.B.TENOUN	0,350	15,46	0,34	0,37	1,48	inapplicable	/	/
BAIOU	0,366	14,04	0,36	0,35	1,38	applicable	0,32	86,76
CHELIA	0,507	11,21	0,42	0,30	1,18	applicable	0,40	78,61

3.5.1.1.Méthode de Wundt :

L'abaque de Wundt modifié par Coutagne permet de déduire la valeur de l'ETR ou D_e en prenant en considération la température moyenne annuelle (°C) et les précipitations annuelles (mm) (fig. 32). Les résultats de l'ETR obtenus sont reportés dans le tableau N°21 :

Tableau N°21 : Évapotranspiration Réelle Annuelle selon Wundt

stations	P(mm)	T°c	ETR	ETR %
TIMGAD	277,73	17,08	295,00	106,22
TOUFFANA	263,18	16,88	310,00	117,79
ALI BEN TENOUN	349,80	15,46	360,00	102,92
BAIOU	366,17	14,04	365,00	99,68
CHELIA	506,67	11,21	430,00	84,87

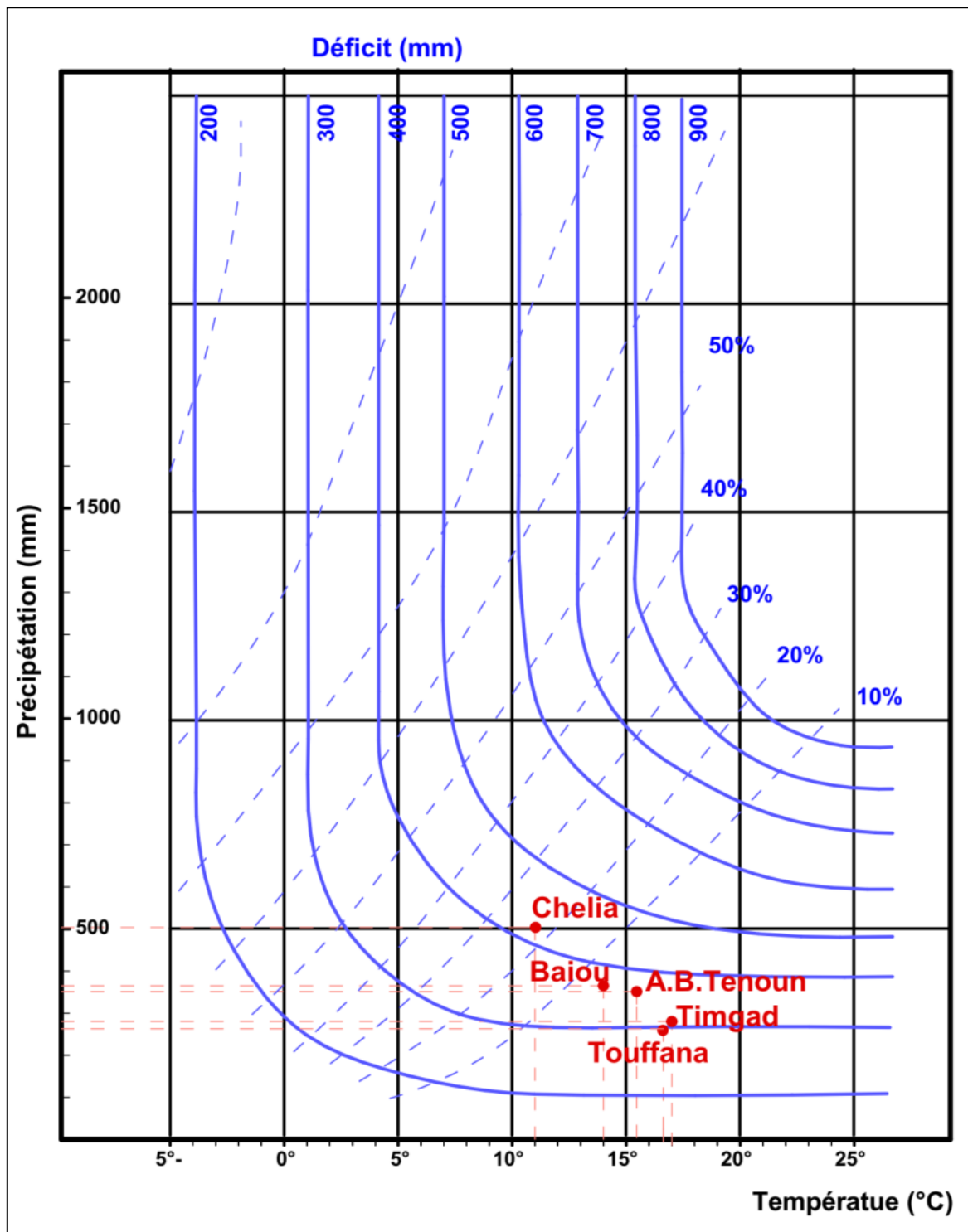


Figure N° 32: Évaluation du déficit d'écoulement en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations (Wundt)

3.5.1.1.Méthode de P. Verdeil (1988) :

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou du déficit d'écoulement, P. Verdeil a établi une abaque bi-logarithmique pour les régions semi-arides en tenant compte uniquement des précipitations annuelles (Fig.33).

Tableau N° 22 : Évapotranspiration Réelle Annuelle selon Verdeil

stations	P(mm)	ETR	ETR %
TIMGAD	277,73	270,00	97,22
TOUFFANA	263,18	260,00	98,79
ALI BEN TENOUN	349,80	335,00	95,77
BAIOU	366,17	360,00	98,31
CHELIA	506,67	490,00	96,71

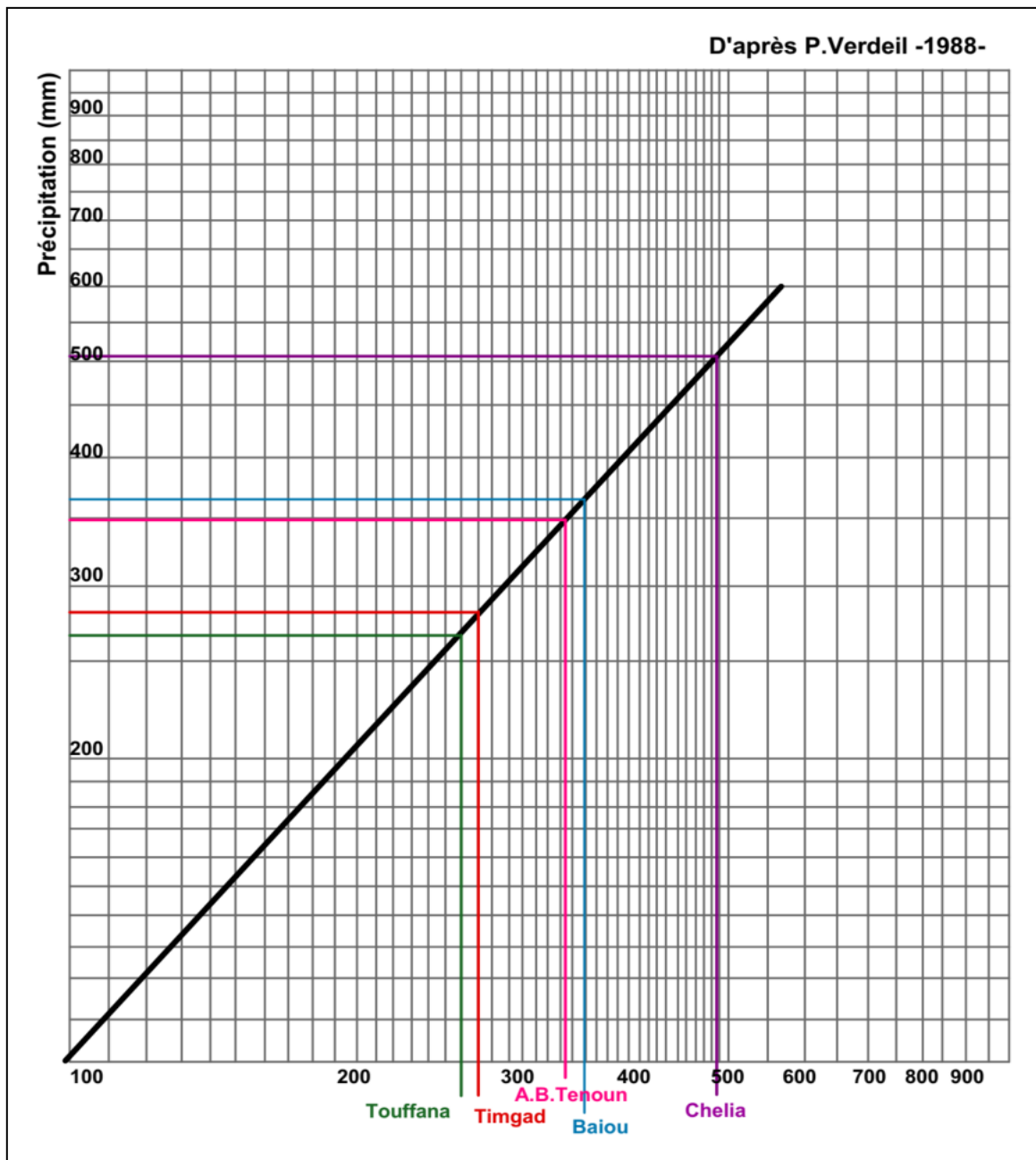


Figure N° 33 : Évaluation du déficit d'écoulement en fonction des précipitations (Verdeil.1988)

3.5. Calcul du bilan hydrique selon Brochet et Gerbier (1975) par la prise en compte de l'ETP de Thornthwaite

Il a pour but de quantifier les transferts d'eau issus des précipitations et permet de caractériser un sol du point de vue de sa sécheresse ou de son humidité.

Pour les besoins de nos calculs on adoptera une réserve utile de l'ordre de 100 mm (sol saturé) qui est une valeur généralement admise.

Concernant la RFU (réserve facilement utilisable), qui doit être calculée selon la nature des sols et de la profondeur d'enracinement des plantes, et compte tenu de l'absence de ces données, on adoptera également comme valeur une RFU au seuil de 50% la RU, c'est à dire 50 mm.

En prenant en considération l'ETP de Thornthwaite, la méthode de Brochet-Gerbier, permet de calculer le bilan hydrique au pas mensuel, avec :

- **ETR**: évapotranspiration réelle,
- **RFU**: réserve facilement utilisable. Pour notre région on prend $RFU=50\text{mm}$,
- **Da**: déficit agricole,
- **Ex**: l'excédent (water surplus).

A partir des données des pluies mensuelles et l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée par la méthode de Thornthwaite, plusieurs cas peuvent être envisagés :

- Si: $P \geq ETP \rightarrow ETP = ETR$, il y a une quantité d'eau ($P-ETR$) qui va alimenter la RFU jusqu'au maximum (100%).
- Si $P=ETP$, les précipitations sont suffisantes pour combler la demande énergétique de l'atmosphère en vapeur. Il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU.
- Si: $P < ETP$, il y aura épuisement progressif des réserves, dans ce cas on aura un déficit du bilan $Da=ETP-ETR$, ou encore $ETP-P$ qui représente la quantité d'eau qu'il faudra ajouter à l'ETR pour atteindre l'ETP.
(Da) représente le besoin en eau pour l'irrigation des plantes.

Les tableaux ci-après comportent les résultats des calculs du bilan hydrique pour différentes stations.

Tableau N° 23 : Bilan hydrique de la station de Timgad

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P (mm)	31,20	22,45	22,67	25,23	26,61	18,87	27,85	29,70	36,79	11,57	8,80	15,98	277,73
ETP	107,28	71,7	31,92	14,55	11,69	14,55	30,32	49,18	93,9	142,1	183,42	167,6	918,22
P-ETP	- 76,08	- 49,25	- 9,25	10,68	14,92	4,32	- 2,47	- 19,48	- 57,11	- 130,53	- 174,62	- 151,62	/
ETR	31,20	22,45	22,67	14,55	11,69	14,55	30,32	49,18	44,76	11,57	8,80	15,98	277,72
RFU	0	0	0	10,68	25,60	29,92	27,45	7,97	0	0	0	0	/
Da	76,08	49,25	9,25	0	0	0	0	0	49,14	130,53	174,62	151,62	640,49
Ex	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau N° 24: Bilan hydrique de la station de Touffana

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P (mm)	30,77	24,48	21,84	22,84	27,45	18,54	27,11	25,02	33,59	13,95	5,41	12,19	263,18
ETP	107,78	68,29	29,86	14,82	12,25	14,82	28,68	49,7	90,02	141,33	178,1	167,97	903,62
P-ETP	- 77,01	- 43,81	- 8,02	8,02	15,20	3,72	- 1,57	- 24,68	- 56,43	- 127,38	- 172,69	- 155,78	/
ETR	30,77	24,48	21,84	14,82	12,25	14,82	28,68	49,7	34,27	13,95	5,41	12,19	263,18
RFU	0	0	0	8,02	23,22	26,94	25,37	0,68	0	0	0	0	/
Da	77,01	43,81	8,02	0	0	0	0	0	55,75	127,38	172,69	155,78	640,44
Ex	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau N° 25 : Bilan hydrique de la station d'Ali Ben Tenoun

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P (mm)	41,79	27,99	29,56	45,15	35,83	25,58	36,20	32,67	33,54	19,63	7,58	14,27	349,80
ETP	100,36	67,2	27,8	14,55	11,69	12,92	28,35	43,43	83,64	127,2	163,54	154,23	834,9
P-ETP	- 58,57	- 39,21	1,76	30,60	24,14	12,66	7,85	- 10,76	- 50,10	- 107,57	- 155,96	- 139,96	/
ETR	41,79	27,99	27,8	14,55	11,69	12,92	28,35	43,43	72,78	19,63	7,58	14,27	322,79
RFU	0	0	1,76	32,36	50,00	50,00	50,00	39,24	0	0	0	0	/
Da	58,57	39,21	0	0	0	0	0	0	10,86	107,57	155,96	139,96	512,12
Ex	0	0	0	0	6,50	12,66	7,85	0	0	0	0	0	27,01

Tableau N° 26: Bilan hydrique de la station de Baiou

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P (mm)	34,95	30,71	37,47	36,61	30,36	22,78	39,69	41,54	36,77	22,87	9,13	23,27	366,17
ETP	93,94	63,32	25,59	11,02	8,35	11,02	25,87	43,43	82,86	123,32	157,83	144,21	790,76
P-ETP	- 58,99	- 32,61	11,88	25,59	22,01	11,76	13,82	- 1,89	- 46,09	- 100,45	- 148,70	- 120,94	/
ETR	34,95	30,71	25,59	11,02	8,35	11,02	25,87	43,43	82,86	24,89	9,13	23,27	331,09
RFU	0	0	11,88	37,47	50,00	50,00	50,00	48,11	2,03	0	0	0	/
Da	58,99	32,61	0	0	0	0	0	0	0	98,43	148,70	120,94	459,67
Ex	0	0	0	0	9,48	11,76	13,82	0	0	0	0	0	35,07

Tableau N° 27: Bilan hydrique station de Chelia

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P (mm)	47,92	41,93	49,73	49,33	51,84	33,44	59,39	42,85	52,79	26,84	16,48	34,13	506,67
ETP	86,19	56,03	22,7	6,12	4,73	6,12	20,11	36,8	72,99	112,48	137,56	125,84	687,66
P-ETP	-	-	27,03	43,21	47,11	27,32	39,28	6,05	-	-	-	-	/
ETR	47,92	41,93	22,7	6,12	4,73	6,12	20,11	36,8	72,99	56,64	16,48	34,13	366,67
RFU	0	0	27,03	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	29,80	0	0	0	/
Da	38,27	14,10	0	0	0	0	0	0	0	55,84	121,08	91,71	321,00
Ex	0	0	0	20,24	47,11	27,32	39,28	6,05	0	0	0	0	140,00

Les stations de Timgad et de Touffana: se trouvent au centre de bassin de Timgad à environ 1000m d'altitude, l'examen de leurs bilans hydriques montre que l'ETP dépasse largement les précipitations (Timgad : ETP=330.62%, Touffana : ETP=343.35%, des précipitations), et donc un important déficit agricole qui représente la différence entre ces deux facteurs.

Les Stations d'Ali Ben Tenoun et de Baiou : se trouvent au l'Ouest de bassin de Timgad à 1180 m et 1510m d'altitude, l'examen de leurs bilans hydriques montre que l'ETP dépasse les précipitations (A.B.Tenoun : ETP=238.68%, Baiou : ETP=215.95% des précipitations), et donc un bilan hydrique essentiellement déficitaire avec un faible excédent hydrique (A.B.Tenoun : Ex=27,01mm et Baiou : Ex=35.06mm), répartie sur les mois de Janvier, Février et Mars.

Station de Chelia : se trouve au Sud-est de bassin de Timgad à 1260m d'altitude, son bilan hydrique a mis en évidence un certain équilibre entre les mois déficitaires et ceux excédentaires, avec un considérable excédent hydrique Ex=139.97mm (27.63% des précipitations).

D'après les résultats de calcul du bilan hydrique, les agriculteurs doivent irriguer constamment leurs cultures mis à part la région de Chelia. Sachant que La formule de calcul de l'ETP (Thorthwaite) n'a pas été établie pour ce type de climat. Elle est applicable dans les zones humides à climat tempéré.

3.6. Le ruissèlement « R »

On entend par ruissellement l'écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain et la densité du réseau hydrographique.

3.6.1. Méthode de TIXERONT- BERKALOFF

Cette méthode est appliquée pour des bassins dont la surface varie de 40 à 200000 km² et des précipitations variant entre 100 et 500 mm. Cette formule concerne surtout les régions ayant un climat aride à semi aride.

Elle s'écrit:

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Avec :

R : ruissellement (mm),

P : précipitation moyenne annuelle (mm),

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle

Tableau N° 28 : calcul de ruissèlement selon TIXERONT- BERKALOFF

Stations	TIMGAD	TOUFFANA	ALI BEN TENOUN	BAIOU	CHELIA
P(mm)	277,73	263,18	349,80	366,17	506,67
ETP (mm)	918,22	903,62	834,90	790,76	687,66
R (mm)	8,47	7,44	20,47	26,17	91,69
R (%)	3,05	2,83	5,85	7,15	18,10

3.7. Bilan hydrologique globale

La formule générale du bilan d'eau donne l'égalité des apports et des pertes évaluées sur des grandes périodes.

$$P = ETR + R + I + (\Delta Q)$$

Avec

R : ruissellement de surface (mm) ;

P : hauteur des précipitations (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle (mm) ;

I : infiltration (mm) donc : I = P - (R + ETR) ;

ΔQ : variation des réserves suite aux prélèvements par pompages

Les différentes composantes du bilan hydrologique ont été calculées séparément par zone d'influence de chaque station climatique, car à chaque zone correspond une ETR donnée (obtenue à travers le bilan hydrique de Thornthwaite).

Tableau N° 29 : Les Différentes Composantes Du Bilan Hydrologique (Stations : Baiou, Timgad, Touffana, A.B Tenoun et Chelia)

Stations	TIMGAD	TOUFFANA	ALI BEN TENOUN	BAIOU	CHELIA
P (mm)	277,73	263,18	349,80	366,17	506,67
ETR (mm)	247,80	236,25	272,79	281,10	316,67
R (mm)	8,47	7,44	20,47	26,17	91,69
I (mm)	21,45	19,49	56,54	58,90	98,31
I (%)	7,72	7,41	16,16	16,09	19,40

3.9. Conclusion

Le bassin de Timgad de par sa position géographique est soumis essentiellement à l'influence de deux régimes climatiques : le climat dominant est le climat semi aride à hivers frais, le climat sub-humide à hivers froid est localisé aux altitudes septentrionales du bassin (station de Chelia).

Le climat du bassin est connu par son irrégularité. Les conditions climatiques varient d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre.

Les valeurs des précipitations moyennes annuelles pour les stations : Timgad, Touffana, A.B.Tenoun, Baiou et Chelia sont respectivement 277mm, 263mm, 349mm, 366.17mm et 506mm, avec des températures moyennes annuelles de 17.08°C, 16.88°C, 15.46°C, 14.04°C et 11.21°C.

Les valeurs de l'ETR sont respectivement de l'ordre de 247.80mm, 236.25mm, 272.79mm, 281.10mm et 316.67mm, soient (89.23%, 89.77%, 77.98%, 76% et 62.50% des précipitations moyennes annuelles), selon Thornthwaite.

Pour la majorité des stations, le bilan hydrique est déficitaire, les valeurs du déficit agricole pour les stations : Timgad, Touffana, A.B Tenoun, Baiou et Chelia sont respectivement : 670.41mm, 667.37mm, 562.12mm, 509.66 et 139.97mm. Seule la station de Chelia marque un bilan plus ou moins équilibré avec un excédent hydrique de l'ordre de 139.97mm soit 27.63% des précipitations moyennes annuelles.

Chapitre V :

LE CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

1. Caractérisation géométrique des aquifères du bassin de Timgad

1.1. Introduction

Le bassin de Timgad comprend un substratum mésozoïque correspondant à une série marine grès-carbonatée, surmonté en discordance par des formations du Néogène. Ces dernières sont représentées essentiellement par des sédiments détritiques où dominent les dépôts silicoclastiques. La puissance de toute la série dépasse les 1000 mètres.

L'étude géophysique, consistant en l'exploitation des profils sismiques et des coupes géo-électriques, a permis de mettre en évidence d'une part la géométrie profonde des différents accidents dans le bassin et montre la présence de deux niveaux géologiques ; gréseux et carbonaté relativement résistants affectés par un réseau de fracturation et qui constituent très probablement des aquifères en charge, dont le plus important est l'aquifère gréseux du Miocène, de ce fait l'objectif est de valoriser leurs potentiels hydriques par la caractérisation géométrique, piézométrique et hydrodynamique.

1.2 Géométrie et identification des aquifères du bassin de Timgad

La reconstitution de la configuration géométrique des systèmes aquifères représente une étape majeure dans la compréhension de leur fonctionnement hydrogéologique (Cudennec et al., 2007). Les structures reconstituées peuvent jouer un rôle dans les relations entre les unités hydrogéologiques et permettent éventuellement de se prononcer sur les écoulements dont elles sont le siège.

La détermination des caractéristiques géométriques des différentes formations réservoir dans le bassin de Timgad, leur superposition, ainsi que le contact entre eux nécessite une démarche basée sur :

- Les différentes études géologiques réalisées sur le bassin de Timgad et dans les environs, entre autre les Aurès;
- L'étude géophysique effectuée sur les sites de Tazoult, Timgad et Ouled Fadhel ;
- La corrélation des logs lithostratigraphiques des forages réalisés au niveau du bassin, dont le plus profond atteint 300 m (Tibikaouine 2, Foug Tob coupe N° 02).

La combinaison des résultats obtenus à l'issue de cette démarche a abouti à la réalisation de coupes hydrogéologiques transversales, celles-ci couvrent pratiquement tout le bassin (Ouest, Centre et Est, Fig. 34), et ont permis de cerner l'extension le synclinal de Timgad.

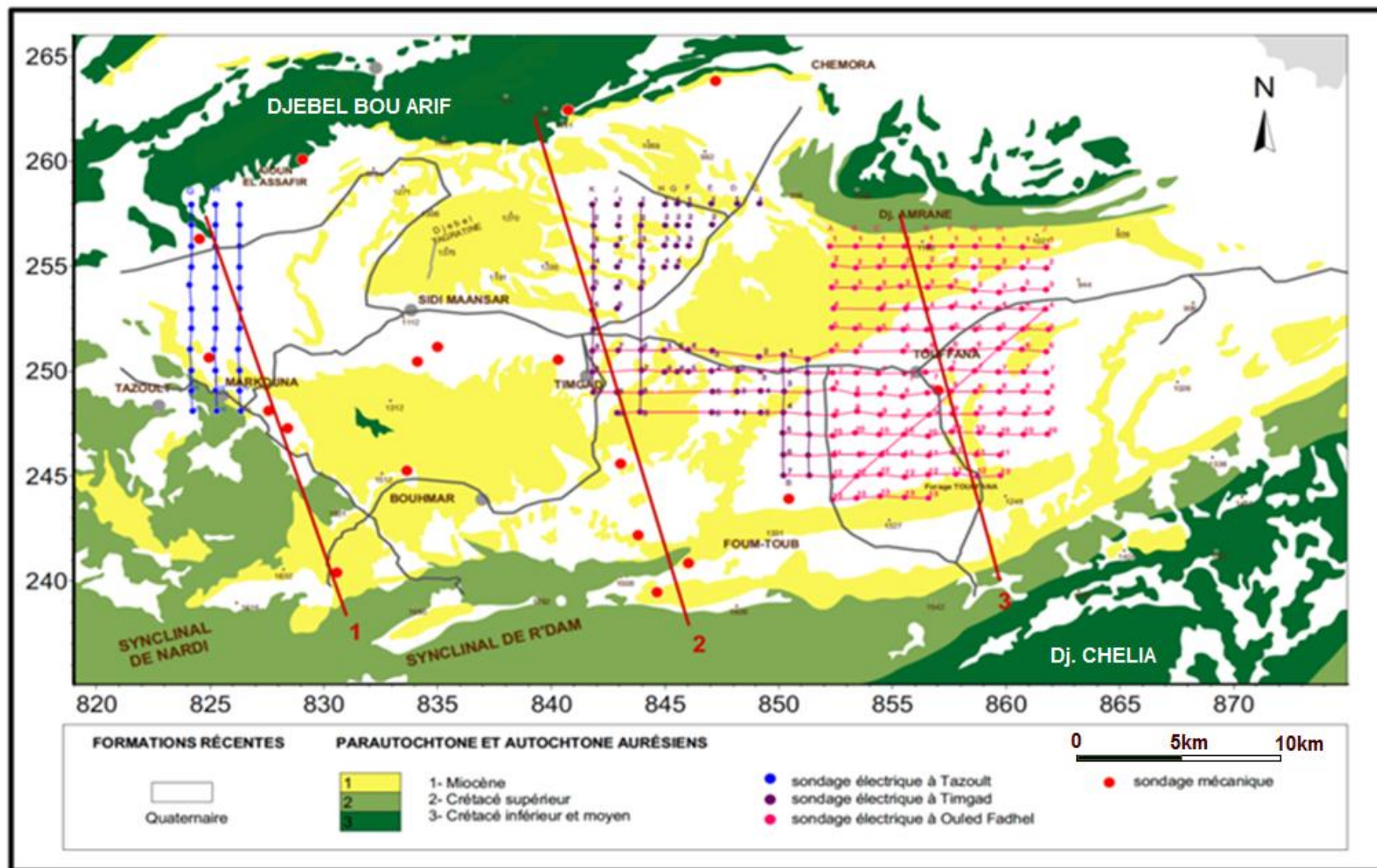


Figure N° 34 : Carte de position des coupes hydrogéologiques

1.2.1. Interprétation des coupes hydrogéologiques

Les coupes hydrogéologiques réalisées ont mis en évidence une lithologie contrastée et organisée en structures plissées dont les pendages convergent vers le centre du bassin, favorisant l'accumulation des eaux souterraines (ENAGEO, 1993) (Fig. 35), déterminant ainsi un système d'aquifères composé de haut en bas comme suit :

1.2.1.1. L'aquifère gréseux du Miocène

Les grès du Tortonien forment des cordons pluri-hectométriques avec des chenaux orientés sensiblement SW-NE qui s'amincissent latéralement vers l'est et l'ouest. Cette formation est discordante et peut reposer directement sur le Crétacé supérieur à la terminaison septentrionale de l'anticlinal du Djebel Chelia. Elle est composée de grès blancs grossiers, en bancs plurimétriques, à abondantes dragées de quartz (diamètre allant jusqu'à 2cm). La disposition en chenaux hectométriques est fréquente. De rares intercalations argileuses existent. Cette formation a une puissance d'environ 300m, aisément estimable au Djebel bou Djeza ou au Kef Mezouat sur le flanc nord de l'anticlinal du Djebel Chelia (VILA & GUELLAL, 1973).

Les grès du Tortonien s'étendent sur tout le territoire du synclinal de Timgad qui se présente sous une allure ondulée, favorisant la création d'une série de dépressions à remplissage argilo-marno-gréseux. Ce remplissage est d'une épaisseur variable atteignant 1000 m par endroits, principalement au centre de bassin (synclinal de Tagratine et la région de Ouled Fadhel). Les grès du Tortonien constituent l'aquifère le plus exploité vu son caractère artésien par endroits, son épaisseur importante qui peut dépasser les 200 m, son étendue ainsi que sa géométrie ondulée particulière. En terme de caractéristiques hydrodynamiques, les transmissivités obtenues lors des essais de pompage sont de l'ordre de 10^{-4} m/s² avec des coefficients d'emmagasinements de 10^{-4} à 10^{-5} en conformité avec le caractère captif de l'aquifère.

1.2.1.2.L'aquifère des calcaires du Crétacé supérieur

Des calcaires massifs cristallins d'âge maastrichtien pouvant atteindre une épaisseur de 300m, forment la bordure sud du bassin (synclinal de R'dam, Dj.Chelia) et sont surmontés en discordance par les grès blancs du Miocène (VILA & GUELLAL, 1973). Ces calcaires sont le siège d'écoulements souterrains dont l'exploitation est restreinte par rapport à l'aquifère gréseux et se limite aux bordures méridionales dans les régions d'Oued Taga, Foum Tob et Yabous. Vers le centre de la dépression de Timgad, ils n'ont pas été détectés par reconnaissance géophysique.

1.2.1.3.L'aquifère des calcaires du Crétacé inférieur

Des calcaires aptiens occupent les parties en voûte des soulèvements anticlinaux du Djebel Bou Arif au bord nord du bassin. L'Aptien est représenté par l'association d'une assise marneuse basale de 70 m d'épaisseur de teinte beige-verdâtre et grise, surmontée par des formations de calcaires épaisses d'environ 300 m, avec des variétés massives pélitomorphes et organogènes (VILA & GUELLAL, 1973). L'exploitation de cet aquifère est limitée au versant sud du Djebel Bou Arif et en sa bordure immédiate (zones d'Ain Abderrahmane et de Ayoun el Assafir), compte tenu du pendage important de plongement en profondeur des formations carbonatées du Crétacé et même celles du Miocène conglomératique (45° et plus), sous les formations plus récentes.

L'empreinte de la phase tectonique post-miocène est évidente. Elle est matérialisée sur les coupes hydrogéologiques du bassin. Elle est responsable de la création d'un important fossé d'effondrement, la jonction entre les failles normales positionnées aux centres des coupes montre clairement l'extension de ce fossé et met en évidence le contact entre la formation gréseuse (réservoir) et le remplissage marno-argileux du fossé, qui forme une barrière étanche (failles barrières) Fig 40.

La nature des formations en présence ainsi que l'ordre des épaisseurs, inspirés en grande partie des descriptions géologiques établies dans les études antérieures (LAFFITE, R.,1939 ; VILA & GUELLAL, 1973 ; ENAGEO, 1993 ;...), nous a permis d'établir une description des principales formations aquifères.

1.2.2. Communication entre aquifères

Le bassin de Timgad est influencé essentiellement par la phase atlasique qui a tracé ses structures plissées, le Miocène s'est déposé généralement sur une surface d'érosion en discordance sur des séries litho-stratigraphiques (marneuses et carbonatées) du Crétacé,

Ce qui est évident dans les coupes (1, 2) qui montrent clairement au sud-ouest du bassin (Dj. Chelia et R'dam...) les calcaires de Maestrichtien qui affleurent avec un pendage faible et leur recouvrement par les grès du Tortonien (Miocène). En revanche, au niveau de la bordure nord, les calcaires de l'Aptien sont fortement inclinés. Ils plongent au-dessous des grès du Miocène et le contact entre les deux formations est très limité (Fig. 37).

Tableau N°30 : Unités hydrogéologiques du bassin de Timgad

Unités stratigraphiques		Unités lithologiques	Epai moy	Unités hydrogéologiques	
Quaternaire		Eboulis, alluvions, Glacis polygéniques...		Aquifère à nappe libre	
Tertiaire	Miocène	Messinien	Alternances d'argiles et de grès à grains moyens à grossiers	500m	Niveaux aquifères éparses
			Argiles rouges	350m	Substratum imperméable
		Tortonien sup	Argiles et Argiles gréseuses	350 à 400m	Niveaux aquifères éparses dans les grès
		Tortonien inf	Alternance de bancs de grès et marnes	400m	Aquifère à nappe captive des grès du Miocène
			Argiles gypsifères	350m	Substratum imperméable
		Langhien-Serravalien	Calcaires, Marne et conglomérats	40m	Aquifère captif
		Aquitano-Burdigalien	Argiles, conglomérats et marnes	300 à 400m Jusqu'à 1000m	Niveaux aquifères dans les conglomérats, captés en bordure sud du Djebel Bou Arif
Secondaire	Crétacé	Maestrichtien sup	Calcaires massifs cristallins	Jusqu'à 300m	Aquifères du Crétacé supérieur
		Campanien	Marnes	350 à 400m	imperméable
		Santonien	Marnes et calcaires	Plus de 200m	Semi perméable
		Coniacien	Marnes et marno-calcaires	150m	Imperméable
		Turonien	Marnes, marno-calcaires et calcaires	100 à 300m	Semi-perméable
		Cénomannien sup	Calcaires marneux	150m	Semi-perméable
		Cénomannien moy	Marnes	150m à 350m	imperméable
		Albien	Argiles, marnes et grès ferrugineux	50 à 70m	Imperméable à semi-perméable
		Aptien	Calcaires	300m	Aquifères du Crétacé inférieur

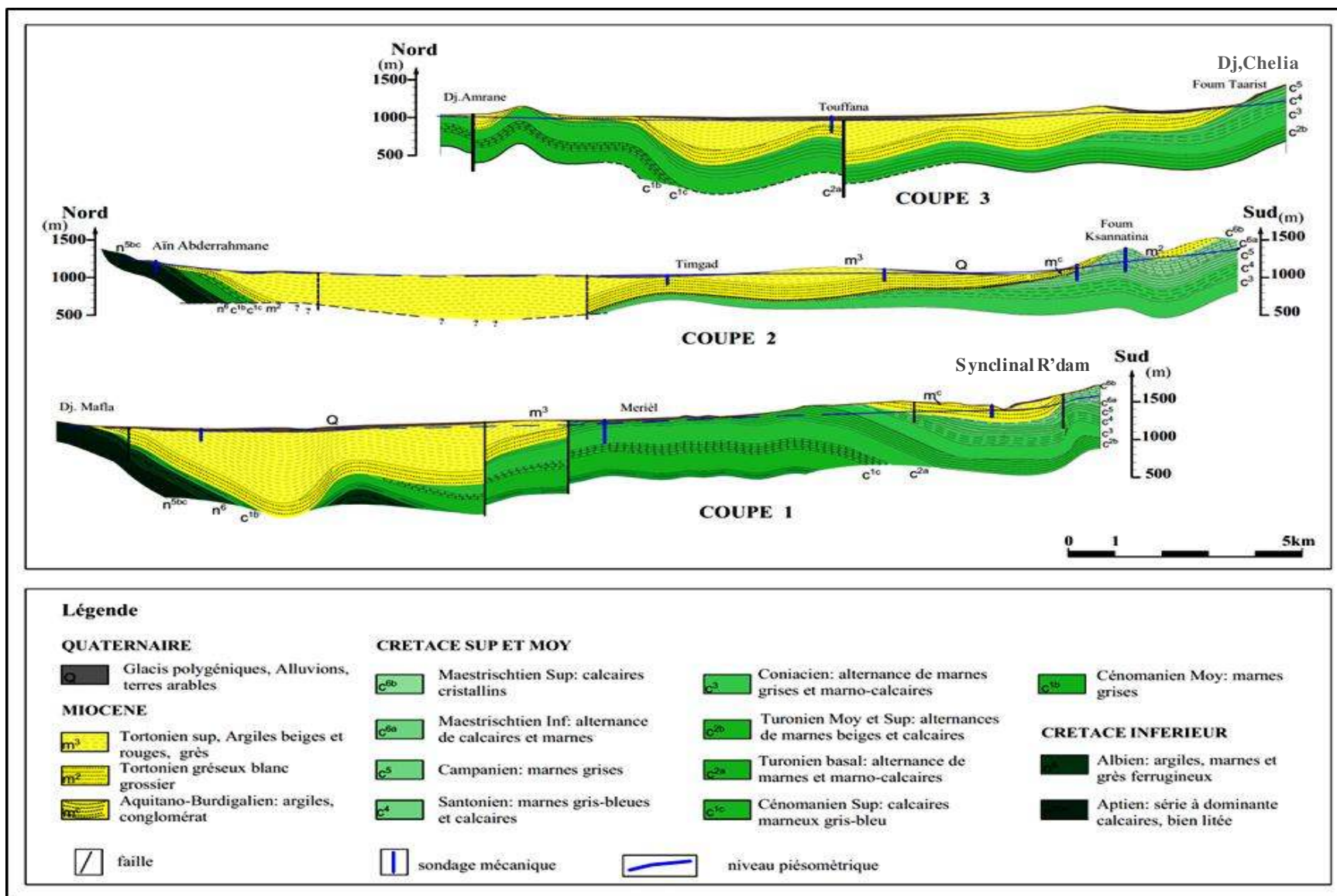


Figure N° 35 : Coupes hydrogéologiques transversales du bassin de Timgad

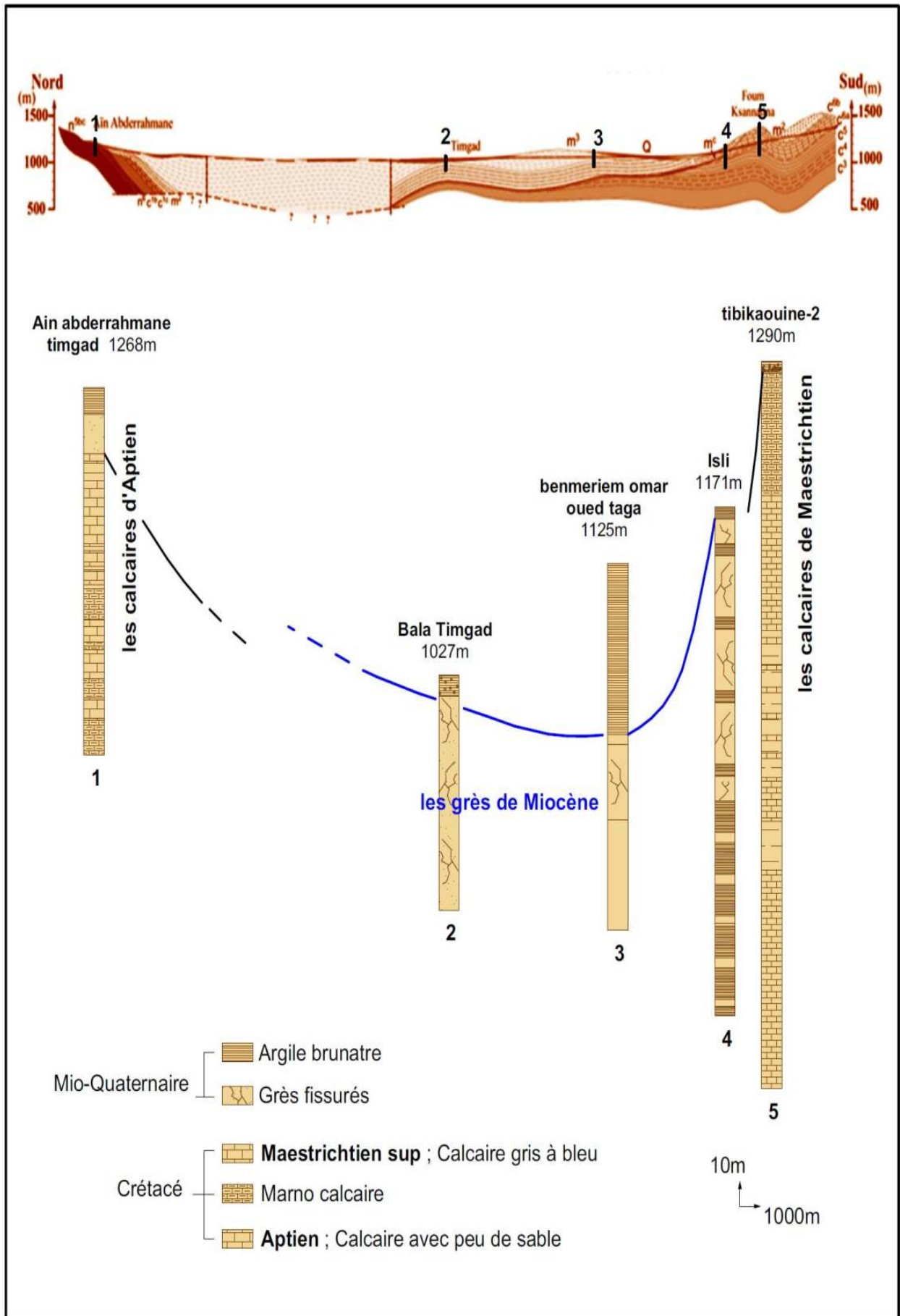


Figure N° 36 : Corrélation des logs stratigraphiques des forages de bassin de Timgad

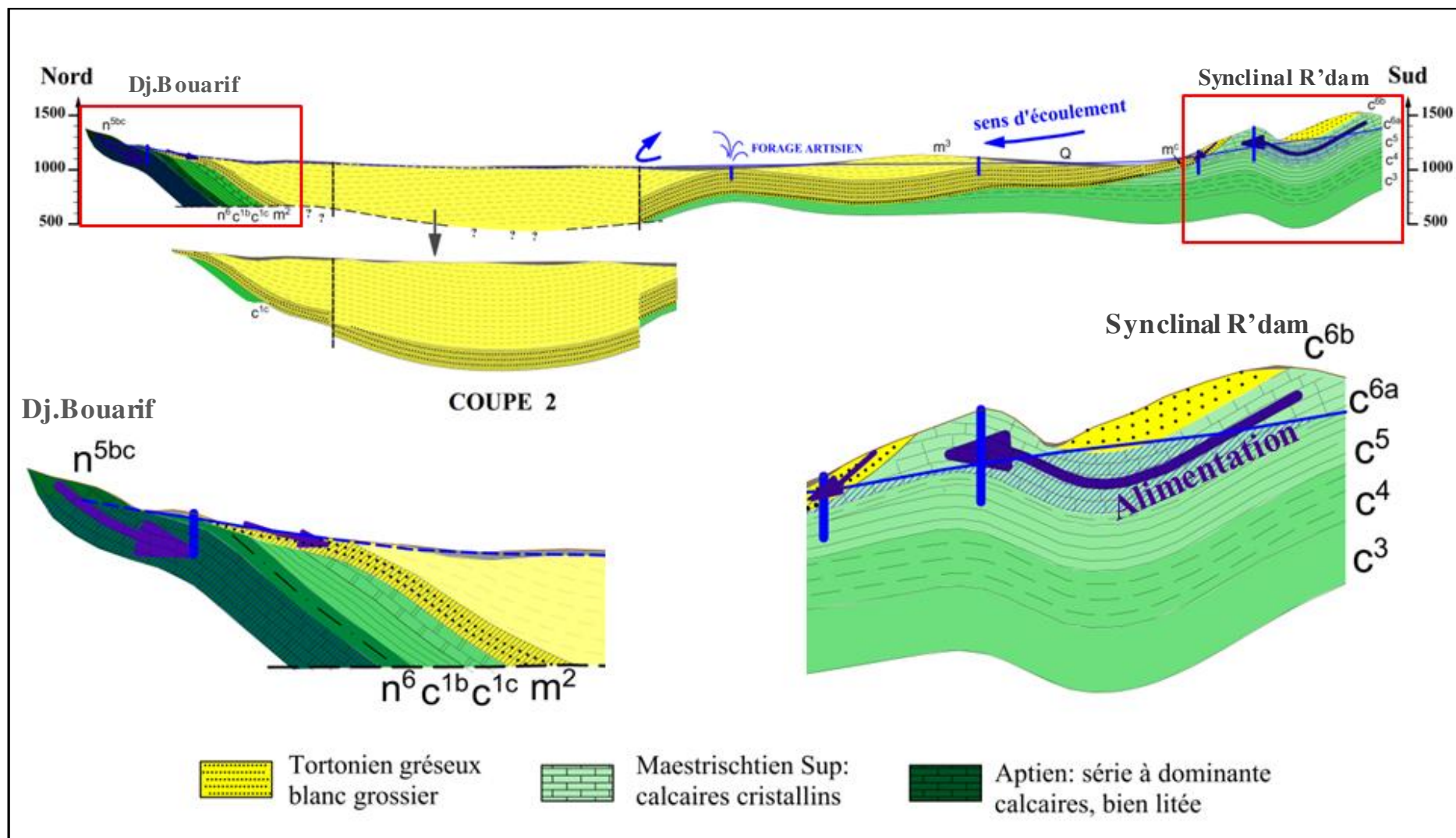


Figure N° 37 : Coupe hydrogéologique représentant le contact entre les différentes formations aquifères du bassin de Timgad

2. Piézométrie

La reconnaissance de la surface piézométrique permet de connaître l'extension de l'aquifère, le sens d'écoulement des eaux souterraines, les conditions hydrodynamiques aux limites, les zones d'accumulation et de potentiels échanges entre aquifères. Les fluctuations interannuelles et saisonnières des niveaux piézométriques sont également révélatrices de la recharge naturelle par les précipitations mais également des rythmes d'exploitation des aquifères.

L'aquifère gréseux du Miocène a été principalement ciblé par la campagne piézométrique effectuée sur le bassin vu son importance mais des mesures, plus réduites en nombre, ont également été effectuées sur les aquifères carbonatés aux bordures du bassin pour étudier leur relation avec l'aquifère gréseux.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées au cours de la réalisation de la campagne piézométrique:

- *Prise des mesures en période de pompage (influence des pompes sur les mesures effectuées dans des forages voisins) ;*
- *Difficulté d'accéder aux forages vu la topographie accidentée en certains points du bassin (certains forages sont situés en zone montagneuse) ;*
- *Faire face aux mentalités difficiles des propriétaires surtout avec le nombre important de forages illicites ;*
- *L'équipement des forages : tête de forage fermée ou câbles électriques dans le trou de forage gênant la descente de la sonde de mesure et parfois même le coincement de cette dernière ;*

Toutes ces difficultés ont impacté la qualité de la carte piézométrique obtenue.

Le niveau piézométrique a été mesuré entre avril et mai 2015 dans 90 forages dont les profondeurs varient entre 50 et 300m. Ces derniers sont destinés à l'alimentation en eau potable ainsi qu'à l'irrigation.

2.1. Les bordures du bassin de Timgad

Les massifs bordant le bassin sont en général formés de calcaires alternant avec des marnes d'âge Crétacé, on distingue ;

Au Nord

- **Anticlinal du Djebel Bou Arif** : (Altitude maximale : **K.Graf 1744m**, précipitations annuelles maximale : **590mm**),

De cœur barrémien grésodolomitique au centre, il montre des formations miocènes conglomératiques discordantes sur sa bordure sud donnant sur le bassin de Timgad. Les formations de sa bordure sud ont un pendage accentué (subvertical passant à 45° dans sa limite nord-ouest). Sa forme en baïonnette est apparue à la faveur d'un système de décrochement dextres de direction N120 à N140°.

En coupe, c'est un pli coffré, avec un flanc nord nettement verticalisé parfois légèrement déversé et un flanc sud sub-vertical par endroits. Les calcaires affleurent largement sur les flancs du Dj. Bou Arif.

- **L'anticlinal du Djebel Amrane** (précipitations annuelles maximale : **420mm**), la plupart des fractures qui l'affectent ne passent pas dans le Tortonien. D'autre part, son flanc sud présente des compartiments plissotés entre des fractures. Les formations carbonatées deviennent plus gréseuses et réduites par rapport au Dj. Bou Arif (VILA & GUELLAL, 1973).

Au Sud

La structure des Aurès est matérialisée par de vastes anticlinaux et synclinaux;

- **La zone synclinale Nerdi-Bouhmar**: (Alt. Max ouest : **1900 Dj. Lézourès** ; précipitations annuelles maximale : **740mm**), possède une fracturation plus confuse avec notamment des failles de faibles rejets qui correspondent en fait à une flexure faillée (VILA & GUELLAL, 1973).
- **L'anticlinal du Djebel Chelia** : (Alt. Max est : **2328m Dj. Chelia** ; précipitations annuelles maximale : **770mm**); c'est un pli coffré typique. Cet anticlinal est associé à des failles dont au moins une possède une composante décrochante dextre et qui ne passe pas dans le Tortonien gréseux de nature marno-carbonaté (VILA & GUELLAL, 1973).

2.2. Rôle des bordures dans la recharge du système aquifère

La carte piézométrique réalisée pour les mesures d'avril-mai 2015 (Fig.38) montre que l'aquifère gréseux du Miocène est alimenté essentiellement au niveau de la bordure méridionale formée de massifs des Aurès (Dj.Chelia, Rdam, Nerd Bouhmar), avec une altitude maximale de 2328m (Dj. Chelia) et des précipitations annuelles maximales de l'ordre de 770 mm (ANRH, 2013). Cette bordure, de nature carbonatée d'âge crétacé supérieur constitue une importante source de recharge de l'aquifère gréseux miocène. Le versant sud du Dj. Bou Arif représente aussi un front d'alimentation, cependant de moindre importance. Il est formé essentiellement de marnes et calcaires d'âge crétacé inférieur (altitude maximale de l'ordre de 1744m à Koudiat Graf) (Fig. 38, 39).

La majorité des axes d'écoulement des eaux souterraines sont orientés vers l'aval (est du bassin, région de Bou el Freis) montrant ainsi un écoulement convergent (Fig.38), avec un resserrement des courbes piézométriques près des bordures du bassin (gradient hydraulique $i=2.5\%$ à 5%), au centre et à aval du bassin, les courbes piézométriques sont plus espacées ($i=1.5\%$ à 0.5%).

Le remplissage argilo-marneux du fossé situé dans la partie nord du bassin, forme une barrière étanche qui influe :

- D'une part ; sur le sens d'écoulement des eaux souterraines, créant un axe d'écoulement au centre de bassin, orienté vers l'est séparant la partie Sud caractérisée par l'abondance des eaux souterraines (la formation gréseuse est proche de la surface) et la partie nord du bassin caractérisée par de faibles ressources en eaux souterraines compte tenu de l'épaisseur importante du remplissage argilo-marneux à minces intercalations gréseuses; la formation nettement gréseuse est très profonde, plus de 1000m) (Fig. 40).
- D'autre part, cette barrière étanche qui correspondrait beaucoup plus à une faille barrière, augmente la pression hydrostatique au niveau de l'aquifère et se traduit par la présence de certains puits artésiens dans la partie sud (exemple : forage de la ferme Abdessamed à Timgad).

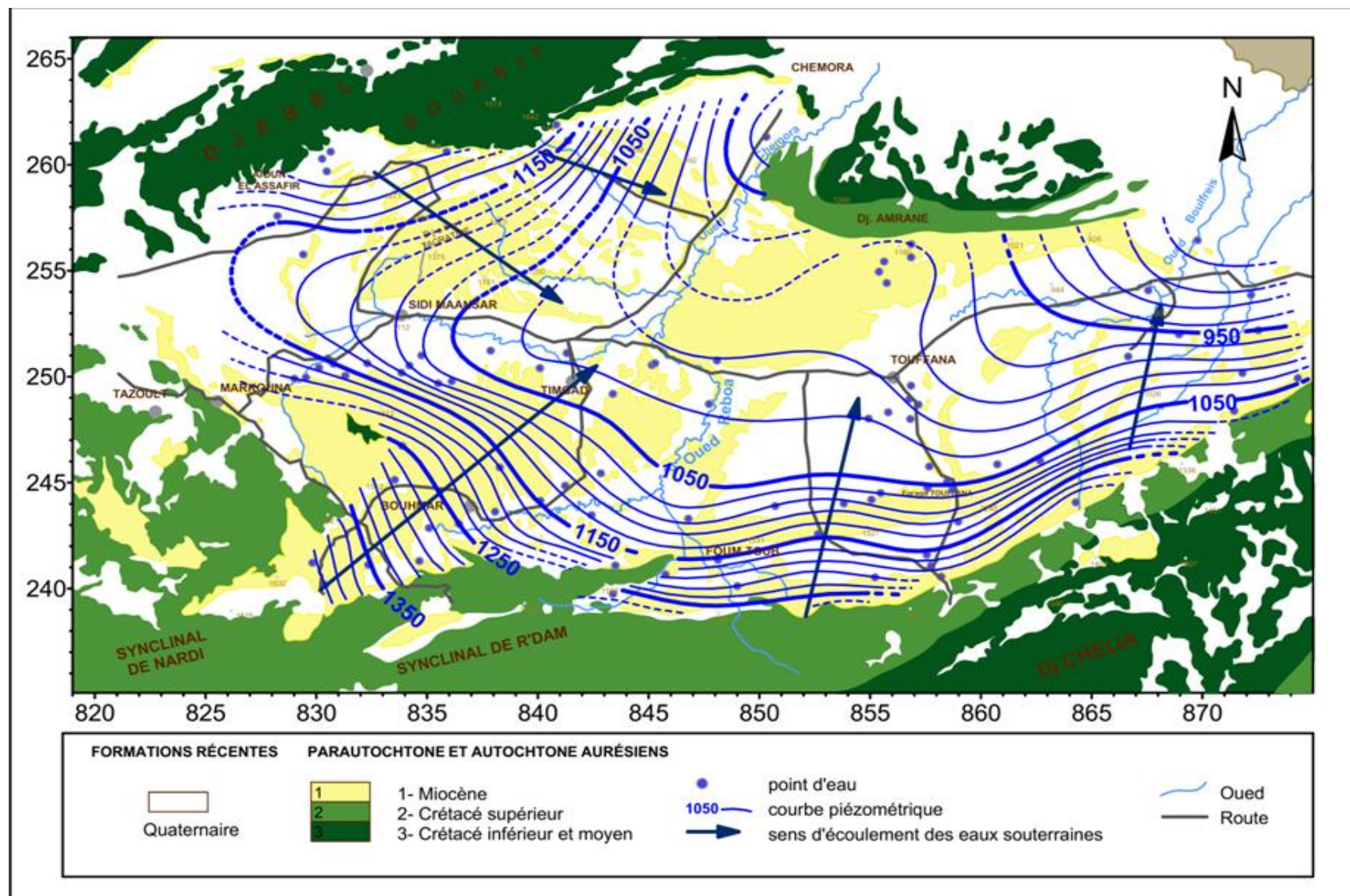


Figure N° 38 : Carte piézométrique de l'aquifère gréseux du Miocène (bassin de Timgad, Avril 2015)

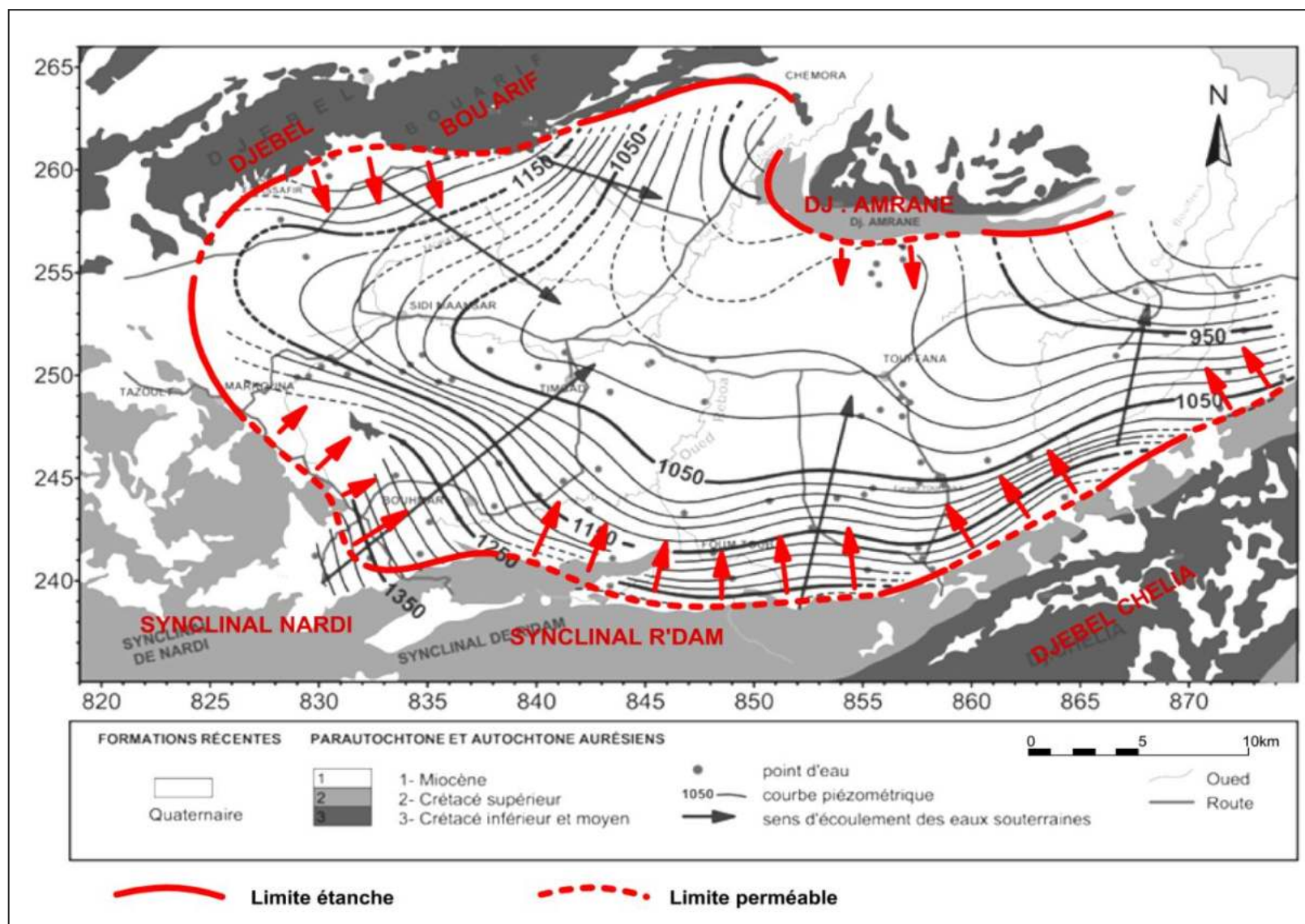


Figure N° 39 : Carte des conditions aux limites de l'aquifère gréseux du Miocène (bassin de Timgad Avril 2015)

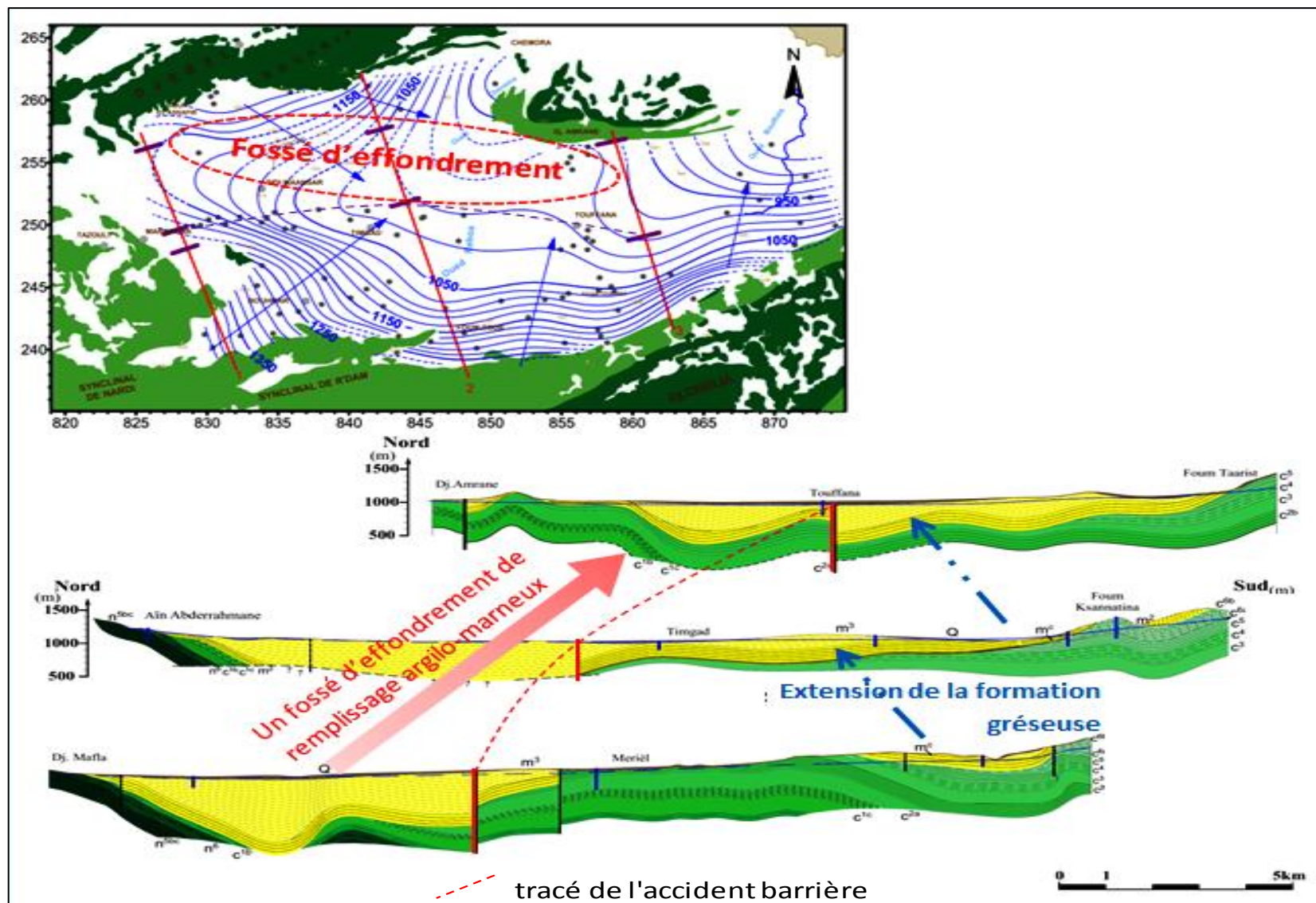


Figure N° 40 : Schéma explicatif de la structure de l'aquifère gréseux de miocène

3. Caractérisation hydrodynamique du système aquifère du bassin de Timgad

3.1. Introduction

L'exploration et l'exploitation des ressources hydriques souterraines rappellent leur grand intérêt, tant scientifique qu'économique. Cet intérêt se manifeste pour les emmagasineurs et écoulements. L'optimisation de l'exploitation des réservoirs implique une maîtrise des caractéristiques pétrophysiques, qui sont très variables au sein d'une même formation (ACHI, 2015).

Les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères s'expriment fondamentalement en termes de perméabilité, porosité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, drainance dont les relations sont complexes (PERRODON, 1985)

Les essais de pompages sont pratiqués afin d'évaluer les caractéristiques techniques d'ouvrages (essai de puits) et de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères par l'évaluation de plusieurs paramètres, notamment la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, et d'autres paramètres telle que la drainance si les piézomètres de mesure sont en nombre suffisant et captent différents niveaux aquifères (Kruseman & Ridder, 1973).

3.2. Propriétés hydrodynamiques et pétrophysiques

3.2.1. La porosité

C'est une grandeur pétrophysique permettant l'évaluation de la capacité d'un milieu poreux à emmagasiner une quantité de fluide. La porosité (\emptyset) est aussi une valeur numérique définie comme étant le rapport entre le volume des vides ou pores (V_v) et le volume total (V_t) d'un milieu poreux.

$$\emptyset = V_v / V_t \text{ (exprimée en \%)}$$

Suivant un modèle proposé par Bernabé (1991) et imagé par Fredrich, *et al.* (1993) sur les grès de Fontainebleau, on peut schématiser la porosité d'un grès exempt de particules argileuses, et par extension d'une roche granulaire, par trois types de vides, organisés en un réseau poreux tridimensionnel (fig. 41). Les pores sont situés à l'intersection de quatre grains et dispersés dans la roche. Ils sont hérités de la genèse de la roche. Ils représentent une grande part du volume poreux au sein des roches de type granulaire, mais ne contribuent à la circulation des fluides que s'ils sont connectés entre eux par l'intermédiaire de pores cylindriques plus aplatis, en forme de "tubes" ou de "fentes" ou "fissures", situés respectivement entre trois ou deux grains.

La compaction géologique peut réduire considérablement la porosité, la figure N°41, montre différentes coupes d'échantillons de grès poreux prélevés lors d'un forage mais à des

profondeurs différentes. On remarque que généralement la porosité primaire décroît avec l'augmentation de la profondeur, du fait de la réduction des vides sous l'effet de la compaction exercée par les formations sus-jacentes.

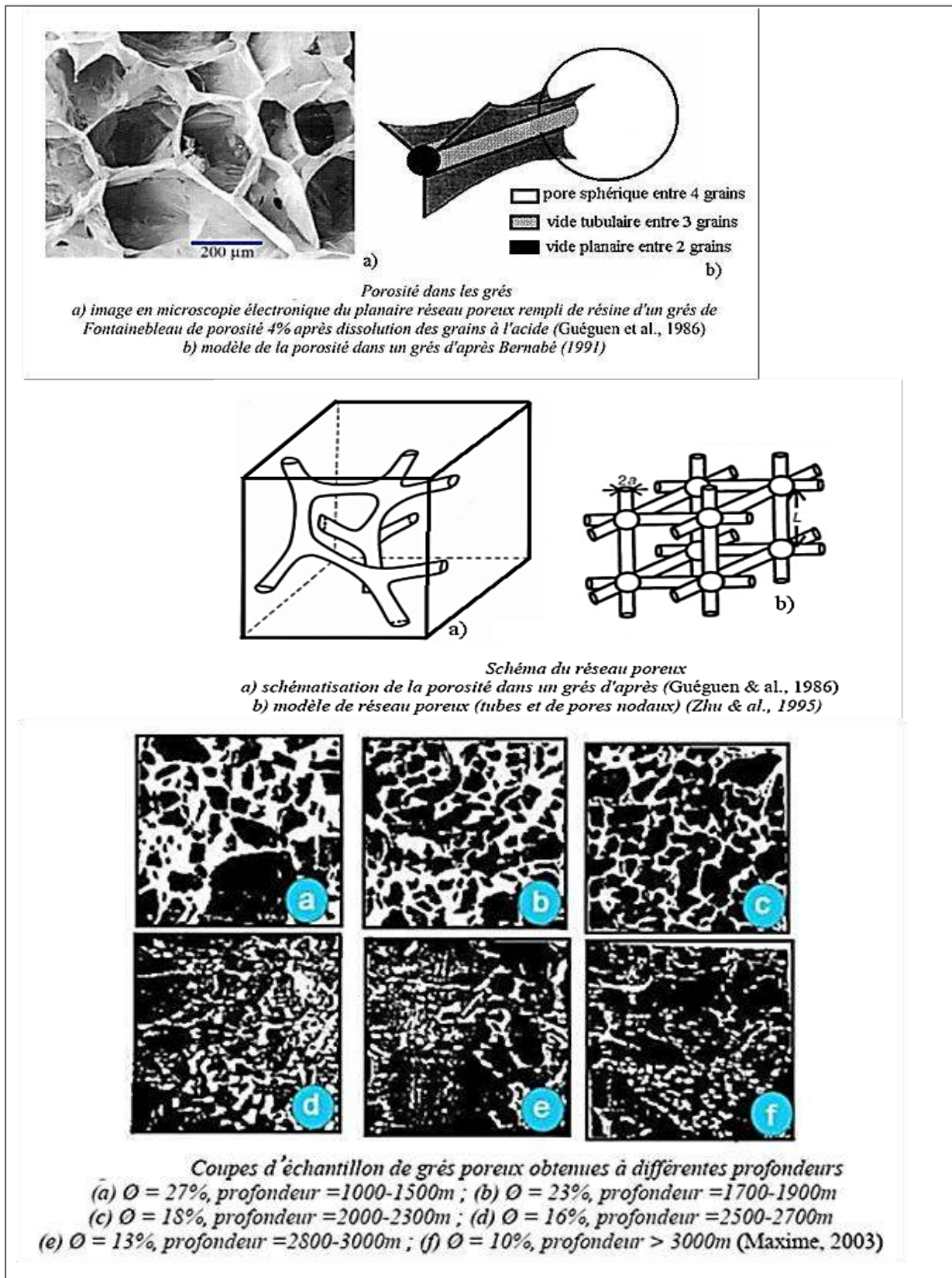


Figure N° 41 : La porosité des milieux gréseux

➤ **Classification de porosité :**

Comme indiqué dans le tableau N° 31, la proportion de la porosité efficace qui est indicatrice des vides réellement concernés par la circulation d'eau souterraine, par rapport à la porosité totale varie beaucoup d'une formation à l'autre. L'écart le plus notable est celui de l'argile dont la porosité totale peut atteindre 50%, mais sa porosité efficace est réduite à 2% au maximum

Tableau N° 31 : Porosité totale et efficace de quelques formations sédimentaires (René, 1988)

Roches poreuses	Pt (%)	Pe (%)
Sable et gravier	25 à 40	15 à 25
Sable fin	30 à 35	10 à 15
Argiles	40 à 50	1 à 2
Craie	10 à 40	1 à 5
Calcaire (fissuré)	1 à 10	10 à 20

Tableau N° 32 : Classification de la porosité (René, 1988)

Porosité \emptyset (%)	classe
$\emptyset < 5\%$	Faible
$5\% < \emptyset < 10\%$	Médiocre
$10\% < \emptyset < 20\%$	Moyenne
$20\% < \emptyset < 30\%$	Bonne
$\emptyset > 30\%$.	Excellente

La porosité est généralement mesurée au laboratoire.

3.2.2. La perméabilité

La perméabilité d'une roche caractérise son aptitude à laisser s'écouler un fluide à travers les vides qu'elle contient. (Darcy, 1856 ; Banton et Bangoy, 1997).

La perméabilité caractérise la capacité d'un milieu poreux à laisser circuler, à travers l'échantillon considéré de section (A), de longueur donnée (L) et sous une différence de pression (ΔP) (pression d'entrée et pression de sortie), des fluides (liquides ou gaz). Cette perméabilité est contrôlée par les propriétés des fluides et de la roche réservoir.

$$Q = (K / \mu) * A (P1-P2) / h$$

Avec :

Q: débit en cm³/s,

μ : viscosité en cp,

A: surface en cm², à travers laquelle se produit l'écoulement,

h : distance d'écoulement en cm,

P1 et P2 : pressions amont et aval en atm ,

K : perméabilité absolue en darcy (D).

- **Classification de la perméabilité** : Le tableau ci-après donne la classification des perméabilités.

Tableau N° 33 : Classification des perméabilités (René, 1988)

Perméabilité (mD)	classe
<1 mD	Très faible
1 à 10 mD	Faible
10 à 50 mD	Médiocre
50 à 200	Moyenne
200 à 500	Bonne
>500 mD	Excellente

- **Caractéristiques de l'espace poreux affectant la perméabilité**

La perméabilité est corrélée en premier lieu à la porosité, cette relation est souvent vague. La perméabilité est beaucoup plus conditionnée par la dimension des canaux à l'intérieur du milieu poreux que par leur abondance relative.

Dans certains cas, il a été établi une corrélation entre la porosité et la perméabilité, la relation obtenue est de type : $\log k = a\phi + b$ (Bourbié & al., 1986)

Cossé (1988) établit une relation entre Perméabilité et Porosité en se basant dans son expérience sur des modèles à tubes de différents diamètres : $k = \phi (r^2/8)$.

Un modèle plus fin peut être obtenu en tenant compte de la répartition des rayons de pores, établie à partir d'une courbe de pression capillaire, ou de l'observation de plaques minces.

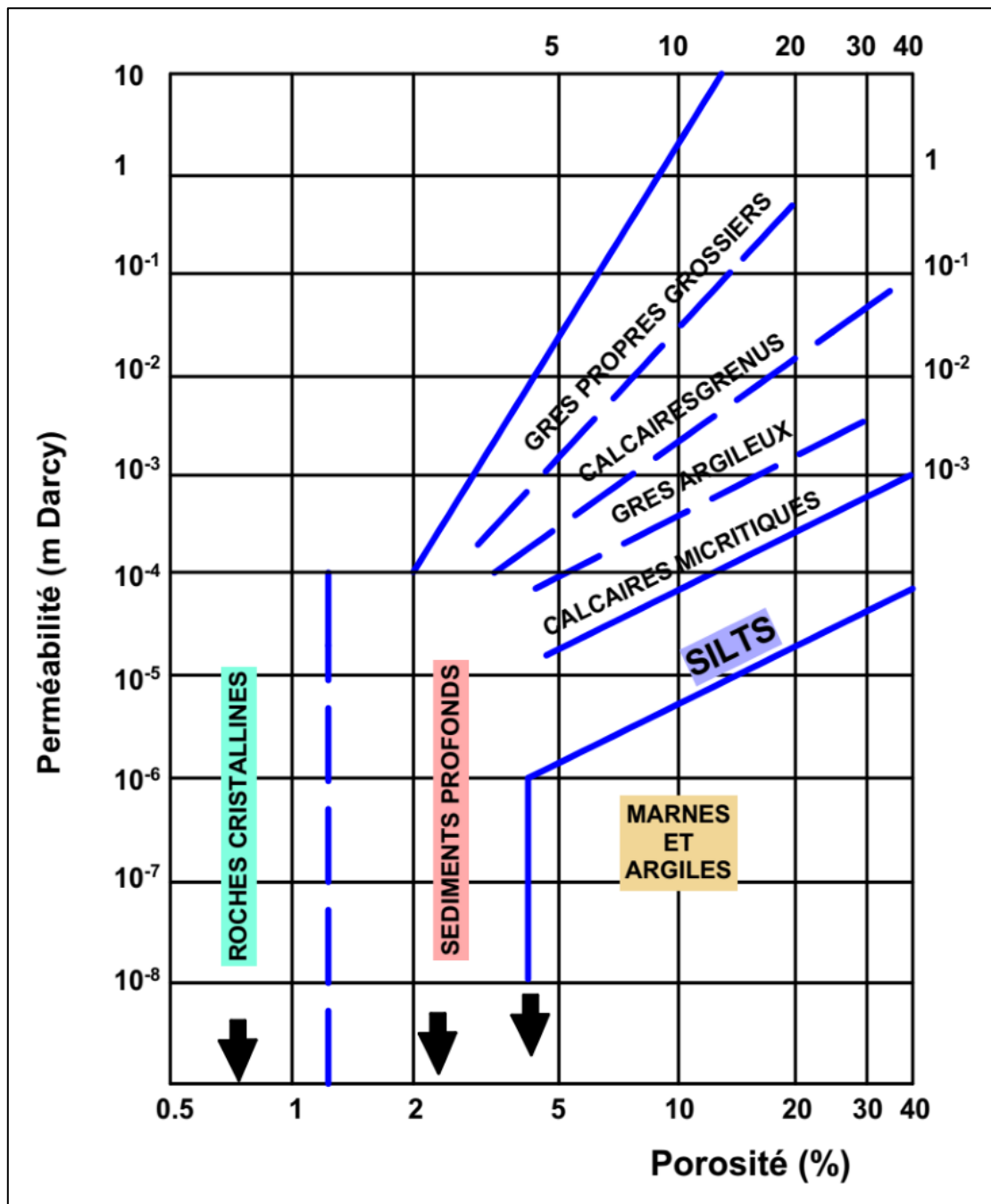


Figure N° 42 : Schématisation des relations porosité/perméabilité dans les roches (Bourbié & al., 1986)

La perméabilité est estimée au laboratoire (test de perméamétrie, sédimentométrie) sur des échantillons de sol. Concernant les milieux aquifères, on a surtout recours à des essais de pompages, à travers l'estimation de la transmissivité.

3.2.4 - La Transmissivité

La transmissivité est le produit du coefficient de perméabilité moyen par l'épaisseur de l'aquifère. Elle est donc égale au débit traversant une section normale à l'écoulement, de largeur

unitaire prise sur toute l'épaisseur de l'aquifère et sous un gradient hydraulique égal à l'unité. On l'écrit **Kd** ou **T**.

Elle a les dimensions **longueur³ / temps x longueurs**, ou encore **longueur²/ temps**; on l'exprime par exemple en **m²/s** ou en **m²/jour**.

Pour mieux apprécier la distribution de la transmissivité, une classification de celle-ci a été établie (Kouassi et al., 2012) et se présente dans le tableau suivant :

Tableau N° 34 : Classification des transmissivités (Kouassi et al., 2012)

Transmissivité (m ² /s)	classe
$T < 10^{-5}$	Faible
$10^{-5} < T < 10^{-4}$	Moyenne
$T > 10^{-4}$	Forte

3.2. Détermination de la transmissivité

L'interprétation des résultats des essais de pompages permet de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère testé (T et S).

Différentes méthodes de calculs existent et sont appliquées selon la catégorie de l'aquifère (libre, captif, semi-libre ou semi-captif) mais dépendent des piézomètres implantés et des niveaux qu'ils atteignent.

L'absence de piézomètres de mesures, fait que le plus souvent, les essais de puits (mesures réalisées dans les puits même en cours de pompage) sont traduits en essais de nappe, entraînant ainsi une marge d'erreur sur l'évaluation des paramètres hydrodynamiques.

Cette absence de piézomètres de mesures, fait qu'on a le plus souvent recours à l'utilisation des formules de Dupuit en régime permanent et à celles de Theis-Jacob en régime transitoire, sans tenir forcément compte de leurs conditions d'application. De ce fait, les résultats obtenus doivent être considérés avec une certaine prudence.

3.3.1. Interprétation des essais de pompage en régime transitoire (THEIS, 1935)

L'équation du régime transitoire, ou de Theis, provient de l'analogie entre l'écoulement souterrain et la conduction de la chaleur, et peut s'écrire par la formule :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \text{ Dans laquelle } u = \frac{r^2 S}{4Tt} \Rightarrow S = \frac{4Ttu}{r^2}$$

Avec :

s : le rabattement, mesuré dans un piézomètre situé à une distance r (en m) du puits de pompage

Q : le débit constant de pompage, en m^3/s

S : le coefficient d'emmagasinement, sans dimension.

T : la transmissivité de l'aquifère en m^2/s .

t : le temps, compté en secondes ou en minutes depuis le début de pompage.

W(u) : fonction caractéristique de Theis.

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^2}{2.2!} - \frac{u^2}{2.2!} + \dots$$

3.3.1.1. Conditions d'application

- a. L'aquifère horizontal est homogène, isotrope, infini et d'épaisseur constante ; ses paramètres hydrauliques (transmissivité T et coefficient d'emmagasinement S) sont constants ;
- b. L'aquifère est à nappe captive ;
- c. Toute l'eau pompée provient du stockage dans l'aquifère et elle est relâchée instantanément quant la pression interstitielle varie (hypothèse du transfert instantané de la pression interstitielle aux contraintes effectives « pas d'effets de consolidation » et élasticité du matériau solide de l'aquifère) ;
- d. Le puits de pompage pénètre totalement l'aquifère et son diamètre est infiniment petit ;
- e. Le puits est pompé à débit constant ;
- f. L'écoulement est en régime transitoire et respecte la loi de Darcy (écoulement laminaire).

3.3.1.1. Mode opératoire

- Construire une "courbe type" de la fonction de puits de Theis sur une feuille bi-logarithmique en portant les valeurs de $W(u)$ en fonction de u , On obtient la courbe type "normale".
- Cependant, il est souvent plus pratique d'utiliser la courbe "renversée", obtenue en portant les valeurs de $W(u)$ en fonction de $1/u$.

- Porter de la même façon sur une autre feuille bi-logarithmique de même module les valeurs de s en fonction de t .
- Superposer la courbe d'essai à la courbe type en maintenant les axes de coordonnées respectivement parallèles entre eux et chercher la meilleure coïncidence possible entre les deux courbes.
- Choisir un point de référence arbitraire A, que l'on appellera point pivot, dans la zone de chevauchement des deux feuilles et chercher pour ce point les coordonnées $W(u)$, $1/u$, s et t . Remarquer qu'il n'est pas nécessaire que le point pivot soit situé sur la courbe type. En fait, les calculs seront plus commodes si l'on choisit ce point de façon que $W(u) = 1$ et $1/u = 10$.
- Porter les valeurs de $W(u)$, s et Q dans l'équation :

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \text{ et résoudre par rapport à } T.$$

- Calculer S en remplaçant dans l'équation :

$$S = 4T(t/r^2)u \quad T, t \text{ et } u \text{ par leur valeurs.}$$

3.3.2. L'approximation de Cooper-Jacob

3.3.2.1. Étude du rabattement pendant le pompage (durant la descente)

La méthode de JACOB (COOPER et JACOB, 1946) s'appuie elle aussi sur la formule de Theis; cependant les conditions de son application sont plus restrictives que celles de la méthode de Theis.

Dans la formule de Theis

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

On peut remplacer la fonction exponentielle intégrale par un développement en série convergente. Ainsi, le rabattement s s'écrit

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^2}{2.2!} - \frac{u^2}{2.2!} + \dots)$$

A partir de $u = \frac{r^2 s}{4Tt}$ on voit que u décroît quand le temps de pompage augmente.

Ainsi, pour de grandes valeurs de t et/ou de faibles valeurs de r , les termes à droite de $\ln u$ dans la série de l'équation ci-dessus deviennent négligeables, et si $u < 0,01$, le rabattement peut s'exprimer sous la forme asymptotique

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4\pi T} \right) \quad s : \text{rabattement}; S: \text{coefficient d'emmagasinement}$$

Après arrangement et passage au logarithme décimal, cette Equation se réduit à

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

Par conséquent, si l'on porte les rabattements s en fonction du logarithme du temps t , on obtient une ligne droite. On prolonge cette ligne jusqu'à l'axe des abscisses, et le point d'intersection a pour coordonnées $s = 0$ et $t = t_0$.

Si l'on porte ces valeurs dans l'équation précédente, on obtient :

$$0 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt_0}{r^2 S}$$

Et comme $\frac{2.3Q}{4\pi T} \neq 0$, il s'ensuit que $\frac{2.25Tt_0}{r^2 S} = 1$ Soit, $S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$

Si maintenant $t/t_0=10$, d'où $\log t/t_0 = 1$ on peut remplacer s par Δs , c'est à dire par la différence de rabattement par cycle \log de temps, ce qui donne : $T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s}$

A. Conditions d'application :

On doit satisfaire aux hypothèses et conditions suivantes:

- Les mêmes conditions que celles de la méthode de Theis.
- Les valeurs de u sont faibles ($u < 0,01$), c'est à dire que r est petit ou que t est grand.

La condition que u soit faible est atteinte en une heure ou même moins dans une nappe captive si l'on n'est pas trop éloigné du puits de pompage. Par contre, dans une nappe libre, cela peut prendre 12 h ou même davantage, en considérant en plus qu'on doit se mettre assez loin du puits de pompage pour se rapprocher des conditions d'application de la formule dans le cas d'un aquifère à nappe libre.

B. Mode opératoire :

- Porter les valeurs de s en fonction du temps correspondant t sur un papier semi-logarithmique (t en échelle logarithmique) et tracer la courbe passant par les points obtenus. Une droite est par la suite ajustée aux points traduisant le régime transitoire.
- Prolonger la droite jusqu'à l'axe des temps où $s=0$, et lire la valeur de t_0 .
- Calculer la pente de la droite, c'est à dire la différence de rabattement Δs par cycle \log de temps.

$$a = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\log t_2 - \log t_1}$$

Pour un cycle logarithmique : $\log 100 - \log 10 = 1 \rightarrow a = \Delta \text{ cycle}$

$$\Delta \text{ cycle} = 0.183 \frac{Q}{T} \Rightarrow T = 0.183 \frac{Q}{\Delta_s}$$

$$\Delta = 0 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt_0}{r^2S} / \frac{0.183Q}{T} \neq 0$$

$$\log \frac{2.25Tt_0}{r^2S} = 0 \Rightarrow \log \frac{2.25Tt_0}{r^2S} = 1 \Rightarrow S = \frac{2.25Tt_0}{r^2S}$$

- Porter les valeurs de Q et de Δs dans l'équation et résoudre par rapport à T . Connaissant T et t_0 calculer S .

3.3.2.2. Étude du rabattement après l'arrêt de pompage (durant la remontée)

Après l'arrêt de pompage, la nappe continue à fournir de l'eau comme s'il y avait une poursuite fictive de pompage, mais d'un autre côté l'eau remonte dans le puits comme s'il y avait injection de débit dans le puits après t_a (Menani, 1991)

Les rabattements observés après l'arrêt de pompage résultent donc :

- D'un rabattement (s_1) qui est dû à la poursuite fictive de pompage à un débit Q et pendant un temps (t).
- A un rabattement (s_2) qui est dû à une injection fictive qui se produit à partir de l'arrêt de pompage (t').

Ces rabattements, on les appelle : **rabattements résiduels.**

$$s = s_1 - s_2 \Rightarrow s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} - \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt'}{r^2S}$$

$$\Rightarrow s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t}{t'} \text{ Avec :}$$

Avec :

s : rabattements après l'arrêt de pompage (m).

t : temps compté depuis le début de pompage (secondes ou minutes).

t' : temps compté depuis l'arrêt de pompage (secondes ou minutes).

T : transmissivité (m^2/s)

3.4. Estimation et répartition des paramètres hydrodynamiques du système aquifère du bassin de Timgad

L'étude hydrodynamique est essentiellement basée sur l'interprétation des essais de pompage issue des différentes fiches techniques de forage. L'interprétation de ces essais repose sur les expressions hydrodynamiques en régime transitoire de Theis (1935) et de Jacob (1947).

- ✓ Les mesures de rabattements disponibles sont uniquement celles du forage de pompage vu l'absence des piézomètres d'observation.
- ✓ En théorie, pour pouvoir utiliser les approximations de Theis et de Jacob, en régime transitoire, certaines conditions doivent être remplies. Les pompages d'essai réalisés ne vérifient pratiquement jamais l'intégralité de ces conditions.
- ✓ Dans le cadre de cette étude, nous travaillons sur deux milieux différents (grès et calcaires) qui présentent deux classes de porosité différentes (porosité d'interstice et porosité de fissure).
- ✓ Les méthodes de Theis et Jacob sont appliquées généralement dans les milieux de porosité d'interstice, tandis que certains essais sont appliqués sur des milieux carbonatés sans que l'on sache si la densité de fissure est importante au point d'être assimilée à une porosité d'interstice et si l'écoulement est laminaire ou turbulent (ce qui serait le cas dans les cavités ouvertes). De ce fait, les résultats doivent être considérés avec réserve.
- ✓ Il ne nous a pas été possible d'évaluer les coefficients d'emmagasinement des aquifères en raison de l'absence de piézomètres.

3.4.1. Essais de pompages effectués dans le bassin de Timgad

Plusieurs essais de pompages ont été réalisés au niveau du bassin, les forages ont été choisis de sorte à couvrir la totalité du bassin en terme d'estimation des transmissivités et leur répartition spatiale.

Tableau N° 35 : Description des forages

N°	forage	nature d'aquifère	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof (m)	NS (m)	s (m)	Q (l/s)
01	THNIET EL-KHORCHEF	calcaire et marno-calcaire	845,20	250,50	1060	300	42,75	31,87	20
02	AIN ABDERAHMANE	calcaire et marno-calcaire	840,53	262,17	1268	150	3,75	123,4	10,2
03	SIDI MAANSER 4	grès et marne	833,89	250,20	1182	400	96,2	39,1	10
04	THENIA EL BEIDA	calcaire et marno-calcaire	860,11	256,67	991	250	68,3	46,33	14
05	AIOUN EL ASSAFER	Grès et marne	835,87	260,71	1273	222	47,18	16,28	17
06	OUED TAGA	Grès et marne	838,09	245,10	1155	200	86,73	0,47	22
07	FOUM TOUB	grès et marne	848,78	241,58		250	22,5	78	15
08	CHORFA TAOUZIANET	grès et marne	871,01	256,33	888	185	27,47	4,36	5
09	YABOUS Y3	grès et marne	858,50	244,90	1100	250	74,55	28,96	5

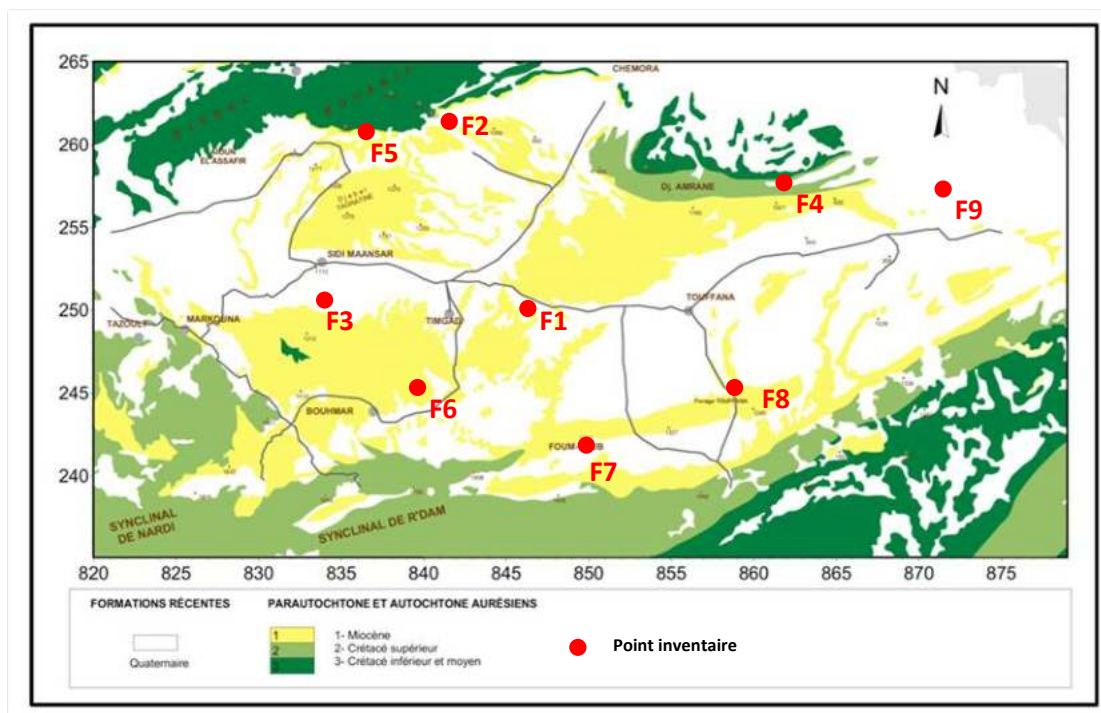


Figure N° 43 : Carte d'inventaire des points d'eau (essais de pompage)

Les transmissivités ont été évaluées à l'aide des méthodes de Theis et Cooper-Jacob, les résultats sont mentionnés dans le tableau N°36.

Exemple d'application de la méthode de Theis (le forage de Chorfa)

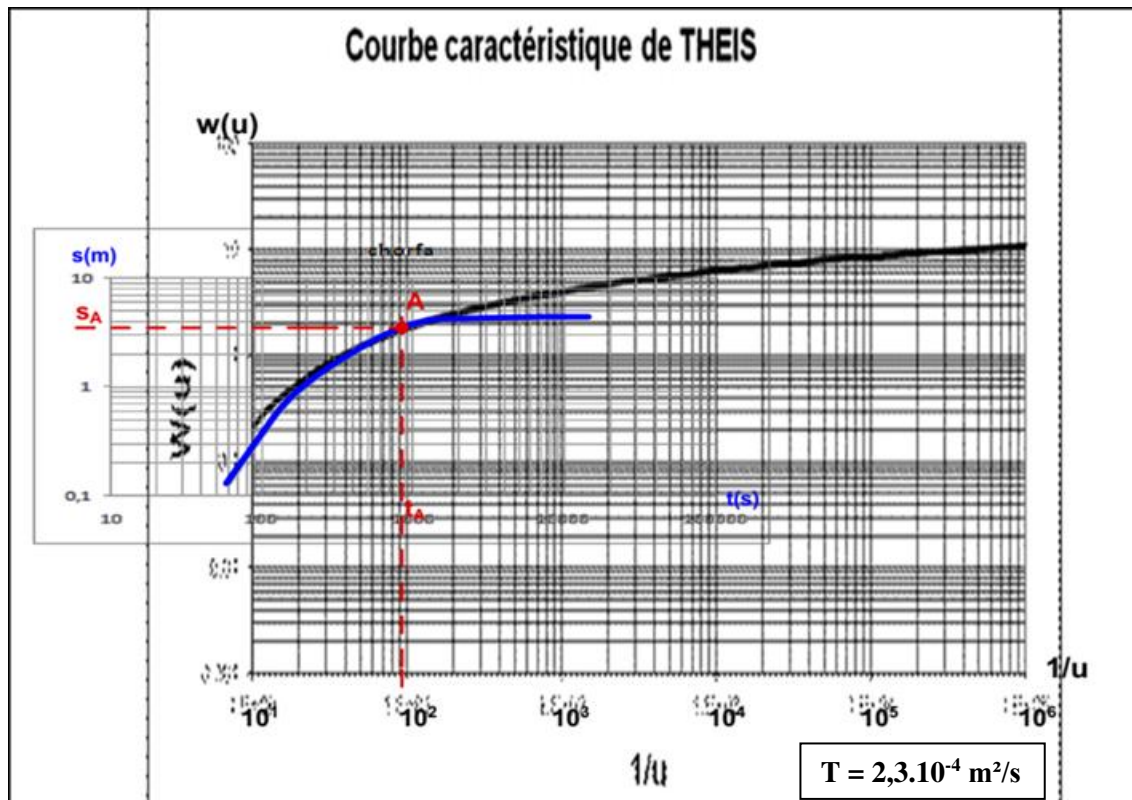


Figure N° 44 : Application de la méthode de Theis sur le forage de Chorfa

Exemple d'application de la méthode de Cooper-Jacob (forage de Chorfa)

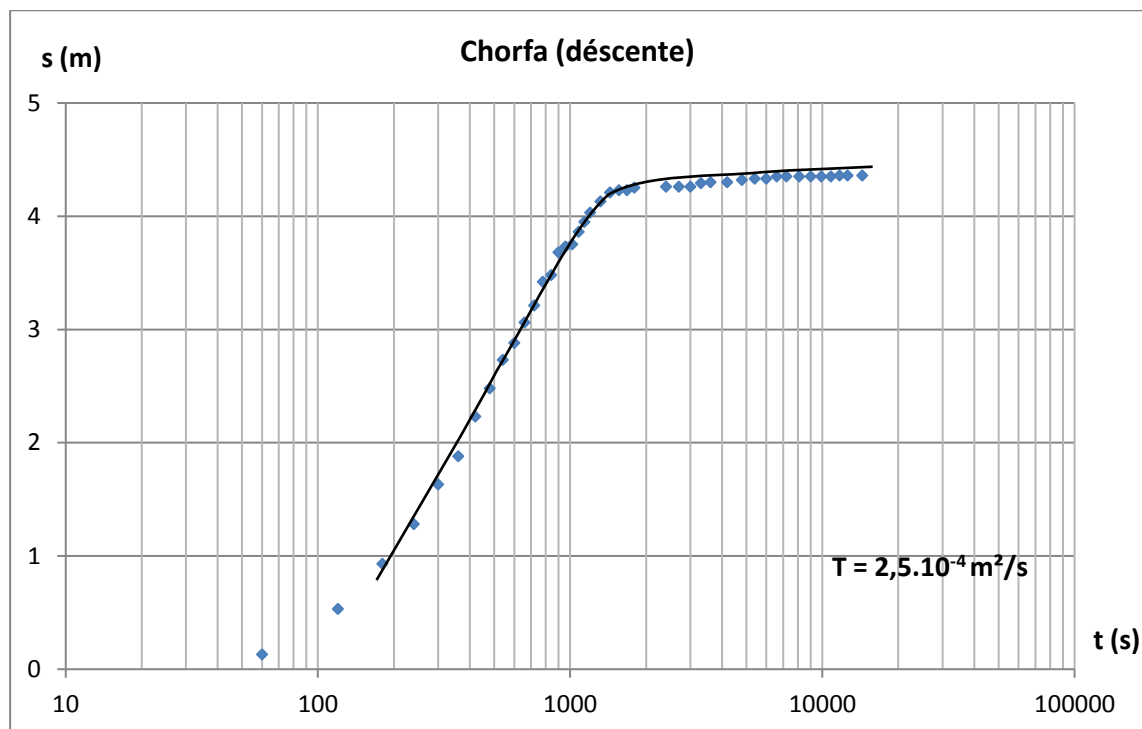


Figure N° 45 : Application de la méthode de JACOB sur le forage de Chorfa (durant la descente)

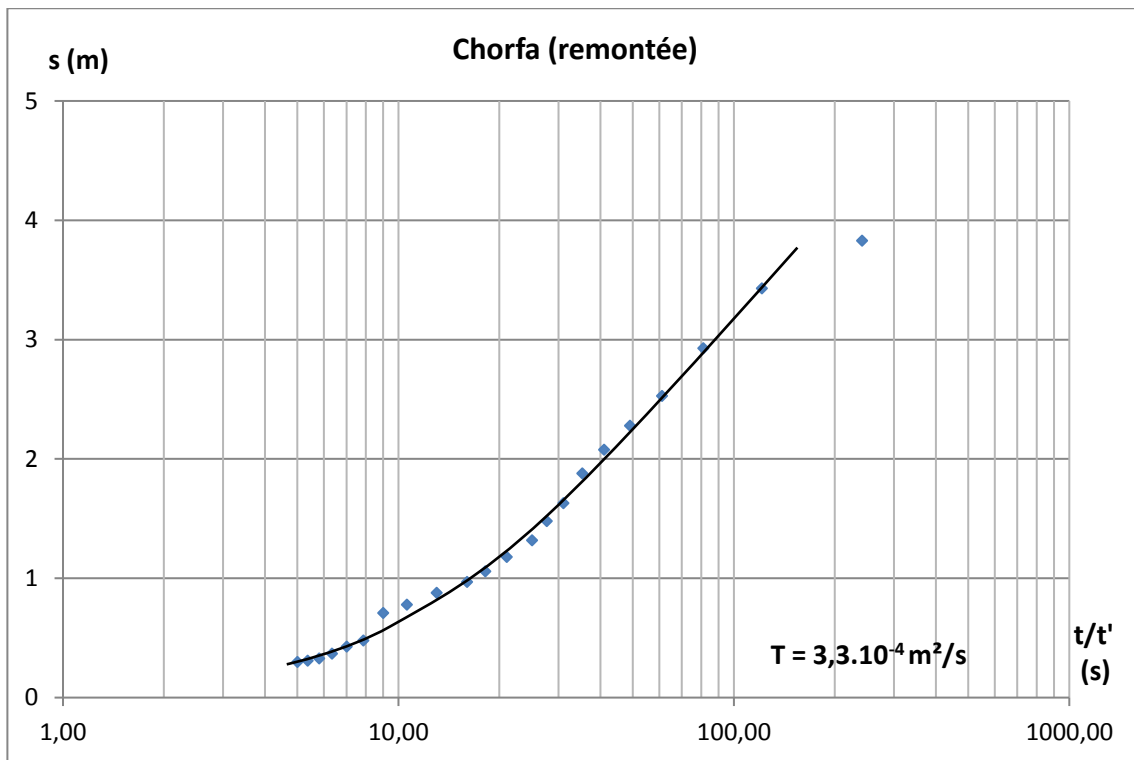


Figure N° 46 : Application de la méthode de JACOB sur le forage de Chorfa (durant la remontée)

3.4.2. Interprétation des résultats des essais

Concernant l'aquifère gréseux, les résultats obtenus par les deux méthodes (Theis/Jacob) montrent que presque toutes les valeurs de transmissivité sont de l'ordre de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, traduisant ainsi le même comportement hydrodynamique de l'aquifère gréseux, à l'exception du forage N° 06 (Oued Taga) qui se trouve en bordure sud-ouest du bassin, où on obtient une transmissivité nettement plus élevée ($10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$), et un rabattement de 0.47m, et ce au bout de 3 heures de pompage et la remontée est quasi instantanée, en 2 minutes le niveau d'avant pompage est pratiquement rétabli, ce qui traduit la bonne réalimentation de l'aquifère à cet endroit.

Concernant l'aquifère carbonaté, il a été testé au forage N°02 (Ain Abderrahmane). Un rabattement très important qui dépasse 120m a été observé au bout de 72 heures de pompage, pour une transmissivité assez faible de l'ordre de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, cela dénote la complexité de la circulation souterraine en milieu carbonaté sous porosité de fissures.

Pour l'ensemble des forages, le débit de pompage varie entre 10 et 22 l/s, ce qui traduit une bonne capacité de rétablissement des niveaux statiques au niveau de l'aquifère, précisément les forages de la partie sud-ouest du bassin qui est très proche des limites d'alimentation. En revanche dans la partie avale du bassin, les forages 08 et 09 (Chorfa, yabous Y3) ont des débits

assez faibles 5 l/s, en relation avec la nature plus argileuse de l'aquifère à ces endroits, où seules les minces intercalations gréseuses sont débitrices.

D'après l'ensemble des valeurs de transmissivités ; l'aquifère gréseux est classé dans la classe moyenne ($10^{-5} < T < 10^{-4}$ m²/s, selon Kouassi et al., 2012). La transmissivité varie d'un forage à l'autre suite au changement de faciès. Les forages qui ont une transmissivité élevée captent probablement un aquifère composé d'un grès grossier, faiblement cimenté et moins compact qui augmente sa perméabilité. En effet, les descriptions géologiques des affleurements des grès du Tortonien montrent des grès blancs grossiers, en bancs plurimétriques, à abondantes dragées de quartz (diamètre allant jusqu'à 2cm), rarement alternés avec des films argileux (Djebel Chelia).

En revanche les forages qui ont de faibles transmissivités captent généralement de minces formations gréseuses intercalées dans une matrice où les argiles sont prédominantes, notamment dans la partie avale du bassin.

Tableau N° 36 : Transmissivités obtenues selon Theis et Cooper-Jacob

N°	Forage	Coordonnées			Theis	Cooper-Jacob		
		X (m)	Y (m)	Z (m)	T (m ² /s)	Td (m ² /s)	Tr (m ² /s)	Tmoy (m ² /s)
01	THNIET EL-KHORCHEF	845,200	250,500	1060	$3,9.10^{-4}$	$1,8.10^{-4}$	$3,7.10^{-3}$	$1,9.10^{-3}$
02	AIN ABD - RAHMANE	840,533	262,173	1268	$4,1.10^{-5}$	$5,8.10^{-5}$	$2,1.10^{-5}$	$4,0.10^{-5}$
03	SIDI MAANCER 4	833,892	250,198	1182	$1,9.10^{-4}$	$3,7.10^{-4}$	$2,6.10^{-4}$	$1,48.10^{-4}$
04	THENIA EL BEIDA	860,111	256,656	991	$2,8.10^{-4}$	$2,3.10^{-4}$	$1,1.10^{-4}$	$1,7.10^{-4}$
05	AIOUN EL ASSAFER	835,866	260,705	1273	$2,7.10^{-4}$	$3,9.10^{-4}$	$1,3.10^{-4}$	$8,1.10^{-4}$
06	OUED TAGA	838,018	245,104	1155	$3,9.10^{-2}$	$4,0.10^{-2}$	$2,1.10^{-2}$	$3,0.10^{-2}$
07	FOUM TOUB	848,782	241,585	1152	$1,3.10^{-4}$	$3,4.10^{-4}$		$3,4.10^{-4}$
08	CHORFA	871,009	256,334	888	$2,3.10^{-4}$	$2,5.10^{-4}$	$3,3.10^{-4}$	$3,3.10^{-4}$
09	YABOUS Y3	858,500	244,900	1100		$6,0.10^{-4}$	$9,0.10^{-4}$	$9,0.10^{-4}$

4. Conclusion

Le bassin de Timgad constitue un système aquifère dont le plus important est l'aquifère gréseux miocène (Tortonien) qui est captif et même artésien (sud-ouest du Bassin) avec une épaisseur importante (200m), et une large étendue. Il est alimenté essentiellement par les massifs septentrionaux des Aurès de nature carbonatée d'âge crétacé. L'écoulement des eaux souterraines est orienté principalement vers l'est du bassin (région de Bou el Freis). La partie nord du bassin contient un important fossé d'effondrement de remplissage argilo-marneux, ce dernier forme une barrière étanche, influant sur le sens d'écoulement des eaux souterraines et l'augmentation de la pression au niveau de l'aquifère, ce qui explique la présence de certains points artésiens dans la partie sud (Oued Taga et Timgad). Les eaux souterraines sont en général facilement accessibles, à l'exception de la partie nord du bassin, là où le remplissage argilo-marneux est plus épais (plus de 1000m) jamais encore dépassé par sondage.

Les transmissivités de l'aquifère des grès du Tortonien sont de l'ordre de 10^{-4} m²/s, sauf à Oued Taga, où elle est de l'ordre de 10^{-2} m²/s, en raison de la nature des grès plus grossiers et de l'excellente réalimentation par les bordures.

Les formations carbonatées présentent des transmissivités plus faibles, comme à Ain Abderrahmane (10^{-5} m²/s) dénotant la complexité de la circulation souterraine en milieu carbonaté sous porosité de fissures.

Pour l'ensemble des forages, le débit d'exploitation varie entre 10 à 22 l/s. Ils sont plus élevés dans la partie sud-ouest du bassin qui est très proche des limites d'alimentation. En revanche, dans la partie aval du bassin, les débits sont plus faibles, de l'ordre de 5 l/s, en raison de la prédominance des formations argileuses.

Chapitre VI :

LE CADRE HYDROCHIMIQUE

1. Introduction

L'hydrochimie est une discipline très complexe et aujourd'hui d'une importance toujours plus grande, face en particulier aux importants problèmes de contamination des eaux. La qualité des eaux souterraines est fonction de nombreux paramètres tels que : (le type d'alimentation « pluie ou eau superficielle », la nature des terrains traversés, le temps de séjour, la profondeur de la nappe, ...etc).

La qualité des eaux dépend en faible partie des eaux de pluie ; elle dépend surtout des interactions géochimiques et biologiques qui les affectent dans le sol et / ou dans la nappe. Le rôle du sol est généralement majeur dans l'acquisition des caractères chimiques des eaux souterraines.

Les interactions eau-roche se traduisent par la mise en solution de parties du squelette rocheux ou par la précipitation de substances contenues dans la roche (Zwahlen.F & Renard. P, 2002).

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier la variation chimique des eaux souterraines à travers tout le bassin et comprendre les différents facteurs responsables de leur minéralisation.

2. Méthodologie de travail :

31 échantillons ont été prélevés en des points bien répartis pour assurer la couverture de la totalité de bassin de Timgad à l'exception des zones dépourvues de forages. Le prélèvement a été effectué après plusieurs purges (pompage de 10mn) du volume de la colonne d'eau. La collecte des échantillons est de rincer et remplir des flacons en plastique (1.5l) stériles préparés au préalable avec de l'eau souterraine provenant directement du tubage en sortie de puits. La fermeture des flacons doit être étanche, et le transport des échantillons du terrain au laboratoire doit être à l'abri de la lumière et au froid. Les analyses chimiques des éléments majeurs (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{-2} , NO_3^-) ont été réalisées durant la semaine qui a suivi la campagne de prélèvements au niveau du laboratoire d'hydrogéologie de la faculté des sciences de la terre de l'Université de Constantine.

Les résultats ont été traités par différents logiciels pour l'opération d'interprétation.

- Tout d'abord, une analyse statistique descriptive a été réalisée, l'objectif principal est l'étude du mode de la répartition spatiale des résultats (CV - coefficient de variation)

pour voir l'amplitude entre les valeurs minimales et maximales et leur répartition dans le bassin,

- Puis, ces résultats ont été portés sur le diagramme de Piper pour déterminer les familles chimiques. Afin d'avoir une approche sur l'évolution du chimisme des eaux dans l'espace aquifère, on a étudié les ions dominants qui apparaissent dans les faciès caractéristiques selon l'axe d'écoulement.
- Dans le but de déterminer les principaux facteurs qui contrôlent le chimisme des eaux souterraines, une analyse en composantes principales (ACP) a été également appliquée aux résultats des analyses chimiques. C'est une technique d'analyse statistique, permettant une représentation graphique des liens entre variables n et des positions des individus par rapport aux vecteurs de ces variables. Les graphiques sont construits à partir de la matrice des corrélations et l'ACP représente graphiquement les liens selon les facteurs choisis. Cette méthode a été adoptée dans de nombreuses études hydrogéochimiques (Blavoux et Mudry 1985, Lasne 1992, Muet 1985, Maqsoud 1996, Abdelkadir, 2004 et de nombreux autres auteurs).
- Enfin, on déterminera l'origine de la salinité des eaux et les mécanismes d'acquisition du chimisme en utilisant l'évolution des éléments chimiques et leurs relations les uns par rapport aux autres. Nous ciblerons dans cette partie l'origine et l'évolution des éléments chimiques et le processus géochimique de l'évolution de la salinité en utilisant le facteur de concentration (F_c).

3. Présentation et interprétation des paramètres physico-chimiques des eaux du bassin de Timgad

3.1. Analyse d'ensemble :

L'analyse statistique des éléments physico-chimiques nous permet en plus de l'étude de la variation des paramètres mesurés, la possibilité d'un suivi de l'importance de la concentration d'une zone par rapport à une autre. On utilise le coefficient de variation CV (le pourcentage de l'écart type par rapport à la moyenne) qui tient compte de l'ensemble des données. Plus le CV est faible ($CV < 50\%$), plus les données sont dispersées autour de la moyenne (homogénéité dans l'amplitude des teneurs observées). Inversement, plus le CV est élevé, plus les données sont dispersées loin de la moyenne.

3.1.1. Présentation de la qualité des eaux souterraines :

Les analyses chimiques des eaux des différents aquifères (les grès du Miocène et les calcaires du Crétacé), ont permis d'apprécier le contexte géochimique et de définir les caractéristiques fondamentales des eaux souterraines du bassin de Timgad.

Les paramètres physiques (conductivité, pH) et éléments chimiques majeurs (Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl, SO_4 , NO_3) qui ont été dosés au laboratoire, figurent dans le tableau N°37.

Le contrôle de la validité de ces résultats d'analyses chimiques a été effectué à l'aide de la balance ionique ; où nous n'avons retenu que les analyses ayant une balance ionique inférieure à 6%.

Tableau N° 37 : Données statistiques des éléments physico-chimiques des eaux souterraines.

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
HCO_3^-	(mg/l)	225,70	451,40	309,92	64,68	20,87
Cl^-	(mg/l)	07,10	177,50	46,53	41,36	88,90
SO_4^{2-}	(mg/l)	22,00	400,00	173,48	112,02	64,57
NO_3^-	(mg/l)	00,00	56,00	7,68	16,55	215,59
Ca^{+2}	(mg/l)	48,10	196,40	99,04	33,18	33,51
Mg^{+2}	(mg/l)	4,68	74,16	31,72	19,44	61,30
Na^+	(mg/l)	12,19	164,20	59,98	40,27	67,13
K^+	(mg/l)	00,02	04,12	00,60	00,94	156,69
Cond	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	360,00	1 860,00	867,74	366,35	42,22
pH		06,60	8,40	7,10	0,33	04,70

3.1.2. Résultats de la statistique descriptive

Les résultats physico-chimiques sont utilisés pour la caractérisation de la salinité des eaux et leurs répartitions spatiales dans le bassin.

Les résultats obtenus de CV, (tab.37) diffèrent d'une variable à l'autre ;

- L'ensemble des variables (HCO_3^- , Ca^{+2} , Cond et pH) sont distinguées par des valeurs de CV inférieures à 50% respectivement (**20.87**, **33.51**, **42.22**, **4.70**) traduisant une faible amplitude entre la valeur minimale et maximale montrant ainsi une répartition spatiale assez homogène des ions (HCO_3^- , Ca^{+2}) dans le bassin.
- Les variables (Mg^{+2} , Na^+ , SO_4^{-2}) présentent un CV qui avoisine 50% respectivement (**61.30**, **67.13**, **64.57**) traduisant une certaine hétérogénéité de la répartition spatiale de ces ions dans le bassin due généralement à l'augmentation de leur concentration durant leur parcours souterrain selon les axes d'écoulement.
- Par contre, pour le reste des variables (NO_3^- , K^+ , Cl^-) le CV est supérieur à 50%, principalement les nitrates (NO_3^- : **215.59**) et (K^+ : **156.69**) mettant en évidence la grande variabilité des teneurs ; ceci peut être expliqué par des causes anthropiques (utilisation des engrais de type NPK d'une façon irrégulière) pour le Cl^- , un CV qui atteint la valeur de 90% témoigne d'une grande amplitude entre les valeurs minimales et maximales ainsi que leur répartition.

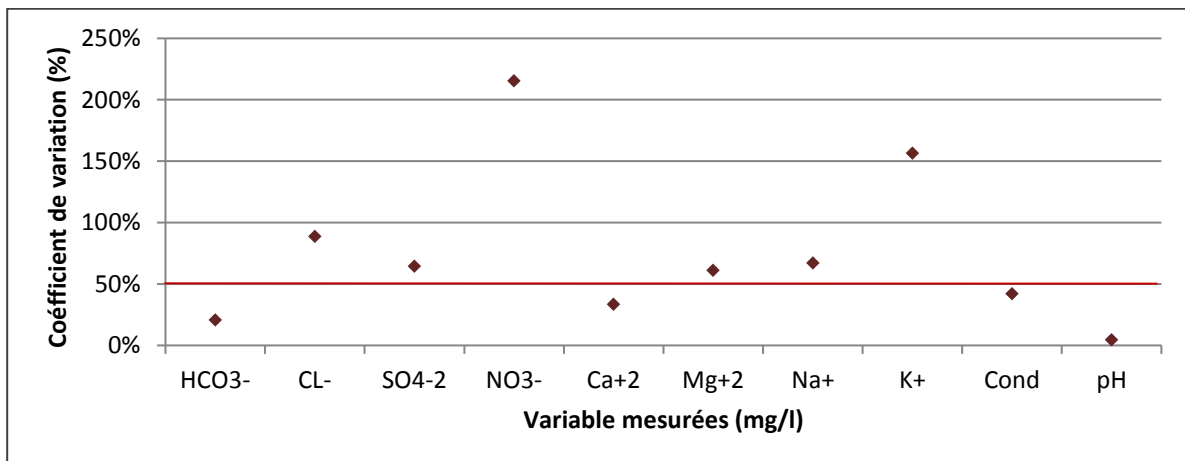


Figure N°48 : Taux de coefficient de variation des variables physico-chimiques mesurées des eaux souterraines

3.2. Analyse détaillée :

L'analyse s'intéresse à étudier chaque élément individuellement, et évaluer sa concentration afin de déterminer sa conformité aux normes de potabilité. Ces normes ont été établies notamment pour fixer les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives et susceptibles d'être présentes dans l'eau (Normes algériennes du ministère des ressources en eau depuis 22 mars 2011). Le fait qu'une eau soit conforme aux normes, c'est-à-dire potable, ne signifie donc pas qu'elle soit exempte de matières polluantes, mais que leur concentration a été jugée suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur.

Tableau N° 38 : Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine
(Normes algériennes, journal officiel de la république Algérienne N° 18, 2011)

Paramètres	unité	Valeurs indicatives
pH	/	6 < PH < 9
Température	C°	25
Conductivité	μS/cm	2800
TDS	mg/l	1000
Turbidité	NTU	5
Chlorure « Cl »	mg/l	500
Bicarbonates « HCO ₃ »	mg/l	/
Sulfates « SO ₄ »	mg/l	400
Nitrates « NO ₃ »	mg/l	50
Calcium « Ca »	mg/l	200
Magnésium « Mg »	mg/l	150
Sodium « Na »	mg/l	200
Potassium « K »	mg/l	12
Zinc « Zn »	mg/l	5
Cuivre « Cu »	mg/l	2
Fer « Fe »	mg/l	0.3

3.2.1. Le calcium (Ca²⁺) :

Les sels de calcium sont très fréquents dans les eaux naturelles. La teneur en calcium dépend de la nature géologique des terrains traversés par les eaux souterraines. Cette teneur entre, pour une large part, dans la définition de la dureté de l'eau.

L'ion calcium est obtenu, en majorité, par l'attaque par le CO₂ dissous (acide carbonique) des roches calcaires et dolomitiques ou par simple dissolution sous la forme de sulfates de calcium dans le cas de gypse ((CaSO₄)₂H₂O).

L'analyse des ions calcium a été effectuée au laboratoire, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau N° 39.

Tous les points d'eau du bassin présentent des concentrations inférieures à la norme de potabilité des eaux (200 mg/l), (Fig. 49).

Tableau N° 39 : Statistique élémentaire de l'ion calcium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
Ca ⁺²	(mg/l)	48,10	196,40	99,04	33,18	33,51

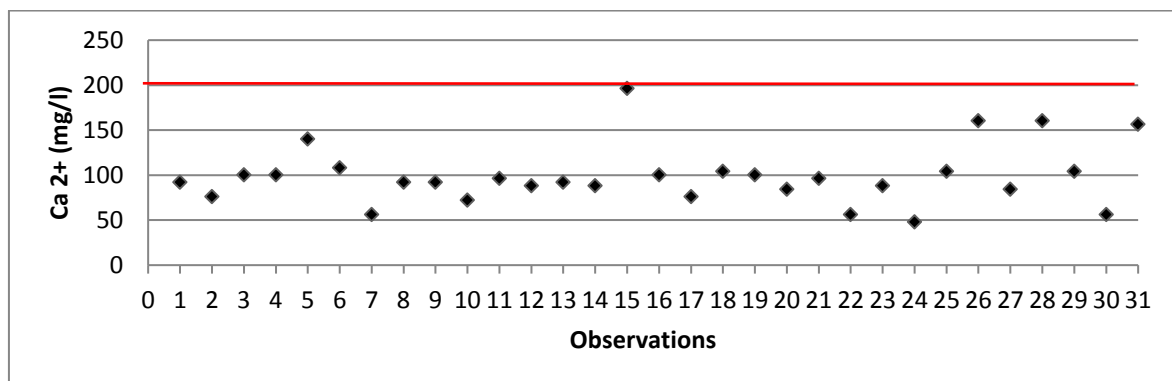


Figure N° 49 : Variation de l'ion calcium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.2. Le magnésium (Mg⁺²) :

La teneur en magnésium dépend, comme celle du calcium, de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonate, de bicarbonate et de magnésite (les calcaires dolomitiques et les roches évaporitiques). Le magnésium contribue à la dureté de l'eau. Il est important dans les formations évaporitiques avec un rapport Mg/Ca dépassant en général "1". Par contre, dans les eaux bicarbonatées ce rapport est en général inférieur à "1".

Le tableau N° 40 englobe les résultats de l'ion magnésium. Les eaux souterraines de du bassin de Timgad sont pauvres en magnésium où la majorité des points d'eau présentent des concentrations inférieures à 50 mg/l.

Tableau N° 40 : Statistique élémentaire de l'ion Magnésium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
Mg ²⁺	(mg/l)	4,68	74,16	31,72	19,44	61,30

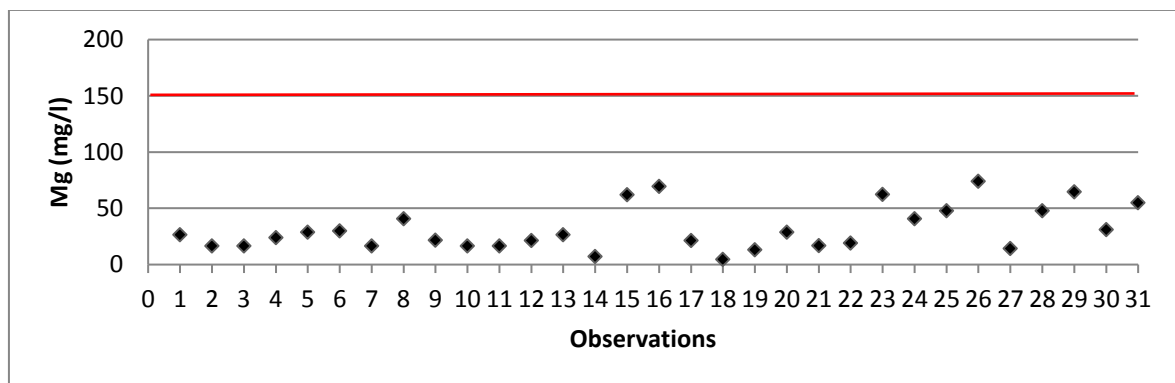


Figure N° 50 : Variation de l'ion Magnésium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.3. Le sodium (Na⁺) :

Les teneurs en sodium dans l'eau proviennent généralement de la dissolution des terrains salés. Il peut aussi provenir de l'activité humaine qui utilise beaucoup de sels de sodium.

Les teneurs de l'ion Sodium dans les eaux souterraines sont inférieures à la norme de potabilité.

Tableau N° 41 : Statistique élémentaire de l'ion Sodium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
Na ⁺	(mg/l)	12,19	164,20	59,98	40,27	67,13

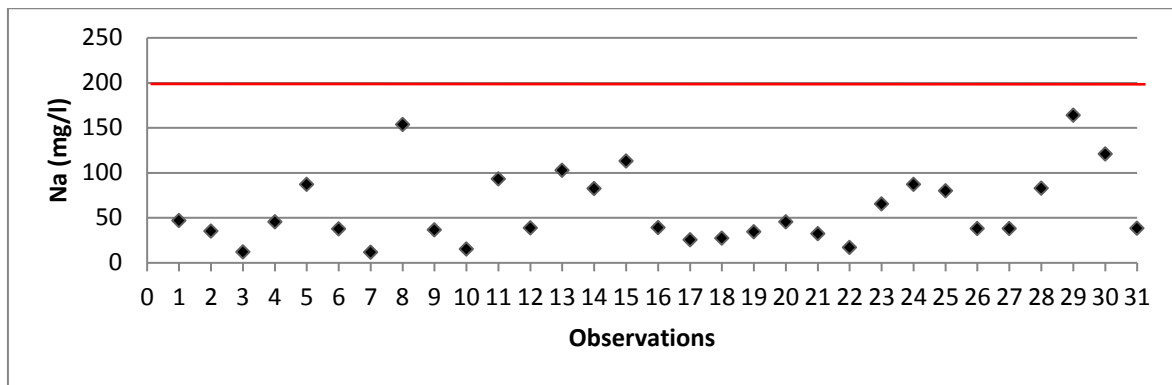


Figure N° 51 : Variation de l'ion Sodium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.4. Le potassium (K⁺) :

Le potassium est un élément normal des eaux, avec des concentrations largement inférieures à celles du sodium. Les valeurs de concentration en K (tab. 42) montrent des concentrations ne dépassant pas la norme.

L'ion K⁺ n'est pas d'une grande importance et sa teneur dans l'eau est très faible, les teneurs variant entre 0.02 et 4.12mg/l pour une valeur moyenne de 0.6mg/l. L'ion K⁺ n'a pas un rôle significatif dans la minéralisation. Il pourrait venir de la dissolution du KCl utilisé dans les engrais.

Tableau N° 42 : Statistique élémentaire de l'ion Potassium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
K ⁺	(mg/l)	00,02	04,12	00,60	00,94	156,69

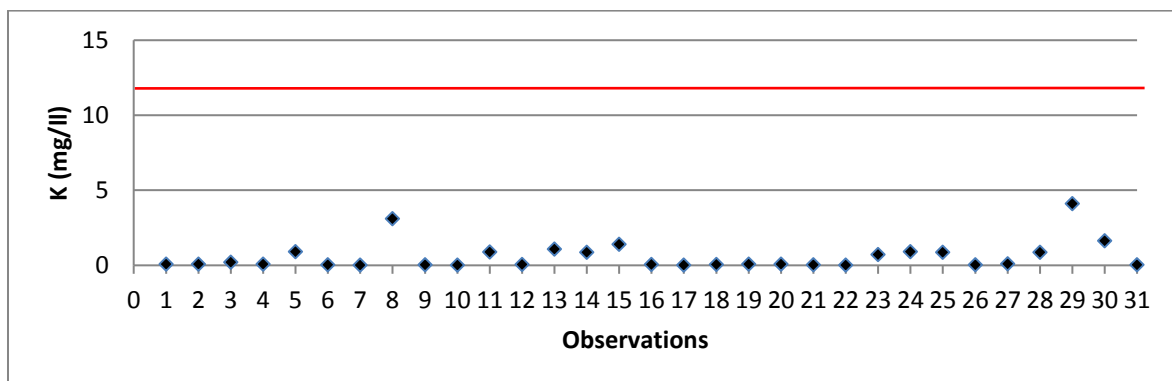


Figure N° 52 : Variation de l'ion Potassium dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.5. Les chlorures (Cl⁻) :

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables. L'origine peut être naturelle avec la dissolution des terrains salés ou anthropique (pollution).

Les teneurs rencontrées dans les eaux souterraines en ion chlorure sont généralement faibles. Les moyennes des concentrations sont dans les normes.

Tableau N° 43 : Statistique élémentaire des chlorures dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
Cl ⁻	(mg/l)	07,10	177,50	46,53	41,36	88,90

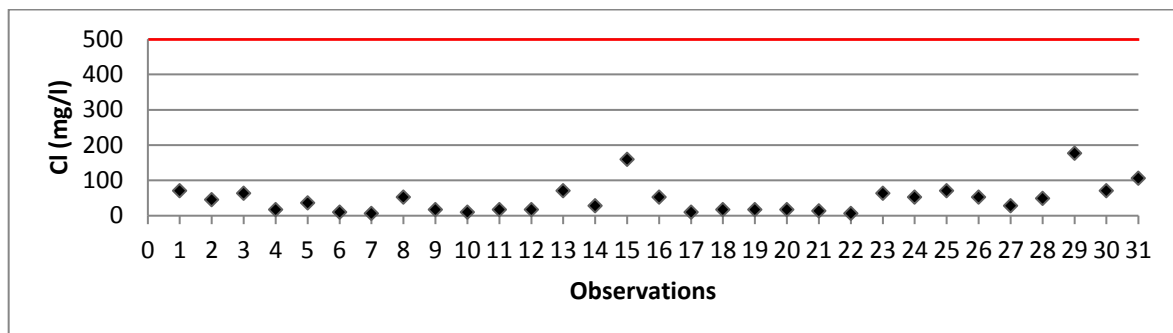


Figure N° 53 : Variation des chlorures dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.6. Les sulfates (SO₄²⁻) :

Composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse (CaSO₄, 2H₂O). Les sulfates peuvent provenir de l'activité humaine mais il est difficile de préciser l'origine. On peut citer comme sources anthropiques les ateliers de décapage métallique, les tanneries, les textiles et l'industrie papetière.

Les teneurs rencontrées dans les eaux souterraines en sulfates sont variables. Elles sont élevées dans certains cas mais restent dans les normes à l'exception d'un point d'eau (Yabous). L'origine est due à la dissolution des formations évaporitiques du Néogène.

Tableau N° 44 : Statistique élémentaire des Sulfates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
SO ₄ ²⁻	(mg/l)	22,00	400,00	173,48	112,02	64,57

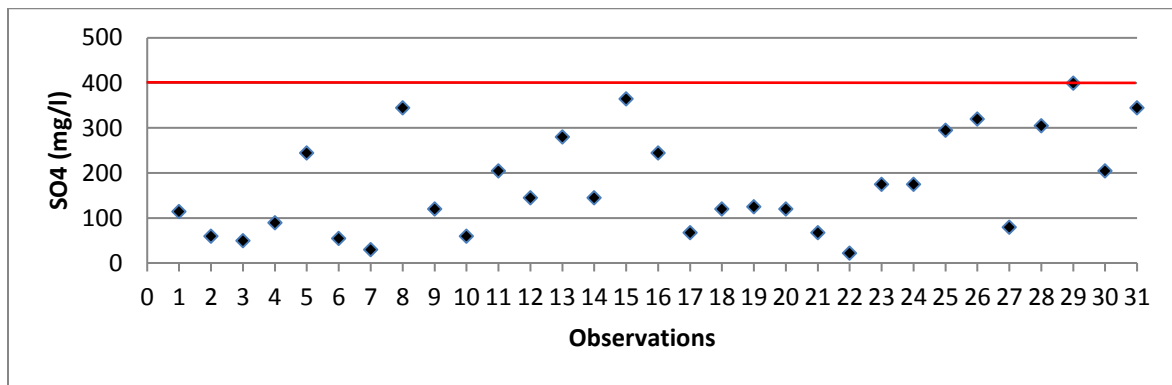
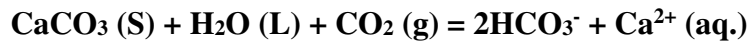


Figure N° 54 : Variation des sulfates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.7. Les bicarbonates (HCO₃⁻) :

Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO₂) selon l'équation suivante :



Les concentrations de cet élément sur l'ensemble du bassin sont reportées au tableau N°45, les teneurs en Bicarbonates dans les eaux souterraines sont convergentes à travers tout le bassin.

Tableau N° 45 : Statistique élémentaire des Bicarbonates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
HCO ₃ ⁻	(mg/l)	225,70	451,40	309,92	64,68	20,87

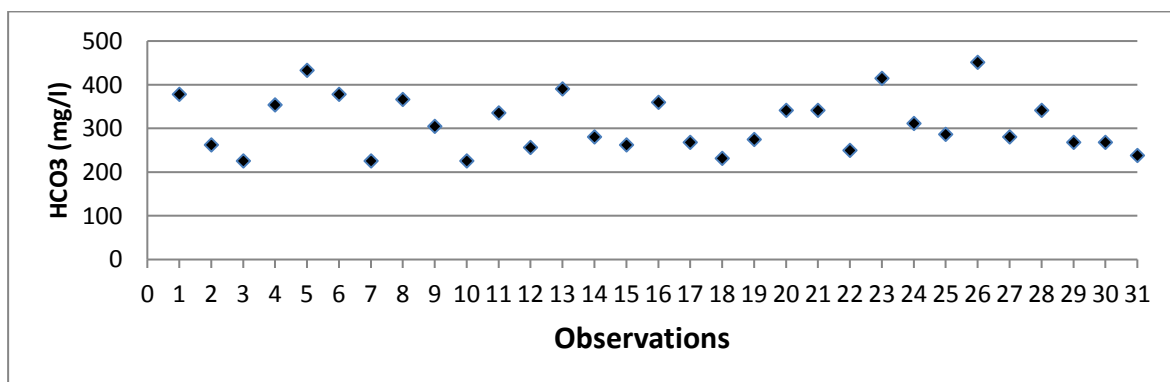


Figure N° 55 : Variation des bicarbonates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.8. Les nitrates (NO₃⁻) : Les nitrates se trouvent naturellement dans les eaux mais leur teneur est souvent accentuée par l'activité humaine. Elle accélère le processus d'enrichissement en éléments nutritifs par l'apport d'engrais sur les sols cultivés (BRINIS, 2011).

La principale source de contamination des sols et des eaux par les nitrates est l'apport d'engrais azotés sur les cultures. Ces apports peuvent être effectués en utilisant divers types d'engrais azotés qui peuvent fournir de l'azote soit sous forme de nitrates, soit sous formes d'urée, d'ammonium ou de lisier, qui seront progressivement transformées en nitrates. Les systèmes de traitements des eaux usées déficients, tout comme la décomposition de matières organiques animales ou végétales issues produites par l'activité humaine, peuvent être une source de contamination par les nitrates (LEVALLOIS & PHANEUF, 1994).

Les teneurs enregistrées dans le bassin (tab.46) sont en général sans danger selon la norme, à l'exception de quelques points, ceci peut être expliqué par des causes anthropiques.

Tableau N° 46 : Statistique élémentaire des Nitrates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
NO ₃ ⁻	(mg/l)	00,00	56,00	7,68	16,55	215,59

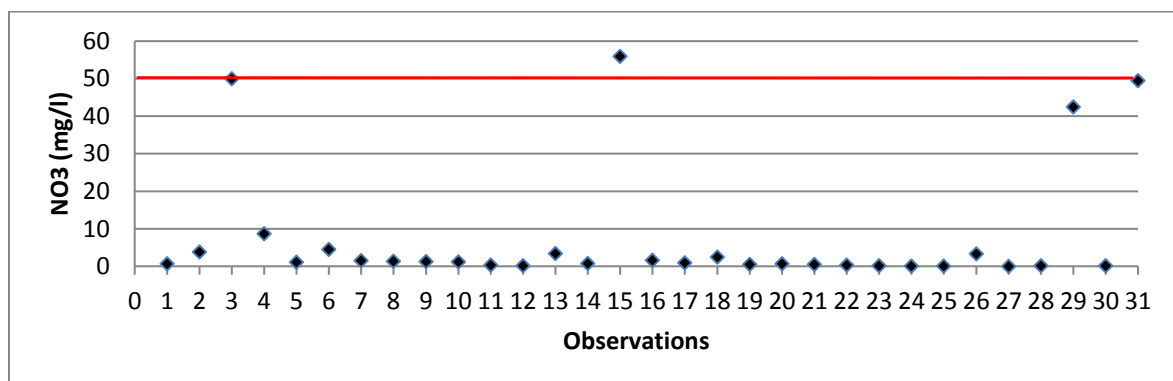


Figure N° 56 : Variation des nitrates dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.9. Conductivité électrique :

La minéralisation de l'eau peut être déterminée soit par la conductivité électrique (méthode rapide), soit par la teneur en ions dissous obtenue par sommation des concentrations des anions et des cations car celles-ci sont fortement corrélées dans toutes les formations aquifères.

La conductivité électrique est un paramètre important en hydrogéologie ; sa variation est liée, à température constante, aux modifications de la minéralisation des eaux souterraines.

Elle constitue une bonne appréciation des matières en solution. En effet, dans les eaux naturelles qui constituent des solutions peu concentrées en sels minéraux, pratiquement tous les éléments dissous sont ionisés et contribuent donc à la conductibilité d'une eau. Elle n'est pas,

toutefois, proportionnelle à la masse des éléments en solution ou au total des milliéquivalents présents car il n'y a pas de proportionnalité entre la milli-équivalence ou la masse atomique des ions et leur conductibilité (BRINIS, 2011). Le degré d'ionisation de la majorité des sels en solution diminue avec l'augmentation de la concentration et varie selon la nature des éléments en présence. La relation conductibilité-salinité n'est donc ni linéaire ni univoque. Une conductibilité élevée traduit, soit des pH anormaux, soit le plus souvent une salinité élevée, celle-ci pouvant être naturelle ou due à des rejets salins.

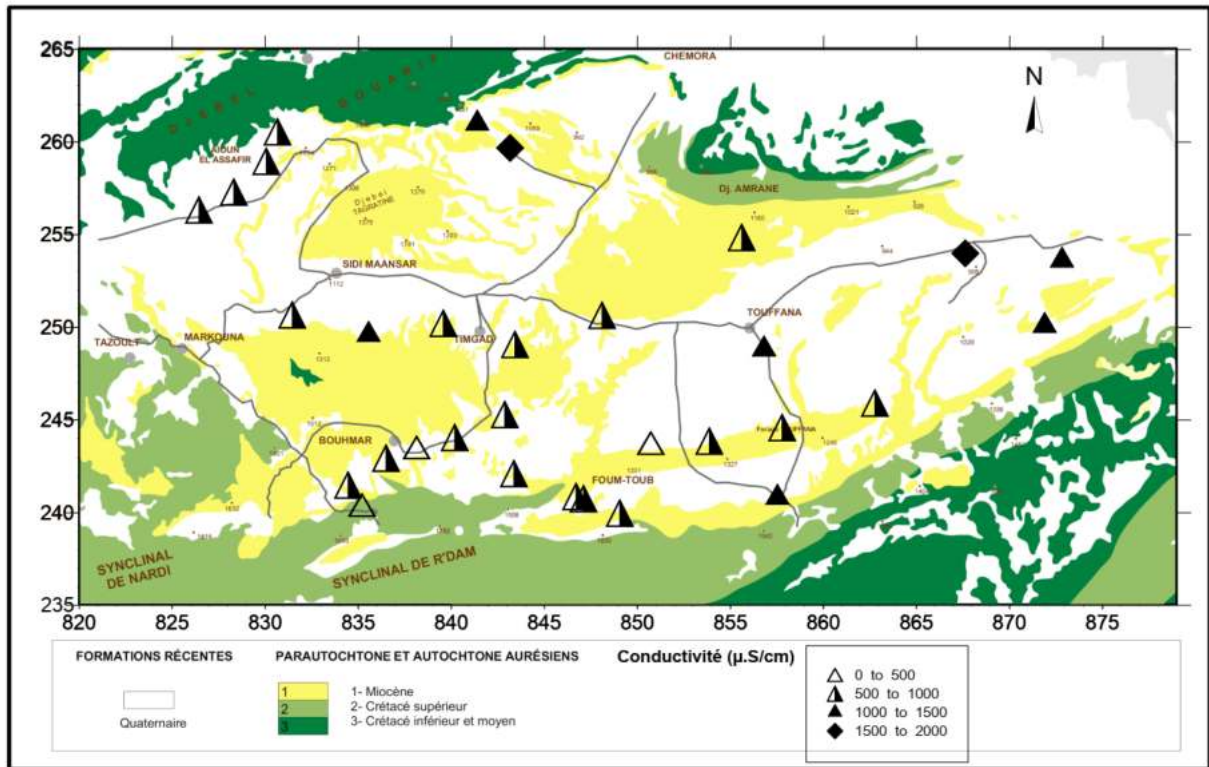


Figure N° 57 : Répartition spatiale de la conductivité électrique dans les eaux souterraines du bassin de Timgad ($\mu.S/cm$)

Tous les points d'eau prélevés (fig.58), ont montré des valeurs de conductivités inférieures à la limite exigée (2800 $\mu S/cm$). A l'exutoire du bassin, à l'Est, il semble que les valeurs deviennent plus élevées. Ce qui peut être expliqué par l'augmentation de la salinité dans ces endroits.

Tableau N° 47 : Statistique élémentaire de la conductivité électrique dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
Cond	($\mu S/cm$)	360,00	1 860,00	867,74	366,35	42,22

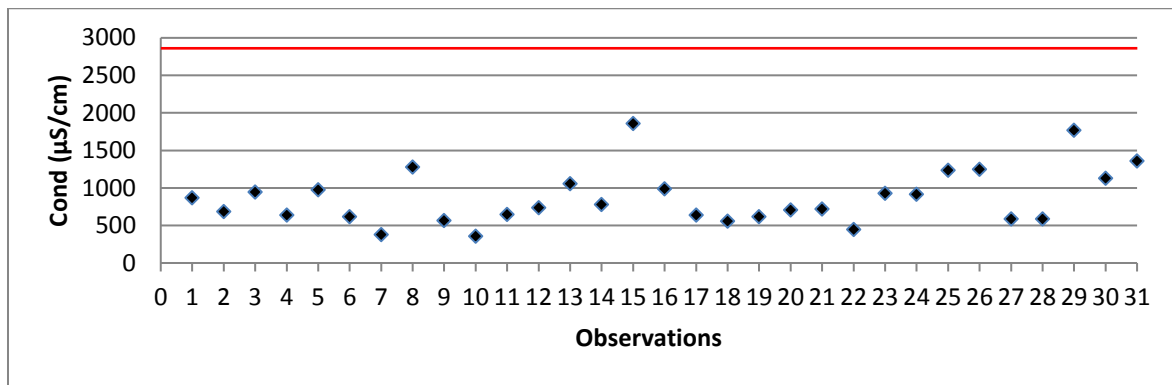


Figure N° 58 : Variation de conductivité dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

3.2.10. Le potentiel d'hydrogène (pH):

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions H^+ dans l'eau. Cette mesure est très importante car la valeur du pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. Dans les eaux naturelles, c'est-à-dire non soumises aux rejets importants résultant de l'activité humaine, le pH dépend de l'origine de ces eaux et de la nature géologique des terrains traversés. La totalité des points échantillonnés sont dans les limites de la norme (fig.59). L'écart des valeurs par rapport à la moyenne n'est pas important (tab.48).

Tableau N° 48 : Statistique élémentaire du potentiel d'hydrogène dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (% Écart-Type)
pH	06,60	8,40	7,10	0,33	04,70

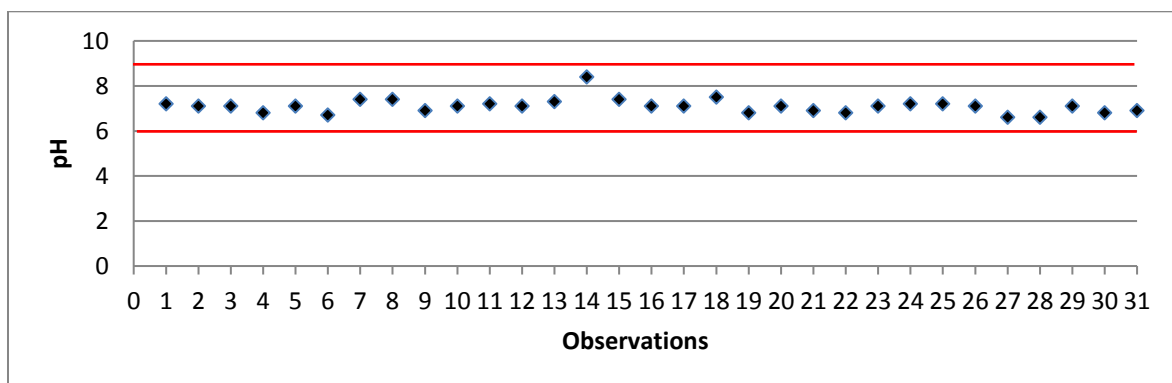


Figure N° 59 : Variation du potentiel d'hydrogène dans les eaux souterraines du bassin de Timgad

4. Facies chimiques des eaux

4.1. Types du faciès chimique

Les résultats des analyses chimiques reportées sur le diagramme de Piper (fig. 60) montrent deux grandes familles de faciès chimiques :

Les eaux bicarbonatées (calciques, sodiques et magnésiennes) ; représentent 81% dont 65% sont calciques,

Les eaux sulfatées (calciques et sodiques) ne représentent que 19% des prélèvements, ce que traduit l'influence des formations carbonatées sur la minéralisation des eaux souterraines du bassin par rapport aux formations évaporitiques.

4.2. Relation entre les faciès chimiques des eaux souterraines

Bien que les eaux se regroupent dans deux familles chimiques d'apparence différentes, cependant on peut penser qu'elles ont la même origine et sont interdépendantes.

Elles sont toutes le résultat de la dissolution des roches carbonatées. Ce caractère mixte des eaux étudiées nous amène à définir la relation entre les familles chimiques caractérisant ces eaux.

Les résultats d'analyse portés sur le diagramme de Piper (fig.60) confirment l'origine commune de ces eaux. Elles se regroupent en un seul pôle influencé par la dissolution des minéraux carbonatés. Cette dissolution a généré plusieurs éléments chimiques, notamment les bicarbonates, les sulfates, le magnésium, le calcium et le sodium.

Les points sur le triangle relatif aux cations se placent dans pôle du Calcium et au milieu (partie mixte) avec une tendance vers le Calcium.

Tandis que dans le triangle des anions, on observe une concentration au niveau du pôle bicarbonaté.

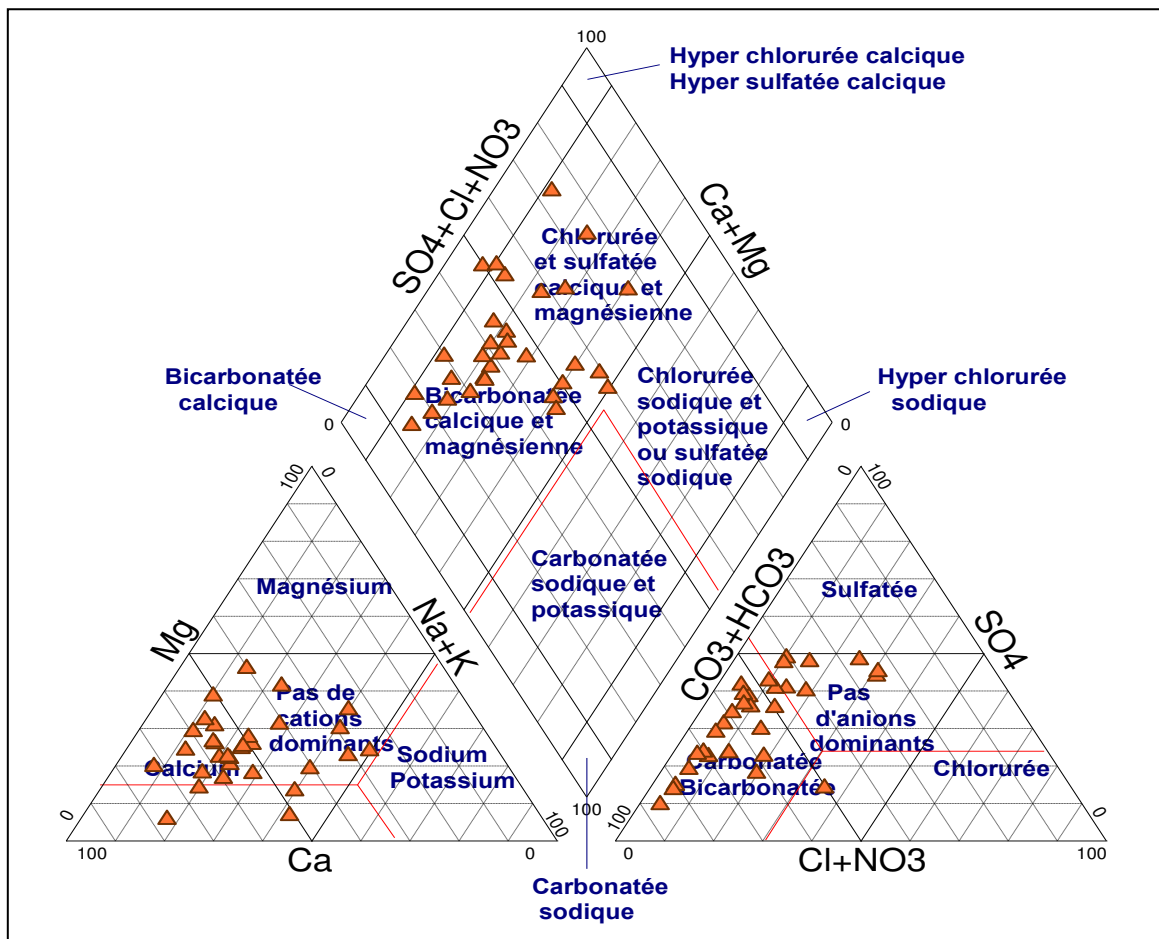


Figure N° 60 : Familles de faciès chimiques selon le diagramme de Piper

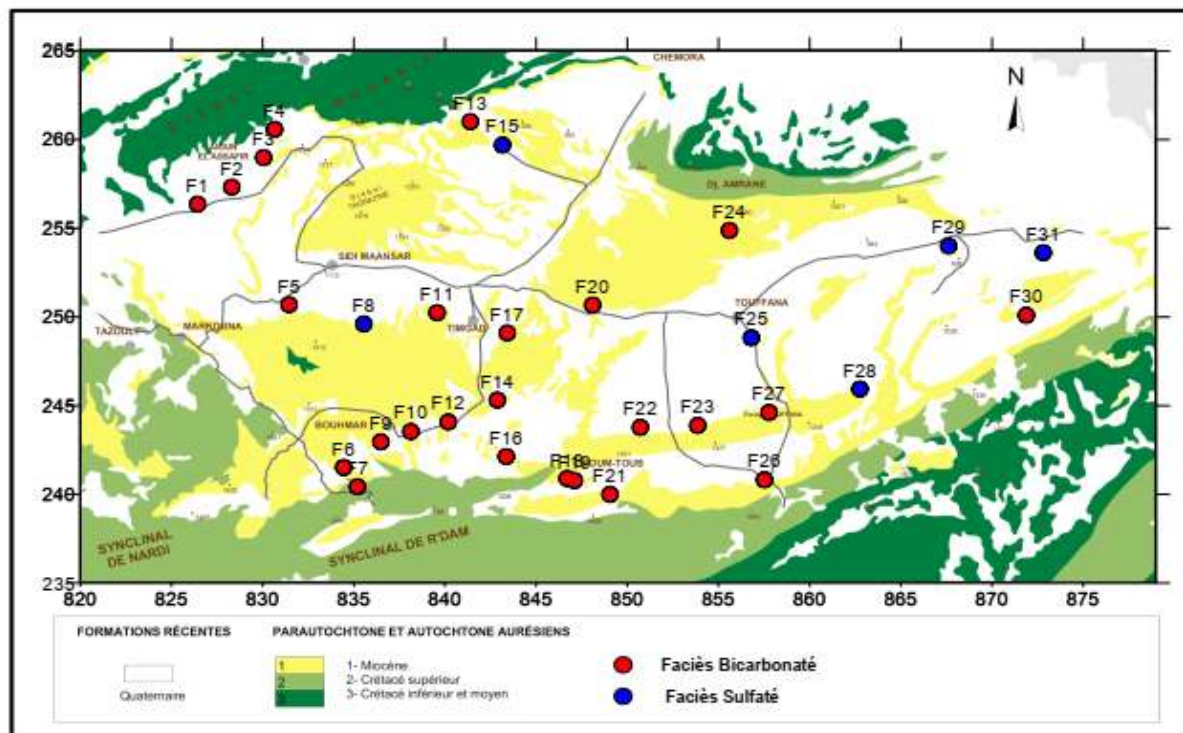


Figure N° 61 : Répartition du faciès chimiques à travers le bassin de Timgad.

Tableau N° 49 : Types de faciès chimiques des eaux souterraines du bassin de Timgad

Faciès chimique		Formule ionique	Pourcentage du Faciès (%)	Conductivité moyenne (μ.S/cm)
BicarbonatéCalcique (64,5%)	Secondairement Sulfaté Magnésien (Points : 1, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 17, 20, 22, 26)	$r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > r \text{Cl}$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na}$	35,48	657,27
	Secondairement Sulfaté Sodique (Points : 5, 11, 14, 18, 19, 21, 27)	$r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > r \text{Cl}$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg}$	22,58	700
	Secondairement Chloruré Magnésien (Points : 3)	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na}$	3,23	950
	Secondairement Chloruré Sodique (Points : 2)	$r \text{HCO}_3 > r \text{Cl} > r \text{SO}_4$ $r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{Mg}$	3,23	690
Bicarbonaté Sodique (9,68%)	Secondairement Sulfaté Calcique (Points : 13, 30)	$r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > r \text{Cl}$ $r \text{Na} > r \text{Ca} > r \text{Mg}$	6,45	1095
	Secondairement Sulfaté Magnésien (Points : 24)	$r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > r \text{Cl}$ $r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{Ca}$	3,23	920
Bicarbonaté Magnésien (6,45%)	Secondairement Sulfaté Calcique (Points : 16, 23)	$r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > r \text{Cl}$ $r \text{Mg} > r \text{Ca} > r \text{Na}$	6,45	960
Sulfaté Calcique (12,90%)	Secondairement Bicarbonaté Magnésien (Points : 25, 28, 31)	$r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3 > r \text{Cl}$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na}$	9,68	1063,34
	Secondairement Chloruré Magnésien (Points : 15)	$r \text{SO}_4 > r \text{Cl} > r \text{HCO}_3$ $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na}$	3,23	1860
Sulfaté Sodique (6,45%)	Secondairement Bicarbonaté Calcique (Points : 8)	$r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3 > r \text{Cl}$ $r \text{Na} > r \text{Ca} > r \text{Mg}$	3,23	1280
	Secondairement Chloruré Magnésien (Points : 29)	$r \text{SO}_4 > r \text{Cl} > r \text{HCO}_3$ $r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{Ca}$	3,23	1770

Pour mieux apprécier l'origine des faciès caractéristiques des eaux de la région, on a étudié plusieurs rapports caractéristiques (HCO_3/SO_4 , Ca/Na et Ca/Mg), dont le choix a été basé sur les faciès dominants. Ce suivi touche l'ensemble des échantillons analysés indépendamment du lieu de prélèvement.

Le rapport HCO_3/SO_4 : L'examen de graphique tracé (fig.62) montre la prédominance des bicarbonates sur les sulfates où la majorité des points (rapports) sont supérieurs à "1".

Les rapports Ca/Na et Ca/Mg : les deux graphes (fig.63, fig.64) montrent la prédominance de l'ion du Calcite par rapport aux ions de Magnésium et de Sodium.

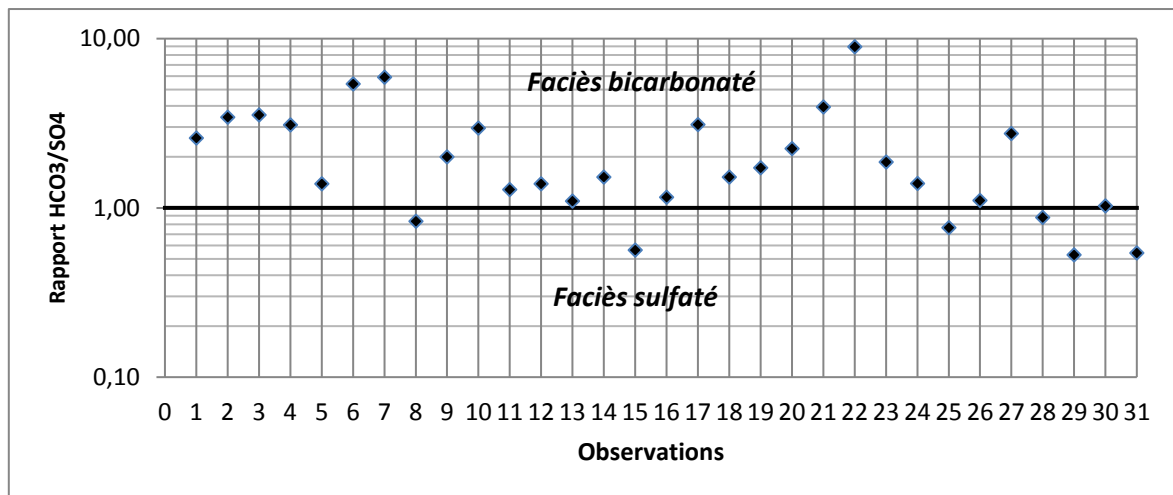


Figure N° 62 : Évolution du rapport (HCO_3/SO_4) dans les eaux du bassin de Timgad

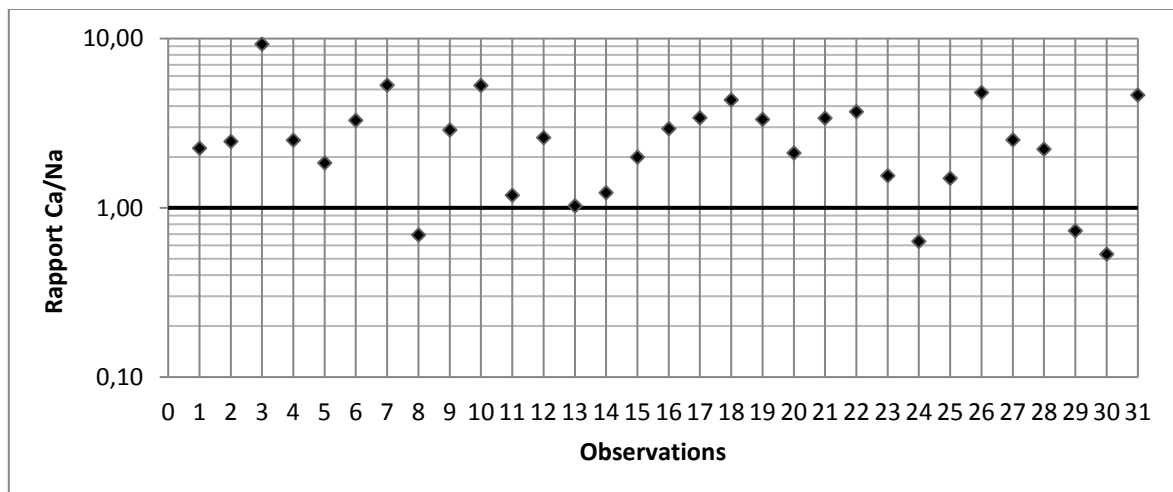


Figure N° 63 : Évolution du rapport (Ca/Na) dans les eaux du bassin de Timgad

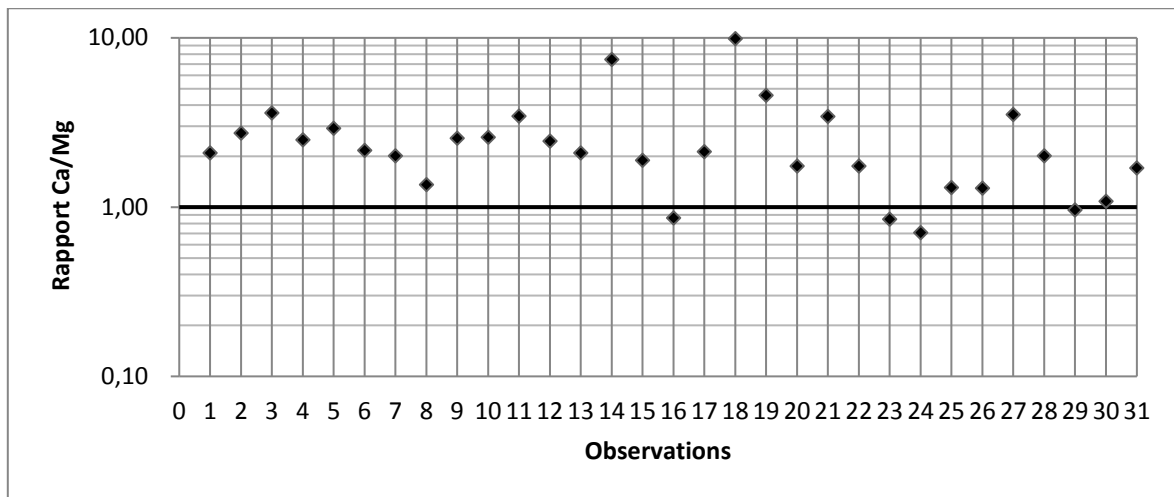


Figure N° 64 : Évolution du rapport (Ca/Mg) dans les eaux du bassin de Timgad

4.3. L'évolution de faciès chimique

Afin d'avoir une approche sur l'évolution du chimisme des eaux dans l'espace aquifère selon l'axe d'écoulement, plusieurs couples ont été corrélés. Le choix s'est porté essentiellement sur les ions dominants et qui apparaissent dans les faciès caractéristiques.

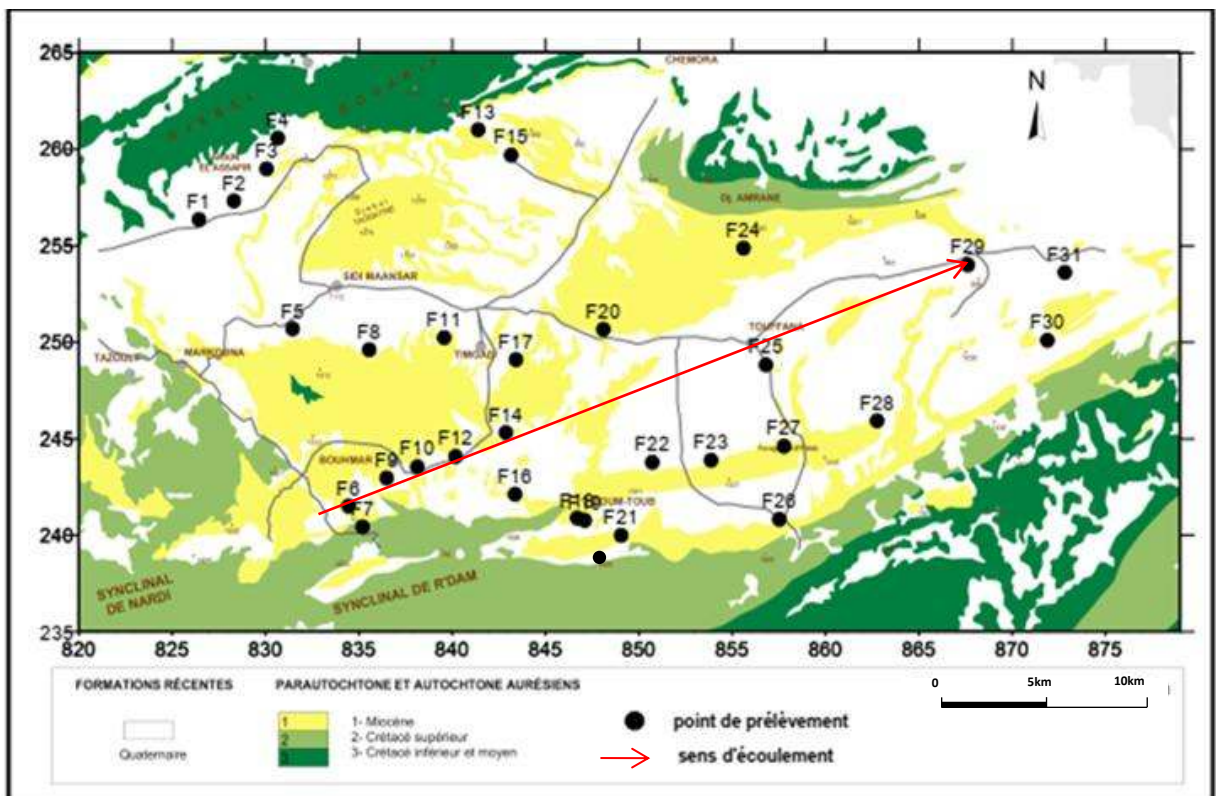


Figure N° 65 : Carte représentant l'axe de suivi des faciès dans le bassin de Timgad

4.3.1. Évolution du rapport HCO_3/SO_4 : Axe Sud-Ouest – Nord-Est

Le rapport, dans son majorité est supérieur à 1, varie entre 0,6 et 6, mis en évidence la dominance des bicarbonates par rapport aux sulfates. En aval les valeurs de rapport HCO_3/SO_4 est proche de 1 montrant ainsi une certaine équivalence entre les carbonates et les sulfates (Fig.66).

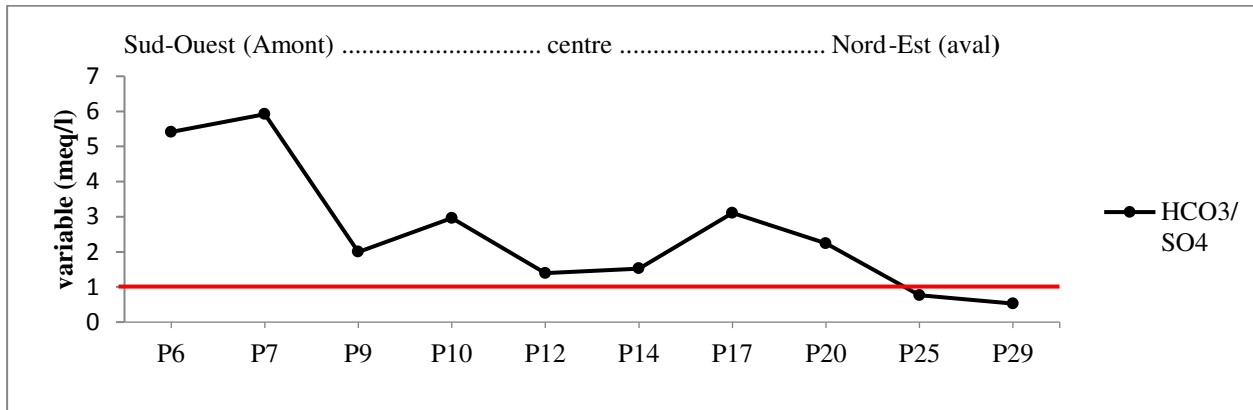


Figure N° 66 : Évolution des bicarbonates et des sulfates

4.3.2. Évolution du faciès bicarbonaté

Les carbonates sont des minéraux caractérisés par l'ion $(\text{CO}_3)^{2-}$, les plus importants parmi eux sont; la calcite CaCO_3 , l'aragonite CaCO_3 et la dolomite $(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$, (Faucault & Raoult, 2010). Dans les eaux souterraines du bassin étudié, les ions carbonatés (HCO_3^- , Ca^{+2}) sont dominants et leurs concentrations présentent une évolution simultanée tout au long de l'axe d'écoulement des eaux souterraines, la dynamique de Mg^{+2} et Na^+ présente une évolution moins importante avec les bicarbonates que le calcium, sauf en aval où se concentrent justement, le faciès évaporitique (Fig.67).

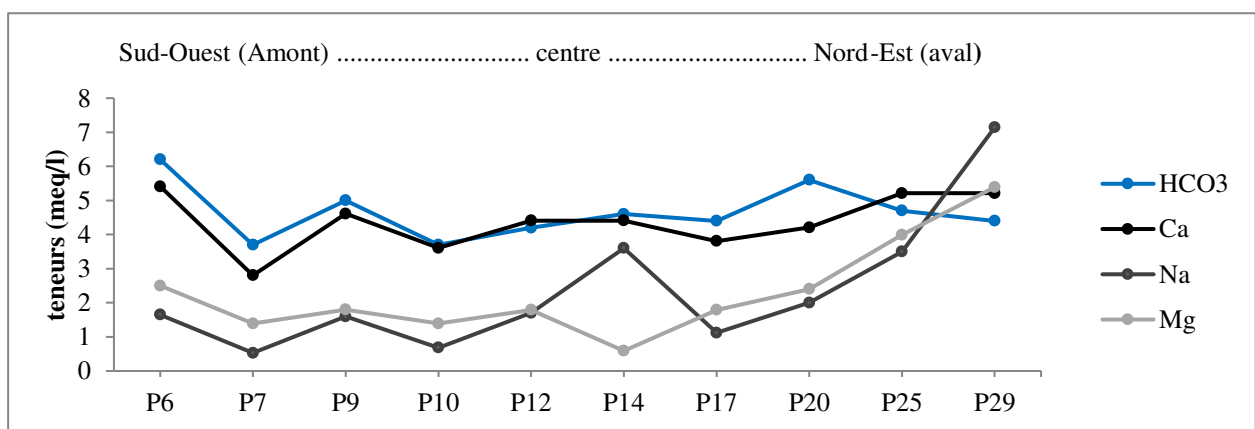


Figure N° 67 : Évolution des bicarbonates, du calcium, du magnésium et du sodium.

4.3.3. Évolution du faciès sulfaté

Les sulfates sont des minéraux caractérisés par le radical $(\text{SO}_4)^{-2}$, coordonné à Ca, Na, Mg, Ba... les principaux minéraux anhydres sont la barytine BaSO_4 , l'anhydrite CaSO_4 à la forme hydratée ; le gypse $(\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O})$, la mirabilite $(\text{Na}_2\text{SO}_4, 10 \text{H}_2\text{O})$ (Faoucault & Raoult, 2010). Dans les eaux souterraines du bassin de Timgad, le Na^{+2} est lié parfaitement avec le SO_4^{-2} avec des concentrations assez faibles sauf en aval où ils augmentent, là où le faciès devient évaporitique (Fig. 68).

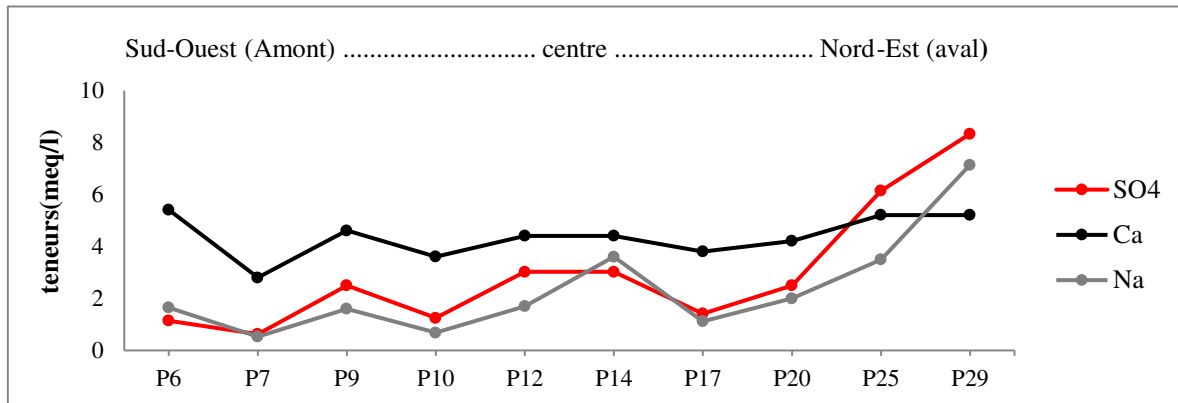


Figure N° 68 : Évolution des sulfates, de calcium et de sodium.

4.4. Synthèse de la répartition spatiale des faciès chimiques des eaux souterraines :

Le degré de dissolution des roches traversées par les eaux souterraines détermine la variation des concentrations en ions majeurs et par conséquent il est responsable de la détermination de leur identité géochimique. Par ailleurs, cette répartition nous permet de nous faire une idée générale sur l'évolution des faciès qui se fait selon les axes d'écoulement.

La façon selon laquelle les eaux étudiées acquièrent leur minéralisation laisse apparaître clairement la dominance de la composante carbonatée (81%) surtout au niveau des bordures correspondant aux zones d'alimentation. Nous remarquons que par endroits (flancs méridionaux de DJ. Bou Arif et Amrane ainsi que le flanc septentrional de Dj Chelia) le calcium dans le faciès bicarbonaté est remplacé par le Na, donnant naissance à un faciès bicarbonaté sodique (10%), ceci peut être dû à un échange de base qui s'effectue entre ces deux ions.

L'apparition du faciès évaporitique (19%) représenté par les sulfates, combinés parfois avec le Ca et autres fois avec le Na, se concentre en aval vers l'exutoire. Il est important de signaler que ces eaux présentent un rapport $\text{SO}_4 / \text{HCO}_3$ proche de 01 ce qui nous permet d'affirmer que ces eaux sont à l'origine carbonatées contaminées par des formations évaporitiques (les argiles gypsifères) qui acquièrent par conséquent le caractère gypsifère (fig.69).

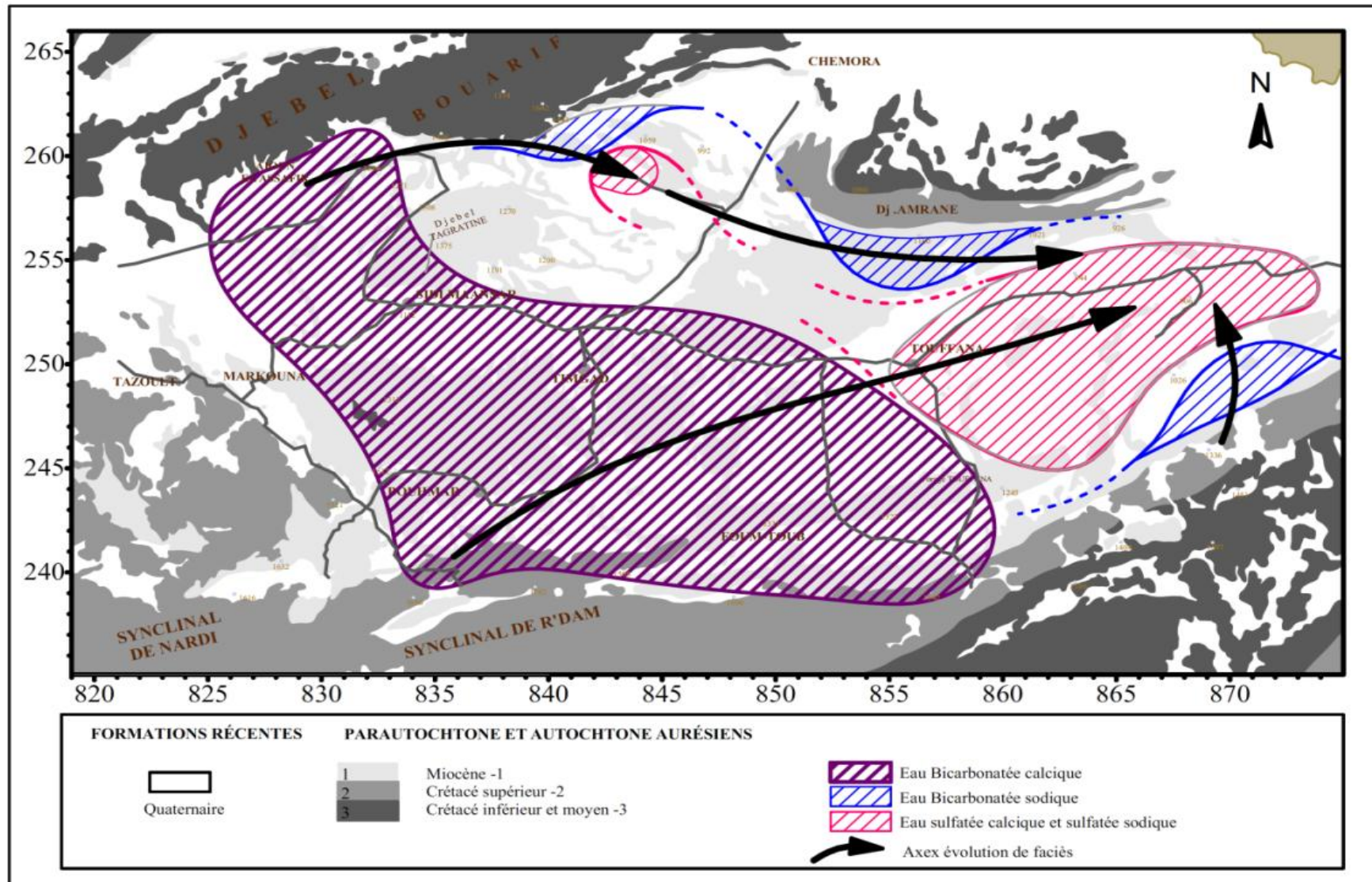


Figure N° 69 : Répartition spatiale des Faciès chimiques dans le bassin de Timgad.

5. Analyse statistique des paramètres physico-chimiques :

Cette analyse concerne les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines du bassin. Elle nous permettra d'avoir une vision globale des relations qui peuvent exister entre différents paramètres mesurés ainsi que les tendances que présentent les observations. Ces relations seront interprétées au fur et à mesure.

5.1. Corrélations entre les paramètres physico-chimiques :

Une matrice de corrélation est utilisée pour évaluer la dépendance entre plusieurs variables en même temps. Le résultat est une table contenant les coefficients de corrélation entre chaque variable et les autres. On admet qu'une corrélation est significative, si la valeur du coefficient de corrélation « r » est comprise entre + 0,5 et 1 (Brinis, 2015).

Une corrélation significative (0.54 à 0.92) est remarquée entre la conductivité et toutes les variables à l'exception de HCO_3^- ce qui met en évidence la contribution de tous les éléments à la minéralisation des eaux souterraines.

Par ailleurs, on remarque une corrélation significative entre les SO_4^{2-} et la majorité des variables (Cl^- , Na^+ ; Mg^{2+} , Ca^{2+} et K^+) traduisant probablement une origine commune de ces dernières, qui serait liée aux minéraux évaporitiques (tab.50) ;

Par contre, la corrélation entre HCO_3^- et les éléments chimiques (Ca, Na et Mg) est non significative alors que les eaux sont caractérisées par la dominance de faciès bicarbonaté. Pour expliquer cette anomalie, on peut faire intervenir l'évolution du facteur de concentration (Fc).

Tableau N° 50 : matrice de corrélation des variables

variable	PH	COND	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+
PH	1.00									
COND	0.18	1.00								
HCO_3^-	-0.10	0.13	1.00							
Cl^-	0.11	0.92	-0.04	1.00						
SO_4^{2-}	0.13	0.84	0.27	0.76	1.00					
NO_3^-	0.04	0.65	-0.35	0.74	0.39	1.00				
Ca^{2+}	-0.04	0.54	0.26	0.49	0.63	0.53	1.00			
Na^+	-0.11	0.73	0.38	0.68	0.76	0.36	0.53	1.00		
Mg^{2+}	0.23	0.69	0.24	0.63	0.75	0.18	0.19	0.41	1.00	
K^+	0.21	0.66	0.07	0.65	0.67	0.29	0.09	0.39	0.93	1.00

5.2. Analyse en composantes principales ACP

5.2.1. Principe de la méthode :

C'est une méthode qui consiste à transformer des variables liées entre elles en nouvelles variables décorréelées les unes par rapport aux autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales », ou axes principaux. Elle permet de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante (BENZECRI, 1973)

Il s'agit d'une approche à la fois géométrique (les variables étant représentées dans un nouvel espace, selon des directions d'inertie maximale) et statistique (la recherche portant sur des axes indépendants expliquant au mieux la variabilité « la variance » des données).

L'ACP représente graphiquement les liens entre les différentes variables et les facteurs choisis, ces graphiques sont projetés dans un cercle de rayon 1 (Hotelling, 1930). Plus la coordonnée de la variable est forte (proche de 1 ou -1) sur un facteur, plus la variable a de liens avec ce facteur (Abdelkadir, 2004).

5.2.2. Classification des variables :

L'ACP montre que le facteur horizontal F1 exprime 51.76% de la variance totale, il est marqué par la concentration positive et significative des variables (Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} et conductivité) et confirme l'évolution de la majorité des paramètres avec la conductivité sauf HCO_3^- , NO_3^- et à un degré moindre le Ca. On peut affirmer que ce facteur représente l'axe de la minéralisation des eaux souterraines après évolution dans l'aquifère gréseux du Miocène (origine géologique), cependant le facteur vertical F2 qui exprime seulement 16.20% de la variance, est marqué par les HCO_3^- qui représente les eaux provenant des zones d'alimentation déjà saturées en bicarbonates. On remarque que le Ca n'est pas associé à ces derniers dans cet axe pour la simple raison qu'il existe un apport supplémentaire en cet ion à partir des minéraux évaporitiques (Gypse par exemple) le faisant augmenter par rapport aux bicarbonates.

La projection des individus sur le plan F1/F2 montre le regroupement de la majorité des échantillons au centre du cercle traduisant une minéralisation moyenne, à l'exception de quelques points (16, 30 et 32) qui sont marqués par une minéralisation assez importante (Fig.70).

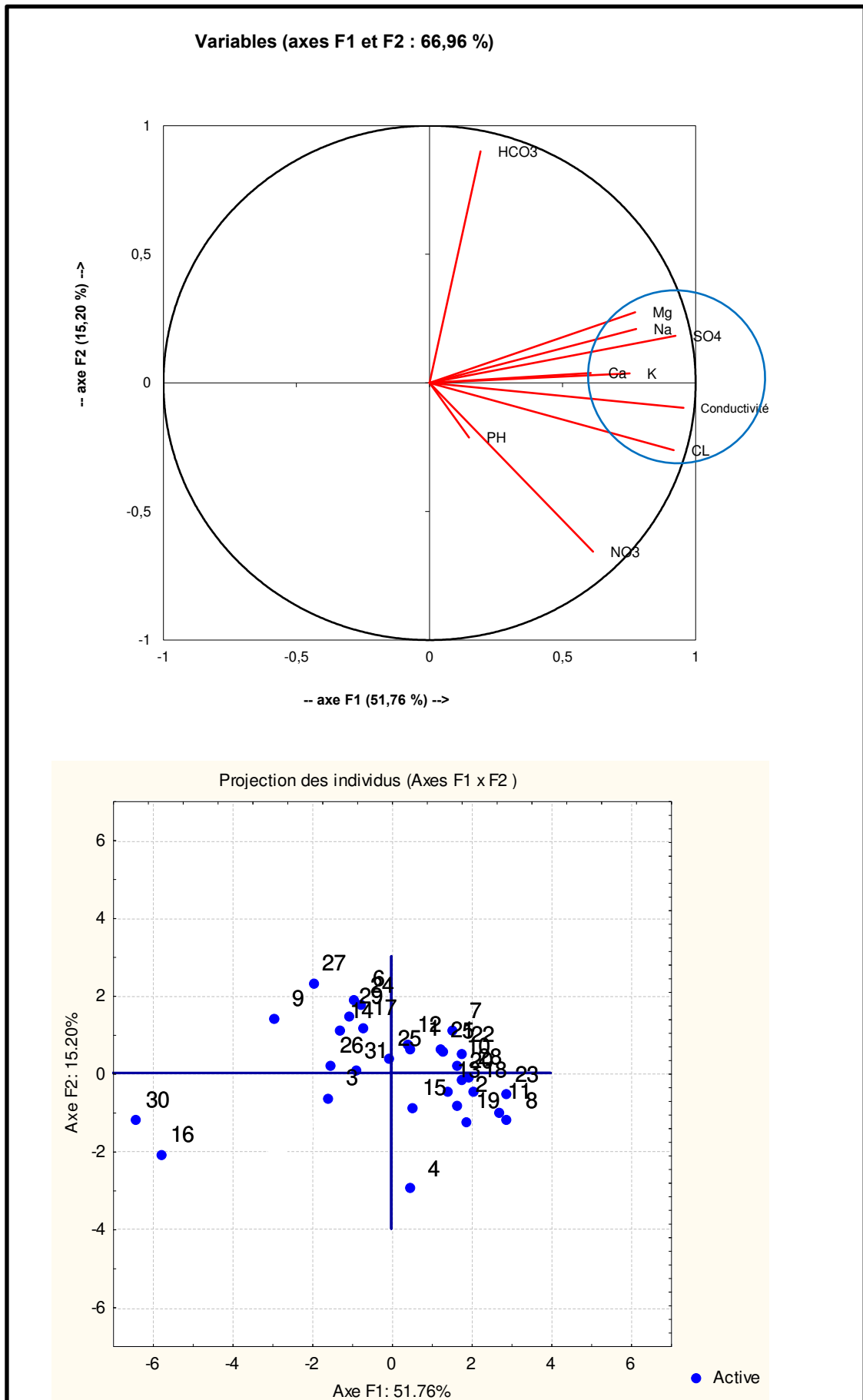


Figure N° 70 : Projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1/F2

6. Origines du chimisme des eaux souterraines

Les eaux souterraines qui circulent dans l'aquifère gréseux du Miocène proviennent des formations carbonatées du Maestrichtien et de l'Aptien qui bordent le bassin (Zones d'alimentations). Ensuite, elles s'écoulent dans un matériel gréseux relativement hétérogène (intercalations des grès et de marnes et quelques dépôts évaporitiques). Ceci explique l'origine des bicarbonates (HCO_3^-) et des sulfates (SO_4^-) dans les eaux souterraines.

Le parcours d'écoulement et les couches traversées influent sur l'acquisition des éléments chimiques. Les ions qui jouent le rôle le plus important dans la minéralisation des eaux sont : HCO_3^- , SO_4^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^{2+} . En se basant sur les analyses statistiques de ces derniers et les différents faciès trouvés pour étudier les relations entre les ions, nous avons pu déterminer leur origine probable.

6.1. Relation HCO_3/SO_4 – conductivité

Le graphe N°70 montre que la majorité des points indiquent que la conductivité est plus influencée par la dissolution des carbonates.

Les fortes conductivités (1060 - 1860 $\mu\text{S}/\text{cm}$) correspondent aux eaux sulfatées dont le parcours souterrain a été relativement prolongé, alors que les valeurs relativement faibles (870 - 990 $\mu\text{S}/\text{cm}$) correspondent aux eaux bicarbonatées, jeunes avec un parcours souterrain réduit.

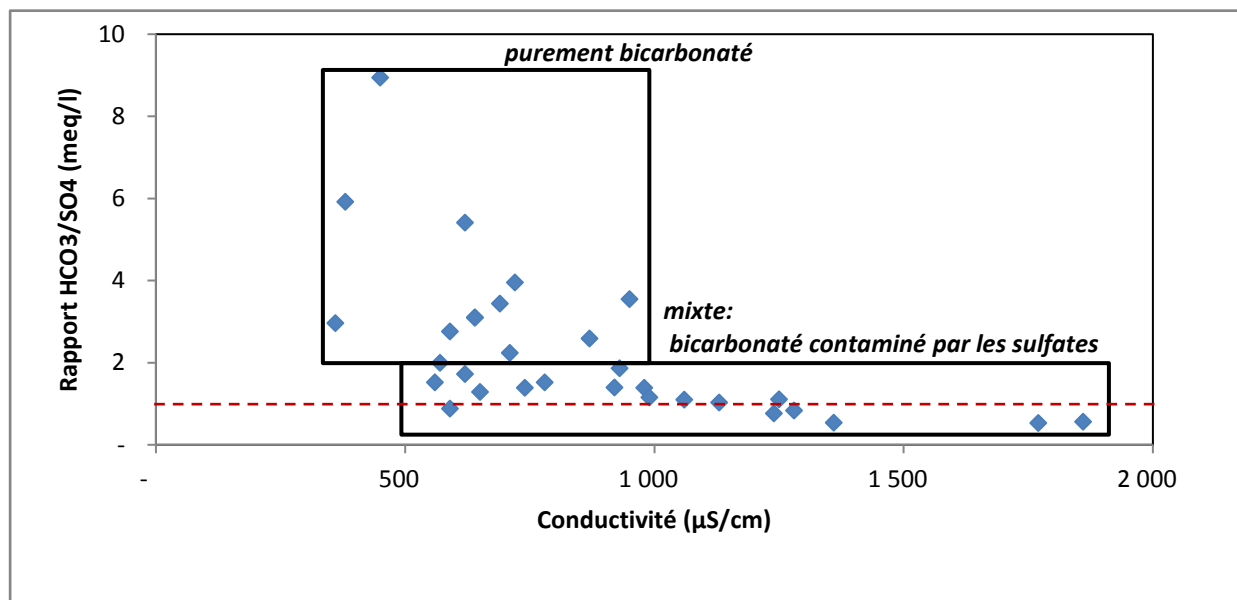


Figure N°71 : Relation HCO_3/SO_4 – conductivité

6.2. Origine du Calcium et du Magnésium

L'origine de l'ion calcium est obtenue généralement en majorité par l'attaque du CO_2 dissous (acide carbonique) des roches calcaires ou par simple dissolution des roches gypseuses. Dans l'eau, il peut être échangé, sous certaines conditions, contre le sodium des roches traversées (argile). Une substitution entre magnésium et calcium dans les eaux est aussi possible (Schoeller, 1962). Il participe aux phases de précipitations avec les bicarbonates dans l'aragonite et la calcite.

Le magnésium est un élément combiné à l'oxygène dans de nombreux silicates, avec remplacement partiel fréquent par Fe^{2+} (ex. : olivine, pyroxène, amphibole,). On le trouve aussi dans le périclase, la brucite, les spinelles (ou magnésite) et la dolomite. Les sels de Mg étant très solubles) et peuvent se retrouver en abondance dans les évaporites (Faoucault & Raoult, 2010).

L'observation de nuage des points dans les graphes N°71,72 montre que les deux ions ont pratiquement le même comportement où la majorité des points se trouvent au-dessus la valeur « 1 » du rapport $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ traduisant l'origine commune des ions calcium et magnésium qui proviennent dans leur majorité de la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), alors que, la participation des formations évaporitiques (gypses) est faible.

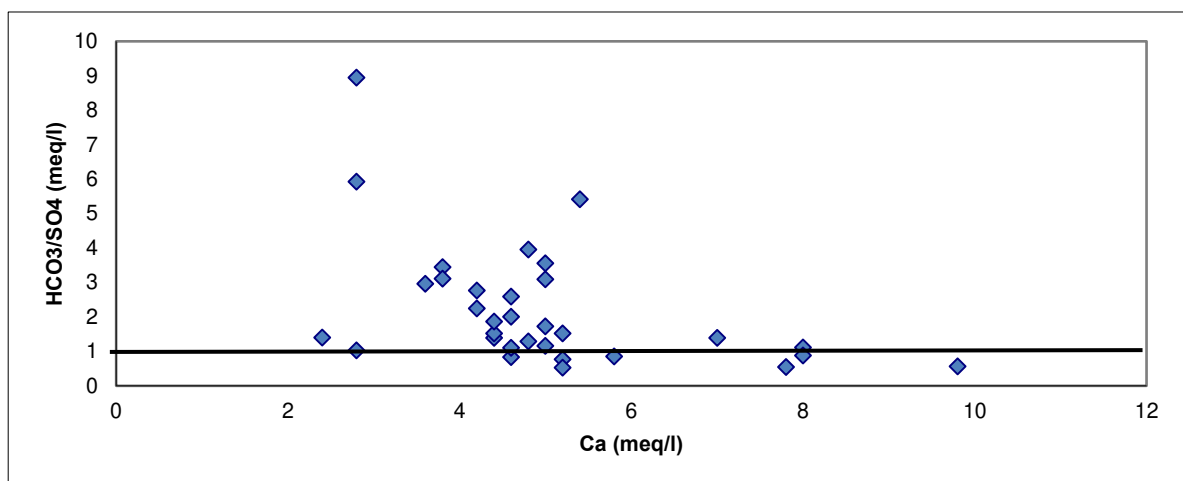


Figure N° 72 : La relation Ca – ($\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$)

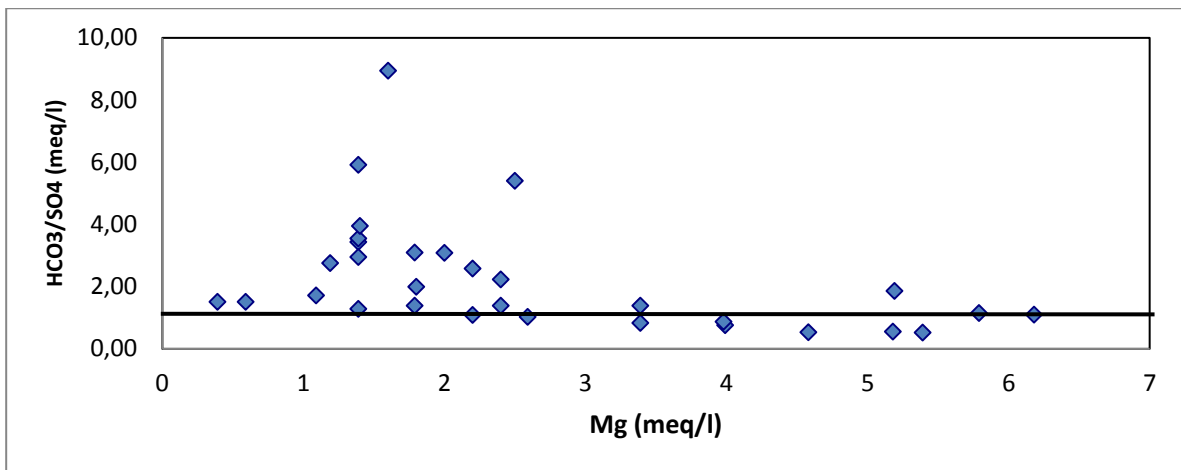


Figure N° 73 : La relation Mg – (HCO₃/SO₄)

6.3. Origine du sodium

La présence de sodium Na dans les eaux provient généralement de la dissolution de l'Halite (NaCl) et comme la relation Na-Cl des eaux étudiées (fig.74) n'est pas significative ce dernier peut avoir une autre origine. Dans ce sens, et pour vérifier l'origine du sodium on va étudier l'évolution des cations (Ca, Mg et Na) selon le sens d'écoulement des eaux souterraines.

Le graphe N° 74 montre que les cations ont le même comportement durant l'écoulement avec un excès du calcium, en aval on remarque l'augmentation du sodium par rapport aux calcium et magnésium, nous pensons que ceci est dû à un échange de base qui s'effectue entre ces ions, donc l'origine du sodium est sans doute les argiles gypsifères.

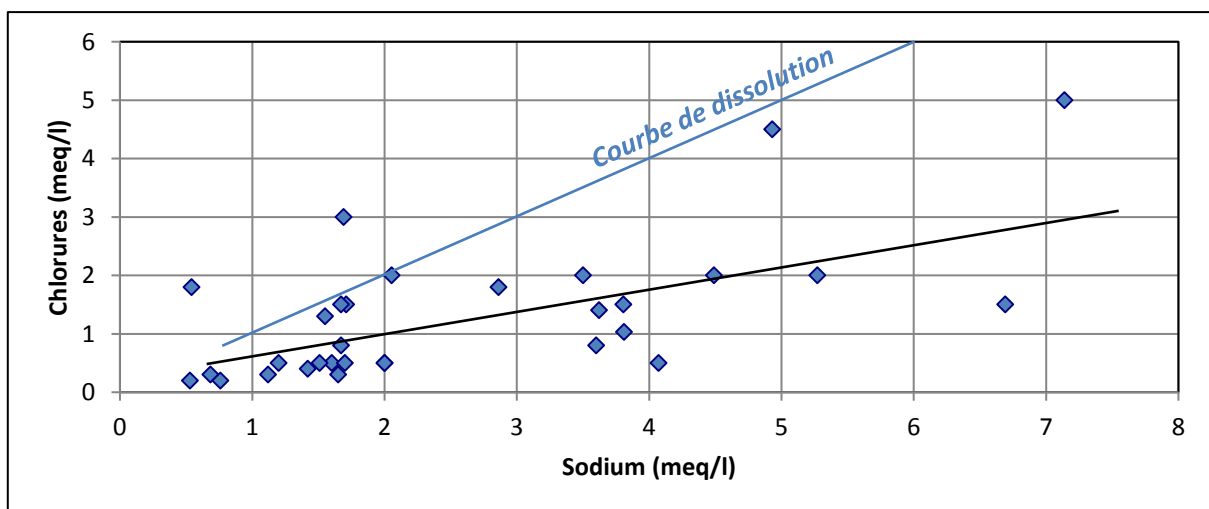


Figure N° 74 : La relation Na-Cl

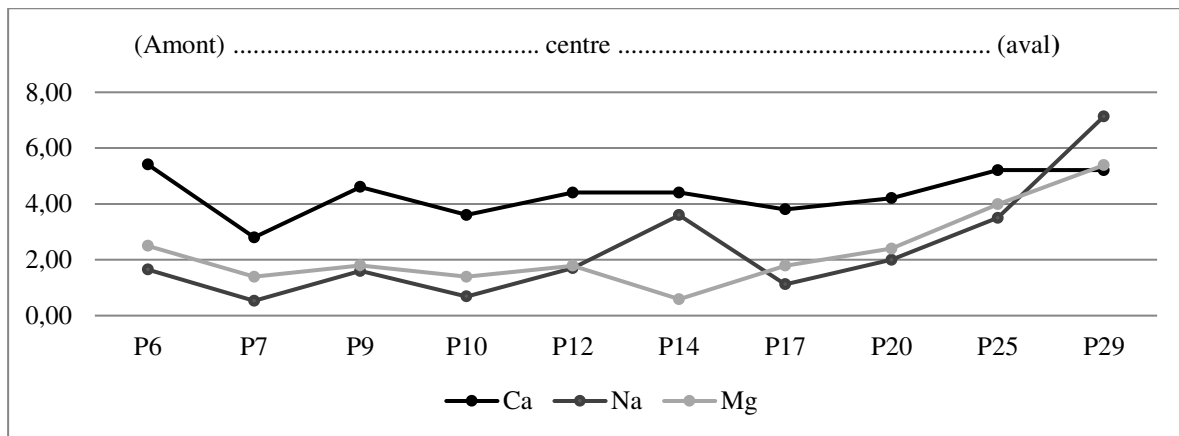


Figure N°75 : Évolution des cations Ca, Mg et Na

7. Processus géochimiques de l'acquisition de la salinité des eaux souterraines

Depuis les précipitations, jusqu'à ce qu'elle atteigne l'aquifère et tout au long de l'écoulement dans ce dernier, l'eau est soumise à des processus successifs qui modifient sa composition chimique. Les processus hydrogéochimiques sont généralement contrôlés ou influencés par différents facteurs tels que la dissolution de certains minéraux présents dans les roches et dans les sols, l'infiltration et l'écoulement de l'eau dans la matrice aquifère, les interactions entre les minéraux dissous...etc. Selon les processus auxquels elle est soumise, l'eau souterraine acquiert ainsi une signature particulière en fonction du milieu où elle se trouve et de ceux qu'elle rencontre lors de son parcours (LAROCQUE.M & GAGNE.S, 2013).

Pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, nous avons représenté les éléments majeurs en fonction des chlorures. Ce dernier est un élément conservé qui ne participe pas aux interactions eau-roche,

L'utilisation de l'ion chlorure comme facteur de concentration nous a permis de suivre l'évolution des éléments chimiques en fonction du facteur de concentration (Fig.76). Le travail consiste à vérifier que l'acquisition du chimisme résulte de la concentration des eaux, c'est pour quoi on fait intervenir le concept du « facteur de concentration (Fc) » qui est estimé à partir du rapport entre la teneur en chlorure d'une eau et la plus petite teneur en chlorure observée dans l'ensemble des échantillons. Cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs : Valles (1987), Gueddari (1984) et Barbiero (1994).

Évolution des paramètres physico-chimiques

L'établissement des diagrammes couplant le log du facteur de concentration (Fc) et les différents logs des molalités des paramètres physico-chimiques montre l'évolution de ces derniers avec la minéralisation globale.

- **Les bicarbonates :** Le diagramme montre que les bicarbonates se trouvent saturés au début de la concentration et que ces derniers restent stables pendant l'évolution de la concentration globale (Fc).
- **Le calcium :** D'après le diagramme N°75 on observe que la concentration du calcium est essentiellement plus importante que les chlorures jusqu'à la valeur $\text{Log Fc}=0.8$ où les valeurs de la concentration de Ca sont distribuées autour de la droite de Fc et suivent la concentration globale.
- **Le sodium:** les concentrations de sodium se trouvent au-dessus de la droite du facteur de concentration (Fc) à l'exception de quelques points. En général, la molalité du Na suit la concentration des chlorures mais avec un taux plus élevé, ce qui implique que le sodium se trouve en excès par rapport aux chlorures ceci peut être expliqué par une autre origine probablement l'échange de base.
- **Le magnésium et les sulfates:** Les diagrammes de Mg et SO₄ montrent pratiquement le même comportement des molalités des sulfates et du magnésium par rapport au facteur de concentration (Fc). Les SO₄ et Mg semblent indiquer une évolution avec la minéralisation. La concentration de ces éléments est supérieure à la droite des chlorures jusqu'à la valeur de 1.2 pour les sulfates et 0.8 pour le magnésium où la molalité de ces derniers diminue lorsque la concentration totale augmente avec une diminution plus importante de magnésium.

L'analyse de comportement de différents paramètres chimiques par rapport à la minéralisation globale (concentration des chlorures), confirme que l'importance des bicarbonates et du calcium par rapport à la concentration globale est expliquée par des eaux bicarbonatées provenant des zones d'alimentation (calcaires de Crétacé) au niveau des bordures, qui vont évoluer dans l'aquifère du remplissage (Miocène) et s'enrichissent davantage après dissolution des minéraux évaporitiques, en ions sulfates, sodium etc Ces eaux auront à la fin, la signature chimique des calcaires (dominance des bicarbonates) et celle des minéraux évaporitiques, notamment gypsifères. A noter que la dominance des bicarbonates sur les sulfates dans ces eaux indique un taux de gypse assez faible parmi les roches du remplissage Miocène.

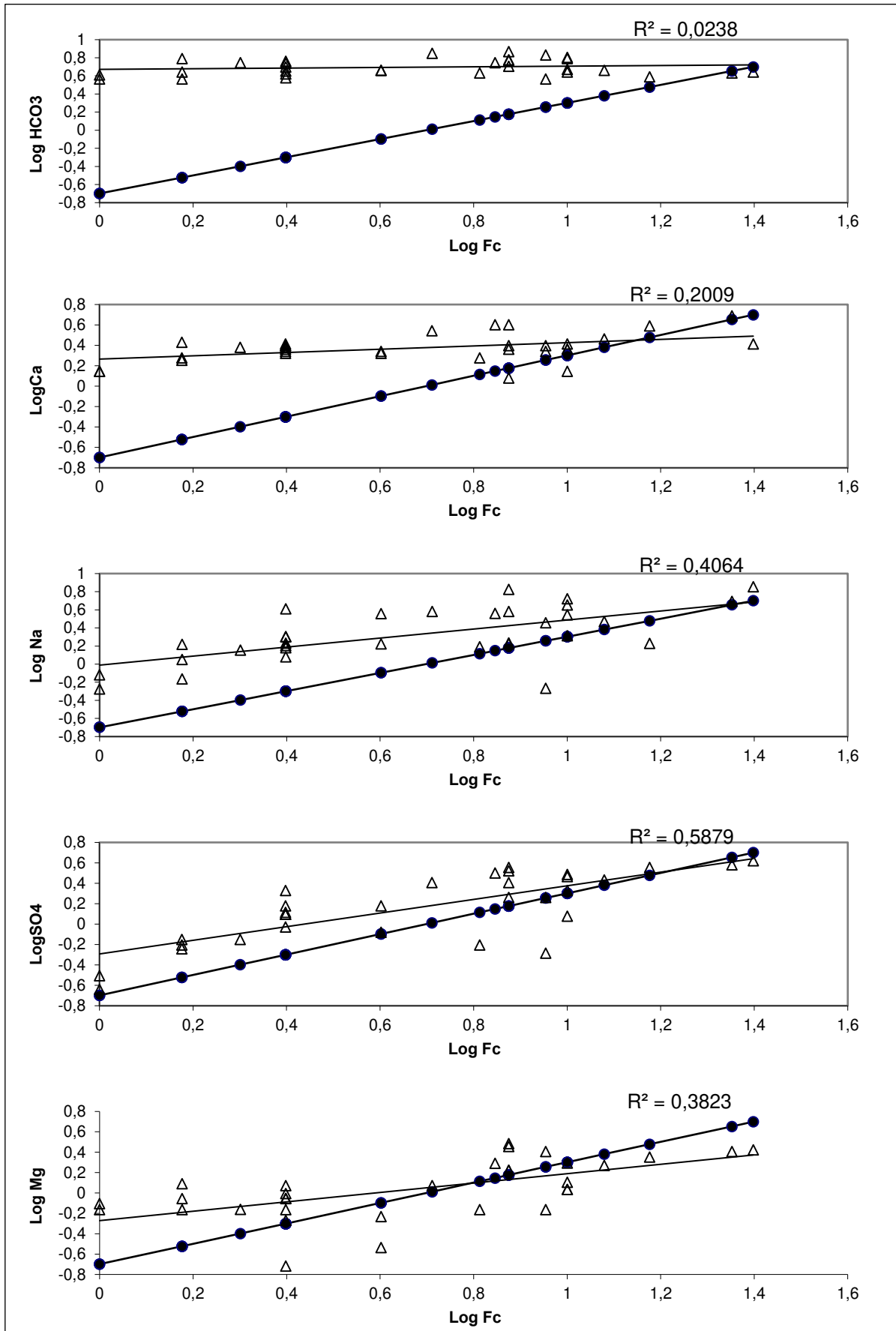


Figure N° 76 : Diagrammes de concentration

8. Conclusion

Le chimisme des eaux souterraines du bassin de Timgad est caractérisé par une certaine homogénéité dans l'espace. La minéralisation augmente progressivement du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Les eaux du bassin, dans leur majorité, ont des teneurs conformes aux normes de potabilité Algériennes, à l'exception de quelques points caractérisés par un excès des nitrates ou d'autres paramètres pour ceux qui se trouvent en aval du bassin.

Les eaux souterraines du bassin de Timgad sont marquées par la dominance du faciès bicarbonaté (calciques, sodiques et magnésiens) qui représente 81% dont 65% est calcique, montrant l'influence des carbonates surtout au niveau des bordures correspondant aux zones d'alimentation (calcaires du Maestrichtien et de l'Aptien). Dans certains endroits (flancs méridionaux de DJ. Bou Arif et Amrane ainsi que le flanc septentrional de Dj Chelia) le calcium dans le faciès bicarbonaté est remplacé par le Na, donnant naissance à un faciès bicarbonaté sodique (10%), ceci peut être dû à un échange de base qui s'effectue entre ces deux ions.

L'apparition du faciès évaporitique (19%) représenté par les sulfates combinés parfois avec le Ca et autre fois avec le Na, se concentre en aval vers l'exutoire. Ces eaux présentent un rapport SO_4/HCO_3 proche de 1 ce qui nous permet de dire que ces eaux sont à l'origine carbonatées contaminées par des formations évaporitiques (les argiles gypsifère) qui acquièrent par conséquent ce caractère.

Les fortes conductivités (1060 - 1860 μ S/cm) correspondent aux eaux sulfatées dont le parcours souterrain a été relativement prolongé, alors que les valeurs relativement faibles (870 - 990 μ S/cm) correspondent aux eaux bicarbonatées, jeunes avec un parcours souterrain réduit

L'ACP a met en évidence l'évolution de la majorité des paramètres (Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2}) avec la conductivité montrant ainsi un pôle de minéralisation qui représente les variables d'origine géologique, tandis que le deuxième pôle est marqué par les HCO_3^- qui ne suivent pas la minéralisation globale en raison de la saturation des eaux souterraines du bassin de Timgad en HCO_3^- .

L'analyse de comportement des différents paramètres chimiques par rapport à la minéralisation globale (concentration des chlorures), confirme que l'importance des bicarbonates et du calcium par rapport à la concentration globale est expliquée par des eaux bicarbonatées provenant des zones d'alimentation (calcaires de Crétacé) au niveau des bordures, qui vont évoluer dans l'aquifère du remplissage (Miocène) et s'enrichissent davantage après dissolution des minéraux évaporitiques ; en ions sulfates, sodium et ...etc. Ces

eaux auront à la fin alors, la signature chimique des calcaires (dominance des bicarbonates) et celle des minéraux évaporitiques, notamment gypsifère. A noter que la dominance des bicarbonates sur les sulfates dans ces eaux indique un taux de gypse assez faible parmi les roches du remplissage Miocène.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le bassin de Timgad appartient à l'Atlas saharien nord-oriental, à la terminaison septentrionale du massif des Aurès. D'une superficie de 1000 Km², il a la forme d'une gouttière de direction Est-Ouest, limitée au nord par les massifs Bou Arif, Amrane et Tagratine, et au sud par les massifs Chelia, Rdam et Nerd Bouhmar.

Le bassin s'étend sur deux Wilayas (Wilaya de Batna et Wilaya de Khenchela). Il contient sept communes abritant plus de 79500 habitants. Le bassin est en premier lieu marqué par son agriculture qui est basée essentiellement sur les ressources en eaux souterraines qui sont les ressources les plus importantes dans le bassin, leur mobilisation est assurée par un grand nombre de forages et de sources captées ou non captées, réparties à travers tout le bassin.

Géologie:

Le bassin de Timgad fait partie de l'avant-pays atlasique autochtone à la terminaison septentrionale du massif des Aurès. Il s'agit d'un synclinal de direction Est-Ouest, formé essentiellement par des ensembles sédimentaires du Miocène plissés (GHANDRICHE, 1991) qui s'étalent sur de grandes étendues constituées à la base par des conglomérats rouges et calcaires (Aquitaniens-Serravallien) surmontés par une série marneuse avec des bancs de grés et des argiles verdâtres gypsifères (Tortonien) ; au-dessus se trouve l'alternance des argiles rouges et des argiles gréseuses (Messinien). Ces trois ensembles lithologiques reposent en discordance sur des séries marneuses et carbonatées du Crétacé par des dépôts détritiques le plus souvent grossiers (COQUAND, 1862) et sont recouverts par le Quaternaire (GUELLAL & VILA, 1973 ; GHANDRICHE, 1991).

Au centre de bassin, on peut bien observer l'apparition des formations du Secondaire marno-calcaires au niveau des massifs isolés (Djebel Tagratine, Koudiate Safia, Kef Lakhal, le massif de Bouhmar et Dj. Amrane)

Les contreforts des reliefs qui bordent le bassin de Timgad au Sud sont formés localement d'affleurements miocènes. En revanche, le quaternaire les recouvre dans toute la partie NW et partiellement dans le centre du bassin.

Les bordures septentrionales et méridionales du bassin de Timgad sont aussi généralement de nature marno-carbonaté, représentant ainsi la partie visible de substratum du bassin de Timgad

Du point de vue structural, le bassin de Timgad est influencé essentiellement par la phase atlasique qui a tracé ses structures plissées qui ont été réactivées par la phase post-miocène. Produisant un réseau de fracturations avec les directions principales suivantes : NW-SE et NE-SW, affectant à la fois les formations du Miocène et du Crétacé (VILA, 1980 ; GHANDRICHE, 1991 ; DJAIZ, 2011), le Miocène s'est déposé généralement sur une surface d'érosion formant ainsi une suite de dépressions parfois très profondes (Dj. Tagratine, Kef Lakhhal...), (LAFFITTE, 1939 ; MARMI, 1995).

Géophysique

L'étude géophysique a montré la présence de dépôts de faible résistivité dont l'épaisseur augmente des bordures vers le centre du synclinal, correspondant aux marnes et aux argiles du Miocène, surmontant un niveau relativement résistant correspondant principalement à des grès du Miocène et partiellement à des calcaires du Crétacé qui affleurent sur les bordures (ENAGEO, 1993). Les horizons susceptibles d'être aquifères sont les grès du Miocène et les calcaires du Crétacé. On remarque que les grès sont présents dans toutes les coupes géoélectriques tandis que les calcaires d'Aptien ne sont atteints que sur les flancs Nord et Sud de la région.

Hydroclimatologie

Le bassin de Timgad de par sa position géographique est soumis essentiellement à l'influence de deux régimes climatiques : le climat dominant est le climat semi aride à hivers frais, le climat sub-humide à hivers froid est localisé aux altitudes septentrionales du bassin (station de Chelia)

Le climat du bassin est connu par son irrégularité. Les conditions climatiques varient d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre.

Les valeurs des précipitations moyennes annuelles pour les stations : Timgad, Touffana, A.B.Tenoun, Baiou et Chelia sont respectivement 277mm, 263mm, 349mm, 366.17mm et 506mm,

Avec des températures moyennes annuelles de 17.08°C, 16.88°C, 15.46°C, 14.04°C et 11.21°C

Et les valeurs de l'ETR sont respectivement de l'ordre de 247.80mm, 236.25mm, 272.79mm, 281.10mm et 316.67mm, soient (89.23%, 89.77%, 77.98%, 76% et 62.50% des précipitations moyennes annuelles), selon Thornthwaite.

Pour la majorité des stations, le bilan hydrique est déficitaire, les valeurs de déficit agricole pour les stations : Timgad, Touffana, A.B Tenoun, Baiou et Chelia sont respectivement : 670.41mm, 667.37mm, 562.12mm, 509.66 et 139.97mm. Seule la station de Chelia qui marque un bilan plus ou moins équilibré avec un excédent hydrique de l'ordre de 139.97mm soit 27.63% des précipitations moyennes annuelles.

Hydrogéologie

Le bassin de Timgad constitue un système aquifère dont le plus important est l'aquifère gréseux miocène (Tortonien) qui est captif et même artésien (Sud-Ouest du Bassin) avec une épaisseur importante (200m), et une large étendue. Il est alimenté essentiellement par les massifs septentrionaux des Aurès de nature carbonatée d'âge crétacé. L'écoulement des eaux souterraines est orienté principalement vers l'Est du bassin (région de Bou el Freis). La partie nord du bassin contient un important fossé d'effondrement de remplissage argilo-marneux, ce dernier forme une barrière étanche, influant sur le sens d'écoulement des eaux souterraines et l'augmentation de la pression au niveau de l'aquifère, ce qui explique la présence de certains points artésiens dans la partie sud (Oued Taga et Timgad). Les eaux souterraines sont en général facilement accessibles, à l'exception de la partie nord du bassin, là où le remplissage argilo-marneux est plus épais (plus de 1000m) jamais encore dépassé par sondage.

Les transmissivités de l'aquifère des grès du Tortonien sont de l'ordre de 10^{-4} m²/s, sauf à Oued Taga, où elle est de l'ordre de 10^{-2} m²/s, en raison de la nature des grès plus grossiers et de l'excellente réalimentation par les bordures.

Les formations carbonatées présentent des transmissivités plus faibles, comme à Ain Abderrahmane (10^{-5} m²/s) dénotant la complexité de la circulation souterraine en milieu carbonaté sous porosité de fissures.

Pour l'ensemble des forages, le débit d'exploitation varie entre 10 à 22 l/s. Ils sont plus élevés dans la partie sud-ouest du bassin qui est très proche des limites d'alimentation. En revanche, dans la partie aval du bassin, les débits sont plus faibles, de l'ordre de 5 l/s, en raison de la prédominance des formations argileuses.

Hydrochimie

Les eaux souterraines du bassin de Timgad sont marquées par la dominance de faciès bicarbonaté (81%) montrant l'influence des carbonates surtout au niveau des bordures correspondant aux zones d'alimentation. Nous remarquons que par endroits (flancs méridionaux de DJ. Bou arif et Amrane ainsi que le flanc septentrional de Dj Chelia) le calcium dans le faciès bicarbonaté est remplacé par le Na, donnant naissance à un faciès bicarbonaté sodique (10%), vers l'exutoire, on remarque l'apparition de faciès sulfaté (19%), En effet les eaux sont à l'origine carbonatées sauf qu'elles sont contaminées par des formations évaporitiques (les argiles gypsifère) qui acquièrent par conséquent ce caractère.

L'ACP a met en évidence l'évolution de la majorité des paramètres (Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2}) avec la conductivité montrant ainsi un pôle de minéralisation qui représente les variables d'origine géologique, tandis que le deuxième pôle est marqué par les HCO_3^- qui ne suivent pas la minéralisation globale en raison de la saturation des eaux souterraines du bassin de Timgad en HCO_3^- .

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDELKABIR, M., JEAN, V. & MICHEL, B., (2004). Hydrochimie de l'Esker Saint-Mathieu Berry, Abitibi, Québec Rev 57^{ème} Congrès Canadien de géotechnique, 29-30p.

ACHI, N., (2015). Caractérisation d'un réservoir gréseux par simulation de carottes artificielles Thèse de magister Sciences Université des frères Mentouri de Constantine, 139p.

AGW-Net, & BGR, & IWMI, & Cap Net, & RAOB, & IGRAC, (2015). Intégration de la gestion des eaux souterraines dans les organismes de bassin transfrontaliers en Afrique, manuel de formation, 232p.

ANDI, (Agence Nationale de Développement de l'Investissement), (2013). Monographie de la wilaya de Batna, 18p.

ANDI, (Agence Nationale de Développement de l'Investissement), (2013). Monographie de la wilaya de Khenchela, 20p.

ANRH, (Agence nationale des ressources hydriques), (2013). Données pluviométriques, Algérie.

BABA HAMED, K., & BOUANANI, A., (2016). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna. (Nord-ouest algérien), Geo-Eco-Trop., 2016, 40, 4, 277-286 p.

BARBIERO, L., (1992). Les sols alcalinisés du socle dans la Vallée du Fleuve Niger-Origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Thèse Doctorat, ENASA Rennes, 210p.

BENZÉCRI J.P., (1973). Analyse des données. T2 (leçons sur l'analyse factorielle et la reconnaissance des formes et travaux du Laboratoire de statistique de l'Université de Paris 6. T. 2 : l'analyse des correspondances), Dunod Paris Bruxelles Montréal, 619p.

BOUABDALLAH, E.H., (2008). Le concept de durabilité à travers une relecture de l'histoire agricole romaine et des paysages actuels de certains sites maghrébins hérités de cette époque, Colloque international « Développement durable des productions animales : enjeux, évaluation et perspectives », Alger, 20-21 Avril 2008.

BOUILLIN, J.P., (1986). Le « bassin maghrébin » : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. Bull. Soc. Géol. France, 8(2) 547-558p.

BRINIS, N., & BOUBOUKHA, A., (2011). Classification statistique et hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya. (W) de Biskra. Algérie. Publication au courrier du savoir- N°11, 41- 46 p.

BRINIS, N., (2015). Analyse statistique et géochimique de la Dynamique des paramètres physico-chimiques des Eaux souterraines du synclinal de Ghassira Algérie orientale. Publication au Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°22, Juin 2015, 123-137p.

BROCHET P., GERBIER N., (1975). L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique. Évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie de la météorologie nationale, n° 65, S.M.M. Climatologie. Paris, 95p.

CASTANY, G., (1982). Principes et méthodes en hydrogéologie. Dunod édit.Paris, 173 - 187p.

CASTANY, G., (1998). Hydrogéologie: principes et méthodes. Dunod. Paris. 238 p.

CHABOU, M.C., (2012). La chaîne des Maghrébides, Cours de Géologie Algérienne (3ème année), Département des Sciences de la Terre, Université Ferhat Abbas de Sétif, 10p.

COQUAND, M.H., (1862). Géologie et paléontologie de la région Sud de la province de Constantine. Mém, Soc, Emul, Province, II, 341 p.

DARCY, H., (1856). Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer, Paris, victor dalmont, 638p.

DELARTIGUE, H., (1904). Monographie de L'Aurès - Histoire particulière des diverses tribus de l'Aurès, Marle-Audrino, Constantine, Algérie, 285 p.

DJAIZ, F., (2011). Le Bassin néogène de Timgad : Etudes sédimentaire et tectonique (Algérie nord-orientale), Thèse de doctorat Université de Constantine, Algérie, 260p.

DJAIZ, F., & BRINIS, N., & Marmi, R., (2013). Le remplissage sédimentaire du bassin de Timgad et aquifères potentiels (Atlas saharien Algérien oriental), Afrique science 09(3) (2013) 66 – 76, 11p.

DHW (La Direction de l'hydraulique de la Wilaya de Batna), (2015). Rapport de DHW Batna. Algérie, 10p.

DPAT (Direction de la Planification et de l'Aménagement du territoire), (2008). Monographie de la Wilaya de Batna, 195p.

DSA (Direction des Services Agricoles de la wilaya de Batna et Khenchela), (2015).

DURAND-DELGA, M., (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Serv. Géol. Algérie, n°39, 89-131p.

ENAGEO, (1993). Rapport d'études géophysiques des sites Timgad et Ouled-Fadhel, 27p.

FAOUCAULT, A., & RAOULT, J.F., (2010). Dictionnaire de géologie, 7^{ème} édition, univers-sciences, 416 p.

GHANDRICHE, H., (1991). Modalités de la superposition de structures de plissement-chevauchement d'âge alpin dans les Aurès (Algérie), Thèse de doctorat Université de Paris Sud, centre d'Orsay, 196 p.

GHANDRICHE, H., (1987). Etude préliminaire du bassin tertiaire Timgad-Khenchela (Algérie orientale). Mémoire de D. E. A., Univ. de Paris-Sud Orsay, 29p.

GUIDOUM, A., (2004). Etude hydrologique du bassin versant de l'oued Chemorah (W. de Batna, Est Algérien). Mémoire de Magister, Univ. Hadj Lakhdar Batna.

GUIRAUD, R., (1968). Le plio-quadernaire du bassin du Hodna (Algérie du Nord). C. R. Acad. Sci. Paris, t. 267, série D, 561-564 p.

GUELLAL, M.S., & VILA, J.M., (1973). Étude géologique du permis Ain Beida. Rapport SONATRACH inédit, 120 p.

HAROLD, H., & Holbrook Working., (1929). Applications of the Theory of Error to the Interpretation of Trends, Journal of the American Statistical Association, 85p-73

KRUSEMENA, G.P. & De RIDDER N.A., (1973). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data; ILRI Wageningen, 1973, 2nd edition.

LAFFITE, R., (1933). Les formations continentales du Tertiaire de l'Aurès. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 197, n° 25, 1671-1672 p.

LAFFITE, R., (1939). Etude de géologie de l'Aurès. Doctorat Sciences Paris, Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, 1re série, 15, 484 p.

LAFFITE, R., (1939). Structure et relief de l'Aurès algérien. Bull. Ass. Géogr. Fr., n° 119, 34-39 p.

- LEVALLOIS, P., PHANEUF, D., (1994).** La contamination de l'eau potable par les nitrates : analyse des risques à la santé. Rev. Can. Santé publique, 85, 192-196.
- MARMI, R., (1994).** Stratigraphic informations about Cretaceous formations and 227 reconstructions of paleoenvironments of Northern Aures (East Algeria). Annual Assembly, IGCP Project N°362, Tethian and Boreal Cretaceous, Smolenice (Slovakia), 109-111 p.
- MARMI, R., (1995).** Les bassins continentaux de l'avant-pays de la chaîne alpine nord-orientale. Etude stratigraphique, sédimentaire, structurale et géochimique. Thèse de doctorat Université de Henri Poincaré, Nancy1, 283p.
- MENANI, M.R., (2009).** Hydrogéologie du massif des Aurès – Étude de vallées typiques. Rapport de recherche annuel-2009, Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, université de Batna, 24p.
- MENANI, M.R., (1991).** Étude hydrogéologique de la plaine d'El Madher (Algérie orientale): géologie, climatologie, hydrogéologie et modélisation des écoulements souterrains de l'aquifère mio-plio-quaternaire, thèse de doctorat, université de nancy,
- METEOBLUE, (2017).** Données climatiques du bassin de Timgad.
- MORIZOT, P., (1993).** L'Aurès et l'olivier Auteur : Edition : Antiquités africaines, 177p.
- MOULLEY C.C.,** La chaîne des Maghrébides, Cours de Géologie Algérienne (3^{ème} année), Université Ferhat Abbas de Sétif.
- OMM, (2011).** Guide des pratiques climatologiques p61 /152p.
- ONS (Office national de statistique), (2008).** Opération de recensement des habitants.
- WENGER, R., & ROGGER, C., & WYMANN, S., (2003).** Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). La voie du développement durable InfoResources Focus, N°1, 16p.
- RIHANI, A., (2008).** Étude hydrogéologique du bassin de Bouzina (sous bassin versant de l'Oued Abdi - Massif des Aurès), mémoire de Magister, université El Hadj Lakhdar –Batna, 176p
- RODIER, J., (1996).** L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 8^{ème} édition, Dénod, Paris, 1383 p.

SCHOELLER, H., (1959). Hydrologie des régions arides, la science et la culture, Fontenoy, Paris-7^{ème} Imprimeries Oberthur, 127p.

LAROCQUE, M., & GAGNÉ, S., & TREMBLAY, L., & MEYZONNAT, G., (2013). Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour, rapport final, université du Québec à Montréal Département des sciences de la Terre et de l’atmosphère, 219p.

VILA, J.M., (1980). La chaîne alpine d’Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat Sciences nat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 665p.

VILA, J.M., & GUELLAL, M.S., (1973). Cartes géologiques au 1/50 000e, Tazoult (201), Touffana (202), Boulhelet (174), Ain el ksar (173) 1^{ère} édition avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal et J.-M. Vila). Serv Carte géol. Algérie / SONATRACH, (division hydrocarbures, direction exploitation)

WILDI, W., (1983). La chaîne tello rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Rev. Géol. Dyn. géog. Phys., (24), 3, 201-297 p.

ANNEXE

Annexe I : Inventaire des forages

<i>Région</i>	<i>N</i>	<i>Propriétaire</i>	<i>Latitude</i>	<i>longitude</i>	<i>Alt</i>	<i>Prof</i>	<i>NS</i>	<i>ND</i>	<i>T°</i>	<i>Cond</i>	<i>S</i>	<i>TDS</i>	<i>Observation</i>
TAOUZIANETE	<i>F1</i>	MOSQUEE HAMZA	<i>N35° 30' 44"</i>	<i>E06° 48' 18"</i>	904	48	13,9						
	<i>F2</i>	MOSQUEE el ATIK	<i>N35° 30' 37"</i>	<i>E06° 48' 38"</i>	915	100	18,51		19,4	1395	0,7	679	
	<i>F3</i>	BEN ACHI ELJAMAI	<i>N35° 28' 44"</i>	<i>E06° 47' 55"</i>	951		26,6						
	<i>F4</i>	GUEHAM ABD ALLAH	<i>N35° 27' 48"</i>	<i>E06° 47' 36"</i>	984	120	44,4						
	<i>F5</i>	AGHROU TAHER	<i>N35° 28' 36"</i>	<i>E06° 49' 42"</i>	996	110	36,9						
	<i>F6</i>	AZIZI HEMAMA	<i>N35° 29' 49"</i>	<i>E06° 48' 25"</i>	930	120	70						
	<i>F7</i>	MOSQUEE CHORFA	<i>N35° 29' 16"</i>	<i>E06° 44' 30"</i>	1014		8,2						
BOULEFREI S	<i>F8</i>	ATHMANI LAZHAR	<i>N35° 29' 48"</i>	<i>E06° 46' 04"</i>	945	180	8,5						ABONDANNE/ L'EAU SALEE
	<i>F9</i>	SAHLI YASSINE	<i>N35° 32' 15"</i>	<i>E06° 46' 10"</i>	874	83	9,4						
	<i>F10</i>	MOSQUEE ERRAHMENE	<i>N35° 30' 56,5"</i>	<i>E06° 45' 12,5"</i>	895	200	17		19,6	1869	0,9	927	
YABOUS	<i>F11</i>	TAGHARISTE EZZINE	<i>N35° 26' 03"</i>	<i>E06° 39' 04"</i>	1105		41,8						
	<i>F12</i>	Mosquée ABOU BAKER	<i>N35° 24' 07"</i>	<i>E06° 38' 22"</i>	1188	170	25						
	<i>F13</i>	YABOUS (FORAGE ETATIQUE)	<i>N35° 25' 03"</i>	<i>E06° 35' 00"</i>	1220	100	14						
	<i>F14</i>	AIN DAUD SOUANEF NACER	<i>N35° 27' 54,9"</i>	<i>E06° 37' 58,5"</i>	1000	170	28		23,6	811	0,4	390	

Région	N	Propriétaire	Latitude	longitude	Alt	Prof	NS	ND	T°	Cond	S	TDS	Observation
TOUFFANA	F15	BIR SENDOU	N35° 31' 23,7"	E06° 37' 25,6"	1034		26,50		21,8	1219	0,5	527	
	F16	MEJOUJ TAIB	N35° 31' 40,8"	E06° 37' 17,4"	1040	189	30		20,5	944	0,5	455	
	F17	DIAB AMMAR	N35° 31' 56,1"	E06° 37' 20,7"	1053		45,2						
	F18	BOULEMZAOUAD	N35° 32' 19,3"	E06° 38' 11,8"	1040		26,1						
	F19	DIAB ESSADEK	N35° 32' 02,0"	E06° 38' 10,4"	1019	165	11,2		21,6	590	0,3	282	Les premiers mètres sont des marnes grise, jusqu'à 20m on trouve les grés
	F20	DIAB MOUBAREK	N35° 31' 10,3"	E06° 38' 46,1"	1005	180	100<		23,4	9,16	5,1	5020	
	F21	/	X : 857,596	Y : 244,67	1113	96	43		18,5	543	0,3	260	
	F22	/	X : 855,476	Y : 244,42	1103		61,15		16	614	0,3	291	
	F23	/	X : 855,062	Y : 244,15	1110		34,6						
	F24	/	X : 853,868	Y : 243,91	1110		36,1						
	F25	/	X : 855,045	Y : 247,97	1065	335	30,35		25	830	0,5	395	
	F26	/	X : 856,851	Y : 249,49	1036	280	42	54	25,5	864	0,4	416	
	F27	/	X : 857,732	Y : 245,65	1088	174	68						
	F28	/	X : 855,847	Y : 248,18	1041	300	24		20	1412	0,7	668	
F29	/	X : 857,165	Y : 248,63	1044		36,2							
F30	DIAB Mostefa (ouled fadhel)	X : 856,804	Y : 248,841	1038	200	25	80						

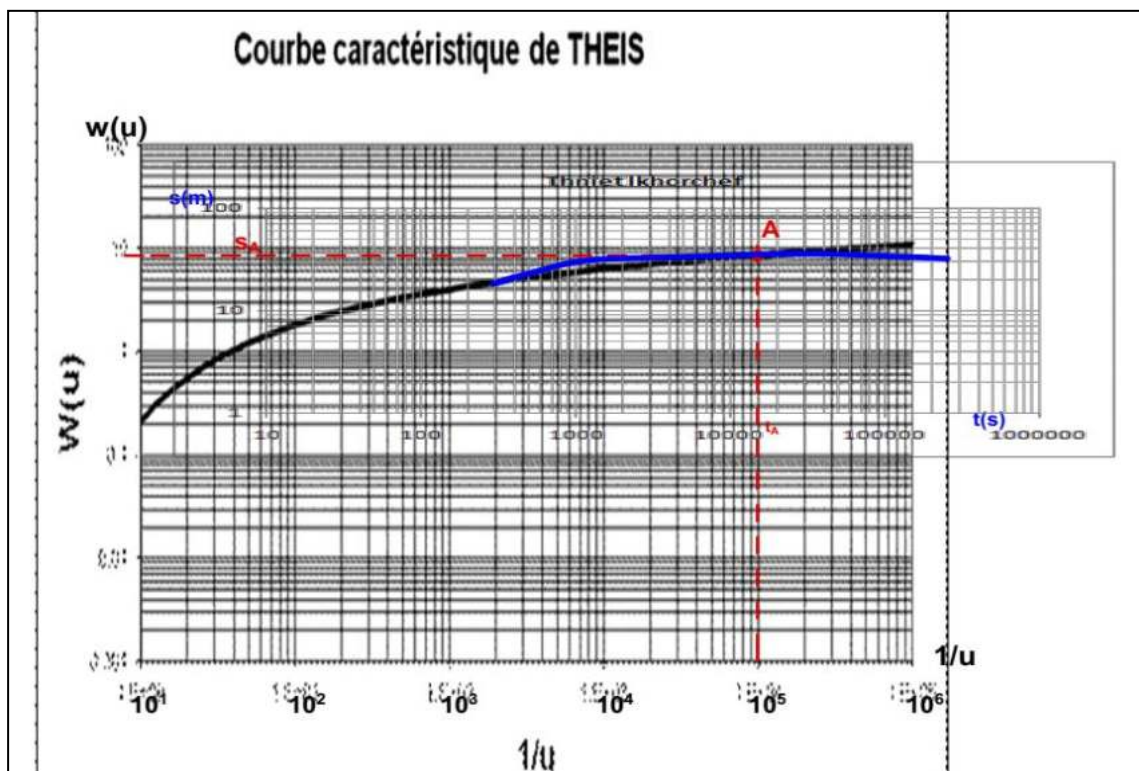
<i>Région</i>	<i>N</i>	<i>Propriétaire</i>	<i>Latitude</i>	<i>longitude</i>	<i>Alt</i>	<i>Prof</i>	<i>NS</i>	<i>ND</i>	<i>T°</i>	<i>Cond</i>	<i>S</i>	<i>TDS</i>	<i>Observation</i>	
TIMGA D	F31	2eme forage d'AIN ABDERRAHMANE	N35° 35' 45"	E06° 27' 41"	1221		0,8						ABONDANNE	
	F32	MORRI (FORAGE ETATIQUE)	N35° 28' 49"	E06° 29' 05"	1047		2		22,3	687	0,3	329		
	F33	GHOUAR RABEH 1	N35° 35' 18"	E06° 28' 03"	1161	100	22,1		19,9	1100	0,5	540		
	F34	BEN AICHA SABTI	N35° 34' 16"	E06° 29' 28"	1055	81	18							
	F35	POSTE GRTE (koudiet Medaour)	N35° 32' 10"	E06° 29' 44"	1048	110	4						ABONDANNE	
	F36	LA FERME ABDESSAMED SALEH	N35° 29' 54"	E06° 27' 45"	988		0							
	F37	BALA			993	96	0	12,6	12,5					
	F38	AIN TARFA			980		0,8							
	F39	THENIET EL KHORCHEF			1018		2							
	F40	AMRAOUI KHELIF chemora	N35° 35' 15"	E06° 34' 00"	930		11,7							
FOUMTOUB	F41	BAATACHE CHAFAI	N35° 29' 34"	E06° 32' 13"	1011	125	8	23,4	25,5	623	0,3	327		
	F42	BOUZYAGUE IBRAHIM	N35° 28' 28"	E06° 31' 57"	1032	180	0						ARTESIEN	
	F43	FORAGE ESSFAHE	N35° 25' 47"	E06° 33' 46"	1138		62,8		24,7	621	0,3	251		
	F44	TEBIKAOUINE (FORAGE ETATIQUE)	N35° 23' 32"	E06° 28' 14"	1388		21							
	F45	FOUMTOUB (FORAGE ETATIQUE)	N35° 24' 30"	E06° 32' 00"	1151	118	53							
	F46	RABHI LAKHDAR	N35° 23' 44"	E06° 28' 46"	1369	140	34,6		15,5	1012	0,5	491		
	F47	FORAGE ETATIQUE (foum tob 4)	N35° 23' 44"	E06° 28' 46,1"	1126		18		18,7	767	0,4	371		
	F48	TIBIKAOUINE 2			1290	297	105	126,75	12					

Région	N	propriétaire	Latitude	longitude	Alt	Prof	NS	ND	T°	Cond	S	TDS	observation	
OUED ETTAGUA	F49	G Hassiri Abderrahmane	N35° 25' 55"	E06° 25' 27"	1179	185	0		16,9	484	0,2	231	ARTESIEN	
	F50	Saidi Taher	N35° 25' 03"	E06° 28' 52"	1139	122	71		25,1	648	0,3	311		
	F51	Habeddine Amar	N35° 24' 45"	E06° 23' 05"	1315	100	18,2		16,2	660	0,3	315		
	F52	Khenguette Riouague (forage itatique)	N35° 24' 40"	E06° 21' 35"	1336		7,2							
	F53	Dardouri Mouhamed	N35° 25' 33"	E06° 23' 28"	1262		0		17,9	296	0,3	614		
	F54	Belaidi Med Saleh	N35° 26' 10"	E06° 26' 49"	1148	148	85		18,2					
	F55	ISLI (forage itatique)	N35° 24' ??"	E06° 28' ??"	1163	170	94		16,4					
	F56	Baiou (forage etatique)	N35° 24' 49"	E06° 19' 59"	1505	300	100<							
	F57	Goudja Amer	N35° 25' 45"	E06° 28' 18"	1142	221	63,4		16,8	3,2	1,6	1620	la salinité diminue après un certains temps de pompage	
	F58	forage etatique (bezzouh Ali)	N35° 25' 38,5"	E06° 24' 21"	1180		0		15,6	622	0,3	301		
	F59	MaaLEM Mouhamed	N35° 27' 04"	E06° 25' 36"	1230	150	42							
	F60	Baiou (forage etatique)	N35° 24' 49"	E06° 19' 59"	1505	300	100<							
	F61	Metouche Belkacem	X : 833,467	Y : 245,026	1395	51	25,8	40						
	F62	Mouda Belkacem	X : 830,385	Y : 240,138	1452	150	50	75						
	F63	Benmeriem Omar	X : 842,868	Y : 245,33	1125	150	45	68						
F64	ISLI	X : 843,57	Y : 241	1171	208	82	85,83	36						

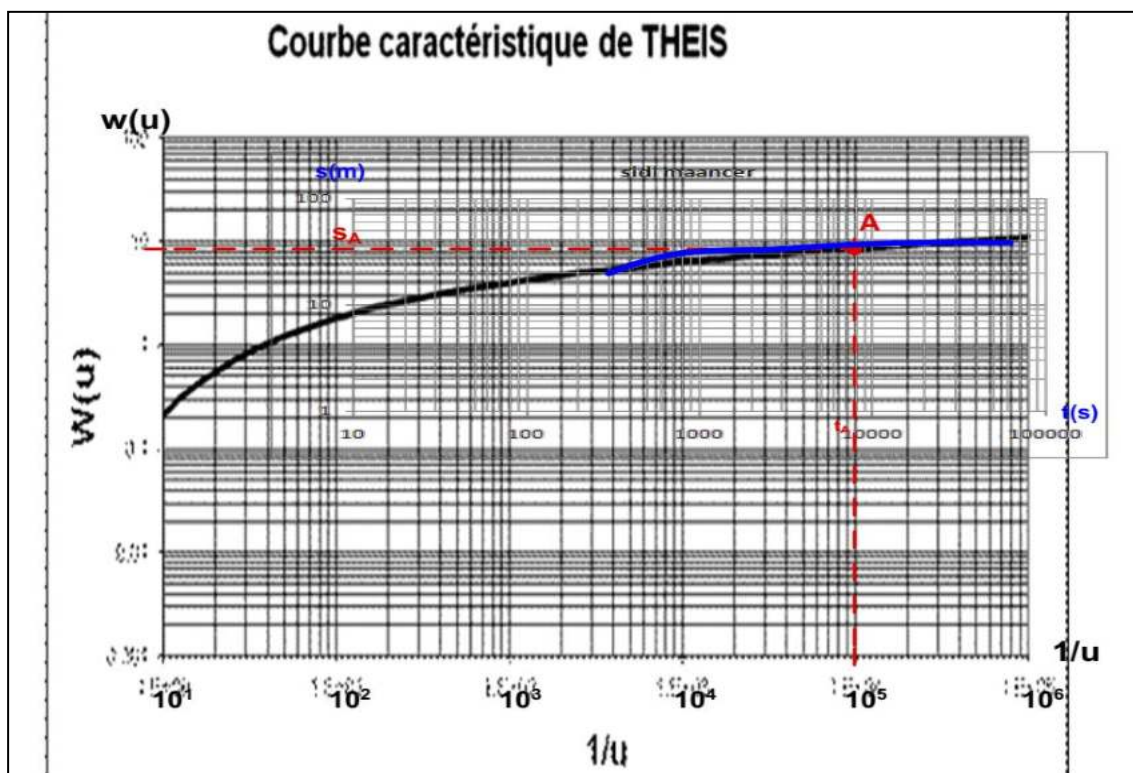
Région	N	propriétaire	Latitude	longitude	Alt	Prof	NS	ND	T°	Cond	S	TDS	observation	
SIDI MAANSAR	F65	OUAID (FORAGE ETATIQUE)	N35° 29' 44"	E06° 23' 04"	1106	380	100<		30,5	845	0,4	406		
	F66	LABIR ALI	N35° 29' 15,3"	E06° 23' 53,9"	1110	130	72,2		21	1337	0,7	650		
	F67													
	F68	TALEB KAMEL	N35° 30' 02"	E06° 25' 26"	1085	150	54							
MERIEL	F69	LAMBARKIA FARID	N35° 29' 50"	E06° 21' 47"	1122		23,8							
	F70	SAHNOUNI JAMEL	N35° 29' 51"	E06° 20' 45"	1114	105	22							
	F71	OUAYD (Propriété de ferme pilote)	N35° 30' 01"	E06° 23' 25"	1085	220	67							
	F72	LAMBARKIA LAHCENE	N35° 29' 33,2"	E06° 21' 5,7"	1161	125	21,3		22,5	599	0,5	422		
	F73	OUED MERIEL	N35° 29' 31,1"	E06° 19' 56"	1165	85	7,7		20	792	0,4	380		
	F74	GOUDJA AHMED	N35° 29' 41,7"	E06° 20' 19,2"	1146	42	28,5							
AIOUN EL ASSAFIR	F75	BESBAS FARID	N35° 33' 33"	E06° 17' 12"	1125	120	100<							
	F76	ABDESSAMED	N35° 33' 33"	E06° 33' 53"	1141		150<							
	F77	MOSQUEE el rahma	N35° 34' 46"	E06° 20' 49"	1120	100	5,2						Le débit d'eau s'arrête après 30 mn de pompage	
	F78	RAHAL EL GHARBI	N35° 35' 16"	E06° 20' 56"	1245	170	73		15,5	623	0,3	225		
	F79	INCONNU	N35° 33' 41"	E06° 19' 18"	1183		47,8							
	F80	MOURAD MASAUD	N35° 35' 06,8"	E06° 20' 42"	1193		65							
	F81	HAMOUDA SELEIMANE	N35° 34' 49,6"	E06° 20' 05,8"	1169	178	100		18,6	837	0,4	402		
	F82	KHENISSA Naoui (Ain el assafir)	X : 824,324	Y : 256,037	1139	150	13	143						
	F83	Timzel TASOULT	X : 828,232	Y : 247,01	1280	218	47	48,63						

Annexe II : application de la méthode de Theis

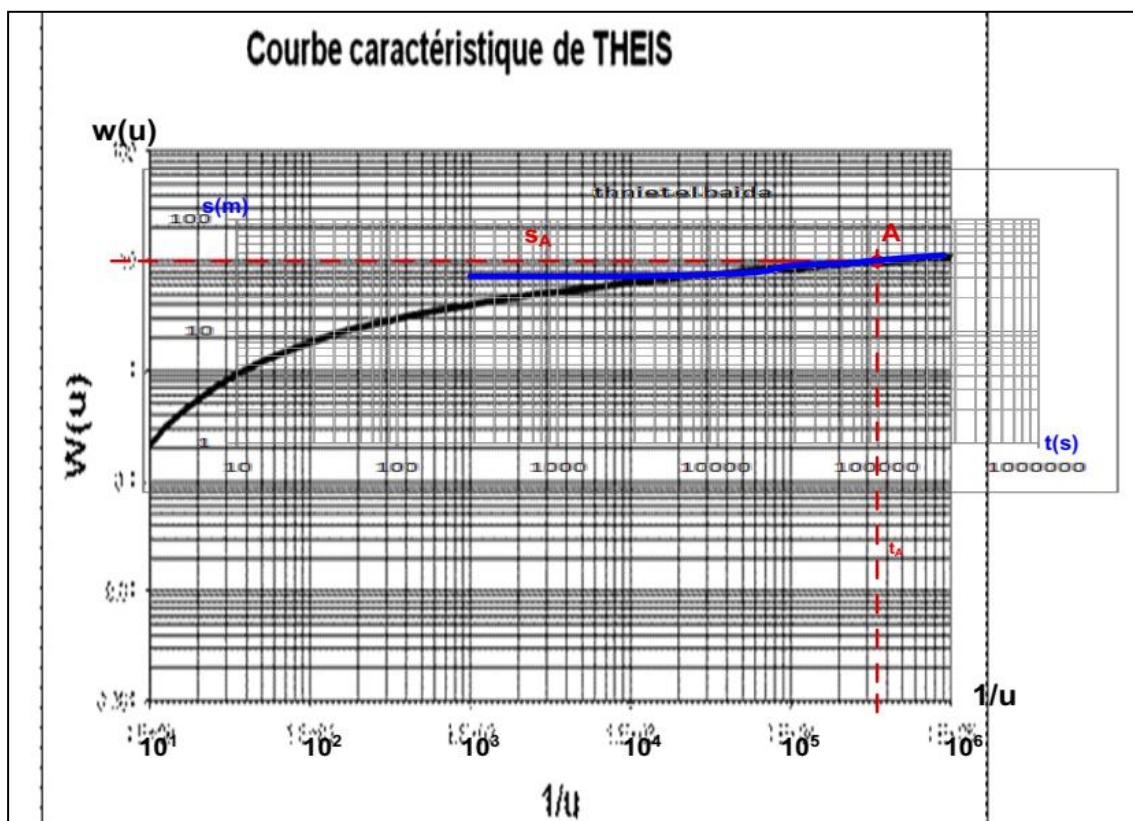
Forage Thniet Ikhorchef



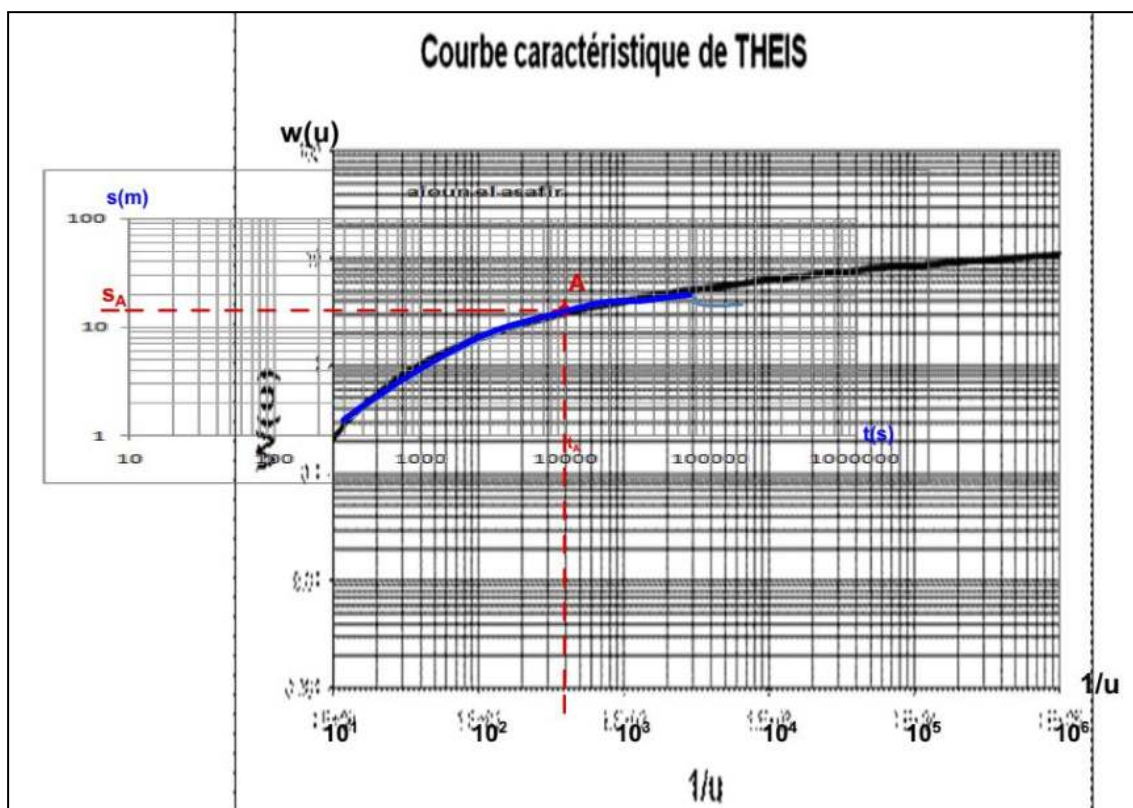
Forage Sidi Maancer



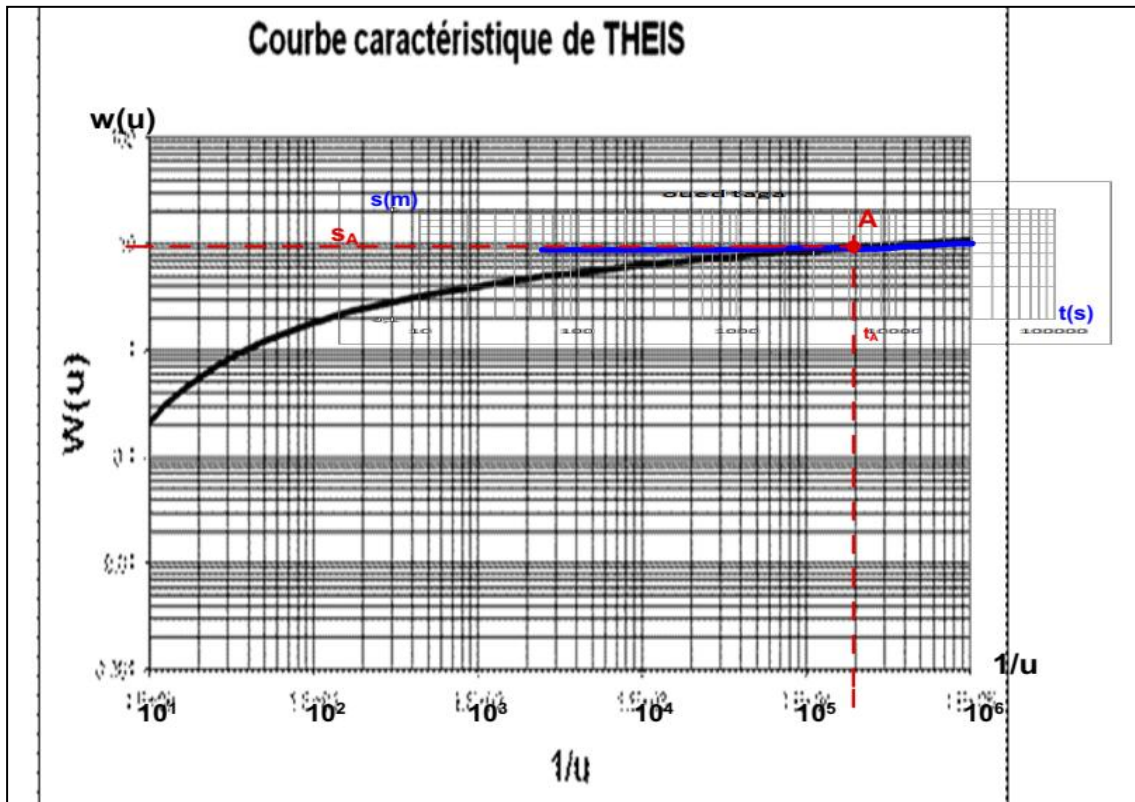
Forage Thniet el baida



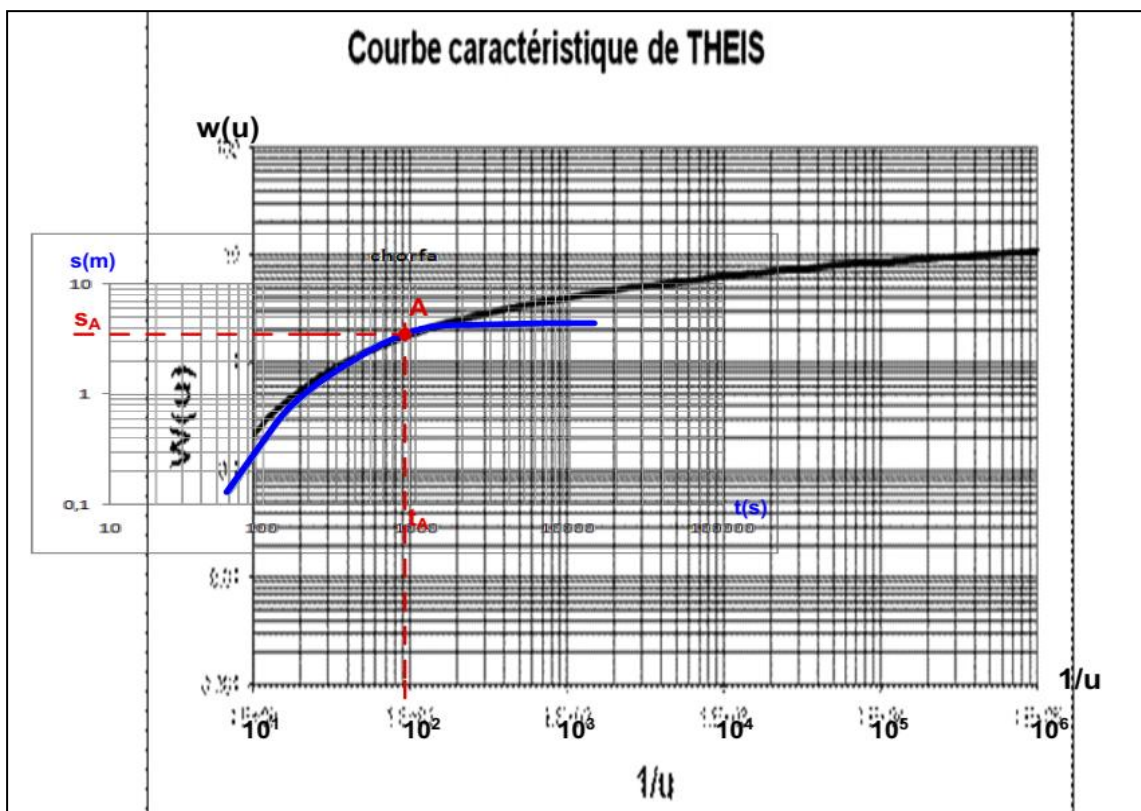
Forage Aioun el assafer



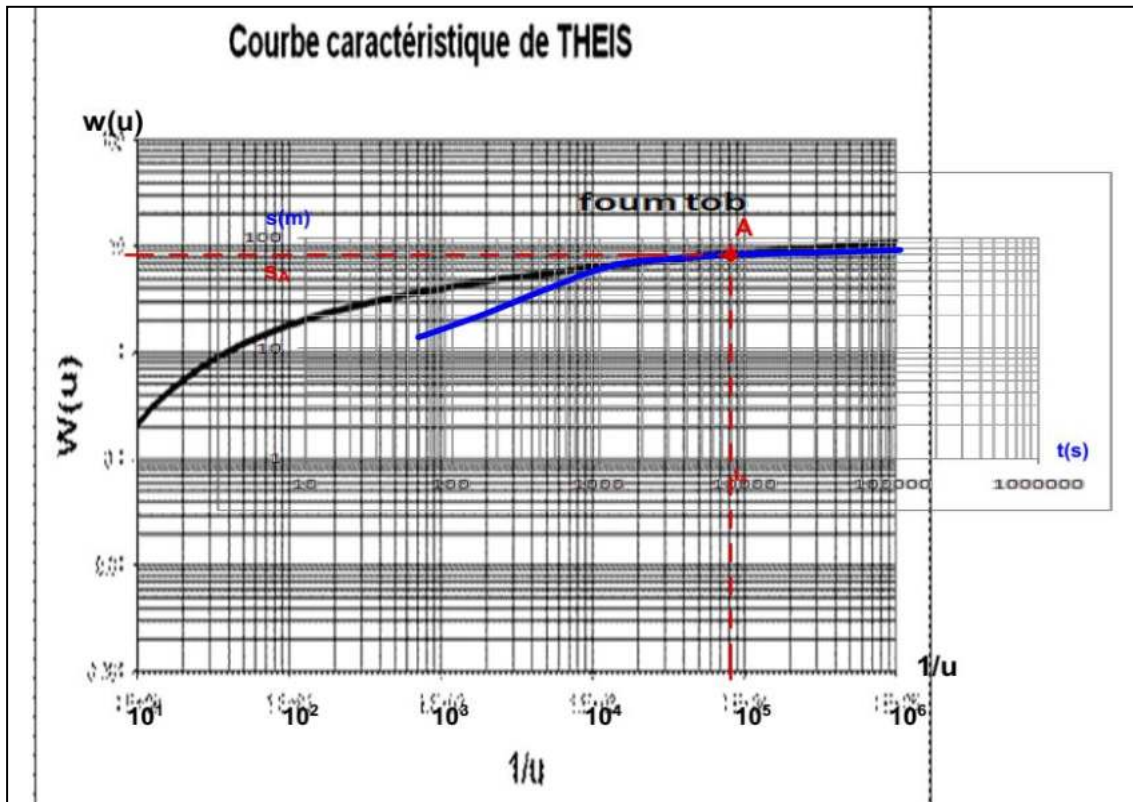
Forage Oued Taga



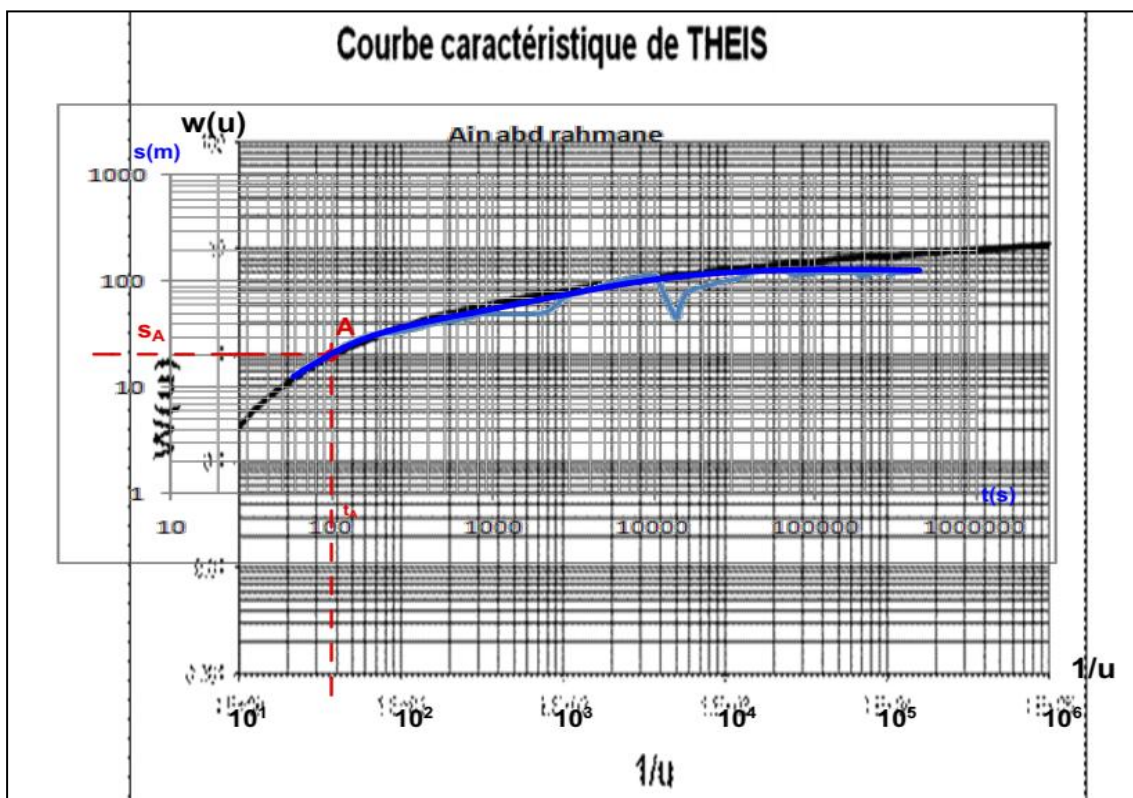
Forage Chorfa



Forage Fom Tob

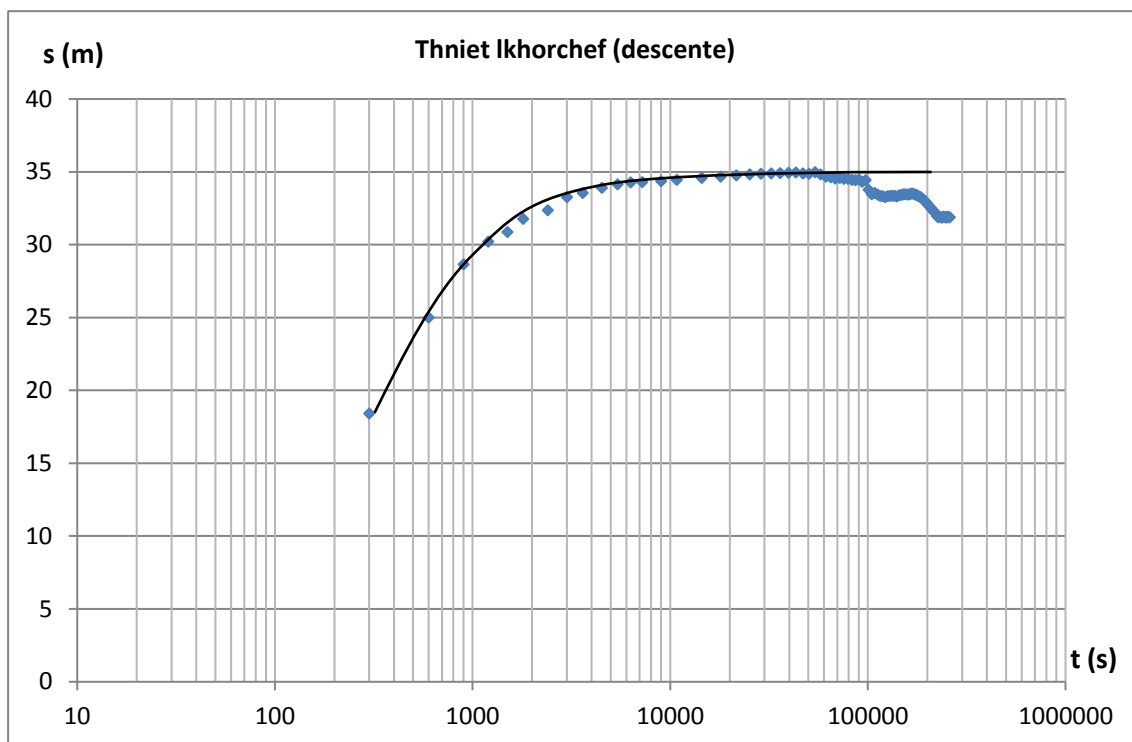


Forage Ain abd rahmane

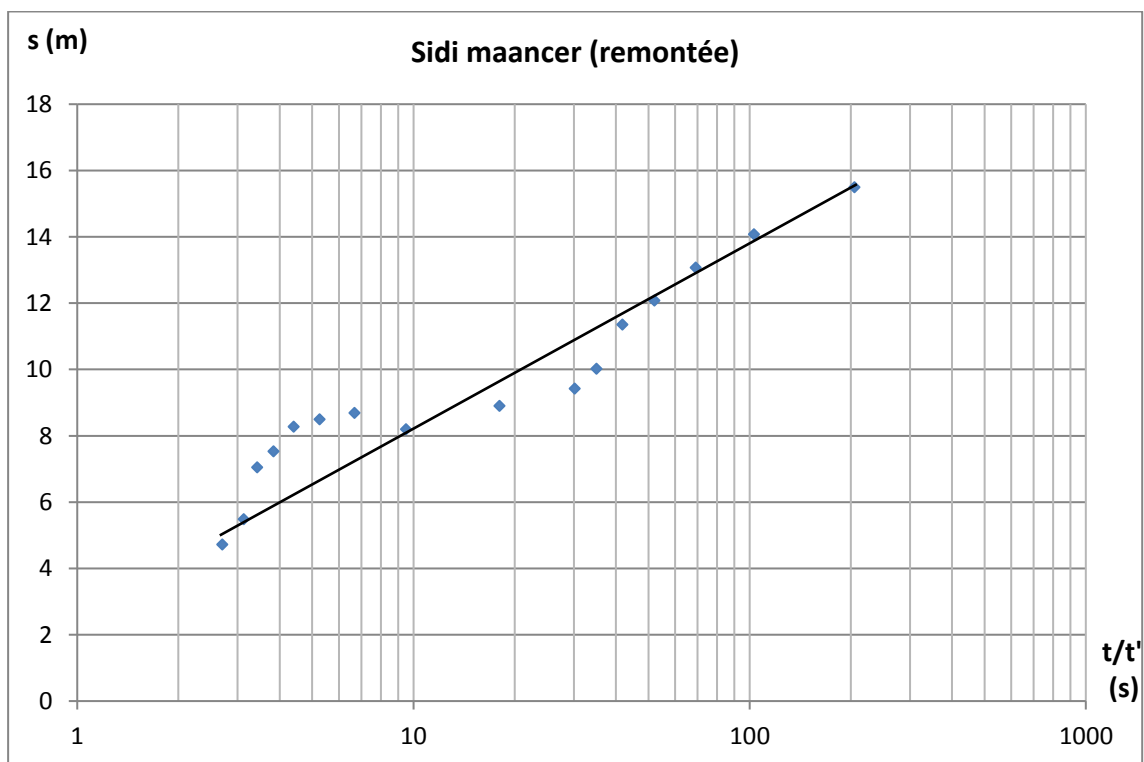
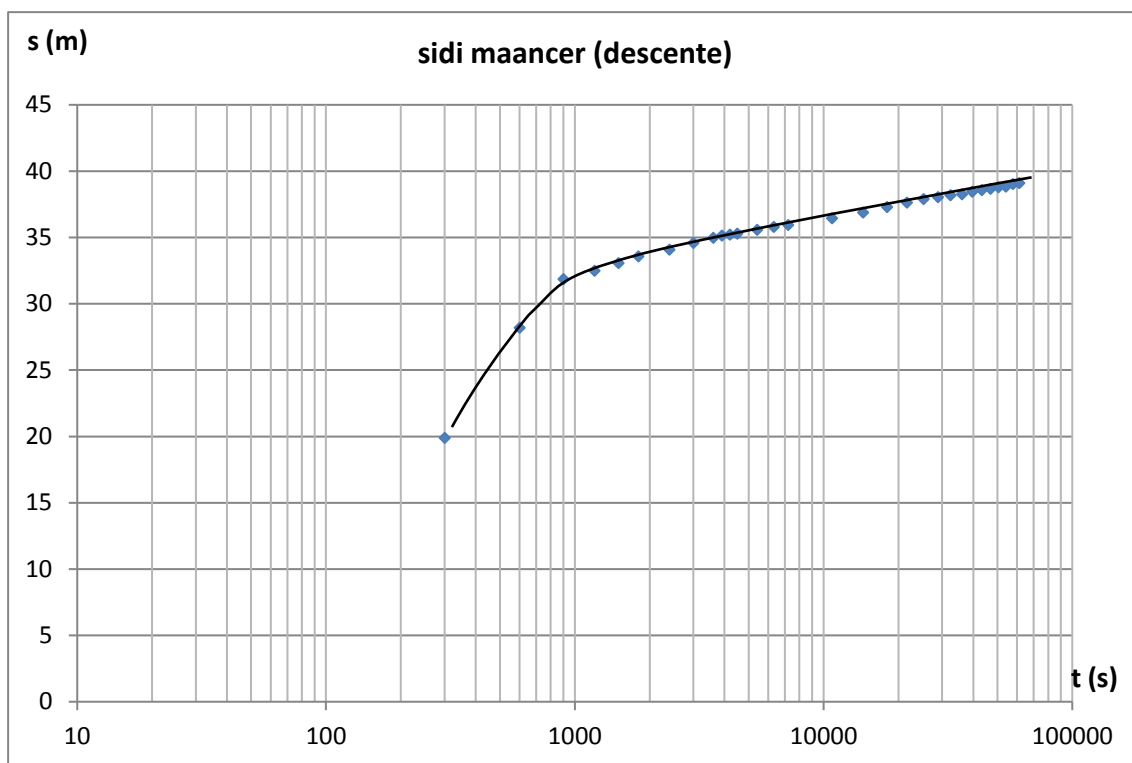


Annexe II : application de la méthode de Cooper-Jacob

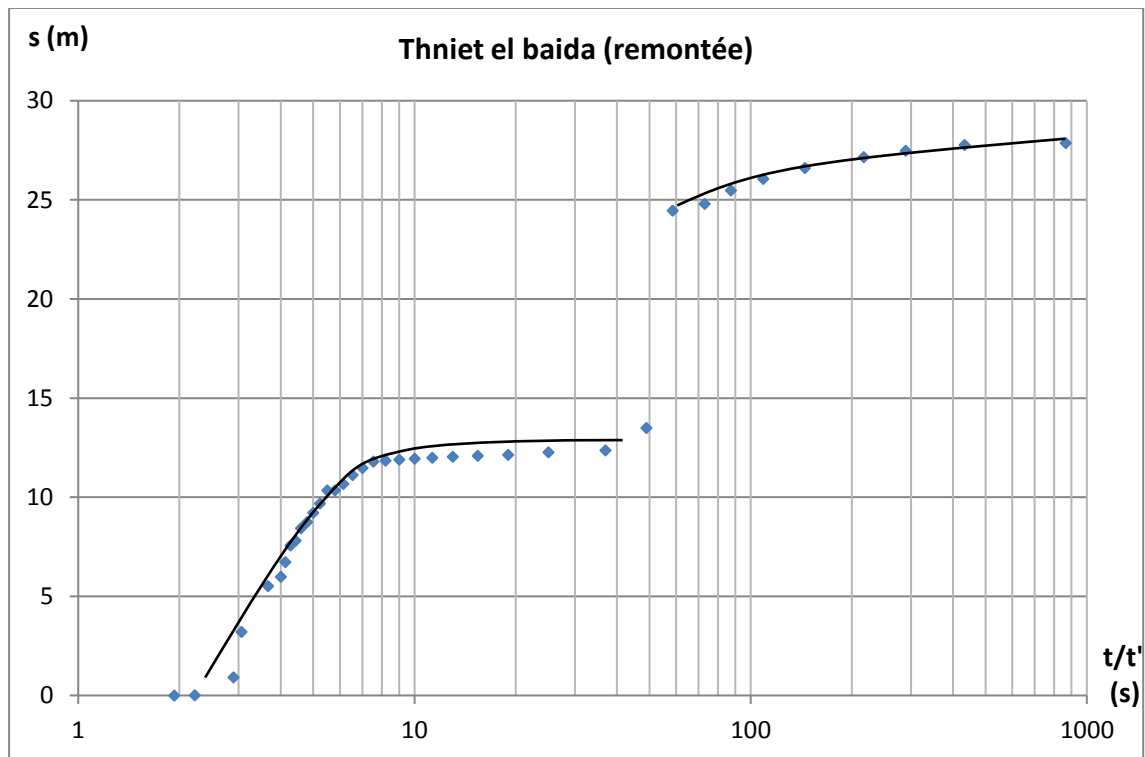
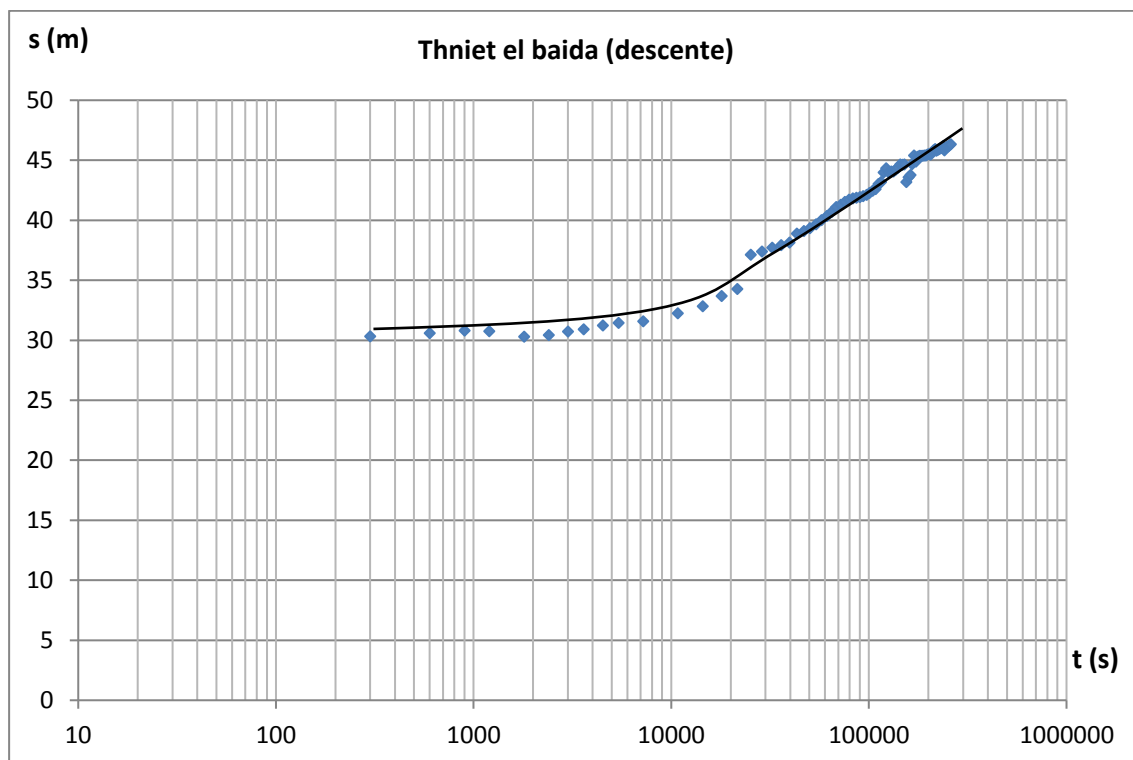
Forage Thniet Ikhorchef



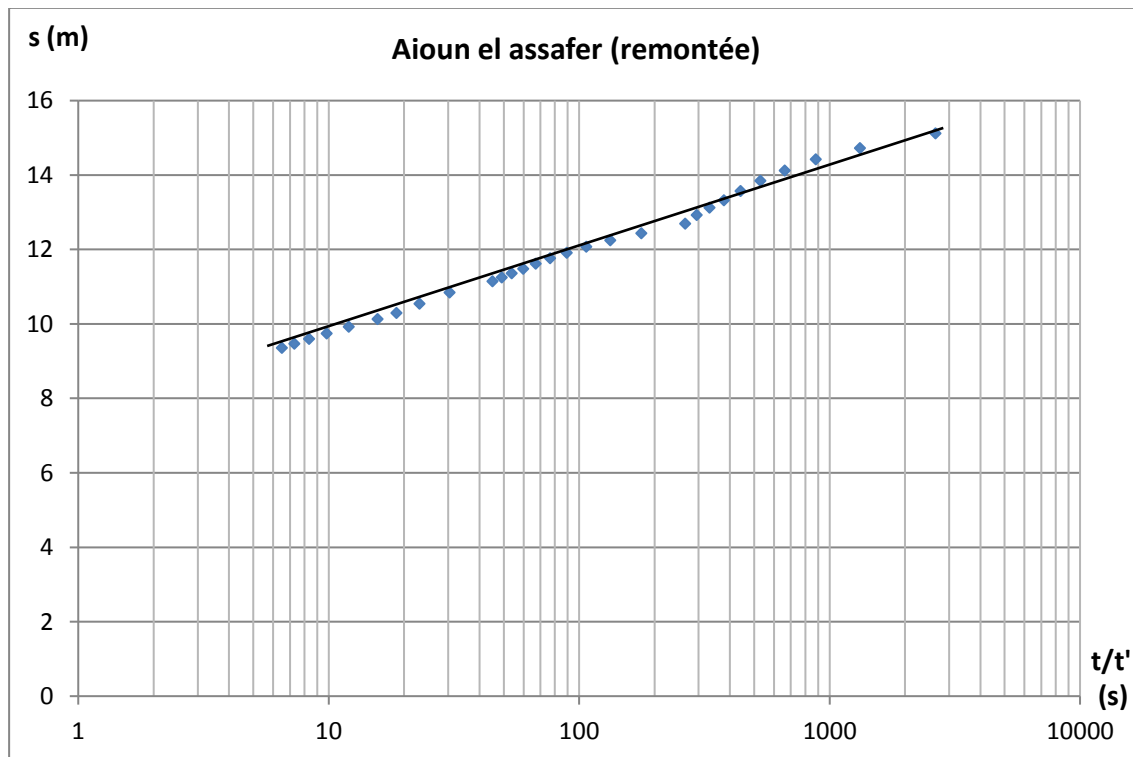
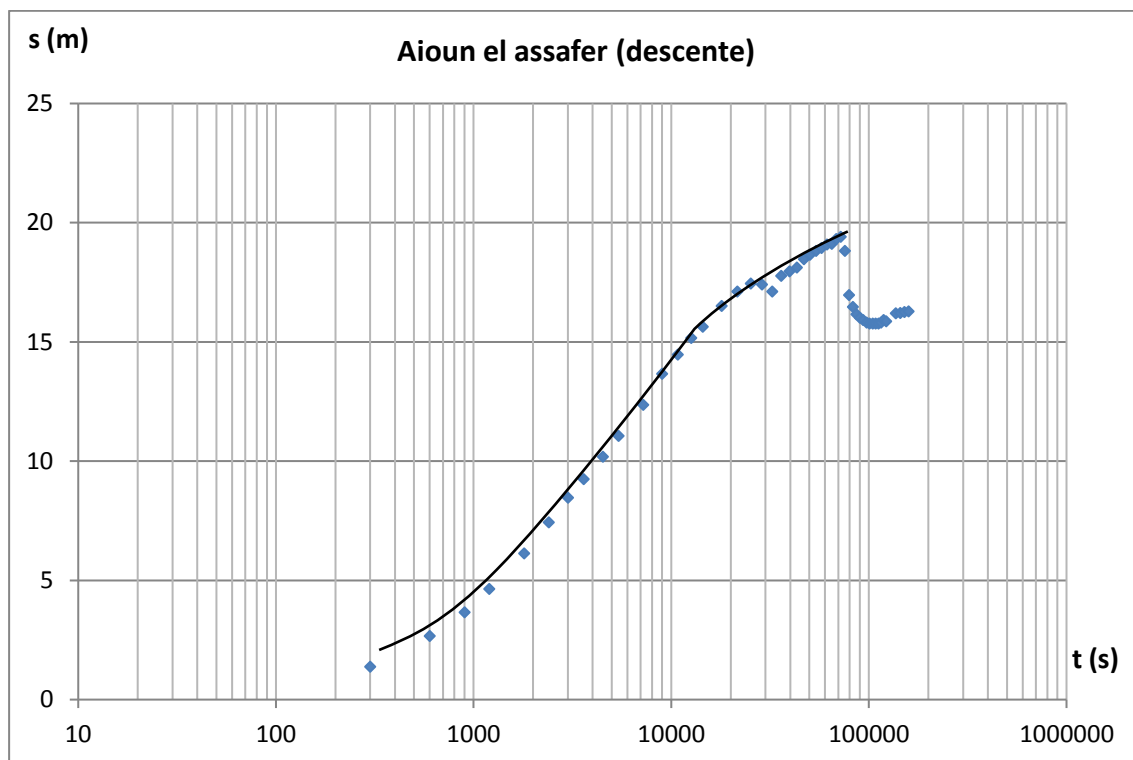
Forage Sidi Maancer



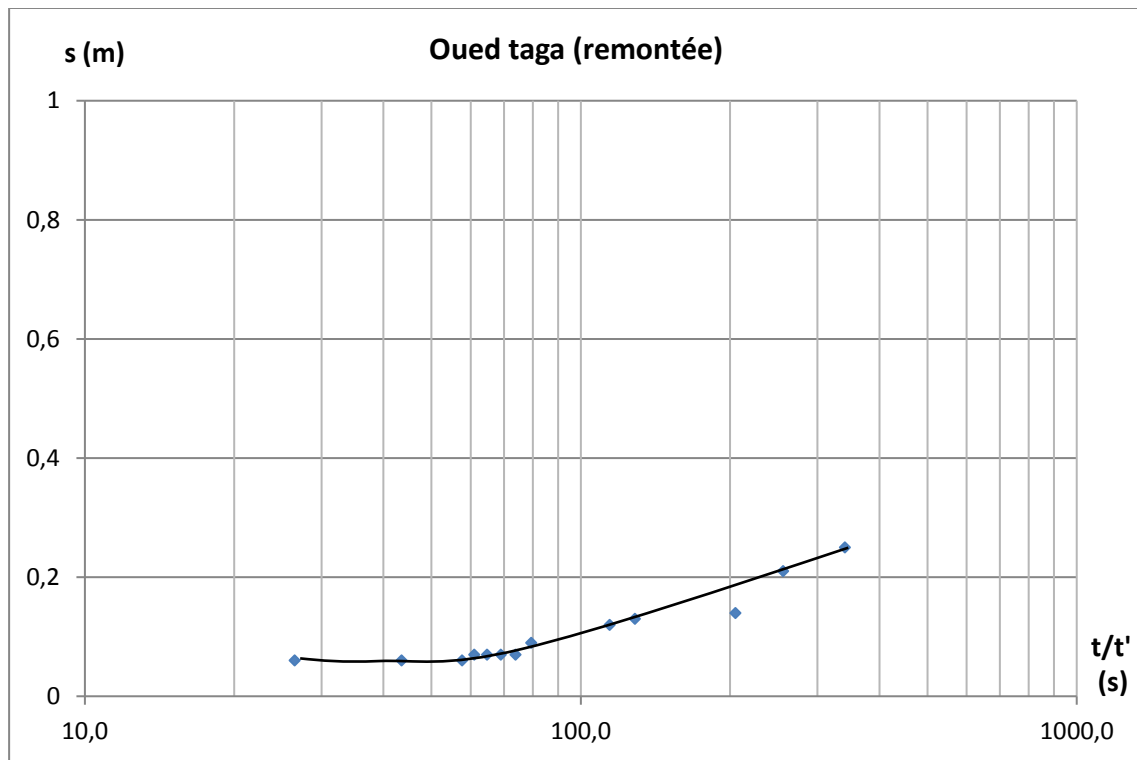
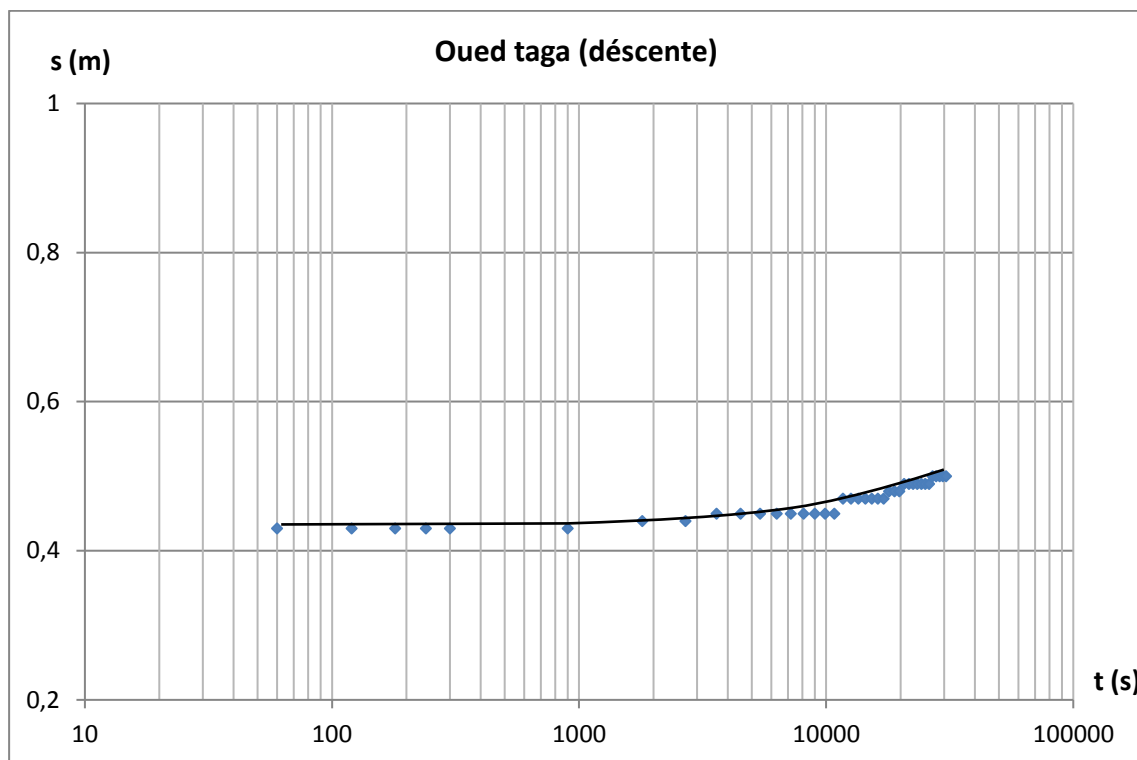
Forage Thniet el baida



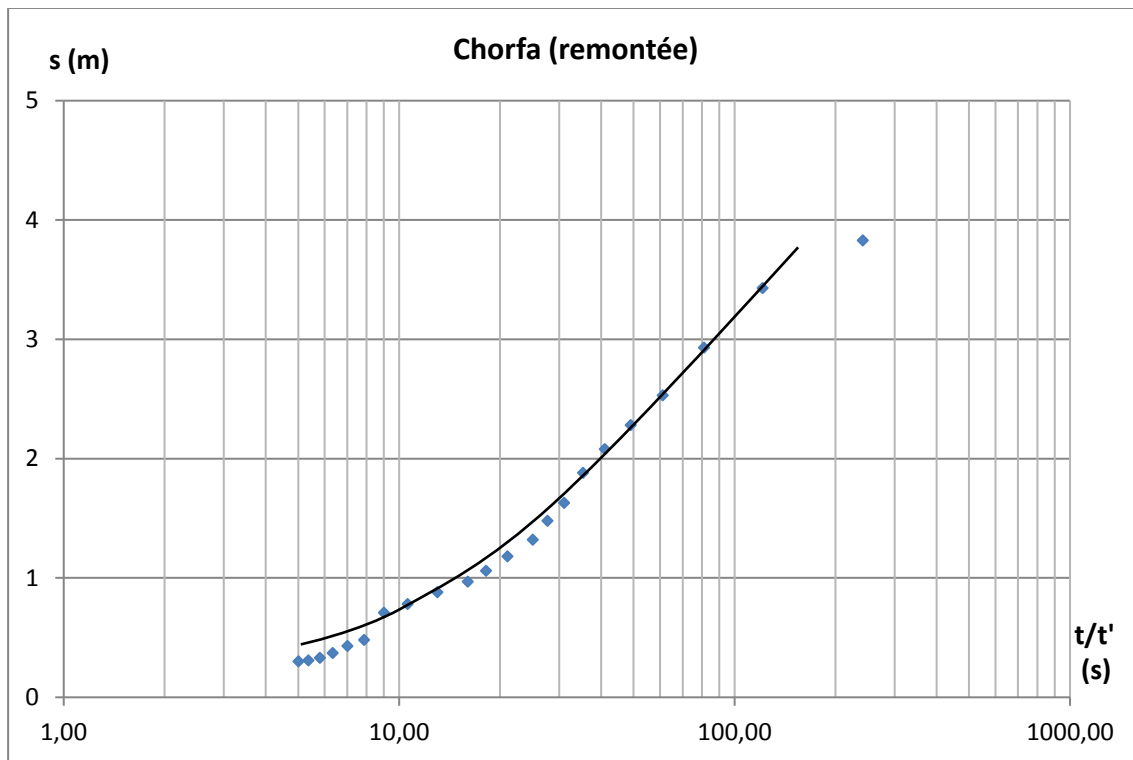
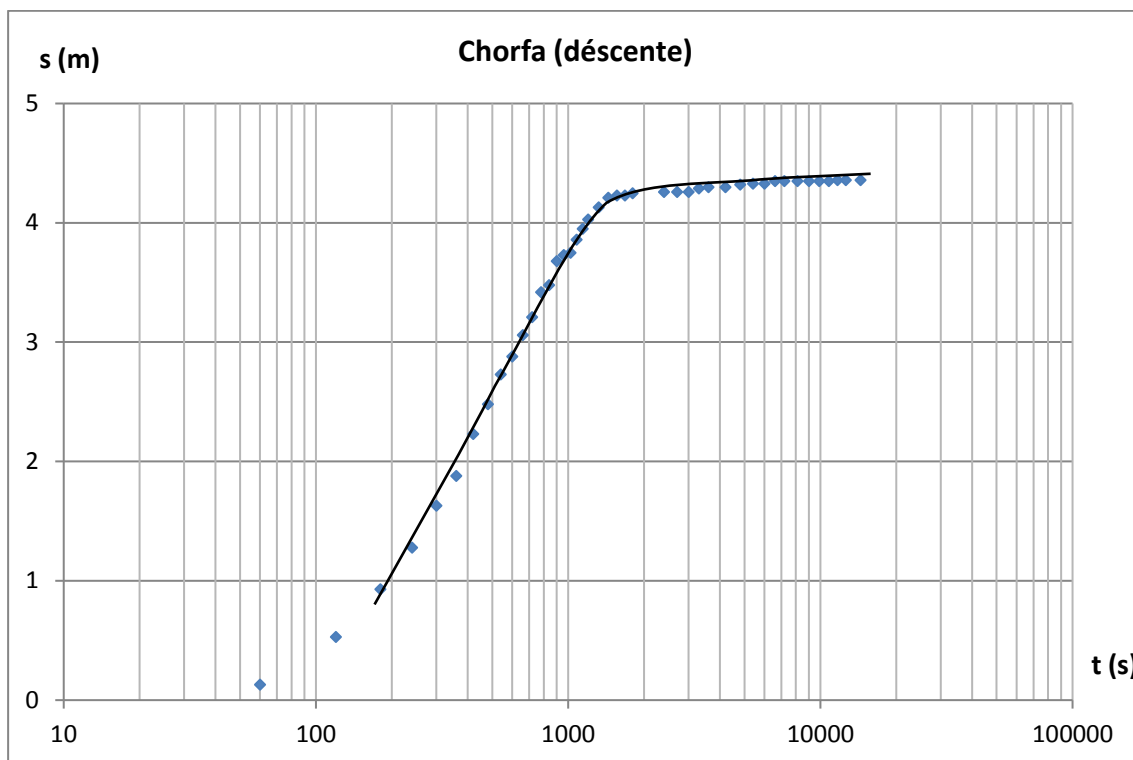
Forage Aioun el assafer



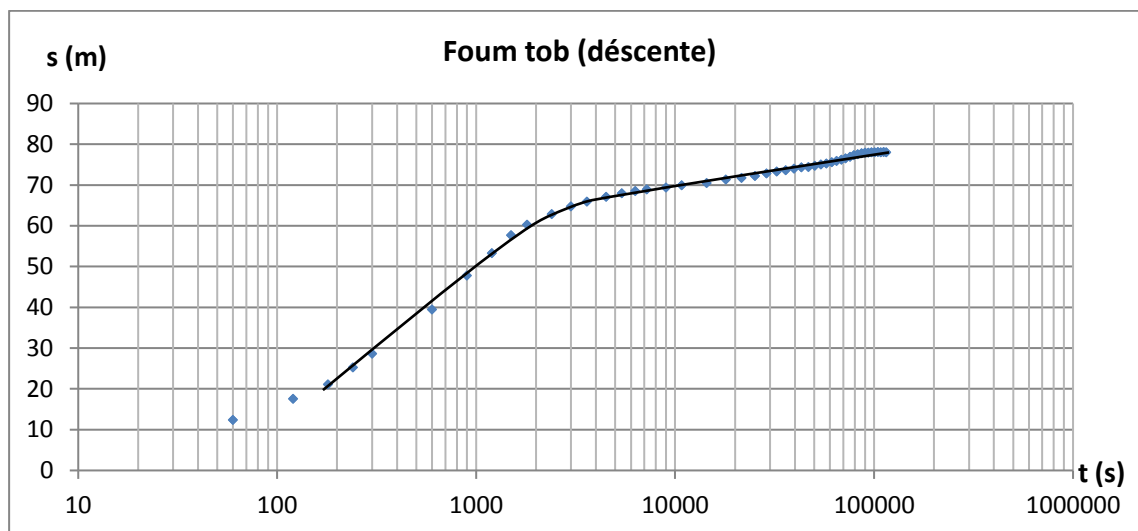
Forage Oued taga



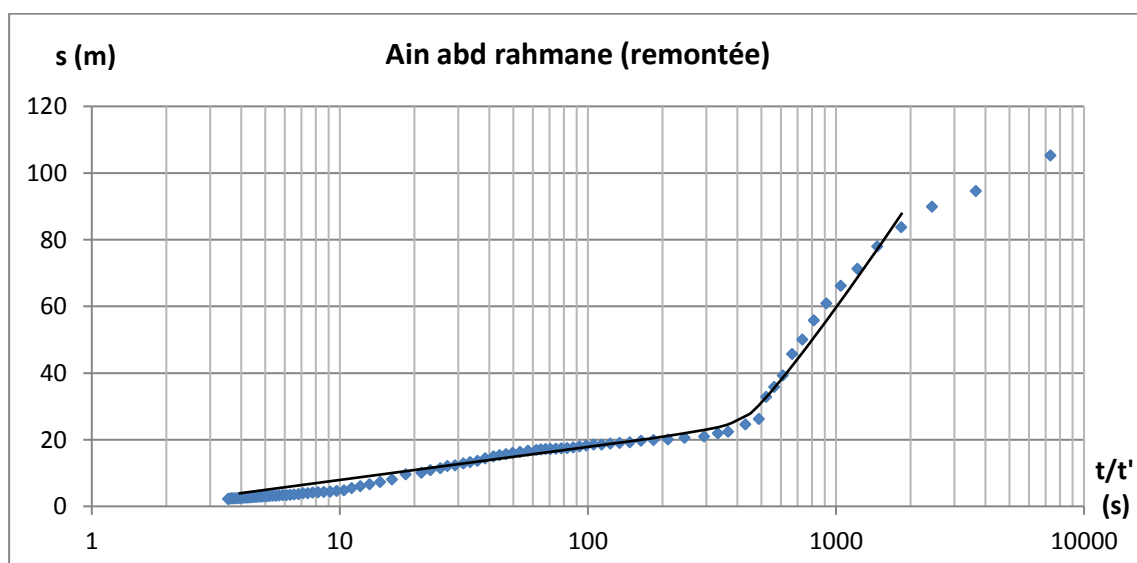
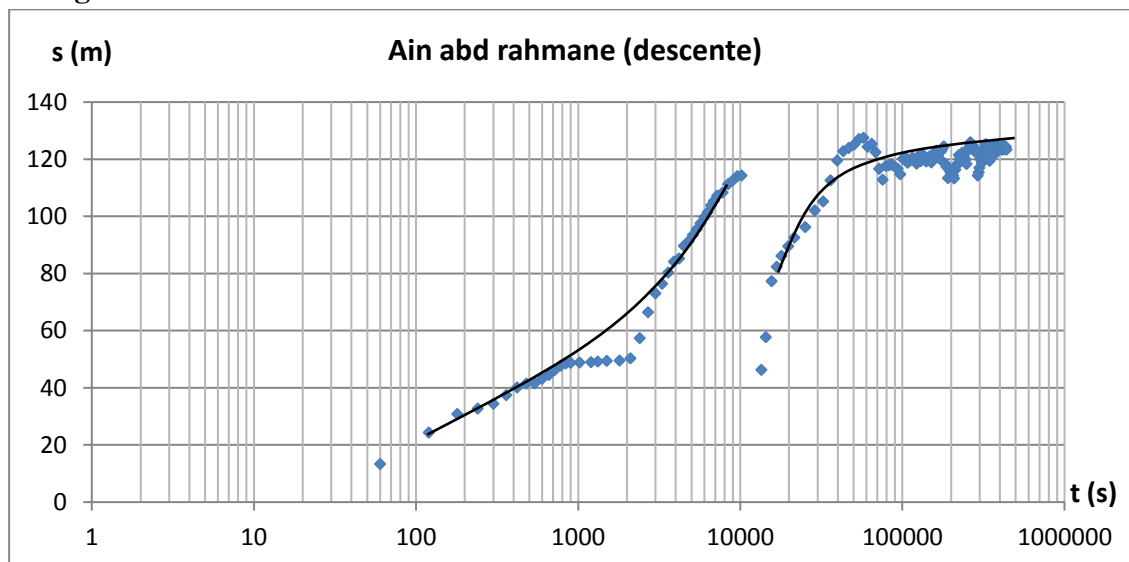
Forage Chorfa



Forage Foug tob



Forage Ain abd rahmane



Annexe III : Les paramètres physico-chimiques des eaux de forages du bassin de Timgad

N°	Nom de forage	Coordonnées Lamber		C°	Cond μS/cm	PH /	HCO3 mg/l	CL mg/l	SO4 mg/l	NO3 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l
		x (km)	y (km)											
1	AIOUN EL ASSAFIR (Forage étatique)	826,435	256,372	17	870	7,2	378,2	71	115	0,7	92,19	26,4	47,24	0,086
2	AIOUN EL ASSAFIR (abdessamad salim)	828,306	257,338	17	690	7,1	262,3	46,15	60	3,8	76,16	16,68	35,65	0,084
3	MERIEL (reddas)	829,034	249,824	17,5	1140	7,2	280,7	85,2	260	18	116,24	45,36	67,6	0,716
4	AIOUN EL ASSAFIR (ziani Med)	830,051	259	17	950	7,1	225,7	63,9	50	50	100,2	16,68	12,44	0,216
5	AIOUN EL ASSAFIR (rahal)	830,656	260,591	15,5	640	6,8	353,8	17,75	90	8,7	100,2	24	46	0,088
6	MERIEL (mosquée bilel)	831,448	250,707	22,5	980	7,1	433,1	36,5	245	1,1	140,28	28,8	87,63	0,925
7	OUED TAGA (boumechache)	834,447	241,524	16,2	620	6,7	378,2	10,65	55	4,5	108,22	30	37,95	0,041
8	OUD TAGA (source charchar)	835,195	240,443	14,8	380	7,4	225,7	7,1	30	1,5	56,08	16,68	12,19	0,019
9	SIDI MAANSAR OUAID (yabir ali)	835,551	249,623	21	1280	7,4	366	53,25	345	1,4	92,19	40,68	153,87	3,115
10	OUED TAGA (BEZOUH ALI)	836,487	242,974	15,6	570	6,9	305	17,75	120	1,3	92,19	21,6	36,8	0,032
11	OUD TAGA (ghassiri)	838,13	243,55	17,3	360	7,1	225,7	10,65	60	1,2	72,15	16,68	15,75	0,022
12	TIMGAD (tissiki)	839,566	250,253	18	650	7,2	335,5	17,75	205	0,3	96,2	16,68	93,61	0,898
13	OUD TAGA (blaaidi Med salah)	840,18	244,09	19,7	740	7,1	256,2	17,75	145	0,2	88,18	21,48	39,1	0,072
14	TIMGAD Ain abderrahmene (ghouar rabe)	841,39	261,028	19,9	1060	7,3	390,4	71	280	3,4	92,19	26,4	103,27	1,085
15	OUD TAGA (ben meriem omar)	842,87	245,33	19,6	780	8,4	280,6	28,4	145	0,8	88,18	7,08	82,8	0,877

16	TIMGAD-AIN ABDERRAHMANE (mosquée)	843,155	259,709	19,5	1860	7,4	262,3	159,75	365	56	196,4	62,16	113,4	1,408
17	OUAD TAGA (saaidi tahar)	843,36	242,14	18,4	990	7,1	359,9	53,25	245	1,6	100,2	69,48	39,33	0,0712
18	TIMGAD (morri)	843,415	249,11	22,3	640	7,1	268,4	10,65	68	0,9	76,16	21,48	25,76	0,029
19	FOUM TOB-- TEBEKAOUINE (forage temergine)	846,698	240,904	19,7	560	7,5	231,8	17,75	120	2,5	104,21	4,68	27,6	0,063
20	FOUM TOB-- TEBEKAOUINE (source temergine)	847,099	240,782	18,4	620	6,8	274,5	17,75	125	0,5	100,2	13,08	34,73	0,085
21	ESSFAHE (Baatache chafai)	848,095	250,68	25,5	710	7,1	341,6	17,75	120	0,7	84,17	28,8	46	0,083
22	FOUM TOB (forage étatique)	849,048	240,007	18,7	720	6,9	341,6	14,2	68	0,5	96,2	16,8	32,66	0,031
23	ESSFAHE (forage étatique)	850,713	243,788	18,7	450	6,8	250,1	7,1	22	0,3	56,12	19,2	17,48	0,018
24	YABOUS-BOUAATAB (sammer)	853,861	243,895	18,7	930	7,1	414,8	63,9	175	0,2	88,18	62,28	65,78	0,726
25	TOUFANA-AMRANE (medjoudj taib)	855,6	254,89	20,6	920	7,2	311,1	53,25	175	0,1	48,1	40,68	87,5	0,914
26	TOUFANA (diab moustafa)	856,8	248,84	22,5	1240	7,2	286,7	71	295	0,1	104,21	47,88	80,5	0,862
27	YABOUS (zraoulia hocine)	857,518	240,832	22	1250	7,1	451,4	53,25	320	3,3	160,32	74,16	38,41	0,045
28	YABOUS-BOUAATAB (ben saaidia)	857,772	244,626	20,7	590	6,6	280,6	28,4	80	0	84,17	14,28	38,41	0,098
29	YABOUS-SEKOUM (mosquée forkane)	862,757	245,948	20,7	590	6,6	341,6	49,77	305	0,2	160,32	47,76	83,29	0,875
30	FEIS (mosquée Errahmane)	867,614	254,018	19,6	1770	7,1	268,4	177,5	400	42,5	104,21	64,68	164,2	4,117
31	FEIS (ben achi djemai)	871,88	250,11	21,8	1130	6,8	268,4	71	205	0,2	56,12	31,08	121,21	1,635
32	TAOUEZIANET (mosquée el atik)	872,812	253,63	19,4	1360	6,9	237,9	106,5	345	49,5	156,32	54,96	38,87	0,036

