

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ LAARBI TÉBESSI- TÉBESSA



FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES ET DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Thèse

Présentée en Vue de l'Obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

SPECIALITÉ : Géologie

OPTION : HYDROGÉOLOGIE

THÈME

**APPORT DE LA GÉOLOGIE, L'HYDROGÉOLOGIE ET DES
OUTILS HYDROGÉOCHIMIQUES À LA CONNAISSANCE DES
AQUIFÈRES DU BARRÉMIEN ET HAUTERIVIEN DE LA RÉGION
SUD-SÉTIFIENNE
*NORD-EST ALGÉRIEN***

Présentée par : M^{me} Kada Houria

Devant le jury composé de:

Mr. Athamnia.D	Professeur- ULT. Tebessa	président
Mr. Demdoum. A	Professeur- UFAS 1 Sétif	Directeur de thèse
Mr. Baali. F	Professeur- ULT. Tebessa	Co-Directeur de thèse
Mr. Fehdi. N	Professeur- ULT. Tebessa	Examineur
Mr.Hani. A	Professeur- UBM. Annaba	Examineur
Mr.Benhamza. M	Professeur- UBM. Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021- 2022

REMERCIEMENTS



Tout d'abord et avant tout, je tiens à remercier en premier lieu, **Allah**, le Clément et le Miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la patience d'accomplir mon travail dans les meilleures conditions.

Cette thèse n'aurait pu être réalisée sans l'aide, la compréhension et la patience de ceux qui ont contribué scientifiquement et moralement à son aboutissement. Je voudrais remercier respectueusement les personnes qui m'ont ouvert les portes du savoir, je leurs serais toujours très reconnaissante.

Au terme de cette étude, je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, **Pr. Demdoug Abdeslam** et **Pr. Baali Fethi** pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant d'encadrer cette thèse. Je tiens également à saluer ses disponibilités durant toute ces années.

Je voudrais remercier vivement les membres du jury pour l'interet qu'ils accordent à mon travail.

Je remercie **Pr. Athemnia Djamel** pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury.

Je suis sensible à l'honneur que m'ont fait **Pr. Fehdi Noufel** pour m'avoir honoré de leur présence en acceptant de juger ce travail.

Je remercie **Pr. Hani Azzedine** de me faire le plaisir d'accepter d'examiner cette thèse.

Comme je remercie **Pr. Benhamza moussa** de me faire le plaisir d'examiner mes travaux.

Je souhaite remercier infiniment **Mr. Chouder** (Subdivisionnaire de l'ADE-Ain Azel avec son équipe de techniciens) et **Mr. Khalid** (Ingénieur hydrogéologue à l'ANRH) pour leur disponibilité et ses encouragements, ainsi que pour leur aide en opération d'échantillonnage et d'analyse.

Mes remerciements s'adressent également à **Mr. Hamza**, Docteur à l'UFAS, Faculté des Sciences, Département de Chimie pour les analyses des métaux lourds par SAA.

Je remercie considérablement mon père **Chikh Slimène** d'avoir été présent lorsque j'avais besoin de lui, notamment lors de mes déplacements pour faire l'opération d'échantillonnage.

Je tiens aussi à exprimer mes reconnaissances à **Mr. Bellouche**, Docteur à l'UFAS, Institut d'Architecture et Sciences de la Terre, Département de Géologie pour ses réponses argumentées et judicieuses aux questionnements divers et pour m'avoir ouvert de nouveaux horizons scientifiques en hydrogéologie.

Toute ma gratitude à **Mr. Ben Mouhamed**, Enseignant Chercheur à l'UFAS, Institut d'Architecture et Sciences de la Terre, Département de Géologie pour son aide précieuse et son assistance louable.

Je souhaite remercier particulièrement **Mr. Zaghouane**, mon Enseignant et mon Promoteur de l'Ingéniorat, pour sa disponibilité et ses encouragements.

Tout mes remerciements à **Mr. Boustila**, Enseignant Chercheur à l'UFAS, Institut d'Architecture et Sciences de la Terre, Département de Géologie pour ses orientations et ses suggestions à titre indicatif.

Je présente mes sincères remerciements à mes **étudiants**, que j'ai eu à encadrer à qui j'ai appris des choses mais qui m'en ont beaucoup appris. Ce travail a été rendu possible en partie grâce à leur collaboration.

Je transmets du fond du cœur mes plus vifs remerciements à ma deuxième mère **Naïma**, mes **frères** et mes sœurs **Samira** et **Karima** pour leur collaboration.

Enfin, je ne saurai oublier dans mes remerciements mon époux **Mourad** qui a supporté mes préoccupations et mon stress ainsi que mes deux enfants **Islem Safy Errahmène** et **Mouadh Taky Errahmène**, je leur dédie cette humble œuvre.



الملخص:

تعرف ولاية سطيف في الفترة الأخيرة موجة جفاف حادة وشحا كبيرا في كمية تساقط الأمطار و الثلوج، وبدرجة أكبر المناطق الجنوبية منها، و بالخصوص منطقة عين أزال التي تتميز بمناخها شبه جاف، مما أدى الى تراجع رهيب في مستوى المياه الجوفية المسجل في الابار القليلة العمق، و التي كانت هي الملجأ الوحيد لسكان المنطقة بغية التزود بالمياه الصالحة للشرب وكذا سقي الأراضي الزراعية، ولا سيما ان المنطقة فلاحية.

و بما ان المنطقة تزرع بعدة مناخ للرباص و الزنك كالشعبة الحمراء وخرزة يوسف، واللذان بدورهما يحويان كميات كبيرة من المياه الجوفية و التي شكلت عائقا كبيرا في عملية الاستغلال المنجمي، فقد تم حفر عدة ابار ارتوازية بغية خفض منسوب المياه لمواصلة اشغال الاستغلال المنجمية، وكذا تزويد المنطقة بالمياه الصالحة للشرب و سقي الأراضي الزراعية.

وبهدف دراسة نوعية هذه المياه ومدى صلاحيتها للشرب والسقي بما انما في منطقة منجمية، فقد أجريت عدة حملات معاينة (2012- 2018) اين تمت معاينة كل من طبقة المياه الجوفية الصوتريفانية بالشعبة الحمراء، والبارميانية في كل من الشعبة الحمراء و خرزة يوسف، وكذا الميو بليو كواترنارية بمنطقة عين أزال من خلال اجراء جملة من التحاليل الفيزيائية (T°,pH, CE, RS)، الكيميائية ($K^+,HCO_3^-,SO_4^{2-},Cl^-$)، و كذا المعادن الثقيلة (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb)، اين استعملت نتائجها في استنباط عدة معايير: SSP, RC, HQ, ADD, C_d, HEI, HPI, SAR, KR, IP, RSC, MH.

و كنتيجة اساسية لهذا العمل فان المياه الجوفية لهذين الطبقتين المائيتين العميقتين الموجودتين في تركيبات جيولوجية من عمر الحقبة الطباشيرية السفلية (هوتريفيان وبارميان)، و كذا المسطح المائي العلوي الميو بليو كواترناري، تعرف درجة من التلوث تمنعها من ان تكون صالحة للشرب او السقي.

الكلمات المفتاحية: هوتريفيان، بارميان، طبقة مياه جوفية، نوعية، سطيف، عين أزال

Abstract:

The wilaya of Setif has recently experienced a severe drought and a great scarcity of precipitation and snow, and to a greater extent the southern areas, and in particular the region of Ain-Azel, which is characterized by its semi-arid climate, this has led to a terrible drop in the level of groundwater recorded in the shallow wells, which were the only refuge for the inhabitants of the region to provide drinking water as well as irrigation of fertile land, especially since the area is agricultural.

Since the area is full of several lead and zinc mines, such as Chaabet –el-Hamra and Kherzet-Youcef, which in turn contain large amounts of groundwater, which have been a major obstacle in the mining process, several wells were drilled to lower the piezometric level to continue mining, as well as to provide the region with drinking water and irrigation.

In order to study the quality of these waters and their suitability for consumption and irrigation since they are located in a mining area, several sampling campaigns were conducted (2012-2018) for the Hauterivian aquifers in the Chaabet-el-Hamra deposit, Barremian in the Chaabet-el-Hamra and Kherzet-Youcef deposit, as well as the Mio-Plio-Quaternary in the Ain-Azel plain, in order to carry out a series of analyses: physical (T° , pH, EC, TDS), chemical (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-}) as well as heavy metals (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), where their results were used in the estimation of several indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d , ADD, HQ and RC.

As a key result of this work, the groundwater of these two deep aquifers, Hauterivian and Barremian, and the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary, experience a degree of pollution that prevents it from being drinkable or to be used for irrigation.

Key words: Hauterivian, Barremian, Aquifer, Quality, Setif, Ain- Azel.

Résumé :

La wilaya de Sétif a récemment connu une grave sécheresse et une grande rareté des précipitations et de la neige, et dans une plus grande mesure dans les zones méridionales, et en particulier la région de Ain- Azel, qui se caractérise par son climat semi-aride, ce qui a entraîné un terrible rabattement du niveau des eaux souterraines enregistré dans les puits de faible profondeur, qui étaient le seul refuge pour les habitants de la région afin de fournir de l'eau potable, ainsi que l'irrigation des terres fertiles, d'autant plus que la zone est agricole.

Étant donné que la zone regorge de plusieurs mines de plomb et de zinc, telles que Chaabet –el-Hamra et Kherzet- Youcef, qui contiennent à leur tour de grandes quantités d'eau souterraine, qui ont été un obstacle majeur dans le processus d'exploitation minière, plusieurs forages ont été forés afin de rabattre le niveau piézométrique pour poursuivre l'exploitation minière, ainsi que pour fournir à la région de l'eau potable et d'irrigation.

Afin d'étudier la qualité de ces eaux et leur aptitude à la consommation, et à l'irrigation puisqu'elles se trouvent dans une zone minière, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été menées (2012-2018), pour les aquifères Hauterivien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra, Barrémien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra et Kherzet-Youcef, ainsi que le Mio-Plio-Quaternaire dans la plaine de Ain- Azel, afin de réaliser une série d'analyses : physiques (T° , pH, CE, RS), chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-}) ainsi que des métaux lourds (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), où leurs résultats ont été utilisés dans l'estimation de plusieurs indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d , ADD, HQ et RC.

Et comme résultat-clé de ce travail, les eaux souterraines de ces deux aquifères profonds, Hauterivien et Barrémien, et la nappe d'eau superficielle du Mio-Plio-Quaternaire, connaissent un degré de pollution qui l'empêche d'être potable ou à utiliser pour l'irrigation.

Mots clés : Hauterivien, Barrémien, Aquifère, Qualité, Sétif, Ain- Azel.

A decorative graphic consisting of a trail of small squares in shades of pink, grey, and dark red, leading to a larger dark red square at the bottom left.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

AVANT PROPOS

Page

1. Introduction	1
2. Problématique	1
A. Une synthèse bibliographique	3
B. Les travaux de terrain	3
C. Les travaux de laboratoire	4

PREMIER CHAPITRE/ CADRE GÉOLOGIQUE

Page

I.1. Introduction	5
I.2. Localisation géographique de la zone d'étude	5
I.3. La géomorphologie	5
I.4. Le cadre climatique	8
I.5. Le couvert végétal	8
I.6. Le cadre socio-économique	8
I.7. La géologie de la zone d'étude	8
I.7.1. La géologie régionale	8
I.7.1.1 Domaine interne	10
I.7.1.2 Domaine des Flyschs	13
I.7.1.3 Domaine externe (le Tell)	14
I.7.2. Les phases tectoniques	21
I.7.2. 1. Les phases tectoniques mésozoïques	21
I.7.2. 2. Les phases tectoniques tertiaires	22
I.7.2. 3. La tectonique récente	24
I.8. La géologie locale	24
I.8. 1. La stratigraphie des Monts du Hodna.....	24
I.8. 1.1. Les terrains triasiques	26
I.8. 1.2. Ensemble parautochtone et autochtone Hodnéen	26
I.8. 1.3. Séries à Jurassiques intermédiaires de l'unité inférieure de Djebel Kalaoun	32
I.8. 1.4. Ensemble allochtone Sud-Sétifien	33
I.8. 2. La tectonique des monts du Hodna	37
I.8. 3. Les phases tectoniques	39

I.8. 4. La stratigraphie du gisement de Chaabet el Hamra	43
I.8. 5. La tectonique du gisement de Chaabet el Hamra	47
I.9. Conclusion	49

DEUXIÈME CHAPITRE/ HYDROCLIMATOLOGIE

Page

II.1. Introduction	50
II.2 Le bassin versant de la zone d'étude.....	51
II.3 Étude morphométrique	51
II. 3.1 Les caractéristiques morphométriques du sous bassin.....	51
II. 3.2 Indice de compacité ou coefficient de Gravelius (Kc).....	53
II. 3.3 Recherche d'un modèle de représentation.....	53
II.3.4 Caractéristiques des altitudes.....	54
II.3.5 Altitude médiane H50%.....	56
II.3.6 Dénivelée simple D.....	57
II.3.7 Indice de pente et relief.....	57
II.3.8 Indice de pente globale Ig.....	57
II.3.9 Carte des pentes	57
II.4 Caractéristiques du réseau hydrographique.....	58
II.5 Récapitulation des caractéristiques morphométriques.....	59
II.6 L'étude hydroclimatique.....	60
II.7 Données de l'O.N.M.....	61
II.7.1 Les précipitations.....	61
II.7.2 Étude des précipitations de la station de Ain Azel.....	62
II.7.2.1 Variation des précipitations dans le temps.....	62
II. 7.2.1.1 Précipitations moyennes mensuelles.....	62
II. 7.2.1.2 Précipitations moyennes annuelles.....	63
II. 7.2.1.3 Variation des précipitations dans l'espace.....	64
II. 7.3 Température de l'air.....	64
II. 7.3.1 Variation de la T° de l'air dans le temps.....	64
II. 8 Courbe ombrothermique.....	65
II. 9 Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte).....	66
II. 10 Indice d'aridité	67



II. 11 L'indice climatique.....	68
II. 12 Évapotranspiration potentielle et réelle.....	68
II.12.1 L'évapotranspiration réelle	68
II.12.1.1 Formule de L. Turc.....	68
II.12.1.2 Formule de Coutagne.....	69
II.12.1.3 L'abaque de Wundt.....	69
II.12.1.4 Abaque de P. Verdeil	70
II.12.2 L'évapotranspiration potentielle ETP.....	70
II.13 Bilan hydrique selon Thornthwaite	72
II.13.1 Calcul des réserves facilement utilisables RFU.....	72
II.14 Bilan hydrologique.....	74
II.14.1 Estimation du ruissellement annuel	74
II.14.2 Infiltration	75
II.15 Conclusion.....	75

TROISIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOLOGIE

Page

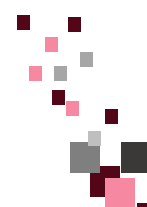
III.1. Introduction	77
III.2. Aperçu sur l'hydrogéologie de la région de Sétif	77
III.3. Contexte hydrogéologique de Ain Azel	78
III.3.1. Aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire	78
III.3.2. Aquifère profond (Crétacé inférieur)	79
III.4. Inventaire des points d'eau	79
III.5. Interprétation de la carte piézométrique	81
III.5.1 Pour la première campagne (Juin 2015)	81
III.5.1 Pour la deuxième campagne (Mai 2016)	81
III.6. Gradient hydraulique	81
III.7. Contexte hydrogéologique du gisement de Chaabet el Hamra	84
III.8. Inventaire des points d'eau	85
III.9. Interprétation de la carte piézométrique	86
III.10. Gradient hydraulique	86
III.11. Les paramètres hydrodynamiques	89
III.12. Conclusion	91



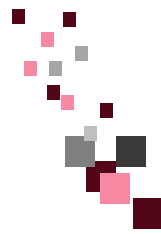
QUATRIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOCHIMIE

Page

IV.1. Introduction	92
IV.2. Échantillonnage et analyse des eaux souterraines	92
IV.3. Les compagnes de prélèvement d'eau	93
IV.3.1. Avril 2012	93
IV.3.1.1 Résultats et discussion.....	95
❖ Caractéristiques hydrochimiques	95
❖ Paramètres physiques	96
❖ Paramètres chimiques	97
IV.3.1.2. Analyse en composantes principales	98
IV.3.1.3. Métaux lourds	99
IV.3.1.4. Mécanismes contrôlant la chimie des eaux souterraines	100
IV.3.1.5. Eaux souterraines pour l'irrigation.....	103
A Ratio d'absorption du sodium (SAR).....	103
B Diagramme de Wilcox	104
C Pourcentage de sodium soluble (SSP).....	105
D Carbonate de sodium résiduel (RSC).....	106
E Indice de perméabilité (PI)	106
F Risque de magnésium (MH)	106
G Rapport de Kelly (KR)	107
IV.3.2. Période de Mai 2018	107
IV.3.2. 1 Points échantillonnés	107
IV.3.2. 2 Méthode de prélèvement et conservation des échantillons	107
IV.3.2. 3 Méthodes d'analyses	108
❖ Mesures in situ : paramètres physiques	108
❖ Teneurs en éléments majeurs et mineurs : analyses chimiques	108
❖ Teneurs des métaux lourds	108
IV.3.2. 4 Caractérisations hydrochimiques	110
IV.3.2. 5. Les principaux paramètres physico-chimiques	110
❖ La température de l'eau	110



❖	pH de l'eau.....	110
❖	La conductivité électrique (CE)	110
❖	Les éléments chimiques majeurs	111
IV.3.2. 6 Diagramme de Gibbs		115
IV.3.2. 7 Faciès chimiques des eaux		116
IV.3.2. 8 Corrélation entre les éléments majeurs		121
IV.3.2. 8.1 ACP pour les eaux Hauteriviennes		121
IV.3.2. 8.2 ACP pour les eaux Barrémiennes.....		121
IV.3.2. 8.3 ACP pour les eaux du Mio-Plio-Quaternaire		123
IV.3.2. 9 Relations binaires entre les éléments majeurs		124
IV.3.2. 9.1 L'aquifère Hauterivien		124
❖	Couple $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ - Conductivité	124
❖	Couple Mg^{2+} - Na^{+}	124
❖	Couple SO_4^{2-} - Cl^{-}	125
❖	Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-}	125
❖	Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-}	125
❖	Couple Ca^{2+} - Cl^{-}	126
❖	Couple Mg^{2+} - Cl^{-}	126
❖	Couple Ca^{2+} - HCO_3^{-} - SO_4^{2-}	127
IV.3.2. 9.2 L'aquifère Barrémien		127
❖	Couple SO_4^{2-} - Cl^{-}	127
❖	Couple SO_4^{2-} / Cl^{-} - Conductivité	127
❖	Couple $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ - Conductivité	128
❖	Couple Mg^{2+} - Na^{+}	129
❖	Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-}	129
❖	Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-}	130
❖	Couple Ca^{2+} - Cl^{-}	130



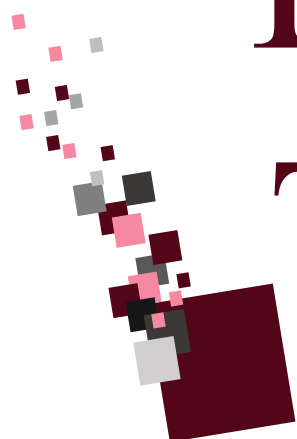
❖ Couple Mg^{2+} - Cl^{-}	130
❖ Couple Ca^{2+} - Mg^{2+}	131
❖ Couple Ca^{2+} - HCO_3^{-} - SO_4^{2-}	131
❖ Diagramme $Ca^{2+}/(HCO_3^{-}+SO_4^{2-})-Na^{+}/Cl^{-}$	131
❖ Diagramme $Mg^{2+}/(HCO_3^{-}+SO_4^{2-})-Na^{+}/Cl^{-}$	132
IV.3.2. 10 Qualité des eaux à la consommation humaine et à des fins d'irrigation.....	133
IV.3.2. 11 Aptitude des eaux à l'irrigation	138
A Kelly ratio (KR)	138
B Sodium absorption ratio (SAR).....	139
C Residual Sodium Carbonate (RSC)	140
D Soluble Sodium Percentage (SSP).....	141
E Permeability Index (PI)	142
F Magnesium Hazard (MH)	143
G Le diagramme de Wilcox	144
IV.3.2. 12. Les métaux lourds	145
IV.3.2. 13. Estimation des indices d'évaluation de la pollution.....	148
IV.3.2. 14. Paramètres d'évaluation des risques pour la santé	152
IV.3.2. 15. Analyse statistique multi-variée	154
IV.4 Conclusion	157

	<u>Page</u>
CONCLUSION GÉNÉRALE	160
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	



LISTES DES

TABLEAUX ET FIGURES



LISTE DES FIGURES

PREMIER CHAPITRE/ CADRE GÉOLOGIQUE

	<u>Page</u>
Figure I.1. Localisation géographique de la zone d'étude (Google Maps, 2020).....	6
Figure I.2. Image satellitaire en combinaison des bandes 321 montrant les massifs montagneux.....	7
Figure I.3: Localisation des principales unités géologiques des Maghrébides (A. Domzig, 2006).	9
Figure I.4: Position des différentes unités géologiques des Maghrébides (A. Domzig, 2006).....	9
Figure I.5. Les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (D'après M. Durand Delga, 1969).	11
Figure I.6. Contexte structural du domaine d'étude (D'après W. Wildi, 1983).....	11
Figure I.7. Coupe géologique schématique expliquant les relations structurales et sédimentaires entre le Néritique et les Sellaoua (M. Chadi et al, 1999 ; in : A. Mezerzi, 2015).....	19
Figure I.8. Les principaux massifs des Monts du Hodna (A. Khaldi, 1987)	20
Figure I.9. Localisation des structures et des formations imputables à la tectonique priabonienne (J. M. Vila, 1980) In A. Mezarzi, 2015	23
Figure I.10. Représentation schématique des principaux effets de la néotectonique (J. M. Vila, 1980) In Mezarzi, 2015	25
Figure I.11. Schéma structural de la région de Sétif montrant le cadre de la géologie régionale de la zone d'étude (J. M. Vila, 1980)	27
Figure I.12. Carte géologique de la région d'étude, extrait de la carte géologique de Ain- Azel et Ain- Lahdjar, 1/50000 (J.M. Vila, 1980).	29
Figure I.13 Colonne lithostratigraphique des massifs des Monts du Hodna (Compilation faite par A. Boutaleb, 2001 à partir des travaux de J. Glaçon, 1967; R. Guiraud 1973; J. M.Vila, 1980).	31
Figure. I.14 : Log lithostratigraphique de l'échelle inférieure de Djebel Kalaoun (J. M. Vila, 1980).....	33
Figure I.15. Corrélation des séries typiques de l'ensemble allochtone Sud-Sétifien (J. M. Vila, 1980)	37
Figure I.16 Coupe interprétative au 1/50.000 (Extrait de la carte géologique de Ain- Lahdjar au 1/50.000. J.M.Vila ,1977).....	38
Figure I.17 : Coupe interprétative au 1/50.000 (Extrait de la carte géologique de Ain- Azel au 1/50.000. D'après J. M. Vila ,1977).....	41
Figure I.18 : Coupe géologique schématique de la région de Kherzet- Youcef (J. Glaçon, 1956) in L. Attoucheik, 2006	42
Figure I.19. Carte géologique du gisement de Chaabet- el- Hamra (e : 1/2000, E.R.E.M, 1992)	43
Figure I.20. La colonne lithostratigraphique du gisement de Chaabet- el- Hamra (E.R.E.M, 1990)	46
Fig. I. 21. Rosace du gisement de Chaabet el Hamra.....	48

DEUXIÈME CHAPITRE/HYDROCLIMATOLOGIE

	<u>Page</u>
Figure II.1 : Bassins hydrographiques de l'Algérie orientale (A. Mebarki, 2005).....	50
Figure. II.2 Le bassin versant des hauts plateaux constantinois.....	52
Figure. II.3 L'orographie du sous bassin versant de la zone d'étude.	54
Figure. II.4 La courbe hypsométrique du sous bassin versant de la zone d'étude.....	55

Figure. II. 5 MNA du sous bassin versant de la zone d'étude.....	56
Figure. II. 6 Carte des pentes du sous bassin versant de la zone d'étude.....	58
Figure. II.7 Le réseau hydrographique du sous bassin versant de la zone d'étude.....	59
Figure II.8 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (A) (M. Côte, 1998a) In A. Mebarki, 2005 et Climagramme d'Emberger (B) In M. Z. Belhadj, 2017.....	60
Figure. II.9 Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (Établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1 ^{er} septembre 1921 au 31 Août 1960 et du 1 ^{er} Septembre 1968 au 31 Août 1989).....	62
Figure.II.10 Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Station de Ain Azel, période de 1984- 2011).....	63
Figure. II.11. Histogramme des précipitations moyennes annuelles (Station de Ain Azel, période de 1984- 2011)	63
Figure. II.12 Les températures moyennes mensuelles (Station de Sétif, période de 2000- 2011).	65
Figure. II.13 Courbe ombrothermique (Température: Station de Sétif, période 2000-2011 et (Précipitation: Station de Ain Azel, période 2000-2011).....	66
Figure II.14 Abaque de l'Indice d'aridité annuel de De Martone	67
Figure II.15 Évaluation des éléments et déficit en fonction de la température et des précipitations (Abaque de Wundt modifié par Coutagne).....	71
Figure II.16 Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement Algérie, d'après P. Verdeil, 1988.....	71
Figure II.17 Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Ain Azel	74

TROISIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOLOGIE

Page

Figure. III.1 Carte schématique descriptive des principales nappes aquifères existantes à travers la région de Sétif, (DREWS, 2011).....	78
Figure III.2 : Carte d'inventaire des points d'eau dans la région de Ain Azel (d'après la carte géologique de Ain Azel, feuille n°143, et Ain Lahdjer feuille n° 144, Échelle 1/50000)	80
Figure III.3 : Carte piézométrique de Ain Azel (Juin 2015).....	82
Figure III.4 : Carte piézométrique de Ain Azel (Mai 2016).	83
Figure III.5 : Coupe hydrogéologique dans la partie centrale du gisement touchant l'aquifère Hauterivien.	85
Figure III.6 : Coupe hydrogéologique dans la partie Nord- Ouest du gisement touchant l'aquifère Barrémien	85
Figure III.7: Carte d'inventaire des points d'eau du gisement de Chaabet el Hamra (Juin 1990)	87
Figure III.8: Carte piézométrique du gisement de Chaabet el Hamra (Juin 1990)	88

QUATRIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOCHIMIE

Page

Fig. IV.1. Localisation des forages testés de l'aquifère Hauterivien sur la carte géologique du gisement de zinc de Chaabet el Hamra (Tirée du rapport E. R. E. M, 1992).	94
Fig.IV.2. Diagramme de Piper des eaux Hauteriviennes de la zone d'étude (Avril 2012)	102



Fig.IV.3. Diagramme de Schoeller des eaux Hauterivienne de la zone d'étude (Avril 2012)	102
Fig.IV.4. Diagramme de Gibbs (Avril 2012)	103
Fig.IV.5. Diagramme de Wilcox pour les eaux Hauterivienne de la mine de Chaabet el Hamra	105
Figure IV.6. Inventaire des points d'eau prélevés (a: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra)	109
Figure IV.7. Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Barrémienne	112
Figure IV.8. Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Hauterivienne	112
Figure IV.9. Diagramme de Gibbs des eaux Hauteriviennes (Mai 2018)	115
Figure IV.10. Diagramme de Gibbs des eaux Barrémiennes (Mai 2018)	116
Figure IV.11. Diagramme de Gibbs des eaux du Mio-Plio-Quaternaire (Mai 2018)	116
Fig.IV.12. Diagramme de Piper (aquifère Barrémien) Mai 2018	118
Fig.IV.13. Diagramme de Piper (aquifère Hauterivien) Mai 2018	118
Fig.IV.14 a,b, c. Diagramme de Piper (aquifère Mio-Plio-Quaternaire) Mai 2018	119
Fig.IV.15. Faciès chimiques des eaux de la zone d'étude (Mai 2018)	120
Figure IV.16. Relation Ca^{2+}/Mg^{2+} -CE	124
Figure IV.17. Relation Ca^{2+} - Na^{+}	124
Figure IV.18. Relation Mg^{2+} - Na^{+}	125
Figure IV.19. Relation SO_4^{2-} - Cl^{-}	125
Figure IV.20. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}	126
Figure IV.21. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}	126
Figure IV.22. Relation Ca^{2+} - Cl^{-}	126
Figure IV.23. Relation Mg^{2+} - Cl^{-}	126
Figure IV.24. Relation Ca^{2+} - HCO_3^{-}	127
Figure IV.25. Relation Ca^{2+} - HCO_3^{-} - SO_4^{2-}	127
Figure IV.26. Relation Cl^{-} - SO_4^{2-}	128
Figure IV.27. Relation SO_4^{2-} / Cl^{-} - CE	128
Figure IV.28. Relation Ca^{2+}/Mg^{2+} - CE	129
Figure IV.29. Relation Ca^{2+} - Na^{+}	129
Figure IV.30. Relation Mg^{2+} - Na^{+}	129
Figure IV.31. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}	129
Figure IV.32. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}	130
Figure IV.33. Relation Ca^{2+} - Cl^{-}	130
Figure IV.34. Relation Mg^{2+} - Cl^{-}	131
Figure IV.35. Relation Ca^{2+} - Mg^{2+}	131
Figure IV.36a. Évolution du calcium	132
Figure IV.36b. Évolution du calcium	132
Figure IV.37. Échange de base	132
Figure IV.38. Échange de base	132



Figure IV.39. Représentation des eaux_ Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Mai 2018)	135
Figure IV.40. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Mai 2018) des eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire	136
Figure IV.41. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Mai 2018) des eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire	137
Figure IV.42. Histogramme des valeurs du KR des différents points d'eau	138
Figure IV.43. Histogramme des valeurs du SAR des différents points d'eau	139
Figure IV.44. Histogramme des valeurs du RSC des différents points d'eau	140
Figure IV.45. Histogramme des valeurs du SSP des différents points d'eau	141
Figure IV.46. Histogramme des valeurs du PI des différents points d'eau	142
Figure IV.47. Histogramme des valeurs du MH des différents points d'eau	143
Figure IV. 48. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox (L'aquifère Hauterivien et Barrémien_Mai 2018)	144
Figure IV.49. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox (L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire_Mai 2018).....	145
Figure IV.50. Histogrammes des teneurs des métaux lourds dans l'aquifère Barrémien et Hauterivien (Mai 2018)	148
Figure IV. 51. Carte factorielle montrant le regroupement de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.....	155

ANNEXES	Page
Figure.A2-1 Essai de pompage long duré : Pz1 de la nappe Hauterivienne.....	III
Figure. A2-2. Essai de pompage long duré : CH6 de la nappe Hauterivienne.....	III
Figure. A2-3. Essai de pompage palier 1: Afounes de la nappe Barrémienne.....	III
Figure. A2-4. Essai de pompage palier 2: Afounes de la nappe Barrémienne.....	III
Figure.A2-5. Essai de pompage long duré: Afounes de la nappe Barrémienne.....	IV
Figure. A2-6. Essai de pompage long duré: P1 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	IV
Figure. A2-7. Essai de pompage long duré: P2 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	IV
Figure. A2-8. Essai de pompage palier 1: P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	IV
Figure. A2-9. Essai de pompage palier 2: P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-10. Essai de pompage long duré : P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-11. Essai de pompage palier 1: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-12. Essai de pompage palier 2: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-13. Essai de pompage long duré: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VI
Figure. A2-14. Essai de pompage palier 1: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire	VI
Figure. A2-15. Essai de pompage palier 2: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VI
Figure. A2-16. Essai de pompage palier 1: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VI
Figure. A2-17. Essai de pompage palier 2: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure. A2-18. Essai de pompage long duré : P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure. A2-19. Essai de pompage palier 3: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure. A2-20. Essai de pompage long duré: P9 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure A3.1 Variabilité spatiale du pH (A. : Tous les points prélevés. B. : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien.).....	XVIII
Figure A3.2 Variabilité spatiale du CE (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien).....	XIX
Figure A3.3 Variabilité spatiale du Calcium (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des	XX



forages du Barrémien et Hauterivien)	
Figure A3.4 Variabilité spatiale du Magnésium (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien).....	XXI
Figure A3.5 Variabilité spatiale du Sodium (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXII
Figure A3.6 Variabilité spatiale du Potassium A. : Tous les points prélevés (B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXIII
Figure A3.7 Variabilité spatiale du Bicarbonates (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXIV
Figure A3.8 Variabilité spatiale des Sulfates (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien).....	XXV
Figure A3.9 Variabilité spatiale des Chlorures (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXVI
Figure A3.10 Variabilité spatiale des Nitrates (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXVII
Figure A3.11 Potabilité des eaux selon OMS, 2008 (a.: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b. : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra).....	XXVIII
Figure A3.12 Potabilité des eaux selon NA, 1992 (a.: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b. : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra).....	XXIX
Figure A3.13 Aptitude des eaux à l'irrigation selon Ayers and Westcot, 1994 (a.: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b. : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra).	XXX



LISTE DES TABLEAUX

DEUXIÈME CHAPITRE/HYDROCLIMATOLOGIE

	<u>Page</u>
Tableau. II. 1. L'indice de compacité de Gravelius Kc du sous-bassin de la région d'étude.....	53
Tableau.II.2. Les dimensions du rectangle équivalent du sous- bassin 07-01.....	54
Tableau. II. 3. La répartition des surfaces par tranches d'altitudes.....	55
Tableau. II.4. L'indice de pente globale Ig.	57
Tableau. II.5. Récapitulation des caractéristiques du sous- bassin versant 07-01.	59
Tableau II.6. Coordonnées Lambert de la station.....	61
Tableau II.7 Précipitations moyennes mensuelles (Station de Ain Azel, période de 1984- 2011)....	62
Tableau II.8. Coordonnées Lambert de la station.	64
Tableau II.9 Températures moyennes mensuelles (Station de Sétif, période 2000-2011)...	64
Tableau II.10. Températures et précipitations moyennes mensuelles (Température: Station de Sétif, période 2000-2011, Précipitation: Station de Ain Azel, période 2000-2011). ...	65
Tableau II.11. Variation des valeurs de rapport (P/T) d'après la méthode d'Euverte.	66
Tableau II.12. Vérification de la condition.....	69
Tableau II.13: Estimation de l'évapotranspiration réelle avec différentes méthodes	70
Tableau.II.14 Evapotranspiration potentielle ETP selon Thornthwaite.....	72
Tableau II. 15. Estimation du bilan hydrologique selon Thornthwaite pour la station de Ain Azel.	73

TROISIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOLOGIE

	<u>Page</u>
Tableau III.1. Inventaire des points d'eau dans la zone d'étude.....	79
Tableau III.1. Calcul du gradient hydraulique de la plaine de Ain -Azel, au sud de Sétif.....	84
Tableau III.2. Calcul du gradient hydraulique du gisement de Chaabet el Hamra.....	86
Tableau III.3. Quelques valeurs des paramètres hydrodynamiques (K et T).....	90

QUATRIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOCHIMIE

	<u>Page</u>
Tableau IV.1. Les normes Algériennes (NA. 6360), 1992 ; OMS, (2008) et Ayers and Westcot (1994) pour potabilité et irrigation	95
Tableau IV. 2. Les paramètres physico-chimiques en mg/l de l'aquifère Hauterivien (Compagne Avril 2012)	96
Tableau IV.3. Matrice de corrélation multiple des eaux Hauterivienne dans la mine de Chaabet el Hamra.....	99
Tableau IV.4. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauterivienne du gisement de Chaabet el Hamra en mg/l (Avril 2012).....	100
Tableau IV.5. Classification des eaux pour l'irrigation selon L. V. Wilcox (1955).....	104
Tableau IV. 6. Classification hydrochimique des eaux de la zone d'étude	117
Tableau IV. 7. La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Hauterivien.....	121
Tableau IV.8. La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Barrémien.....	122
Tableau IV.9 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.....	123
Tableau IV. 10 La qualité des eaux selon les différentes normes.....	134
Tableau IV.11. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauteriviennes et Barrémiennes du gisement de Chaabet el Hamra en mg/l (Mai 2018).....	146
Tableau IV.12. Les valeurs de l'HPI estimées	150
Tableau IV.13. Les valeurs de l'HEI estimées	151

Tableau IV.14. Les valeurs du C_d estimées	152
Tableau IV.15. Les valeurs du ADD estimées	153
Tableau IV.16. Les valeurs du HQ estimées	153
Tableau IV.17. Les valeurs du CR estimées	154
Tableau IV.18. Coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds pour les échantillons d'eau souterraine	155
Tableau IV.19. Coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques pour les échantillons d'eau souterraine	156
Tableau IV.20. Matrice de corrélation entre les métaux lourds et les indices de pollution dans les eaux souterraines de la zone d'étude	156

ANNEXES

	Page
Tableau.A1.1. Précipitations mensuelles (de la station de Ain Azel, Période 1984-2011)	I
Tableau.A1.2. Les données météorologiques (Précipitation, Température, Vitesse du vent) *station de Sétif, Période 2000-2010*	II
Tableau A3.1. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Mio-Plio-Quaternaire	VIII
Tableau A3.2. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau de l'Hauterivien	XII
Tableau A3.3. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Barrémien	XIII
Tableau A3.4. Les indices d'irrigation calculés, la balance ionique vérifiée et les paramètres de Gibbs dans la zone d'étude	XIV





AvANT - P ROPOS

AVANT PROPOS



1 Introduction :

L'eau est l'une des conditions essentielles de la vie. Tous les êtres vivants ont besoin d'eau pour survivre. Elle est indispensable à l'existence de l'Homme et au développement de ses activités, (industrie, agriculture...).

Cependant, la forte augmentation de la demande en eau due à l'accroissement de la population, de l'urbanisation, de l'industrialisation et des besoins pour l'irrigation a fini par poser des problèmes importants de pollution. La protection de cette ressource rare et vulnérable constitue, actuellement, l'une des principales préoccupations de notre Pays.

Le suivi de la qualité de l'eau est devenu l'un des outils importants du développement durable et fournit des informations importantes pour la gestion de l'eau (K. Srinivasamoorthy et al. 2009).

Pour cette raison, la qualité de l'eau et son analyse sont un sujet important dans les études des eaux souterraines (N. Aghazadeh, A.A. Mogaddam 2010; T. Subramani et al. 2005), en particulier, lorsque 80% des maladies dans les pays en croissance sont directement associées à une mauvaise gestion de l'eau et à des conditions d'insalubrité, (UNESCO, 2007).

Les données sur la qualité des eaux souterraines fournissent des indices importants sur l'histoire géologique des roches et des indications sur la recharge, le mouvement et le stockage des eaux souterraines. (W.C Walton, 1970).

La qualité des eaux souterraines dépend de nombreux facteurs, tels que la géologie, le degré d'altération chimique de la lithologie dominante, la qualité de l'eau de recharge et les apports provenant de sources autres que l'interaction eau-roches. (P.A. Domenico, 1972).

Il y a plusieurs types de pollution des eaux ; on cite à titre d'exemple les polluants primaires : (HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , SiO_2 , Na^+ , SO_4^{2-}), secondaires : (NH_3^+ , B^+ , F^- , Fe^{2+} , NO_3^- , K^+), tertiaires : (Al, Ba, Br, Cu, Pb, Li, Mn, P, Zn) et en traces : (Cd, Cr, Co, Hg, Ni, Sn, Ti). (E. Riboni, 2003).

2 Problématique :

La région de Ain-Azel, au Sud de Sétif, est riche en gisements polymétalliques dont la mine zincifère de Chaabet- el- Hamra qui fut découverte en 1900 par J. Savornin. Ce gisement est du type Mississippi Valley Type (MVT). (A. Boutaleb, 2001).

Suite à l'inondation qui a touché la mine de Kherzet-Youcef le 02 juin 1990 où la cause principale de l'inondation de la mine était une faille majeure conductrice, (un drain

karstique actif affecté par les mineurs), les travaux de prospection et d'exploitation ont été arrêtés. Par la suite, et en 1991, l'entreprise des substances ferreuses et non ferreuses (ENOF) a repris les travaux d'exploration du gisement de Chaabet- el- Hamra pour une éventuelle exploitation de la mine.

Les données géologiques montrent que ce gisement est formé par des terrains sédimentaires du Crétacé inférieur, (Hauterivien et Barrémien) recouverts par le Miocène qui est discordant. (E.R.E.M, 1992).

Du point de vue hydrogéologique, les données montrent l'existence de deux aquifères. (E.N.O.F, 2003):

- ❖ Dans la partie centrale du gisement, il existe une nappe d'eau contenue dans les formations carbonatées d'âge Hauterivien à perméabilité de fissures.
- ❖ Dans la partie Nord-Ouest du gisement, une nappe d'eau est reconnue dans les formations Barrémiennes. Cet aquifère est associé aux grès dolomitiques.

La nappe aquifère Hauterivienne a été captée par plusieurs forages afin de dénoyer le gisement par un rabattement de 30 m du niveau d'eau sous le corps minéralisé. Ceci a permis de continuer les travaux d'exploitation et d'extraction du minerai de zinc.


Par la suite, ces mêmes forages ont joué un autre rôle en alimentant en eau potable la région de Ain- Azel et ses alentours.

Compte-tenu de la tendance actuelle de l'accroissement de la demande en eau, notamment dans les régions semi-arides, (Sud Sétifien, tel que Ain- Azel et ses environs), le problème primordial de trouver de l'eau en quantité suffisante a tendance à minimiser et même à faire oublier celui de la qualité.

En conséquence, un nombre considérable de forages a été implanté dans la partie Nord-Ouest du gisement pour capter l'aquifère Barrémien.

Ceci pourrait constituer une sérieuse menace pour la population, le bétail et la production agricole. Cette situation nous amène à nous poser la question suivante: « *Est-ce qu'il y a un risque de pollution de nature minière et une détérioration de la qualité de l'eau des deux aquifères ?* ».

En conséquence, cette étude est très à propos, car elle évaluera la qualité des eaux souterraines dans la région et fournira une base de référence pour les futures initiatives de recherche.



Pour cela, ce travail intitulé : « *Apport de la géologie, hydrogéologie et des outils hydrogéochimiques à la connaissance des aquifères du Barrémien et Hauterivien dans la région Sud Sétifienne* », constitue une contribution pour une meilleure connaissance de l'hydrochimie de l'aquifère Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet- el- Hamra et la nappe Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Ain- Azel. L'appréciation de la qualité de l'eau et son aptitude à différents usages sont les principaux buts à atteindre.

La méthodologie suivie est fondée sur :

A. Une synthèse bibliographique :

- Des études géologiques et hydrogéologiques antérieures, (thèses, mémoires, publications) relatives à la géologie du Nord-Est Algérien, la géologie des hautes plaines sétifiennes, la géologie des Monts du Hodna, la géologie détaillée du gisement de Chaabet- el- Hamra et également les cartes géologiques et topographiques ;
- Les rapports des travaux de recherche, d'exploration et d'exploitation liés aux ressources en eau dans la région.

B. Les travaux de terrain :

Plusieurs sorties ont été effectuées sur la région de Ain- Azel, au Sud de Sétif.

Les travaux de terrain ont investigués:

- Le site du gisement de Chaabet- el- hamra où se trouvent les deux batteries de forage du Barrémien et Hauterivien ;
- Le site du gisement de Kherzet- Youcef où se trouve une autre batterie proche du gisement ;
- Les sites des forages privés implantés dans la plaine de Ain- Azel,
- Des prélèvements d'échantillons d'eau ont été effectués en 98 emplacements pour des analyses physico-chimiques ainsi que pour déceler les métaux lourds.
- Des mesures piézométriques ont été initiées en 2 périodes différentes, (2015 et 2016) sur 11 forages afin d'élaborer une carte piézométrique de la plaine de Ain- Azel. Les dits forages étant répartis irrégulièrement sur toute la plaine et qui servent en grande partie à l'irrigation et aux besoins domestiques.
- **Les travaux de laboratoire :**
au début et en Avril 2012, six (06) échantillons d'eau ont été analysés au

laboratoire de l'ANRH-Constantine, (analyses physico-chimiques et métaux lourds), prélevés des forages de la nappe Hauterivienne dans le gisement de Chaabet- el- hamra ;

- Plus tard en Mai 2018, quatre- vingt- dix- huit (98) échantillons d'eau (06 de l'aquifère Hauterivien, 09 du Barrémien et 83 du Mio-Plio-Quaternaire) ont été prélevés et analysés au laboratoire de l'ADE- Sétif et au laboratoire de la faculté des sciences, département de Chimie, UFA Sétif.

Cette étude s'articulera en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons le cadre géologique dans lequel nous avons abordé la lithologie et la structure du terrain ;
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des paramètres hydroclimatiques de la zone d'étude pour aboutir à l'établissement du bilan hydrique ;
- Le troisième chapitre traite l'hydrogéologie de la zone d'étude par l'élaboration des cartes piézométriques et l'utilisation des essais de pompage pour l'évaluation de certains paramètres hydrodynamiques, en l'occurrence, la transmissivité et la perméabilité ;
- Dans le quatrième chapitre, nous traiterons le chimisme des eaux souterraines de ces aquifères et leur évolution spatiale à l'aide de la cartographie hydrochimique ;
- Finalement, nous donnerons une conclusion générale, dans laquelle, nous mettrons en évidence les résultats auxquels nous avons abouti.

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ LAARBI TEBESSI- TEBESSA



FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES ET DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Thèse

Présentée en Vue de l'Obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

SPECIALITÉ : Géologie

OPTION : HYDROGÉOLOGIE

THÈME

**APPORT DE LA GÉOLOGIE, L'HYDROGÉOLOGIE ET DES
OUTILS HYDROGÉOCHIMIQUES À LA CONNAISSANCE DES
AQUIFÈRES DU BARRÉMIEN ET HAUTERIVIEN DE LA RÉGION
SUD-SÉTIFIENNE
*NORD-EST ALGÉRIEN***

Présentée par : M^{me} Kada Houria

Devant le jury composé de:

Mr. Athamnia.D	Professeur- ULT. Tebessa	président
Mr. Demdoum. A	Professeur- UFAS 1 Sétif	Directeur de thèse
Mr. Baali. F	Professeur- ULT. Tebessa	Co-Directeur de thèse
Mr. Fehdi. N	Professeur- ULT. Tebessa	Examineur
Mr.Hani. A	Professeur- UBM. Annaba	Examineur
Mr.Benhamza. M	Professeur- UBM. Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021- 2022

REMERCIEMENTS



Tout d'abord et avant tout, je tiens à remercier en premier lieu, **Allah**, le Clément et le Miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la patience d'accomplir mon travail dans les meilleures conditions.

Cette thèse n'aurait pu être réalisée sans l'aide, la compréhension et la patience de ceux qui ont contribué scientifiquement et moralement à son aboutissement. Je voudrais remercier respectueusement les personnes qui m'ont ouvert les portes du savoir, je leurs serais toujours très reconnaissante.

Au terme de cette étude, je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, **Pr. Demdoug Abdeslam** et **Pr. Baali Fethi** pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant d'encadrer cette thèse. Je tiens également à saluer ses disponibilités durant toute ces années.

Je voudrais remercier vivement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils accordent à mon travail.

Je remercie **Pr. Athemnia Djamel** pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury.

Je suis sensible à l'honneur que m'ont fait **Pr. Fehdi Noufel** pour m'avoir honoré de leur présence en acceptant de juger ce travail.

Je remercie **Pr. Hani Azzedine** de me faire le plaisir d'accepter d'examiner cette thèse.

Comme je remercie **Pr. Benhamza moussa** de me faire le plaisir d'examiner mes travaux.

Je souhaite remercier infiniment **Mr. Chouder** (Subdivisionnaire de l'ADE-Ain Azel avec son équipe de techniciens) et **Mr. Khalid** (Ingénieur hydrogéologue à l'ANRH) pour leur disponibilité et ses encouragements, ainsi que pour leur aide en opération d'échantillonnage et d'analyse.

Mes remerciements s'adressent également à **Mr. Hamza**, Docteur à l'UFAS, Faculté des Sciences, Département de Chimie pour les analyses des métaux lourds par SAA.

Je remercie considérablement mon père **Chikh Slimène** d'avoir été présent lorsque j'avais besoin de lui, notamment lors de mes déplacements pour faire l'opération d'échantillonnage.

Je tiens aussi à exprimer mes reconnaissances à **Mr. Bellouche**, Docteur à l'UFAS, Institut d'Architecture et Sciences de la Terre, Département de Géologie pour ses réponses argumentées et judicieuses aux questionnements divers et pour m'avoir ouvert de nouveaux horizons scientifiques en hydrogéologie.

Toute ma gratitude à **Mr. Ben Mouhamed**, Enseignant Chercheur à l'UFAS, Institut d'Architecture et Sciences de la Terre, Département de Géologie pour son aide précieuse et son assistance louable.

Je souhaite remercier particulièrement **Mr. Zaghouane**, mon Enseignant et mon Promoteur de l'Ingéniorat, pour sa disponibilité et ses encouragements.

Tout mes remerciements à **Mr. Boustila**, Enseignant Chercheur à l'UFAS, Institut d'Architecture et Sciences de la Terre, Département de Géologie pour ses orientations et ses suggestions à titre indicatif.

Je présente mes sincères remerciements à mes **étudiants**, que j'ai eu à encadrer à qui j'ai appris des choses mais qui m'en ont beaucoup appris. Ce travail a été rendu possible en partie grâce à leur collaboration.

Je transmets du fond du cœur mes plus vifs remerciements à ma deuxième mère **Naïma**, mes **frères** et mes sœurs **Samira** et **Karima** pour leur collaboration.

Enfin, je ne saurai oublier dans mes remerciements mon époux **Mourad** qui a supporté mes préoccupations et mon stress ainsi que mes deux enfants **Islem Safy Errahmène** et **Mouadh Taky Errahmène**, je leur dédie cette humble œuvre.



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ LAARBI TÉBESSI- TÉBESSA



FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES ET DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Thèse

Présentée en Vue de l'Obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

SPÉCIALITÉ : Géologie

OPTION : HYDROGÉOLOGIE

THÈME

APPORT DE LA GÉOLOGIE, L'HYDROGÉOLOGIE ET DES
OUTILS HYDROGÉOCHIMIQUES À LA CONNAISSANCE DES
AQUIFÈRES DU BARRÉMIEN ET HAUTERIVIEN DE LA RÉGION
SUD-SÉTIFIENNE
NORD-EST ALGÉRIEN

Présentée par : M^{me} Kada Houria

Devant le jury composé de:

Mr.		président
Mr. Demdoun. A	Professeur-Université de Sétif1	Directeur de thèse
Mr. Baali. F	Professeur-Université de Tébessa	Co-Directeur de thèse
Mr.		Examineur
Mr.		Examineur

Année Universitaire : 2021- 2022

REMERCIEMENTS

Tout d'abord et avant tout, je tiens à remercier en premier lieu, **Allah**, le Clément et le Miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la patience d'accomplir mon travail dans les meilleures conditions.

Cette thèse n'aurait pu être réalisée sans l'aide, la compréhension et la patience de ceux qui ont contribué scientifiquement et moralement à son aboutissement. Je voudrais remercier respectueusement les personnes qui m'ont ouvert les portes du savoir, je leurs serais toujours très reconnaissante.

Au terme de cette étude, je tiens à remercier chaleureusement mes directeurs de thèse, **Pr. Demdoun Abdslem** et **Pr. Baali Fethi** pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer cette thèse. Je tiens également à saluer leur disponibilité durant toute ces années.

Je voudrais remercier vivement les membres du jury pour l'interet qu'ils accordent à mon travail.

Je remercie _____ pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury.

Je suis sensible à l'honneur que m'ont fait Dr _____, maitre Dr. _____ à l'université de _____, pour m'avoir honoré de leur présence en acceptant de juger ce travail.

Je remercie _____ de me faire le plaisir d'accepter d'examiner cette thèse.

Comme je remercie _____ de me faire le plaisir d'examiner mes travaux.

Je remercie aussi _____ d'avoir accepté de juger cette thèse.

Je remercie infiniment **Mr. Chouder** (Subdivisionnaire de l'ADE-Ain-Azel avec son équipe de techniciens) et **Mr. Khalid** (Ingénieur hydrogéologue à l'ANRH) pour leur disponibilité et leurs encouragements, ainsi que pour leur aide en opération d'échantillonnage et d'analyse.

Mes remerciements s'adressent également à **Mr. Hamza**, Docteur à l'UFAS, Faculté des Sciences, Département de Chimie pour les analyses des métaux lourds par SAA.

Je remercie considérablement mon père **Chikh Slimène** d'avoir été présent lorsque j'avais besoin de lui, notamment lors de mes déplacements pour faire l'opération d'échantillonnage.

Je tiens aussi à exprimer mes reconnaissances à **Mr. Bellouche**, Docteur à l'UFAS, Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre, Département de Géologie pour ses réponses argumentées et judicieuses aux questionnements divers et pour m'avoir ouvert de nouveaux horizons scientifiques en hydrogéologie.

Toute ma gratitude à **Mr. Ben Mohamed**, Enseignant- Chercheur à l'UFAS, Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre, Département de Géologie pour son aide précieuse et son assistance louable.

Je souhaite remercier particulièrement **Mr. Zaghouane**, mon Enseignant et mon Promoteur de l'Ingéniorat, pour sa disponibilité et ses encouragements.

Tout mes remerciements à **Mr. Boustila**, Enseignant-Chercheur à l'UFAS, Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre, Département de Géologie pour ses orientations et ses suggestions à titre indicatif.

Je présente mes sincères remerciements à mes **étudiants**, que j'ai eu à encadrer à qui j'ai appris des choses mais qui m'en ont beaucoup appris. Ce travail a été rendu possible en partie grâce à leur collaboration.

Je transmets du fond du cœur mes plus vifs remerciements à ma deuxième mère **Naïma**, mes **frères** et mes sœurs **Samira** et **Karima** pour leur collaboration.

Enfin, je ne saurai oublier dans mes remerciements mon époux **Mourad** qui a supporté mes préoccupations et mon stress ainsi que mes deux enfants **Islem Safy-Errahmène** et **Mouadh Taky-Errahmène**, je leur dédie cette humble œuvre.



الملخص:

تعرف ولاية سطيف في الفترة الأخيرة موجة جفاف حادة وشحا كبيرا في كمية تساقط الأمطار و الثلوج، وبدرجة أكبر المناطق الجنوبية منها، و بالخصوص منطقة عين أزال التي تتميز بمناخها شبه جاف، مما أدى الى تراجع رهيب في مستوى المياه الجوفية المسجل في الابار القليلة العمق، و التي كانت هي الملجأ الوحيد لسكان المنطقة بغية التزود بالمياه الصالحة للشرب وكذا سقي الأراضي الزراعية، ولا سيما ان المنطقة فلاحية.

و بما ان المنطقة تزرع بعدة مناخ للرباص و الزنك كالشعبة الحمراء وخرزة يوسف، واللذان بدورهما يحويان كميات كبيرة من المياه الجوفية و التي شكلت عائقا كبيرا في عملية الاستغلال المنجمي، فقد تم حفر عدة ابار ارتوازية بغية خفض منسوب المياه لمواصلة اشغال الاستغلال المنجمية، وكذا تزويد المنطقة بالمياه الصالحة للشرب و سقي الأراضي الزراعية.

وبهدف دراسة نوعية هذه المياه ومدى صلاحيتها للشرب والسقي بما انما في منطقة منجمية، فقد أجريت عدة حملات معاينة (2012- 2018) اين تمت معاينة كل من طبقة المياه الجوفية الصوتريفانية بالشعبة الحمراء، والبارميانية في كل من الشعبة الحمراء و خرزة يوسف، وكذا الميو بليو كواترنارية بمنطقة عين أزال من خلال اجراء جملة من التحاليل الفيزيائية (T°,pH, CE, RS)، الكيميائية ($K^+,HCO_3^-,SO_4^{2-},Cl^-$)، و كذا المعادن الثقيلة (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb)، اين استعملت نتائجها في استنباط عدة معايير: SSP, RC, HQ, ADD, C_d, HEI, HPI, SAR, KR, IP, RSC, MH.

و كنتيجة اساسية لهذا العمل فان المياه الجوفية لهذين الطبقتين المائيتين العميقتين الموجودتين في تركيبات جيولوجية من عمر الحقبة الطباشيرية السفلية (هوتريفيان وبارميان)، و كذا المسطح المائي العلوي الميو بليو كواترناري، تعرف درجة من التلوث تمنعها من ان تكون صالحة للشرب او السقي.

الكلمات المفتاحية: هوتريفيان، بارميان، طبقة مياه جوفية، نوعية، سطيف، عين أزال

Abstract:

The wilaya of Setif has recently experienced a severe drought and a great scarcity of precipitation and snow, and to a greater extent the southern areas, and in particular the region of Ain-Azel, which is characterized by its semi-arid climate, this has led to a terrible drop in the level of groundwater recorded in the shallow wells, which were the only refuge for the inhabitants of the region to provide drinking water as well as irrigation of fertile land, especially since the area is agricultural.

Since the area is full of several lead and zinc mines, such as Chaabet –el-Hamra and Kherzet-Youcef, which in turn contain large amounts of groundwater, which have been a major obstacle in the mining process, several wells were drilled to lower the piezometric level to continue mining, as well as to provide the region with drinking water and irrigation.

In order to study the quality of these waters and their suitability for consumption and irrigation since they are located in a mining area, several sampling campaigns were conducted (2012-2018) for the Hauterivian aquifers in the Chaabet-el-Hamra deposit, Barremian in the Chaabet-el-Hamra and Kherzet-Youcef deposit, as well as the Mio-Plio-Quaternary in the Ain-Azel plain, in order to carry out a series of analyses: physical (T° , pH, EC, TDS), chemical (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-}) as well as heavy metals (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), where their results were used in the estimation of several indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d , ADD, HQ and RC.

As a key result of this work, the groundwater of these two deep aquifers, Hauterivian and Barremian, and the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary, experience a degree of pollution that prevents it from being drinkable or to be used for irrigation.

Key words: Hauterivian, Barremian, Aquifer, Quality, Setif, Ain- Azel.

Résumé :

La wilaya de Sétif a récemment connu une grave sécheresse et une grande rareté des précipitations et de la neige, et dans une plus grande mesure dans les zones méridionales, et en particulier la région de Ain- Azel, qui se caractérise par son climat semi-aride, ce qui a entraîné un terrible rabattement du niveau des eaux souterraines enregistré dans les puits de faible profondeur, qui étaient le seul refuge pour les habitants de la région afin de fournir de l'eau potable, ainsi que l'irrigation des terres fertiles, d'autant plus que la zone est agricole.

Étant donné que la zone regorge de plusieurs mines de plomb et de zinc, telles que Chaabet –el-Hamra et Kherzet- Youcef, qui contiennent à leur tour de grandes quantités d'eau souterraine, qui ont été un obstacle majeur dans le processus d'exploitation minière, plusieurs forages ont été forés afin de rabattre le niveau piézométrique pour poursuivre l'exploitation minière, ainsi que pour fournir à la région de l'eau potable et d'irrigation.

Afin d'étudier la qualité de ces eaux et leur aptitude à la consommation, et à l'irrigation puisqu'elles se trouvent dans une zone minière, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été menées (2012-2018), pour les aquifères Hauterivien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra, Barrémien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra et Kherzet-Youcef, ainsi que le Mio-Plio-Quaternaire dans la plaine de Ain- Azel, afin de réaliser une série d'analyses : physiques (T° , pH, CE, RS), chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-}) ainsi que des métaux lourds (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), où leurs résultats ont été utilisés dans l'estimation de plusieurs indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d , ADD, HQ et RC.

Et comme résultat-clé de ce travail, les eaux souterraines de ces deux aquifères profonds, Hauterivien et Barrémien, et la nappe d'eau superficielle du Mio-Plio-Quaternaire, connaissent un degré de pollution qui l'empêche d'être potable ou à utiliser pour l'irrigation.

Mots clés : Hauterivien, Barrémien, Aquifère, Qualité, Sétif, Ain- Azel.

A decorative graphic consisting of a trail of small squares in shades of pink, grey, and dark red, leading to a larger dark red square at the bottom left.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

AVANT PROPOS

Page

1. Introduction	1
2. Problématique	1
A. Une synthèse bibliographique	3
B. Les travaux de terrain	3
C. Les travaux de laboratoire	4

PREMIER CHAPITRE/ CADRE GÉOLOGIQUE

Page

I.1. Introduction	5
I.2. Localisation géographique de la zone d'étude	5
I.3. La géomorphologie	5
I.4. Le cadre climatique	8
I.5. Le couvert végétal	8
I.6. Le cadre socio-économique	8
I.7. La géologie de la zone d'étude	8
I.7.1. La géologie régionale	8
I.7.1.1 Domaine interne	10
I.7.1.2 Domaine des Flyschs	13
I.7.1.3 Domaine externe (le Tell)	14
I.7.2. Les phases tectoniques	21
I.7.2. 1. Les phases tectoniques mésozoïques	21
I.7.2. 2. Les phases tectoniques tertiaires	22
I.7.2. 3. La tectonique récente	24
I.8. La géologie locale	24
I.8. 1. La stratigraphie des Monts du Hodna.....	24
I.8. 1.1. Les terrains triasiques	26
I.8. 1.2. Ensemble parautochtone et autochtone Hodnéen	26
I.8. 1.3. Séries à Jurassiques intermédiaires de l'unité inférieure de Djebel Kalaoun	32
I.8. 1.4. Ensemble allochtone Sud-Sétifien	33
I.8. 2. La tectonique des monts du Hodna	37
I.8. 3. Les phases tectoniques	39

I.8. 4. La stratigraphie du gisement de Chaabet el Hamra	43
I.8. 5. La tectonique du gisement de Chaabet el Hamra	47
I.9. Conclusion	49

DEUXIÈME CHAPITRE/ HYDROCLIMATOLOGIE

Page

II.1. Introduction	50
II.2 Le bassin versant de la zone d'étude.....	51
II.3 Étude morphométrique	51
II. 3.1 Les caractéristiques morphométriques du sous bassin.....	51
II. 3.2 Indice de compacité ou coefficient de Gravelius (Kc).....	53
II. 3.3 Recherche d'un modèle de représentation.....	53
II.3.4 Caractéristiques des altitudes.....	54
II.3.5 Altitude médiane H50%.....	56
II.3.6 Dénivelée simple D.....	57
II.3.7 Indice de pente et relief.....	57
II.3.8 Indice de pente globale Ig.....	57
II.3.9 Carte des pentes	57
II.4 Caractéristiques du réseau hydrographique.....	58
II.5 Récapitulation des caractéristiques morphométriques.....	59
II.6 L'étude hydroclimatique.....	60
II.7 Données de l'O.N.M.....	61
II.7.1 Les précipitations.....	61
II.7.2 Étude des précipitations de la station de Ain Azel.....	62
II.7.2.1 Variation des précipitations dans le temps.....	62
II. 7.2.1.1 Précipitations moyennes mensuelles.....	62
II. 7.2.1.2 Précipitations moyennes annuelles.....	63
II. 7.2.1.3 Variation des précipitations dans l'espace.....	64
II. 7.3 Température de l'air.....	64
II. 7.3.1 Variation de la T° de l'air dans le temps.....	64
II. 8 Courbe ombrothermique.....	65
II. 9 Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte).....	66
II. 10 Indice d'aridité	67



II. 11 L'indice climatique.....	68
II. 12 Évapotranspiration potentielle et réelle.....	68
II.12.1 L'évapotranspiration réelle	68
II.12.1.1 Formule de L. Turc.....	68
II.12.1.2 Formule de Coutagne.....	69
II.12.1.3 L'abaque de Wundt.....	69
II.12.1.4 Abaque de P. Verdeil	70
II.12.2 L'évapotranspiration potentielle ETP.....	70
II.13 Bilan hydrique selon Thornthwaite	72
II.13.1 Calcul des réserves facilement utilisables RFU.....	72
II.14 Bilan hydrologique.....	74
II.14.1 Estimation du ruissellement annuel	74
II.14.2 Infiltration	75
II.15 Conclusion.....	75

TROISIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOLOGIE

Page

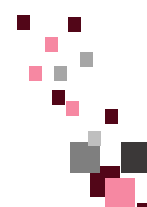
III.1. Introduction	77
III.2. Aperçu sur l'hydrogéologie de la région de Sétif	77
III.3. Contexte hydrogéologique de Ain Azel	78
III.3.1. Aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire	78
III.3.2. Aquifère profond (Crétacé inférieur)	79
III.4. Inventaire des points d'eau	79
III.5. Interprétation de la carte piézométrique	81
III.5.1 Pour la première campagne (Juin 2015)	81
III.5.1 Pour la deuxième campagne (Mai 2016)	81
III.6. Gradient hydraulique	81
III.7. Contexte hydrogéologique du gisement de Chaabet el Hamra	84
III.8. Inventaire des points d'eau	85
III.9. Interprétation de la carte piézométrique	86
III.10. Gradient hydraulique	86
III.11. Les paramètres hydrodynamiques	89
III.12. Conclusion	91



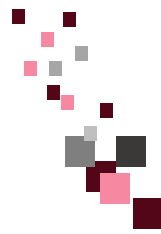
QUATRIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOCHIMIE

Page

IV.1. Introduction	92
IV.2. Échantillonnage et analyse des eaux souterraines	92
IV.3. Les compagnes de prélèvement d'eau	93
IV.3.1. Avril 2012	93
IV.3.1.1 Résultats et discussion	95
❖ Caractéristiques hydrochimiques	95
❖ Paramètres physiques	96
❖ Paramètres chimiques	97
IV.3.1.2. Analyse en composantes principales	98
IV.3.1.3. Métaux lourds	99
IV.3.1.4. Mécanismes contrôlant la chimie des eaux souterraines	100
IV.3.1.5. Eaux souterraines pour l'irrigation	103
A Ratio d'absorption du sodium (SAR).....	103
B Diagramme de Wilcox	104
C Pourcentage de sodium soluble (SSP).....	105
D Carbonate de sodium résiduel (RSC).....	106
E Indice de perméabilité (PI)	106
F Risque de magnésium (MH)	106
G Rapport de Kelly (KR)	107
IV.3.2. Période de Mai 2018	107
IV.3.2. 1 Points échantillonnés	107
IV.3.2. 2 Méthode de prélèvement et conservation des échantillons	107
IV.3.2. 3 Méthodes d'analyses	108
❖ Mesures in situ : paramètres physiques	108
❖ Teneurs en éléments majeurs et mineurs : analyses chimiques	108
❖ Teneurs des métaux lourds	108
IV.3.2. 4 Caractérisations hydrochimiques	110
IV.3.2. 5. Les principaux paramètres physico-chimiques	110
❖ La température de l'eau	110



❖	pH de l'eau.....	110
❖	La conductivité électrique (CE)	110
❖	Les éléments chimiques majeurs	111
IV.3.2. 6 Diagramme de Gibbs		115
IV.3.2. 7 Faciès chimiques des eaux		116
IV.3.2. 8 Corrélation entre les éléments majeurs		121
IV.3.2. 8.1 ACP pour les eaux Hauteriviennes		121
IV.3.2. 8.2 ACP pour les eaux Barrémiennes.....		121
IV.3.2. 8.3 ACP pour les eaux du Mio-Plio-Quaternaire		123
IV.3.2. 9 Relations binaires entre les éléments majeurs		124
IV.3.2. 9.1 L'aquifère Hauterivien		124
❖	Couple $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ - Conductivité	124
❖	Couple Mg^{2+} - Na^+	124
❖	Couple SO_4^{2-} - Cl^-	125
❖	Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-}	125
❖	Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-}	125
❖	Couple Ca^{2+} - Cl^-	126
❖	Couple Mg^{2+} - Cl^-	126
❖	Couple Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}	127
IV.3.2. 9.2 L'aquifère Barrémien		127
❖	Couple SO_4^{2-} - Cl^-	127
❖	Couple SO_4^{2-} / Cl^- - Conductivité	127
❖	Couple $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ - Conductivité	128
❖	Couple Mg^{2+} - Na^+	129
❖	Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-}	129
❖	Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-}	130
❖	Couple Ca^{2+} - Cl^-	130



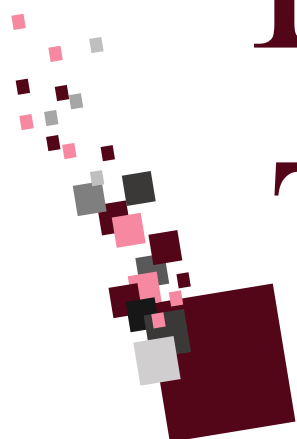
❖ Couple Mg^{2+} - Cl^{-}	130
❖ Couple Ca^{2+} - Mg^{2+}	131
❖ Couple Ca^{2+} - HCO_3^{-} - SO_4^{2-}	131
❖ Diagramme $Ca^{2+}/(HCO_3^{-} +SO_4^{2-}) - Na^{+}/Cl^{-}$	131
❖ Diagramme $Mg^{2+}/(HCO_3^{-} +SO_4^{2-}) - Na^{+}/Cl^{-}$	132
IV.3.2. 10 Qualité des eaux à la consommation humaine et à des fins d'irrigation.....	133
IV.3.2. 11 Aptitude des eaux à l'irrigation	138
A Kelly ratio (KR)	138
B Sodium absorption ratio (SAR).....	139
C Residual Sodium Carbonate (RSC)	140
D Soluble Sodium Percentage (SSP).....	141
E Permeability Index (PI)	142
F Magnesium Hazard (MH)	143
G Le diagramme de Wilcox	144
IV.3.2. 12. Les métaux lourds	145
IV.3.2. 13. Estimation des indices d'évaluation de la pollution.....	148
IV.3.2. 14. Paramètres d'évaluation des risques pour la santé	152
IV.3.2. 15. Analyse statistique multi-variée	154
IV.4 Conclusion	157

	<u>Page</u>
CONCLUSION GÉNÉRALE	160
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	



LISTES DES

TABLEAUX ET FIGURES



LISTE DES FIGURES

PREMIER CHAPITRE/ CADRE GÉOLOGIQUE

	<u>Page</u>
Figure I.1. Localisation géographique de la zone d'étude (Google Maps, 2020).....	6
Figure I.2. Image satellitaire en combinaison des bandes 321 montrant les massifs montagneux.....	7
Figure I.3: Localisation des principales unités géologiques des Maghrébides (A. Domzig, 2006).	9
Figure I.4: Position des différentes unités géologiques des Maghrébides (A. Domzig, 2006).....	9
Figure I.5. Les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (D'après M. Durand Delga, 1969).	11
Figure I.6. Contexte structural du domaine d'étude (D'après W. Wildi, 1983).....	11
Figure I.7. Coupe géologique schématique expliquant les relations structurales et sédimentaires entre le Néritique et les Sellaoua (M. Chadi et al, 1999 ; in : A. Mezerzi, 2015).....	19
Figure I.8. Les principaux massifs des Monts du Hodna (A. Khaldi, 1987)	20
Figure I.9. Localisation des structures et des formations imputables à la tectonique priabonienne (J. M. Vila, 1980) In A. Mezarzi, 2015	23
Figure I.10. Représentation schématique des principaux effets de la néotectonique (J. M. Vila, 1980) In Mezarzi, 2015	25
Figure I.11. Schéma structural de la région de Sétif montrant le cadre de la géologie régionale de la zone d'étude (J. M. Vila, 1980)	27
Figure I.12. Carte géologique de la région d'étude, extrait de la carte géologique de Ain- Azel et Ain- Lahdjar, 1/50000 (J.M. Vila, 1980).	29
Figure I.13 Colonne lithostratigraphique des massifs des Monts du Hodna (Compilation faite par A. Boutaleb, 2001 à partir des travaux de J. Glaçon, 1967; R. Guiraud 1973; J. M.Vila, 1980).	31
Figure. I.14 : Log lithostratigraphique de l'échelle inférieure de Djebel Kalaoun (J. M. Vila, 1980).....	33
Figure I.15. Corrélation des séries typiques de l'ensemble allochtone Sud-Sétifien (J. M. Vila, 1980)	37
Figure I.16 Coupe interprétative au 1/50.000 (Extrait de la carte géologique de Ain- Lahdjar au 1/50.000. J.M.Vila ,1977).....	38
Figure I.17 : Coupe interprétative au 1/50.000 (Extrait de la carte géologique de Ain- Azel au 1/50.000. D'après J. M. Vila ,1977).....	41
Figure I.18 : Coupe géologique schématique de la région de Kherzet- Youcef (J. Glaçon, 1956) in L. Attoucheik, 2006	42
Figure I.19. Carte géologique du gisement de Chaabet- el- Hamra (e : 1/2000, E.R.E.M, 1992)	43
Figure I.20. La colonne lithostratigraphique du gisement de Chaabet- el- Hamra (E.R.E.M, 1990)	46
Fig. I. 21. Rosace du gisement de Chaabet el Hamra.....	48

DEUXIÈME CHAPITRE/HYDROCLIMATOLOGIE

	<u>Page</u>
Figure II.1 : Bassins hydrographiques de l'Algérie orientale (A. Mebarki, 2005).....	50
Figure. II.2 Le bassin versant des hauts plateaux constantinois.....	52
Figure. II.3 L'orographie du sous bassin versant de la zone d'étude.	54
Figure. II.4 La courbe hypsométrique du sous bassin versant de la zone d'étude.....	55

Figure. II. 5 MNA du sous bassin versant de la zone d'étude.....	56
Figure. II. 6 Carte des pentes du sous bassin versant de la zone d'étude.....	58
Figure. II.7 Le réseau hydrographique du sous bassin versant de la zone d'étude.....	59
Figure II.8 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (A) (M. Côte, 1998a) In A. Mebarki, 2005 et Climagramme d'Emberger (B) In M. Z. Belhadj, 2017.....	60
Figure. II.9 Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (Établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1 ^{er} septembre 1921 au 31 Août 1960 et du 1 ^{er} Septembre 1968 au 31 Août 1989).....	62
Figure.II.10 Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Station de Ain Azel, période de 1984- 2011).....	63
Figure. II.11. Histogramme des précipitations moyennes annuelles (Station de Ain Azel, période de 1984- 2011)	63
Figure. II.12 Les températures moyennes mensuelles (Station de Sétif, période de 2000- 2011).	65
Figure. II.13 Courbe ombrothermique (Température: Station de Sétif, période 2000-2011 et (Précipitation: Station de Ain Azel, période 2000-2011).....	66
Figure II.14 Abaque de l'Indice d'aridité annuel de De Martone	67
Figure II.15 Évaluation des éléments et déficit en fonction de la température et des précipitations (Abaque de Wundt modifié par Coutagne).....	71
Figure II.16 Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement Algérie, d'après P. Verdeil, 1988.....	71
Figure II.17 Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Ain Azel	74

TROISIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOLOGIE

Page

Figure. III.1 Carte schématique descriptive des principales nappes aquifères existantes à travers la région de Sétif, (DREWS, 2011).....	78
Figure III.2 : Carte d'inventaire des points d'eau dans la région de Ain Azel (d'après la carte géologique de Ain Azel, feuille n°143, et Ain Lahdjer feuille n° 144, Échelle 1/50000)	80
Figure III.3 : Carte piézométrique de Ain Azel (Juin 2015).....	82
Figure III.4 : Carte piézométrique de Ain Azel (Mai 2016).	83
Figure III.5 : Coupe hydrogéologique dans la partie centrale du gisement touchant l'aquifère Hauterivien.	85
Figure III.6 : Coupe hydrogéologique dans la partie Nord- Ouest du gisement touchant l'aquifère Barrémien	85
Figure III.7: Carte d'inventaire des points d'eau du gisement de Chaabet el Hamra (Juin 1990)	87
Figure III.8: Carte piézométrique du gisement de Chaabet el Hamra (Juin 1990)	88

QUATRIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOCHIMIE

Page

Fig. IV.1. Localisation des forages testés de l'aquifère Hauterivien sur la carte géologique du gisement de zinc de Chaabet el Hamra (Tirée du rapport E. R. E. M, 1992).	94
Fig.IV.2. Diagramme de Piper des eaux Hauteriviennes de la zone d'étude (Avril 2012)	102



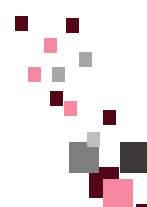
Fig.IV.3. Diagramme de Schoeller des eaux Hauterivienne de la zone d'étude (Avril 2012)	102
Fig.IV.4. Diagramme de Gibbs (Avril 2012)	103
Fig.IV.5. Diagramme de Wilcox pour les eaux Hauterivienne de la mine de Chaabet el Hamra	105
Figure IV.6. Inventaire des points d'eau prélevés (a: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra).....	109
Figure IV.7. Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Barrémienne.....	112
Figure IV.8. Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Hauterivienne	112
Figure IV.9. Diagramme de Gibbs des eaux Hauteriviennes (Mai 2018).....	115
Figure IV.10. Diagramme de Gibbs des eaux Barrémiennes (Mai 2018)	116
Figure IV.11. Diagramme de Gibbs des eaux du Mio-Plio-Quaternaire (Mai 2018).....	116
Fig.IV.12. Diagramme de Piper (aquifère Barrémien) Mai 2018	118
Fig.IV.13. Diagramme de Piper (aquifère Hauterivien) Mai 2018	118
Fig.IV.14 a,b, c. Diagramme de Piper (aquifère Mio-Plio-Quaternaire) Mai 2018	119
Fig.IV.15. Faciès chimiques des eaux de la zone d'étude (Mai 2018).....	120
Figure IV.16. Relation Ca^{2+}/Mg^{2+} -CE.....	124
Figure IV.17. Relation Ca^{2+} - Na^{+}	124
Figure IV.18. Relation Mg^{2+} - Na^{+}	125
Figure IV.19. Relation SO_4^{2-} - Cl^{-}	125
Figure IV.20. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}	126
Figure IV.21. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}	126
Figure IV.22. Relation Ca^{2+} - Cl^{-}	126
Figure IV.23. Relation Mg^{2+} - Cl^{-}	126
Figure IV.24. Relation Ca^{2+} - HCO_3^{-}	127
Figure IV.25. Relation Ca^{2+} - HCO_3^{-} - SO_4^{2-}	127
Figure IV.26. Relation Cl^{-} - SO_4^{2-}	128
Figure IV.27. Relation SO_4^{2-} / Cl^{-} - CE	128
Figure IV.28. Relation Ca^{2+}/Mg^{2+} - CE	129
Figure IV.29. Relation Ca^{2+} - Na^{+}	129
Figure IV.30. Relation Mg^{2+} - Na^{+}	129
Figure IV.31. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}	129
Figure IV.32. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}	130
Figure IV.33. Relation Ca^{2+} - Cl^{-}	130
Figure IV.34. Relation Mg^{2+} - Cl^{-}	131
Figure IV.35. Relation Ca^{2+} - Mg^{2+}	131
Figure IV.36a. Évolution du calcium	132
Figure IV.36b. Évolution du calcium	132
Figure IV.37. Échange de base.....	132
Figure IV.38. Échange de base	132



Figure IV.39. Représentation des eaux_ Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Mai 2018)	135
Figure IV.40. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Mai 2018) des eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire	136
Figure IV.41. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Mai 2018) des eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire	137
Figure IV.42. Histogramme des valeurs du KR des différents points d'eau	138
Figure IV.43. Histogramme des valeurs du SAR des différents points d'eau	139
Figure IV.44. Histogramme des valeurs du RSC des différents points d'eau	140
Figure IV.45. Histogramme des valeurs du SSP des différents points d'eau	141
Figure IV.46. Histogramme des valeurs du PI des différents points d'eau	142
Figure IV.47. Histogramme des valeurs du MH des différents points d'eau	143
Figure IV. 48. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox (L'aquifère Hauterivien et Barrémien_Mai 2018)	144
Figure IV.49. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox (L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire_Mai 2018).....	145
Figure IV.50. Histogrammes des teneurs des métaux lourds dans l'aquifère Barrémien et Hauterivien (Mai 2018)	148
Figure IV. 51. Carte factorielle montrant le regroupement de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.....	155

ANNEXES	Page
Figure.A2-1 Essai de pompage long duré : Pz1 de la nappe Hauterivienne.....	III
Figure. A2-2. Essai de pompage long duré : CH6 de la nappe Hauterivienne.....	III
Figure. A2-3. Essai de pompage palier 1: Afounes de la nappe Barrémienne.....	III
Figure. A2-4. Essai de pompage palier 2: Afounes de la nappe Barrémienne.....	III
Figure.A2-5. Essai de pompage long duré: Afounes de la nappe Barrémienne.....	IV
Figure. A2-6. Essai de pompage long duré: P1 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	IV
Figure. A2-7. Essai de pompage long duré: P2 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	IV
Figure. A2-8. Essai de pompage palier 1: P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	IV
Figure. A2-9. Essai de pompage palier 2: P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-10. Essai de pompage long duré : P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-11. Essai de pompage palier 1: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-12. Essai de pompage palier 2: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	V
Figure. A2-13. Essai de pompage long duré: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VI
Figure. A2-14. Essai de pompage palier 1: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire	VI
Figure. A2-15. Essai de pompage palier 2: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VI
Figure. A2-16. Essai de pompage palier 1: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VI
Figure. A2-17. Essai de pompage palier 2: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure. A2-18. Essai de pompage long duré : P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure. A2-19. Essai de pompage palier 3: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure. A2-20. Essai de pompage long duré: P9 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire.....	VII
Figure A3.1 Variabilité spatiale du pH (A. : Tous les points prélevés. B. : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien.).....	XVIII
Figure A3.2 Variabilité spatiale du CE (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien).....	XIX
Figure A3.3 Variabilité spatiale du Calcium (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des	XX

forages du Barrémien et Hauterivien)	
Figure A3.4 Variabilité spatiale du Magnésium (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien).....	XXI
Figure A3.5 Variabilité spatiale du Sodium (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXII
Figure A3.6 Variabilité spatiale du Potassium A. : Tous les points prélevés (B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXIII
Figure A3.7 Variabilité spatiale du Bicarbonates (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXIV
Figure A3.8 Variabilité spatiale des Sulfates (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien).....	XXV
Figure A3.9 Variabilité spatiale des Chlorures (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXVI
Figure A3.10 Variabilité spatiale des Nitrates (A. : Tous les points prélevés B.: Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien)	XXVII
Figure A3.11 Potabilité des eaux selon OMS, 2008 (a.: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b. : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra).....	XXVIII
Figure A3.12 Potabilité des eaux selon NA, 1992 (a.: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b. : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra).....	XXIX
Figure A3.13 Aptitude des eaux à l'irrigation selon Ayers and Westcot, 1994 (a.: vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, b. : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra).	XXX



LISTE DES TABLEAUX

DEUXIÈME CHAPITRE/HYDROCLIMATOLOGIE

	<u>Page</u>
Tableau. II. 1. L'indice de compacité de Gravelius Kc du sous-bassin de la région d'étude.....	53
Tableau.II.2. Les dimensions du rectangle équivalent du sous- bassin 07-01.....	54
Tableau. II. 3. La répartition des surfaces par tranches d'altitudes.....	55
Tableau. II.4. L'indice de pente globale Ig.	57
Tableau. II.5. Récapitulation des caractéristiques du sous- bassin versant 07-01.	59
Tableau II.6. Coordonnées Lambert de la station.....	61
Tableau II.7 Précipitations moyennes mensuelles (Station de Ain Azel, période de 1984- 2011)....	62
Tableau II.8. Coordonnées Lambert de la station.	64
Tableau II.9 Températures moyennes mensuelles (Station de Sétif, période 2000-2011)...	64
Tableau II.10. Températures et précipitations moyennes mensuelles (Température: Station de Sétif, période 2000-2011, Précipitation: Station de Ain Azel, période 2000-2011). ...	65
Tableau II.11. Variation des valeurs de rapport (P/T) d'après la méthode d'Euverte.	66
Tableau II.12. Vérification de la condition.....	69
Tableau II.13: Estimation de l'évapotranspiration réelle avec différentes méthodes	70
Tableau.II.14 Evapotranspiration potentielle ETP selon Thornthwaite.....	72
Tableau II. 15. Estimation du bilan hydrologique selon Thornthwaite pour la station de Ain Azel.	73

TROISIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOLOGIE

	<u>Page</u>
Tableau III.1. Inventaire des points d'eau dans la zone d'étude.....	79
Tableau III.1. Calcul du gradient hydraulique de la plaine de Ain -Azel, au sud de Sétif.....	84
Tableau III.2. Calcul du gradient hydraulique du gisement de Chaabet el Hamra.....	86
Tableau III.3. Quelques valeurs des paramètres hydrodynamiques (K et T).....	90

QUATRIÈME CHAPITRE/ HYDROGÉOCHIMIE

	<u>Page</u>
Tableau IV.1. Les normes Algériennes (NA. 6360), 1992 ; OMS, (2008) et Ayers and Westcot (1994) pour potabilité et irrigation	95
Tableau IV. 2. Les paramètres physico-chimiques en mg/l de l'aquifère Hauterivien (Compagne Avril 2012)	96
Tableau IV.3. Matrice de corrélation multiple des eaux Hauterivienne dans la mine de Chaabet el Hamra.....	99
Tableau IV.4. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauterivienne du gisement de Chaabet el Hamra en mg/l (Avril 2012).....	100
Tableau IV.5. Classification des eaux pour l'irrigation selon L. V. Wilcox (1955).....	104
Tableau IV. 6. Classification hydrochimique des eaux de la zone d'étude	117
Tableau IV. 7. La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Hauterivien.....	121
Tableau IV.8. La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Barrémien.....	122
Tableau IV.9 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.....	123
Tableau IV. 10 La qualité des eaux selon les différentes normes.....	134
Tableau IV.11. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauteriviennes et Barrémiennes du gisement de Chaabet el Hamra en mg/l (Mai 2018).....	146
Tableau IV.12. Les valeurs de l'HPI estimées	150
Tableau IV.13. Les valeurs de l'HEI estimées	151

Tableau IV.14. Les valeurs du C_d estimées	152
Tableau IV.15. Les valeurs du ADD estimées	153
Tableau IV.16. Les valeurs du HQ estimées	153
Tableau IV.17. Les valeurs du CR estimées	154
Tableau IV.18. Coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds pour les échantillons d'eau souterraine	155
Tableau IV.19. Coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques pour les échantillons d'eau souterraine	156
Tableau IV.20. Matrice de corrélation entre les métaux lourds et les indices de pollution dans les eaux souterraines de la zone d'étude	156

ANNEXES

	Page
Tableau.A1.1. Précipitations mensuelles (de la station de Ain Azel, Période 1984-2011)	I
Tableau.A1.2. Les données météorologiques (Précipitation, Température, Vitesse du vent) *station de Sétif, Période 2000-2010*	II
Tableau A3.1. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Mio-Plio-Quaternaire	VIII
Tableau A3.2. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau de l'Hauterivien	XII
Tableau A3.3. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Barrémien	XIII
Tableau A3.4. Les indices d'irrigation calculés, la balance ionique vérifiée et les paramètres de Gibbs dans la zone d'étude	XIV





AvANT - P ROPOS

AVANT PROPOS



1 Introduction :

L'eau est l'une des conditions essentielles de la vie. Tous les êtres vivants ont besoin d'eau pour survivre. Elle est indispensable à l'existence de l'Homme et au développement de ses activités, (industrie, agriculture...).

Cependant, la forte augmentation de la demande en eau due à l'accroissement de la population, de l'urbanisation, de l'industrialisation et des besoins pour l'irrigation a fini par poser des problèmes importants de pollution. La protection de cette ressource rare et vulnérable constitue, actuellement, l'une des principales préoccupations de notre Pays.

Le suivi de la qualité de l'eau est devenu l'un des outils importants du développement durable et fournit des informations importantes pour la gestion de l'eau (K. Srinivasamoorthy et al. 2009).

Pour cette raison, la qualité de l'eau et son analyse sont un sujet important dans les études des eaux souterraines (N. Aghazadeh, A.A. Mogaddam 2010; T. Subramani et al. 2005), en particulier, lorsque 80% des maladies dans les pays en croissance sont directement associées à une mauvaise gestion de l'eau et à des conditions d'insalubrité, (UNESCO, 2007).

Les données sur la qualité des eaux souterraines fournissent des indices importants sur l'histoire géologique des roches et des indications sur la recharge, le mouvement et le stockage des eaux souterraines. (W.C Walton, 1970).

La qualité des eaux souterraines dépend de nombreux facteurs, tels que la géologie, le degré d'altération chimique de la lithologie dominante, la qualité de l'eau de recharge et les apports provenant de sources autres que l'interaction eau-roches. (P.A. Domenico, 1972).

Il y a plusieurs types de pollution des eaux ; on cite à titre d'exemple les polluants primaires : (HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , SiO_2 , Na^+ , SO_4^{2-}), secondaires : (NH_3^+ , B^+ , F^- , Fe^{2+} , NO_3^- , K^+), tertiaires : (Al, Ba, Br, Cu, Pb, Li, Mn, P, Zn) et en traces : (Cd, Cr, Co, Hg, Ni, Sn, Ti). (E. Riboni, 2003).

2 Problématique :

La région de Ain-Azel, au Sud de Sétif, est riche en gisements polymétalliques dont la mine zincifère de Chaabet- el- Hamra qui fut découverte en 1900 par J. Savornin. Ce gisement est du type Mississippi Valley Type (MVT). (A. Boutaleb, 2001).

Suite à l'inondation qui a touché la mine de Kherzet-Youcef le 02 juin 1990 où la cause principale de l'inondation de la mine était une faille majeure conductrice, (un drain

karstique actif affecté par les mineurs), les travaux de prospection et d'exploitation ont été arrêtés. Par la suite, et en 1991, l'entreprise des substances ferreuses et non ferreuses (ENOF) a repris les travaux d'exploration du gisement de Chaabet- el- Hamra pour une éventuelle exploitation de la mine.

Les données géologiques montrent que ce gisement est formé par des terrains sédimentaires du Crétacé inférieur, (Hauterivien et Barrémien) recouverts par le Miocène qui est discordant. (E.R.E.M, 1992).

Du point de vue hydrogéologique, les données montrent l'existence de deux aquifères. (E.N.O.F, 2003):

- ❖ Dans la partie centrale du gisement, il existe une nappe d'eau contenue dans les formations carbonatées d'âge Hauterivien à perméabilité de fissures.
- ❖ Dans la partie Nord-Ouest du gisement, une nappe d'eau est reconnue dans les formations Barrémiennes. Cet aquifère est associé aux grès dolomitiques.

La nappe aquifère Hauterivienne a été captée par plusieurs forages afin de dénoyer le gisement par un rabattement de 30 m du niveau d'eau sous le corps minéralisé. Ceci a permis de continuer les travaux d'exploitation et d'extraction du minerai de zinc.


Par la suite, ces mêmes forages ont joué un autre rôle en alimentant en eau potable la région de Ain- Azel et ses alentours.

Compte-tenu de la tendance actuelle de l'accroissement de la demande en eau, notamment dans les régions semi-arides, (Sud Sétifien, tel que Ain- Azel et ses environs), le problème primordial de trouver de l'eau en quantité suffisante a tendance à minimiser et même à faire oublier celui de la qualité.

En conséquence, un nombre considérable de forages a été implanté dans la partie Nord-Ouest du gisement pour capter l'aquifère Barrémien.

Ceci pourrait constituer une sérieuse menace pour la population, le bétail et la production agricole. Cette situation nous amène à nous poser la question suivante: « *Est-ce qu'il y a un risque de pollution de nature minière et une détérioration de la qualité de l'eau des deux aquifères ?* ».

En conséquence, cette étude est très à propos, car elle évaluera la qualité des eaux souterraines dans la région et fournira une base de référence pour les futures initiatives de recherche.



Pour cela, ce travail intitulé : « *Apport de la géologie, hydrogéologie et des outils hydrogéochimiques à la connaissance des aquifères du Barrémien et Hauterivien dans la région Sud Sétifienne* », constitue une contribution pour une meilleure connaissance de l'hydrochimie de l'aquifère Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet- el- Hamra et la nappe Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Ain- Azel. L'appréciation de la qualité de l'eau et son aptitude à différents usages sont les principaux buts à atteindre.

La méthodologie suivie est fondée sur :

A. Une synthèse bibliographique :

- Des études géologiques et hydrogéologiques antérieures, (thèses, mémoires, publications) relatives à la géologie du Nord-Est Algérien, la géologie des hautes plaines sétifiennes, la géologie des Monts du Hodna, la géologie détaillée du gisement de Chaabet- el- Hamra et également les cartes géologiques et topographiques ;
- Les rapports des travaux de recherche, d'exploration et d'exploitation liés aux ressources en eau dans la région.

B. Les travaux de terrain :

Plusieurs sorties ont été effectuées sur la région de Ain- Azel, au Sud de Sétif.

Les travaux de terrain ont investigués:

- Le site du gisement de Chaabet- el- hamra où se trouvent les deux batteries de forage du Barrémien et Hauterivien ;
- Le site du gisement de Kherzet- Youcef où se trouve une autre batterie proche du gisement ;
- Les sites des forages privés implantés dans la plaine de Ain- Azel,
- Des prélèvements d'échantillons d'eau ont été effectués en 98 emplacements pour des analyses physico-chimiques ainsi que pour déceler les métaux lourds.
- Des mesures piézométriques ont été initiées en 2 périodes différentes, (2015 et 2016) sur 11 forages afin d'élaborer une carte piézométrique de la plaine de Ain- Azel. Les dits forages étant répartis irrégulièrement sur toute la plaine et qui servent en grande partie à l'irrigation et aux besoins domestiques.
- **Les travaux de laboratoire :**
au début et en Avril 2012, six (06) échantillons d'eau ont été analysés au

laboratoire de l'ANRH-Constantine, (analyses physico-chimiques et métaux lourds), prélevés des forages de la nappe Hauterivienne dans le gisement de Chaabet- el- hamra ;

- Plus tard en Mai 2018, quatre- vingt- dix- huit (98) échantillons d'eau (06 de l'aquifère Hauterivien, 09 du Barrémien et 83 du Mio-Plio-Quaternaire) ont été prélevés et analysés au laboratoire de l'ADE- Sétif et au laboratoire de la faculté des sciences, département de Chimie, UFA Sétif.

Cette étude s'articulera en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons le cadre géologique dans lequel nous avons abordé la lithologie et la structure du terrain ;
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des paramètres hydroclimatiques de la zone d'étude pour aboutir à l'établissement du bilan hydrique ;
- Le troisième chapitre traite l'hydrogéologie de la zone d'étude par l'élaboration des cartes piézométriques et l'utilisation des essais de pompage pour l'évaluation de certains paramètres hydrodynamiques, en l'occurrence, la transmissivité et la perméabilité ;
- Dans le quatrième chapitre, nous traiterons le chimisme des eaux souterraines de ces aquifères et leur évolution spatiale à l'aide de la cartographie hydrochimique ;
- Finalement, nous donnerons une conclusion générale, dans laquelle, nous mettrons en évidence les résultats auxquels nous avons abouti.



P REMIER

C HAPITRE

I.1. Introduction :

Ce chapitre présente les traits majeurs du milieu d'étude notamment la localisation géographique, la physiographie du terrain, l'hydrographie, le cadre climatique, le couvert végétal et le cadre géologique. Ces éléments vont contribuer à situer le système aquifère dans le contexte régional et à cerner les données utiles à la compréhension des problématiques abordées au cours de l'étude.

I.2. Localisation géographique de la zone d'étude :

La région de Ain- Azel, au Sud de Sétif, est située dans la partie orientale de l'Algérie du Nord. Elle appartient au domaine des Hautes Plaines Sétifiennes.

Le secteur d'étude, notamment le gisement de zinc de Chaabet- el- Hamra se trouve à 3,5 Km au Sud-Est de Ain- Azel (ex : Ampère), à 8 Km de Kherzet- Youcef et à l'extrémité occidentale du massif du Djebel Fourhal, (chainon oriental des monts du Hodna). **(Figure I.1).**

Ses coordonnées géographiques sont : 35°45'N et 5°30'E. L'altitude du site varie de 950 à 1200 mètres

Cette région, limitée au Nord par les communes de Ain- Lahdjar et Bir- Haddada, au Sud par la commune de Ras- el- Aioun, à l'Est par la commune de Beida- Bordj, et à l'Ouest par la commune de Salah- Bey, couvre une superficie d'environ 252 km². **(Figure I.1).**

I.3. La géomorphologie :

Cette région est représentée par un ensemble de chaînons, **(Figure I.2)**, dont certains culminent à plus de 1800 m tel que Djebel Boutaleb, (1886m), qui se relayent pour former une barrière topographique et climatique entre l'Algérie septentrionale et le domaine saharien. La région de Ain- Azel est caractérisée par une planitude entourée par les massifs montagneux suivants :

- ❖ Djebel Sekrine au Nord,
- ❖ Djebel Guetiane au Sud,
- ❖ Djebel Fourhal à l'Est et Djebel Boutaleb à l'Ouest.

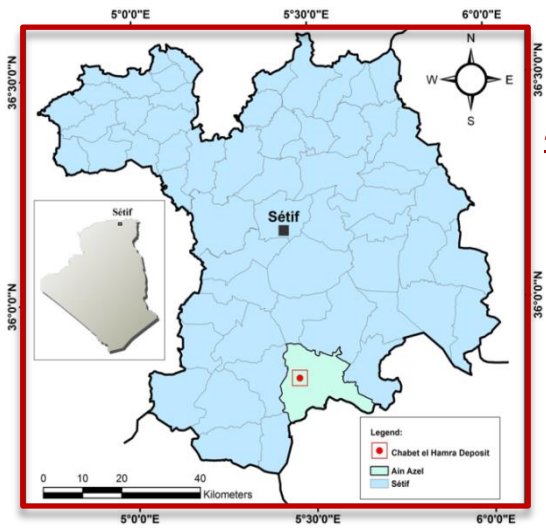


Figure I.1. Localisation géographique de la zone d'étude, (Google Maps, 2020)

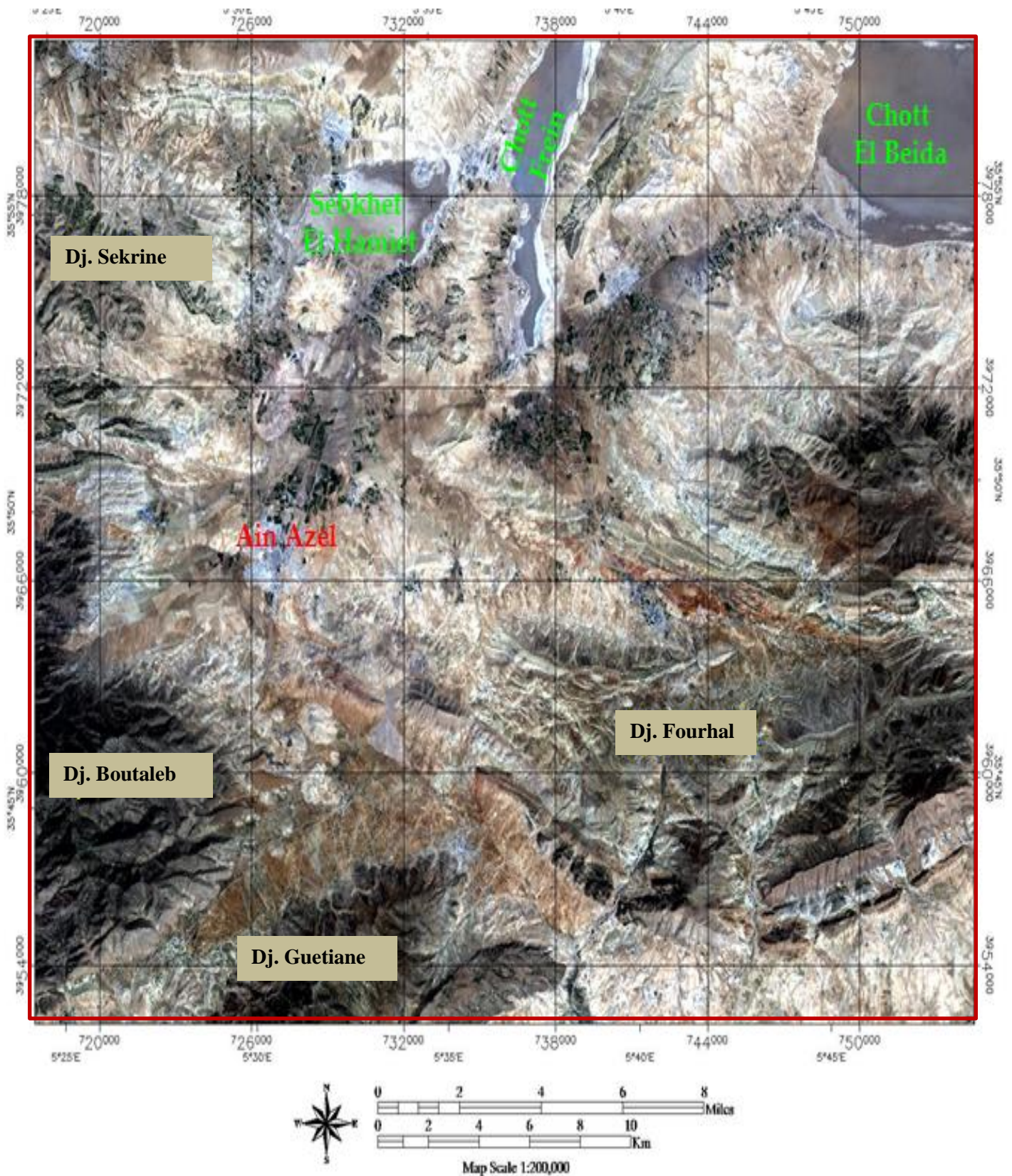


Figure I.2. Image satellitaire en combinaison des bandes 321 montrant les massifs montagneux.

I.4. Le cadre climatique :

Le secteur d'étude est attribué au climat semi -aride. Il est caractérisé par une période froide et humide, et une autre sèche et chaude.

La région d'étude reçoit de faibles quantités de pluies de l'ordre de 300-400 mm. Les températures se distinguent par des variations jusqu'à -5°C en période hivernale et plus de 40°C en été. En hiver, les chutes de neige sont considérables et de nombreuses gelées s'étendant jusqu'au début du printemps. Le régime pluviométrique de la région est défini par une période sèche, (Juin à Octobre) et une période pluvieuse, (Octobre à Mai), caractérisée par des averses torrentielles de courte durée. (H. Kada, 2014).

I.5. Le couvert végétal

Le développement d'une bonne couverture végétale est déterminé par les conditions climatiques et pédologiques. L'aspect général de la région est typique de celui des hautes plaines Sétifiennes : paysages faiblement vallonnés, sans reliefs, en teintes généralement jaunâtres. La semi-aridité du climat est l'indice d'une région, pauvre en végétation, favorable à la culture céréalière, (Orge et blé), et au pâturage.

I.6. Le cadre socio-économique :

La plus grande partie de la population est concentrée au niveau de la ville de Ain- Azel avec une densité moyenne estimée à cinq habitants par Km². (L. Attoucheik, 2006).

L'agriculture constitue la principale ressource de la région, l'industrie quant à elle est représentée par les complexes miniers de plomb et de zinc de Kherzet- Youssef et de Chaabet el- Hamra. (L. Attoucheik, 2006).

I.7. La géologie de la zone d'étude :

I.7.1. La géologie régionale :

La région de Ain- Azel fait partie des zones externes du tronçon Nord-oriental de la chaîne des Maghrébides de l'Afrique du Nord. (M. Durand-Delga, 1969). Cette chaîne s'étend de Gibraltar jusqu'à la Sicile, sur plus de 2000Km (**Figure I.3**), a été approchée par de nombreux auteurs : M. Durand Delga. (1955), R. Guiraud. (1973), J. F. Raoult. (1974), J. P. Bouillin. (1977), J. M. Vila. (1980), W. Wildi. (1983), N. Kazi Tani. (1986), D. Bureau. (1986), J. C. Lahondère. (1987), P. E. Coiffait. (1992), M. Chadi. (2004), A. Domzig. (2006), etc.....

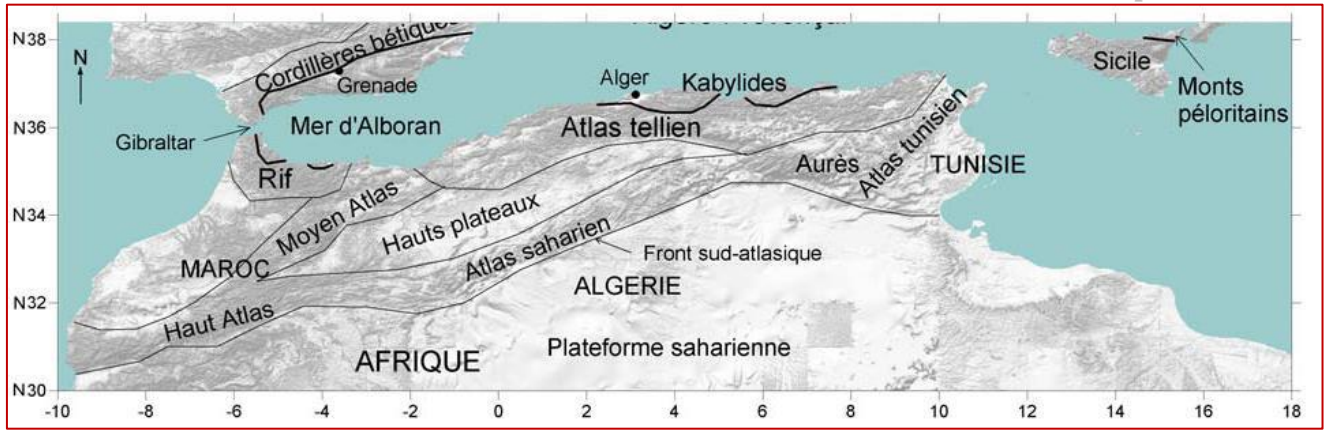


Figure I.3: Localisation des principales unités géologiques des Maghrébides. (A. Domzig, 2006).

La chaîne des Maghrébides résulte probablement de la convergence et de la collision d'un élément de la marge Sud européenne avec la marge Nord-africaine d'un bassin Téthysien Maghrébin qui faisait communiquer la Téthys avec l'Atlantique central. (W. Wildi, 1983).

Cette chaîne est généralement subdivisée en plusieurs domaines structuraux. (Figure I.4) et paléogéographiques bien distincts, qui sont actuellement en parties superposées.

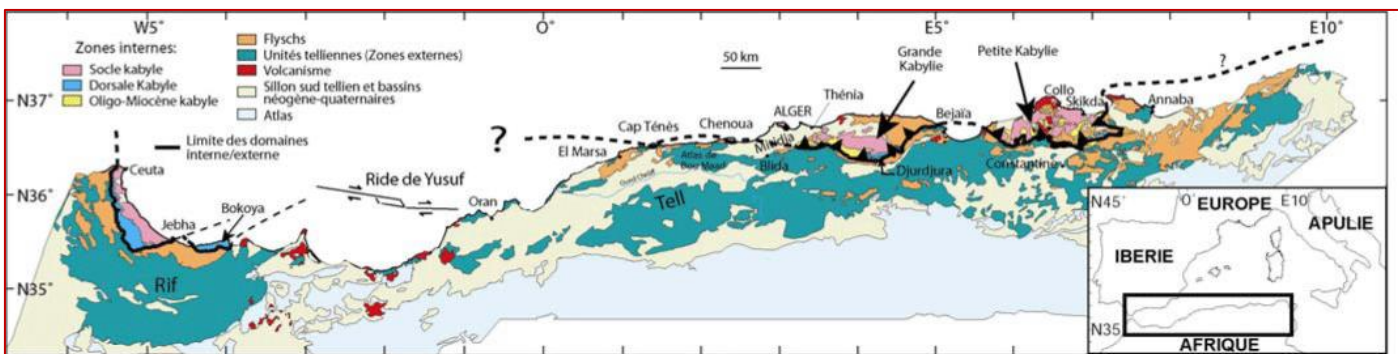


Figure I.4: Position des différentes unités géologiques des Maghrébides

(A. Domzig, 2006).

En Algérie, la chaîne des Maghrébides est structurée du Nord vers le Sud par : (Figure I.5 et I. 6) :

- 1- Domaine interne
- 2- Domaine intermédiaire
- 3- Domaine externe.

I.7.1.1 Domaine interne :

Ce domaine renferme le massif du Chénoua, (Tipaza), massif d'Alger, la grande Kabylie, (Djurdjura qui fait 60km de longueur allant de l'Est vers l'Ouest, et 20km pour sa largeur), Horst de Bou-Hatem, (près de Béjaïa), Petite Kabylie, (faisant 120km de longueur allant d'Est en Ouest, et 30km de largeur).

Il comprend le socle cristallophyllien, (socle kabyle) et une couverture sédimentaire qui constitue la chaîne calcaire appelée par la suite Dorsale Kabyle par [J. F. Raoult \(1974\)](#).

a. Socle kabyle :

Il est représenté par des formations cristallophylliennes. D'après [J. F. Raoult \(1974\)](#), [J. P. Bouillin. \(1977\)](#), [J. M. Vila. \(1980\)](#) et [W. Wildi. \(1983\)](#), on le rencontre dans les massifs littoraux de la grande et la petite Kabylie. Ce dernier, avec 120Km de long et 30Km de large, constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie. Il comporte les termes suivants :

- ❖ Un ensemble cristallophyllien inférieur, formé de gneiss à intercalations, parfois puissantes, de marbre et d'amphibolites.
- ❖ Un ensemble cristallophyllien supérieur comportant principalement des schistes satinés ou phyllades ayant subi un métamorphisme de basse pression avec une zone inférieure à biotite et une zone supérieure à chlorites. ([J. P. Bouillin, 1977](#)).
- ❖ Un ensemble essentiellement sédimentaire constituant la couverture Paléozoïque du socle cristallin. Les séries peu ou pas métamorphiques, comprennent des termes du Cambrien au Carbonifère. ([J. P. Bouillin, 1977](#)).

b. Dorsale Kabyle ou « chaîne calcaire » :

C'est un domaine étroit et discontinu qui constitue la couverture sédimentaire de la bordure méridionale du socle Kabyle, sa largeur ne dépasse jamais quelque Km, elle affleure au : Cap Ténès, Chénoua, Sud-Est d'Alger, (Bouzegza, Lakhdaria), sommet du Djurdjura, Nord de Constantine à Djbel Sidi-Driss et au Sud de Annaba, (Zit Emba).

En général, la dorsale kabyle est caractérisée par un style tectonique en écaille. Ces écailles comprennent également des formations paléozoïques ainsi que des terrains de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène.

La Dorsale Kabyle est subdivisée du Nord vers le Sud en trois unités plus ou moins individualisées et caractérisées par leur lithostratigraphie respective ([J. F. Raoult, 1974](#) ; [J. M. Vila, 1980](#)) :

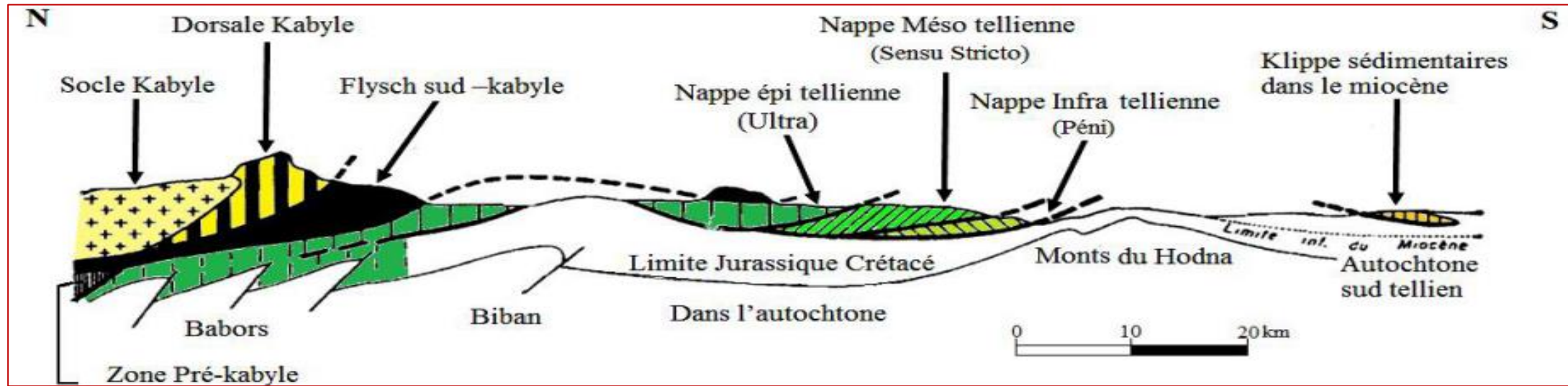


Figure I.5. Les différentes unités de la chaîne des Maghrébides. (D'après M. Durand Delga, 1969)

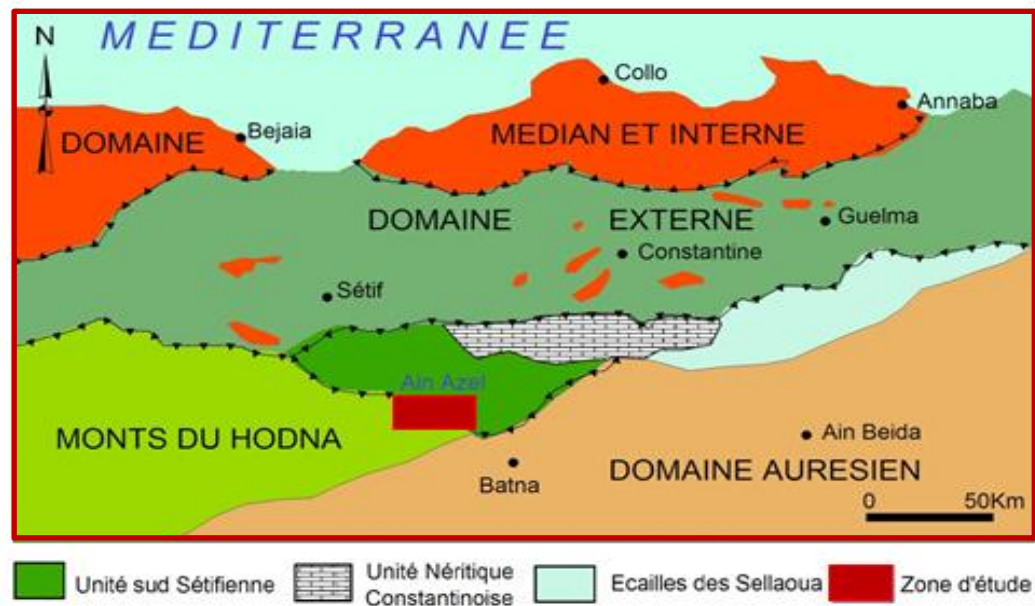


Figure I.6. Contexte structural du domaine d'étude. (D'après W. Wildi, 1983)

- ✿ La dorsale interne ;
- ✿ La dorsale médiane ;
- ✿ La dorsale externe.

Ces unités sont séparées par des limites correspondant à des accidents cisailants. (J. P. Bouillin, 1986).

En général, les faciès traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profondes lorsque l'on passe des formations de la dorsale interne (dépôts littoraux ou épicontinentaux), à celles de la dorsale médiane, (dépôts marneux et plus profonds du Crétacé à l'Eocène), puis aux formations de la dorsale externe, (qui montrent souvent des radiolarites au Dogger-Malm), (J. P. Bouillin, 1986).

b. 1. La dorsale interne :

Elle est très souvent condensée et montre nettement du Sud au Nord un amincissement de ses séries. Cette dorsale est caractérisée par une série transgressive sur le substratum paléozoïque. Elle débute par des microconglomérats du Permo-Trias, un Trias supérieur et un lias basal à calcaires néritiques et des calcaires du Néocomien, suivis par une lacune jusqu'au Sénonien supérieur. Puis vient un Paléocène – Yprésien caractéristique formé de calcaires du Nummulitique.

b. 2. La dorsale médiane :

C'est la plus développée de la dorsale kabyle. (J. Flandrin, 1948) et elle occupe une position centrale dans le dispositif structural du Djurdjura.

Elle est particulièrement déformée et limitée au Nord par les formations métamorphiques de Grande Kabylie et les terrains primaires de la dorsale interne par l'intermédiaire d'une zone tectonique importante. Au Sud, elle chevauche les formations de la dorsale externe.

Elle est aussi caractérisée par un Lias inférieur très développé et ne montre pas en général de différences avec celui de la dorsale interne.

b. 3. La dorsale externe :

Elle est chevauchée par les formations de la dorsale médiane. Elle se caractérise par une série détritique et lacuneuse avec un faciès intermédiaire entre la dorsale interne et médiane du Crétacé à l'Éocène.

On peut conclure qu'en général, les faciès traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profondes lorsque l'on passe des formations de la dorsale interne (dépôts littoraux ou épicontinentaux), à celles de la dorsale médiane, (dépôts marneux et plus profonds du Crétacé à l'Eocène), puis aux formations de la dorsale externe, (qui montrent souvent des radiolarites au Dogger-Malm). (J. P. Bouillin, 1986).

I.7.1.2. Le Domaine Des Flyschs

Domaine médian ou Domaine des flyschs, la zone des flyschs est caractérisée par la complexité structurale et la pauvreté en fossiles. Les flyschs sont des formations sédimentaires allochtones d'âge Crétacé à Éocène, ils sont classiquement subdivisés en trois groupes:

- ✿ Les flyschs de type « Guerrouch » (Tithonique- Crétacé inférieur), ou flyschs Maurétaniens.
- ✿ Les flyschs «schisto-quartzeux », (flyschs Albo-Aptiens de L. Glangeaud, 1932), ou flyschs Massyliens.
- ✿ Les flyschs Numidiens ou bien la nappe numidienne.

a. Le flysch Maurétanien :

D'après J. P. Bouillin (1977), le flysch Maurétanien montre dans ses séries médianes les plus typiques, de bas en haut:

- ✿ un complexe de base flyschoïde à petits bancs de micrites du Néocomien.
- ✿ un flysch argileux-gréseux, (dont les grès forment des bancs métriques), qui atteint l'Albien moyen.
- ✿ un Vracono- Cénomaniens- Turonien calcaire conglomératique ou micro conglomératique à bandes silicifiées blanches.
- ✿ Un Sénonien et un Paléocène -Eocène moyen argilo-conglomératiques, des niveaux bioclastiques à grands foraminifères de l'éocène au lutétien.

Localement des radiolarites sont connues à la base de cette série et rapportées au Malm.

b. Le flysch Massylien

Il a été défini par J. F. Raoult. (1969) au Nord du Kef Sidi- Driss, dans le Nord constantinois et comporte de bas en haut les termes suivants :

- ✿ Des calcaires sableux et des argiles du Néocomien.

- ✿ Un flysch pélito-quartzitique où dominant les couleurs vertes : c'est un flysch « Albo – Aptien ». Il est surmonté par des calcaires fins jaunâtres du Vraconien épais de quelques mètres.
- ✿ Des phtanites noires et blanches d'âge Cénomaniens. (J. F. Raoult, 1974).
- ✿ Un ensemble flyschoides marno- microbréchiqes du Sénonien.

Tous les critères sédimentologiques montrent que les formations massyliennes se sont déposées dans une zone profonde et sans doute à substratum océanique. (J. P. Bouillin, 1986). Le flysch massylien d'origine plus méridionale surmonte très généralement le flysch Maurétanien.

c. Le flysch Numidien

Ce terme a été proposé par E. Ficheur. (1890) pour désigner la trilogie suivante :

- ✿ Des argiles varicolores à Tubotomaculum, (Oligocène supérieur) dites : argiles sous-numidiennes.
- ✿ Des bancs de grés épais à grains hétérogènes.
- ✿ Des argiles, marnes et silexites appelées : supra-numidiennes.

La nappe numidienne dont les sédiments sont postérieurs à la tectonique tangentielle finioécène, forme un étage supérieur nettement moins tectonisé et recouvre indifféremment toutes les unités. Elle s'est désolidarisée de son substratum et se trouve dans une position structurale élevée. (J. M. Vila, 1980).

I.7.1.3. Domaine externe : (le Tell)

Il est constitué par des formations allochtones sous forme des nappes complexes à matériels marneux et calcaireux d'âge Méso- Cénozoïque, charriées largement sur un para-autochtone représenté par les calcaires jurassiques, situé au Sud des flyschs.

Ce domaine est représenté par les séries telliennes, les séries de l'avant pays.

a. Les séries telliennes ou nappes telliennes

Il s'agit des séries épaisses à dominante marneuse qui seraient issues du sillon Tellien. (J. M. Vila, 1980), après avoir mis en évidence des séries telliennes très méridionales, J. M. Vila les a subdivisées en trois grandes unités: Les unités ultra telliennes, les unités telliennes sensu stricto, les séries péni- telliennes et unités méridionales à Nummulites, dont les limites suivent à peu près les lignes paléogéographiques du Crétacé, du Paléocène et de l'Éocène.

a. 1. Les unités ultra- telliennes

Le terme ultra tellien a été proposé par [M. Durand Delga en 1969](#) pour désigner dans la région de Guelma les séries superposées anormalement au Crétacé néritique constantinois des Djebels Debar. ([J. M. Vila, 1969](#)). Elles ont été définies au Kef Sidi- Driss. ([J. F. Raoult, 1966](#)) et au Djebel Bousbaa dans la région de Guelma. ([J. M. Vila, 1969](#)). Les formations typiques comportent un Crétacé inférieur marneux et des calcaires clairs à Ammonites (Valanginien à Vraconien), un Crétacé moyen de même nature à Rotalipores, un Sénonien marneux et micritique riche en microfaunes de Globotruncana. L'Eocène comporte trois termes :

- ✿ Marnes sombres à boules jaunes d'âge Dano-Paléogène.
- ✿ Calcaire à silex noir et cassure grise, d'âge Yprésien- Lutétien inférieur.
- ✿ Marnes sombres d'âge Lutétien supérieur.

Les unités ultra- telliennes forment un ensemble particulièrement homogène, limité à l'Ouest par le témoin du Djebel Mégriss, ses séries se prolongent par contre largement en Tunisie avec les séries de Ain- Draham définie par [H. Rouvier. \(1977\)](#). Elles constituent les séries suivantes : la série de Medjez Sfa , la série d'Oulbane, la série de Mechta El Grar, les affleurements de la région d'Oued Zenati, entre Constantine et El Aria, les affleurements de Djebel Mégriss au Nord de Sétif, la série de Djebel Safia et la couverture mésozoïque de Djebel l'Edough.

a. 2. Les séries telliennes Sensu Stricto (Centralo-Telliennes)

Elles Correspondent à la définition de [L. Glangeaud \(1932\)](#) en deux restrictions simples :

- ✿ Absence des caractères définissant les séries ultra telliennes, Crétacé inférieur clair strictement marneux ou micritique à Ammonites, Crétacé moyen et supérieur analogues, respectivement à Rotalipores, et à Globotruncana.
- ✿ Absence d'intercalation néritique à caractère prépondérant quelle que soit l'époque considérée, du Crétacé inférieur au Lutétien supérieur.

Elles ont été définies par ([J. M. Vila, 1980](#)) et représentant l'équivalent de la série méso-tellienne dans la nomenclature de ([M. Durand Delga, 1969](#)). Ces unités se caractérisent par un Crétacé inférieur riche en sédiments terrigènes où les intercalations des faciès néritiques restent modérées du Crétacé supérieur à l'Oligocène. Les séries telliennes peuvent être rassemblées, du Nord au Sud, en:

- ✿ Les nappes Baboriennes. (D. Obert, 1981) ;
- ✿ Les unités Bibaniques. (A. Caire, 1957 ; M. Leikine, 1971) ;
- ✿ Les nappes de Djemila, béni Abdallah, Barbacha, Drâa el Arba.
- ✿ Les unités Gouraya, Arbalou, Brek.
- ✿ Les nappes Sétifiennes à matériel Éocène. (M. Leikine, 1971 ; D. Obert, 1981).

a. 3. Les séries péni- telliennes

D'après J. M. Vila. (1980), le terme péni-tellien a été créé pour désigner une série allochtone du versant Nord du Djebel Zouaoui dans le massif de Chettaba, au Sud-Ouest de Constantine. Il s'agit des formations constituant d'Ouest en Est les reliefs suivants : les Djebels Hellel, El Halfa, Boucharef, Ouaskissène, le massif d'Ahmed Rachedi, Djebel Lakhal, le Nord du Djebel Khenag, l'Est du Djebel Grouz, le versant Nord de Djebel Zouaoui et l'ensemble de Djebel Karkra-Chettaba. Elles s'étalent sur une étendue de 150km d'Est à l'Ouest et de 40km du Nord au Sud. (J. M. Vila, 1977 ; S. Guellal et al, 1978).

Les séries péni- telliennes sont caractérisées par des formations Jurassiques carbonatées intermédiaires ; le Lias et le Dogger analogue respectivement à ce qui est connu dans les Babors et les séries de Debar, le Malm débute par des carbonates massifs comme dans les séries néritiques, Sétifiennes ou constantinoise.

Selon (J. M. Vila ,1980), le Crétacé inférieur est pélito-marneux avec de rares intercalations gréseuses fines, ainsi que des niveaux de pélites discordants et des niveaux conglomératiques intra-formationnels qui se poursuivent jusqu'à l'Albien élevé, une barre de calcaire avec ses faciès bio-détritiques indiquant la limite Albo-Cénomaniens. Le Crétacé supérieur montre une série composée d'alternance de marnes à rotalipores et de calcaires bio micritiques du Cénomaniens, à intercalations de niveaux de silex du Turonien. Le Sénonien est représenté par un faciès marneux et marno-calcaire avec des niveaux conglomératiques du Campanien. Les séries péni-telliennes ne dépassent pas le Maestrichien moyen. Elles apparaissent de deux façons différentes :

- ✿ Au Nord : en fenêtre sous les nappes telliennes, comme au Djebel Hellel, Djebel Bou- cheref et Ouaskissène, massif d'Ahmed Rachedi et au Djebel El Akhal.
- ✿ Au Sud et à l'Est : en klippe sur les massifs néritiques constantinois, cas du Djebel Grouz, Djebel Khenag et Djebel Chettaba.

b. Domaine de l'avant- pays

Les séries de l'avant-pays ont été abordées par de nombreux auteurs : A. Péron. (1883), E. Ficheur. (1893), J. Savornin. (1920), R. Lafitte. (1939), J. Bertraneu. (1955), R. Guiraud. (1973), J. M. Vila. (1977,1980), D. Aissaoui. (1984), N. Kazi Tani. (1986), D. Bureau. (1986), J. C. Lahondère. (1987), M. Chadi. (1991), F. E. Coiffait. (1992), R. Marmi. (1995), etc.... Il correspond aux formations calcaires et marneuses de la plate- forme néritique et du domaine atlasique. Il comporte l'avant- pays allochtone et l'avant- pays autochtone. (J. M. Vila, 1980).

b. 1. L'avant pays -allochtone

Les séries de l'avant pays allochtone ont été regroupées. (J. M. Vila ,1980) en deux grandes familles :

b.1.1. Une organisation Sétifiennne.

b.1.2. Une organisation Constantinoise.

b.1.1. L'organisation Sétifiennne

Elle est considérée comme terrains autochtones à parautochtones depuis les travaux de A. Péron (1883), J. Savornin. (1920), J. Glaçon. (1967) et M. Durand Delga. (1969). Cependant, R. Guiraud. (1973), les associe à celles du Môle néritique constantinois. À l'exception des Djebels de Guergour et de Anini qui apparaissent en fenêtre sous la nappe de Djemila, les formations allochtones Sud Sétifiennes, (au sens de J. M. Vila, 1980), présentent une grande homogénéité de caractères et constituent un vaste domaine d'écailles, développées entre Ain- Taghrouit à l'Ouest et Ain- M'lila à l'Est. Elles forment d'Ouest en Est et du Nord au Sud des alignements de reliefs de Koudiat Della, des Djebels Zdim, Youssef, Braou et Tnoutit, un peu plus au Sud les Djebels Sekrine, Kalaoun, Tella et Tafourer à la bordure Nord du mont du Hodna , Agmérrouel, Zana ,Hammam ,Messaouda, Mestaoua ,Azraouat, Tizourirt-Guedmane, et Hamouda au Nord du mont du Belezma. Elle comporte des séries argilo-marneuses, dolomitiques, calcaro-dolomitiques, de calcaires massifs et marneux dont l'âge va du Lias à l'Eocène. La limite Jurassique-Crétacé est marquée par un Hard-ground à encroutements ferrugineux. Les massifs de cette organisation présentent :

❖ Au Sud, ils recouvrent anormalement les plis emboutis de l'autochtone.

- ❖ Dans les Hautes Plaines Sétifiennes, ils présentent des accidents tangentiels internes jalonnés de Trias ; ce sont les écailles sétifiennes. (J. Savornin, 1920).
- ❖ Au Nord, les Djebels Guergour et Anini qui apparaissent en fenêtre sous la nappe de Djemila. (J. M. Vila et M. Leikine, 1976).
- ❖ À l'Est, les séries Sétifiennes s'intercalent entre l'unité néritique constantinoise et les écailles atlastiques des Sellaoua. (W. Wildi, 1983).

b.1.2. L'organisation Constantinoise

Les séries de l'avant-pays allochtone constantinois présentent une différenciation remarquable avec au Nord, les séries néritiques constantinoises et au Sud, les séries de type Sellaoua.

a. Le môle néritique constantinois

Ce sont des formations carbonatées du Mésozoïque. (J. M. Vila, 1980). Il correspond à des reliefs calcaires caractérisés par la tectonique cassante et des plissements à grand rayon de courbure lors des phases tectoniques alpines. Ces derniers constituent l'essentiel des massifs de Tadjenanet, d'Oued- Athménia, de Constantine, de Aïn- M'lila, d'Hammam- Meskhoutine et de Guelma.

b. Le sillon écaillé de Sellaoua

Il est représenté par des formations allochtones à sédimentation argilo-marneuse et marno-calcaire allant du Valanginien à la fin du Maestrichtien. Les plissements datent de l'Éocène supérieur, les écaillages et les chevauchements du Tortonien.

M. Chadi. (1991), propose un modèle pour l'organisation constantinoise dans lequel les épaisses séries marneuses du Crétacé supérieur-Éocène des Sellaoua représenteraient la couverture stratigraphique normale de la plate-forme constantinoise (Figure I.7).

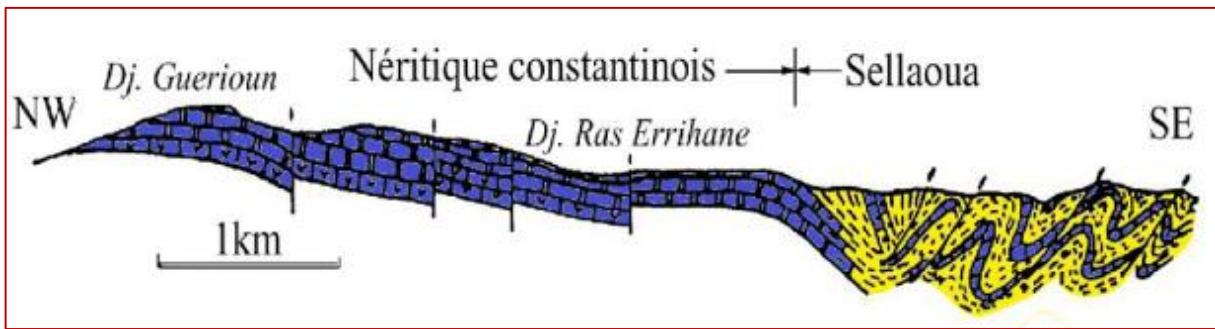


Figure I.7. Coupe géologique schématique expliquant les relations structurales et sédimentaires entre le Néritique et les Sellaoua. (M. Chadi et al, 1999 ; in : A. Mezerzi, 2015).

b. 2. Le domaine de l'avant- pays para-autochtone et autochtone

Les séries de l'avant- pays atlasique sont représentées d'Ouest vers l'Est par les formations parautochtones et autochtones des monts du Hodna, du Belezma et de Batna, le massif de l'Aurés, les Hautes Plaines d'Oum –El- Bouaghi et d'Ain- Beida et la vaste zone des diapirs. (J. M. Vila, 1980). L'avant pays se distingue par des séries sédimentaires mésozoïques très homogènes plissées et très épaisses de plateforme subsidente, à intercalations gréseuses, entre le Berriasien et l'Albien (R. Guiraud, 1973; G. Busson, 1974; L. Delfaud, 1974; J. M. Vila, 1980).

b. 2.1. Le parautochtone et l'autochtone Hodnéens

Les formations parautochtones sont représentées par la série renversée du col de Tifelouine et les terrains du compartiment Nord des failles inverses d'El Bahira (Sud de Salah- Bey), Djebel Hadjar- Labiod, Ain- Azel, et Djebel Gouzi.

Les formations autochtones des monts du Hodna correspondent à un domaine plissé où se développent une série de petits massifs qui s'étendent sur une centaine de kilomètres, d'Ouest en Est ; on distingue: Les massifs de Maadid, des Ouled-- Tebben, de Hadjar Labiod, du Boutaleb, du Guetiane, du Fourhal et du Talkhempt. (**Figure I.8**) (A. Boutaleb, 2001). Les séries mésozoïques et tertiaires autochtones des Monts du Hodna constituent la plus grande portion de la transversale Sétifienne. Elles forment une bande allongée d'Ouest en Est depuis le massif des Maadid jusqu'au Talkhempt. (A. Boutaleb, 2001).

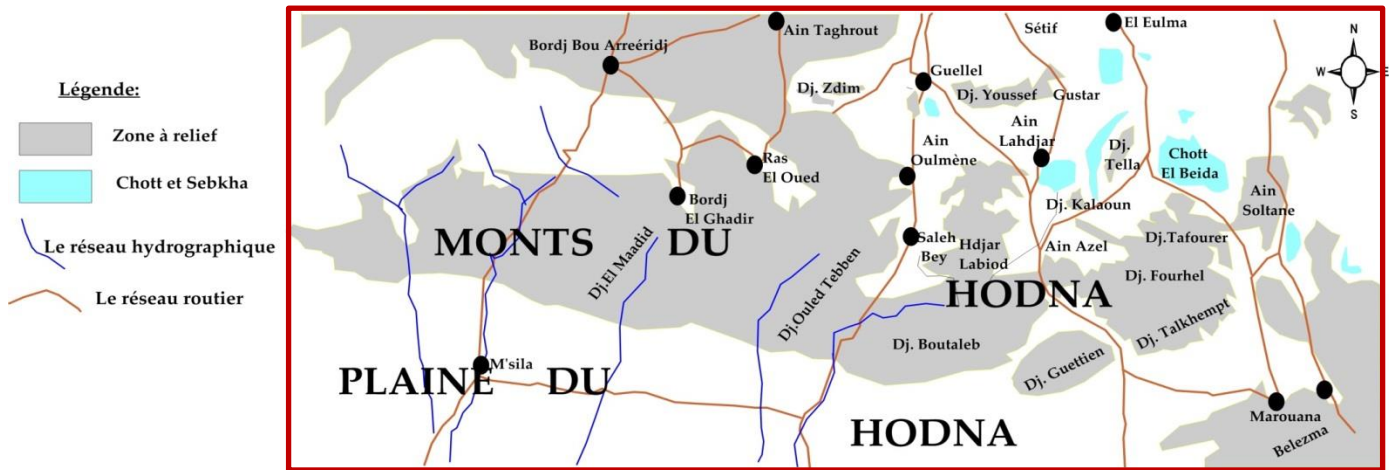


Figure I.8. Les principaux massifs des Monts du Hodna. (A. Khaldi, 1987).

Tout l'ensemble porte le nom de Monts du Hodna. Ils constituent une sorte de barrière qui sépare les plaines Sétifiennes de la dépression récente et profonde du Hodna. Ils sont formés par des roches carbonatées du Crétacé inférieur et supérieur, (calcaires, marno-calcaires et dolomies) et constituent le début de l'Atlas saharien qui développe ses grandes structures plissées et faillées jusqu'aux portes du désert. (A. Boutaleb, 2001).

b. 2.2. Les monts de Belezma

Les monts du Belezma ou monts de Batna forment deux grands ensembles : un ensemble parautochtone, représenté par les écailles du Djebel Metrassi et la série renversée d'El Guelaâ, et un ensemble autochtone dont font partie les chaînons des Djebel Bou Ari, Bou Rhioul, Refaâ, le Ravin bleu ... (A. Boutaleb, 2001).

Les Aurès constituent l'autochtone le plus méridional sur ce tronçon de la chaîne tellienne d'Algérie nord-orientale. Il appartient à l'Atlas saharien, limité au sud par « la flexure sud atlasique » ou l'Accident sud atlasique qui le sépare de la Plateforme Saharienne au Sud. L'Aurès comprend un ensemble de monts qui forment avec les Nemenchas le prolongement oriental de l'Atlas Saharien. (A. Boutaleb, 2001).

b. 2.3. Les Monts de l'Aurès

Les Aurès constituent l'autochtone le plus méridional sur ce tronçon de la chaîne tellienne d'Algérie nord-orientale. Ils appartiennent à l'Atlas Saharien, limités au Sud par « la flexure sud atlasique » ou l'accident sud atlasique qui le sépare de la plate-forme saharienne au Sud. La structure de ces massifs est bien connue depuis les travaux de (R. Lafitte, 1939).

Elle est représentée par des vastes plis plus au moins réguliers orientés Nord-Est et Sud-Ouest, esquissés lors d'une phase tectonique post- Lutétienne ayant abouti à l'émersion de ce relief.

I.7.2. Les phases tectoniques

La période préTECTOGÉNIQUE a commencé dès le Trias, la chaîne alpine d'Algérie s'est surtout structurée au cours des phases tectoniques tertiaires. La structuration du bassin maghrébin est héritée d'une structuration ancienne. (R. Guiraud, 1973), il s'agit d'un ancien accident fracturé profond coïncidant actuellement avec la flexure sud atlasique qui sépare la plateforme saharienne stable des domaines de l'avant pays de la chaîne des Maghrébides. (R. Guiraud, 1973 ; D. Bureau, 1984 et 1986).

I.7.2. 1. Les phases tectoniques mésozoïques

Depuis les anciens travaux jusqu'à nos jours, les auteurs confirment que le Trias correspond à une période de distension généralisée, accompagnée d'un volcanisme basique contemporain à une sédimentation argilo-gypseuse dominante. (D. Bureau, 1970 ; R. Guiraud, 1973 ; D. Aissaoui, 1984). Durant le Jurassique inférieur une subsidence différentielle provoquée par la distension et qui continue jusqu'à la fin du Crétacé inférieur marquée par une direction générale des structures E-W, caractéristique des bassins maghrébins. (P. Deleau, 1938 ; G. Durozoy, 1960 ; C. Voûte, 1967).

Selon plusieurs auteurs, (M. Durand Delga, 1955 ; R. Guiraud, 1973 ; D. Obert, 1974, M. Leikine et B. Velde, 1974), deux phases tectoniques sont localisées au passage Jurassique –Crétacé et au Crétacé supérieur.

a. La phase du Jurassique supérieur

Elle est particulièrement marquée dans les Babors (M. Durand Delga, 1955 et D. Obert, 1981) et dans l'Atlas Saharien. (N. Kazi Tani, 1970 et 1986). Cette phase tectonique est attestée par des discordances angulaires qui marquent la base du Crétacé inférieur (E. Ficheur, 1893 ; J. Savornin, 1904 ; M. Durand Delga, 1955).

b. La phase anté- Sénonienne

C'est une phase de compression associée à des plis E-W. (M. Durand Delga, 1955 ; P. Deleau, 1938). Dans l'avant- pays autochtone, la tectonique anté- sénonienne est connue depuis les travaux de J. Bertraneu. (1952) dans le massif du Boutaleb et dans la

région du Hodna. Ultérieurement et dans le même secteur, R. Guiraud. (1990), montre que cette phase est caractérisée par une compression NNW-SSE à sub- méridienne, et d'après lui, il s'agit en général de bombements accompagnés parfois de cassures orientées au NW au NE ou à l'ENE (Boutaleb, Khenchela). Certaines cassures ont permis à des pointements triasiques de la mise en surface, comme le cas d'Annoual dans le Boutaleb. Les structures issues de cette phase, sont souvent déversées vers le Sud, et sont liées à des discordances, des lacunes et des intercalations détritiques comme le cas de l'ensemble des massifs constantinois, (lacune régionale du Turonien supérieur et Sénonien inférieur), décrit par G. Durozoy. (1960).

I.7.2. 2. Les phases tectoniques tertiaires

a. La phase fini-Lutétienne, (l'Éocène)

Cette phase compressive se situe vers la fin du Lutétien, c'est la phase atlasique. (R. Guiraud, 1973), fini-Lutétienne (M. Durand Delga, 1955 et al), priabonienne. (J.M. Vila, 1980). Elle marque la fin d'un grand cycle sédimentaire. (Y. Aris ,1994). Cette phase aurait structuré la chaîne calcaire, les flyschs et les séries telliennes en lames ou en plis couchés à vergence Sud (**Figure I.9**). Dans le domaine autochtone externe, elle est manifestement la plus évidente, elle montre une direction de raccourcissement NW-SE. (J. M. Vila, 1980).

b. Les phases du Miocène

En Algérie du Nord, il existe deux phases tectoniques compressives durant cet épisode : une phase se situant au Miocène inférieur et une phase attribuée au Miocène supérieur (Tortonien).

b. 1. La phase Miocène inférieur

Cette phase est caractérisée par une déformation compressive générale qui s'est manifestée au Burdigalien à travers tout le Nord-Ouest de la marge de la plaque africaine (R. Guiraud et al. 2005). La partie occidentale de la plaque d'Alboran continue sa migration vers l'Ouest, pour entrer finalement en collision avec la marge rifaine de l'Afrique. Cette migration contribue à l'ouverture du bassin Nord Algérien. (W. Wildi, 1983). Elle est responsable des déformations suivantes :

- ❖ La mise en place des complexes volcano-plutoniques. (J. P. Bouillin, 1977).
- ❖ Des structures plissées, au sud du domaine kabyle. (J. M. Vila, 1980).
- ❖ Le bombement de l'aplomb de la Kabylie méridionale. (J. M. Vila, 1980).

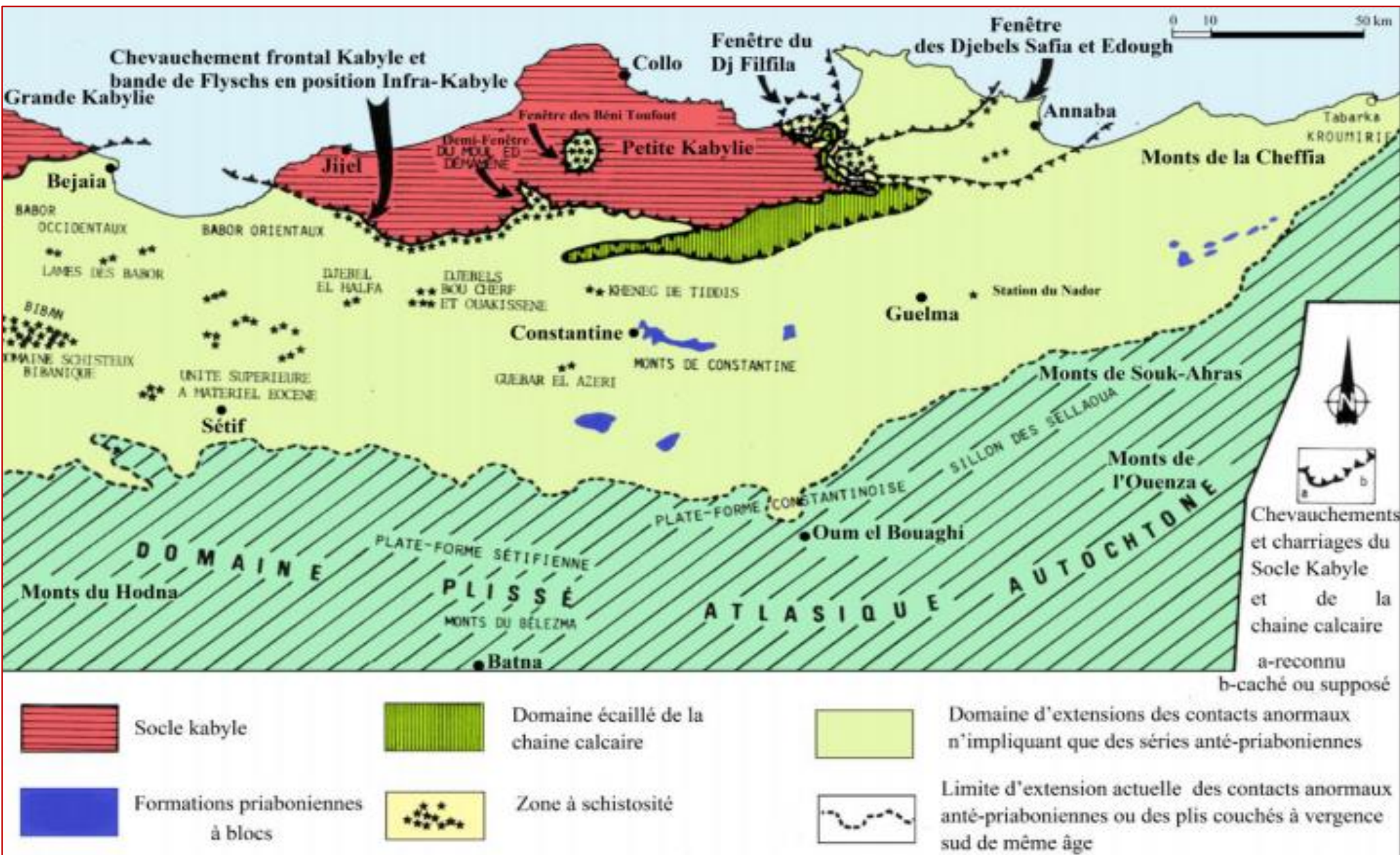


Figure I.9. Localisation des structures et des formations imputables à la tectonique priabonienne (J. M. Vila, 1980)
In A. Mezarzi, 2015

b. 2. La phase alpine tangentielle Tortonienne

Pour [J. M. Vila \(1980\)](#), c'est la phase majeure Tortonienne à vergence sud qui est responsable des vastes recouvrements anormaux impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur dont la nappe numidienne. Elle serait responsable des grands chevauchements vers le Sud des unités méridionales à nummulites, des unités Sud-Sétifiennes et des écailles de Sellaoua, ainsi que des plissements à axes E-W et la genèse des plis emboutis dans les monts du Hodna. Selon le même auteur, cette phase est responsable de la genèse de la nappe néritique constantinoise, des unités allochtones des Sellaoua, de l'ensemble Sud-Sétifien et des unités méridionales à nummulites.

❖ I.7.2. 3. La tectonique récente

Cette phase tectonique post-nappes est responsable de l'orographie actuelle. C'est la Phase post- Pontienne et post- Pliocène, (néotectonique). Elle a induit le comblement des bassins Mio-Pliocènes, alimentés par la destruction des reliefs environnants. La tectonique récente, (**Figure I.10**) est marquée par des déformations plicatives qui sont essentiellement localisées dans les confins Algéro-Tunisiens et les monts de Souk- Ahras, la déformation des dépôts villafranchiens et par l'effet des grandes failles verticales. Selon [R. Guiraud. \(1990\)](#), cette phase est responsable de la mise en surface de certains pointements triasiques.

Dans le constantinois, [J. M. Vila. \(1980\)](#) et [P. E. Coiffait. \(1992\)](#), considèrent que les formations liées à la tectonique récente sont représentées par des failles normales, de directions variables, en bordure des massifs calcaires Jurassico-Crétacé.

I.8. La géologie locale :

I.8. 1. La stratigraphie des Monts du Hodna

La zone d'étude couvre deux domaines paléogéographiques, qui sont : le domaine de la plate-forme Sétifienne au Nord et le domaine Hodnéen au Sud qui occupe méridionalement la région de Sétif. (**Figure.I.11**).

D'après de nombreux auteurs. ([J. Savornin, 1920](#); [J. Glaçon, 1967](#); [R. Guiraud, 1973](#); [J. M. Vila, 1980](#)), deux ensembles sont à distinguer :

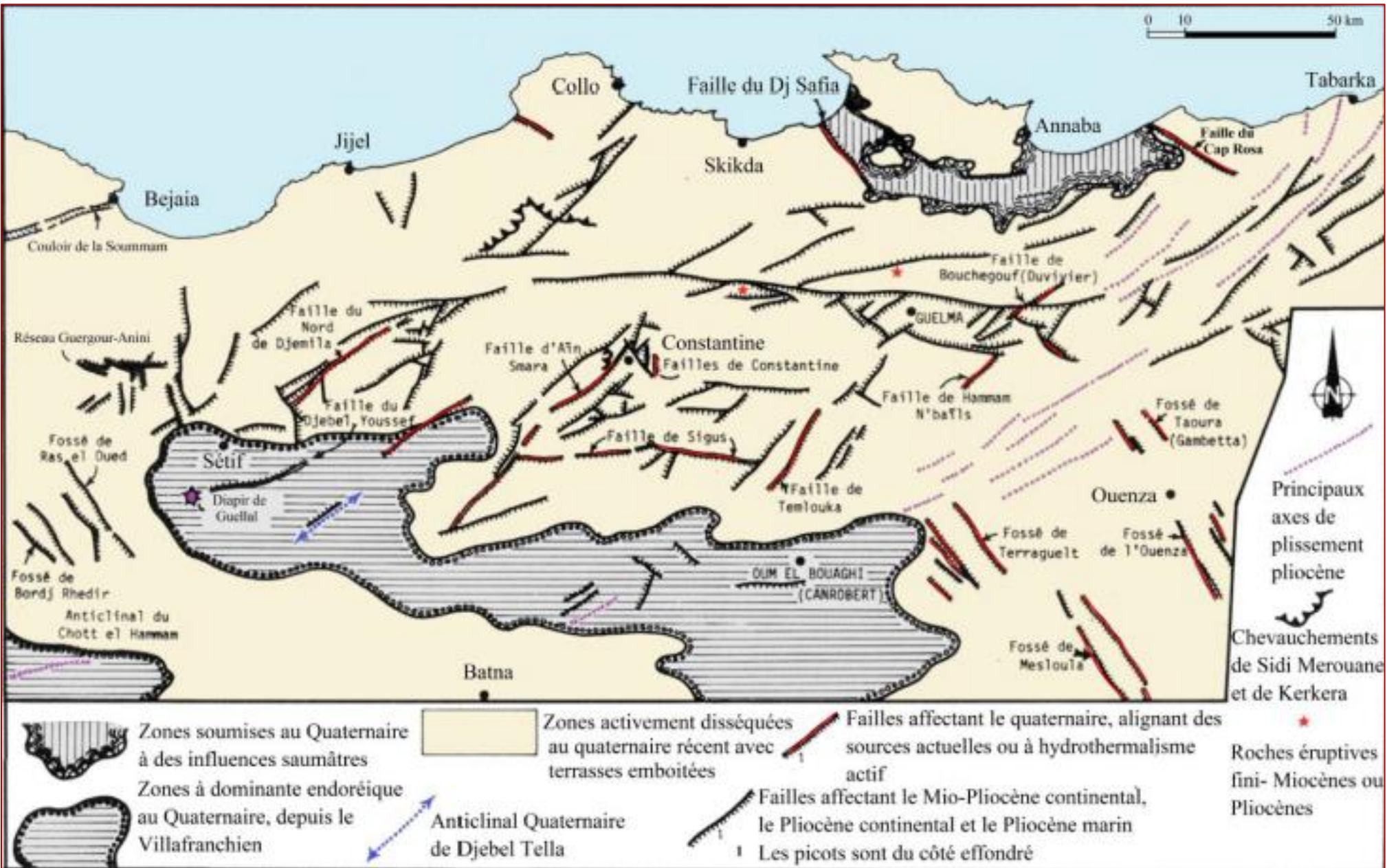


Figure I.10. Représentation schématique des principaux effets de la néotectonique. (J. M. Vila, 1980)
(In Mezarzi, 2015)

- ❑ Au Sud, l'autochtone essentiellement carbonaté, d'âge Jurassique et Crétacé, représenté dans la partie des monts du Hodna par les Djebel Boutaleb et Fourhal d'allongement ENE-WSW.
- ❑ Au Nord, le domaine des nappes de charriage avec l'ensemble allochtone Sud Sétifien représenté du Sud au Nord par l'unité inférieure de Djebel Kalaoun et l'écaille de Djebel Sekrine.

Les terrains et les structures entourant la zone d'étude (**Figure.I.11**) sont résumés par plusieurs auteurs tels que : [J. Glaçon. \(1967\)](#) ; [R. Guiraud. \(1973\)](#) ; [J. M. Vila. \(1980\)](#).

I.8. 1.1. Les terrains triasiques

Les affleurements triasiques de la région d'étude ont été décrits par plusieurs auteurs : [J. Savornin. \(1920\)](#), [J. Bertraneu. \(1955\)](#), [J. Glaçon. \(1967\)](#), [J. M. Vila. \(1980\)](#), [R. Guiraud. \(1990\)](#), [A. Boutaleb. \(2001\)](#), [A. Mezerzi. \(2015\)](#), etc.... Ils correspondent aux formations les plus anciennes connues à l'affleurement dans la région d'étude, Ils n'affleurent jamais en position stratigraphique normale, sous les assises liasiques, mais, au contraire, ils se présentent en pointements diapiriques et en lames injectées le long des accidents tectoniques, sans aucune stratification. Le complexe triasique est constitué essentiellement d'argilites bariolées et gypse. Il s'agit surtout d'argillites bigarrées, d'évaporites, de roches carbonatées, (calcaro-dolomitiques, des cargneules, des grés et marnes bariolées), et des roches vertes.

Le Trias affleure en plusieurs endroits ; au Nord de Ain- Azel (Koudiat -el -Bassour), au Nord-Est de Salah- Bey, (El Maafer), au front de l'allochtone sud Sétifien (Draa- el- Djebbas), au Sud-Ouest de Salah- Bey (El- Bahira), dans le massif du Boutaleb (Annoual, Bouich et El- Hamma), et au Sud-Est de Ain- Azel le long de l'axe anticlinal Gouzi-Debba (diapir d'El Gouzi).

I.8. 1.2. Ensemble parautochtone et autochtone Hodnéen

Les différents ensembles lithostratigraphiques représentés dans les monts du Hodna, (**Figure. I. 12**), sont résumés d'après les auteurs suivants : [J. Savornin. \(1920\)](#), [J. Glaçon. \(1967\)](#), [R. Guiraud. \(1990\)](#), [J. M. Vila. \(1980\)](#), [A. Boutaleb. \(2001\)](#). Les formations de cet ensemble comportent des termes allant du Jurassique jusqu'au Miocène.

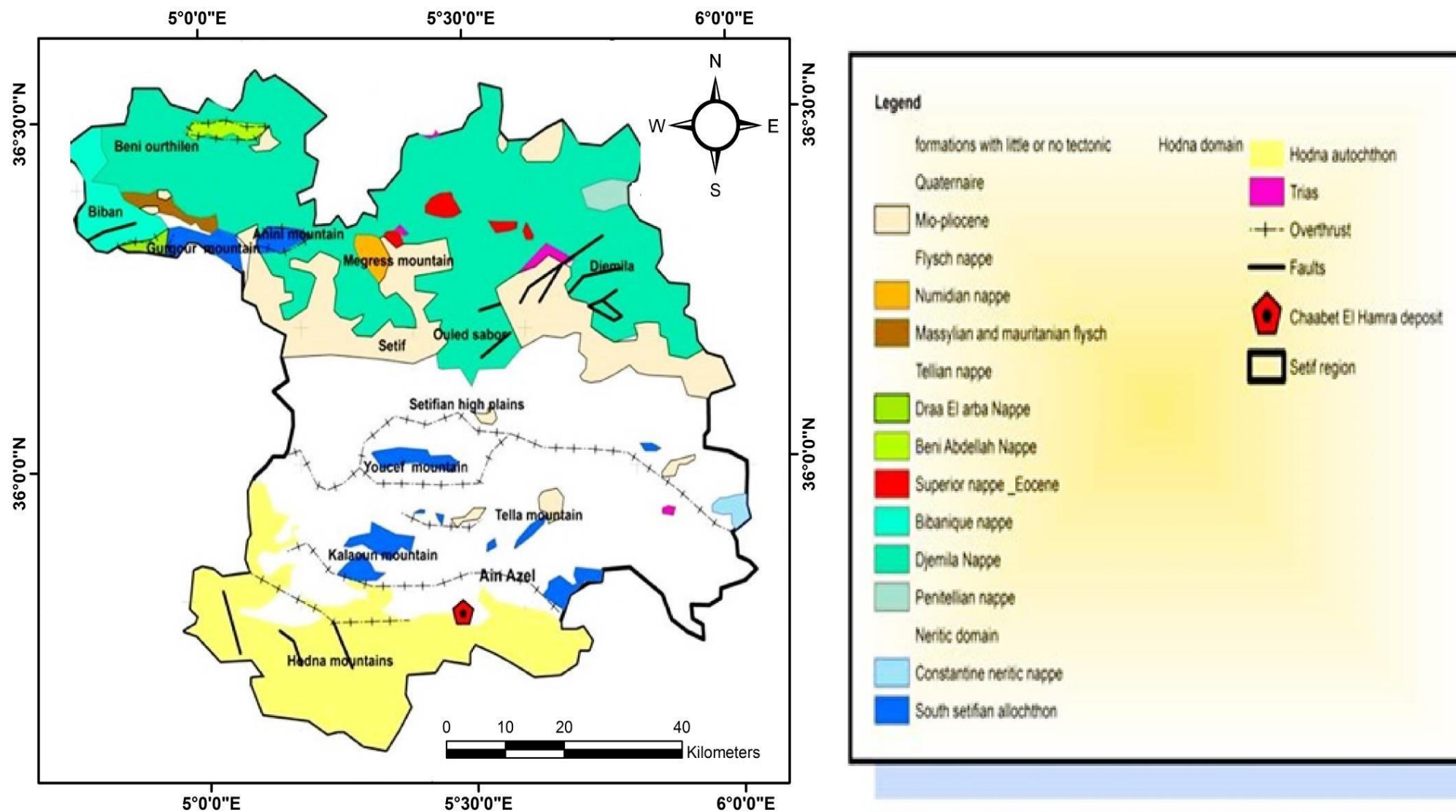


Figure I.11. Schéma structural de la région de Sétif montrant le cadre de la géologie régionale de la zone d'étude. (J. M. Vila, 1980)

❖ **Le Jurassique** : Les affleurements Jurassiques recouvrent des surfaces considérables et sont surtout développés à l'Est de Ain- Azel. Ils sont essentiellement calcaro-dolomitiques et représentés par les étages suivants :

- **Le Lias** : il est essentiellement calcaro-dolomitique en bancs massifs, mal lités à algues. Au sommet, il devient plus fossilifère avec quelques niveaux de calcaires à silex et des dolomies à nodules siliceux. Cette série affleure sur une centaine de mètres d'épaisseur, il s'agit de Lias moyen à inférieur à Toarcien.
- **Lias supérieur (Toarcien)**: le lias supérieur est représenté par des faciès marneux à ammonites, ce sont des marnes jaunâtres grisâtres et blanchâtres avec plaquettes calcaires et des marno-calcaires. Le toarcien ne dépasse pas une vingtaine de mètres.
- **Le Dogger** : il est représenté par des calcaires noduleux rouges et des marnes à ammonites. Ce sont d'abord une centaine de mètres de calcaires argileux, surmontée par 40 mètres de couches marneuses, puis 50 mètres de dolomies et enfin la série se termine par 40 mètres de formations marneuses à nombreuses intercalations de calcaires à Bélemnites. L'épaisseur de l'ensemble varie de 200 à 300 mètres.

❖ **Les formations crétacées**

Le Crétacé affleure largement dans les monts du Hodna et constitue la couverture normale des noyaux jurassiques, il est représenté par les termes suivants:

- **Berriasien Sup-Valanginien inf.** : cette formation est constituée essentiellement par des calcaires marneux extrêmement fins, d'âge attribué au berriasien supérieur à Valanginien inférieur grâce aux ammonites pyrriteuses. Le sommet s'enrichit en éléments détritiques.
- **Le Valanginien** : il est essentiellement marneux et à marnes silteuses gris-verdâtres à rares intercalations de calcaires à la base, pour devenir gréseux en bancs épais vers le sommet.
- **L'Hauterivien** : il est essentiellement dolomitico-gréseux et se caractérise par l'apparition de calcaires dolomitiques. Il comprend des dolomies massives et rouges, alternant avec des grès, des dolomies gréseuses plus ou moins quartzitiques et quelques niveaux argilo-marneux. Les dolomies sont souvent minéralisées en Pb-Zn-Fe (Menes, Chaabat el Hamra, Kherzet Youcef et Kef Aoumar). La série néocomienne peut atteindre 1000 mètres d'épaisseur.

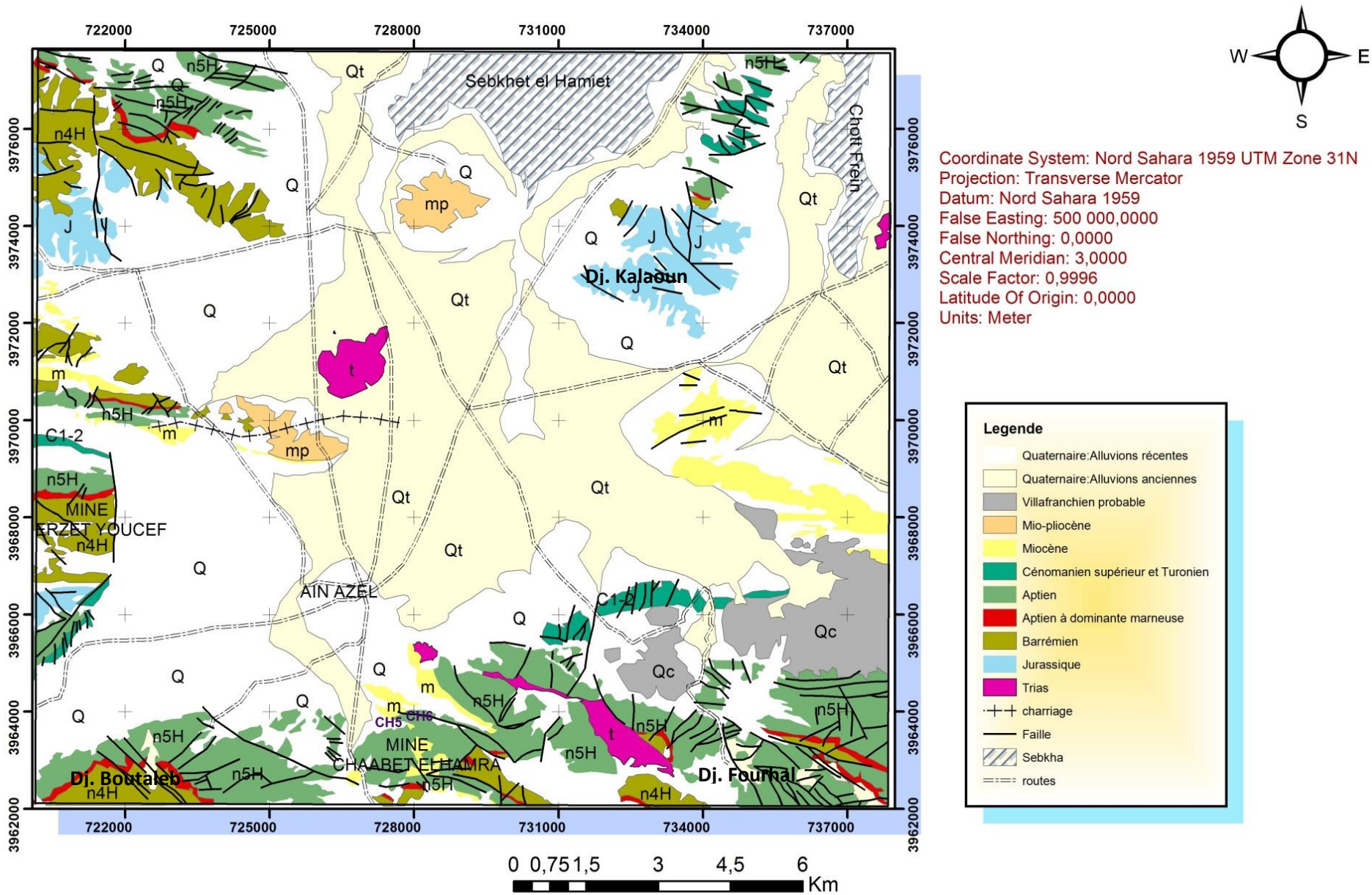


Figure I.12. Carte géologique de la région d'étude, extrait de la carte géologique de Ain -Azal et Ain- Lahdjar, 1/50000

(J. M. Vila, 1980, modifiée).

- **Le Barrémien** : il s'agit d'une série complexe et très variée, on y rencontre des calcaires à lumachelles, des dolomies, des grès et des minces intercalations argileuses ou marneuses. La série barrémienne se caractérise par la présence des lumachelles à petites huitres à la base et par l'apparition des orbitolinidés au sommet. Elle atteint près de 700 mètres d'épaisseur et affleure largement dans le massif de Hadjar Labiod. À sa base, elle est définie par une faune supposée du Barrémien: *Exogyra boussinganti*. (J. Glaçon, 1967); et à son sommet par le genre *Puchelnicères* qui marque l'Aptien inférieur. (R. Guiraud, 1973).
- **L'Aptien inférieur** : il s'agit d'une série à dominante marneuse avec des intercalations d'argiles verdâtres dures, de petits bancs de grès et de calcaires marneux à Orbitolines. C'est la formation « argilo-calcaire-gréseuse » au sens de R. Guiraud. (1973), la série pouvant dépasser les 100 mètres d'épaisseur.
- **L'Aptien supérieur** ; il commence par une barre dolomitique de 10 à 20 mètres d'épaisseur. (J. Glaçon, 1967), repère stratigraphique minéralisé, et se poursuit par des calcaires en gros bancs bien lités, des argiles et des marnes. L'épaisseur de l'ensemble varie de 300 à 350 mètres.
- **Albien-Vraconien-Cénomaniens inférieurs** : l'Albien inférieur n'a pas été caractérisé dans les chaînons orientaux, il correspond à un hard-ground. Au Djebel Hadjar-Labiod, le Vraconien repose directement sur l'Aptien supérieur ; il est constitué par un ensemble de calcaires en petites dalles de grès et de marnes gréseuses jaunes. Au-dessus, on a des intercalations de calcaires marneux en plaquettes et enfin au sommet, le Cénomaniens marneux, (inférieur) épais de 250 à 300 mètres avec une très riche faune de Lamellibranches.
- **Le Cénomaniens supérieur et Turonien** : À la base des calcaires dolomitiques à rognons de silex clairs et à lits de chailles blanches ou beiges, c'est le Cénomaniens supérieur, (100 m).
- **Le Turonien** : il est également carbonaté, représenté par des marnes et des calcaires dolomitiques à débris d'hippuritidés, dont l'épaisseur ne dépasse pas les 100 mètres.
- **Le Sénonien** :
Le Maestrichtien est transgressif dans la partie occidentale du Hodna, il correspond à des calcaires gris compacts avec des intercalations marneuses. La faune y est abondante avec des Oursins, des Inocérames, des Gastéropodes et de nombreux Lamellibranches. Cette formation a une épaisseur de 150 à 200 mètres et elle est constituée de calcaires massifs. Les calcaires du Maestrichtien sont bioclastiques à

débris de bryozoaires et échinides. Le Coniacien et le Santonien sont nombreux, ils deviennent ensuite calcaires. La limite Santonien-Campanien est caractérisée par un niveau calcaire peu épais à *Inocéramus régularis* très constant. Le Campanien est marneux ou à calcaires crayeux à faune très abondante, (Ammonites, Oursins, Huîtres, Plicatules), à l'Est, il ne présente que des Foraminifères.

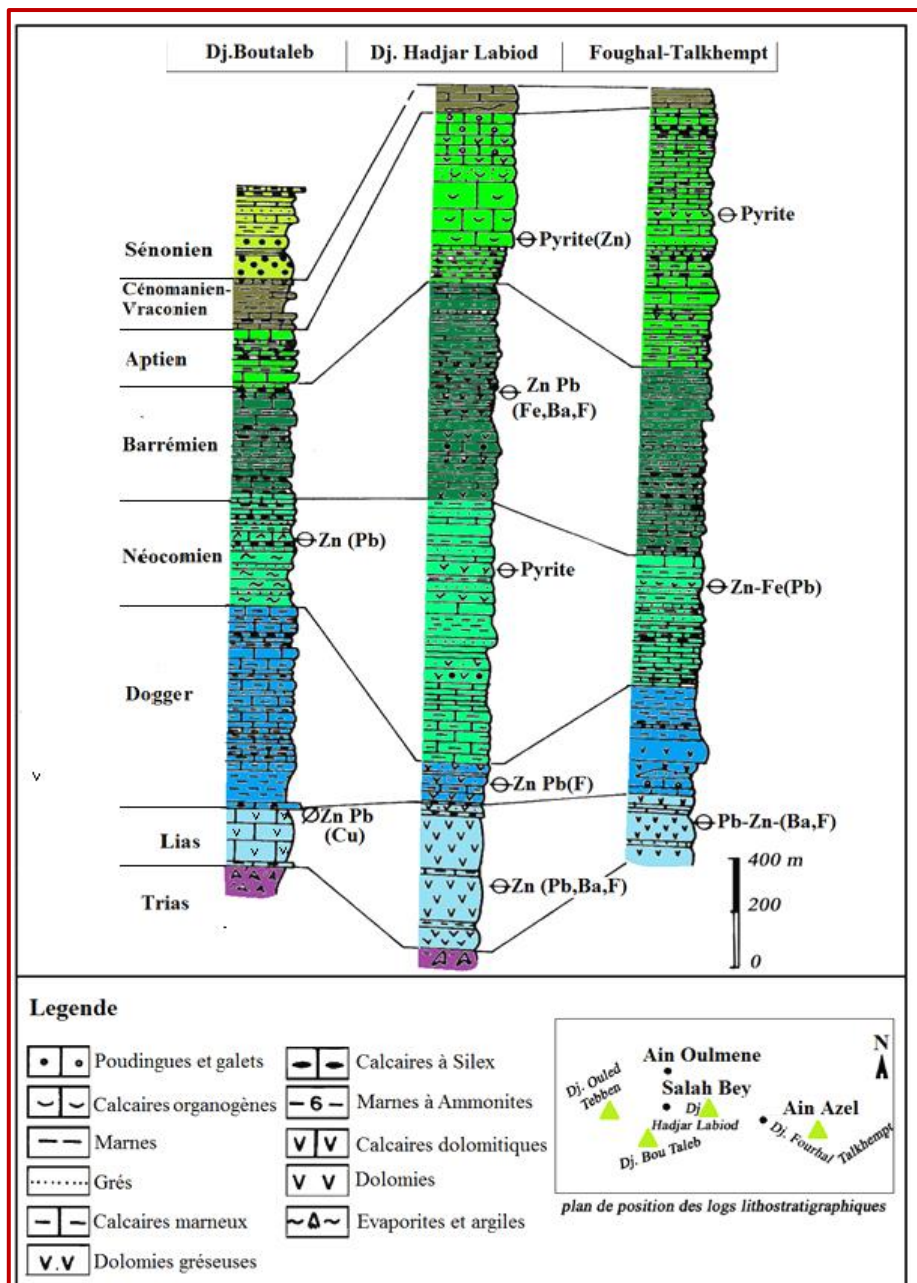


Figure I.13 Colonne lithostratigraphique des massifs des Monts du Hodna. (Compilation faite par A. Boutaleb, 2001 à partir des travaux de J. Glaçon, 1967; R. Guiraud, 1973; J. M. Vila, 1980)

❖ **Le Tertiaire**
 ▪ **Le Paléocène Eocène**

Les formations du Paléocène-Eocène n'affleurent que sur des surfaces réduites autour des massifs occidentaux, (Maadid et Ouled- Tebben). Le Tertiaire débute par des

marnes sombres attribuées au Dano-Montien. Localement s'intercalent des lumachelles à *Cardita beumonti*, *Exogyra overwegi*. Plus haut se situe un repère à *Ostréa aucapitenei*. La microfaune comprend beaucoup de formes benthoniques à côté de Globigérines cf. *belli* et *Globorotalia Velascoensis*. L'Eocène calcaire est constitué essentiellement par des calcaires à silex et des niveaux phosphatés. Ces derniers, d'aspect souvent conglomératique peuvent renfermer d'abondants petits galets de silex. Ces niveaux livrent une abondante faune de vertébrés et surtout des sélaciens comme *Myliobatis dixoni* et *Lamna oblique*. Au sommet de cette série un repère à nodules de calcédoine et géodes de quartz. La série débute par une couche bréchoïde phosphatée qui repose directement sur le Crétacé supérieur. Le Lutétien supérieur débute par des niveaux dolomitiques massifs surmontés par une série de calcaires grisâtres à jaunâtres lités, marneux ou gréseux, souvent plus ou moins dolomités, alternant avec des marnes grises ou verdâtres. Certains niveaux sont pétris de *Thersithéa ponderosa*, *Hemithersthéa maroccana* et *Hedbergella ventricosa*.

▪ **Le Miocène**

Il est marin, transgressif. Le Miocène débute par des poudingues rouges et des grès à Pectinidés et Lithothamniée. Les poudingues remanient de gros blancs d'Éocène à silex et de Crétacé supérieur, (calcaires à Orbitoides et Laffitéines). Au-dessus, une centaine de mètres de calcaires gréseux fauves ou roux à *Pecten convexior*, *P. josslingi* et *Ostrea crassissima* représentant le Burdigalien supérieur. Au-dessus, une puissante série marneuse se développe, surtout sur les périphéries du Boutaleb.

I.8. 1.3. Séries à Jurassiques intermédiaires de l'unité inférieure de Djebel Kalaoun

Cette unité constitue l'essentiel de la masse de Djebel Kalaoun à l'Ouest de Beida- Bordj. Elle comporte les termes suivants : (**Figure I.14**) :

❖ **Jurassique dolomitique**

Il s'agit de dolomies grises ou noires d'épaisseur d'environ 100 mètres, ces dolomies constituent le cœur de l'anticlinal de l'unité inférieure et identique à celles de l'ensemble Sud Sétifien.

- **Le Malm** : Le Malm est représenté par quelques mètres de biomicrites à Calpionelles. La base de la série est constituée par des calcaires fins à radiolaires et saccocoma, il peut s'agir de Kimméridgien ou Portlandien. L'ensemble ne dépasse guère une dizaine de mètres.

❖ **Néocomien**

Il s'agit d'un ensemble bien lité de calcaire fin en petits bancs de 5 à 60 cm dont l'épaisseur est de 150 à 200 mètres. Ces calcaires sont à patine claire, blanche ou jaunâtre; la cassure présente la même couleur de patine. Comme faune on a les *Tintinnopsella Longa*, par ailleurs *Calpionellites Darderi* ont daté le Valanginien inférieur, le Berriasien a été daté par *Tintinnopsella Carpathice*.

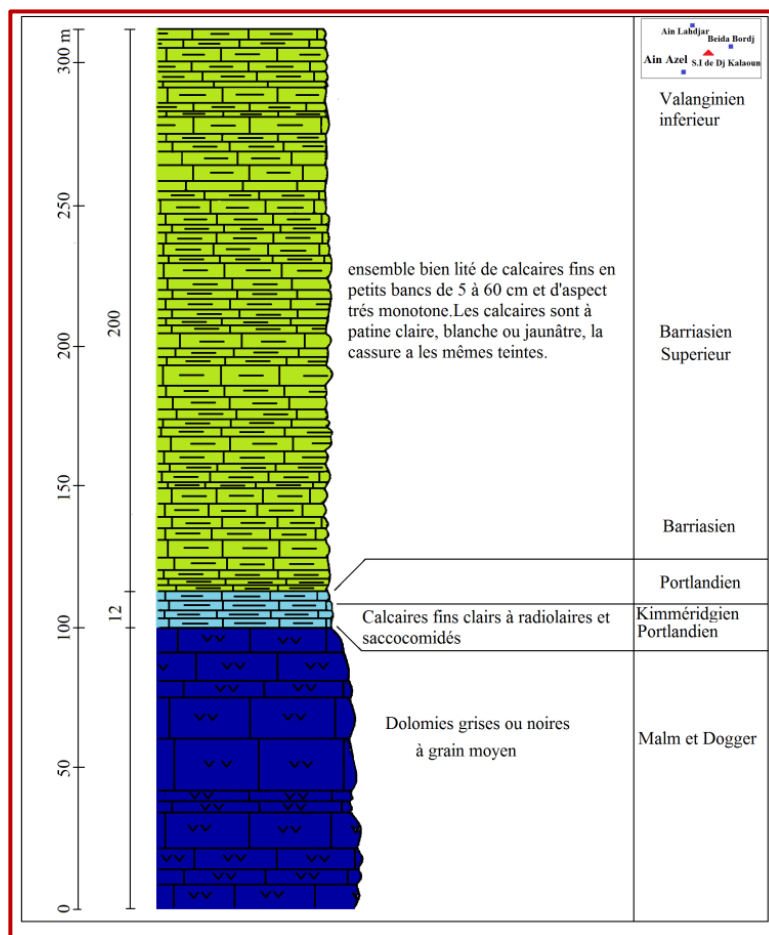


Figure. I.14 : Log lithostratigraphique de l'échelle inférieure de Djebel Kalaoun. (J. M. Vila, 1980).

I.8. 1.4. Ensemble allochtone Sud-Sétifien

Il compose les séries des Djebels ; Sekrine, l'échelle d'Ain- Lahdjar, Koudiat- Tella et séries supérieures du Djebel Kalaoun. Cet ensemble comporte des formations allant du Jurassique jusqu'au Miocène. **(Figure I.15).**

➤ **Les formations Jurassiques**

Le Jurassique comporte les termes suivants :

- **Le Lias :** Le Lias dolomitique affleure au Djebel Tafourer, au Djebel Sekrine et au Djebel Youssef. Parfois, il correspond à une mince série argilo-marneuse qui recouvre un ensemble dolomitique assez épais. Il peut dépasser une centaine de mètres d'épaisseur.
- **Le Dogger :** Il a été reconnu au Djebel Sekrine et au Djebel Tafourer. Cette série est constituée par des lentilles de calcaires gris en petits bancs à grains fins qui auraient livré des débris d'Ammonites. En lames minces leur faciès à « Filaments » a permis à **J. M. Vila, (1980)** de leur attribuer un âge Dogger.
- **Le Jurassique dolomitique indifférencié :** C'est une série dolomitique qui envahit la série supra-Liasique, ailleurs elles s'intercalent entre le lias daté et le Jurassique supérieur, donc elles peuvent représenter la totalité du jurassique moyen et supérieur ou le jurassique moyen seulement.
- **Le Malm :** Il s'achève dans beaucoup d'endroits, (Dj. Youssef, Dj. Sekrine) par des calcaires massifs gris en gros bancs dont l'épaisseur totale est de 80 mètres à Djebel Youssef. La datation de cet ensemble calcaire repose sur la présence dans les niveaux les plus élevés de gros débris de Lamellibranches, de Polypiers, *Clypéina jurassica* qui indique le Jurassique terminal.
- **Les formations crétacées :** les séries du Crétacé sont représentées par :
 - **Le Néocomien :** Le Néocomien représente un nouvel épisode argileux ou marneux. Il affleure largement dans l'ensemble allochtone Sud Sétifien. L'épaisseur de cette série est d'une centaine de mètres.
 - **Le Valanginien** a livré des Ammonites, (Djebel Sékrine), dans les chaînons du Sud-Est Sétifien, y a été récolté une faune à *Exogyra couloni* et des Térébratules. L'Hauterivien contient une microfaune à *Lenticulina schreiteri*. La série Néocomienne commence presque toujours par un hard-ground.
 - **Le Barrémien :** il correspond à une série complexe composée de calcaires, dolomies et des grès avec de minces intercalations argileuses ou marneuses. Il affleure pratiquement dans tous les massifs qui constituent l'ensemble allochtone Sud Sétifien, néanmoins son épaisseur augmente du Nord au Sud, (de 100 à plus de 500 mètres). La partie inférieure de cette série a livré des *Salpingoporella dinarica*, *Orbitolinopsis capuensis*, *Choffatella decipiens*. Le sommet de la série contient des niveaux à

Palorbitolina lenticularias, Néotrocholina friburgensis, Palaeodictyoconua arabicus qui indiquent le Barrémien supérieur. (R. Guiraud, 1973).

- **L'Aptien** : l'Aptien débute par un mince repère où dominent les marnes jaunâtres très caractéristiques de l'Aptien inférieur datées grâce à la présence de Palorbitolina lenticularias et de Glavelinella flandrin. Ces marnes ne dépassent guère les 60 mètres d'épaisseur. Il est surmonté d'un ensemble calcaire en gros bancs à Orbitolines, de calcaires grossiers ou noduleux à Nérinées, de biosparites à Rudistes avec de minces intercalations marneuses. Cette épaisse formation de 250 à 300 mètres n'affleure que dans les massifs septentrionaux et contient une association à Orbitolina subconcava, Cunéolina laurentii, Sabaudia minuta, des milioles et Ovaléolina reicheli.
- **L'Albien-Vraconien** : l'Albien et le Vraconien correspondent à un ensemble d'une épaisseur de 100 à 200 mètres à dominance marneuse dont le sommet peut représenter le Cénomaniens inférieur. Les intercalations à Pithonella ovalis et Favusella washitensis indiquent l'Albien supérieur et le Vraconien.
- **Le Cénomano-Turonien** : cette formation, d'épaisseur de 100 à 150 mètres, est représentée par une barre carbonatée qui débute par des niveaux dolomitiques ou par des biosparites à Orbitolina conica. Elle s'achève par des calcaires micritiques avec des faciès à Foraminifères benthiques.
- **Le Sénonien**
 - **Le Sénonien inférieur** : il a été reconnu à l'Ouest du Djebel Zdimm, où il débute par un hard-ground et ne comprend qu'une dizaine de mètres de marnes sombres.
 - **Le Sénonien supérieur** : il n'affleure qu'au Nord du Djebel Sekrine, au Djebel Kalaoun, au Chouf Et Tine et à la Koudiat Tella. Il est constitué par des barres calcaires rousses bien datées du Maestrichtien au Chouf et Tine. La série a une épaisseur qui varie de quelques mètres à 200 mètres.
- **Le Tertiaire** : Le Tertiaire comporte les termes suivants :
 - **Paléocène-Éocène** : Dans la partie centrale de l'allochtone Sud Sétifien au Chouf-Tine et à Koudiet Tella, cette formation est constituée de 10 à 20 mètres de marnes à débris d'Exogyra overwegi ou à Globigérina pseudobuloooides et à nombreux Ostracodes. L'Eocène calcaire du Sud Sétifien est caractérisé par quelques mètres

de calcaires clairs à silex, qui renferment d'abondants débris de Gastéropodes silicifiés et *Hemithersithea ventricosa*. Ce sont des biosparites à débris d'Echinodermes, de phosphates, à rares galets, silex et grains de quartz. Ces calcaires affleurent au Chouf et Tine. Des faciès identiques existent près de Beida- Bordj, du Djebel Tafourer et d'Oum- el- Adjoul

▪ **Le Miocène**

Le Miocène est constitué de conglomérats rougeâtres à la base qui ravinent largement son substratum; viennent ensuite des calcaires gréseux roux et des marnes. Il affleure sur le versant Sud du Djebel Sekrine où la discordance avoisine 30° et atteint le Barrémien. Les niveaux marneux remanient en abondance les microfaunes du Sénonien et de l'Éocène; les nombreux Foraminifères benthiques qu'ils renferment indiquent qu'il s'agit au moins du Burdigalien.

➤ **Les formations du Plio-Quaternaire :**

Dans le Hodna, le Pliocène est généralement concordant sur le Miocène. La série est d'abord détritique, à affinité deltaïque, puis marneuse et enfin envahie à son sommet par de nouveaux apports conglomératiques. Le Quaternaire est essentiellement représenté par des dépôts de pente à recouvrements détritiques et de terres arables au pied des reliefs. Ils peuvent se raccorder à des glacis des hautes plaines et des terrasses anciennes étagées des basses plaines entre Ouled Tebbene et Djebel Boutaleb.

- ❖ Glacis des hautes plaines: ces glacis sont représentés principalement par un matériel clastique anguleux et plus grossier au voisinage des montagnes. Il devient très fragmentaire vers le bas. Ce matériel est constitué de cailloux, de gravier et de quelques blocs à remplissage limono-argileux.
- ❖ Terrasses des basses plaines: dans les basses plaines, c'est la fraction fine qui prédomine; elle est composée d'argiles, de limons et des sables avec graviers disséminés dans les différentes couches.

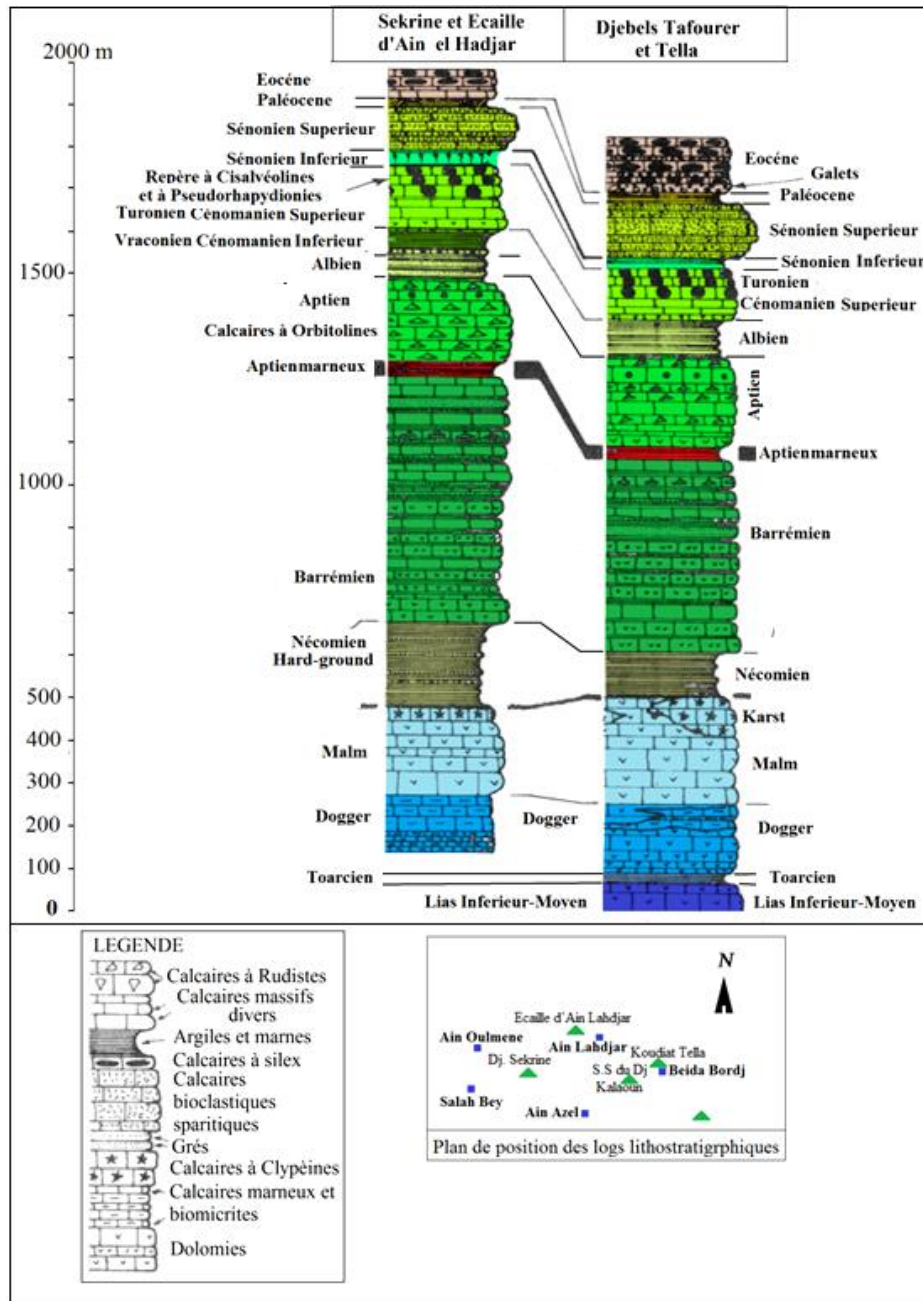
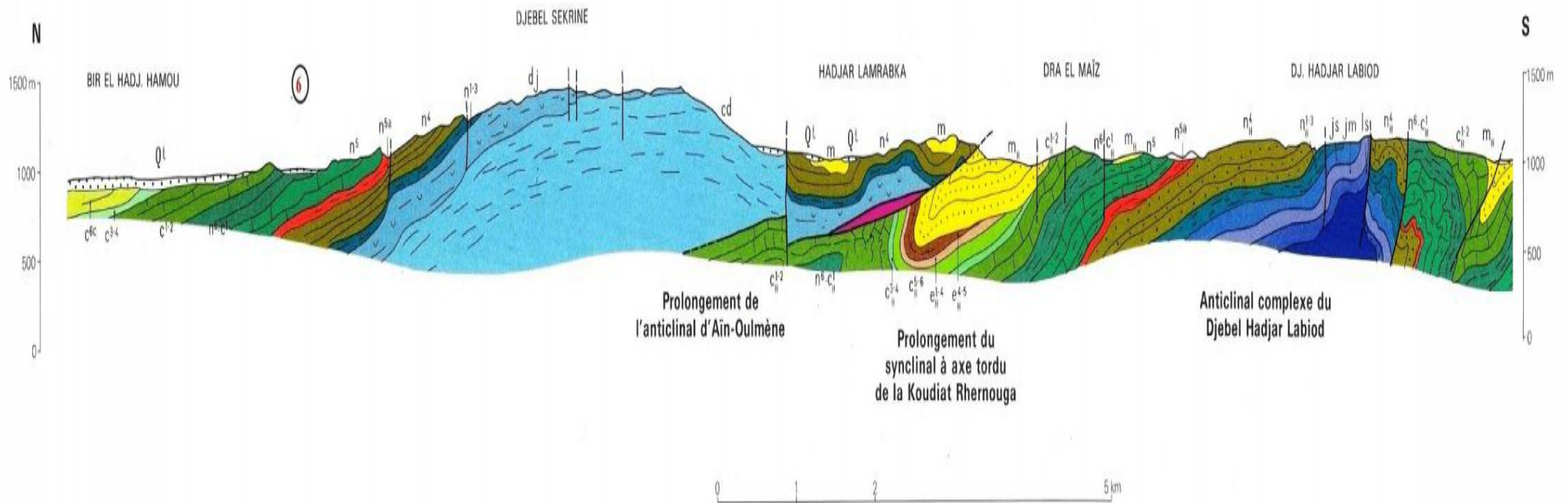


Figure I.15. Corrélation des séries typiques de l'ensemble allochtone Sud-Sétifien. (J. M. Vila, 1980)

I.8. 2. La tectonique des monts du Hodna

Dans les Monts du Hodna se distinguent deux unités tectoniques séparées par le front Sud-Sétifien. (Figure I.16).

- ❖ L'allochtone Sud Sétifien au Nord, constitué d'un vaste empilement d'écailles limitées par des cisaillements. (J. M Vila, 1980).
- ❖ L'autochtone Hodnéen au Sud, dont fait partie le Djebel Hadjar- Labiod est affecté essentiellement par trois structures tectoniques liées à l'orogénèse Alpine qui sont :



Q	Quaternaire
mp	Mio-Pliocène continental
Nappe du Djebel Sattor	
m ₁	Miocène marin : grès calcareux à Méliobésiés et marnes.
e ⁴⁻⁷	Lutétien supérieur : marnes jaunâtres et lumachelles d'Huîtres.
Ecaillés d'Aïn el Ahdjar et du Djebel Sekrine	
m	Miocène : conglomérats, grès roux, argiles et marnes à Huîtres.
e ³⁻⁵	Éocène : calcaires massifs détritiques à Theristées silicifiées.
e ¹⁻³	Paléocène : niveau phosphaté.
c ³⁻⁶	Sénonien supérieur : biosparites jaunâtres et lumacholles à Orbitoides.
c ¹⁻²	Cénomaniens supérieur et Turonien : calcaires fins ou graveleux à Miliolidés.
n ^{5-c5}	Albien supérieur (?) et Cénomaniens marneux.
n ³	Aptien calcaire à Orbitolines.
e ¹⁻⁴	Aptien marneux.
n ⁴	Barrémien calcaro-dolomitique.
n ²	Néocomien à Ammonites.
j ¹⁻¹¹	Passage Jurassique-Crétacé à Algues ou à Calpionelles.
d ₁	Jurassique (supérieur ?) dolomitique.
cd	Dogger (?) : calcaires marneux lités.

PARAUTOCHTONE ET AUTOCHTONE HODNÉENS	
m ₁	Miocène : conglomérats, marnes à Huîtres et calcaires gréseux.
e ¹⁻⁷	Lutétien supérieur : argiles gypsifères et calcaires.
e ²⁻³	Yprésien-Lutétien inférieur : calcaires à silex, calcaires phosphatés et couches à Theristées.
e ¹⁻⁴	Dano-Paléocène à Yprésien (?) : marnes noirâtres.
c ³⁻⁶	Sénonien supérieur : marnes à galets, marmo-calcaires et calcaires parfois gréseux à Orbitoides.
c ³⁻⁴	Sénonien inférieur : marnes sableuses ou à galets, calcaires, calcaires marneux, lumachelles à Ostréidés.
n ⁵⁻⁹	Cénomaniens supérieur et Turonien : dolomies et calcaires à silex ou à Miliolidés.
n ^{6-c5}	Vraconien (?) et Cénomaniens : marnes grises à <i>Aspidiscus</i> et calcaires à Ammonites, calcaires glauconieux et marmo-calcaires noduleux.
n ₆	Aptien : calcaires à Orbitolines, dolomies.
n ₅	Aptien à dominante marneuse.
n ₄	Barrémien : dolomies, calcaires et grès.
n ₃	Néocomien : grès, pélites, marnes à Ammonites et Brachiopodes.
js	Jurassique supérieur : calcaires fins à Saccocomidés, biomicités à Calpionelles et à Pygopes.
jm	Jurassique moyen : calcaires varicolores à Bélemnites.
ls	Lias supérieur marneux à Ammonites.
ls	Lias carbonaté massif.
TRIAS EXOTIQUE OU EXTRUSIF	
	Trias : marnes beriolées à gypses bréchiques, glaçons calcaro-dolomitiques (dt) et ophites (w)

Figure I.16 : Coupe interprétative au 1/50.000. (Extrait de la carte géologique de Ain- Azel au 1/50.000. D'après J. M. Vila ,1977).

a. Les failles :

L'analyse du réseau de failles permet de distinguer plusieurs familles d'accidents tectoniques qui affectent les terrains carbonatés du Jurassique et du crétacé. Il s'agit :

- ❖ Des failles de Direction NE-SW et NW-SE très nettes au Djebel Boutaleb et Djebel Hadjar Labiod ;
- ❖ Des failles de direction EW de plus grande importance affectant surtout les formations de Djebel Hadjar Labiod et Djebel Fourhal. Elles se sont formées lors du plissement au moment de la formation du grand anticlinal du Hodna.
- ❖ Une faille importante de direction N-S, (faille de Kherzet- Youssef) affectant le crétacé du Djebel Hadjar Labiod sur son flanc Est. (**Figure I.18**).

b. Les plis :

Les plis ont généralement une orientation E-W. La direction WNW-ESE correspond à des synclinaux à larges rayons de courbure, représentant l'ensemble de hauts reliefs avec des axes de direction :

- ❖ NW-SE tels que ceux observés au niveau du Djebel Sekrine, Djebel Kalaoun, Djebel Gouzi et Djebel Fourhal. (**Figure I.17**).
- ❖ NE-SW rencontrés au niveau de Djebel Hadjar- Labiod et Djebel Boutaleb.

c. Les relations du Trias

Le Trias se localise en grande majorité sur les lignes de dislocation, leur relation structurale est bien différente. Au front de chevauchement, les affleurements triasiques de Koudiat el Bassour, el Maafeur et de Draa el Djebbas laissent supposer qu'ils auraient joué le rôle d'une semelle de glissement des nappes vers le Sud ([A. Mezerzi, 2015](#)). En ce qui concerne les masses triasiques d'El Gouzi et du massif du Boutaleb, ils sont situés sur de vastes failles, et son origine est clairement à la base des séries Hodnéennes. ([J. M. Vila, 1980](#)), ce sont de vraies structures diapiriques. ([J. Bertraneu, 1955](#) et [J. Glaçon, 1967](#)). La mise en place du Trias est liée principalement à des contraintes compressives de direction N-S ([R. Guiraud, 1973](#)), c'est à dire à la phase Priabonnienne et la phase Tortonienne.

I.8. 3. Les phases tectoniques

La configuration structurale actuelle de la région d'étude a laissé apparaître les traces de plusieurs phases tectoniques du cycle alpin. Les principales phases tectoniques qui sont à l'origine de ce dispositif structural actuel sont :

- **La phase anté- Sénonienne :** Cette phase est connue dans le massif du Boutaleb depuis les travaux de [J. Bertraneu \(1952\)](#), [R. Guiraud \(1990\)](#), et qui montre que cette phase est caractérisée par une compression NNW-SSE à sub méridienne et d'après lui, il s'agit en général de bombements accompagnés parfois de cassures orientées au NW au NE ou à l'ENE (Boutaleb). Certaines cassures ont permis à des pointements triasiques de la mise en surface (d'Annoual et El Hammam) dans le Boutaleb.
- **La phase fini-Lutétienne :** Cette phase compressive se situe vers la fin du Lutétien, c'est la phase atlasique ([R. Guiraud, 1973](#)), et la phase priabonienne à vergence sud au sens de [J. M. Vila \(1980\)](#). Cette phase aurait structuré les séries hodnéennes en plis et montre une direction de raccourcissement NW-SE. ([J. M. Vila, 1980](#)). Elle est marquée par l'arrêt des séries à la fin de l'Eocène. L'Oligocène qui y fait suite ne reflète plus du tout l'appartenance à une quelconque unité.
- **La phase du Miocène basal :** Cette phase marquée par un hiatus dans la sédimentation, lequel n'est rompu que par la transgression du Burdigalien supérieur. Dans certains secteurs, ce Burdigalien fossilise des structures plissées à flancs verticaux évoquant des plis coffrés au Sud du Djebel Sekrine.
- **La phase Alpine :** elle est responsable des grands chevauchements méridionaux où le Miocène est largement impliqué. C'est la phase Tortonienne qui est responsable des torsions d'axes, décrochements, des plissements à axes E-W et la genèse des plis emboutis des monts du Hodna.
- **La tectonique récente :** elle est responsable de l'orographie actuelle et la montée récente des gypses triasiques de Guellal. ([J. M. Vila, 1980](#)). Ainsi, elle est responsable des accidents cassants traversant d'Est en Ouest la partie méridionale de Djebel Sekrine et qui on fait rejouer les décrochements de même direction du Djebel Hadjar Labiod.

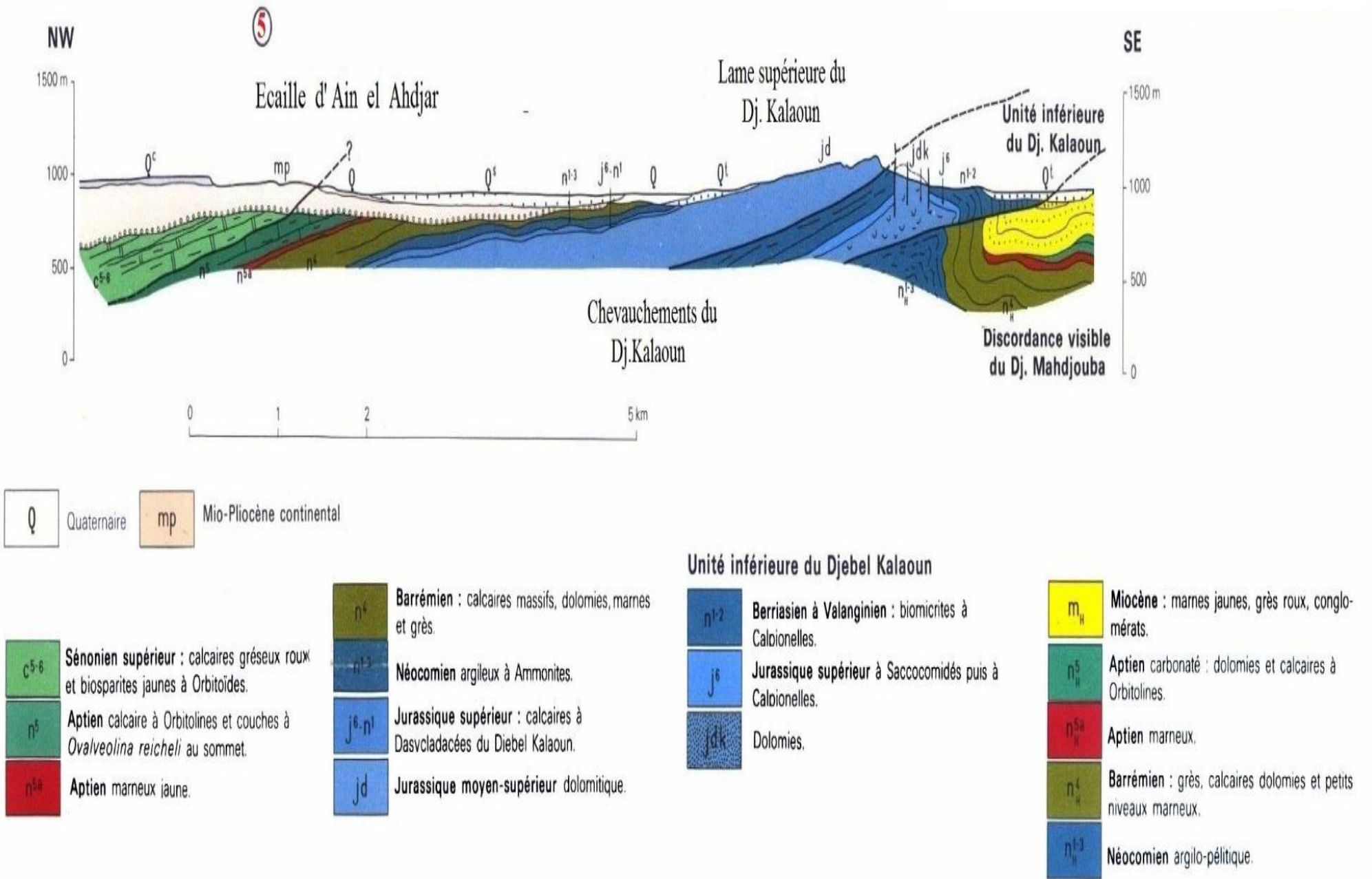


Figure I .17. Coupe interprétative au 1/50.000, (Extrait de la carte géologique de Ain- Lahdjar au 1/50.000. J. M. Vila ,1977).

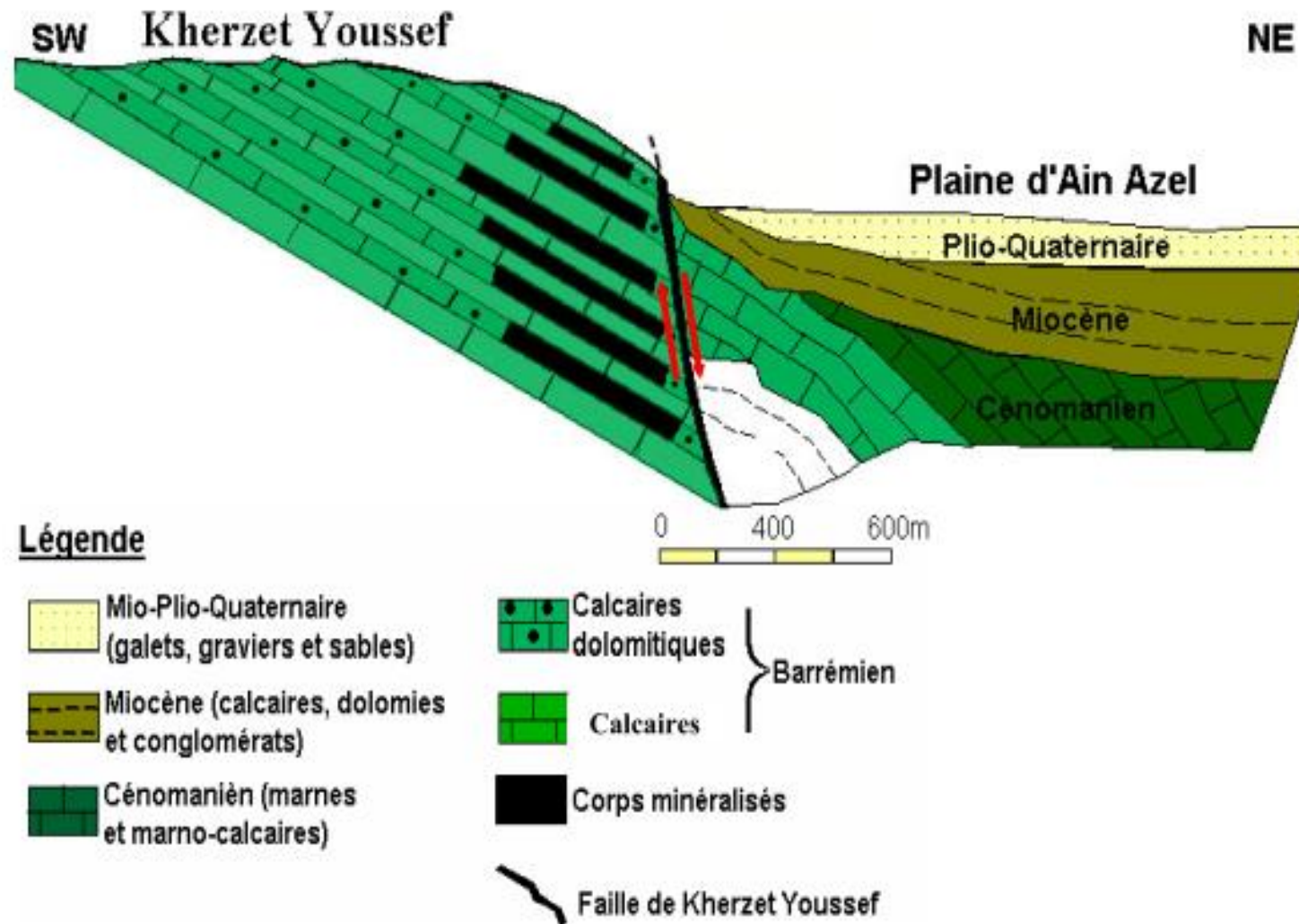


Figure L.18 : Coupe géologique schématique de la région de Kherzet -Youssef.(J. Glaçon, 1956), in L. Attoucheik, 2006

I.8. 4. La géologie locale

Les deux aquifères en question ont été captés dans le gisement de Chaabet el Hamra. Sa stratigraphie est caractérisée principalement par les dépôts du Crétacé, dont l'Hauterivien présente le plus grand intérêt, car il renferme la minéralisation. La carte géologique de ce secteur a été levée par l'E.R.E.M (1992). (Fig. I.19).

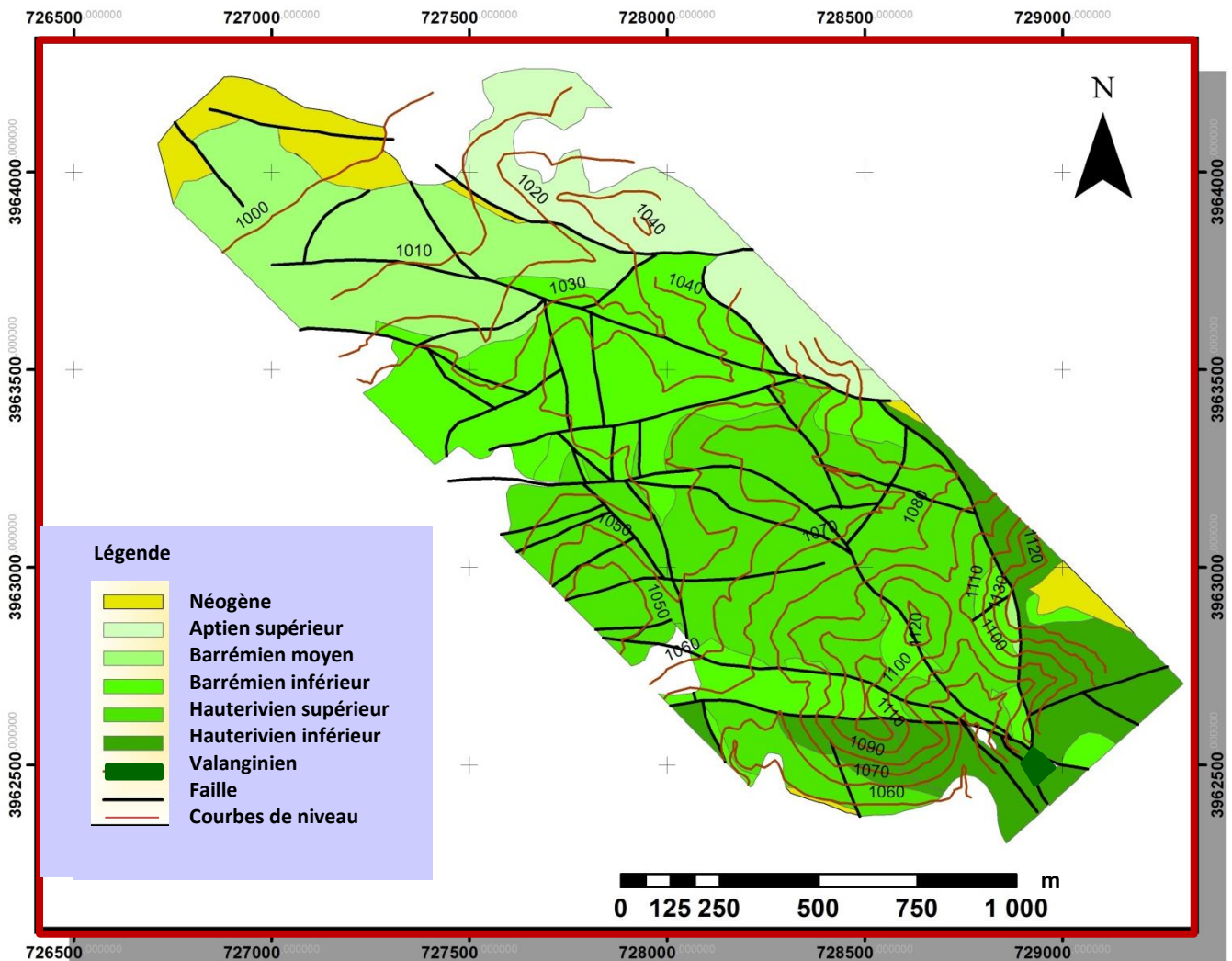


Figure I.19. Carte géologique du gisement de Chaabet el Hamra (e : 1/2000, E. R. E. M, 1992, modifiée)

I.8. 4. 1 La stratigraphie du gisement de Chaabet el Hamra, (Figure I.20)

a. Valanginien [épaisseur: 150 à 220m]: Les dépôts du Valanginien (stériles) affleurent à l'Est de la faille orientale et à l'Ouest du gisement et sont représentés par une alternance

d'aleurolites grises avec des grès quartzeux gris clair, des dolomies gréseuses et argileuses, des calcaires et des marnes gris-verdâtres.

b. Hauterivien [épaisseur: 150 à 200m]: La minéralisation zincifère d'intérêt industriel est localisée dans la partie inférieure de l'Hauterivien, dont la puissance varie de 100 à 150 m. Cet étage est subdivisée en deux (02) niveaux :

b. 1. Hauterivien inférieur:

Ce niveau, d'une puissance totale variant de 70 à 120 m, est à son tour divisé en trois (03) termes :

- 1- Composé de dolomies grises massives, à grains fins, parfois gréseuses, souvent à petites inclusions et nodules, de couleur blanchâtre, et parfois de calcarénites noires dans la partie supérieur de 2 à 5 m du toit ; ce terme est discontinu et son épaisseur est de 1 à 2 m.
- 2- Représenté par une superposition, de bas en haut, de marnes gris-verdâtres (0,5 à 2 m), d'aleurites gris-brun (2 à 5 m), de dolomies grises (2 à 10 m), de dolomies gréseuses (3 à 8 m) et de marnes bariolées (5 à 10 m).

b. 2. Hauterivien supérieur :

Ce niveau, d'une puissance globale variant de 80 à 120 m, est subdivisé en cinq- (05)-termes :

- 1- Formé de grès, parfois en alternance avec des argiles, de marnes et aleurolites verdâtres, avec toujours à la base de l'alternance un niveau calcaire gris-clair, dont une partie, de 1 à 3m d'épaisseur, est dolomitisée.
- 2- Représenté par des dolomies massives à grains fins plus ou moins hématitisées.
- 3- Représenté par un calcaire gris argileux, (parfois renfermant des passées argilo-marneuses ou siliceuses), dont l'épaisseur varie de 10 à 15 m.
- 4- Constitué de dolomies à grains fins, de couleur gris-brun, souvent argileuses, dont la puissance totale varie de 15 à 20 m.
- 5- Caractérisé par une irrégularité de composition et de puissance ; essentiellement représenté par des calcaires gris en alternance grossière avec des marnes et des aleurolites ; dans la partie inférieure de ce terme, les calcaires sont remplacés par des dolomies recristallisées.

c. Barrémien [épaisseur: 300m] :

Il est développé au Nord-Ouest et au Sud du gisement, et il est subdivisé en deux - (02)- niveaux :

c. 1. Barrémien inférieur (B1) : Ce niveau est à son tour divisé en trois (03) termes :

- 1-** Formé essentiellement par des grès et des dolomies gréseuses parfois argilo-bitumineuses, avec une fine dissémination de pyrite et de passées de dolomies légèrement oxydée ; la puissance de ce terme varie de 40 à 60 m.
- 2-** Constitué par une alternance de dolomies marneuses massives, de marnes et de calcaires marneux ; sa puissance varie aussi de 40 à 60 m.
- 3-** Représenté par des dolomies massives à grain fins, avec des fissures remplies d'oxydes et de calcite, et une puissance variant de 15 à 20 m.

c. 2. Barrémien supérieur (B2) : Ce niveau est subdivisé en quatre (04) termes :

- 1-** Représenté par des dolomies gréseuses, massives à grains fins ou moyens, avec souvent des fissures remplies par la calcite et, vers la fin du terme, par la pyrite disséminée ; la puissance de ce terme varie de 20 à 30 m.
- 2-** Formé de grès brun, avec une alternance d'aleurolites et d'une **dolomie** très gréseuse, et, en fin d'intervalle, un aspect broyé de la roche. La puissance du terme varie de 30 à 40 m.
- 3-** Constitué d'une alternance de dolomie gréseuse, de grès bruns et d'argiles verdâtres, (dolomies et grès compacts, massifs et légèrement hématitisés). Sa puissance varie de 60 à 130 m.
- 4-** Formé de dolomies gréseuse et argileuse et de calcaire brun-violet, avec des passées d'argile verdâtre. Sa puissance est d'environ 60 m.

d. Aptien :

Les formations aptiennes ont été rencontrées par certains sondages au Nord-Ouest du champ minier sous le Miocène et le Quaternaire. Elles sont représentées par une alternance de calcaires gréseux et grès calcaireux avec des passées de calcaires très fins et des grès friables.

e. Miocène :

Le Miocène existe à 1200m d'altitude- (Chouf Bou Arket)- et est discordant sur l'Hauterivien. Il est constitué par des brèches à la base, des calcaires blancs, gris et de calcaires gréseux au sommet. (J. Glaçon, 1967).

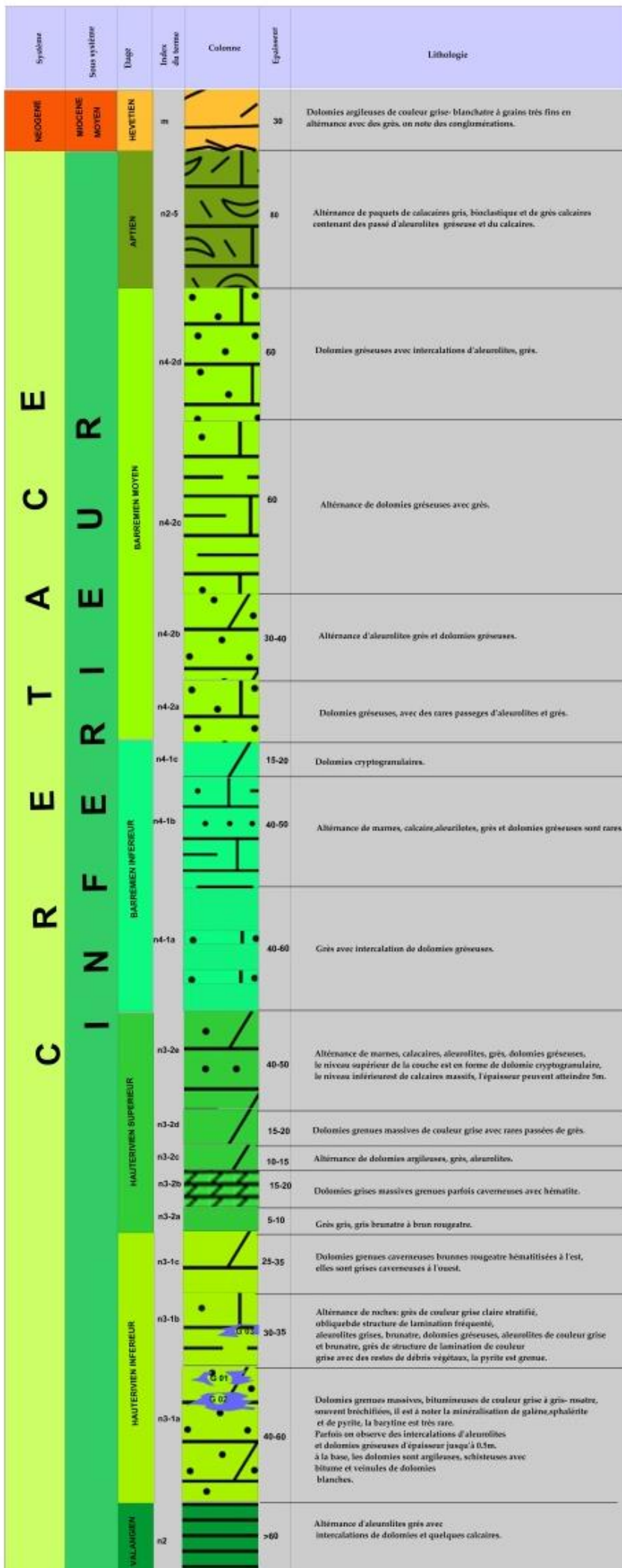


Figure I.20. La colonne lithostratigraphique du gisement de Chaabet- el- Hamra, (E.R.E.M, 1992).

c. Quaternaire (Q):

Il se résume dans des débris de roches en place sous forme des dolomies, calcaires, grès avec un ciment argileux.

I.8. 5. La tectonique du gisement de Chaabet el Hamra

Le gisement de Chaabet el Hamra est situé dans la partie Sud-Ouest de la terminaison périclinale de la grande structure en horst anticlinal de Rahbet, district de Fourhal.

Selon l'EREM (1992) et d'après le caractère du plissement, le gisement est subdivisé en trois (03) gros blocs: Est, centre et Ouest.

a. Le Bloc Est:

Trois (3) côtés de ce bloc sont limités par des failles, (la faille Est en Est, la faille Latitudinale au Nord et Nord-Ouest et les failles Ouest et Sud en Ouest), tandis que le côté Sud est ouvert et se trouve en contact avec les calcaires du Néogène.

Sur le plan structural, le bloc représente un brachyanticlinal et le pendage des flancs du pli est : 10° à 15° NE et 15° à 20° SW. Le pli est compliqué par des accidents cassants :

- ❖ **La faille Sud** : de direction latitudinale dans le flanc Sud-Est du brachyanticlinal, c'est une faille normale à rejet vertical de 100 à 120 m avec un pendage au Nord inférieur à 65-75°. Cette faille a soulevé ce bloc. (J. Glaçon, 1967).
- ❖ **La faille Diagonale** : elle s'étend vers le Nord-Est sub-parallèlement au plan axial.

b. Le bloc Centre:

Il a la forme d'un coin, dont l'angle aigu est formé par le raccordement des failles centrale et latitudinale dans la partie Est. La partie opposée du coin s'en va en s'élargissant à l'Ouest du gisement. Sur le plan structural, le bloc Central est plus compliqué. Dans son ensemble, le coin représente un Graben à amplitude d'affaissement de 15 à 20 m.

c. Le Bloc Ouest:

Il est localisé au Nord-Ouest de la faille centrale et se trouve limité par des dislocations cassantes Ouest, Sud et latitudinale.

- ❖ **La faille centrale** : c'est une faille normale qui s'étend de l'extrémité Nord jusqu'à l'extrémité Sud, avec un pendage au Sud-Est inférieur à 70-75° et un rejet vertical

de 10 à 15 m dans sa partie Nord-Est. Elle coupe un chevauchement à pente douce.

- ❖ **La faille latitudinale** : c'est une faille normale dérivée de la faille centrale. Elle se prolonge à l'Ouest au-delà du gisement, avec un pendage au Nord de 75 à 80° et un rejet vertical de 10 à 20 m.
- ❖ **La faille Est** : dérivée aussi de la faille centrale, cette faille normale est orientée vers l'Est, de direction subméridienne, avec une amplitude verticale du rejet de 80 m, voire de 100 m suivant le plan de faille, et un pendage Sud-ouest inférieur à 65-70°.
- ❖ **La faille Ouest** : cette faille normale se dégage du dessous du dépôt quaternaire, bordant le flanc Sud-est du brachyanticlinal du bloc Est, et change de direction jusqu'à 300°, se faisant couper par la faille latitudinale ; c'est une faille en escalier formant des plaques, des coins, dans une zone d'environ 70 m de large, et le pendage est à l'Est inférieur à 70-85°, tandis que les rejets verticaux atteignent 10 m.

L'étude de la fracturation qui affecte la région de Chaabet- el- Hamra est faite grâce au relevé de plusieurs directions de failles à partir de la carte de réseaux de faille, déduite de la carte géologique du gisement, permet la réalisation d'un diagramme de rosace. (**Figure I .21**).

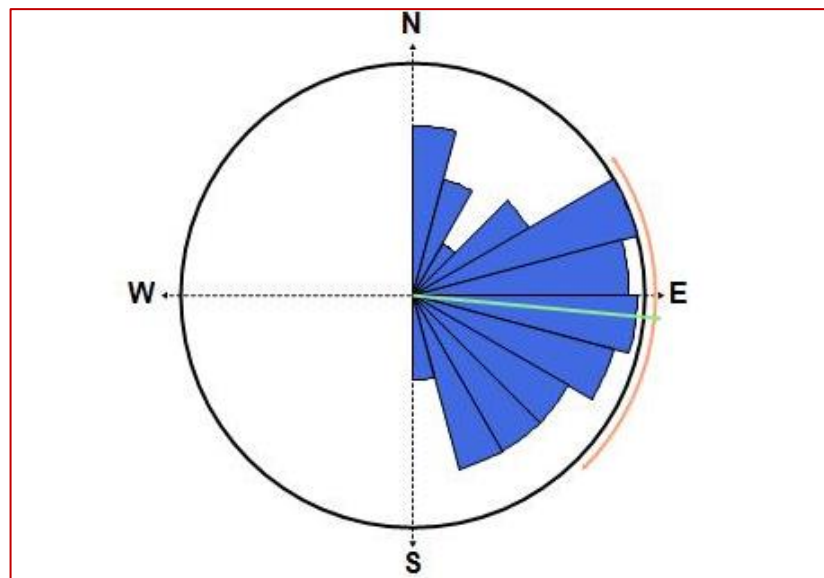


Fig. I. 21. Rosace du gisement de Chaabet el Hamra

L'interprétation de la rosace directionnelle montre que les failles s'organisent selon les directions majeures suivantes: N010, N060, N100, N140.

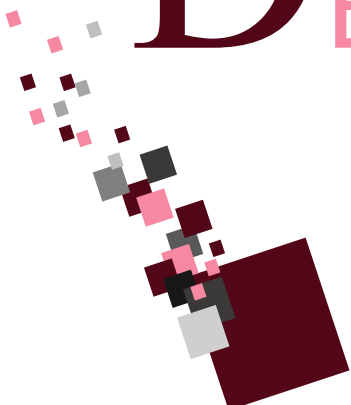
I.9. Conclusion :

Le gisement de Chaabet el Hamra qui occupe le Sud-Ouest de la terminaison périclinale de la grande structure en horst anticlinal de Rahbet, district de Fourhal, (l'un des Monts du Hodna) dans la région de Ain- Azel, au Sud de Sétif, appartient aux zones externes du tronçon Nord oriental de la chaîne des Maghrébides de l'Afrique du Nord. Précisément, Il fait partie du domaine autochtone et para-autochtone Hodnéen.

Il est constitué essentiellement par des formations sédimentaires de Crétacé inférieur recouvertes par du Miocène discordant. Il s'agit des dolomies gréseuses et argileuses, des argiles, des marnes et des calcaires...

Il se caractérise par une tectonique de type cassante représentée par des failles normales qui perturbent la lithologie du secteur.

Cette approche géologique a permis de définir la nature lithologique des terrains qui sont favorables aux développements d'éventuels aquifères, et d'après la description géologique, les formations du Barrémien et de l'Hauterivien pourraient constituées des aquifères.



DEUXIÈME
CHAPITRE

II.1. Introduction :

Avant d'aborder l'étude hydrogéologique du secteur étudié, une étude hydrologique s'avère nécessaire, puisque cette dernière est la science qui étudie le cycle de l'eau et son évolution à la surface de la terre. Elle permet donc de quantifier l'eau qui alimente les nappes d'eau souterraines.

Cette étude est basée sur le bassin hydrographique et qui est par définition un espace géographique dont les apports hydriques naturels sont alimentés exclusivement par les canaux ou en matières solides transportés par l'eau forment, en un point unique dans l'espace, une embouchure ou en un exutoire.

Généralement, un bassin versant est déterminé par sa morphologie, et essentiellement par les lignes des crêtes topographiques et de partage des eaux.

De par la nature et le sens d'écoulement des oueds, l'Est algérien juxtapose deux grands types de bassins hydrographiques. (**Figure.II.1**), (A. Mebarki, 2005).

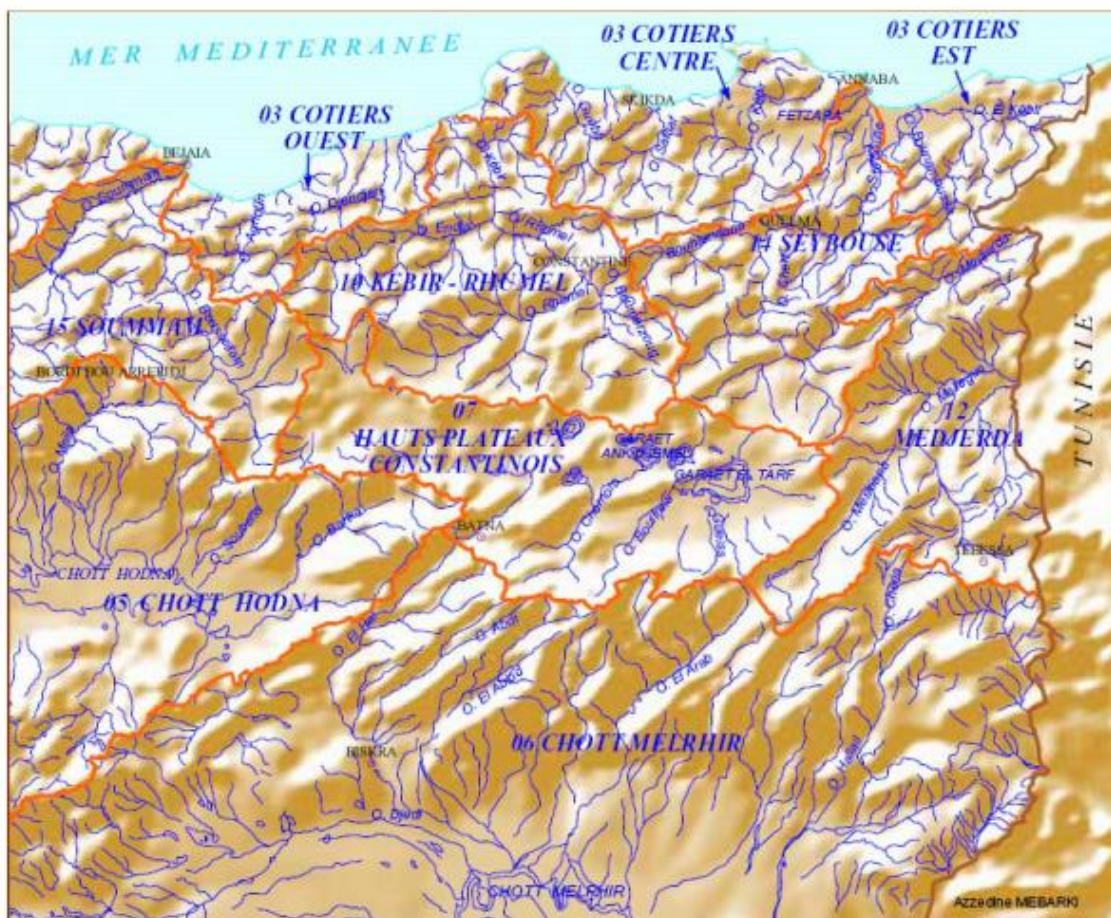


Figure II.1 : Bassins hydrographiques de l'Algérie orientale. (A. Mebarki, 2005).

- Au Nord, des bassins à écoulement exoréique, (les oueds se jettent dans la mer Méditerranée), et à régime quasiment pérenne : Côtiers constantinois (11570 km²), Boussellam, affluent de l'oued Soummam (5 010 km²), Kébir-Rhumel (8 815 km²), Seybouse (6 475 km²) et Medjerda (7 785 km²). (A. Mebarki, 2005).
- Au Sud, des bassins à écoulement endoréique, (les oueds se jettent dans des dépressions fermées) et à régime quasi-temporaire : les Hauts Plateaux constantinois (9 578 km²), le bassin Nord-Est du Chott Melrhir, (près de 28 000 km² pour une superficie totale de 68 751 km²), et le bassin Est du Chott Hodna (autour de 13 000 km² pour un total de 25 843 km²), (A. Mebarki, 2005).

II.2 Le bassin versant de la zone d'étude:

La dépression de Ain- Azel fait partie d'un vaste bassin hydrologique qui s'étale sur 9578Km² depuis la région de Ain- Beida à l'Est à celle d'El-Eulma à l'Ouest. Il est limité par le 35^{ème} parallèle au Sud et par le parallèle 36°N au Nord.

L'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H) lui attribue le N° 07 sous le nom des hauts plateaux constantinois.

La plaine de Ain- Azel occupe le sous-bassin (s/ BV) le plus occidental codé 07-01. (**Figure II.1**)

II.3 Étude morphométrique :

L'étude morphométrique du bassin versant repose sur les mesures et les calculs géométriques des différents paramètres morphométriques. (Surface, altitude, pente...).

Ces paramètres obtenus à partir des données topographiques nous permettent d'avoir une idée sur la forme du bassin versant, son relief, son régime et même l'ordre des cours d'eau.

II.3.1 Les caractéristiques morphométriques du sous- bassin:

La forme des bassins versants est importante à étudier, car elle conditionne directement le temps de réponse du bassin versant aux précipitations, c'est-à-dire la durée du ruissellement de surface et le temps de parcours à travers le réseau de drainage.

II.3.2 Indice de compacité ou coefficient de Gravelius (Kc):

C'est la forme du bassin versant qui conditionne le temps de la concentration des eaux à l'exutoire de ce dernier. En effet, un bassin versant qui possède une forme allongée ne réagira pas de la même manière qu'un autre qui a une forme plus compacte.

Alors, la forme des bassins versants est exprimée par l'indice de compacité de Gravelius K_c , qui correspond au rapport du périmètre P du bassin, (Sous-bassin) à celui d'un cercle ayant la même surface.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots(\text{Eq.1})$$

- **K_c**: Indice de compacité de Gravelius ;
- **P**: Périmètre du sous- bassin versant à étudier;
- **A**: Superficie du sous- bassin versant à étudier;

(La surface et le périmètre sont deux paramètres principaux, ils s'obtiennent par planimétrie sur la carte topographique après le tracé des limites du bassin versant à étudier sous ArcGis. La surface s'exprime en Km² et le périmètre en Km).

Tableau II.1. L'indice de compacité de Gravelius K_c du sous-bassin de la région d'étude.

A (Km ²)	P (Km)	K _c
584, 76	112	1, 29

- ❖ On remarque que la valeur du K_c , (indice de compacité), est supérieure à 1,12, ce qui permet de dire que la forme du bassin versant de la région étudiée est allongée.
- ❖ du point de vue hydrologique, la durée de ruissellement de surface ou le temps de parcours à travers le réseau de drainage sera plus lent par comparaison avec un bassin ramassé.

II.3.3 Recherche d'un modèle de représentation:

- ❖ **Les dimensions du rectangle équivalent, (Rectangle du Gravelius):**

Cette notion introduite par **L. Roche (1963)**, permet la simple comparaison des bassins versants entre eux en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le contour devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveau des droites parallèles au petit côté du rectangle, l'exutoire l'un des petits côtés du rectangle appelé, « Rectangle équivalent ».

Si l'indice de compacité de Gravelius K_c est supérieur ou égal à 1.12 ($K_c \geq \frac{2}{\sqrt{\pi}}$), les dimensions du rectangle équivalent seront obtenues à l'aide des deux relations suivantes:

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \dots\dots\dots(\text{Eq. 2})$$

$$l = \frac{Kc \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (Eq. 3) \quad \text{Tel que:}$$

- **Kc**: l'indice de compacité de Gravelius,
- **A**: la superficie du sous- bassin versant à étudier,
- **L**: la longueur du rectangle équivalent,
- **l**: la largeur du rectangle équivalent.

Le tableau II.2 qui suit récapitule la simple application numérique des deux relations précédentes:

Tableau.II.2. Les dimensions du rectangle équivalent du sous- bassin 07-01

A (Km ²)	Kc	L (Km)	l (Km)
584, 76	1, 29	41. 6	14. 03

II.3.4 Caractéristiques des altitudes:

Les variations d'altitudes à l'intérieur du bassin versant, (**Figure II.3**) jouent un rôle très important dans la répartition spatiale des éléments climatiques et le taux de concentration.

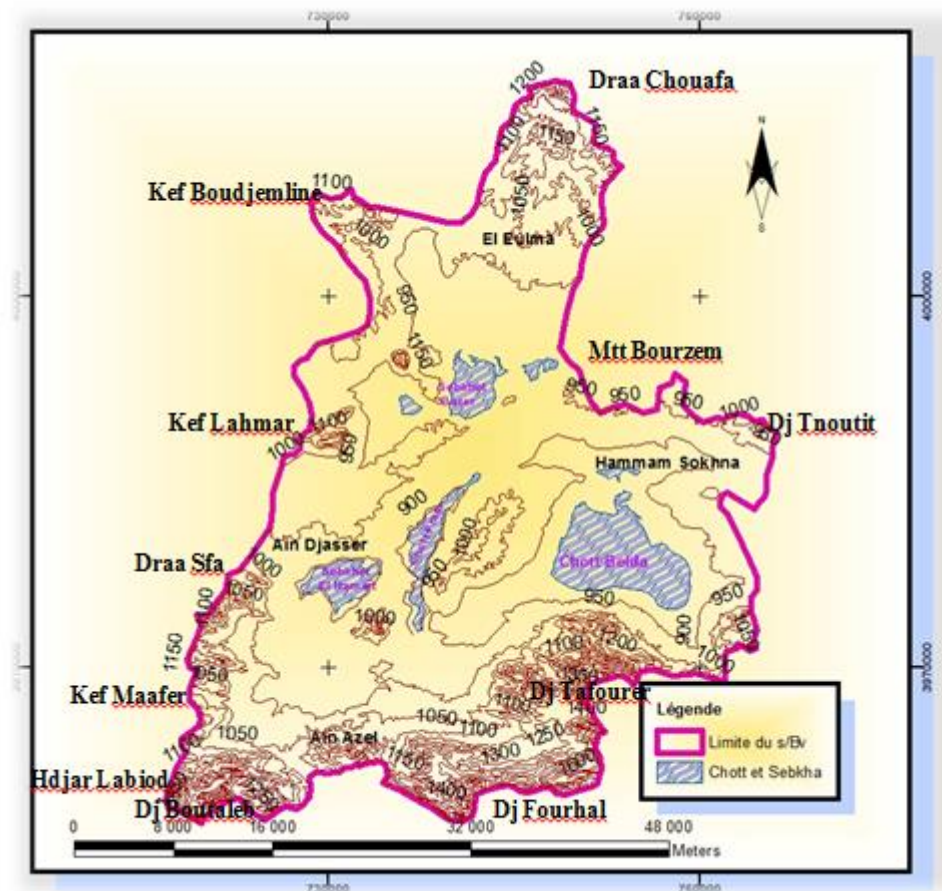


Fig. II.3 L'orographie du sous- bassin versant de la zone d'étude.

Le portrait le plus précis des altitudes est représenté par la courbe hypsométrique, (Figure II.4). Cette courbe exprime la répartition de la surface du B.V par tranches d'altitudes. Le tableau suivant montre la répartition altimétrique.

Tableau. II. 3. La répartition des surfaces par tranches d'altitudes.

Classe d'altitude (m)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
1350- 1300	1,87	1,87
1300- 1250	1,87	3,74
1250-1200	2,8	6,54
1200- 1150	2,81	9,35
1150-1100	5,61	14,96
1100-1050	6,55	21,51
1050-1000	10,28	31,79
1000-950	21,5	53,29
950- 900	35,51	88,8
900-850	8,41	97,21
850- 800	1,87	99,08
800 -750	0,92	100

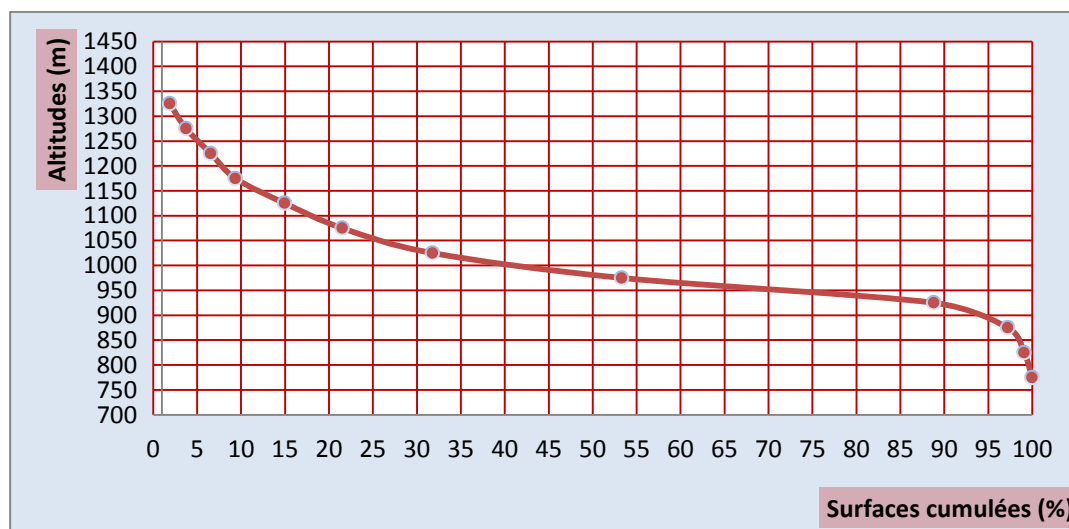


Fig. II.4 La courbe hypsométrique du sous- bassin versant de la zone d'étude.

Alors, la répartition hypsométrique de chaque secteur est plus significative, les tranches les plus dominantes sont celles de 800-850m et 850- 900m, (99, 08% et 97,21%

successivement), ce qui implique l'abondance de planitude avec une faible pente, c'est-à-dire un sous-bassin sénile à relief âgé avec quelques buttes.

En outre, la réalisation du modèle numérique d'altitude, MNA, (Figure II.5) du sous-bassin en sujet montre aussi que les altitudes de ce dernier varient entre 800 et 1600m, dont les fortes occupent sa partie sud d'où se trouvent **Dj. Fourfal et Boutaleb**.

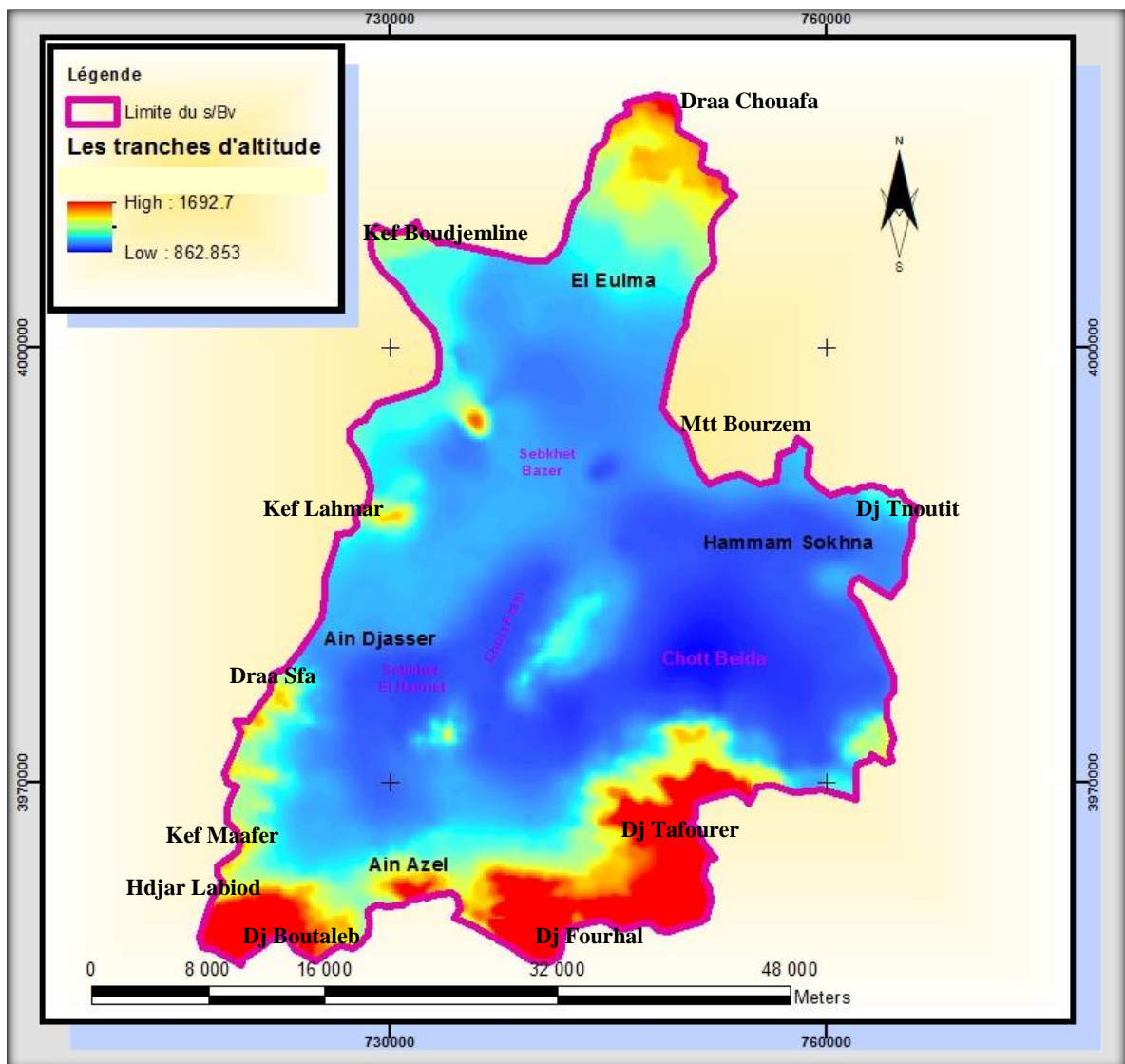


Fig. II. 5. MNA du sous- bassin versant de la zone d'étude.

II.3.5 Altitude médiane H50%:

Elle est déduite directement de la courbe hypsométrique, (Figure II.4). H50% = 975m

II.3.6 Dénivelée simple D:

On définit la dénivelée D comme étant la différence de cote entre H5% et H95%.

H5%= 1250m

H95%= 900m

$$D= 1250 - 900 = 350m$$

II.3.7 Indice de pente et relief:

L'effet du relief apparaît dans la vitesse d'écoulement et donc dans le temps de concentration.

Si la pente dans une région donnée est forte, l'écoulement sera rapide, ce qui donne un temps de concentration court.

II.3.8 Indice de pente globale I_g :

L'indice de pente globale est évalué par [M. Roche, \(1963\)](#) à partir du rectangle équivalent, facile à calculer et permet une classification de relief selon l'ORSTOM.

- Classe R1: Relief très faible: $I_g < 0,002\%$
- Classe R2: Relief faible: $0,002 < I_g < 0,005\%$
- Classe R3: Relief assez faible: $0,005 < I_g < 0,01\%$
- Classe R4: Relief modéré: $0,01 < I_g < 0,02\%$
- Classe R5: Relief assez fort: $0,02 < I_g < 0,05\%$
- Classe R6: Relief fort: $0,05 < I_g < 0,1\%$
- Classe R7: Relief très fort: $0,1 < I_g$

$$I_g = \frac{D}{L} \dots\dots\dots (Eq.4)$$

Tableau. II.4. L'indice de pente globale I_g

D (m)	L (m)	I_g	Relief
350	41600	0,008	Assez faible

II.3.9 Carte des pentes:

L'analyse globale de la carte des pentes, (**Figure II.6**) effectuée en utilisant l'image satellitaire du sous- bassin en sujet montre ce qui suit :

- ❖ Les pentes d'ordre **30 à 70%** se trouvent intensément dans le Nord de cette entité, tandis que les pentes d'ordre 2% occupent les chotts et les Sebkhass.
- ❖ Les pentes **18 à 10%** occupent toute sa superficie et elles sont remarquables surtout dans sa partie centrale, ce qui permet de dire que le bassin possède **un relief âgé**.

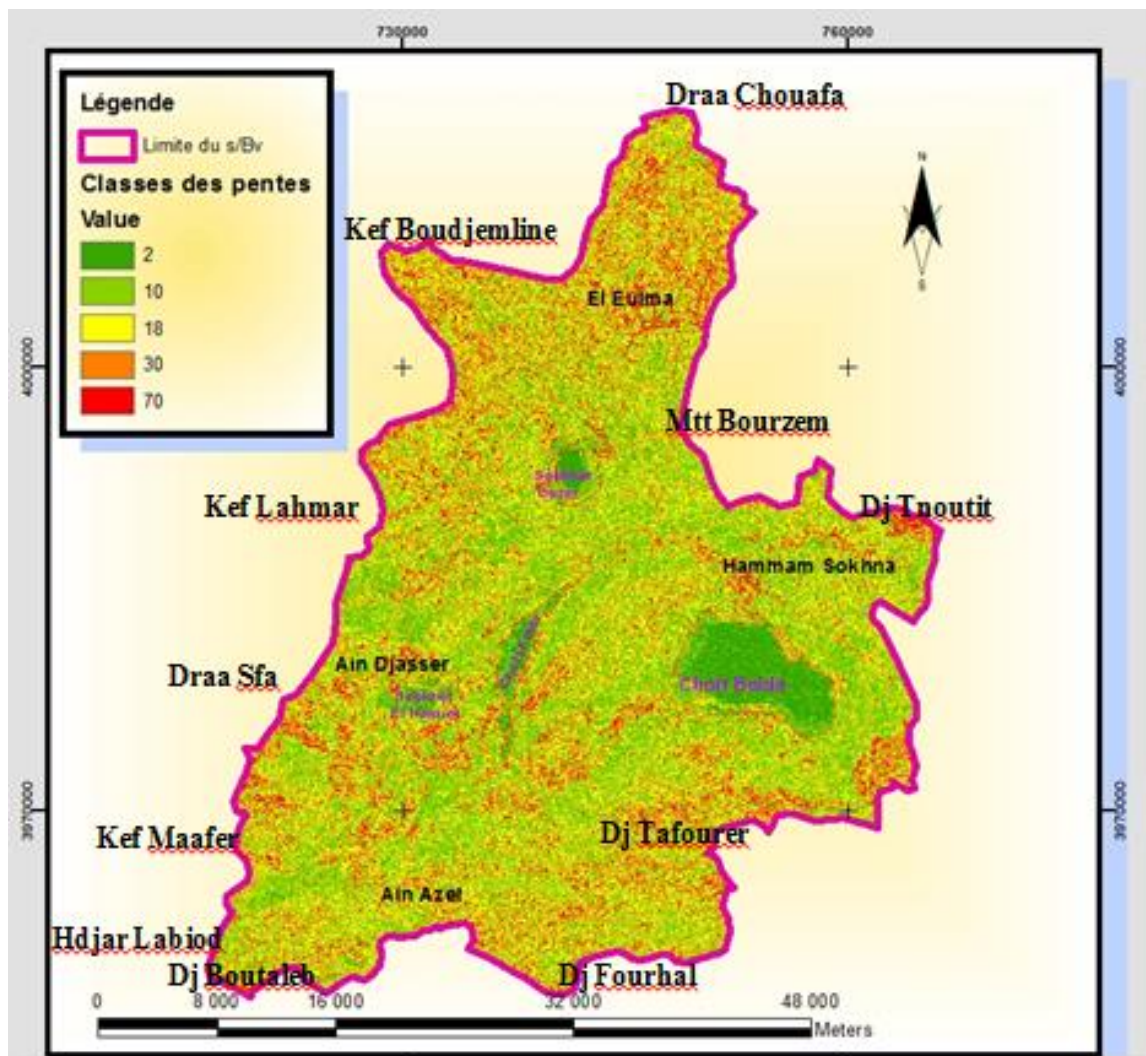


Fig. II. 6. Carte des pentes du sous- bassin versant de la zone d'étude.

II.4 Caractéristiques du réseau hydrographique:

Un réseau hydrographique est l'ensemble des canaux de drainage naturel permanents ou temporaires par où s'écoulent les eaux. Ces eaux proviennent des eaux de ruissellement ou restituées par les eaux souterraines.

Le réseau hydrographique du sous-bassin versant **07- 01** est représenté par une série de cours d'eau intermittents, dont la plupart se perdent dans les formations du quaternaire, au niveau des dépressions fermées, représentées par les Chotts et les Sebkhass indiquant un écoulement de type endoréique.

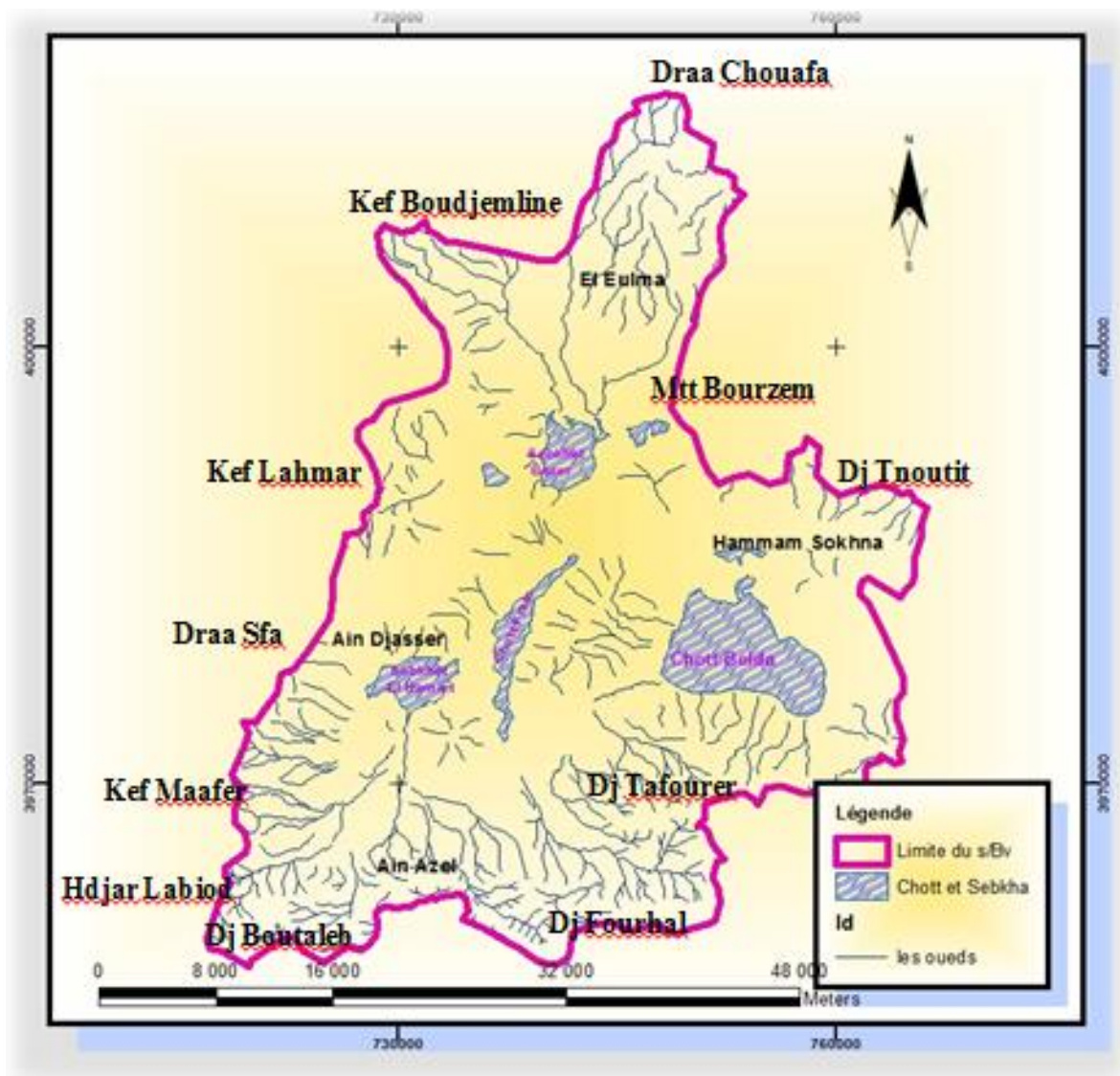


Fig. II.7 Le réseau hydrographique du sous -bassin versant de la zone d'étude.

II.5 Récapitulation des caractéristiques morphométriques:

Le tableau II.5 sera une récapitulation des différentes caractéristiques du sous -bassin versant 07-01 de la zone d'étude.

Tableau. II.5. Récapitulation des caractéristiques du sous- bassin versant 07-01.

s/Bassin versant		Sebkhet- el -Hamiet
Code		07-01
Surface A (Km ²)		584,76
Périmètre P (Km)		112
L'indice de compacité Kc		1,29
Rectangle équivalent	Longueur L (Km)	41,6
	Largeur l (Km)	14,03

Altitude moyenne H50% (m)		975	
Dénivelée D (m)	H5% (m)	350	1250
	H95% (m)		900
Indice de pente Ig		0,008	
Classification du relief		Relief assez faible	

Le sous-bassin versant **07-01** couvre une superficie de **584,76Km²**. Il a une forme allongée, (Indice de compacité **Kc = 1,29**) et un relief assez faible (**Ig = 0,008**) avec une altitude moyenne de **975m**.

La majorité des oueds sont temporaires, prenant naissance dans la partie sud de ce dernier, et ont comme exutoire Sebket-El-Hamiet, caractérisant ainsi un écoulement endoréique.

II.6 L'étude hydroclimatique:

L'Algérie, du fait de sa situation géographique se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes; la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde à climat semi-aride vers l'intérieur du pays, (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara.

L'Algérie se subdivise du Nord au Sud, en cinq zones bioclimatiques en relation avec le relief et les précipitations. **Figure II.8 (A)**. (M. COTE, 1998a). Les hautes plaines Sétifiennes appartiennent au domaine bioclimatique semi-aride. **Figure II.8 (B)**.

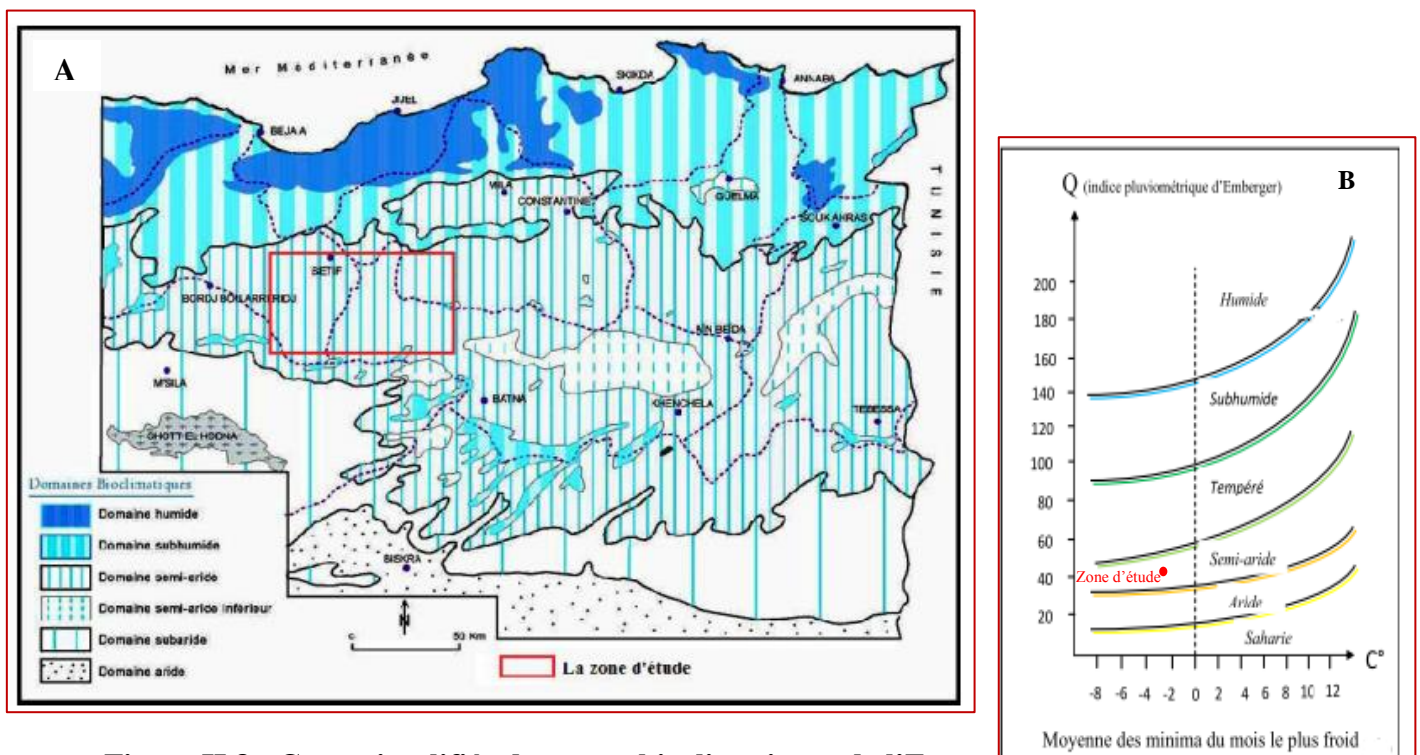


Figure II.8 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (A). (M. Côte, 1998a) In A. Mebarki, 2005 et **Climagramme d'Emberger (B)**, In M. Z. Belhadji, 2017.

Le trait le plus frappant du climat semi-aride dans les hautes plaines Sétifiennes, dont notre zone d'étude fait partie, est sans doute la grande variabilité des précipitations P et des températures T liées bien sûr aux irrégularités topographiques et aux oppositions de la Méditerranée et du Sahara. Ainsi, les montagnes de l'Atlas Saharien et celles de l'Atlas Tellien protègent les hautes plaines Sétifiennes respectivement des vents désertiques du Sud et ceux chargés en humidité venant du Nord.

Le climat de type semi-aride y est avec des hivers perturbés, rigoureux et pluvieux et des étés chauds et secs.

II.7 Données de l'O.N.M:

Il existe plusieurs stations météorologiques dans l'environnement du bassin versant de la zone d'étude qui vont nous permettre de caractériser la climatologie, entre autre la station de Ain- Azel, Ain- Djasser, El Eulma. Mais vu la discontinuité des données enregistrées au niveau de ces stations, seules celles de la station hydroclimatologique de Ain- Azel, (**Tableau II.6**) vont être utilisées pour la caractérisation du climat de cette zone d'étude, car elle se trouve pratiquement dans le gisement de Chaabet- el- Hamra, (à 700 m de la limite Nord-Ouest du gisement) et présente moins de lacunes de données.

Pour étudier ces données, nous sommes basés sur une série de mesures sur une période de 27 ans d'observations s'étalant depuis l'an 1984 à l'an 2011. Cette série est la plus récente et ne présente pas de lacunes.

Tableau II.6. Coordonnées Lambert de la station.

Station	Code	X Lambert (m)	Y Lambert (m)	Z(m)
Ain- Azel	07- 01- 02	754.000	287.700	0960

II.7.1 les précipitations:

La pluie est un facteur climatique très important pour la caractérisation du climat, elle conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau, ainsi que celui des nappes aquifères. La région d'étude est considérée parmi les régions les moins arrosées avec une moyenne interannuelle de 350mm. (**Figure II.9**).

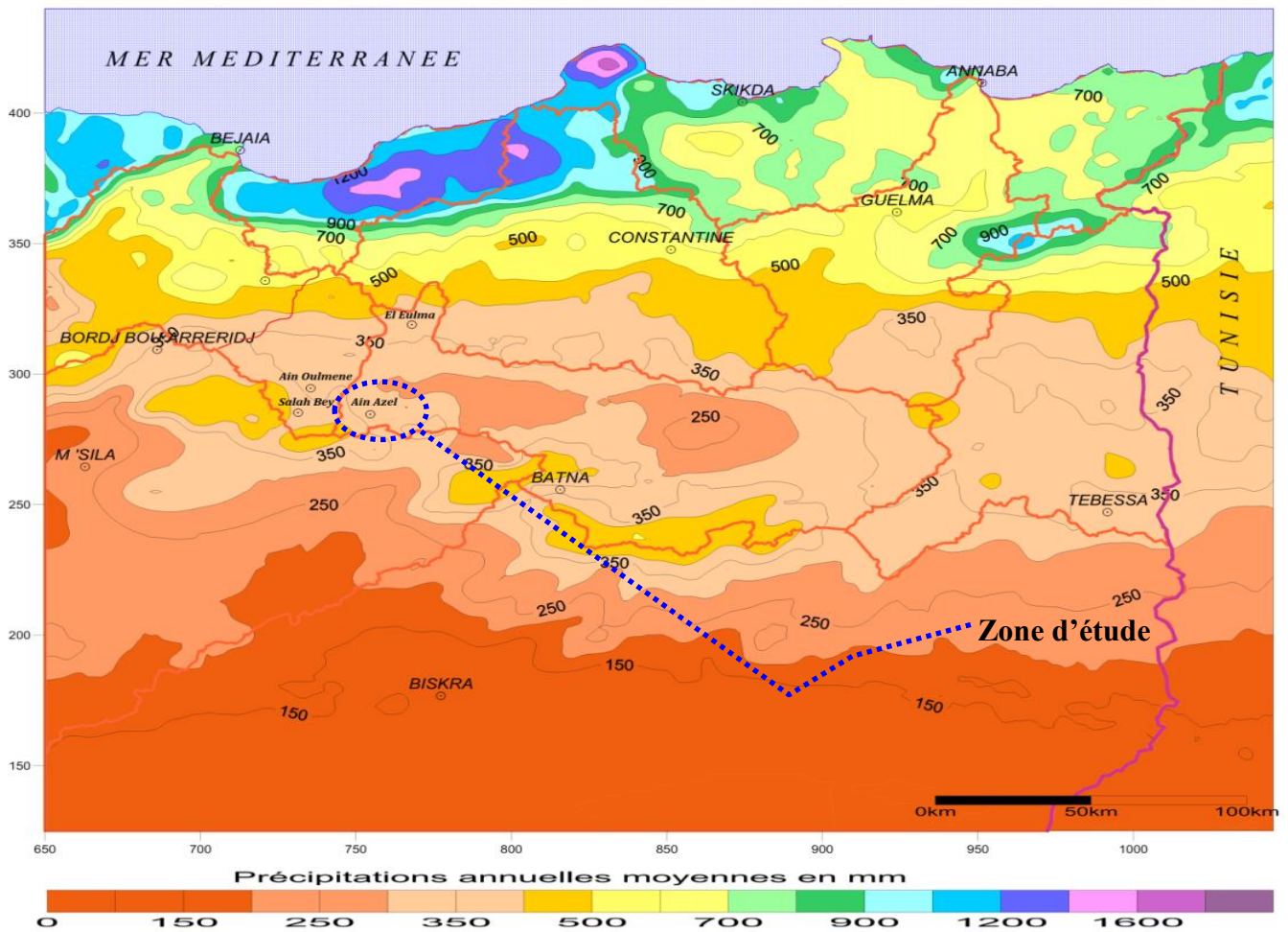


Fig. II.9. Carte des précipitations annuelles moyennes de l’Est algérien, (Établie d’après L’A.N.R.H, 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1^{er} septembre 1921 au 31 Août 1960 et du 1^{er} Septembre 1968 au 31 Août 1989).

II.7.2 Étude des précipitations de la station de Ain- Azel

La série d’observations sur la précipitation de 1984 à 2011, (Période de 27 ans) de la station de Ain- Azel est donnée, (Tableau A1.1 en Annexe 1).

Les données disponibles permettent l’estimation de la quantité de pluie moyenne annuelle reçue par le sous- bassin versant.

II.7.2.1 Variation des précipitations dans le temps

II. 7.2.1.1 Précipitations moyennes mensuelles

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations sont portées dans le tableau qui suit.

**Tableau II.7 Précipitations moyennes mensuelles
(Station de Ain- Azel, période de 1984- 2011)**

Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
30,72	21,36	31,34	36,88	41,42	19,74	8,06	10,13	35,98	27,82	23,62	32,39

Le tableau des précipitations moyennes mensuelles exprimé en histogramme, (**Figure II.10**) montre que la dépression de Ain- Azel est caractérisée par une saison plus ou moins pluvieuse des mois de **Septembre à Mai**.

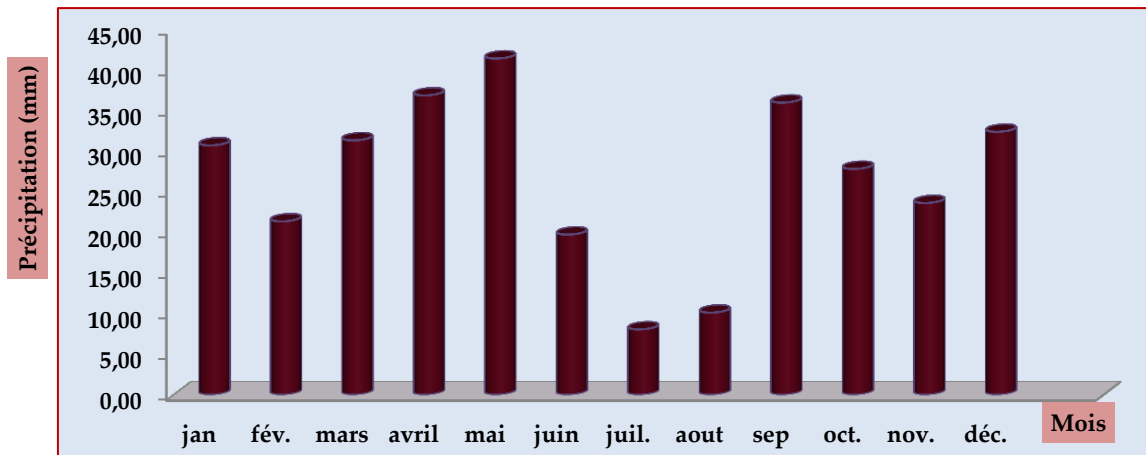


Fig.II.10. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Station de Ain- Azel, période de 1984- 2011).

II. 7.2.1.2 Précipitations moyennes annuelles:

L’histogramme de la figure, (**Figure.II.11**) représente les valeurs moyennes annuelles des précipitations issues des précipitations de la station de Ain- Azel.

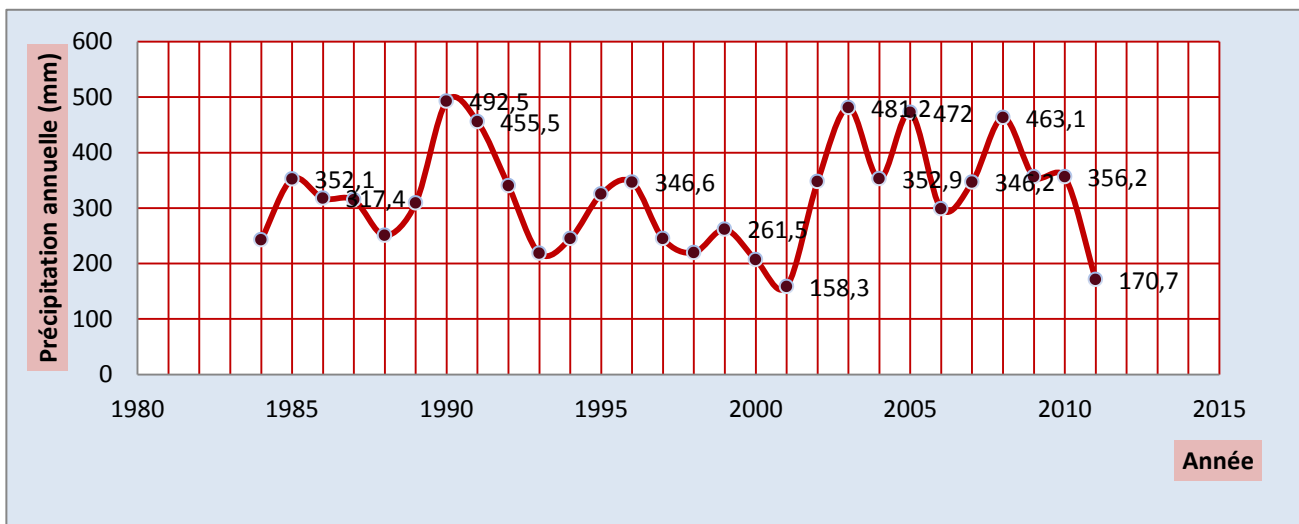


Fig. II.11. Histogramme des précipitations moyennes annuelles (Station de Ain -Azel, période de 1984- 2011).

La simple analyse de l’histogramme montre que l’année 1990 est l’année la plus pluvieuse de la série observée avec 492,5mm, et plus particulièrement les mois d’Avril et Mai, (83,6 mm et 101,4 mm respectivement). Ces précipitations représentent presque plus de 2,5 fois les précipitations moyennes de ces deux mois.

II. 7.2.1.3 Variation des précipitations dans l'espace

(Détermination de la lame d'eau précipitée)

Il existe plusieurs méthodes qui permettent finalement la détermination de la lame d'eau précipitée sur le sous- bassin versant à partir des précipitations moyennes annuelles, mesurées au niveau des différentes stations.

❑ Méthode de Thiessen:

Par manque de données, cette méthode ne peut être convenablement appliquée, elle nécessite des stations régulièrement réparties dans le sous- bassin versant à étudier.

❑ Méthode de la moyenne arithmétique:

$$P = N^{-1} \sum_{i=1}^N P_i \dots\dots\dots(\text{Eq.5})$$

Telle que:

- P: la précipitation enregistrée dans la station i;
- N: nombre de stations.
- ❖ L'application numérique donne une valeur de 334,15 mm.

II. 7.2. Température de l'air:

Contrairement aux précipitations qui constituent l'apport en eau dans le bilan hydrologique, les températures de l'air jouent un rôle très important dans les pertes par le phénomène de l'évapotranspiration.

Par manque de données des températures de l'air de la région de Ain- Azel, on ne trouve que les valeurs enregistrées de la station de Sétif (Tableau A2-Annexe 1-), seul choix, pour faire le reste du calcul (Tableau II.8).

Tableau II.8. Coordonnées Lambert de la station.

Station	Code	X Lambert (m)	Y Lambert (m)	Z(m)
Sétif	15- 06- 12	735. 274	323. 492	1009 m

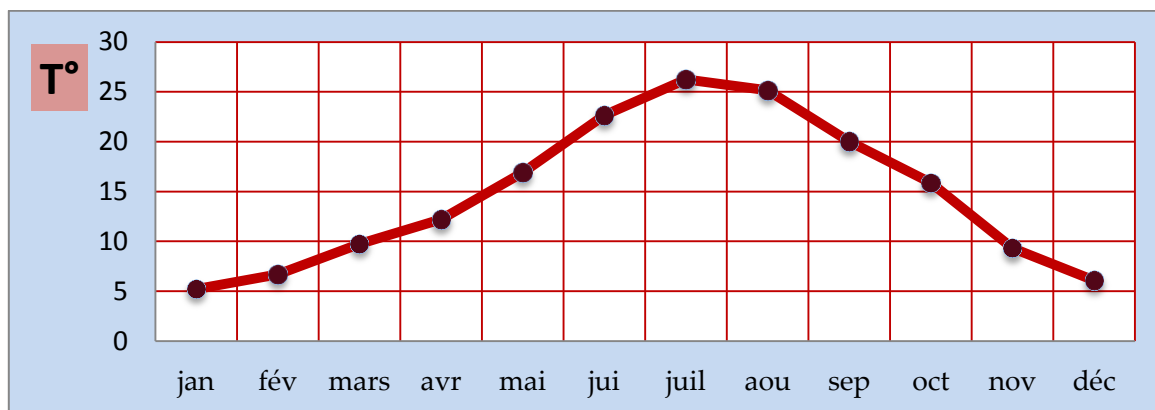
II. 7.2.1 Variation de la T° de l'air dans le temps

La distribution des températures moyennes mensuelles est très irrégulière, on note que les mois les plus chauds sont Juin, Juillet et Août, et les mois les plus froids sont Décembre, Janvier et Février.

Tableau II.9. Températures moyennes mensuelles (Station de Sétif, période 2000-2011).

Mois	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.
T°	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20,0	16,0	9,3	5,9

La figure suivante, (Figure II.12) représente le graphe $T^{\circ} = f(t)$ de la station de Sétif.



**Fig. II.12. Les températures moyennes mensuelles
(Station de Sétif, période de 2000- 2011).**

II. 8 Courbe ombrothermique:

Selon la définition de H. Gaussen et F. Bagnouls, (1957), un mois sec est un mois où la somme totale de précipitation est égale ou inférieure au double de la température moyenne mensuelle du même mois $P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$, cette méthode simplifiée permet de déterminer la période humide ainsi que la période sèche.

L'établissement du diagramme ombro-thermique à partir des données de températures et de précipitations de la station de Sétif et de Ain- Azel peut nous conduire à distinguer deux périodes, (Figure.II.13) :

1. Une période froide et humide, pluvieuse qui s'étale sur neuf mois, (de Septembre jusqu'au Mai), avec de faibles températures.
2. La seconde est une période chaude et sèche relativement courte, qui s'étale sur trois mois, (du mois de Juin jusqu'à Août), caractérisée par de faibles précipitations, (Tableau II.10).

Tableau II.10. Températures et précipitations moyennes mensuelles (Température: Station de Sétif, période 2000-2011, Précipitations: Station de Ain- Azel, période 2000-2011).

	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.
P (mm)	33	23	33	46	45	25	5	12	46	31	28	38
T°	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20,0	16,0	9,3	5,9

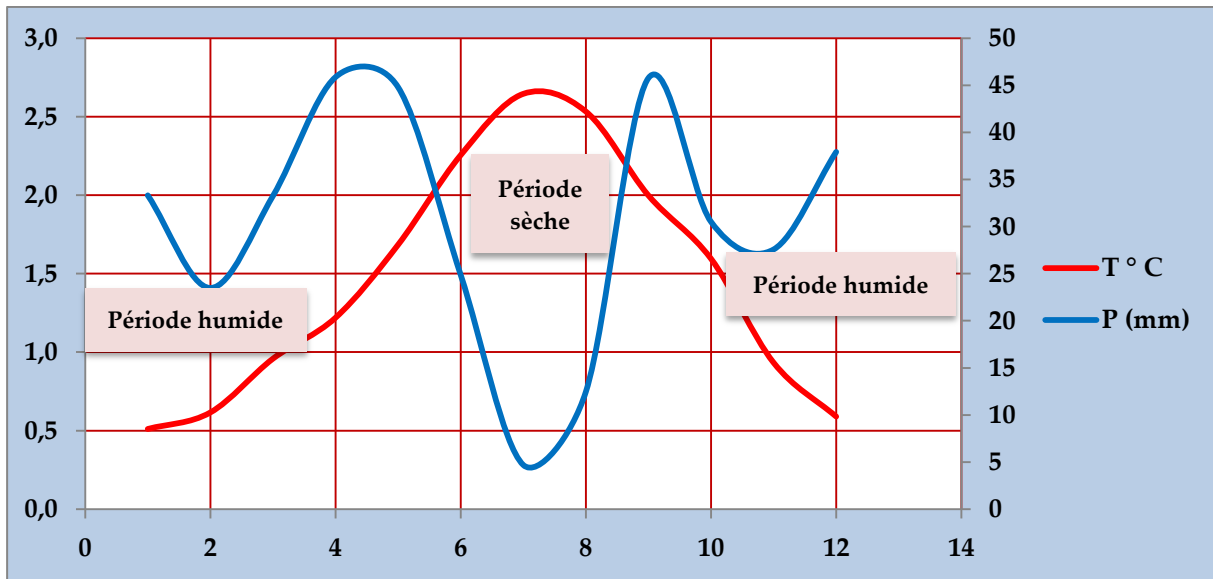


Fig. II.13 Courbe ombrothermique (Température: Station de Sétif, période 2000-2011et (Précipitation: Station de Ain- Azel, période 2000-2011).

II. 9 Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte)

La méthode d'Euverte fait appel à deux paramètres essentiels qui sont la température et la précipitation établies mensuellement, où le rapport P/T permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol. Le rapport permet également de définir quatre types de régimes :

- $(P/T) < 1$, le régime est très sec ;
- $1 < (P/T) < 2$, le régime est sec ;
- $2 < (P/T) < 3$, le régime est sub-humide ;
- $(P/T) > 3$, le régime est humide.

Tableau II.11. Variation des valeurs de rapport (P/T) d'après la méthode d'Euverte.

	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	33	23	33	46	45	25	5	12	46	31	28	38
T°	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20	16	9,3	5,9
P/T	6,47	3,71	3,44	3,77	2,68	1,11	0,19	0,47	2,30	1,94	3,01	6,44

Les résultats obtenus du rapport (P/T) synthétisés dans le **tableau II.11** montrent que la période humide commence du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril, la période sub-humide correspond aux mois de Septembre et Mai, alors que la période sèche correspond au mois de Juin, le régime très sec présenté par les mois de Juillet et Août.

II.10 Indice d'aridité

Cet indice permet d'identifier le type du climat caractérisant la région étudiée. La formule de De Martonne permet d'apprécier ce paramètre.

$$I = P / (T + 10) \dots\dots\dots (\text{Eq.6})$$

Où :

P : précipitation moyenne mensuelle (mm) ;

T : température moyenne mensuelle (°C).

Pour :

- 20 < I < 30 : le climat est tempéré;
- 10 < I < 20 : le climat est semi-aride,
- 7.5 < I < 10 : le climat est steppique;
- 5 < I < 7.5 : le climat est désertique ;
- I < 5 : le climat est hyper -aride.

Pour notre région, comme T= 14,62° C et P = 365 mm permettent de donner un indice d'aridité de l'ordre de 14.82, ce qui détermine un climat semi-aride, (**Figure II.14**).

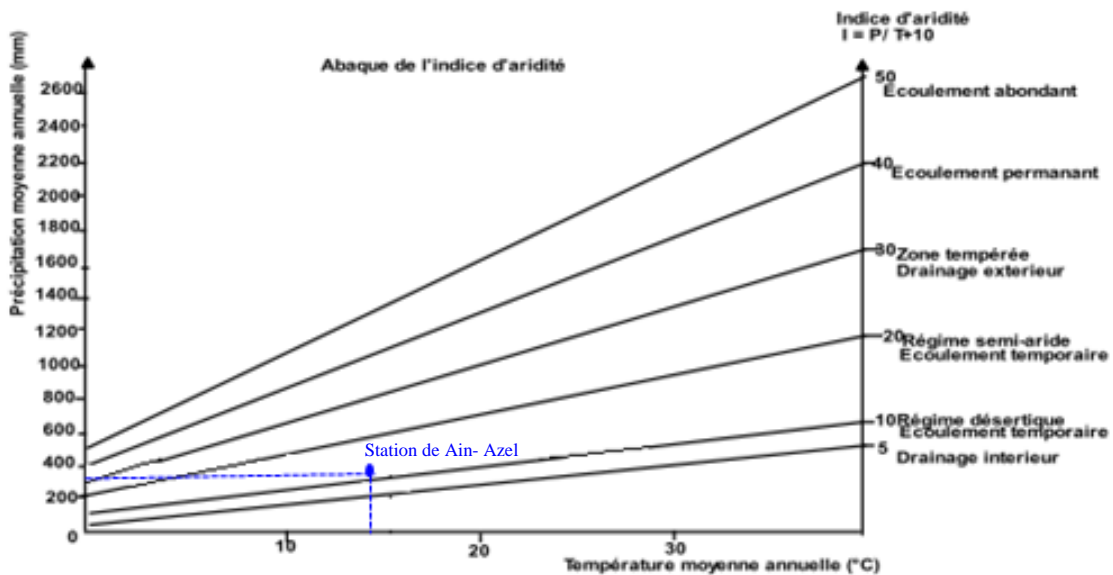


Figure II.14. Abaque de l'Indice d'aridité annuel de De Martonne.

II. 11 L'indice climatique:

Le géographe [De Martonne](#) a défini en 1923 un indice d'aridité « A » qui tient compte des précipitations P et des températures T. Cet indice est calculé par la formule suivante:

$$A = \frac{P}{T + 10} \dots\dots\dots (\text{Eq. 7})$$

- A: l'indice d'aridité;
- P: précipitations annuelles moyennes;
- T: température moyenne annuelle.

Pour la station de Ain- Azel, « A » calculé est égal à **14. 82**.

Selon [De Martonne](#), les valeurs comprises entre **10 et 20** caractérisent un milieu **semi-aride**.

II. 12 Évapotranspiration potentielle et réelle

L'évapotranspiration joue un rôle très important dans les études hydrologiques, car c'est un paramètre qui intervient dans l'étude du bilan hydrologique.

Toute perte sous forme de vapeur est l'évapotranspiration qui est l'aboutissement de deux phénomènes, l'un physique est l'évaporation, et l'autre biologique la transpiration. L'évapotranspiration joue un rôle primordial dans le cycle de l'eau, et ce facteur est lié à plusieurs paramètres physiques comme la température (T°), l'air, l'eau et la vitesse du vent. ([Bouaicha, 2018](#)).

Ce paramètre climatique peut être mesuré directement sur le terrain par des appareils : évaporomètres, bacs d'évaporation. ([A. Demdoum, 2010](#)). Le calcul à défaut, par des formules empiriques de certains auteurs comme [C. W. Thornthwaite \(1948\)](#), [L. Turc \(1961\)](#).

II.12.1 L'évapotranspiration réelle

Du fait des conditions qui règnent sur les zones arides et subarides, toutes les formules de calculs qui suivent, mises au point en régime tempéré n'auront qu'une valeur peu significative. C'est le cas pour [Wundt, Coutagne, Turc et Thornthwaite](#).

II.12.1.1 Formule de L. Turc:

Cette méthode fait intervenir uniquement les températures et les précipitations.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots \dots \dots (Eq.8)$$

- **P**: Précipitation moyenne annuelle en mm
- **T**: Température moyenne annuelle en C°
- **L = 300 + 25T + 0.05T³** : pouvoir évaporant de l’atmosphère

Après le calcul, on trouve ETR = 384,44mm.

II.12.1.2 Formule de Coutagne:

Cette formule fait intervenir deux paramètres: précipitation P et température T.

$$D = P - \lambda P^2 \dots \dots \dots (Eq.9)$$

Avec : $\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 T}$ et cette formule ne sera valable qu’après la vérification de la condition suivante:

$$\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$$

Où:

- **D**: déficit d’écoulement en mm par an
- **P**: précipitation moyenne annuelle en mm
- **T**: température moyenne annuelle en °C
- **λ**: paramètre dépendant de la température.

Tableau II.12. Vérification de la condition.

T°	λ	1/8λ	1/2λ	P (m)
14.62	0.35	0.356	1.42	0.365

- La condition n’est pas vérifiée, ce qui implique que la valeur de l’ETR ne peut pas être calculée par cette formule.
- Apparemment, **la formule de Coutagne** n’est pas justifiée en zone semi-aride.

II.12.1.3 L’abaque de Wundt:

L’évapotranspiration réelle peut être évaluée à partir de l’abaque de **Wundt**, (modifié par **Coutagne**, **Figure II.15**), donnant le déficit d’écoulement moyen annuel en fonction de la température T° et la précipitation moyenne annuelle.

La valeur obtenue à la station de **Ain- Azel** est égale à **350mm**.

II.12.1.4 Abaque de P. Verdeil

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou du déficit d'écoulement, P. Verdeil (1988) a établi un abaque bi-logarithmique en tenant compte uniquement des précipitations annuelles.

C'est une méthode applicable pour les régions semi-arides en Algérie, (In Mihoubi, 2009), et dont les précipitations ne dépassent pas les 600 mm, comme c'est le cas de la station de Ain- Azel.

L'ETR déterminé par la projection sur la droite représentée dans l'abaque, (Figure.II.16), pour la station de Ain- Azel est égale à 350mm.

Les résultats de l'ETR obtenue par différentes méthodes sont exposés au **Tableau II.13.**

Tableau II.13. Estimation de l'évapotranspiration réelle avec différentes méthodes.

Méthode	ETR (mm)	Taux / P
Turc	348,44	95.46%
Coutagne	Non justifiée	
Abaque de Wundt	350	95.89%
Abaque de Verdeil	350	95.89%

On constate que les résultats de l'ETR selon les différentes méthodes présentent des valeurs identiques.

II.12.2 L'évapotranspiration potentielle ETP :

Thornthwaite (1948) a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'ETP, où le pouvoir évaporant pour chaque mois est déterminé à partir de la relation suivante:

$$EP = 16 \times \left(\frac{10T}{I}\right)^A \dots\dots\dots(\text{Eq.10})$$

Avec:

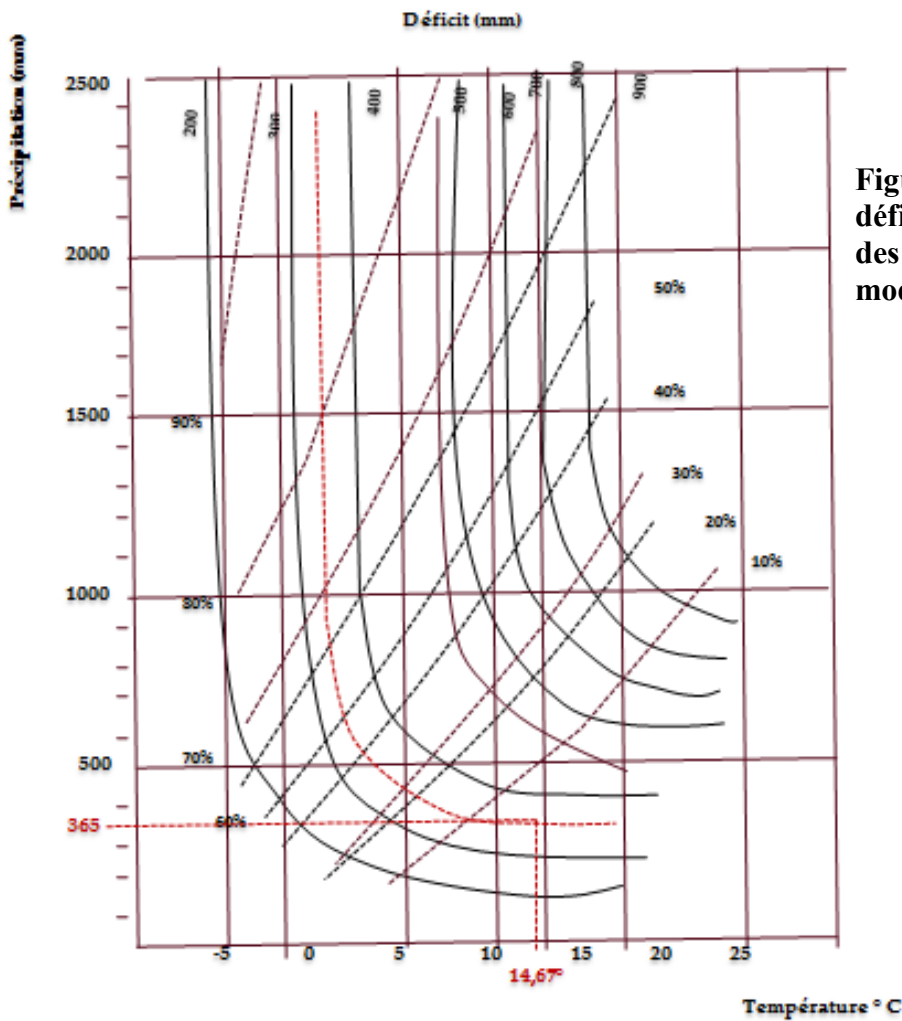


Figure II.15 Évaluation des éléments et déficit en fonction de la température et des précipitations (Abaque de Wundt modifié par Coutagne).

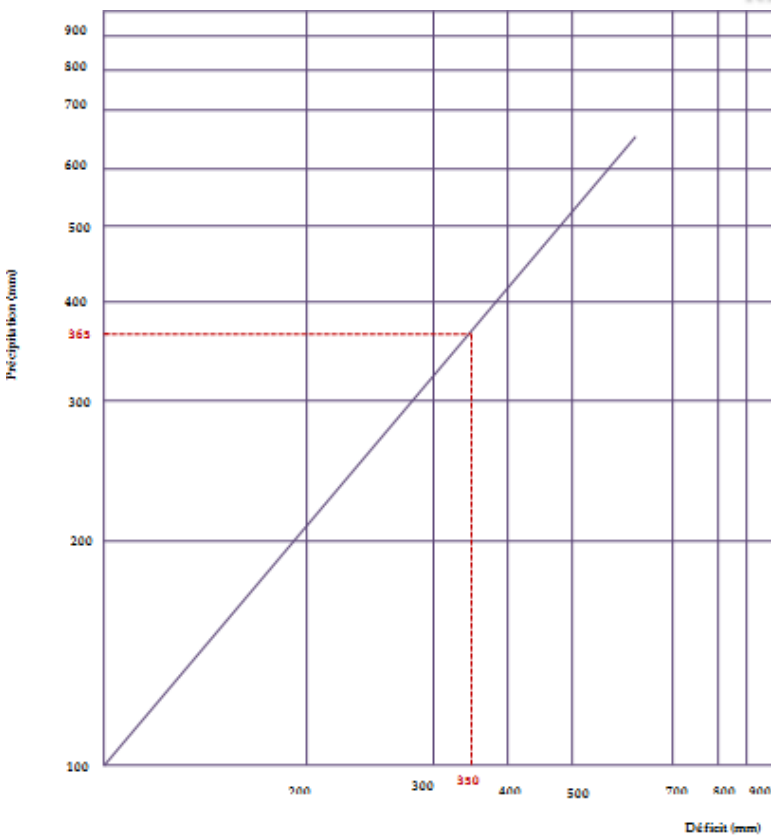


Figure II.16 Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement Algérie, d'après P. Verdeil, 1988.

- EP désigne l'évapotranspiration potentielle non corrigée (mm) ;
- T est la température moyenne mensuelle (°C) ;
- I désigne l'indice thermique annuel : $I = \sum_{i=1}^{12} i$
i désigne l'indice thermique mensuel : $i = (T / 5)^{1,514}$
- $A = (6.75 \times 10^{-7} \times I^3) - (7.71 \times 10^{-5} \times I^2) + (1.79 \times 10^{-2} \times I) + 0.49239$

L'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée est obtenue en multipliant EP par un coefficient de correction **K**, dépendant de la latitude du sous- bassin versant.

**Tableau II.14. Évapotranspiration potentielle ETP selon Thornthwaite
(Période 2000-2010).**

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
T(°C)	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20	16	9,3	5,9
i	1.03	1.38	2.68	3.85	6.26	9.81	12.48	11.64	8.15	5.81	2.55	1.28
I	1.03	1.38	2.68	3.85	6.26	9.81	12.48	11.64	8.15	5.81	2.55	1.28
EP (mm)	10.50	14.21	27.96	40.51	66.45	105.14	134.50	125.20	87.03	61.62	26.62	13.16
K (36°)	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
ETP _{corr} (mm)	9,13	12,07	28,79	44,15	80,40	127,21	165,43	145,23	89,64	59,77	22,89	11,18

II.13 Bilan hydrique selon Thornthwaite

Le but ultime d'une étude de ressources hydriques d'un sous- bassin versant est l'établissement de son bilan hydrologique pour une année moyenne. Ce bilan est établi (**Tableau II.15**), à l'échelle mensuelle, basé sur des données connues des précipitations P et de l'évapotranspiration potentielle ETP.

II.13.1 Calcul des réserves facilement utilisables RFU:

Avant de commencer le calcul du bilan, il faut mentionner que la RFU, (Réserves facilement utilisables) est calculée à partir de la formule de Hallaire.

Tel que:

$$RFU = \frac{C-F}{100} \times H \times d + 30 \dots\dots\dots (Eq.11)$$

- RFU: Réserves facilement utilisées
- C: capacité de rétention du sol: c'est- à- dire, elle correspond au maximum d'eau que le sol peut retenir lorsque son drainage est assuré librement;

- **F**: capacité au point de flétrissement: c'est-à-dire : c'est la limite inférieure de l'eau absorbable par les plantes;
 - **H**: profondeur d'enracinement;
 - **D**: densité apparente du sol.
 - **Les 30mm** correspondent à l'enracinement capillaire pour les sables limoneux.
- Ne disposant pas de ces paramètres, nous retenons une valeur de **36mm pour la RFU** correspondant à la quantité d'eau optimale que le sol peut retenir, (M. A. Bellouche, 1996). La valeur de 36mm pour la RFU est utilisée pour les calculs.
- Le bilan de Thornthwaite est établi à partir du mois de Septembre, au moment où les réserves commencent à se reconstituer.
- $P > ETP$: $ETP = ETR$
 - $P < ETP$: a/ $ETP \leq P + RFU$: $ETR = ETP$
b/ $ETP > P + RFU$: $ETR = P + RFU$
 - $RFU > 36mm$: un excédent (water surplus)
 - $RFU < 0mm$: un déficit agricole.

Tableau II. 15. Estimation du bilan hydrologique selon Thornthwaite pour la station de Ain- Azel (Période 2000-2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Ann
T°	20,00	16,00	9,30	5,90	5,10	6,20	9,60	12,20	16,80	22,60	26,50	25,30	14.62
P	46,00	31,00	28,00	38,00	33,00	23,00	33,00	46,00	45,00	25,00	05,00	12,00	365,00
i	08.15	5.81	02.55	01.28	01.03	01.38	02.68	03.85	06.26	09.81	12.48	11.64	66.92
K	01,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	-
EP	87,03	61,62	26,62	13,16	10,50	14,21	27,96	40,51	66,45	105,14	134,50	125,20	712,9
ETP	89,64	59,77	22,89	11,18	9,13	12,07	28,79	44,15	80,40	127,21	165,43	145,23	795,95
ETR	46,00	31,00	22,89	11,18	9,13	12,07	28,79	44,15	80,40	25,6	5,00	12,00	328,21
RFU	0	0	5,11	31,93	36	36	36	36	0,6	0	0	0	
Da	43,64	28,77	0	0	0	0	0	0	0	102,21	160,43	133,23	468,28
Ws	0	0	0	0	19,80	10,93	4,21	1,85	0	0	0	0	32,57

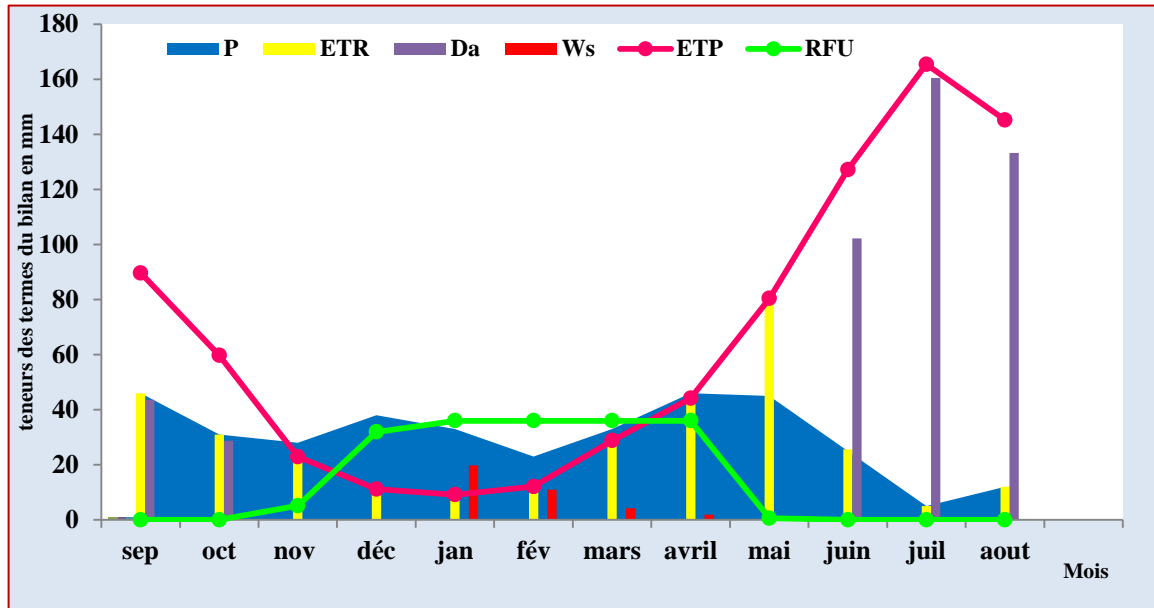


Figure II.17 Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Ain-Azel (Période 2000-2010).

L'analyse des résultats du **Tableau II. 15.** et **Figure. II.17,** nous a permis de faire les remarques suivantes

- L'ETR est égale à 328,21mm, et représente 89,92% des précipitations.
- Le renouvellement des réserves du sol débute au mois de Novembre jusqu'au mois de Mai.
- Le déficit agricole est de l'ordre de l'ordre de 468,28mm, la saison commence du mois de Mai jusqu'au mois de Novembre.
- Un excès de l'ordre de 32,57mm qui représente les mois de Janvier, Février, Mars et Avril.

II.14 Bilan hydrologique :

L'équation du bilan s'écrit comme suit:

$$P = ETR + R + I \dots\dots\dots(\text{Eq.12})$$

- P: la hauteur de la lame d'eau précipitée en mm
- E: l'évapotranspiration réelle en mm
- R: le ruissellement en mm
- I: l'infiltration

II.14.1 Estimation du ruissellement annuel:

La formule de **Tixeront- Berkaloff** applicable en zone semi-aride, permet d'estimer le ruissellement à l'aide de la relation suivante:

$$R = \frac{P^3}{3 \times ETP^2} \dots\dots\dots (Eq.13)$$

- R: Ruissellement annuel en mm;
- P: Précipitations moyennes annuelles en mm;
- ETP: Évapotranspiration potentielle annuelle en mm.

Soit : P= 365mm

$$ETP=795,95mm \quad \longrightarrow \quad R=25,58mm$$

II.14.2 Infiltration

L'infiltration est le passage d'eau à travers la surface du sol en mouvement descendant de la zone non saturée jusqu'à la zone saturée. (G. Castany et J. Margat, 1977).

On peut estimer ce paramètre suivant la formule suivante :

$$I= P-(ETR+R)\dots\dots\dots (Eq.14)$$

De ce qui précède, on retient les valeurs suivantes:

- P = 365mm
- ETR = 328,21mm \longrightarrow I = 11,21 mm soit un 3.07%.
- R = 25,58 mm

II.14.3 lame d'eau écoulee (E)

$$E = R + I \dots\dots\dots (Eq.15)$$

$$E = 25,58 + 11,21 = 36,79 \text{ mm}$$

L'ensemble de La lame d'eau ruisselée et infiltrée est égal à 36,79 mm et représente 10,07% des précipitations moyennes annuelles enregistrées sur la région de Ain- Azel.

II.15 Conclusion:

Le secteur étudié est caractérisé par un climat sec semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de 365mm et des températures moyennes annuelles de 14.62°C.

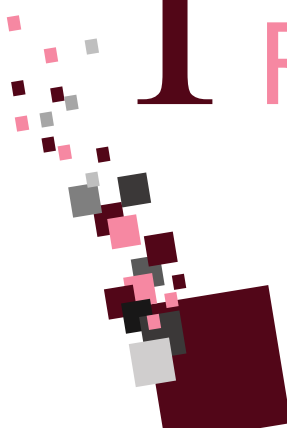
L'analyse des précipitations mensuelles montre que la courbe des précipitations est en dessous de la courbe thermique depuis le mois du Juin jusqu'au mois d'Août, ce qui correspond à une période de sécheresse.

L'évapotranspiration réelle retenue est estimée à 328,21mm et qui représente 89.92% des précipitations, et l'évapotranspiration potentielle est estimée à 795,95mm, donc, le bilan hydrique de la région est très déficitaire: le déficit est estimé à 467,68 mm.

L'excédent est évalué à 32,57 mm selon le bilan hydrologique de Thornthwaite.

Le ruissellement est estimé par la formule de Tixeront- Berkaloff à 25,28mm.

L'infiltration représente la quantité d'eau qui pénètre dans le sous-sol, ce paramètre est très important du point de vue hydrogéologique, mais il est difficile à apprécier, et vu les valeurs estimées de l'ETP et l'ETR, on peut dire que l'infiltration est très faible, (3,07%).



TROISIÈME
CHAPITRE

III. 1. Introduction :

L'étude hydrogéologique permet de compléter et de confirmer ce qui a été précédemment prédéterminé par la géologie. Cette étude s'avère nécessaire pour arriver à une bonne connaissance des caractéristiques hydrogéologiques des différents aquifères existants, elle permet donc de reconnaître les potentialités en eaux souterraines de la région.

Pour mieux appréhender l'hydrogéologie de notre région d'étude, nous avons suivi les démarches classiques de toute étude hydrogéologique :

- ❖ Mesure piézométrique sur terrain, (inventaire des points d'eau) ;
- ❖ Élaboration de la carte piézométrique ;
- ❖ Interprétation de la carte piézométrique ;
- ❖ Étude des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

III. 2. Aperçu sur l'hydrogéologie de la région de Sétif:

Du point de vue hydrogéologique, la région de Sétif est répartie en deux grandes zones:

- ❑ La zone Nord dite à faible potentialité hydrique souterraine qui est caractérisée par un relief très morcelé par la néotectonique, l'agressivité de l'érosion, la faiblesse des masses calcaires et la large dominance des formations argileuses ou marneuses qui créent de mauvaises conditions pour l'existence d'aquifères. Les sources sont faibles, dispersées et peu intéressantes à cause de l'irrégularité de leur débit.
- ❑ La zone Sud de la région Sétifienne ; dont notre zone d'étude fait partie ; dite à moyenne et forte potentialité hydrique, est par contre représentée par un grand développement des formations Subhorizontaux détritiques Mio-Plio-Quaternaire qui détermine l'existence d'une nappe superficielle déjà surexploitée. Par ailleurs, il y a un grand nombre d'aquifères potentiels correspondant à des formations carbonatées épaisses et qui sont répertoriés comme suit : **(Fig. III.1)**

- ❖ L'aquifère de l'Yprésien-Lutétien inférieur (e4-5);
- ❖ L'aquifère du Campano-Maestrichtien (C6c)
- ❖ L'aquifère du Cénomano-Turonien (C1-2);
- ❖ L'aquifère de l'Aptien (n5);
- ❖ L'aquifère du Barrémien (n4);
- ❖ L'aquifère de l'Hauterivien (n3)
- ❖ L'aquifère du Jurassique (Jd)

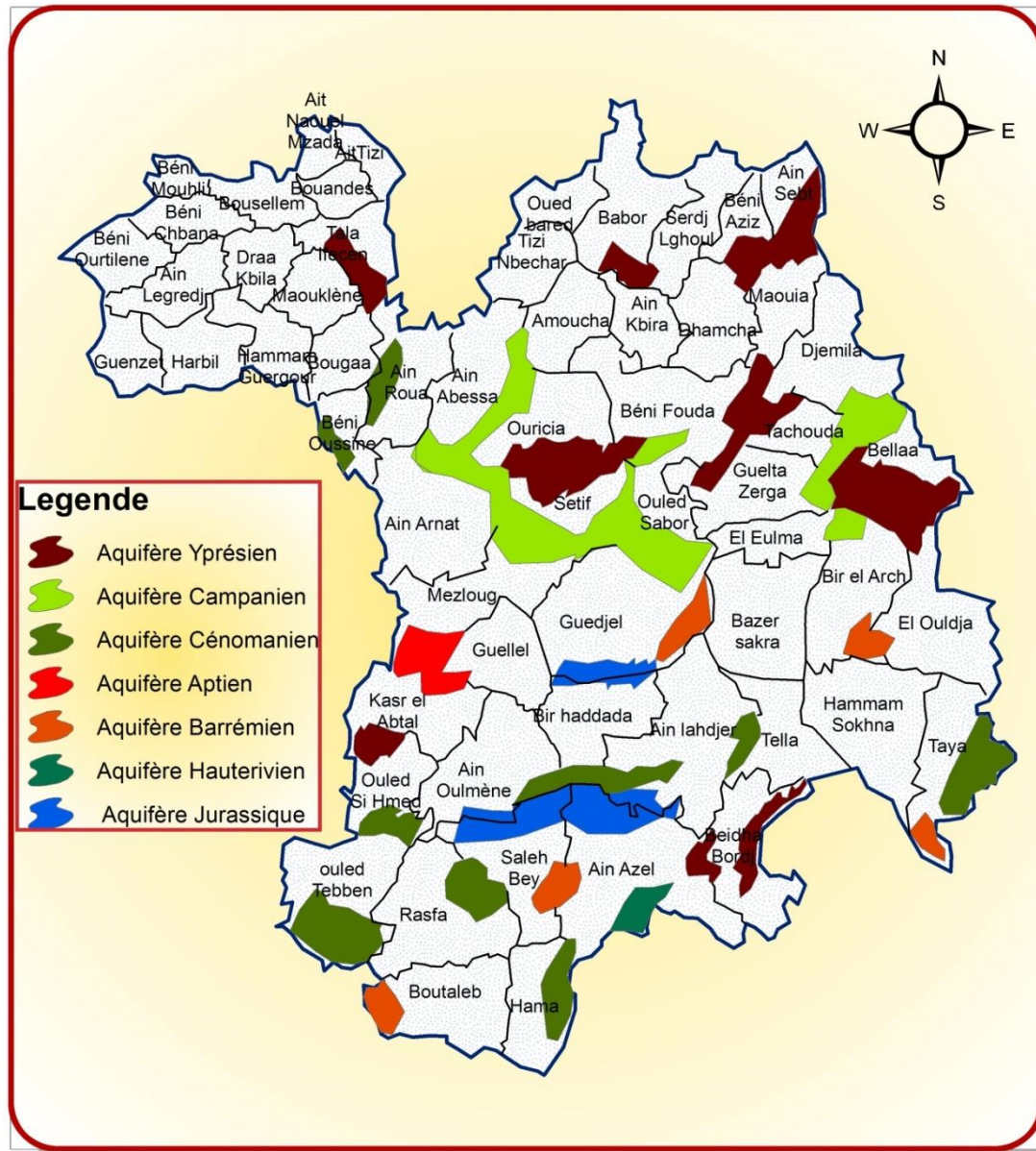


Fig. III.1 Carte schématique descriptive des principales nappes aquifères existantes à travers la région de Sétif (DREWS, 2011).

III.3. Contexte hydrogéologique de Ain- Azel :

La région des hautes plaines Sétifiennes allant d’El- Eulma vers Ain- Azel dont le gisement de Chaabet- el- Hamra fait partie a fait l’objet de plusieurs investigations hydrogéologiques, (H. Kada et A. Demdoug, 2020 ; H. Kada, 2014 ; M. A. Bellouche, 2016, 1996; A. Demdoug, 2010; A. Demdoug et M. Djebbar, 2009; L. Belkhiri et al, 2010; L. Belkhiri, 2005; A. Boudoukha, 1998; 1988) où ils ont identifié deux aquifères importants. Du point de vue hydrogéologique, la zone d’étude renferme :

III.3.1. Aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire :

La couverture Mio-Plio-Quaternaire représente un aquifère superficiel, c’est un aquifère hétérogène, constitué essentiellement par des alluvions anciennes et récentes, des

terres arables, des glacis polygéniques, des calcaires villafranchiens, des calcaires lacustres et cailloutis du Pliocène, des sables, limons et conglomérats du Miocène. L'épaisseur de ces formations varie d'un endroit à un autre.

III.3.2. Aquifère profond (Crétacé inférieur) :

Les niveaux d'aquifères sont édifiés au niveau des bancs carbonatés fortement tectonisés et bien fissurés et karstifiés, ceci leur donne la capacité de renfermer des potentiels hydriques considérables. Ce sont des aquifères à porosité secondaire qui sont constitués dans des formations profondes du Crétacé.

III.4. Inventaire des points d'eau

La zone d'étude présente un grand nombre de forages qui sont dispersés en fonction de la situation de l'agglomération et qui sont destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation.

Deux campagnes piézométriques, (**Juin 2015 et Mai 2016**), en collaboration avec les services techniques de l'ANRH ont été effectuées dans la plaine de Ain- Azel. Nous avons recensé 11 forages, (**Fig.III.2**), dont la majorité sont des ouvrages récents et imparfaits de 32 à 120m de profondeur, répartis irrégulièrement sur toute la plaine et qui servent en grande partie à l'irrigation et aux besoins domestiques.

Le tracé des deux cartes piézométriques, (**Figure III.3 et III.4**), à partir des deux campagnes, (**Juin 2015, Mai 2016**), est basé sur un inventaire de 11 points d'eau dont les données sont reportées au tableau III.1, nous permet cependant de faire quelques observations sur l'écoulement des eaux souterraines et l'évolution de la surface piézométrique dans le temps.

Tableau III.1. Inventaire des points d'eau dans la zone d'étude

N° du point d'eau	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	PROFONDEUR (m)	CP(m) JUIN 2015	CP(m) Mai 2016
1	724938,52	3972731,26	930	120	856,55	857,86
2	725386,45	3965988,79	952	50	933,4	932,75
3	725830,45	3964335,37	985	99	952,55	952,83
4	727487,53	3975108,71	905	43	893,75	891,62
5	723465,68	3965477,6	974	32	944,22	943,56
6	729727,75	3968074,27	919	90	857,68	857,18
7	735724,03	3975819,37	900	55	859,35	858,22
8	727768,84	3971015,3	914	/	841,11	840,06
9	736679,58	3970001,56	920	/	821,88	822,81
10	737010,13	3965867,43	1010	89	991,02	990,67
11	735090,57	3970402,78	925	/	827,55	825,99

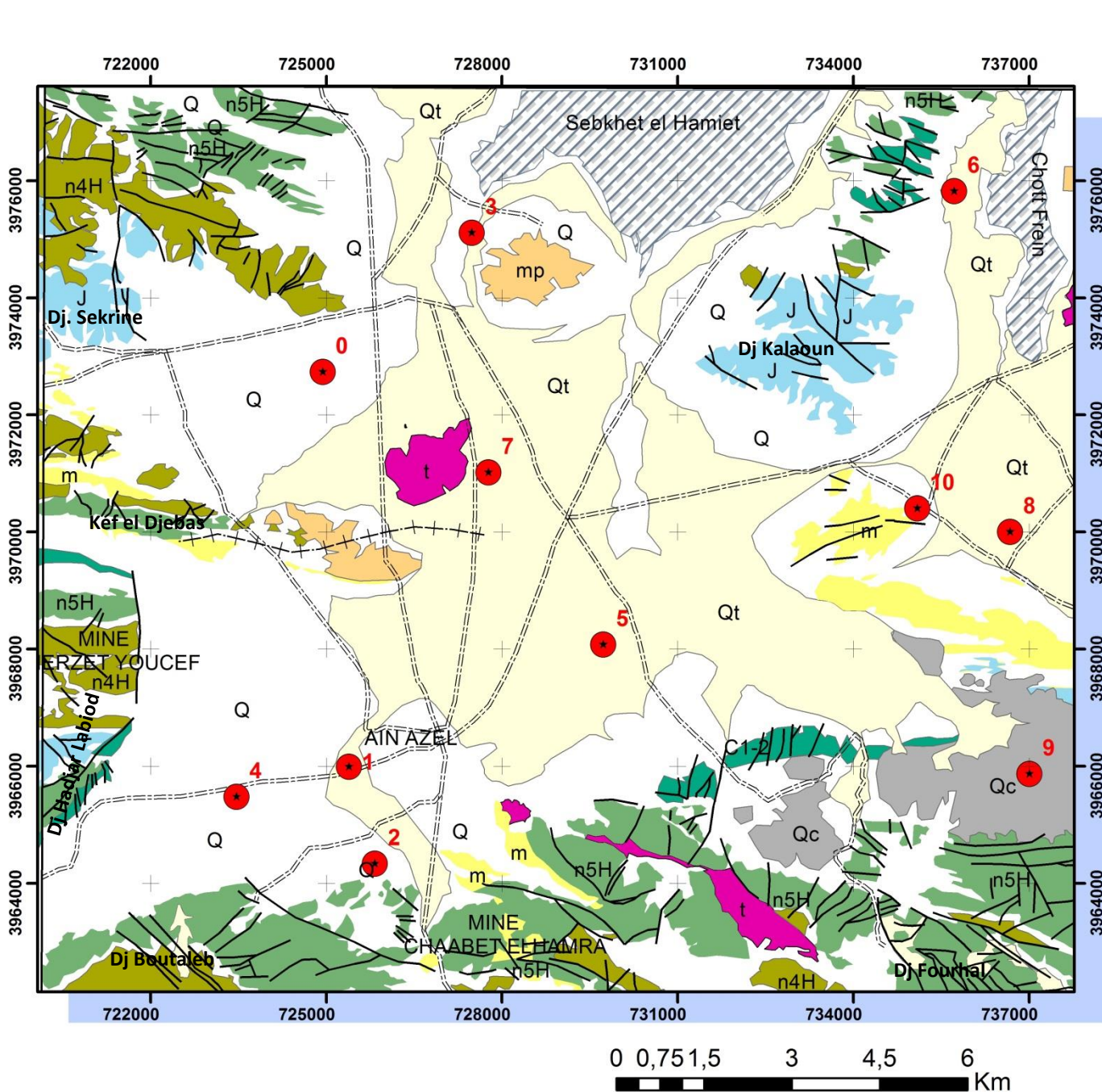
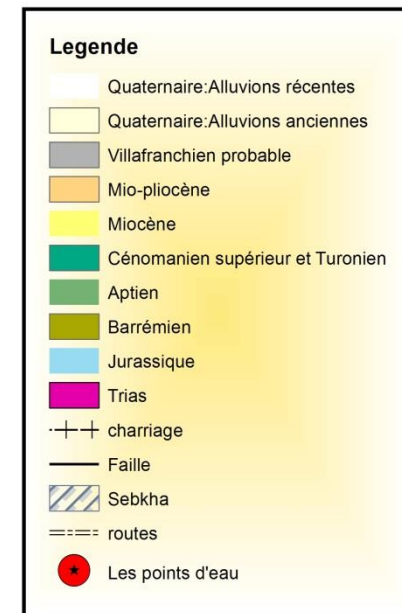


Figure III.2 : Carte d'inventaire des points d'eau dans la région de Ain- Azel (D'après la carte géologique de Ain- Azel, feuille n°143, et Ain- Lahdjer feuille n° 144, Échelle 1/50000)



III.5 Interprétation de la carte piézométrique

Les cartes piézométriques dressées, (**Figure III.3 et III.4**), nous a permis de faire quelques observations sur l'écoulement des eaux souterraines et l'évolution de la surface piézométrique dans l'espace.

À partir de l'examen de la carte piézométrique couvrant la zone d'étude, il en ressort :

III. 5.1 Pour la première campagne (Juin 2015):

- Nous avons constaté un sens d'écoulement principal vers le plaine de Ain Azel, c'est-à-dire : du Nord vers le Sud et du Sud vers le Nord ;
- La cote piézométrique la plus élevée est située à l'Est de la mine de Chaabet- el-Hamra, où le sens d'écoulement est toujours vers le plaine ;
- Les cotes piézométriques les plus basses s'expliquent par une élévation du substratum ;
- Toute la zone d'étude est caractérisée par des courbes piézométriques régulières plus ou moins espacées, (gradient hydraulique moyen et une bonne perméabilité), traduisant une zone d'accumulation ;
- La zone Sud de la zone d'étude, à l'Est et à l'Ouest du gisement de Chaabet- el-Hamra, les courbes piézométriques sont serrées au début puis elles deviennent espacées dans le sens d'écoulement, reflétant une zone d'accumulation ;
- Aussi, un sens d'écoulement SE a été observé à l'Est du DJ. Kalaoune.

III. 5.2 Pour la deuxième campagne (Mai 2016) :

- Le sens d'écoulement principal est toujours vers le centre de la zone d'étude, c'est-à-dire vers la plaine ;
- La comparaison des deux cartes piézométriques n'indique aucun changement dans l'allure des courbes piézométriques et son espacement, mais les cotes piézométriques enregistrées, (**Tableau III. 1**), montrent un rabattement de l'ordre de 0,5m en moyenne, avec un maximum de 2,13m, ce qui est expliqué par la surexploitation qu'a connue la région ;
- Les deux points 1 et 9 enregistrent un soulèvement du niveau piézométrique, (**Tableau III. 1**), de 1,31 m et 0,93 respectivement s'explique par la situation des deux points dans le sens d'écoulement des eaux.

III.6 Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique correspond à la perte de charge par unité de longueur, ou à la pente de la nappe, c'est la différence du niveau piézométrique entre deux points de la surface piézométrique. Il est donné par la relation suivante:

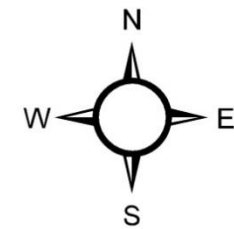
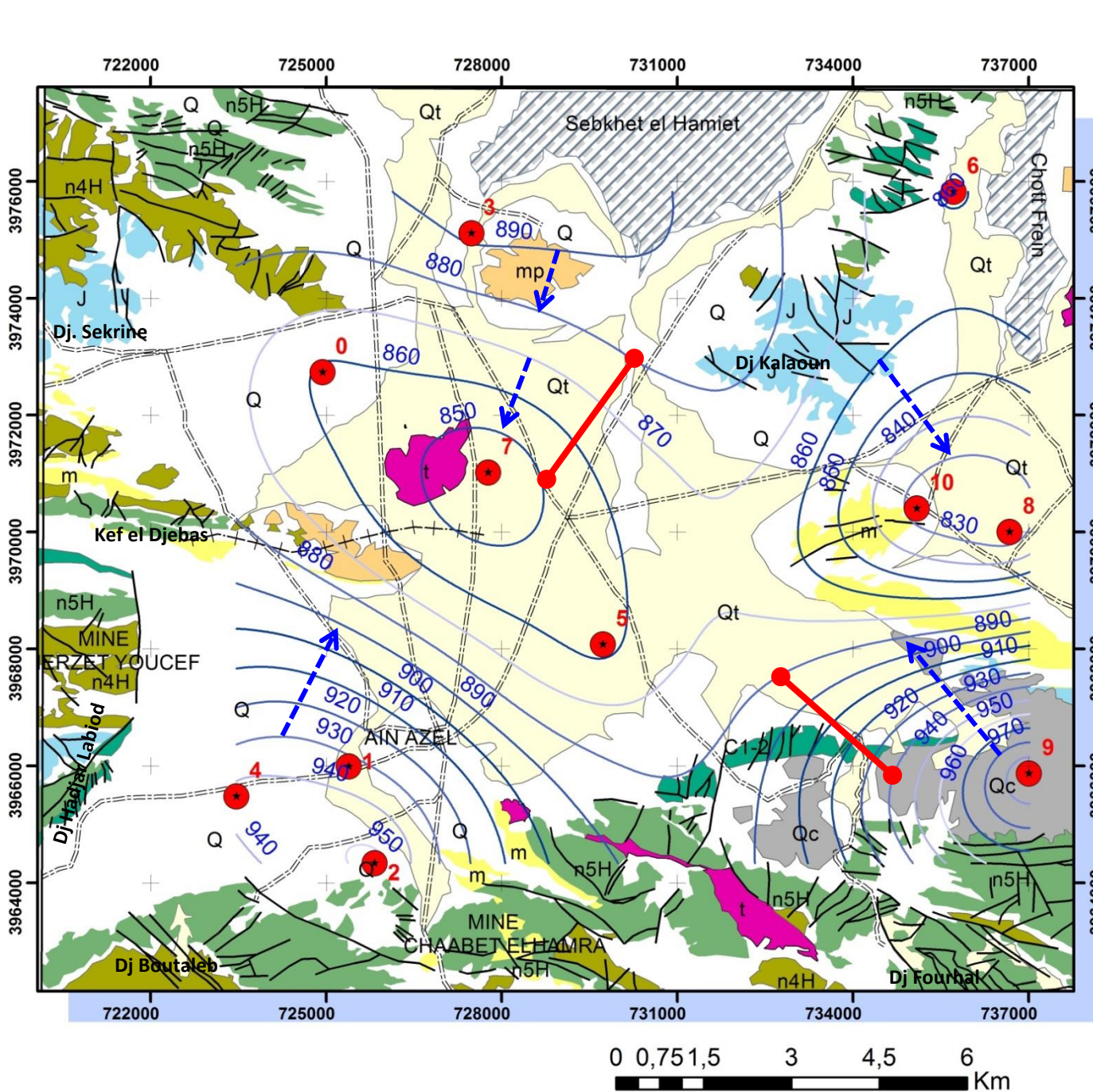
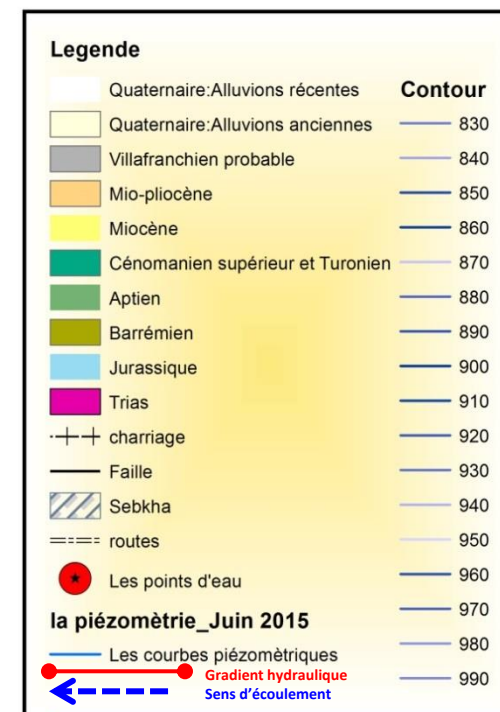


Figure III.3 : La carte piézométrique de Ain- Azel, (Juin 2015).



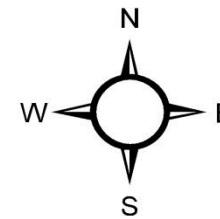
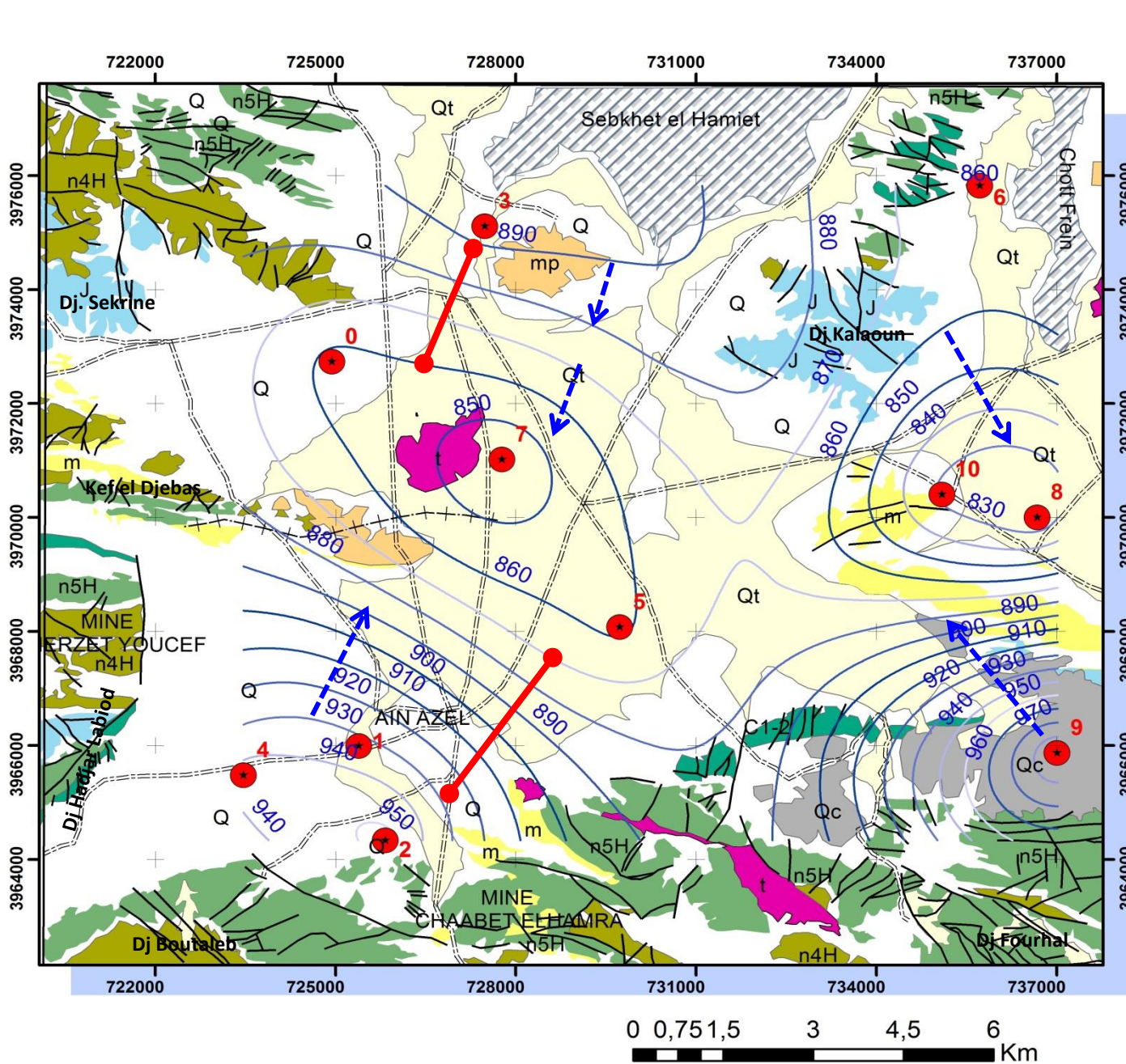
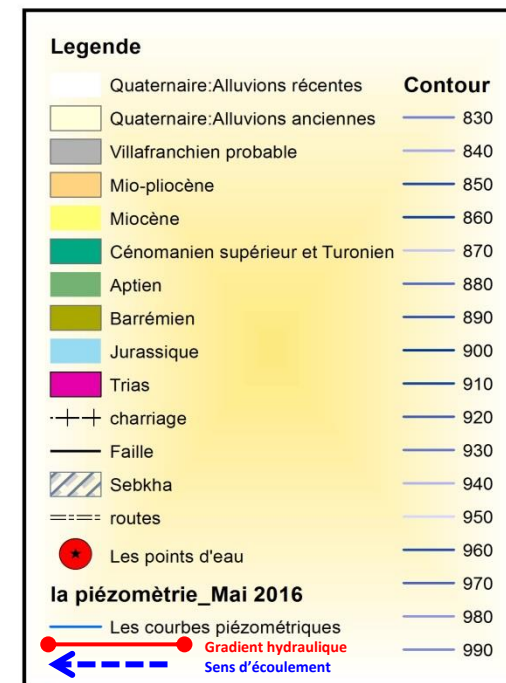


Figure III.4 : La carte piézométrique de Ain- Azel, (Mai 2016).



$$I = (H1-H2) /L..... (Eq. 1)$$

Avec :

- **H1 et H2** : désignent les niveaux piézométriques déterminés par les courbes hydro-isohypses.
- **L** : désigne la distance entre les deux points H1 et H2, déterminée par l'échelle de la carte piézométrique.

Tableau III.2. Calcul du gradient hydraulique de la plaine de Ain- Azel, au Sud de Sétif.

Périodes	H ₁ (m)	H ₂ (m)	L(m)	I	i(%)
Juin 2015	980	890	1407	0,063	6,39
	880	850	1633	0,018	1,83
Mai 2016	890	860	1712	0,017	1,75
	940	870	810	0,086	8,64

Les valeurs du gradient hydraulique sont relativement différentes. Cette variation est due à l'hétérogénéité des formations, donc à la perméabilité.

III.7 Contexte hydrogéologique du gisement de Chaabet- el- Hamra

Les études et les données hydrogéologiques montrent la mise en évidence de la présence de deux (02) aquifères sous forme des nappes libres:

- Un aquifère d'âge Hauterivien à perméabilité de fissure dans la partie centrale du gisement. Il est localisé dans des formations carbonatées sous forme des dolomies fissurées hématitisées et parfois cavernueuses. Cet aquifère a été étudié par la réalisation d'une batterie de forage et de piézomètre, afin de dénoyer la mine.
- Une coupe hydrogéologique, (**Figure III.5**), a été effectuée dans cette partie, où nous avons utilisé les coupes techniques des forages de la batterie Hauterivienne (F1, F2, F3, F4, F5 et F6) et les coupes des différents sondages d'exploitation de la même zone.

La première lecture à cette coupe nous montre un niveau piézométrique irrégulier de l'aquifère qui touche les formations géologiques de l'Hauterivien.

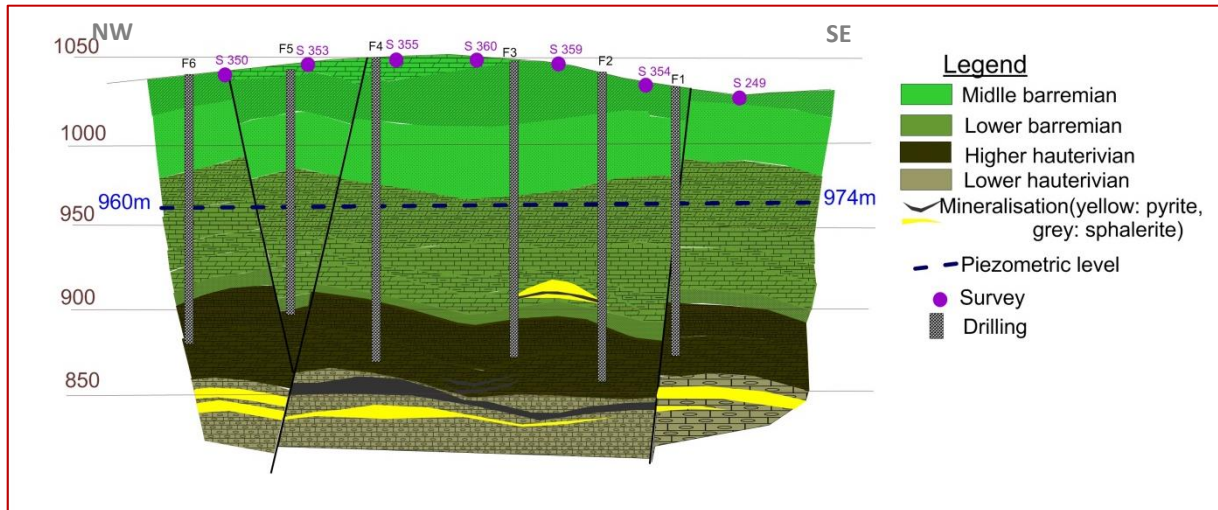


Figure III.5. Coupe hydrogéologique dans la partie centrale du gisement touchant l'aquifère Hauterivien.

- ✿ Un second aquifère d'âge Barrémien, (**Figure III.6**), localisé dans la partie Nord-Ouest du gisement. Il est associé aux grès et dolomies gréseuses. Cet aquifère a été précisé par la réalisation d'une deuxième batterie de forage afin d'alimenter la région de Ain- Azel et ses bordures par l'eau potable et d'irriguer les terres fertiles de la région.

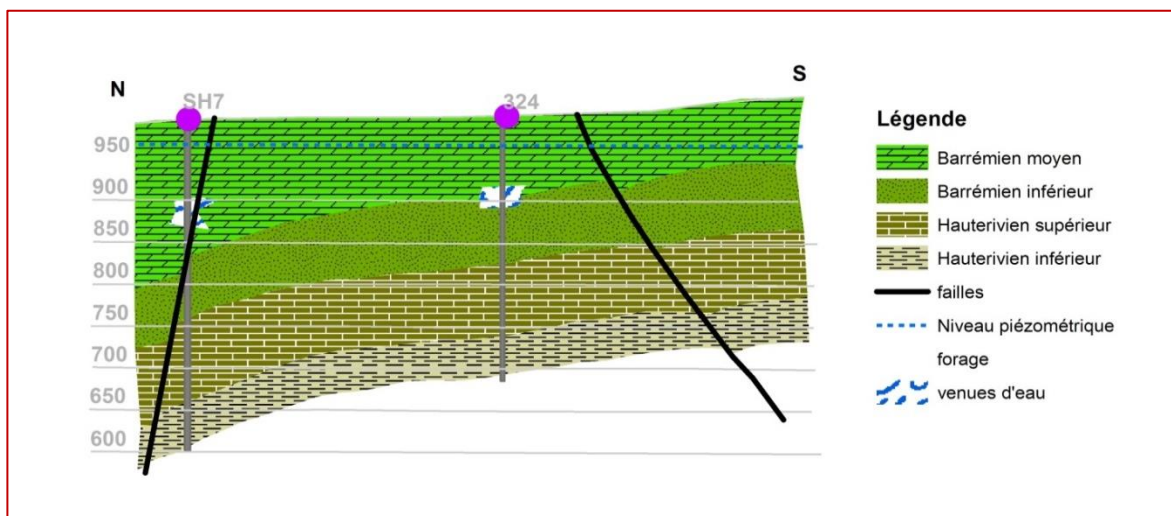


Figure III.6. Coupe hydrogéologique dans la partie Nord- Ouest du gisement touchant l'aquifère Barrémien

- ✿ La partie Est du gisement: deux sondages hydrogéologiques ont été exécutés, ces derniers ont donné des résultats négatifs et une absence des venues d'eau a été notée.

III.8 Inventaire des points d'eau

En 400 sondages de prospection, **vingt-quatre** ont été utilisés comme des ouvrages hydrauliques qui servent à contrôler le niveau piézométrique du gisement, (**Figure III.7**).

La collecte des données des différents niveaux piézométriques à travers les différents ouvrages datés de l'année **1990**, nous a permis l'élaboration d'une carte piézométrique pour le gisement.

III.9 Interprétation de la carte piézométrique

- La carte piézométrique (**Figure III.8**) nous montre que le sens d'écoulement des eaux se fait vers le NW et NE de l'aquifère ;
- Les courbes piézométriques sont serrées régulièrement, (c'est –à-dire un gradient hydraulique fort et une vitesse d'écoulement souterraine forte et une perméabilité faible), au début puis elles deviennent plus ou moins espacées, (c'est –à-dire un gradient hydraulique moyen et une bonne perméabilité), au centre présentant une concavité, ce qui traduit une zone d'accumulation où est concentrée la majorité des forages du gisement.

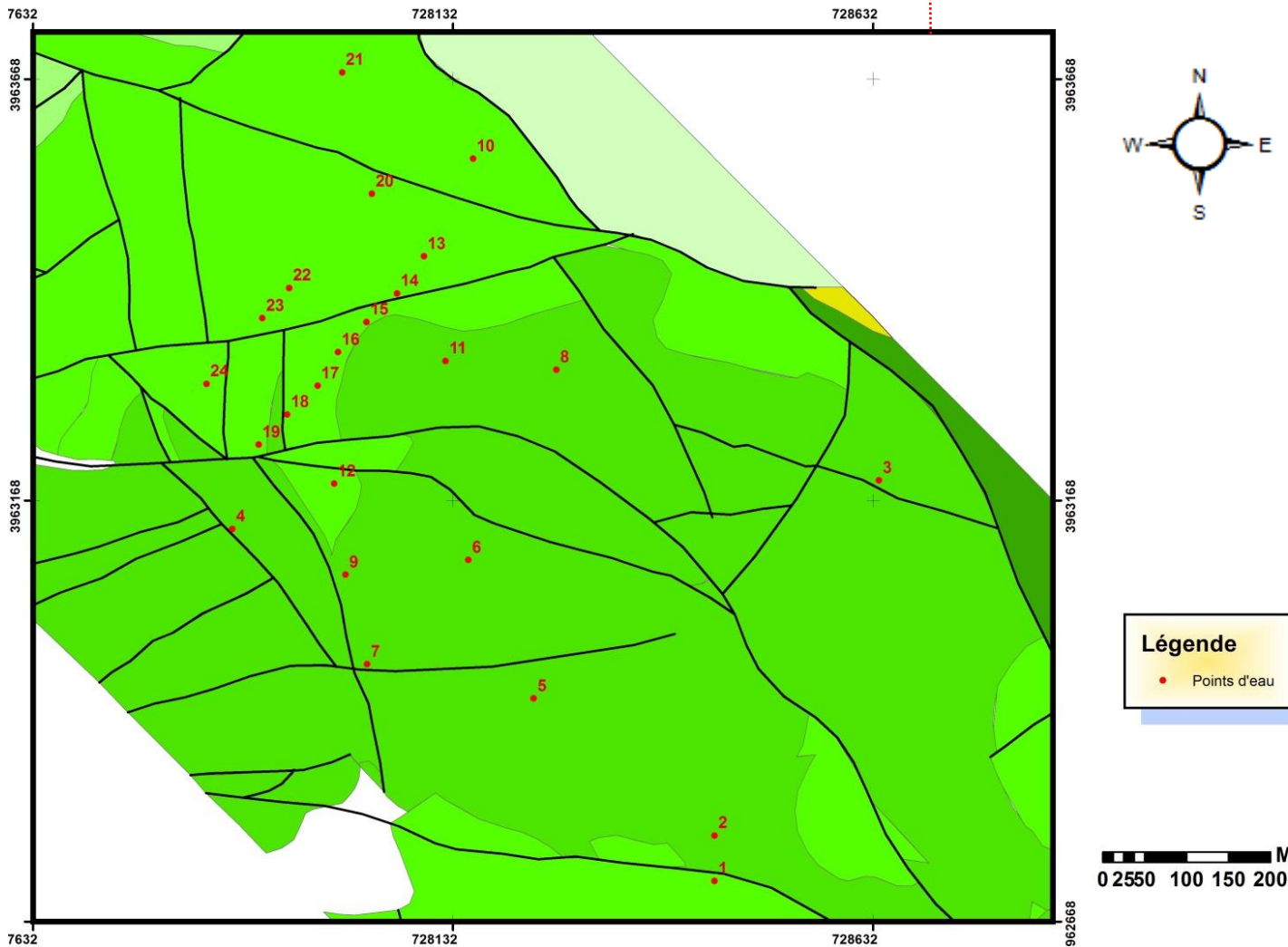
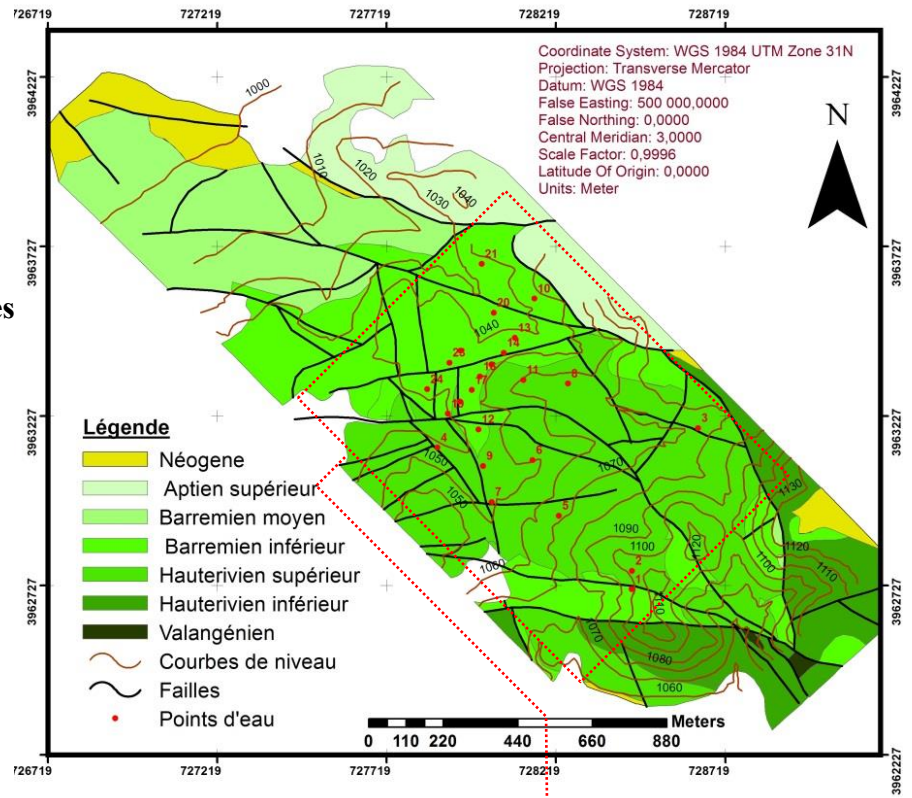
III.10 Gradient hydraulique

Pour exprimer le gradient hydraulique dans le gisement de Chaabet- el- Hamra, nous avons choisi deux endroits où les courbes iso- pièzes sont serrées et espacées.

Tableau III.3. Calcul du gradient hydraulique du gisement de Chaabet- el -Hamra.

Périodes	H₁(m)	H₂(m)	L(m)	I	i(%)
1990	970	964	129	0,046	4,6
	992	185	185	0,054	5,4

Figure III.7: Carte d'inventaire des points d'eau du gisement de Chaabet-el-Hamra, (Juin 1990).



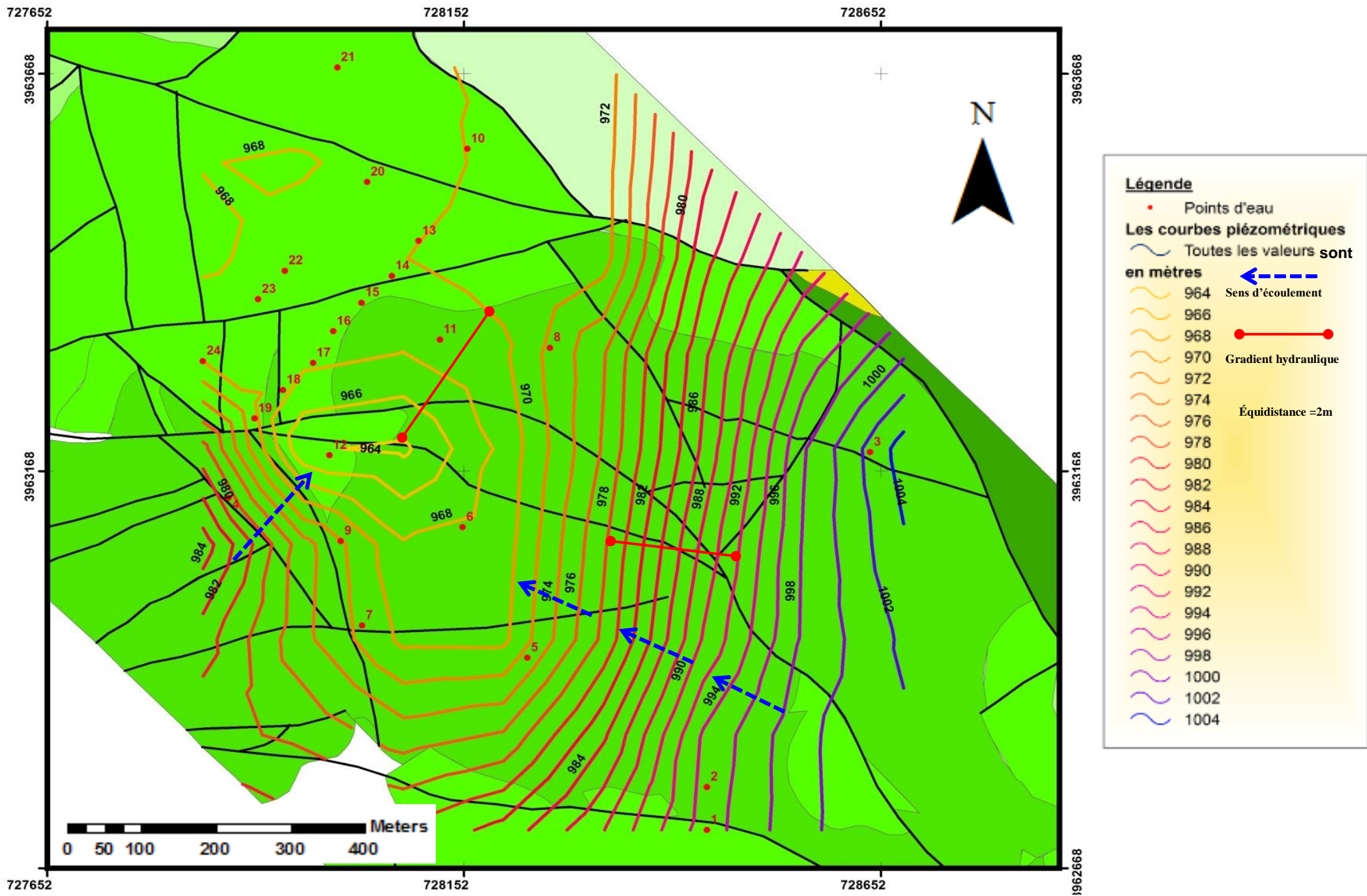


Figure III.8: Carte piézométrique du gisement de Chaabet el Hamra, (Juin 1990).

III.11 Les paramètres hydrodynamiques

Dans le but d'identifier les paramètres hydrodynamiques à savoir la transmissivité (T) et la perméabilité (K) au sein des deux nappes Hauterivienne et Barrémienne captées dans le gisement de Chaabet- el- Hamra et la nappe Mio- Plio- Quaternaire autour de Kherzet- Youcef à Ain-Azel, au Sud de Sétif, nous avons utilisé les résultats des essais définitifs des forages déjà effectués par la Direction des Ressources en Eau (DRE) de Sétif.

Dix localités pour lesquelles nous disposons des données de pompage d'essai ont permis l'estimation de « T » et de « K » (Tableau III. 3). Les figures **A2.1 jusqu'au A2.20** en annexe 2 représentent les graphes du rabattement « S » en fonction du temps « t » des sites de pompage.

Leur interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de C. E. Jacob (1950).

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log 2.25 \frac{Tt}{x^2S} \dots\dots\dots(\text{Eq.2}) \text{ où}$$

- s : rabattement observé en fonction du temps t, en m.
- Q : débit du pompage, en m³/s.
- T : transmissivité de l'aquifère, en m²/s.
- t : durée du pompage, en s.
- S : coefficient d'emmagasinement.
- X : distance séparant le puits de pompage du puits d'observation, en m.

❖ **La transmissivité :**

La productivité d'un captage dans un aquifère est fonction de son coefficient de perméabilité « K » et de son épaisseur « H ». C'est pourquoi un nouveau paramètre, noté T a été créé. La transmissivité « T » d'un aquifère est le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur, « L » d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique « i ».

Ici, elle est obtenue par la résolution graphique de l'expression de Jacob en reportant sur papier semi-logarithmique, les rabattements exprimés en mètre en ordonnées arithmétiques et le temps de pompage exprimé en secondes en abscisses logarithmiques. La transmissivité en m²/s est déterminée à partir de la pente de la droite obtenue, pour un cycle logarithmique, par la formule suivante :

$$T = \frac{0.183Q}{c} \dots\dots\dots(\text{Eq.3})$$

Où :

- **T** : transmissivité de l'aquifère, en m^2/s .
- **Q** : débit du pompage, en m^3/s .
- **C** : pente de la droite.

❖ **La perméabilité :**

La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique, (G. Castany, 1982). Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité « K » défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement en 1 seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique.

La perméabilité « K » est exprimée en m/s et donnée par la formule simplifiée suivante :

$$K = \frac{T}{e} \dots\dots\dots (Eq.4)$$

Où

K : désigne la perméabilité en m/s ;

T : désigne la transmissivité en m^2/s ;

e : désigne l'épaisseur de la couche aquifère ;

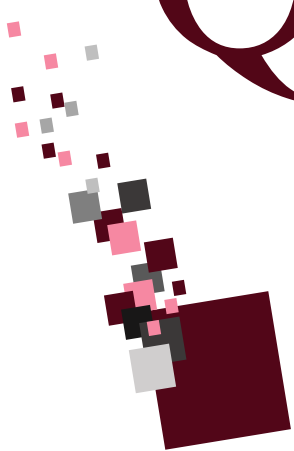
Tableau III.4. Quelques valeurs des paramètres hydrodynamiques (K et T).

Système aquifères	Forages	Palier/ long duré	T (m^2/s)	K (m/s)
Hauterivien	CH6	Long Duré	$1.48 \cdot 10^{-2}$	$9.84 \cdot 10^{-5}$
	PZ1	Long Duré	$1 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-6}$
Barrémien	Afounes	palier 1	$5.28 \cdot 10^{-3}$	$4.40 \cdot 10^{-5}$
		Palier 2	$2.98 \cdot 10^{-3}$	$2.48 \cdot 10^{-5}$
		Long Duré	$1.66 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-5}$
Mio-Plio-Quaternaire	P1	Long Duré	$1.69 \cdot 10^{-1}$	$1.13 \cdot 10^{-3}$
	P2	Long Duré	$2.14 \cdot 10^{-1}$	$1.43 \cdot 10^{-3}$
	P3	palier 1	$1 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-5}$
		palier 2	$1 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-5}$
		Long Duré	$1.39 \cdot 10^{-2}$	$9.28 \cdot 10^{-5}$
	P4	palier 1	$5.78 \cdot 10^{-2}$	$3.85 \cdot 10^{-4}$
		palier 2	$3.16 \cdot 10^{-4}$	$4.74 \cdot 10^{-2}$
		Long Duré	$3.55 \cdot 10^{-2}$	$2.37 \cdot 10^{-4}$
	P5	palier 1	$1.17 \cdot 10^{-1}$	$7.77 \cdot 10^{-4}$
		palier 2	$2.45 \cdot 10^{-3}$	$1.63 \cdot 10^{-5}$
	P6	palier 1	$4.62 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-5}$
		palier 2	$2.33 \cdot 10^{-3}$	$1.55 \cdot 10^{-5}$
		palier 3	$6.95 \cdot 10^{-4}$	$4.63 \cdot 10^{-5}$
		Long Duré	$4.56 \cdot 10^{-3}$	$3.04 \cdot 10^{-5}$
P7	Long Duré	$5.69 \cdot 10^{-4}$	$3.79 \cdot 10^{-6}$	

III.12 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, quelques points essentiels méritent d'être soulignés :

- ❖ L'hydrogéologie du secteur étudié concerne principalement deux grands systèmes aquifères :
- ❖ Un aquifère superficiel correspondant aux formations du Mio-Plio-Quaternaire et un complexe d'aquifères profonds du Crétacé inférieur, (Hauterivien et Barrémien précisément), qui est important pour les besoins en eau de la région.
- ❖ Les deux cartes piézométriques élaborées dans la plaine de Ain- Azel, à partir des campagnes de Juin 2015 et Mai 2016, montrent que le sens d'écoulement général est du Nord vers le Sud et de Sud vers le Nord, c'est-à-dire vers la plaine de Ain Azel ;
- ❖ En comparant les deux périodes, (Juin 2015 et Mai 2016), un rabattement de 0,5m en moyenne a été enregistré ;
- ❖ Au niveau du gisement de Chaabet- el- Hamra, les courbes piézométriques sont serrées au début puis elles deviennent espacées dans le sens d'écoulement, reflétant une zone d'accumulation ;
- ❖ Les cartes piézométriques traitées permettent l'estimation des gradients hydrauliques variant entre **1,83 et 6,39%** pour la période du Juin 2015 et entre **1,75 à 8,64%** pour la période du Mai 2015.
- ❖ Les valeurs du gradient hydraulique sont relativement différentes. Cette variation est due à l'hétérogénéité des formations, donc à la perméabilité.
- ❖ L'étude hydrodynamique nous démontre que la transmissivité au niveau de l'aquifère Hauterivien est de l'ordre de $1,48 \cdot 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$, $1,66 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ pour l'aquifère Barrémien et de $3,16 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ et $2,14 \cdot 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ pour l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.



QUATRIÈME
CHAPITRE

IV.1. Introduction :

Ce travail apporte une caractérisation géochimique globale des eaux souterraines Hauterivienne et Barrémienne du gisement de Chaabet- el- Hamra et les eaux du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Ain- Azel, au Sud de Sétif.

Pour la caractérisation géochimique des deux aquifères Hauterivien et Barrémien de Chaabet- el- Hamra, des campagnes de reconnaissance et d'échantillonnage des points d'eau ont été effectuées dans cette région (d'abord en contexte minier de Chaabet- el- Hamra, puis à travers toute la région de Ain- Azel tant en contexte agricole que péri-urbain), notamment pendant l'année 2012 et 2018.

Les résultats obtenus lors de ces campagnes de mesures ont permis tout d'abord à caractériser les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines. Ces derniers contribuent à définir les familles d'eau au sein des différents aquifères, à montrer leur variabilité latérale et à préciser l'origine de la minéralisation des eaux souterraines. Enfin, à établir les aptitudes de ces aquifères à l'irrigation des terres fertiles de la région d'étude.

En outre, plus de 15 gisements de Pb, Zn, Ba et Fe sont connues dans les monts du Hodna, au Nord-Est de l'Algérie ([A. Boutaleb et al. 2014](#)) où le territoire de Ain- Azel comprend deux gisements: Kherzet- youcef à l'Ouest et Chaabet- el- Hamra au Sud-Est, le risque de la présence de métaux lourds dans les eaux souterraines est un problème majeur. C'est l'une des préoccupations les plus importantes qui ont attiré l'attention aux niveaux régional, local et mondial en raison de leur importance toxicologique dans les écosystèmes et de leur impact sur la santé publique ([U. Rizwan et al., 2009](#)).

Les métaux lourds peuvent causer des effets graves sur la santé avec des symptômes variés selon la nature et la quantité de métal ingéré ([A. A. Adepoju-Bello et O. M. Alabi 2005](#), [Z. Khoshnam et al. 2017](#)). Cependant, l'eau de mine peut varier considérablement dans la concentration de contaminants présents et, dans certains cas, elle peut même répondre aux spécifications de l'eau potable. Et pour cela, l'analyse des métaux lourds s'avère nécessaire.

IV.2. Échantillonnage et analyse des eaux souterraines :

Cette rubrique s'appesantit sur le prélèvement des échantillons d'eau, la représentativité de l'échantillon et les méthodes analytiques utilisées.

L'échantillonnage a été réalisé au niveau des points d'eau aménagés pour l'alimentation en eau potable de la population, dont l'accès nous a été autorisé. Ces points d'eau appartiennent soit à des particuliers, soit à l'Algérienne des eaux (ADE) chargée de la distribution d'eau potable dans la région de Ain- Azel, soit à l'entreprise nationale des

substances ferreuses et non-ferreuses (ENOF). Ils couvrent spatialement toute la zone d'étude. En effet, les activités industrielles et commerciales sont présentées dans la zone de Ain- Azel, tandis que l'agriculture constitue l'activité principale des habitants de la plaine de Ain- Azel.

IV.3. Les campagnes de prélèvement d'eau :

IV.3.1. Période d'Avril 2012 :

Les eaux de six forages différents dont la profondeur varie de 150 à 200 m ont été collectées au cours du mois d'Avril 2012 dans la zone d'étude, (**Fig. IV.1**), touchant l'aquifère Hauterivien dans le gisement de Chaabet- el- Hamra. Tous les échantillons d'eau ont été stockés dans des bouteilles en polyéthylène (250 ml), préalablement lavées avec une solution acide et de l'eau distillée. Au moment de l'échantillonnage, les bouteilles ont également été soigneusement rincées deux fois avec l'eau de forage. Avant l'échantillonnage, la pompe a fonctionné pendant 15 min et une fois que les valeurs des caractéristiques de l'eau (T, EC et PH) ont atteint une quantité constante, les échantillons ont été prélevés. Les échantillons d'eau ont été filtrés pour séparer les éventuels solides en suspension. De plus, pour éviter des variations imprévisibles de la composition de l'eau, les échantillons ont été conservés dans un réfrigérateur à moins de 4 ° C. ([APHA, 2005](#)).

Les valeurs de conductivité électrique (EC) et de pH des échantillons ont été déterminées sur le site d'échantillonnage à l'aide d'un conductimètre portable (Consort C 5010).

Les concentrations de cations telles que Na^+ et K^+ ont été déterminées par spectrophotomètre à flamme, (Jenway Clinic PFP7) dans les 24 h suivant l'échantillonnage. Les ions Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Bicarbonates (HCO_3^-) et Chlorures (Cl^-) ont été analysés par titrage volumétrique, tandis que NO_3^- et SO_4^{2-} ont été déterminés par chromatographie ionique. Les métaux lourds (Pb, Zn, Fe, Cd, Cr, Mn) ont été détectés par le spectromètre d'absorption atomique, (WFX-110B) et les solides dissous totaux, (TDS) par des méthodes de séchage, ([L. M. L Nollet, 2007](#)). Toutes ces analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), Constantine, Algérie. Les valeurs des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau souterraines ont été comparées aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé

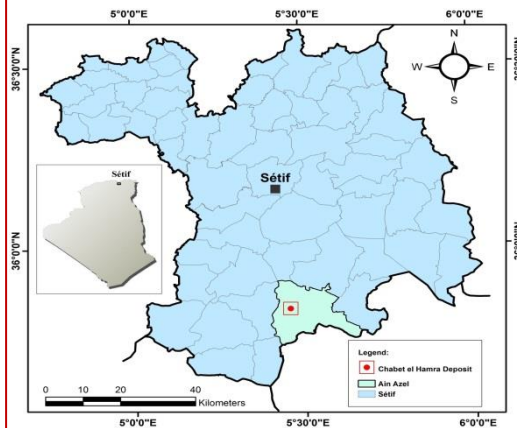
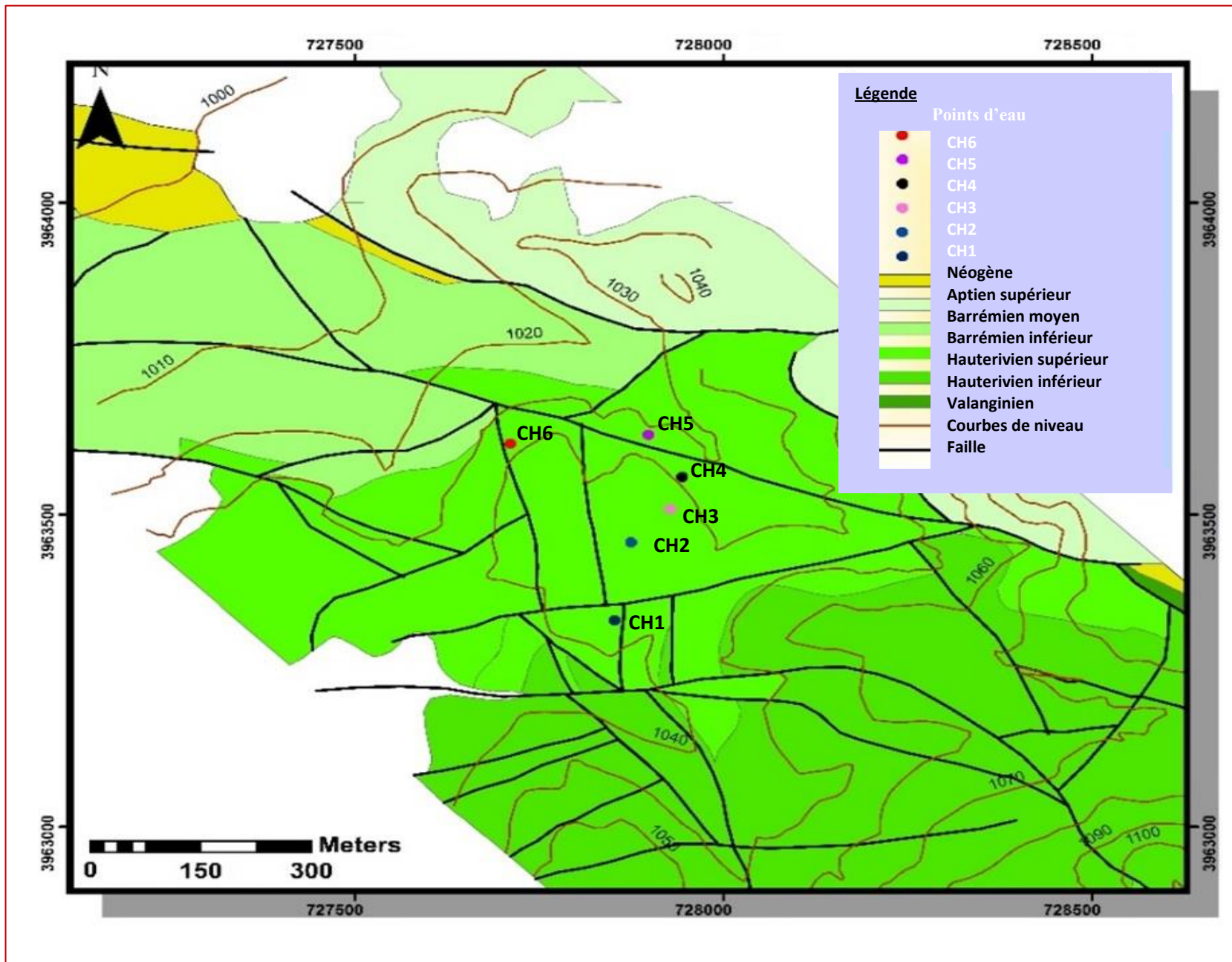


Fig. IV.1. Localisation des forages testés de l'aquifère Hauterivien sur la carte géologique du gisement de zinc de Chaabet- el- Hamra, (Tirée du rapport E. R. E. M, 1992), modifiée.

(OMS, 2008), aux Normes Algériennes (NA.6360, 1992) pour l'eau potable, et à la norme de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO ; Ayers et Westcot, 1994) pour l'eau d'irrigation, (Tableau IV. 1).

Tableau IV.1. Les normes Algériennes (NA. 6360), 1992 ; OMS, (2008) et Ayers and Westcot (1994) pour potabilité et irrigation.

Paramètre	Les normes Algérienne (NA. 6360).1992	WHO (2008)	Ayers and Westcot (1994)
pH	6.5 - 8.5	6.5 to 9.225	8.5
EC ($\mu\text{S/cm}$)	2800	≤ 1500	3000
TDS (mg/l)	2000	1500	2000
SO_4^{2-} (mg/l)	200/400	250	960
Cl (mg/l)	200/500	200	1063
HCO_3^- (mg/l)	-	-	610
NO_3^- (mg/l)	50	20	10
Ca^{2+} (mg/l)	75/200	200	400
Mg^{2+} (mg/l)	150	50	60
Na^+ (mg/l)	200	100	919
K^+ (mg/l)	20	12	2
Zn (mg/l)	5	3	2
Pb (mg/l)	0.05	0.01	5
Fe (mg/l)	0.3	0.3	0.3
Mn (mg/l)	0.5	0.4	0.2
Cd (mg/l)	0.01	0.003	0.01
Cr (mg/l)	0.05	0.05	0.1
Cu (mg/l)	2	2	0,2

IV.3.1.1 Résultats et discussion

❖ Caractéristiques hydrochimiques

Les données des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines Hauteriviennes du gisement Chaabet- el- Hamra sont données dans le tableau IV.2.

La précision des données sur la qualité de l'eau peut être testée en calculant l'erreur de l'équilibre ionique (IB%) à l'aide de l'équation (1). Il donne une indication de la qualité de

la valeur recommandée pour l'eau d'irrigation est de 6,5 à 8,4, (Ayers et Westcot, 1994). L'eau d'irrigation dont le pH est supérieur à la normale peut provoquer un déséquilibre nutritionnel ou contenir des ions toxiques, (M. B. Pescod, 1985; A. H. M. J. Al-Obaidy et al., 2010).

Les résidus secs de tous les échantillons d'eau souterraine varient de l'ordre de 440 à 522 mg/l avec une moyenne de 457 mg/l, (tableau IV. 2), se situent à l'intérieur des limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994). Selon la classification des résidus secs dans l'eau, (J. D. Hem, 1986), tous les échantillons d'eau souterraine sont étiquetés à l'intérieur de la classe d'eau douce.

La conductivité électrique (CE) est le paramètre le plus important pour déterminer l'adéquation de l'eau à des fins de consommation et d'irrigation, car la CE excessive entraîne la formation de sols salins. (A. Esmaeili et F. Moore, 2012). Pour la CE dans les eaux souterraines Hauteriviennes de la zone d'étude, toutes les valeurs varient entre 690 et 770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 735 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (tableau IV.2). Ainsi, nous pouvons conclure que les eaux souterraines de la région sont acceptables pour la consommation, (OMS, 2008; N / A. 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

❖ Paramètres chimiques

La concentration en calcium (Ca^{2+}) se situe entre 63, 64 et 77, 97 mg /l avec une moyenne de 73, 49 mg /l (**Tableau IV.2**). La teneur en calcium dans la zone d'étude se situe dans les limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992), et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994). La calcite et la dolomite sont responsables de l'enrichissement des eaux souterraines en ions calcium. (K. Kim et S. T. Yun, 2005).

La concentration de magnésium (Mg^{2+}) dans les échantillons d'eau souterraine se situe entre 36, 31 et 44,85 mg /l et avec une moyenne de 42,47 mg /l, (**Tableau IV.2**). La teneur en magnésium dans la zone d'étude se situe dans les limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992), et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

La concentration de sodium (Na^+) dans les échantillons d'eau souterraine de l'aquifère Hauterivien varie de 17 à 29 mg /l avec une valeur moyenne de 19,5 mg /l, (**Tableau IV.2**). Tous les échantillons d'eau souterraine se situent dans la limite autorisée de la norme pour l'eau potable, (OMS, 2008; NA 6360, 1992). De plus, la teneur en sodium est la plus problématique des ions majeurs et un facteur important dans l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

Les concentrations des bicarbonates (HCO_3^-) trouvées dans les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude varient de 292,8 à 323,3 mg/l avec une moyenne de 311,1 mg/l (**Tableau IV.2**). Ainsi, l'eau de la zone d'étude convient à l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994). Par conséquent, les eaux souterraines hauteriviennes de la mine de Chaabet- el- Hamra sont submergées par les bicarbonates (HCO_3^-), qui représentent plus de 54% des anions et des cations. Ces valeurs se situent à l'intérieur des limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers and Westcot, 1994).

L'ion chlorure (Cl^-) est une forme naturelle prédominante de chlore et est extrêmement soluble dans l'eau. La principale source de chlorure dans l'eau naturelle est particulièrement les roches sédimentaires d'évaporation. (B. Pradhan et S. Pirasteh, 2011). Dans la zone d'étude, la teneur en ions chlorure dans tous les échantillons d'eau souterraine varie de 35 à 50 mg/l avec une valeur moyenne de 40 mg/l, (**Tableau IV.2**). Ces valeurs se situent dans les limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

Les nitrates (NO_3^-) et le potassium (K^+) ont une offre minimale en concentrations absolues d'anions et de cations avec 1% de l'agrégat de fixation des particules.

La prédominance de HCO_3^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les eaux souterraines est principalement due à la dissolution des roches carbonatées des formations du Crétacé.

IV.3.1.3. Analyse en composantes principales (IBM SPSS statistics, 22)

L'analyse statistique multi-variée est une impulsion qui a été spécialement créée pour examiner et décomposer les ensembles de données, (T. Raykov et G. A. Marcoulides, 2008; K. H. Wolfgang et S. Léopold, 2012).

Dans la recherche sur les eaux souterraines, l'analyse statistique multi variée est une approche quantitative de la classification des eaux souterraines qui permet de regrouper les échantillons d'eau souterraine et d'établir des corrélations entre les échantillons et leurs paramètres chimiques, (Z. Feng et al., 2007; L. Belkhiri et al., 2010; S. Bencer et al., 2016). Les interrelations entre les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines ont été inspectées à l'aide de la matrice de corrélation de Pearson, (**Tableau IV. 3**).

Les coefficients de corrélation de Pearson montrent que le pH affiche une corrélation négative avec tous les paramètres et une forte corrélation entre TDS, Cl⁻ et EC (r = 0, 88; r = 0, 87 respectivement), TDS et Cl⁻ (r = 0,95).

Entourés de cations, seuls Ca²⁺ et Mg²⁺ déterminent une corrélation négative (r = - 0, 56; r = -0,53) avec Na⁺ qui peut être indiqué qu'ils proviennent de diverses sources. La corrélation positive la plus élevée, (r = 0, 96), qui existe entre Ca²⁺ et Mg²⁺ peut être traduite, car ils proviennent des mêmes sources (dissolution des minéraux carbonatés).

Tableau IV.3. Matrice de corrélation multiple des eaux Hauterivienne dans la mine de Chaabet el Hamra.

Var	pH	EC	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
PH	1.00										
EC	-0.71	1.00									
TDS	-0.74	0.88	1.00								
Ca ²⁺	-0.77	0.58	0.62	1.00							
Mg ²⁺	-0.59	0.54	0.61	0.96	1.00						
Na ⁺	0.29	0.31	0.04	-0.56	-0.53	1.00					
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00				
HCO ₃ ⁻	-0.04	0.04	-0.38	0.06	-0.06	0.16	0.00	1.00			
SO ₄ ²⁻	-0.60	0.79	0.70	0.87	0.91	-0.15	0.00	0.13	1.00		
Cl ⁻	-0.57	0.87	0.95	0.60	0.66	0.11	0.00	-0.40	0.77	1.00	
NO ₃ ⁻	-0.23	-0.12	0.31	0.14	0.14	-0.50	0.00	-0.87	-0.16	0.24	1.00

IV.3.1.4. Métaux lourds

Le terme métal lourd comprend les métaux d'une densité supérieure à 5 g • cm⁻³, à l'exception des alcalins terreux. Les métaux lourds sont: bismuth (Bi), cadmium (Cd), chrome (Cr), cobalt (Co), cuivre (Cu), étain (Sn), fer (Fe), manganèse (Mn), Mercure (Hg), Molybdène (Mo), Nickel (Ni), Plomb (Pb) et Zinc (Zn).

Étant donné que cette étude de zone concerne une mine d'exploitation du Zn, les investigations sur les métaux lourds sont ainsi nécessaires pour affirmer la dissolution ou la non-dissolution du Zn dans les eaux de la nappe Hauterivienne. L'analyse des métaux lourds confirme leur faible teneur dans ces eaux, (**Tableau IV.4**).

Tableau IV.4. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauteriviennes du gisement de Chaabet el Hamra en mg/l (Avril 2012).

Métal	F1	F2	F3	F4	F6
Zn	0	0.007	0.035	0.048	0.016
Pb	Non décelable				
Fe	0.073	0.071	0.085	0.307	0.141
Cr	Non décelable				
Mn	0.009	0.014	0.014	0.017	0.018
Cd	Non décelable				

IV.3.1.5. Mécanismes contrôlant la chimie des eaux souterraines

❖ Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est largement utilisé pour comprendre les problèmes concernant l'évolution géochimique des eaux souterraines, ([U. Karmegam et al., 2011](#)). Le diagramme se compose de trois champs distincts, dont deux champs triangulaires et un champ en forme de losange. Les cations exprimés en pourcentage du total des cations en meq / l comme un seul point sur le triangle gauche, tandis que le tracé des anions est dans le triangle droite, ([A. M. Piper, 1944](#)). Afin de comprendre le mécanisme d'évolution chimique des eaux souterraines de l' Hauterivien dans la zone minière de Chaabet- el- Hamra, le trigramme Piper a été tracé à l'aide du logiciel Diagramme, (**Figure.IV.2**).

Comme le montre la figure IV.2, le diagramme de Piper a classé tous les échantillons d'eau en Bicarbonaté calcique et magnésien (Ca^{2+} - Mg^{2+} - HCO_3^-), ce qui pourrait être dû à la dissolution des roches carbonatées des séquences sédimentaires adjacentes.

❖ Diagramme de Schoeller

Le diagramme de [Schoeller \(1962\)](#) est utilisé de manière correspondante pour évaluer la qualité de la consommation d'eau. Il est basé sur huit paramètres chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , TDS, TH, Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-). Il représente un diagramme semi-logarithmique des concentrations des échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude. Les points sur les lignes également espacées représentent la concentration de chaque ion dans chaque échantillon et les points sont reliés par une ligne. Dans l'ensemble TDS et TH et selon ce diagramme, l'eau est classée en six classes: admissible, intermédiaire, désagréable, très désagréable, bonne et non potable. En conséquence, les échantillons d'eau souterraine de Chaabet el Hamra se classent dans de bonnes catégories, (**Fig.IV.3**).

Les teneurs relatives des ions en mg/l montre $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ pour les cations et $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ pour les anions.

❖ Diagrammes de Gibbs

La réaction entre les minéraux de l'aquifère et les eaux souterraines joue un rôle important dans la qualité de l'eau, ce qui est également utile pour comprendre la genèse des eaux souterraines, ([D. J. Cederstorm, 1946](#)). Généralement, différents processus et mécanismes contrôlent la chimie des eaux souterraines. Par conséquent, les graphes de Gibbs sont utilisés pour comprendre et différencier les influences de l'interaction roche-eau, de l'évaporation et des précipitations sur la chimie de l'eau, ([R. J. Gibbs, 1970](#)). Une représentation réaliste et recommandée pour comprendre les importantes procédures contrôlant la chimie des eaux souterraines, compte tenu des solides dissous par rapport à $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ pour les cations et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ pour les anions. Les diagrammes de Gibbs ont montré que l'altération des roches contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes dans la zone d'étude, (**Fig.IV.4**).

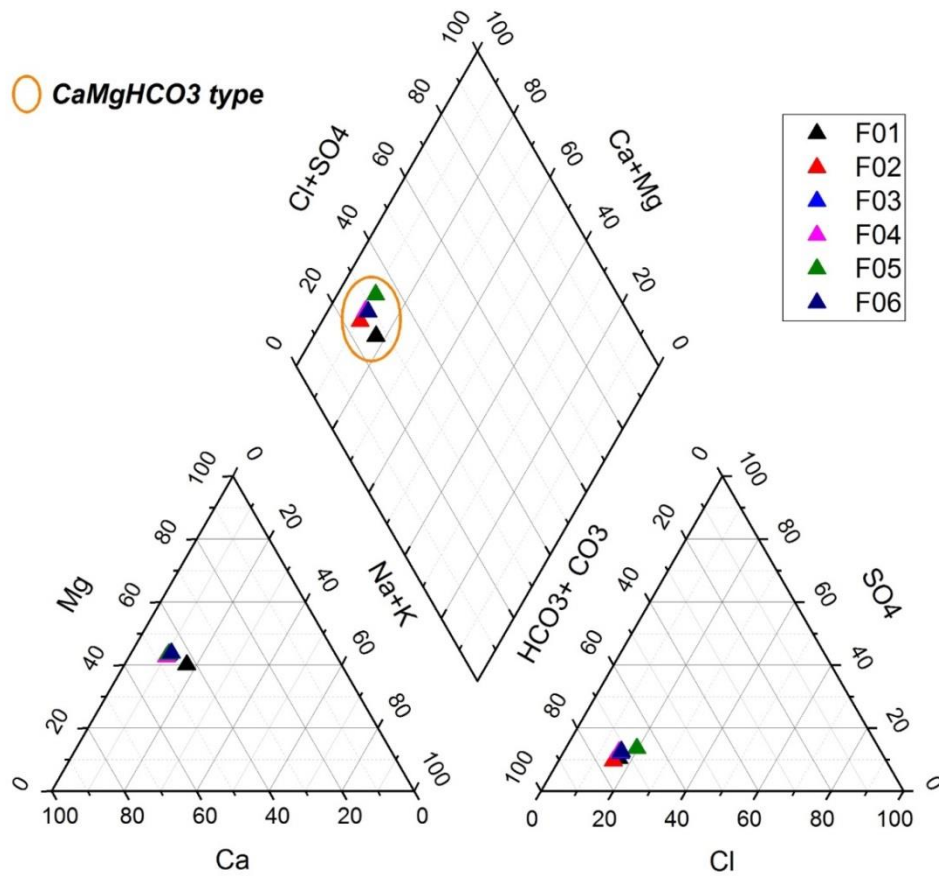


Fig.IV.2. Diagramme de Piper des eaux Hauterivienne de la zone d'étude, (Période d'Avril 2012).

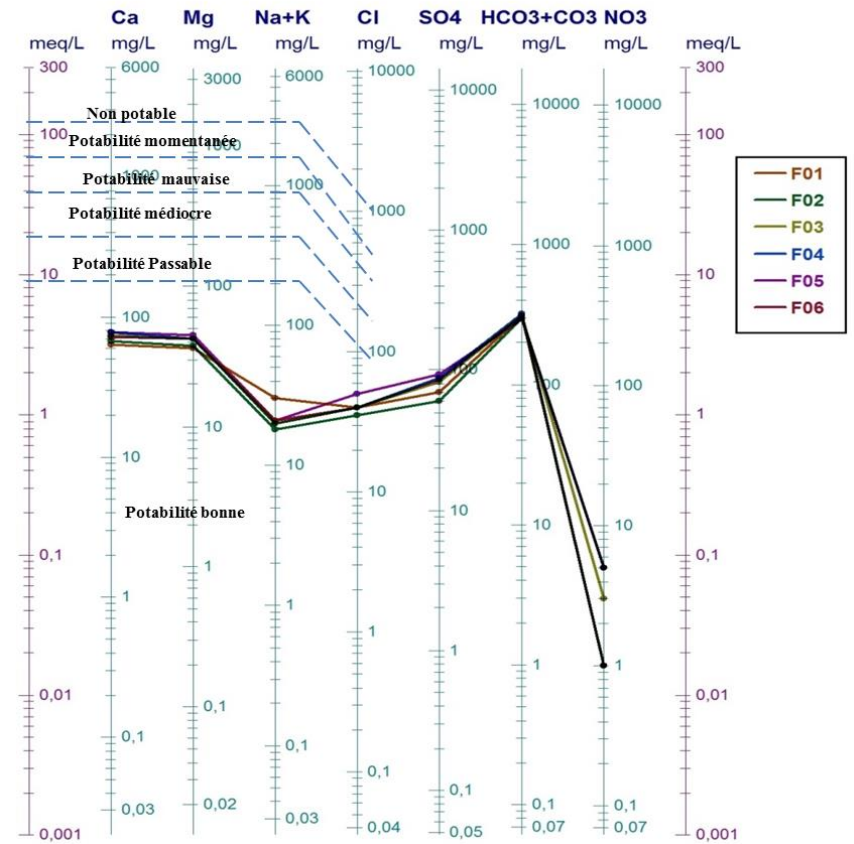


Fig.IV.3. Diagramme de Schoeller des eaux Hauterivienne de la zone d'étude, (Période d'Avril 2012).

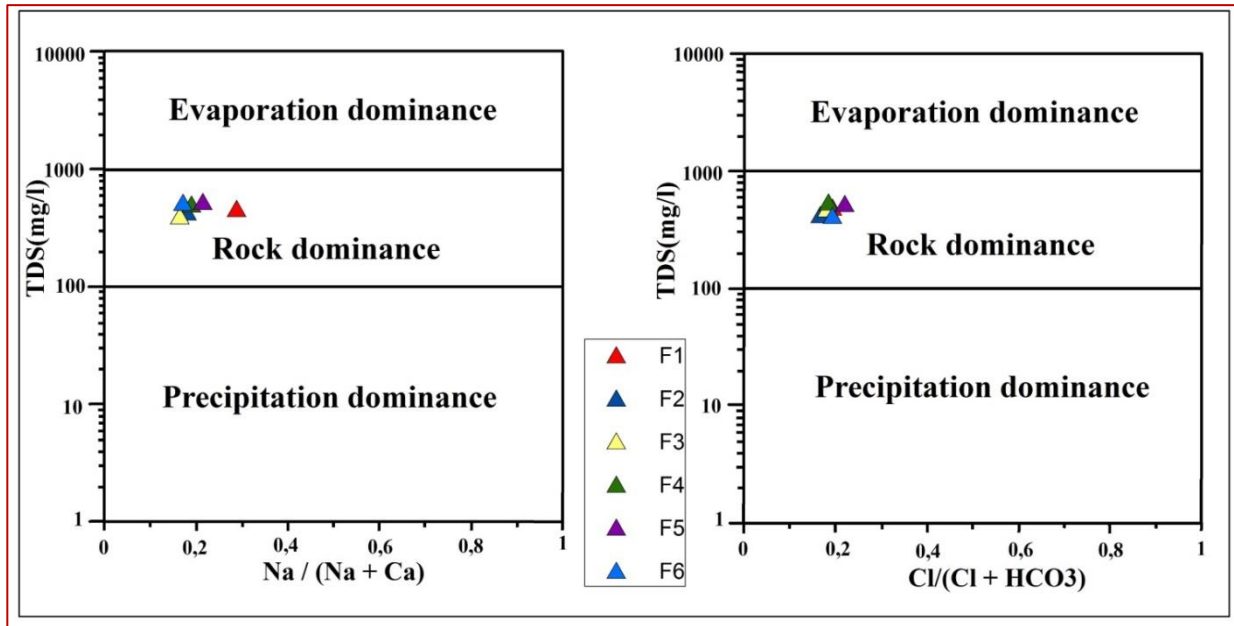


Fig.IV.4. Diagramme de Gibbs, (Période d’Avril 2012)

IV.3.1.6. Les eaux souterraines pour l’irrigation

Des indices tels que le rapport d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium soluble (SSP), le carbonate de sodium résiduel (RSC), l'indice de perméabilité (PI), le magnésium hasard (MH) et le rapport de Kelly (KR) sont des paramètres importants pour déterminer la pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation, (S.S.Gowd, 2005; N. J. Raju, 2007, A. Aghazadeh et N. N. Mogaddam, 2010; F. Ehya et Z. Moghadam, 2017; X. Guan et al., 2017; Q. Huili et al., 2019).

A. Ratio d'absorption du sodium (SAR)

La concentration de sodium joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation, car le sodium entraîne une réduction de la perméabilité du sol. Le risque de sodium de l'eau d'irrigation peut être bien compris par SAR qui détermine son utilité pour l'agriculture, (A. H. M. J. Al Obaidy et al., 2014).

Le rapport d'absorption du sodium (SAR) est défini par l'équation 2, où toutes les teneurs sont en meq /l, (L. A. Richard, 1954).

$$S.A.R = \frac{Na +}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \dots\dots\dots (Eq. 2)$$

Les valeurs SAR varient de 1,17 à 2,05 dans les eaux souterraines de l'Hauterivien. Il est rapporté que si la valeur de SAR est inférieure à 10, l'eau est d'excellente qualité pour l'irrigation, (L. A. Richard, 1954). Par conséquent, tous les échantillons d'eau sont excellents pour l'irrigation.

B. Diagramme de Wilcox

Le diagramme de L. V. Wilcox (1955) est l'une des classifications les plus importantes de cette étude. Dans le diagramme de Wilcox, l'axe horizontal est sélectionné pour la salinité de l'eau, tandis que l'axe vertical correspond au SAR. Comme le montre la **figure IV. 5**, tous les échantillons se trouvent dans la catégorie C2S1, ce qui signifie «à peine saline - convient à l'irrigation», (Tableau IV. 5).

Tableau IV.5. Classification des eaux pour l'irrigation selon L. V. Wilcox (1955).

Classes des eaux	Qualité pour l'irrigation
C1S1	Eau douce—Absolument acceptable pour l'irrigation
C1S2, C2S2, C2S1	Moyennement saline— Acceptable pour l'irrigation
C1S3, C2S3, C3S1, C3S2, C4S2, C4S1	Saline— Acceptable pour l'irrigation avec traitement.
C1S4, C2S4, C3S4, C4S4, C4S3, C4S2, C4S1	Très saline—Non acceptable pour l'irrigation

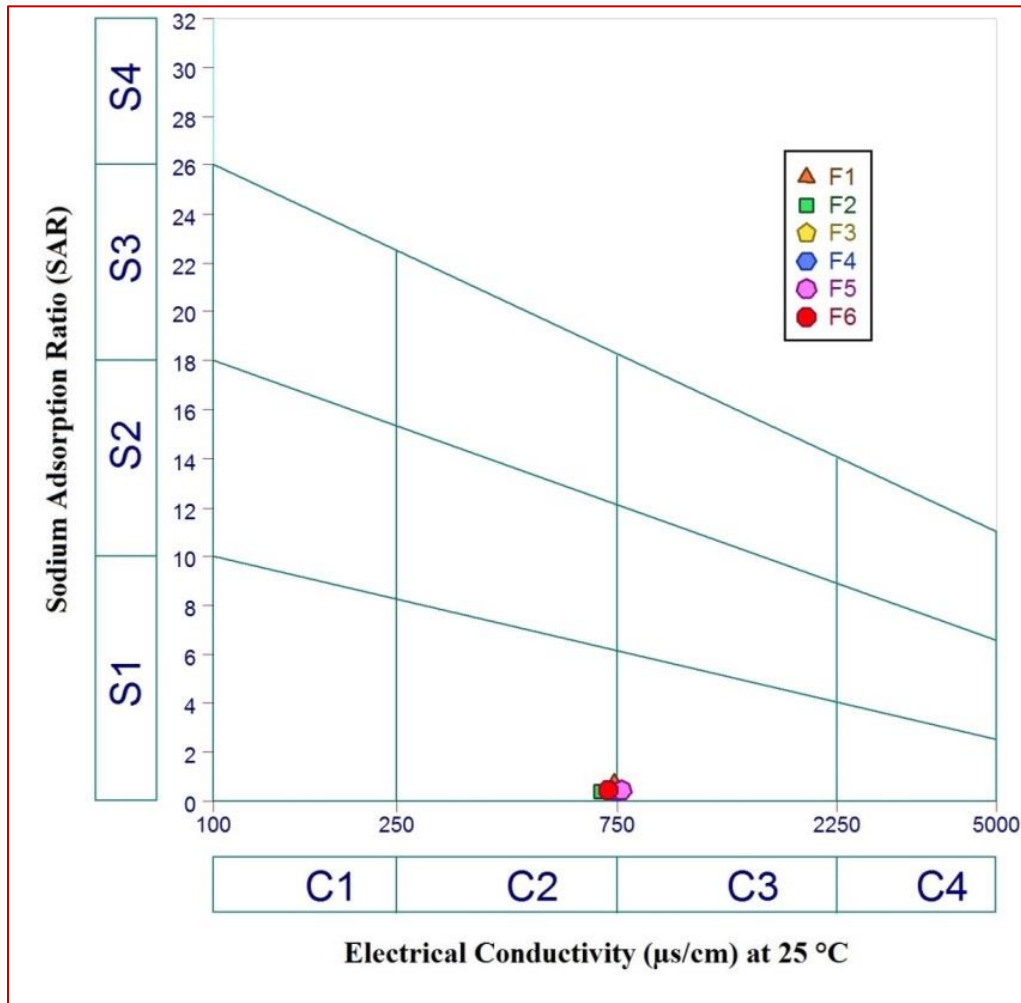


Fig.IV.5. Diagramme de Wilcox pour les eaux Hauteriviennes de la mine de Chaabet- el- Hamra.

C. Pourcentage de sodium soluble (SSP)

Le pourcentage de sodium soluble (SSP) est également utilisé pour évaluer le risque lié au sodium. De plus, le SSP connu sous le nom de % Na est calculé par l'équation 3, où toutes les concentrations ioniques sont en meq /l, (L.V. Wilcox, 1955).

$$\%Na = 100 \times \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K} \dots \dots \dots (Eq. 3)$$

Les valeurs calculées de SSP variaient de 7,70 à 13,05%. . Il est rapporté que si la valeur du SSP est inférieure à 20, l'eau est d'excellente qualité pour l'irrigation, (L.V. Wilcox, 1955). Par conséquent, tous les échantillons d'eau sont répertoriés d'excellente qualité quant à l'utilisation de cette eau souterraine dans l'irrigation.

D. Carbonate de sodium résiduel (RSC)

Le RSC a été utilisé pour déterminer l'effet dangereux du carbonate et du bicarbonate sur la qualité de l'eau pour l'irrigation. RSC est une valeur calculée exprimant l'excès de teneur en CO_3^{2-} et HCO_3^- , qui reste après la consommation de Ca^{2+} et de Mg^{2+} . Le RSC a été calculé selon l'équation 4 recommandée par Eaton, (F. M. Eaton, 1950).

$$RSC = (HCO3 + CO3) - (Ca + Mg) \dots \dots \dots (Eq. 4)$$

Toutes les concentrations ioniques sont en meq /l.

Les valeurs de RSC calculées vont de -2,78 à - 1,06, ce qui indique que tous les échantillons d'eau souterraine ont un RSC inférieur à zéro. Il est rapporté que si la valeur de RSC est inférieure à 10, l'eau est excellente pour l'irrigation, (F. M. Eaton, 1950). Ainsi, tous les échantillons d'eau présentent une excellente qualité pour les propositions d'irrigation.

E. Indice de perméabilité (IP)

L'indice de perméabilité (IP) a également été utilisé pour évaluer le risque lié au sodium et l'adéquation de l'eau à un usage agricole. Cet indice est calculé par la méthode suggérée par Doneen, (L. Doneen, 1962) dans l'équation suivante.

$$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO3}}{Ca + Mg + Na + K} \times 100 \dots \dots \dots (Eq. 5)$$

Tous les ions sont exprimés en meq /l.

Les valeurs de PI dans cette étude varient de 13, 92 à 20,29%. Il est rapporté que si la valeur de RSC est inférieure à 25%, l'eau est impropre à l'irrigation, (L. Doneen, 1962). Paradoxalement les valeurs de PI indiquent que les eaux souterraines Hauteriviennes ne conviennent pas à l'irrigation.

F. Risque de magnésium (MH)

Pour identifier l'eau d'irrigation, I. Szabolcs et C. Darab, (1964) ont proposé le calcul du risque de magnésium (MH) comme dans la formule suivante:

$$MH = \frac{Mg}{Ca + Mg} \times 100 \dots \dots \dots (Eq. 6)$$

Les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont en meq /l.

Les valeurs de MH calculées dans les échantillons d'eau de la zone d'étude varient entre 35, 56 et 37,15%. Il est rapporté que si la valeur de MH est inférieure à 50, l'eau est sûre et adaptée à l'irrigation, (K. V. Paliwal, 1972). Néanmoins les eaux souterraines de l'Hauterivien peuvent être classées comme convenant à l'irrigation.

G. Rapport de Kelly (KR)

Le KR est calculé par l'utilisation de l'équation 7, où les ions Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont en meq /l, (W. P. Kelly, 1940).

$$KR = \frac{Na}{Ca + Mg} \dots \dots \dots (Eq. 7)$$

Si la valeur KR est inférieure à 1, la quantité de Na^+ dans l'eau est faible et l'eau convient à l'irrigation, (W. P. Kelly, 1940).

Dans les échantillons d'eau de l'aquifère Hauterivien de la zone d'étude, le KR est inférieur à 1 (0, 08 à 0, 15). Par conséquent, les eaux souterraines de l'Hauterivien conviennent à l'irrigation.

IV.3.2. Période de Mai 2018 :

IV.3.2. 1 Points échantillonnés :

Quatre-vingt-dix-huit (98) points de prélèvement d'eau, comprenant l'aquifère Hauterivien et Barrémien dans la mine de zinc de Chaabet el Hamra et les forages de l'aquifère superficiel du Mio-Plio- Quaternaire dans la plaine de Ain Azel, ont été échantillonnés. Leurs coordonnées ont été déterminées à l'aide d'un GPS (GARMIN). Les coordonnées UTM sont reprises en annexe 3. L'ensemble des prélèvements réalisés dans la région de Ain- Azel est reporté sur la **figure IV.6**.

IV.3.2. 2 Méthode de prélèvement et conservation des échantillons :

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modification de ses caractéristiques physico-chimiques, raison pour

laquelle le préleveur doit avoir une connaissance précise des conditions de prélèvement très importantes pour la qualité des résultats des analyses.

Pour notre étude hydrochimique, les échantillons ont été prélevés jusqu'au débordement dans des bouteilles en polyéthylène bouchonnées de 1500ml, préalablement rincées avec de l'eau distillée puis de l'eau du forage. Tous les échantillons ont été conservés à basse T° (réfrigérateur) jusqu'au moment d'analyse.

IV.3.2. 3 Méthodes d'analyse :

❖ Mesures in-situ : paramètres physiques :

Les mesures des paramètres physiques in-situ sont essentielles pour la reconstitution de l'état de l'eau à la sortie de l'hydro-système. Les paramètres physiques de l'eau mesurés sur site sont : pH, température (T°), résidus secs (RS) et conductivité électrique (CE).

Ces mesures in-situ ont été effectuées immédiatement après le prélèvement de l'échantillon, à l'aide d'un multi-paramètre, (HANNA HI 76/98195).

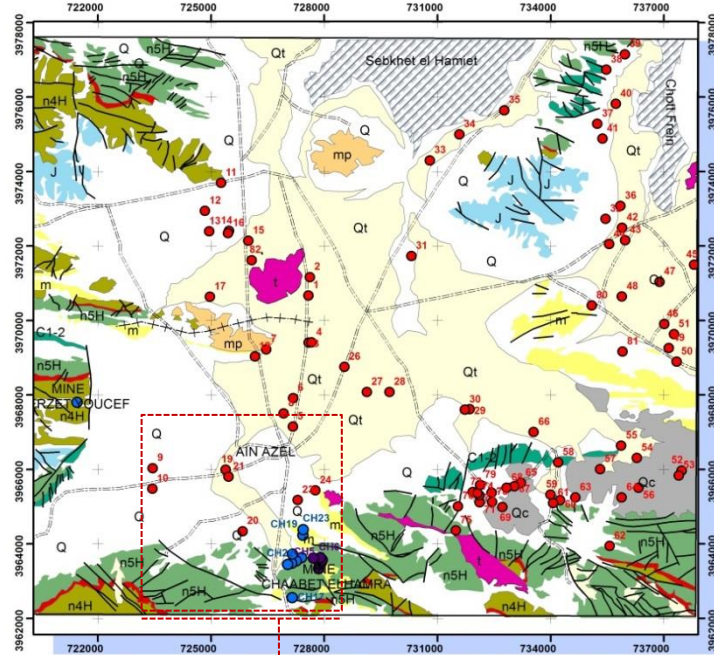
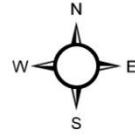
❖ Teneurs en éléments majeurs et mineurs : analyses chimiques

Le sodium et le potassium ont été dosés par photométrie de flamme, (JENWAY PPP7 flamme Photometer). Les ions de calcium et magnésium ont été analysés par spectrométrie à flux continu auto analyseur, (AxFlow III systema). Les bicarbonates ont été analysés par volumétrie, les sulfates par dosage turbidimétrique et les chlorures ainsi que les nitrates ont été dosés par colorimétrie auto-analyseur à flux continu,, (Bluvision TM). Toutes ces analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'ADE de Sétif.

❖ Teneurs des métaux lourds :

Le Zn, Fe, Pb, Cr, Al, Mn et Cu ont été analysés par spectromètre d'absorption atomique (Shimadzu AA-6200) au niveau du laboratoire de chimie, faculté des sciences, Université Ferhat Abbas, Sétif (UFAS).

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

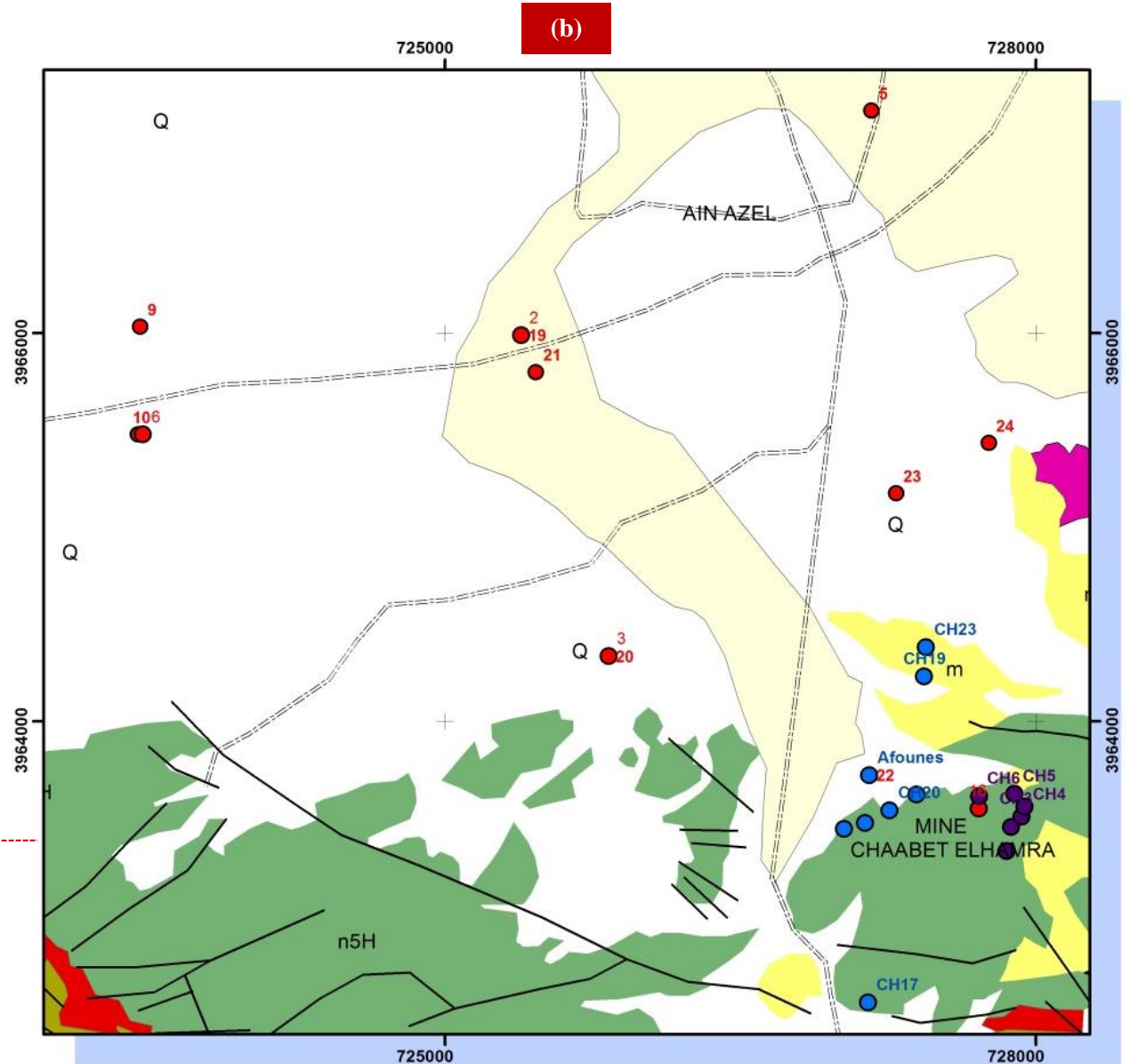


(a)



Légende

- les forages du Mio-Plio-Quaternaire
- les forages du Barrémien
- les forages de l'Hauterivien



(b)



Figure IV.6. Inventaire des points d'eau prélevés (a): vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain- Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet- el- Hamra.

IV.3.2. 4 Caractérisations hydrochimiques :

Les données obtenues dans la zone d'étude, suite à la campagne d'échantillonnage de 2018, (98 prélèvements), sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau sont présentées et discutées.

Les données traitées ont été groupées en fonction de l'âge des aquifères (Hauterivien et Barrémien dans la mine de zinc de Chaabet- el- Hamra et le Mio -Plio- Quaternaire dans la plaine de Ain- Azel) touchés afin d'appréhender éventuellement l'évolution géochimique de l'eau de chaque aquifère.

IV.3.2. 5. Les principaux paramètres physico-chimiques :

❖ La température de l'eau :

La température moyenne des eaux varie entre 17.6 et 21.7 pour l'aquifère Hauterivien, 19.5 et 20.14 pour le Barrémien et 19 à 19.28°C pour le Mio-Plio- Quaternaire.

Ces données, proches de la température moyenne atmosphérique de la zone d'étude (15°C), nous permettent de penser que les différents aquifères sont en équilibre thermique avec l'atmosphère.

❖ pH de l'eau :

Le pH de l'aquifère Hauterivien à travers les forages testés s'inscrit dans la plage de 7,24 à 7,40, 6,62 à 7,8 pour l'aquifère Barrémien et enfin entre 6,9 et 9,63 pour le Mio-Plio-Quaternaire.

Le pH moyen des eaux de l'Hauterivien et du Barrémien est de 7, tandis que celui du Mio-Plio-Quaternaire est de 7,7.

La figure **A3.1 en annexe 3** présente la variabilité spatiale du pH de l'eau souterraine de la région de Ain- Azel au sud de Sétif.

❖ La conductivité électrique (CE) :

La conductivité électrique (CE) mesurée, quoique forte dans la région d'étude, présente une amplitude de variation de $400 \leq CE \leq 5800 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Au niveau de l'aquifère Hauterivien, la CE varie entre 688 et 774 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une valeur médiane de 744,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et pour le Barrémien, la CE est comprise entre 515 et 1920 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (médiane = 782,79 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Par ailleurs, les forages du Mio-Plio-Quaternaire présentent CE comprise entre 400 et 5800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur la conductivité électrique des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

La figure **A3.2 en annexe 3** présente la variabilité spatiale du CE de l'eau souterraine de la région de Ain- Azel au sud de Sétif.

❖ Les éléments chimiques majeurs :

Avant d'interpréter les données acquises au laboratoire, il est indispensable de vérifier leur fiabilité à travers un bilan ionique. Une analyse chimique est considérée comme fiable, lorsque la balance ionique ne dépasse pas 10%. L'expression de la balance ionique considérée dans ces analyses est la suivante :

$$IB\% = 100 \times \frac{(\sum \text{cations} - \sum \text{anions})}{(\sum \text{cations} + \sum \text{anions})} \dots \dots \dots (Eq. 8)$$

Pour l'ensemble des analyses des échantillons, le calcul de la balance ionique a été effectué, il est inférieur ou égal à 10%, (**Tableau A3.4 en Annexe 3**).

Les données présentées ci-dessous se rapportent aux forages des aquifères de l'Hauterivien et Barrémien.

L'importance des ions majeurs, (valeurs exprimées en mg/l), suit l'ordre suivant dans les eaux de l'aquifère :

- Hauterivien: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- et K^+ .
- Barrémien: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , NO_3^- et K^+ .

La contribution relative des ions dominants à la minéralisation des eaux est illustrée sur les **figures IV.7 et 8**.

Figure IV.7 Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Barrémiennes.

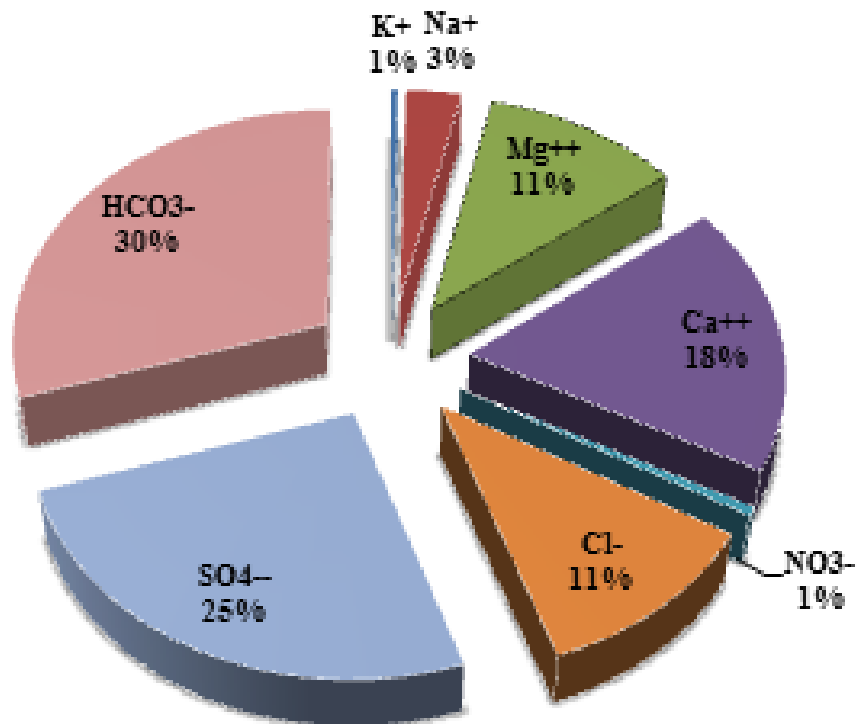
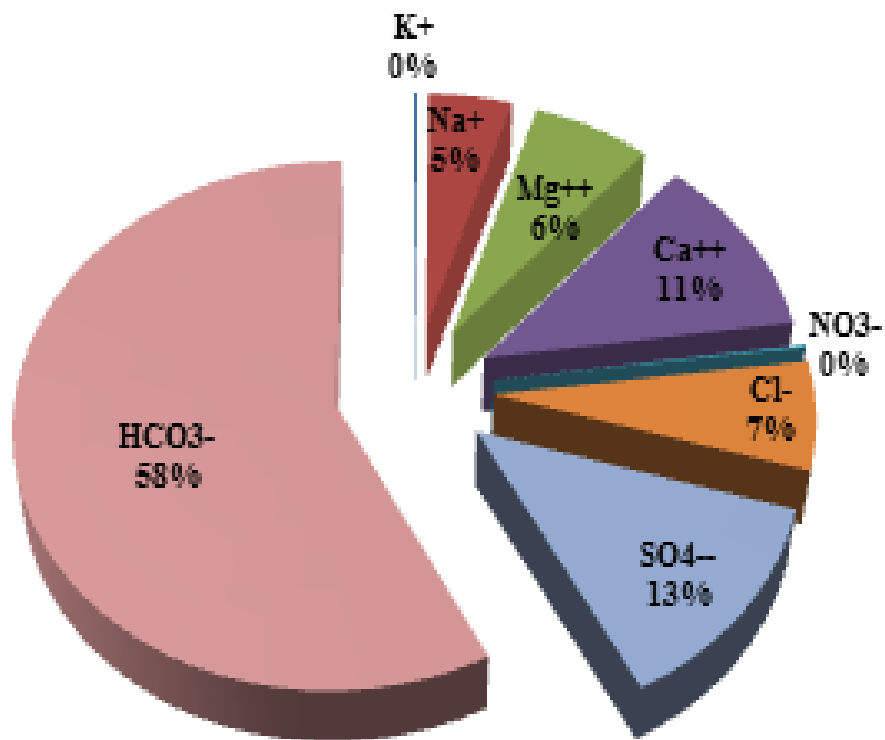


Figure IV.8 Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Hauteriviennes.



Il apparaît que les bicarbonates et les sulfates sont équitables dans l'aquifère Barrémien, tandis que, les bicarbonates sont les plus dominants dans les forages de l'aquifère Hauterivien.

❖ **Les cations :**

Les teneurs en Ca^{2+} sont très fortes et varient de 61,43 et 74,54mg/l au niveau des forages de l'Hauterivien (moyenne 69 mg/l), et de 58,2 à 205,49 mg/l, (moyenne 119 mg/l) au niveau des forages du Barrémien, Par ailleurs, Ca^{2+} varie de 18 à 460 mg/l dans les forages considérés du Mio-Plio-Quaternaire, (moyenne 125,24 mg/l). Par conséquent, la concentration optimale de Ca^{2+} aide à prévenir les troubles cardiaques et le bon fonctionnement des processus métaboliques humains, (F. Hamzaoui-Azaza et al. 2020). La **figure A3.3 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en calcium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

Les teneurs en Mg^{2+} sont comprises entre 35,23 à 42,59mg/l pour les forages de l'Hauterivien, (moyenne 39,63mg/l), de 35,2 à 280,56mg/l (moyenne 107 mg/l), pour les forages du Barrémien et de 14 à 182 mg/l, (moyenne 56,8 mg/l) pour les forages du Mio-Plio-Quaternaire. L'OMS fournit de l'eau potable au-delà des limites recommandées pour Mg^{2+} augmente le risque d'affections cardiovasculaires et d'abaissement sévère de la pression artérielle. La **figure A3.4 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en Magnésium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

Quant au Na^+ , les teneurs sont comprises entre 15 et 25mg/l, (moyenne 19 mg/l), pour les forages de l'Hauterivien, de 11,69 à 29mg/l pour les forages du Barrémien (moyenne 24 mg/l) et de 13 à 724 mg/l pour les forages du Mio-Plio-Quaternaire. La **figure A3. 5 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en Sodium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel. Dans la citation, la teneur en Na^+ supérieure à la limite recommandée de 200 mg/l dans l'eau potable provoque une hyper- tension, des maladies congénitales, des troubles rénaux et des troubles nerveux dans le corps humain, (M. A. Dalvie et al. 2003).

Les données du K^+ sont par ailleurs comprises 0,86 et 0,97mg/l pour les forages de l'Hauterivien, (moyenne 0,91mg/l), de 1,18 à 3,6mg/l, (moyenne 3,03mg/l) pour les forages du Barrémien et de 1 à 74 mg/l, (moyenne 5,7 mg/l) pour le Mio-Plio-Quaternaire. La **figure A3.6 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en Potassium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

❖ Les anions :

Les bicarbonates prennent une part importante à la minéralisation des deux aquifères : Hauterivien et Barrémien, (teneurs comprises entre 317,5 et 288,4mg/l, avec une moyenne de 302mg/l pour l'aquifère Hauterivien et 393,5 à 213,6mg/l –moyenne de 287mg/l- pour l'aquifère Barrémien). Pour l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire, les teneurs varient entre 73 et 671mg/l avec une moyenne de 246,27mg/l, La **figure A3.7 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des Bicarbonates des eaux souterraines dans la région de Ain-Azel.

Les sulfates sont également présents. Leur teneur varie entre 90 et 56mg/l pour l'aquifère Hauterivien, de 52,7 à 484 mg/l pour le Barrémien, puis entre 50 et 998 mg/l avec une moyenne de 251,6 mg/l pour les forages du Mio-Plio-Quaternaire. Une teneur élevée en SO_4^{2-} dans l'approvisionnement en eau domestique peut générer un goût désagréable et une altération gastro-intestinale se manifestant par une diarrhée, (OMS 1993). La **figure A3.8 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des sulfates des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

La limite admissible de Cl^- pour l'eau potable est de 200 mg/l pour l'OMS. Des niveaux élevés de Cl^- dans l'eau potable peuvent causer des vomissements et de la diarrhée répétés, (V. Bhardwaj et D. S. Singh 2011). La teneur moyenne des chlorures des forages de l'Hauterivien est de 38mg/l (minimum : 30mg/l, maximum : 47mg/l), Pour les forages du Barrémien, cette teneur varie entre 32,6 et 163mg/l (moyenne 96 mg/l), Par ailleurs, et pour les forages de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire. Cette teneur varie entre 20 et 1170 mg/l avec une moyenne de 240,66 mg/l. Alors, c'est l'un des éléments majeurs qui détermine le faciès chimique des eaux dans la région. La **figure A3.9 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des chlorures des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

La présence du NO_3^- plus de 10 mg/L devient une référence de la pollution anthropique due au débit de retour de l'irrigation due à l'utilisation intensive d'engrais chimiques (I. Matiatos et al. 2014). L'OMS a suggéré que la limite maximale admissible pour le NO_3^- est de 50 mg/L.

Les nitrates se présentent sous forme de faibles teneurs dans les forages de l'Hauterivien, (minimum : 1mg/l, maximum : 5mg/l, avec une moyenne de 2mg/l). Cet élément présente des valeurs élevées dans l'aquifère du Barrémien (0,04 et 43,3mg/l) et Mio-

Plio-Quaternaire, (1 et 110 mg/l avec une moyenne de 37,93 mg/l). Ces valeurs élevées suggèrent qu'elles soient dues aux apports d'engrais, (Contexte agricole). Les échantillons qui présentent des teneurs du NO_3^- au-dessus de la norme assurant un risque pour la consommation humaine causant cyanose (méthémoglobinémie), hypertension, diabète, goitre et cancer gastrique, (M. Vasanthavigar et al. 2010) ainsi que la mort par asphyxie lorsqu'elle est combinée avec Viagra.

La **figure A3.10 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des nitrates des eaux souterraines dans la région de Ain Azel.

IV.3.2.6 Diagramme de Gibbs :

Généralement, Le diagramme de R. J. Gibbs, (1970), (**Figure IV.9**) montre que l'altération des roches contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes.

Par contre, les eaux souterraines du Barrémien et du Mio-Plio-Quaternaire, le même diagramme, (**Figure IV.10 et IV.11**), montre que l'altération des roches est la responsable de la chimie des ions majeurs pour certains échantillons, et l'évaporation pour d'autres. Ce diagramme représente les mécanismes mixtes pour ces deux aquifères.

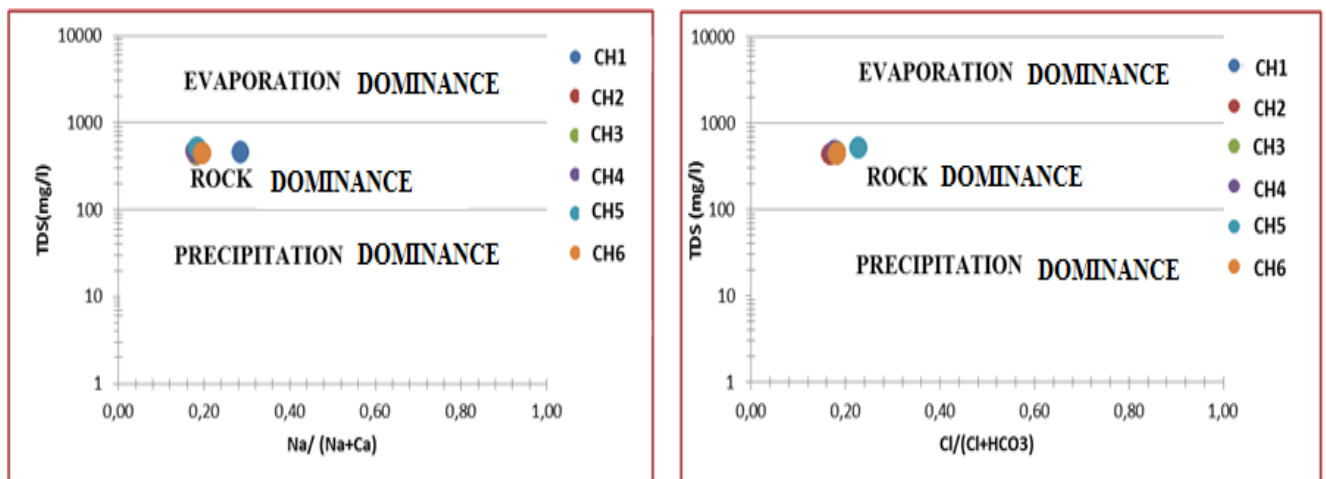


Figure IV. 9 Diagramme de Gibbs des eaux Hauteriviennes, (Mai 2018).

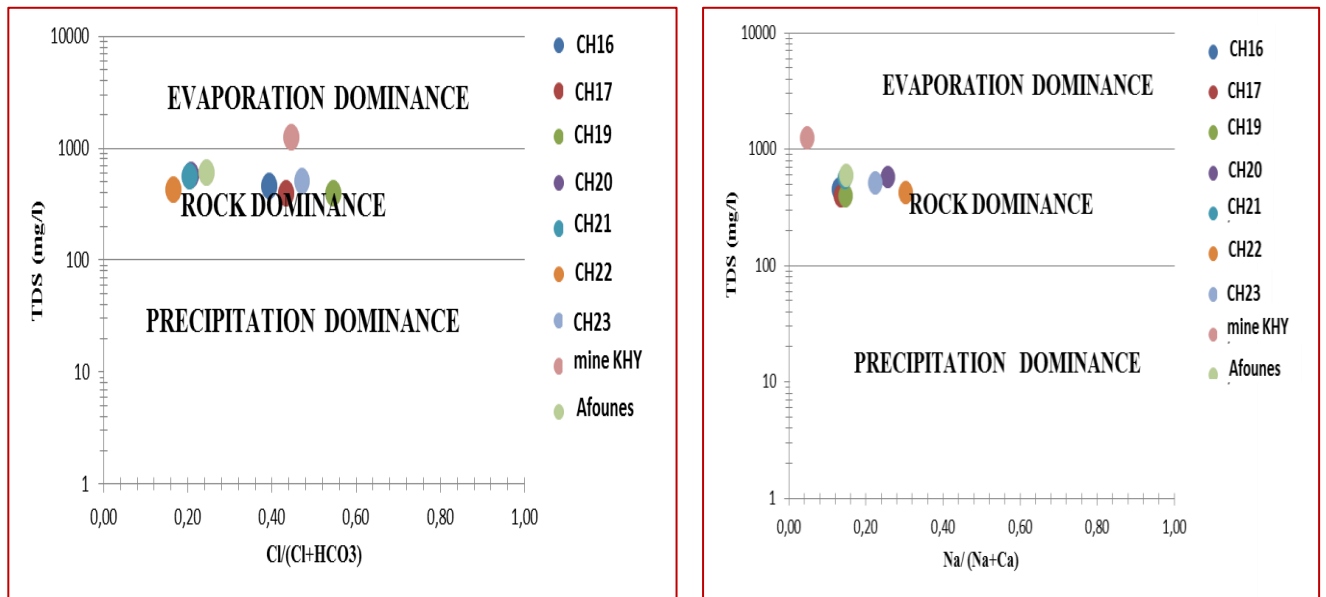


Figure IV.10 Diagramme de Gibbs des eaux Barrémiennes, (Mai 2018).

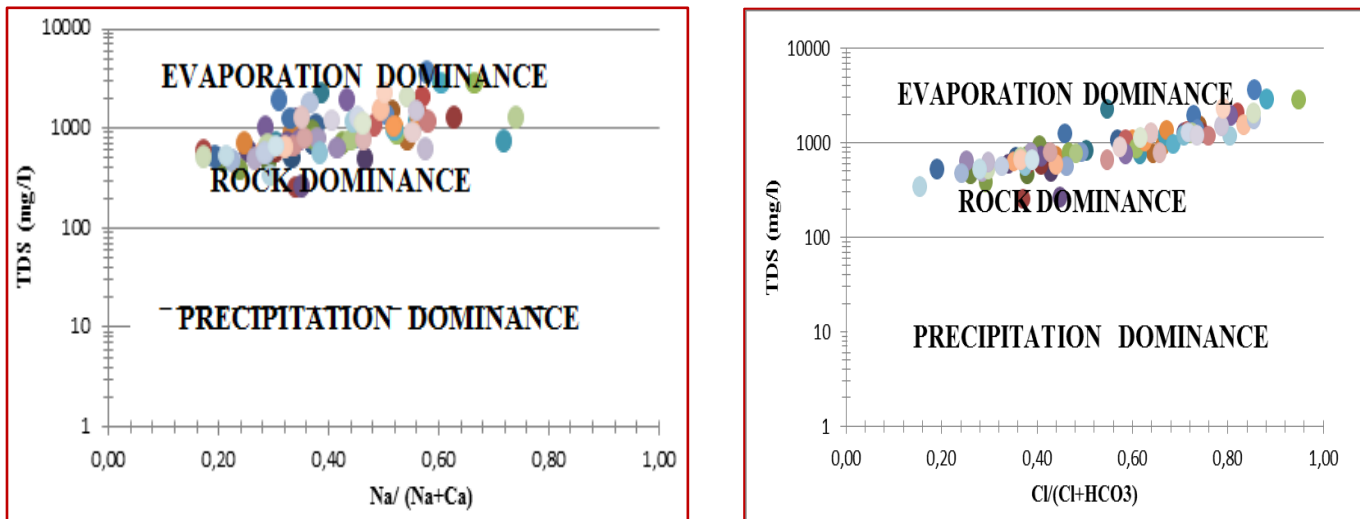


Figure IV. 11 Diagramme de Gibbs des eaux du Mio-Plio-Quaternaire, (Mai 2018).

IV.3.2. 7 Faciès chimiques des eaux :

Le faciès chimique des eaux a été déterminé classiquement à l'aide du diagramme de Piper en ayant recours au logiciel Diagrammes. Les données des ions majeurs, reportées sur ce diagramme, (Figures IV.12, IV.13, IV.14, a-b-c), ont permis d'identifier les faciès chimiques pour les eaux souterraines de la zone d'étude, dont la répartition spatiale est reprise sur la figure IV.15. Ces faciès sont :

- ❖ L'aquifère Hauterivien :
 - Bicarbonaté calcique et magnésien
- ❖ L'aquifère Barrémien :
 - Chloruré et sulfaté calcique et magnésien
 - Bicarbonaté calcique et magnésien
- ❖ L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire :
 - Bicarbonaté calcique et magnésien
 - Chloruré et sulfaté calcique et magnésien
 - Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique

Tableau IV. 6. Classification hydrochimique des eaux de la zone d'étude.

- Faciès chimique	Les points d'eau
- Bicarbonaté calcique et magnésien	L'aquifère Hauterivien : CH1,CH2,CH3,CH4,CH5,CH6
	L'aquifère Barrémien : CH22, Afounes
	L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire : 1, 9, 19,61,71
- Chloruré et sulfaté calcique et magnésien	L'aquifère Hauterivien : aucun forage
	L'aquifère Barrémien : CH16,CH17,CH19,CH20,CH21,mine Kherzet Youssef
	L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire : 2 à 83(sauf les points déjà cités)
- Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique,	L'aquifère Hauterivien : aucun forage
	L'aquifère Barrémien: aucun forage
	L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire : 32, 76, 37, 38, 41,57

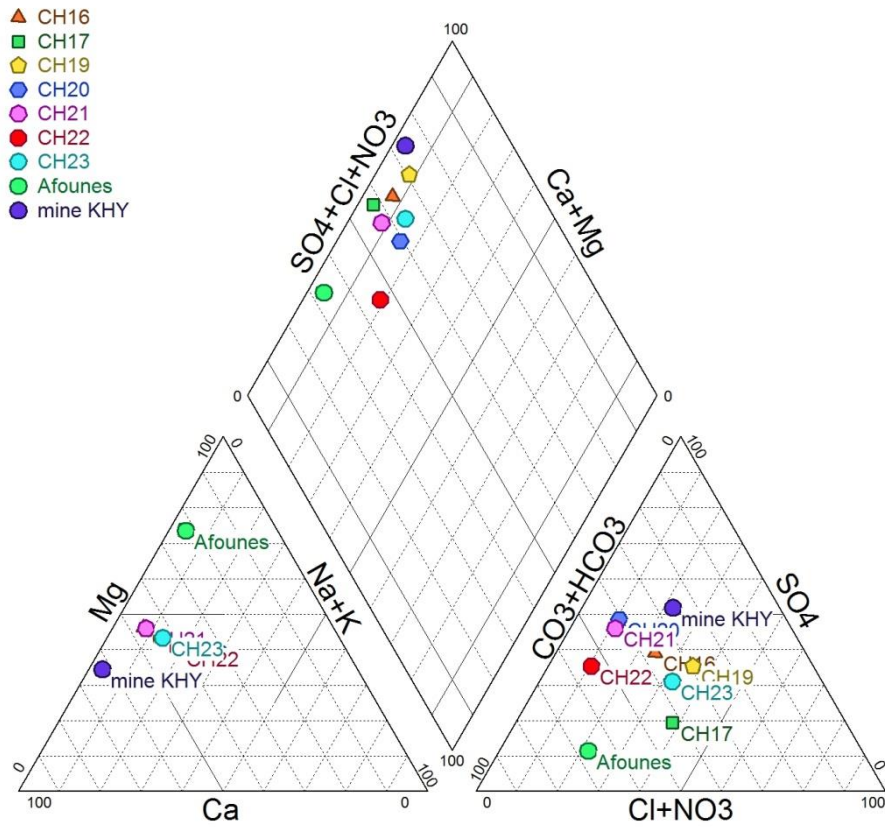


Fig.IV.12. Diagramme de Piper, (les eaux du Barrémien), période de Mai 2018

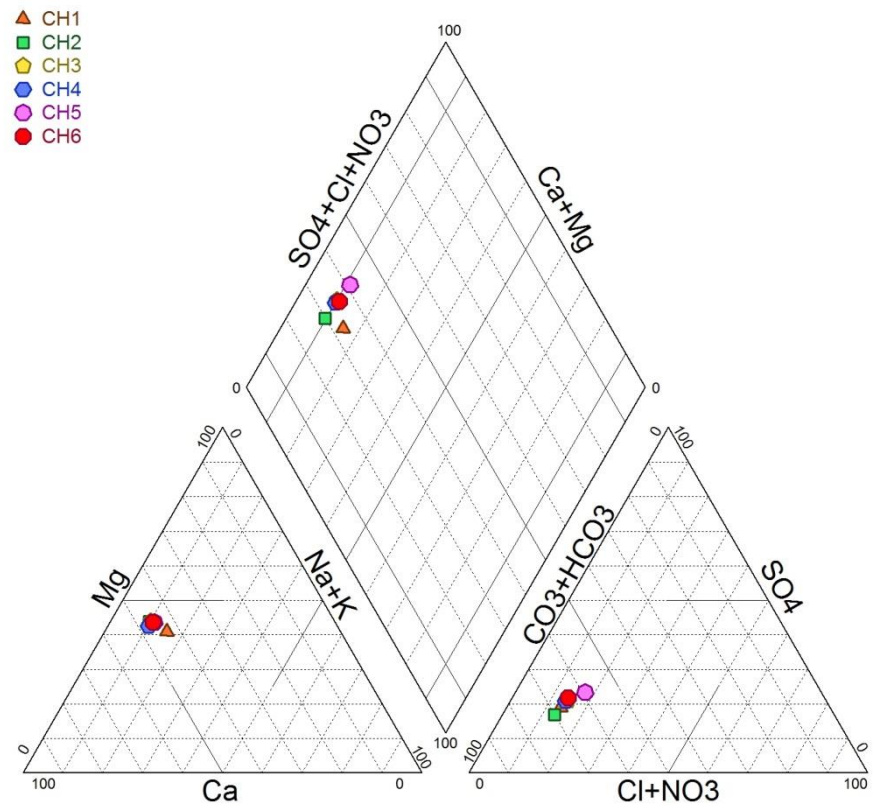


Fig.IV.13. Diagramme de Piper, (les eaux de l'Hauterivien), période de Mai 2018

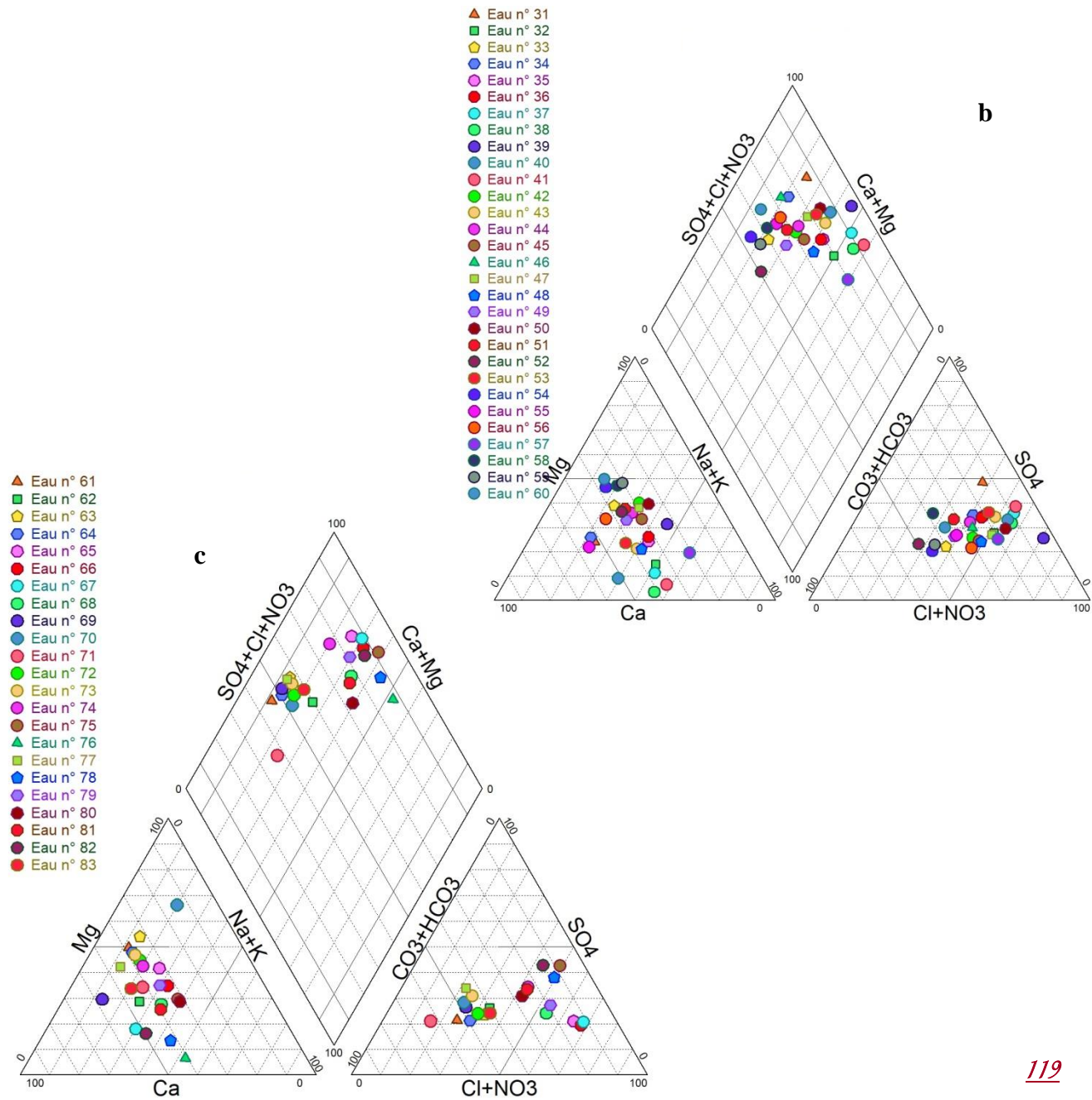
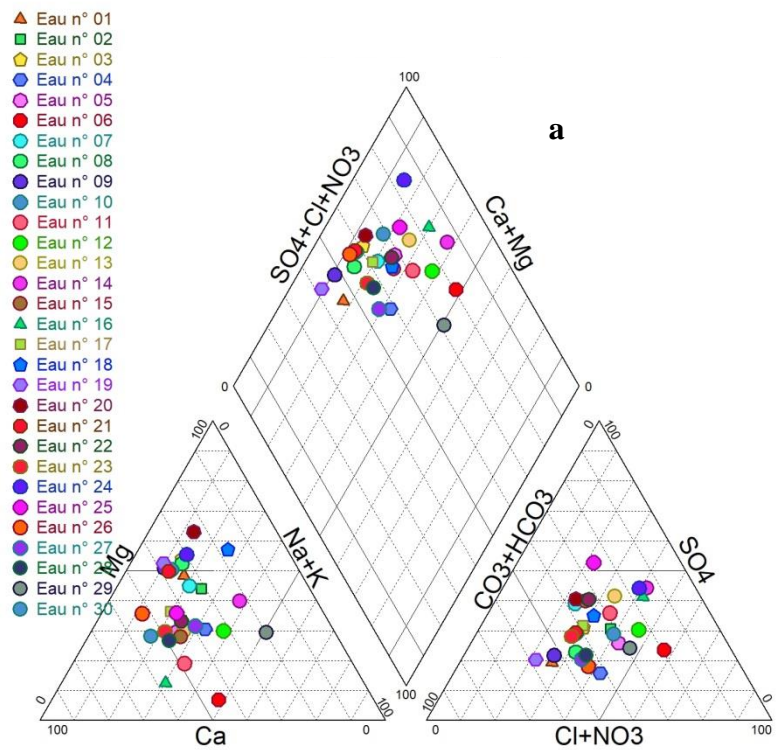
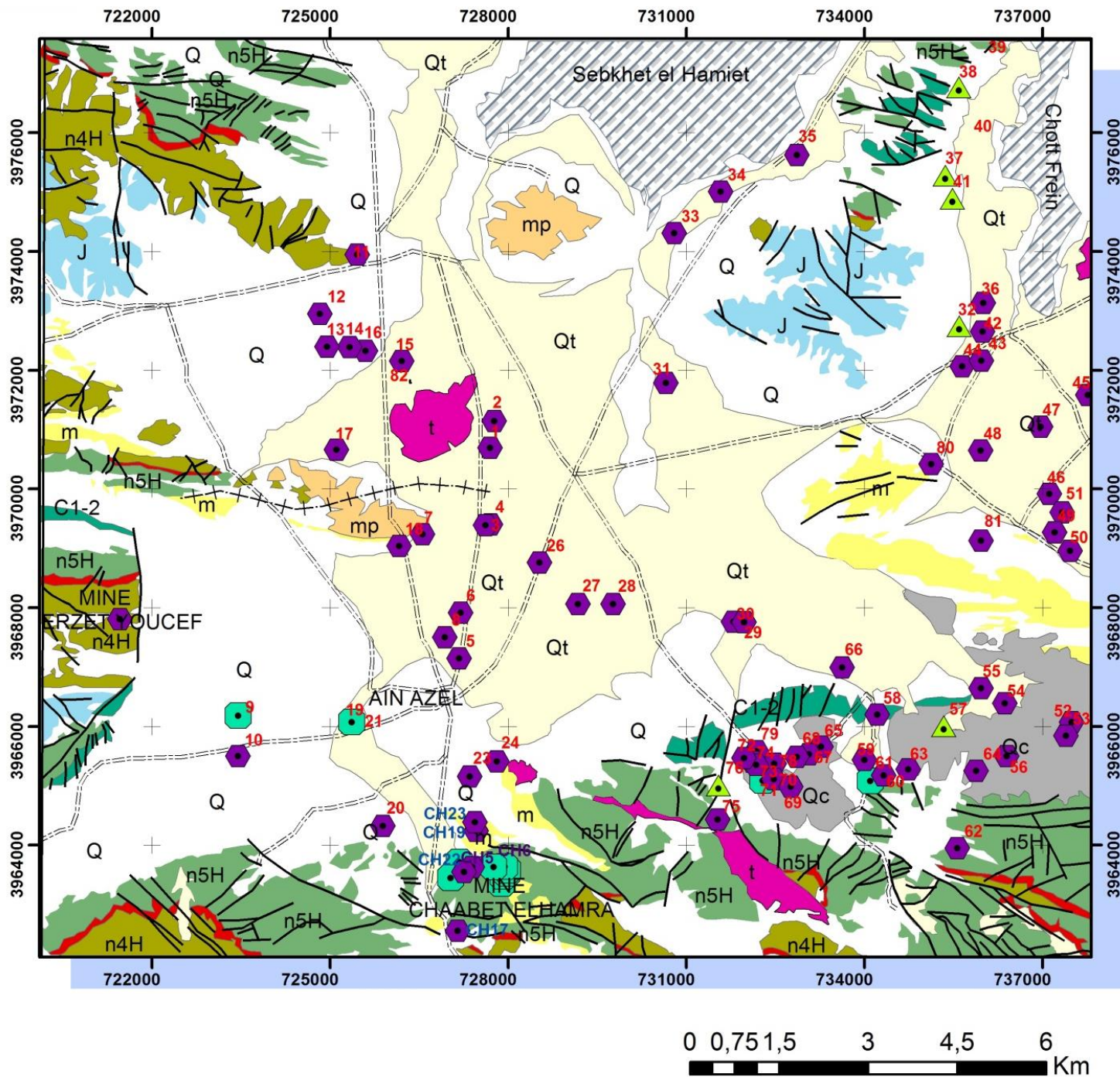


Fig.IV.14a, b, c. Diagramme de Piper, (les eaux du Mio-Plio-Quaternaire), période de Mai 2018



Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Légende

- ◆ Facies: Chlorurée et sulfatée calcique et magnésien
- ▲ Facies: Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique
- Facies: Bicarbonatée calcique et magnésien

Fig.IV.15. Faciès chimiques des eaux de la zone d'étude, (Période de Mai 2018).



IV.3.2. 8 Corrélation entre les éléments majeurs :

Les relations entre les éléments chimiques sont établies à l'aide d'une analyse statistique à plusieurs variables, (matrice de corrélation), pour identifier les groupes des paramètres chimiques qui peuvent avoir un type de variation semblable,

L'utilisation de l'analyse en composante principale (ACP) pour l'étude globale des eaux souterraines des aquifères Hauterivien, Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire dans la région d'étude, permet une différenciation sur leurs particularités chimiques,

IV.3.2. 8. 1 ACP pour les eaux Hauteriviennes :

Le tableau IV. 7 reprend la matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Hauterivien,

Tableau IV. 7 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Hauterivien.

Variables	K+	Na+	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	RS	CE	PH		
K+	1,00												
Na+	0,34	1,00											Bonne corrélation
Mg ⁺⁺	0,63	-0,32	1,00										Moyenne corrélation
Ca ⁺⁺	0,55	-0,34	0,95	1,00									Faible corrélation
NO ₃ ⁻	-0,17	-0,34	0,19	0,03	1,00								Forte anti corrélation
Cl ⁻	0,57	0,30	0,70	0,65	0,28	1,00							Moyenne anti corrélation
SO ₄ ⁻⁻	0,67	0,22	0,81	0,79	0,05	0,95	1,00						Faible anti corrélation
HCO ₃ ⁻	-0,40	0,15	-0,40	-0,11	-0,70	-0,29	-0,18	1,00					
RS	0,94	0,20	0,75	0,61	0,17	0,70	0,73	-0,63	1,00				
CE	0,43	0,65	0,32	0,36	-0,05	0,86	0,80	0,13	0,43	1,00			
PH	0,20	-0,01	-0,13	-0,29	-0,37	-0,50	-0,35	-0,26	0,08	-0,57	1,00		

L'examen du tableau de cette matrice de corrélation permet de voir qu'il existe une bonne corrélation, (Plus de 70%) entre :

- RS et K⁺;
- Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, RS et Mg²⁺;
- SO₄²⁻, RS, CE et Cl⁻ ;
- RS, CE et SO₄²⁻,

La corrélation est moyenne ($\pm 60\%$) entre :

- Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , et K^+ ;
- CE et Na^+ ;
- Cl^- , RS et Ca^{2+} ,

Par ailleurs, on observe une anti-corrélation forte entre NO_3^- et HCO_3^- .

IV.3.2. 8.2 ACP pour les eaux Barrémiennes:

La matrice de corrélations multiples de l'analyse en composantes principales appliquée aux descripteurs chimiques des eaux Barrémiennes est présentée dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Barrémien.

Variables	K+	Na+	Mg++	Ca++	NO3-	Cl-	SO4--	HCO3-	RS	CE	PH
K+	1,00										
Na+	0,77	1,00									
Mg++	0,20	0,04	1,00								
Ca++	-0,79	-0,75	0,31	1,00							
NO3-	-0,25	-0,25	0,67	0,44	1,00						
Cl-	-0,36	-0,39	0,18	0,49	0,41	1,00					
SO4--	-0,90	-0,78	-0,54	0,54	-0,02	0,30	1,00				
HCO3-	0,24	-0,11	0,47	0,01	0,12	-0,01	-0,22	1,00			
RS	-0,77	-0,92	-0,16	0,62	0,05	0,19	0,82	0,19	1,00		
CE	-0,80	-0,92	0,06	0,82	0,33	0,44	0,76	0,24	0,88	1,00	
PH	0,11	-0,21	0,01	-0,15	-0,08	-0,07	0,09	0,68	0,39	0,36	1,00

On observe une très bonne corrélation, (plus de 70%), entre les descripteurs chimiques suivants :

- K^+ et Na^+ ;
- Ca^{2+} et CE
- RS, CE et SO_4^{2-}
- RS et CE

Et une forte anti- corrélation entre :

- Ca^{2+} , SO_4^{2-} , RS, CE et K^+
- Ca^{2+} , SO_4^{2-} , RS, CE et Na^+

IV.3.2.8.3 ACP pour les eaux du Mio-Plio-Quaternaire:

L'analyse du tableau IV.9 de la matrice de corrélation multiple pour les eaux du Mio-Plio-Quaternaire montre :

❖ Une bonne corrélation (+ de 70%) entre :

- Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, RS, CE et Na⁺
- Cl⁻, SO₄²⁻, RS, CE et Ca²⁺
- SO₄²⁻, RS, CE et Cl⁻
- RS, CE et SO₄²⁻

❖ Une moyenne corrélation entre :

- Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻, RS, CE et K⁺
- SO₄²⁻, RS et Mg²⁺
- HCO₃⁻ et Ca²⁺

Tableau IV. 9 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire,

Variables	K+	Na+	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	RS	CE	PH
K+	1,00										
Na+	0,42	1,00									
Mg⁺⁺	0,30	0,29	1,00								
Ca⁺⁺	0,63	0,81	0,36	1,00							
NO₃⁻	-0,20	-0,20	-0,22	-0,17	1,00						
Cl⁻	0,42	0,98	0,36	0,86	-0,22	1,00					
SO₄⁻⁻	0,55	0,78	0,56	0,91	-0,30	0,83	1,00				
HCO₃⁻	0,66	0,30	0,38	0,52	-0,13	0,32	0,38	1,00			
RS	0,56	0,92	0,50	0,95	-0,21	0,95	0,94	0,47	1,00		
CE	0,54	0,92	0,49	0,94	-0,21	0,96	0,94	0,46	1,00	1,00	
PH	-0,11	-0,29	-0,39	-0,40	-0,17	-0,32	-0,34	-0,51	-0,42	-0,41	1,00

	Bonne corrélation
	Moyenne corrélation
	Faible corrélation
	Faible anti corrélation

En conclusion de cette analyse en composante principale (ACP) appliquée aux eaux souterraines de la région de Ain- Azel, dans le Sud de Sétif, il apparaît que la forte corrélation entre les éléments chimiques exprime la même origine. Cette information va être précisée en utilisant les diagrammes binaires.

IV.3.2. 9 Relations binaires entre les éléments majeurs :

IV.3.2. 9.1 L'aquifère Hauterivien :

❖ Couple $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ - Conductivité :

À l'aide de la figure IV.16, on note que 100% des points analysés présentent un rapport supérieur à 1, indiquant la dominance des ions du calcium, et cela nous permet de dire que la conductivité est influencée par le calcium.

❖ Couple Ca^{2+} - Na^+ :

Le graphe, (figure IV .17) montre deux groupes :

- 1- Une diminution du Ca^{2+} alors que le Na^+ reste en évolution, (un échange de base est probable) ;
- 2- Évolution simultanée du calcium et sodium, (probablement dissolution des évaporites sachant que l'aquifère Hauterivien est carbonaté).

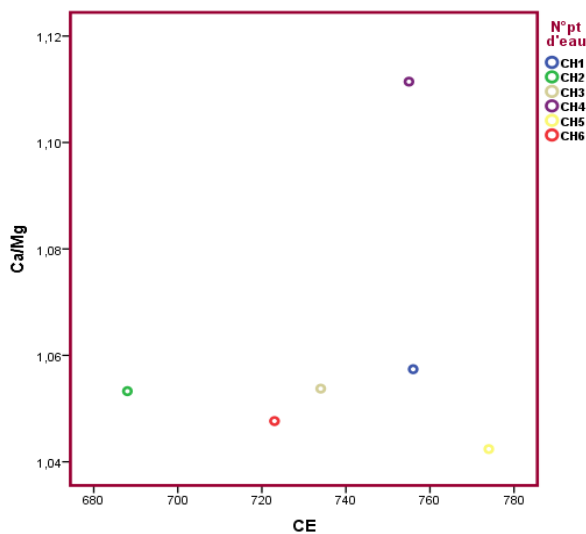


Figure IV.16. Relation $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -CE.

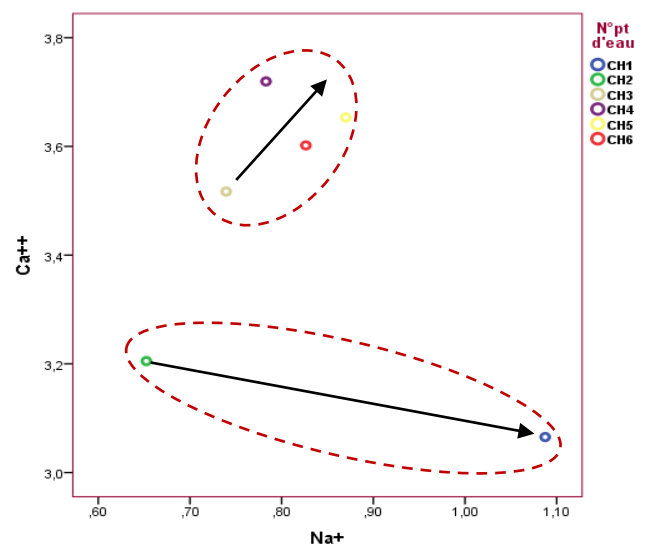


Figure IV.17. Relation Ca^{2+} - Na^+ .

❖ Couple Mg^{2+} - Na^+ :

Le graphe, (figure IV.18), met en évidence également deux tendances :

- 1- Une évolution simultanée du Mg^{2+} et Na^+ (dissolution des évaporites) constatée dans les forages CH3, CH4, CH5 et CH6 ;

2- Une diminution du Mg^{2+} alors que le sodium reste en évolution (un échange de base peut-être) constatée dans les forages CH1 et CH2.

❖ **Couple SO_4^{2-} - Cl^- :**

Le graphe, (**figure IV.19**), montre que les eaux captées dans les forages de l'aquifère Hauterivien, (CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6), présentent un excès de Cl^- (probablement dissolution des évaporites sachant que l'aquifère Hauterivien est carbonaté).

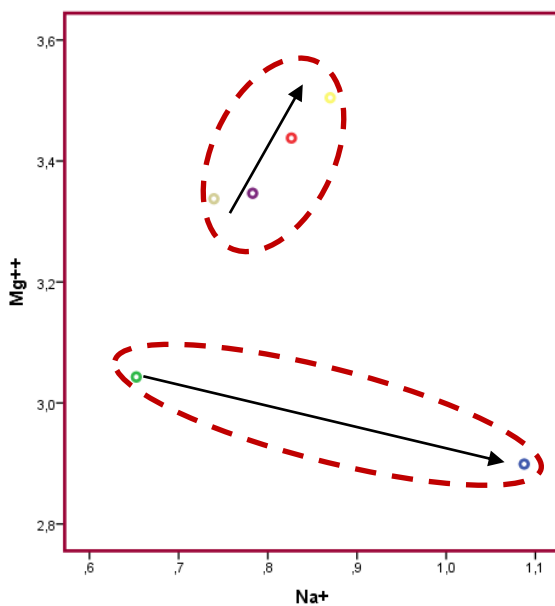


Figure IV.18. Relation Mg^{2+} - Na^+ .

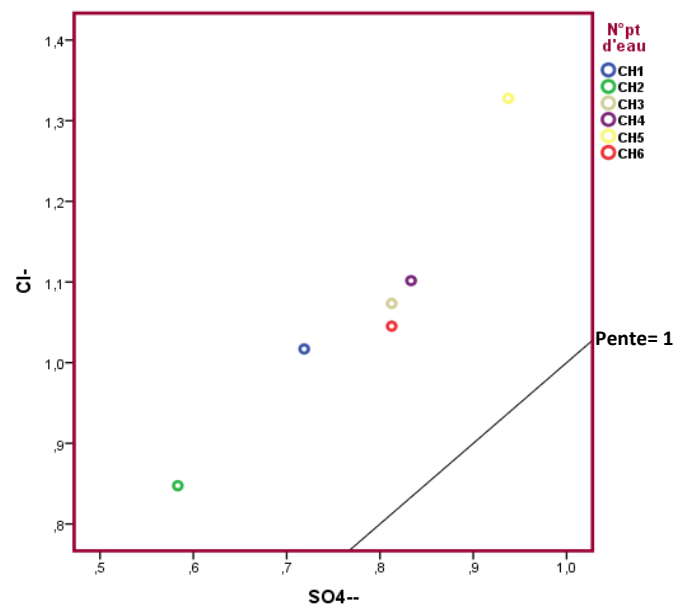


Figure IV.19. Relation SO_4^{2-} - Cl^- .

❖ **Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du calcium, (**Figure IV.20**), et une absence totale du SO_4^{2-} . Cette relation traduit la dissolution du calcium d'origine carbonaté.

❖ **Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du Mg, (**Figure IV.21**), et une absence totale du SO_4 . Cette relation traduit la dissolution des formations carbonatées riches en Mg telle que les dolomies. Cette relation confirme la présence du faciès bicarbonaté magnésien.

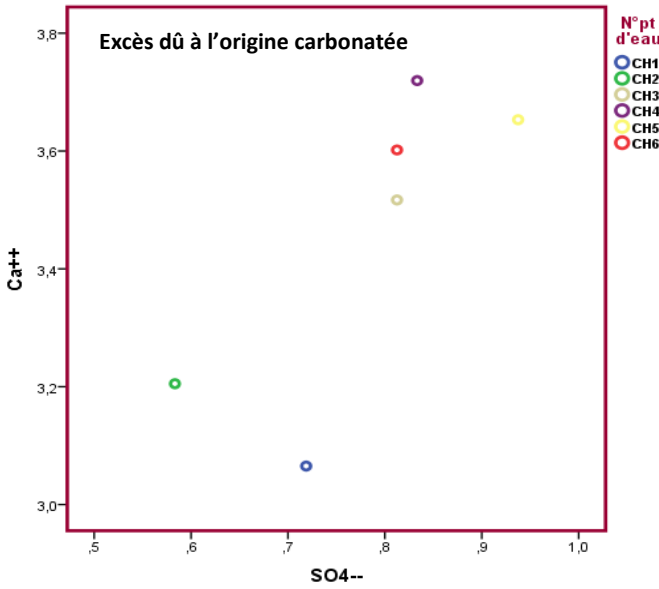


Figure IV.20. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}

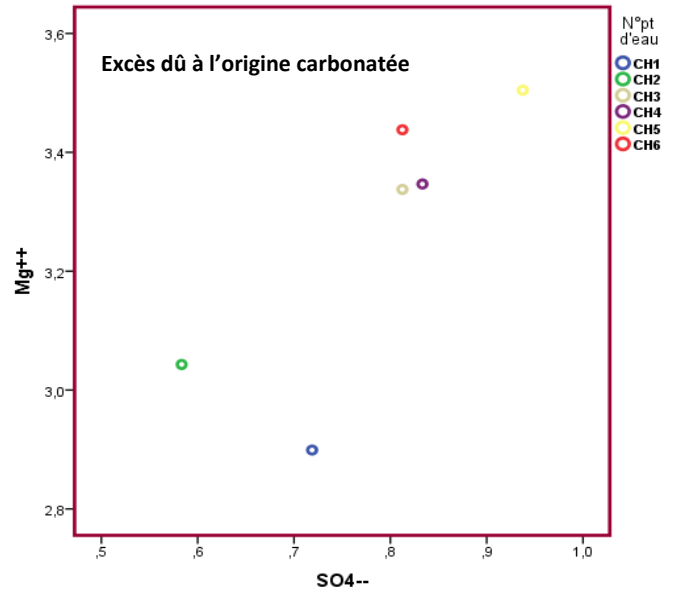


Figure IV.21. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}

❖ Couple Ca^{2+} - Cl^- :

Lorsque ce rapport est supérieur à 1 (Figure IV.22), le Ca prédomine, c'est le cas de tous les forages : CH1, CH2, CH3, CH4, CH5 et CH6.

❖ Couple Mg^{2+} - Cl^- :

Lorsque ce rapport est supérieur à 1, le Magnésium prédomine, ce qui est notable dans la Figure IV.23.

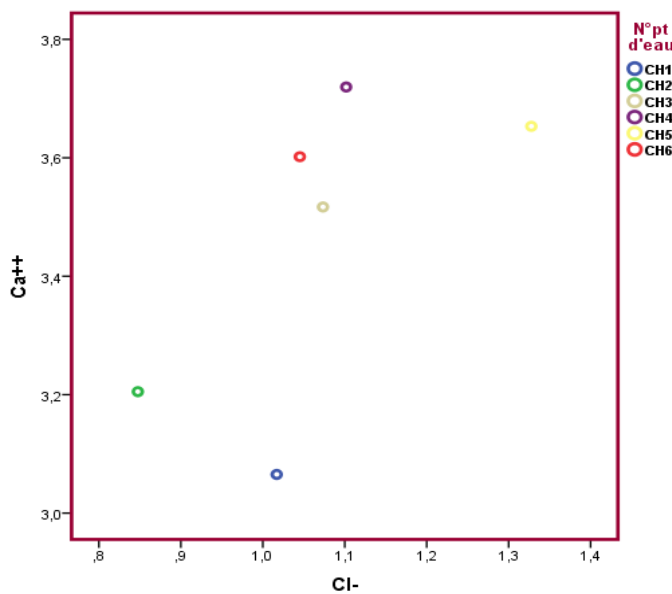


Figure IV.22. Relation Ca^{2+} - Cl^-

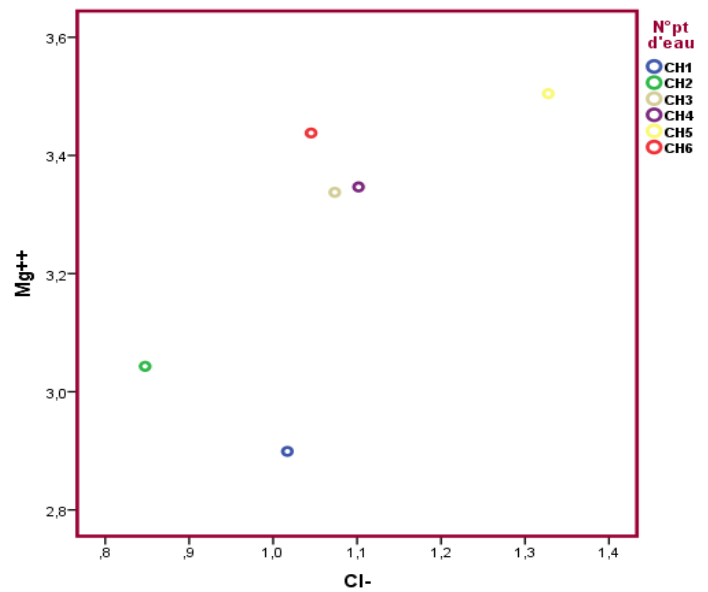
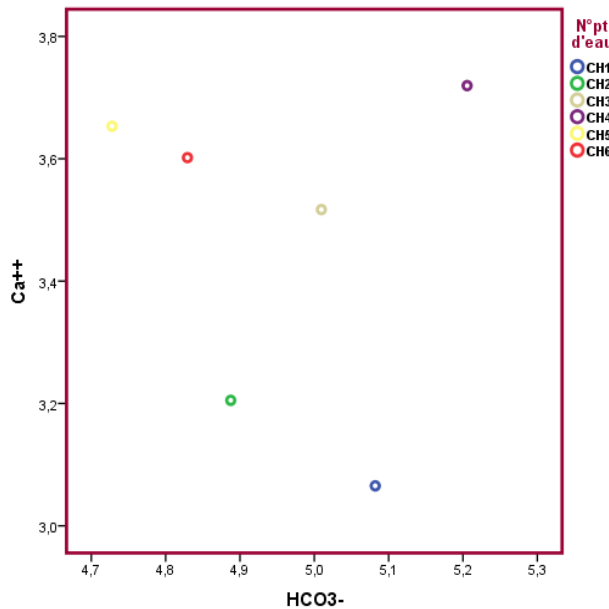
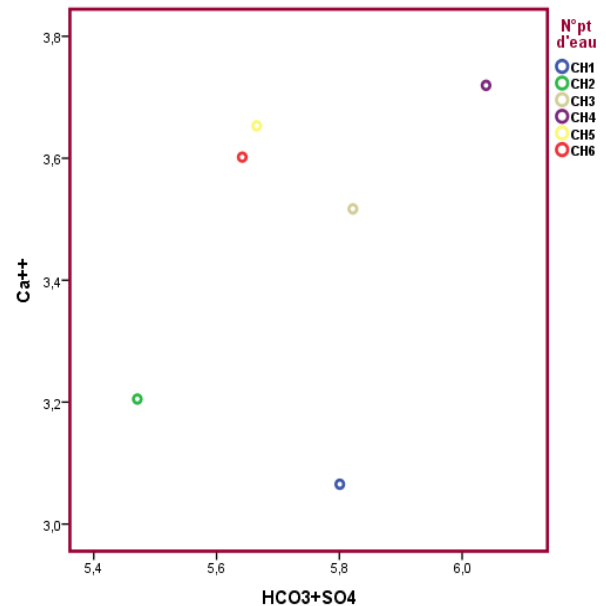


Figure IV.23. Relation Mg^{2+} - Cl^-

❖ Couple Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-} :

La figure IV. 24 montre l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates. Tous les forages CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6 indiquent une origine carbonatée comme source du calcium. La figure IV.25 confirme ce fait.

Figure IV.24. Relation Ca^{2+} - HCO_3^- Figure IV.25. Relation Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}

IV.3.2. 9.2 L'aquifère Barrémien :

❖ Couple SO_4^{2-} - Cl^- :

Tenant compte de la dominance de faciès chloruré et sulfaté, il est important de vérifier la relation entre ces deux éléments. Le graphe, (figure IV.26), montre une dispersion des points où on constate que les eaux captées dans les forages, (CH19, CH23, CH16, Afounes et CH17), présentent un excès de Cl^- , tandis que les forages, (CH21, CH22 et CH20), présentent un excès de SO_4^{2-} .

❖ Couple SO_4^{2-} / Cl^- - Conductivité:

Ce rapport permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la mise en solution des ions évaporitiques en fonction de la conductivité électrique. On note que la conductivité est influencée par les sulfates et les chlorures.

La présentation graphique, (**Figure IV. 27**), montre que 38% des points analysés et précisément les forages, (CH20, CH21 et CH22), présentent un rapport supérieur à 1, indiquant une légère dominance des ions du gypse par rapport aux ions chlorurés, (62% des points analysés : CH16, CH17, CH19, CH23 et Afounes).

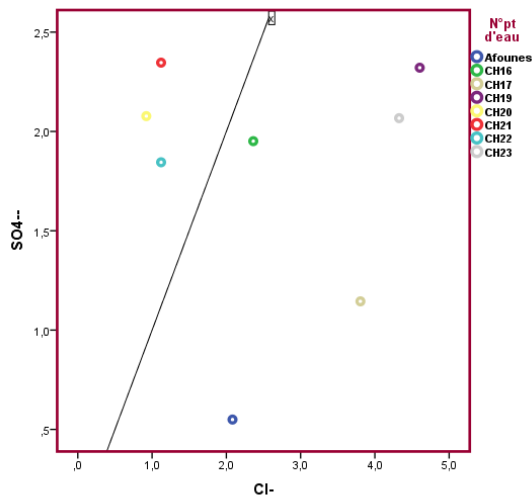


Figure IV.26. Relation Cl⁻ - SO₄²⁻

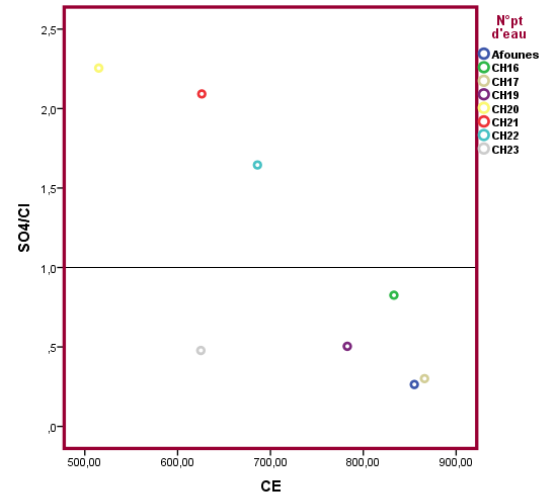


Figure IV.27. Relation SO₄²⁻ / Cl⁻ - CE

❖ **Couple Ca²⁺/Mg²⁺ - Conductivité :**

L'influence de ces deux éléments sur la conductivité électrique de l'eau barrémienne est vérifiée par la figure IV.28. On note que la conductivité est influencée par le calcium et le magnésium, La représentation graphique montre que 80% des points analysés présentent un rapport égal à 1, indiquant une égalité des ions de calcium et magnésium, tandis que 20% des points analysés, (CH23 et Afounes), présentent une dominance de Mg²⁺.

❖ **Couple Ca²⁺ - Na⁺ :**

Le graphe de la **figure IV.29** met en lumière trois tendances :

- 1- Une diminution du Ca²⁺ alors que Na⁺ reste en évolution, (probablement un échange de base entre Na⁺ et Ca²⁺) ;
- 2- Le calcium évolue indépendamment du Na⁺ (une autre origine que les évaporites) ;
- 3- Une évolution simultanée de Ca²⁺ et Na⁺, (dissolution des évaporites).

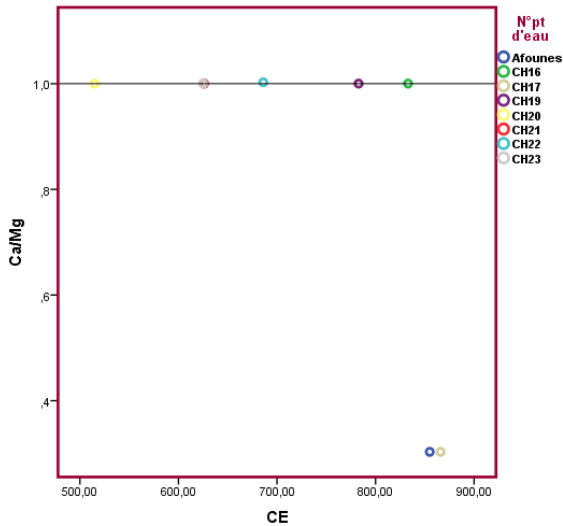


Figure IV.28. Relation Ca^{2+}/Mg^{2+} - CE

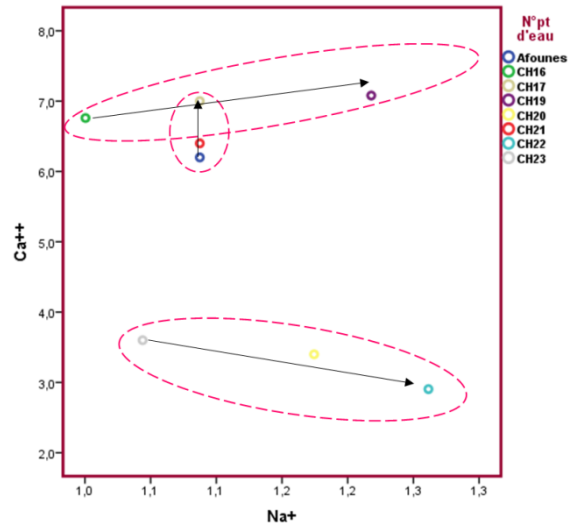


Figure IV.29. Relation Ca^{2+} - Na^+

❖ **Couple Mg^{2+} - Na^+ :**

Le graphe de la **figure IV. 30** révèle aussi trois tendances :

- 1- Une diminution de Mg^{2+} alors que le Na^+ reste en évolution, (probablement un échange de base entre Na^+ et Mg^{2+}) ;
- 2- Le Mg^{2+} évolue indépendamment du Na^+ , (une autre origine que les évaporites) ;
- 3- Évolution simultanée du Na^+ et Mg^{2+} , (dissolution des évaporites).

❖ **Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du calcium, (**Figure IV.31**) et une absence totale du SO_4^{2-} . Cette relation traduit la dissolution du calcium d'origine carbonatée. Cette relation traduit la présence du faciès bicarbonaté calcique.

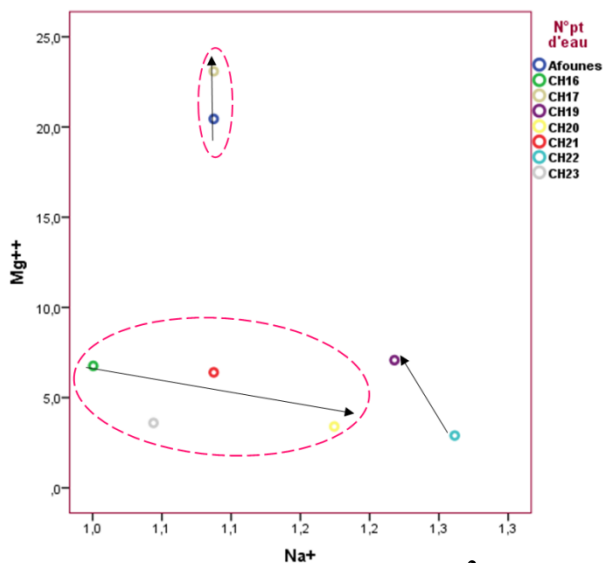


Figure IV.30. Relation Mg^{2+} - Na^+

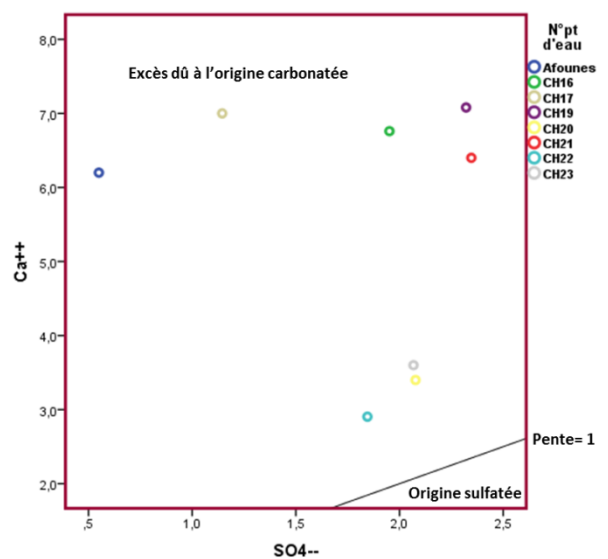


Figure IV.31. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}

❖ **Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du Mg^{2+} , (**Figure IV.32**) et une absence totale du SO_4^{2-} . Cette relation traduit la dissolution des formations carbonatées riches en Mg^{2+} , telle que les dolomies. Cette relation confirme la présence du faciès bicarbonaté magnésien.

❖ **Couple Ca^{2+} - Cl^- :**

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des chlorures et du calcium, (**Figure IV.33**).

Lorsque ce rapport est supérieur à 1, le Ca^{2+} prédomine. C'est le cas des forages : Afounes, CH16, CH17, CH19, CH20, CH21, et CH22. Néanmoins, les chlorures prédominent dans le forage CH23, (**Figure IV.33**).

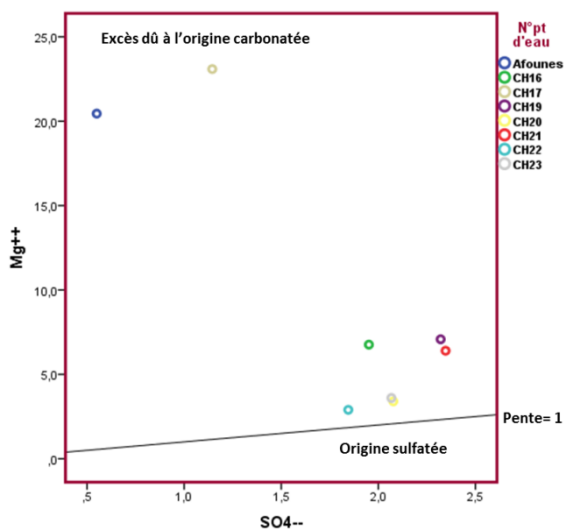


Figure IV.32. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}

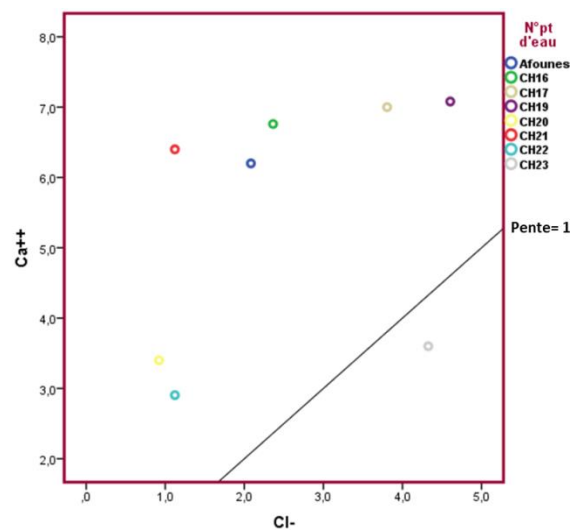


Figure IV.33. Relation Ca^{2+} - Cl^-

❖ **Couple Mg^{2+} - Cl^- :**

Lorsque ce rapport est inférieur à 1, les chlorures prédominent, ce qui est notable dans le forage CH23, (**Figure IV.34**), tandis que le reste des forages et qui représentent 90% des points de l'aquifère Barrémien présente une prédominance du Mg.

❖ **Couple Ca^{2+} - Mg^{2+} :**

Lorsque ce rapport est inférieur à 1, cela indique la prédominance du Mg. C'est le cas des forages CH23 et Afounes, (**Figure IV.35**). Cependant les forages qui se positionnent sur la droite de la pente 1, (CH16, CH17, CH19, CH20, CH21, CH22) indiquent la même origine du calcium.

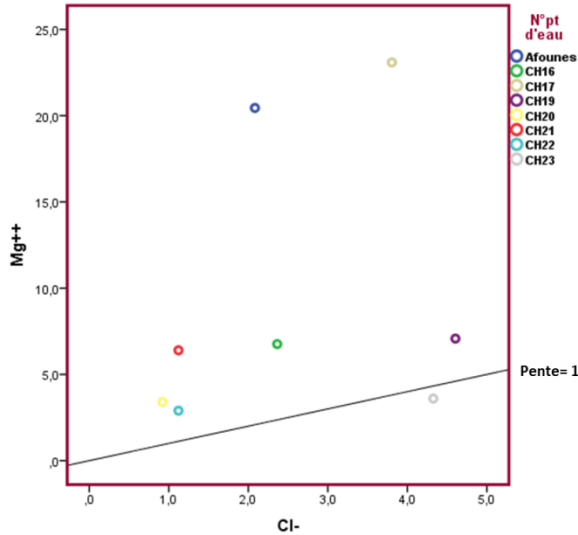


Figure IV.34. Relation Mg^{2+} - Cl^-

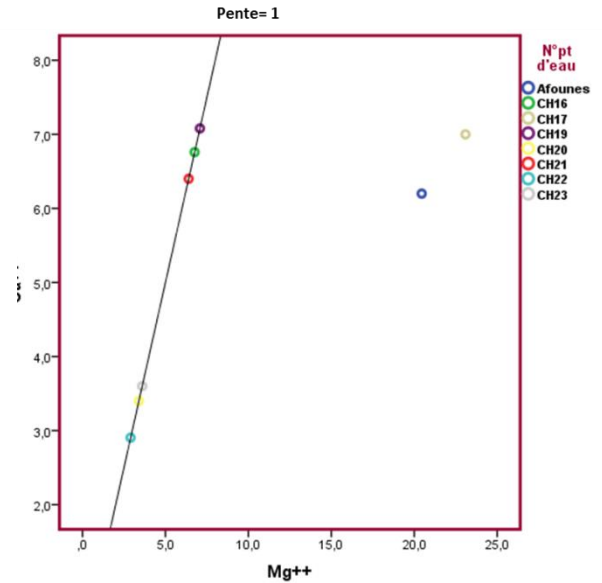


Figure IV.35. Relation Ca^{2+} - Mg^{2+}

❖ **Couple Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-} :**

La **figure IV. 36a** montre l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates. Les forages CH21, CH16, CH19 et CH23 montre un excès du calcium suite peut être à la dissolution du gypse.

Par opposition, les forages CH20, CH23, CH22 et Afounes indiquent une origine carbonatée comme source du calcium. La figure IV.36b confirme cette tendance.

❖ **Diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$:**

Le report de tous les points d'eau sur le diagramme, (**Figure IV.37**) montre que 24% (CH22, CH20) ont subi un échange de base, 38% des points présentent un déficit en Na et en Ca et 38%, certains points présentent un excès en Ca par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} .

❖ **Diagramme $Mg^{2+}/(HCO_3^- + SO_4^{2-}) - Na^+/Cl^-$:**

Le report de tous les points d'eau sur le diagramme, (**Figure IV.38**) montre que 24% (CH20 et CH22) ont subi un échange de base. 24% des points (CH21 et CH23) présentent un déficit en Na et Mg, et 52% aussi des points présentent un excès en Mg par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} .

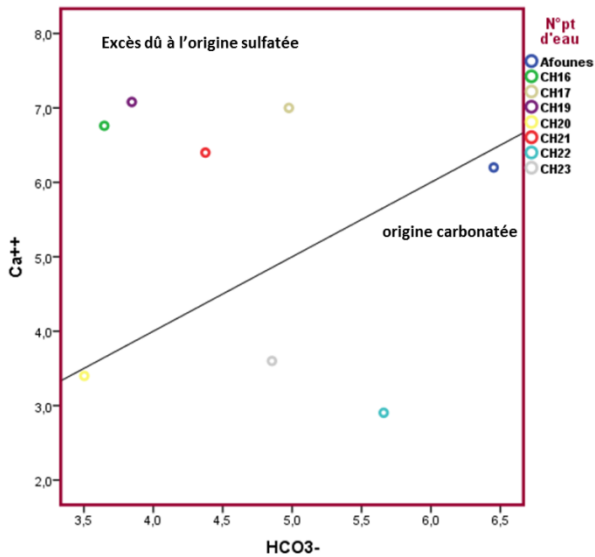


Figure IV.36a. Évolution du calcium

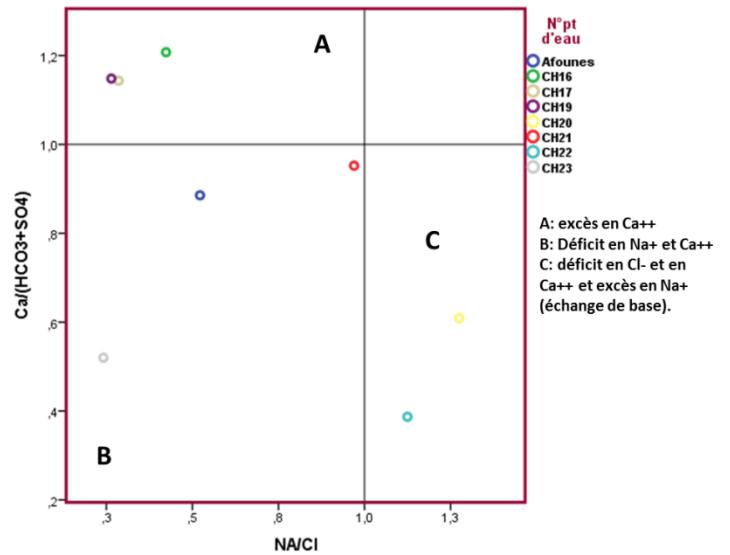


Figure IV.37. Échange de base

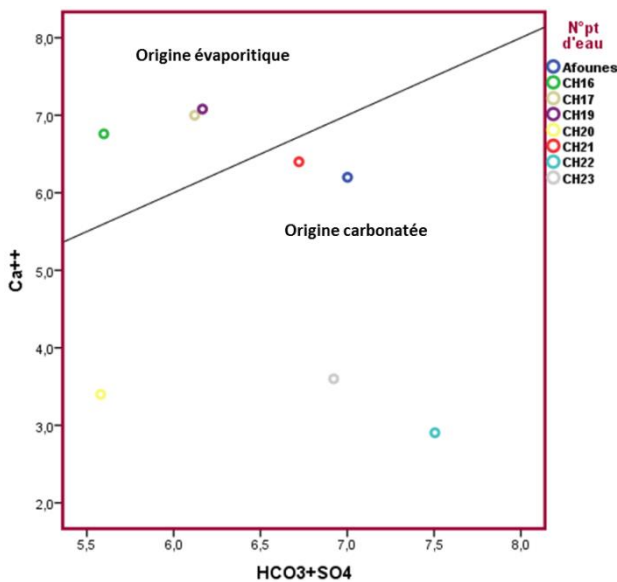


Figure IV.36b. Évolution du calcium

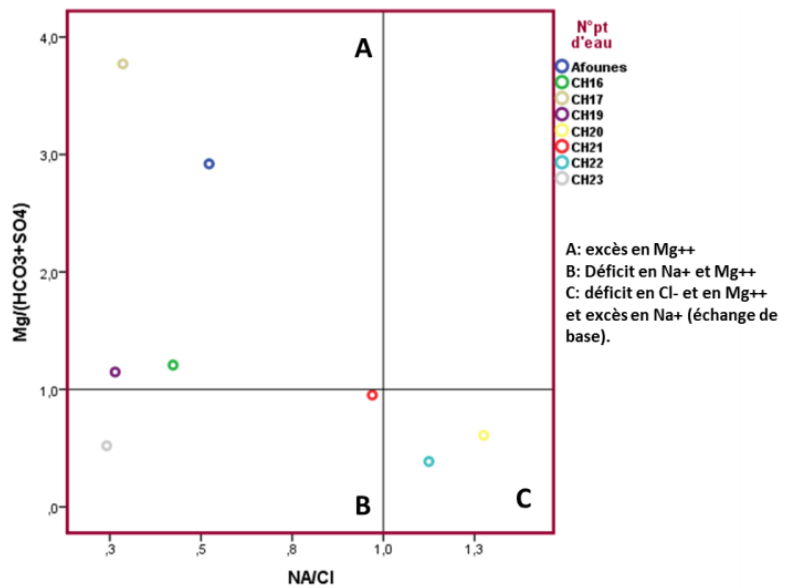


Figure IV.38. Échange de base

Les études d'échange ionique dans les formations géologiques ont révélé, qu'en général, au cours du processus d'échange, un des ions est retenu très fortement contre tout déplacement par les autres ions, C'est une absorption préférentielle connue par sélectivité d'échange ionique, (S. Ghebouli, 2010).

Au cours de leurs trajets souterrains, les eaux entrent en contact avec les différentes formations géologiques qui ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans les eaux, (S. Ghebouli, 2010).

IV.3.2. 10 Qualité des eaux à la consommation humaine et à des fins d'irrigation:

Lors de l'utilisation de l'eau hors de son milieu, sa qualité est souvent mentionnée, elle est fonction du type d'usage. Ainsi, les exigences relatives à la qualité sont différentes d'une utilisation à l'autre. Dans ce travail, seule la qualité d'eau destinée à la consommation humaine et aux activités agricoles est soulevée. Dans cette optique, nous allons profiter des données analytiques disponibles pour évaluer la qualité des eaux destinées à la consommation humaine et aux activités agricoles. En effet, la quasi-totalité des eaux mobilisables dans la région sont utilisées pour ces deux activités.

La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture. La mauvaise qualité des eaux peut être induite par des activités anthropiques ou par des phénomènes naturels.

De ce fait, la comparaison des données des analyses chimiques des eaux du secteur d'étude avec les normes de l'OMS, 2008 et Algérienne NA 6360 ,1992, ainsi qu' avec Ayers and Westcot, 1994, fait ressortir que dans les aquifères Hauterivien, Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire dans la région de Ain- Azel, au Sud de Sétif, nous avons des eaux potables et de bonne qualité et aptes à l'irrigation, et d'autres signalées comme non potables et inaptés à l'irrigation, parce que certaines concentrations en éléments chimiques sont élevées et dépassent les normes, ce qui impose un traitement antérieur avant leur utilisation, (**Tableau IV.10 et figures A3.11, A3.12 et A3.13 en annexe 3**).

Tableau IV. 10. La qualité des eaux selon les différentes normes.

L'aquifère	Norme	Qualité
Hauterivien	OMS, 2008	Toutes les eaux de forages sont potables et apte à l'irrigation sans traitement,
	NA, 6360,1992	
	Ayers and Westcot, 1994	
Barrémien	OMS, 2008	Les eaux des forages CH16, CH19, CH20, CH21, CH22, CH23 sont potables sans traitement,
	NA, 6360,1992	
	Ayers and Westcot, 1994	Seulement les eaux des forages CH20, CH22 et CH23 sont aptes à l'irrigation sans traitement,
Mio-Plio-Quaternaire	OMS, 2008	Seulement les eaux du point 70 sont potables sans traitement,
	NA, 6360,1992	Les eaux des points 2, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 27, 28, 32, 33, 34, 35, 41, 43, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 76 sont potables sans traitement,
	Ayers and Westcot, 1994	Seulement les eaux des points 7 et 28 qui sont aptes à l'irrigation sans traitement,

La représentation des points d'eau, (période de Mai 2018), sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff, (Figure IV.39 .40 .41), a montré que tous les points se rangent dans la classe de potabilité sauf les points CH17 et Afounes, (l'aquifère Barrémien), 33, 37, 38, 41, 57, 65, et 78, (l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire) qui se classent dans la classe médiocre.

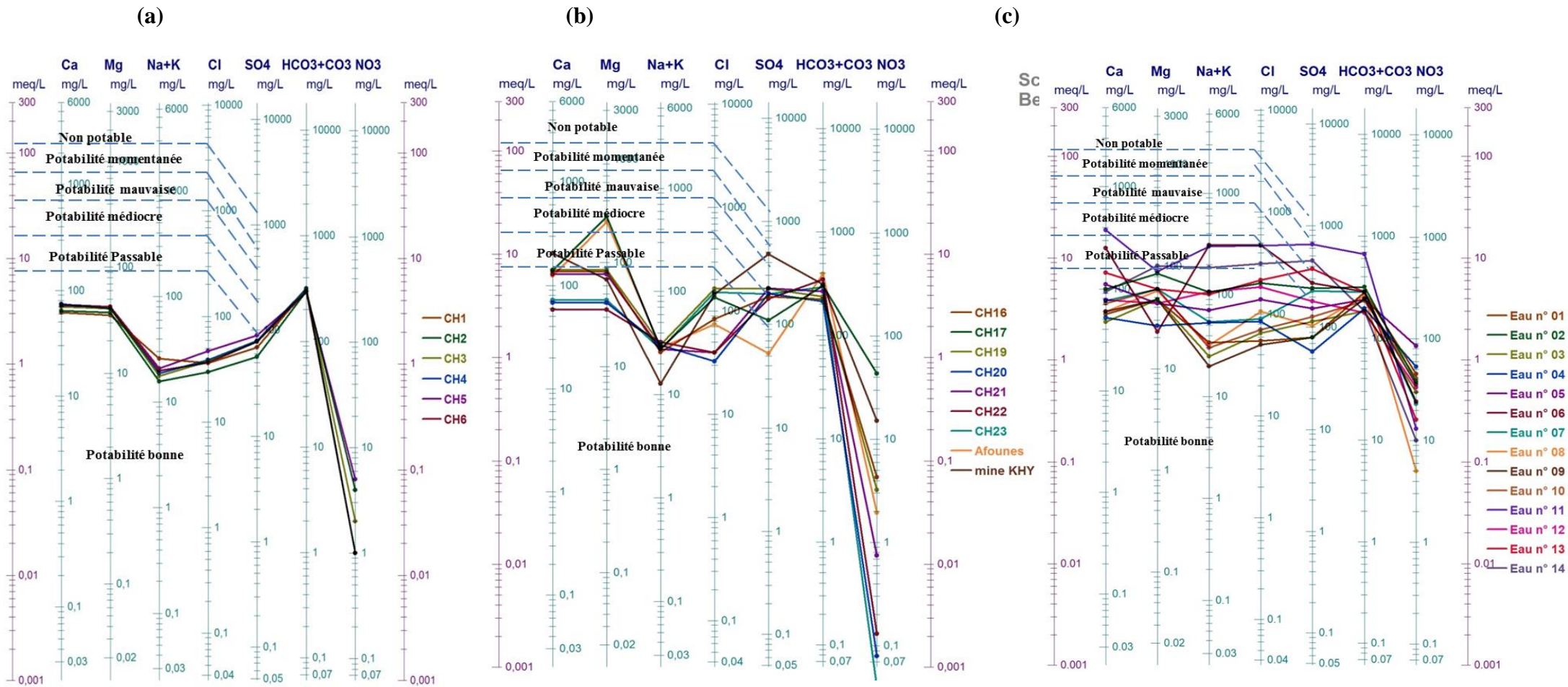


Figure IV.39. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff, (Mai 2018).

- (a) Les eaux de l' Hauterivien
- (b) Les eaux du Barrémien
- (c) Les eaux du Mio-Plio-Quaternaire

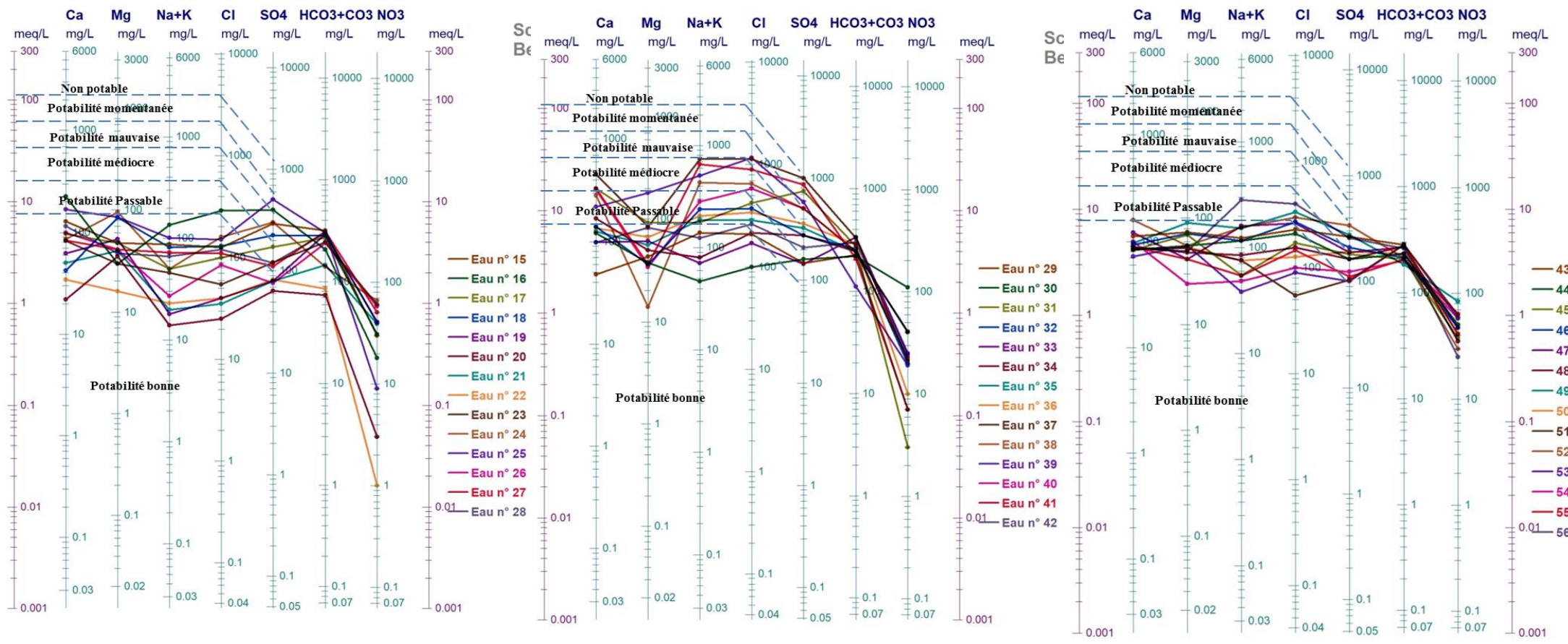


Figure IV.40. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Période de Mai 2018) des eaux du Mio-Plio-Quaternaire.

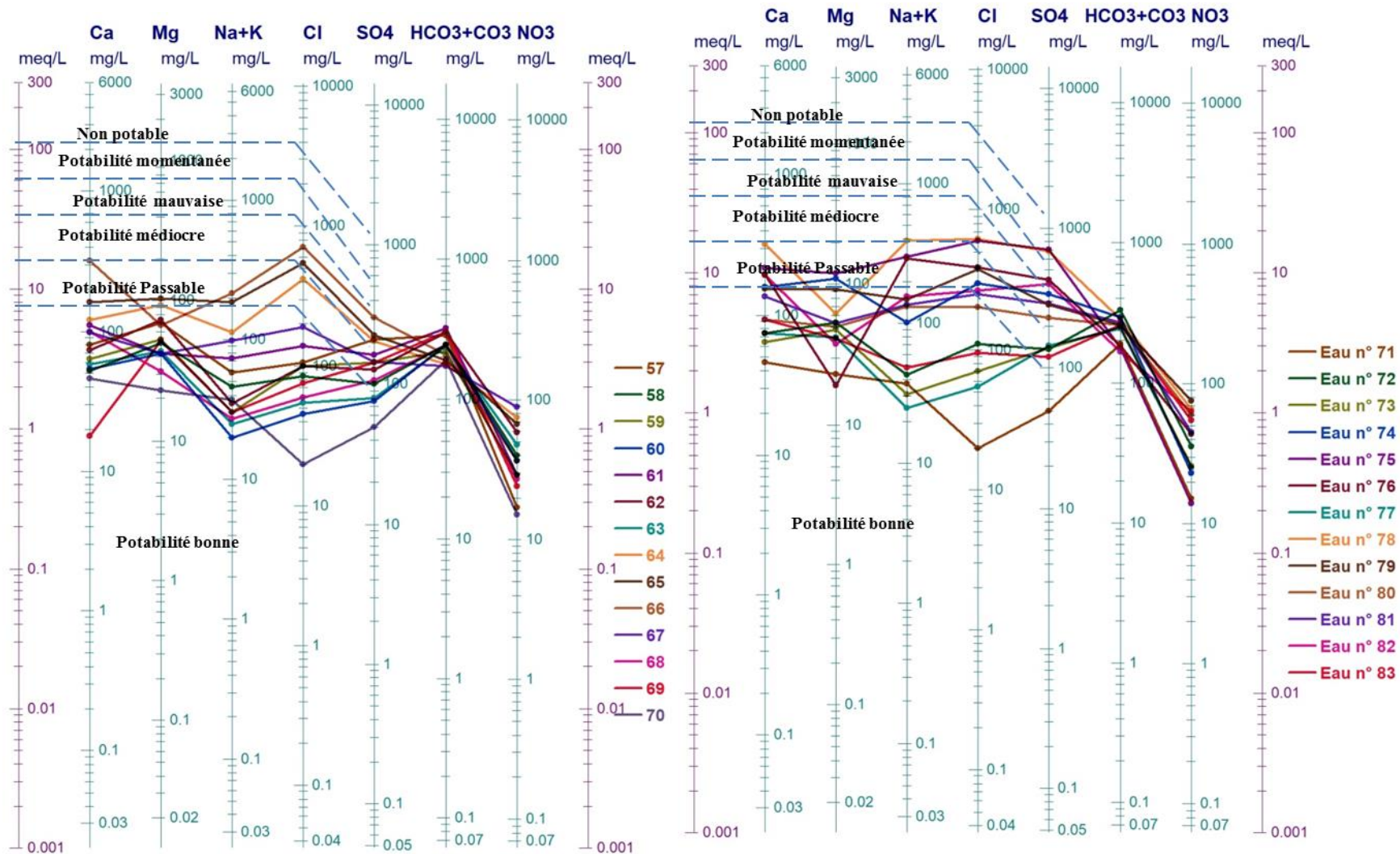


Figure IV.41. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff

(Période de Mai 2018) des eaux du Mio-Plio-Quaternaire.

IV.3.2. 11 Aptitude des eaux à l'irrigation :

Pour déterminer la qualité des eaux de la nappe Hauterivienne, Barrémienne et Mio-Plio-Quaternaire dans la région Sud Sétifienne à des fins d'irrigation, nous avons eu recours au calcul de quelques indices (KR, SAR, RSC, SSP, PI, et MH), ainsi que le diagramme de Wilcox qui peuvent donner des indications pertinentes sur la qualité de ces eaux. Les figures IV .42 à IV.47 résument les valeurs calculées pour chaque indice.

IV.3.2. 11.1 Kelly ratio (KR) :

On constate que les valeurs du KR calculées, (Tableau A3.4. en Annexe 3), des différents points d'eau prélevés sont inférieures ou égales à 1, (Figure IV.42), ce qui confère à ces eaux une bonne qualité vis-à-vis de son utilisation en irrigation, (W. P. Kelly, 1940).

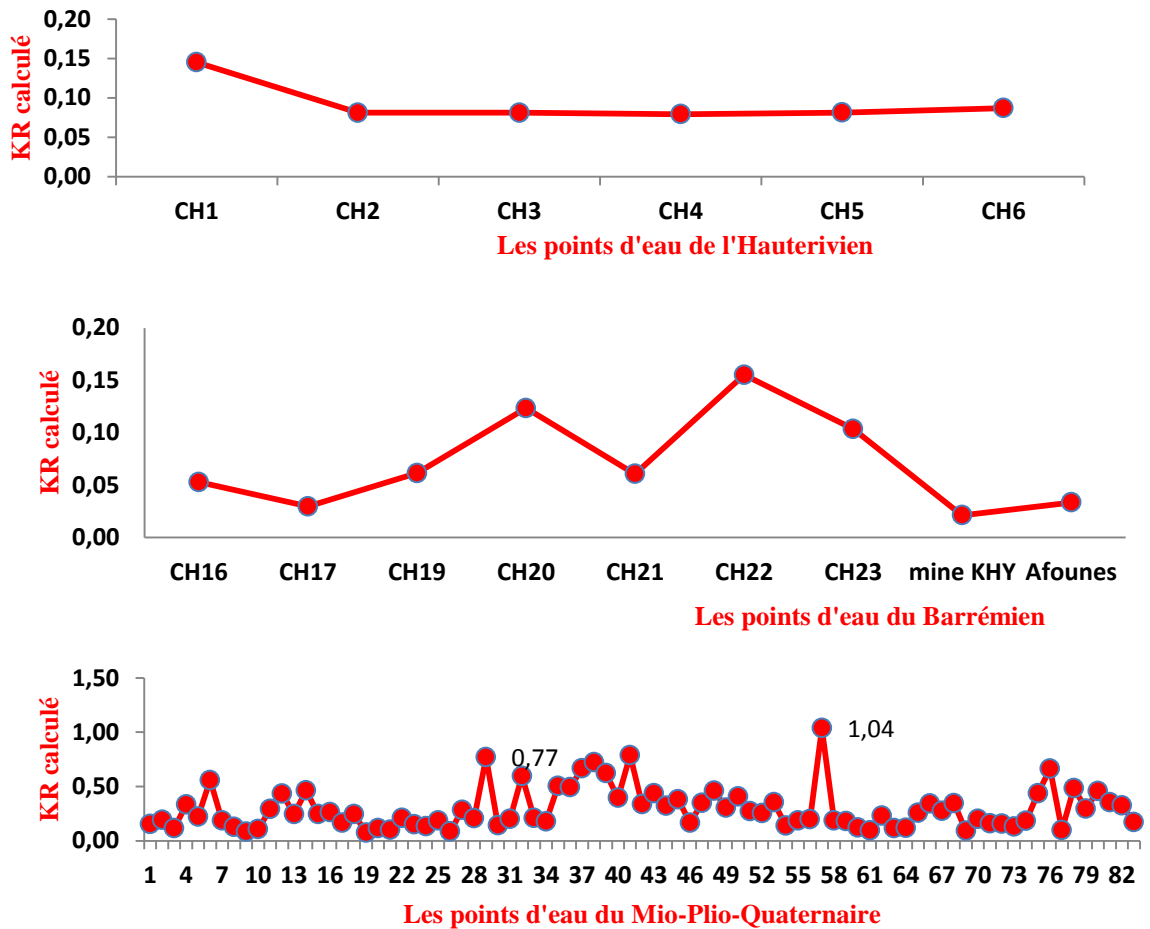


Figure IV.42. Histogramme des valeurs du KR des différents points d'eau.

IV.3.2. 11.2 Sodium absorption ratio (SAR)

Les valeurs du SAR calculées, (Tableau A3.4. en Annexe 3), des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.43), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont d'excellente qualité pour l'irrigation, (valeurs < à 10), contrairement aux points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire qui sont de qualités différentes : Excellente, Bonne et médiocre, (L. A. Richard, 1954).

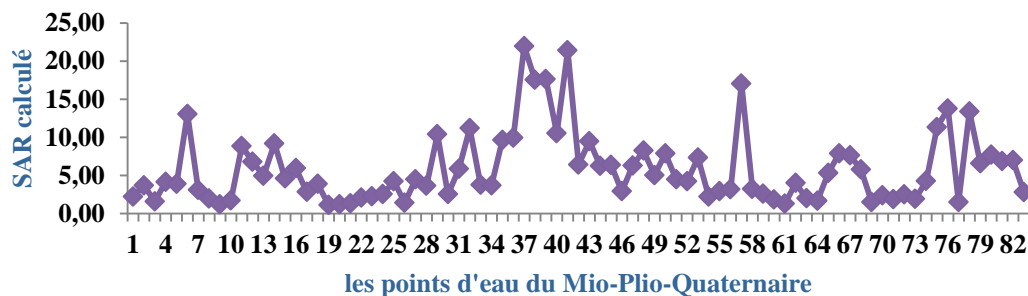
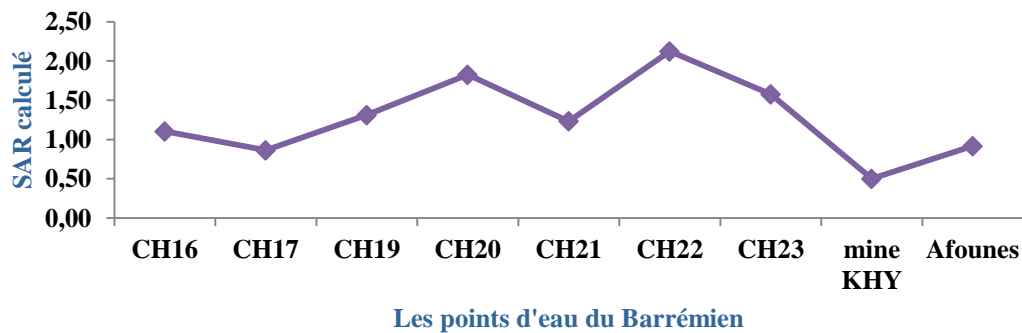
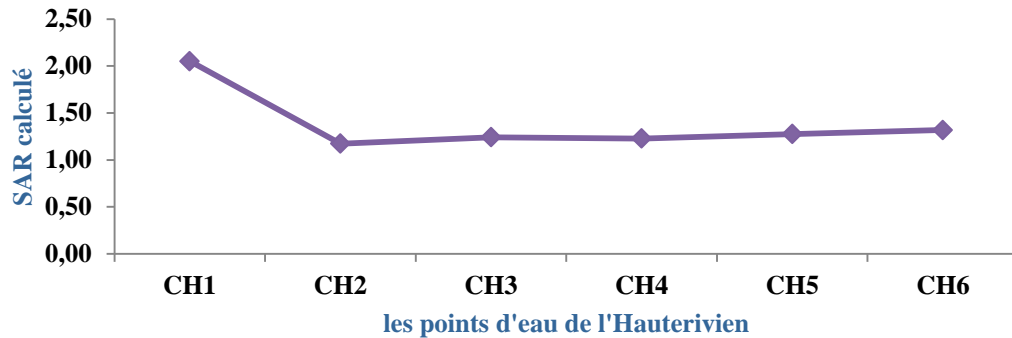


Figure IV.43. Histogramme des valeurs du SAR des différents points d'eau.

IV.3.2. 11. 3 Residual Sodium Carbonate (RSC)

Le calcul du RSC, (Tableau A3.4. en Annexe 3), montre que les points d'eau de tous les aquifères sont rangés dans la classe 1, (Figure IV.44), c'est à dire que leur qualité est excellente pour l'irrigation.

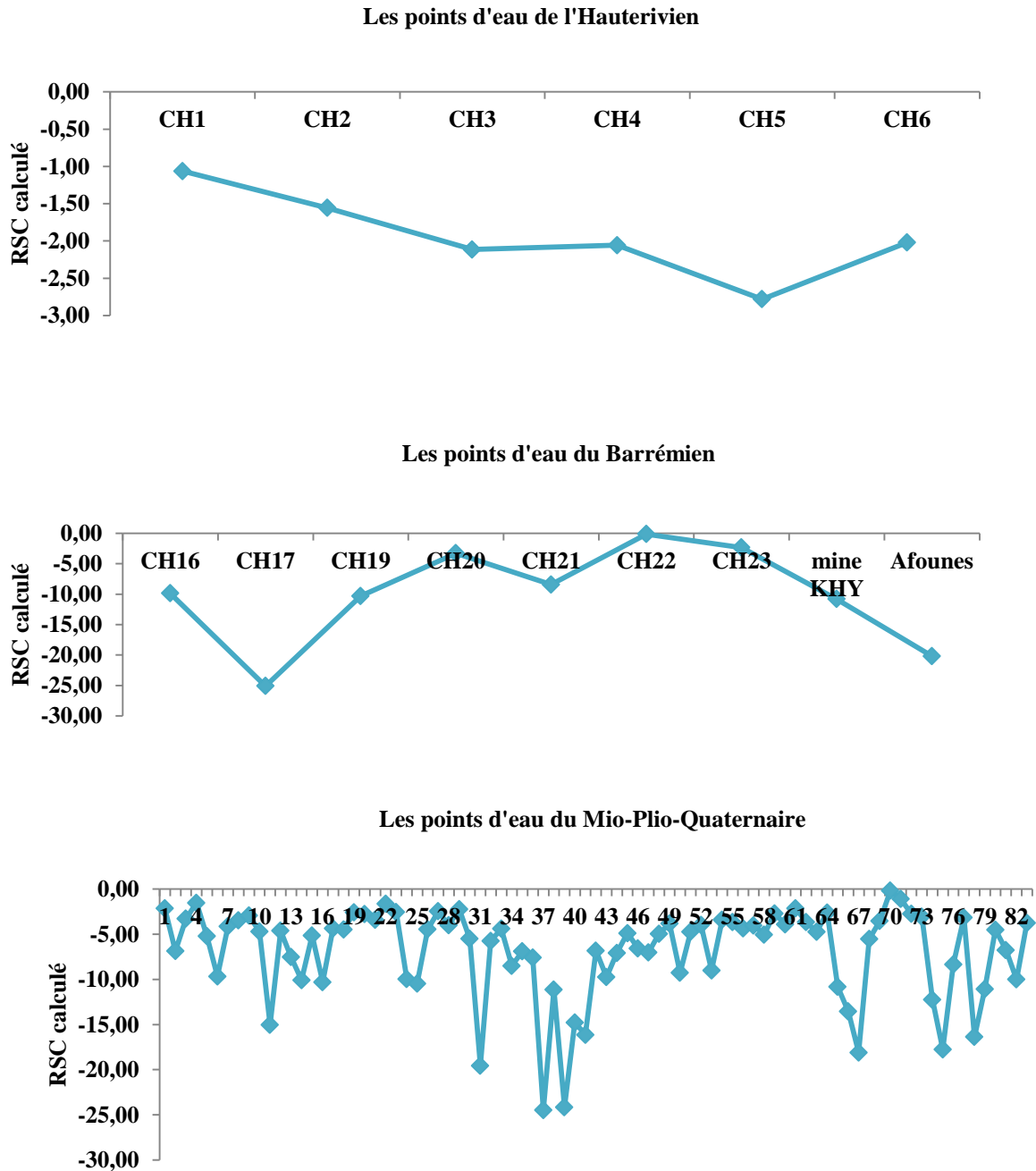


Figure IV.44. Histogramme des valeurs du RSC des différents points d'eau.

IV.3.2. 11.4 Soluble Sodium Percentage (SSP)

Les valeurs du SSP calculées des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.45), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont d'excellente qualité pour l'irrigation, (valeurs < à 20), (Tableau A3.4. en Annexe 3), contrairement aux points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire qui sont de qualités différentes : Excellente, Bonne et moyennement bonne, (L. V. Wilcox, 1955).

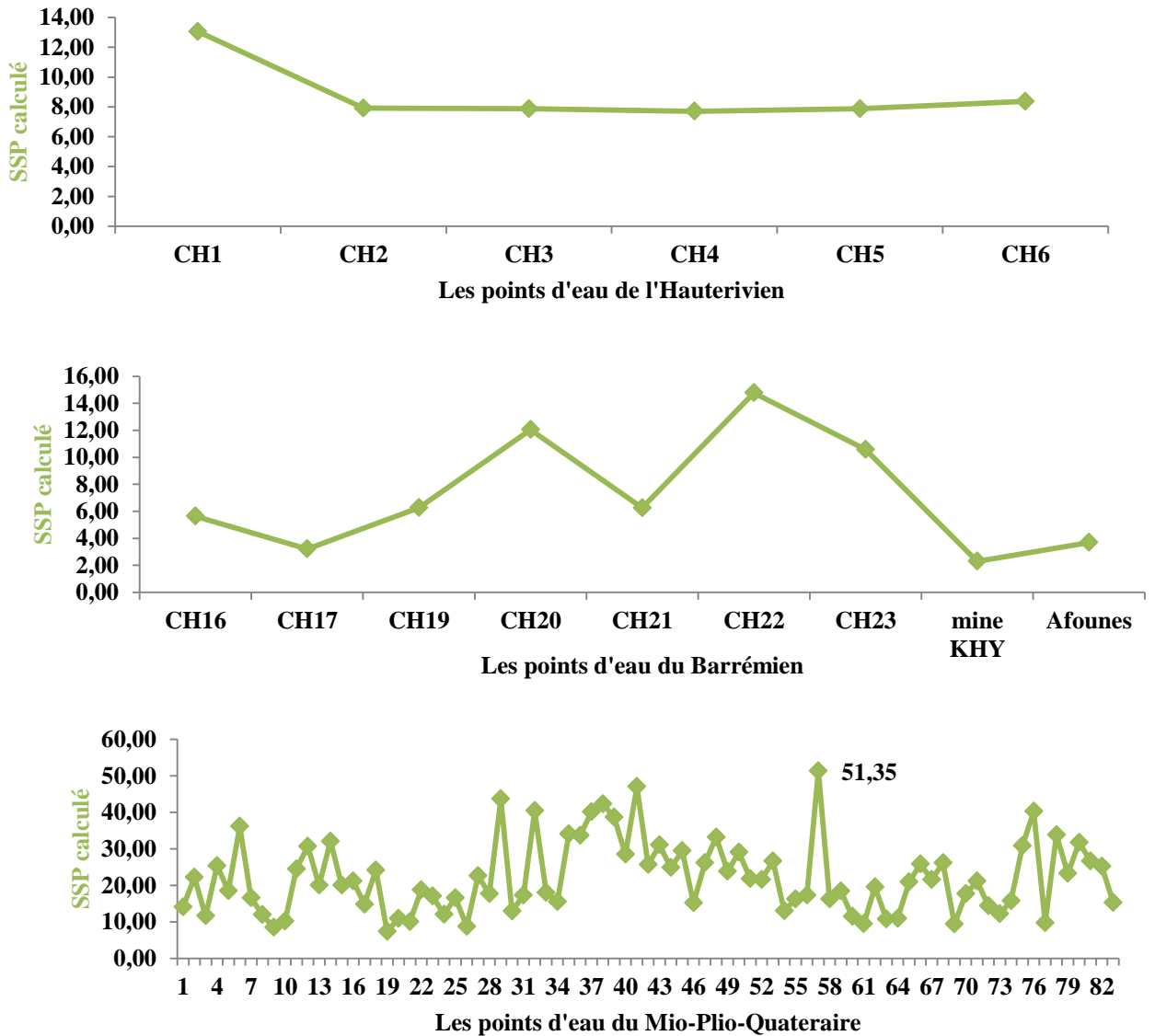


Figure IV.45. Histogramme des valeurs du SSP des différents points d'eau.

IV.3.2. 11.5 Permeability Index (PI)

Les valeurs du PI calculées, (Tableau A3.4. en Annexe 3), des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.46), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont de mauvaise qualité pour l'irrigation, (valeurs < à 25), contrairement aux points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire qui se rangent dans les classes de bonne et de mauvaise qualité, (L. Doneen, 1962).

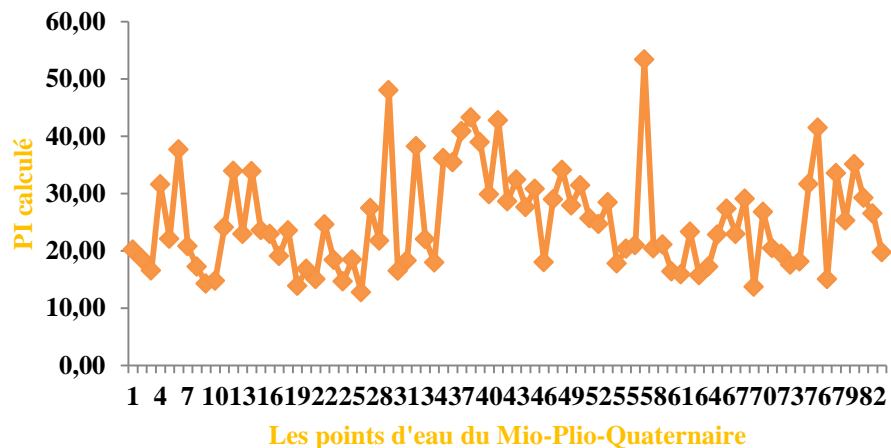
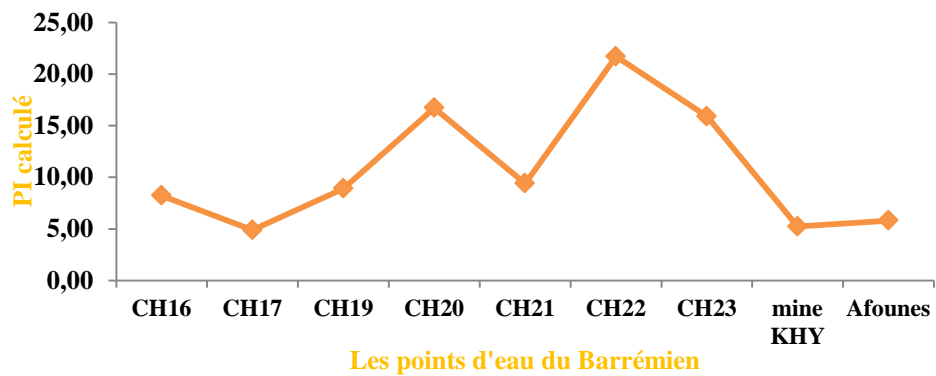
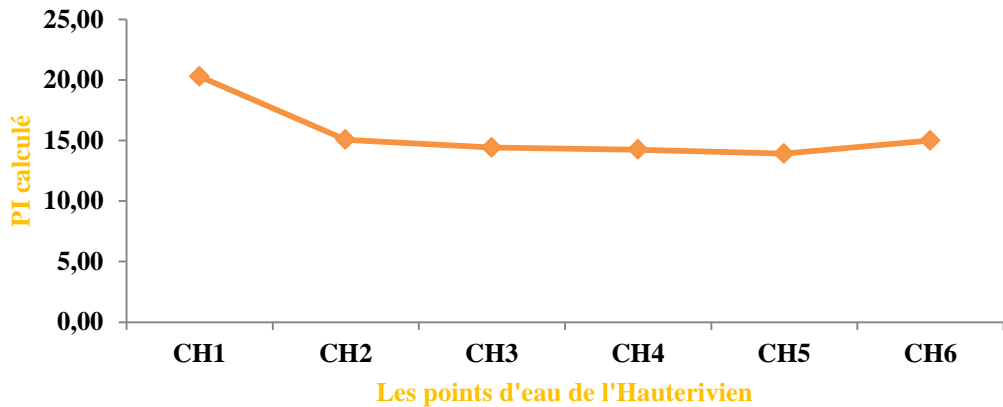


Figure IV.46. Histogramme des valeurs du PI des différents points d'eau

IV.3.2.11.6 Magnesium Hazard (MH)

Les valeurs du MH calculées des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.47), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont acceptables pour l'irrigation, (valeurs < à 50), sauf, CH17 et le forage de Afounes qui sont dans la classe >50, ce qui indique leur mauvaise qualité pour l'irrigation.

De même, les points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire renferment des valeurs < à 50 ce qui indique leur bonne qualité à l'irrigation, (K. V. Paliwal, 1972), (Tableau A3.4. en Annexe 3), et d'autres > 50 ce qui indique leur mauvaise qualité pour l'irrigation.

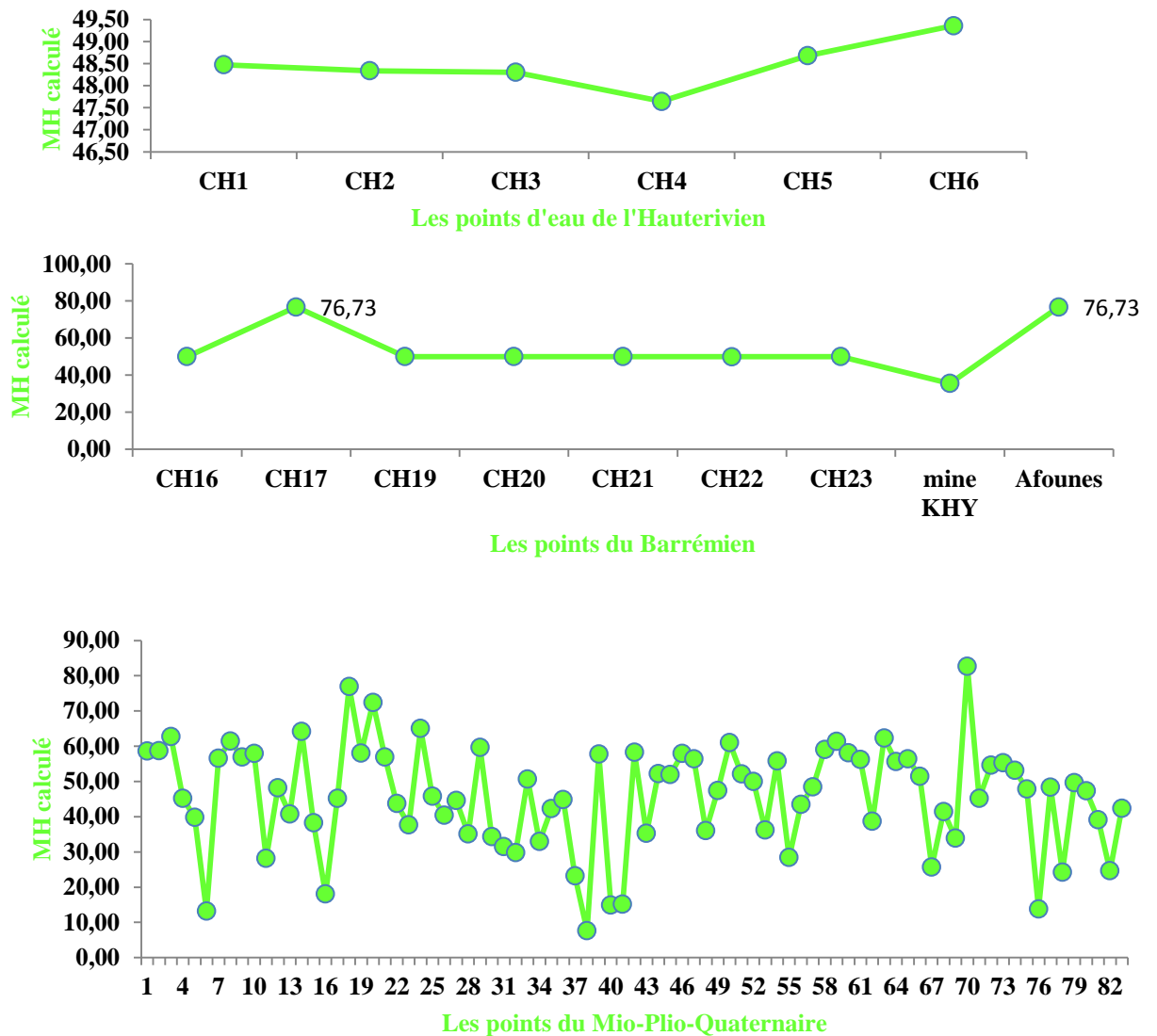


Figure IV.47. Histogramme des valeurs du MH des différents points d'eau.

IV.3.2.11.7 Le diagramme de Wilcox

La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau, généralement connue en pourcentage du sodium, est définie par la relation $Na\% = \frac{Na}{(Ca+Mg+Na+K)} \times 100$ où tous les éléments sont exprimés en méq/l, Cette classification définit cinq classes d'eau : Excellente, bonne, admissible, médiocre, et mauvaise.

Les diagrammes de Wilcox, (**Figure IV.48**), montrent que la quasi-totalité des points d'eau de l'aquifère Hauterivien et Barrémien sont dans les normes : 11 points d'eau (74%) sont rangés dans la classe excellente, 4 points (26%) dans la classe bonne. La représentation du pourcentage de sodium en fonction de la conductivité des points d'eau de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire sur le diagramme de Wilcox, (**Figure IV.49**), permet de constater que 15 % des points d'eau ont une qualité excellente pour l'irrigation, 44 % ont une qualité bonne, 27% ont une qualité médiocre et 14 % ont une qualité mauvaise.

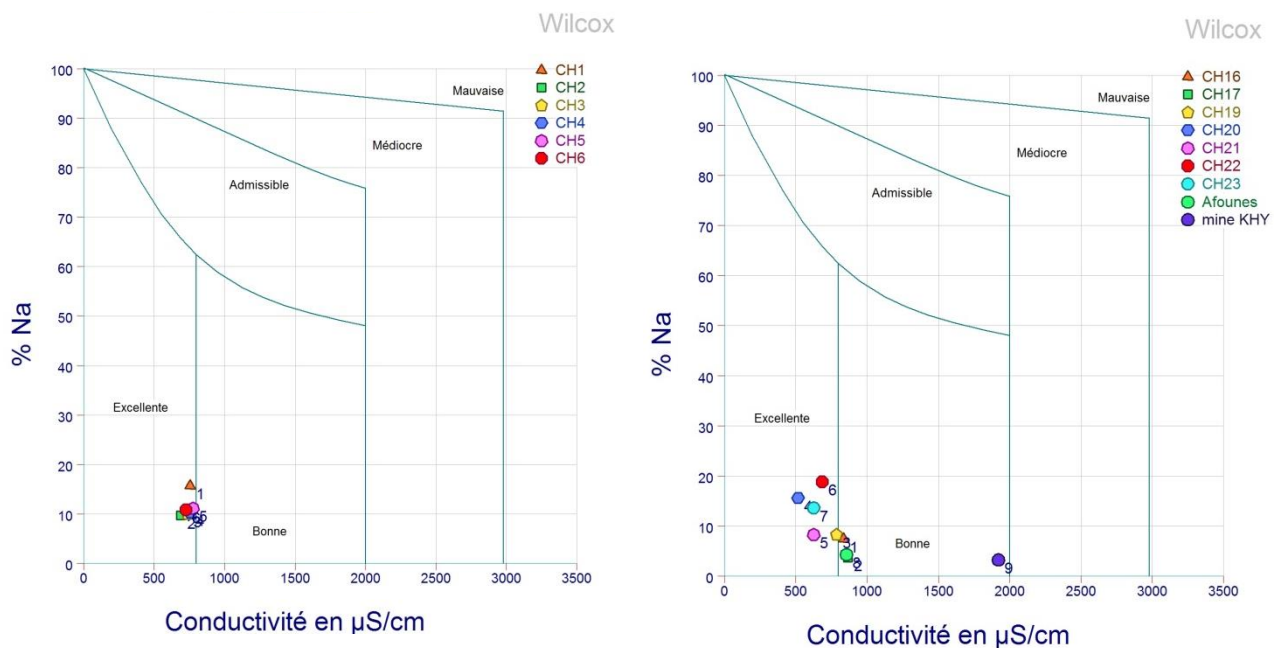


Figure IV. 48. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox, (L'aquifère Hauterivien et Barrémien_Période de Mai 2018).

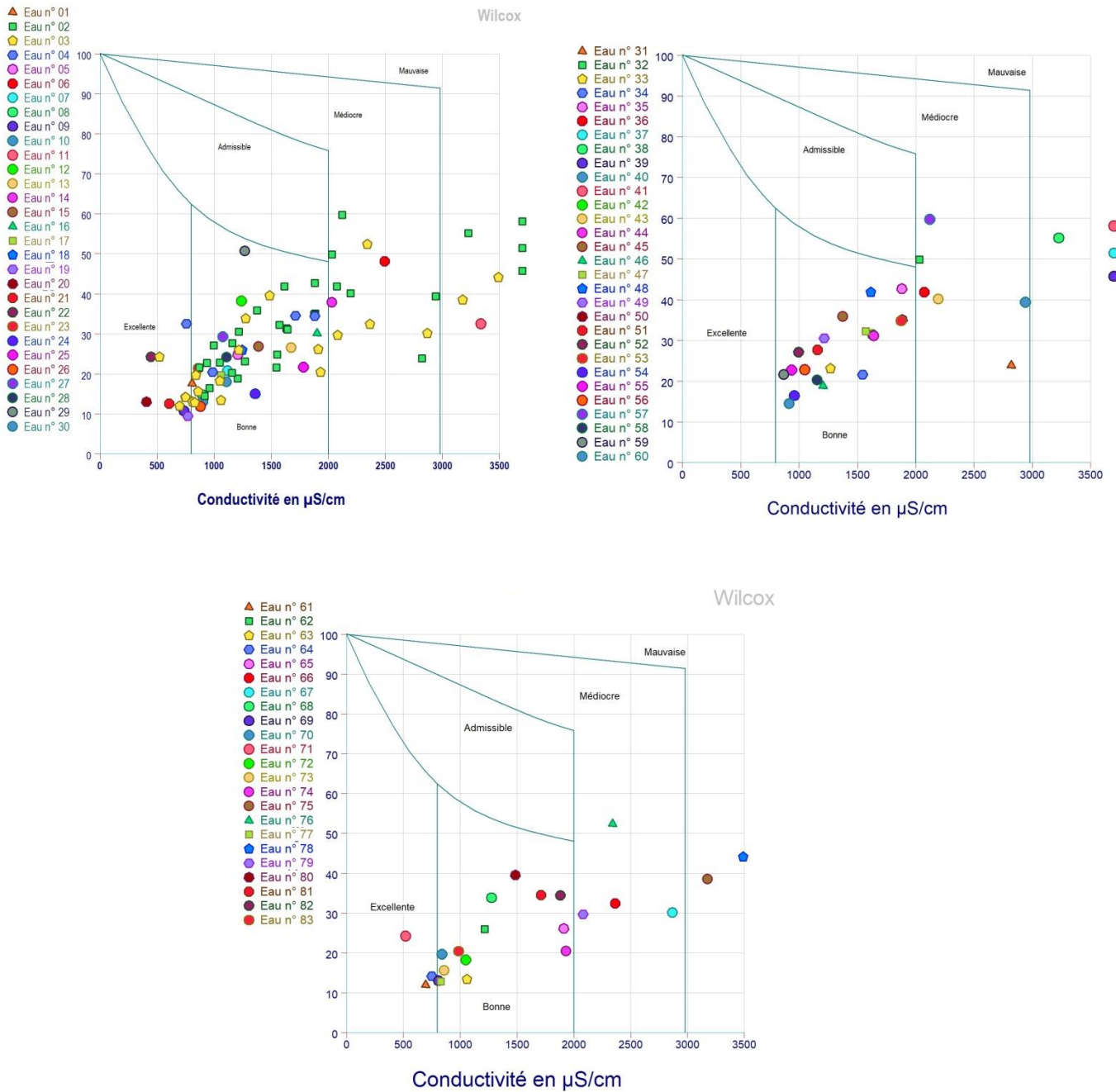


Figure IV .49. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox, (L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire_ Période de Mai 2018).

IV.3.2. 12 Les métaux lourds :

La représentation des données, (période de Mai 2018), des teneurs des métaux lourds des points d'eau du Barrémien et Hauterivien, (Tableau IV.11) en histogrammes, (Figure IV.50), et la comparaison des résultats aux normes (OMS, 2008 ; NA 6360,1992 ; Ayers and Westcot, 1994) montrent des anomalies de pollution de ces eaux par le Plomb (Pb),

Manganèse (Mn) et Chrome (Cr), dû principalement à la minéralisation plombo-zincifère de la région d'étude.

Tableau IV. 11. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauteriviennes et Barrémiennes du gisement de Chaabet –el- Hamra en mg/l, (période de Mai 2018).

L'aquifère	Métal (mg/L)	Al	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb
Hauterivien	CH1	0	0,01	0	0,61	0	0,99	0,76
	CH2		0		0		1,01	1,10
	CH4		0		0		1,04	1,25
Barrémien	CH17		0,01	0,64	1,06		1,10	
	CH19		0,23	0,18	1,02		0	
	CH20		0	0,08	0		1,02	0
	CH21			0,1	0		1,06	1,15
	CH22			0,15			1,05	0
	CH23			0,01			0,08	1,05
	Afounes	0	0	0	1,08	1,23		
mine KHY	0,011		0,008	0,08	1,08	1,40		

La concentration moyenne de Pb était de 0,76 mg/L avec une concentration maximale de 1,4 mg/L et une concentration minimale de 0,00 mg/ (elle varie entre 0,76 et 1,25 mg/l dans l'aquifère Hauterivien, et entre 0,0 et 1,4 mg/l pour les eaux Barrémiennes). La valeur moyenne du Pb de la zone d'étude était beaucoup plus élevée que les limites admissibles des normes OMS, (0,01 mg/L), et algériennes (0,05 mg/L). La valeur maximale du Pb, (1,41 mg/L), était presque 141 et 28 fois supérieure aux valeurs limites recommandées respectivement par l'OMS et les normes algériennes.

Quant au Manganèse, les valeurs dans les eaux souterraines de la zone d'étude varient entre 0,00 et 0,64 mg / L avec une concentration moyenne de 0,131 mg / L, (de 0,0 et 0,61 mg/l pour l'aquifère Hauterivien, et les eaux du Barrémien enregistrent une teneur minimale 0,0 et maximale 0,64 mg/l). Par rapport à la valeur recommandée par l'OMS, (0,4 mg / L) et, aux normes algériennes (0,5 mg / L), certains échantillons d'eau ont montré une concentration de Mn plus élevée.

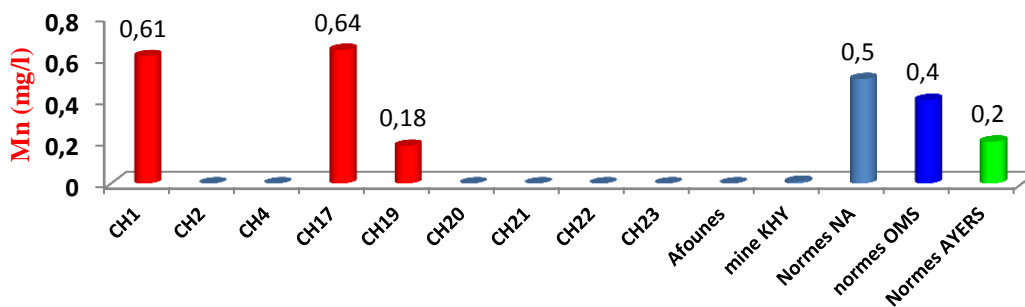
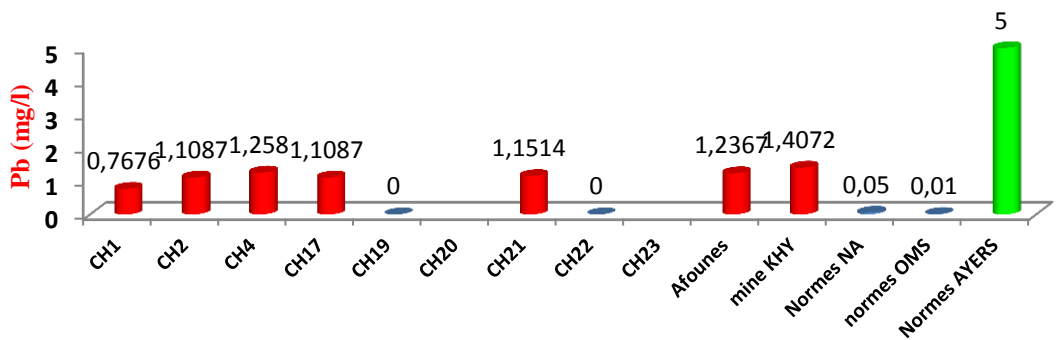
La plupart des sites de la zone d'étude n'ont montré aucune concentration de Zn dans les eaux souterraines. La plage de concentration de Zn observée dans les eaux souterraines de la zone d'étude était de 0,00 à 0,08 mg/L avec une valeur moyenne de 0,007 mg/L. La

concentration de Zn dans les échantillons d'eau souterraine était inférieure aux valeurs limites fixées par l'OMS, (3 mg/L), et les normes algériennes, (5 mg/L). À partir de maintenant, il n'y a pas de problème sérieux de contamination par le Zn dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

La forte teneur en Cr est enregistrée dans l'aquifère Barrémien avec une valeur de 0,23 mg/l, tandis qu'il varie entre 0,0 et 0,01 mg/l dans les eaux Hauteriviennes.

Les résultats ont montré une faible concentration de Fe dans les échantillons d'eau souterraine avec une concentration moyenne de 0,038 mg / L. Tous les échantillons d'eau contiennent des teneurs de Fe inférieurs à ses limites. Donc, pas d'eau contaminée par Fe dans le district.

La concentration moyenne de Cu dans les eaux souterraines était de 1,04 mg/L avec une plage de 0,99 à 1,08 mg/L. Toutes les valeurs de Cu étaient inférieures aux limites admissibles de Cu (2 mg/L) dans l'eau potable. Par conséquent, on peut dire qu'il existe un très faible risque de concentration de Cu dans les eaux souterraines.



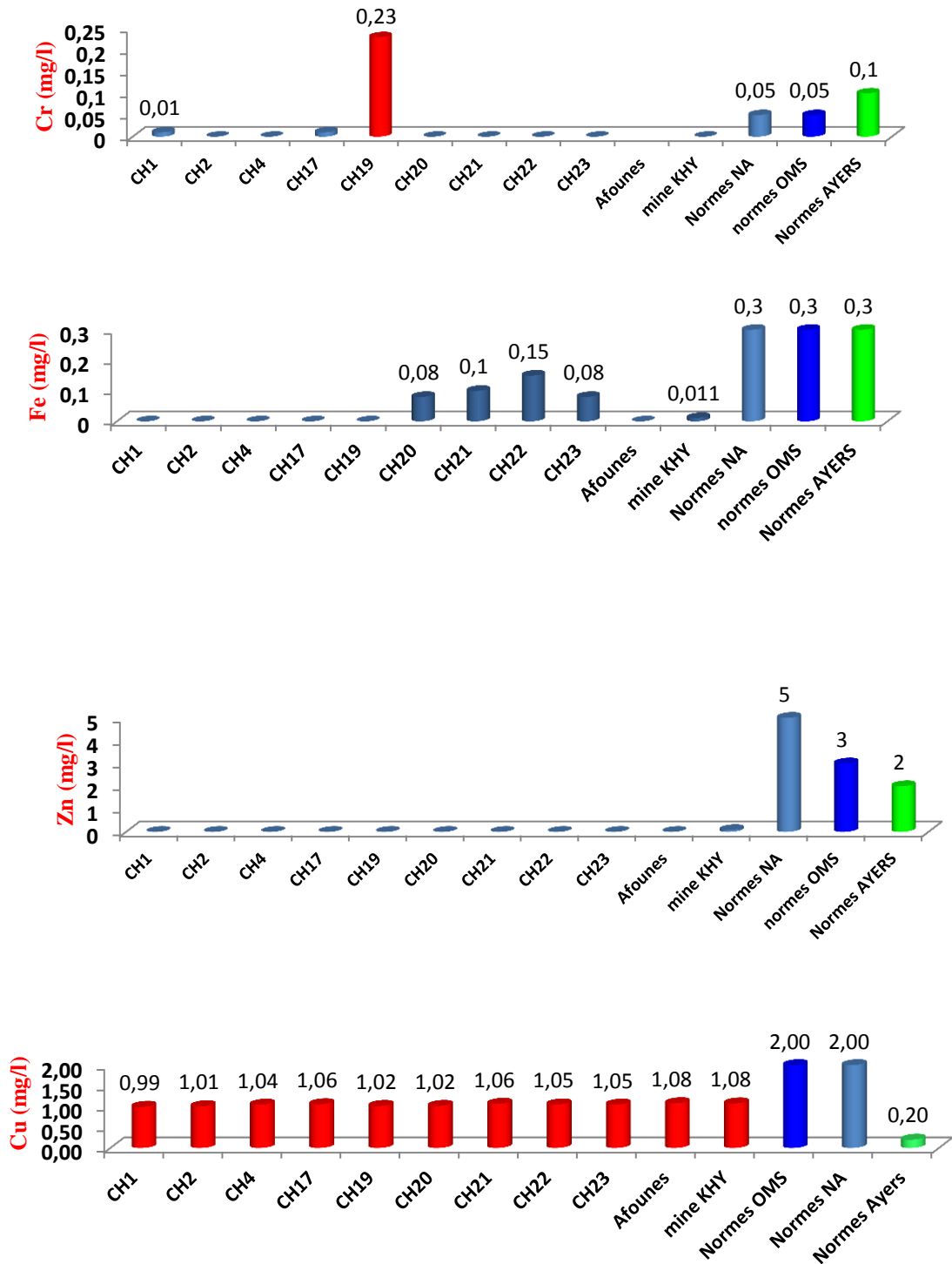


Figure IV. 50. Histogrammes des teneurs des métaux lourds dans l'aquifère Barrémien et Hauterivien, (Période de Mai 2018).

IV.3.2.13 Estimation des indices d'évaluation de la pollution

Pour comprendre la qualité globale de l'eau des deux aquifères du Crétacé inférieur, (Hauterivien et Barrémien), par rapport aux métaux lourds sélectionnés, (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu

et Pb), l'indice de pollution par les métaux lourds (HPI), l'indice d'évaluation des métaux lourds (HEI) et le degré de contamination (Cd) ont été utilisés.

A. Indice de pollution par les métaux lourds (HPI : Heavy metal pollution index)

L'indice de pollution par les métaux lourds (HPI) est une technique d'évaluation qui fournit l'influence des métaux lourds sur la qualité globale de l'eau, (A. K. Tiwari et al. 2015). Il représente la qualité totale de l'eau par rapport au métal lourd, (T. K. Boateng et al. 2019).

L'HPI était inversement proportionnel à la norme du métal lourd résultant, (R. K. Horton, 1965). La valeur de l'indice de pollution critique est de 100. La moyenne arithmétique pondérée des concentrations a été utilisée pour calculer les valeurs de l'IPH à l'aide de l'Eq.9 donnée par S.V Mohan et al. (1996).

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \dots\dots\dots (Eq.9)$$

Où:

n: est le nombre de paramètres pris en compte,

W_i: est la pondération unitaire définie comme la valeur réciproque de S_i,

Q_i : est le sous-indice de chaque paramètre, et calculé par Eq.10.

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - I_i|}{S_i - I_i} \times 100 \dots\dots\dots (Eq.10)$$

Où:

M_i : est la valeur mesurée des métaux lourds,

I_i: est la valeur maximale souhaitable,

S_i: est la valeur standard du chaque paramètre en µg/L

Le signe (-) indique la différence numérique des deux valeurs, ignorant le signe algébrique.

La première limite de concentration est la valeur permissive la plus élevée pour l'eau potable (S_i), telle que spécifiée par les normes Algériennes.

La deuxième limite de concentration est la valeur maximale souhaitable (Ii) telle que définie par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Afin de calculer l'HPI des eaux souterraines, les valeurs de concentration des métaux sélectionnés, (Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn), de chaque échantillon ont été prises en compte.

Les valeurs de l'HPI se situent entre 0,00 et 68,79, (moyenne de 11,47). Les valeurs les plus élevées de l'HPI ont été trouvées à CH19 (68,79), (**Tableau IV.12**).

La valeur plus élevée de l'HPI peut être attribuée à l'altération des roches et à la minéralisation des mines. Cependant, les résultats de l'HPI suggèrent que tous les échantillons d'eau étaient inférieurs à la limite critique de 100 pour l'eau potable, ([B. Prasad et J. Bose, 2001](#)).

Tableau IV.12. Les valeurs de l'HPI estimées.

L'aquifère	Hauterivien			Barrémien							
Le forage	CH1	CH2	CH4	CH17	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	Afounes	KHY
HPI	19.69	0.00	0.00	20.53	68.79	0.61	0.76	1.14	14.35	0.00	0.31

B. Indice d'évaluation des métaux lourds (HEI : Heavy metal evaluation index)

L'HEI a été calculé selon Eq.13. Il offre de l'information sur la qualité globale de l'eau par rapport aux métaux lourds ([Edet et Offiong, 2002](#)).

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{Hc}{Hmac} \dots\dots\dots (Eq.13)$$

Où:

Hmac: la concentration maximale admissible du chaque paramètre,

Hc : valeur mesurée du chaque paramètre.

L'indice calculé d'évaluation des métaux lourds (HEI) pour cette étude donne une moyenne de 76,8 avec des valeurs minimales et maximales de 0,77 et 141,8 respectivement (**Tableau IV.13**).

Les critères proposés pour l'indice d'évaluation des métaux lourds sont classés comme faibles (HEI<10), moyens (HEI = 10 -20) et élevés (HEI>20), ([A. E. Edet et O. E. Offiong 2002](#)).

Sur cette base, 4 emplacements qui représentent 36,36% de tous les emplacements avaient de faibles valeurs de HEI, tandis que 7 emplacements couvrant 63,63% des échantillons d'eau avaient une valeur élevée de HEI dans cette étude.

Tableau IV.13. Les valeurs de l'HEI estimées.

L'aquifère	Hauterivien			Barrémien							
	CH1	CH2	CH4	CH17	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	Afounes	KHY
HEI	85.66	109.37	126.32	124.40	8.71	0.77	116.01	1.03	0.79	124.21	141.48

C. Degré de contamination (C_d : Degree of contamination)

Le degré de contamination (C_d) a été largement utilisé comme méthode de référence pour estimer l'étendue de la pollution par les métaux lourds dans les échantillons d'eau, (B. Rubio et al.2000).

Il tient en compte à la fois du nombre de paramètres qui dépassent les limites supérieures admissibles ou les valeurs guides des éléments potentiellement nocifs et de la concentration dépassant ces valeurs limites, (B. Backman et al., 1998). Cet indice a été considéré comme un indice de toxication pour les consommateurs et a été déterminé par la formule suivante :

$$Cd = \sum_{i=1}^n \left[\frac{CAi}{CNI} - 1 \right] \dots\dots\dots(Eq.14)$$

Où:

CAi: la valeur mesurée de chaque métal;

CNi: concentration maximale admissible du chaque métal (OMS 2008).

Les valeurs du C_d dans les échantillons d'eau de la zone d'étude variaient de -5,21 à 135,48 (moyenne de 72,52), comme indiqué dans le tableau IV.14.

Selon B. Backman et al. (1998), le degré de contamination des échantillons d'eau peut être classé comme élevé si tous les échantillons ont enregistré des valeurs de C_d supérieures à 3.

Dans la zone d'étude, seuls 3 échantillons, (CH20, CH22 et CH23) qui représentent 27,27% du total des échantillons analysés ont des valeurs de Cd inférieures à 1, (-1,23, -4,98,

-5,21 respectivement), qui indiquent une statue de faible contamination pour ces échantillons d'eau. Inversement, tout le reste des échantillons qui représentent 72,72% du total des échantillons analysés ont des valeurs de C_d supérieures aux valeurs maximales de 3, indiquant une contamination élevée dans ces échantillons. Cela a révélé que le plus grand pourcentage de la zone d'étude possède une menace de contamination en termes du métal toxique lourd dissous dans les eaux souterraines.

Tableau IV.14. Les valeurs du C_d estimées.

L'aquifère	Hauterivien			Barrémien							
Le forage	CH1	CH2	CH4	CH17	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	Afounes	KHY
C_d	89.66	111.37	124.32	120.40	5.71	-1.23	110.01	-4.98	-5.21	118.21	135.48

IV.3.2.14 Paramètres d'évaluation des risques pour la santé

Selon [J. S. Lee et al. \(2005\)](#), l'évaluation des risques pour la santé comprend la dose-réponse, l'évaluation de l'exposition, l'identification des dangers et la caractérisation des risques.

A. ADD de métal lourd (ADD : The average daily dose)

La dose quotidienne moyenne (ADD) de chaque métal lourd, (Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn), a été calculée par [W. Siriwong \(2006\)](#), d'après Eq.15.

$$ADD_i = \frac{C_i \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \dots\dots\dots (Eq.15)$$

Où:

- **C_i**: La teneur de métaux lourds (mg/L) dans les échantillons d'eau,
- **IR**: Taux d'ingestion d'eau en une journée (2,2 L / jour),
- **ED**: Durée d'exposition aux eaux souterraines (70 ans),
- **EF**: Fréquence d'exposition aux eaux souterraines (365 jours/an),
- **BW**: Poids corporel des individus locaux (70 Kg),
- **AT**: Espérance de vie moyenne (70 ans).

Les valeurs moyennes du ADD (**Tableau IV.15**) pour les eaux souterraines du territoire de Ain- Azel diffèrent pour différents métaux par ordre décroissant de Cu (10,86) > Pb (7,62) > Mn (1,36) > Fe (0,4) > Cr (0,24) > Zn (0,08).

Tableau IV.15. Les valeurs du ADD estimées.

Métal	Paramètre	Statistiques	La valeur calculée dans la zone d'étude
Cr	ADD	Interval	0 - 2.4
		Moyenne	0.24
Fe		Interval	0 – 1.56
		Moyenne	0.4
Mn		Interval	0 - 6.67
		Moyenne	1.36
Zn		Interval	0 – 0.83
		Moyenne	0.08
Pb		Interval	0 – 14.68
		Moyenne	7.62
Cu	Interval	10.36 – 11.27	
	Moyenne	10.86	

B. HQ du métal lourd (HQ : The Hazard Quotient)

Le quotient de danger (QG) de Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn pour les eaux souterraines d'Ain Azel a été estimé à l'aide de l'Eq.16 (R. A. Tabassum et al. 2019b).

$$HQ = \frac{ADD}{RFD} \dots\dots\dots (Eq.16)$$

Où:

- RFD (Reference Dose: Dose de référence) indique la dose orale de référence des métaux lourds (USEPA IRIS, 2011 ; P. Wongsasuluk et al., 2014).

L'eau dont la valeur HQ est inférieure à 1 est considérée comme non-toxique à utiliser pour la consommation en ce qui concerne la teneur en métaux lourds, (S. Khalid et al. 2020).

Contrairement aux valeurs du DDA, une valeur de HQ élevée a été observée pour le Pb et le Cu dans les eaux souterraines de la zone d'étude, (Tableau IV.16).

Tableau IV.16. Les valeurs du HQ estimées.

Métal	Paramètre	Statistiques	La valeur calculée dans la zone d'étude
Cr	HQ	Interval	0 - 0.016
		Moyenne	0.0016
Fe		Interval	0 – 0.0223
		Moyenne	0.0057
Mn		Interval	0 – 0.476
		Moyenne	0.0974
Zn		Interval	0 – 0.027
		Moyenne	0.0025
Pb		Interval	0 – 41.92
		Moyenne	21.77
Cu	Interval	2.59 – 2.81	
	Moyenne	2.71	

C. CR du métal lourd (CR: The Cancer Risk)

Le risque de cancer (RC) a été estimé à l'aide de l'équation suivante, (Tabassum et al. 2019b).

$$RC = ADD \times OSF \dots\dots\dots (Eq.17).$$

Où:

OSF indique les valeurs du facteur orale pour chaque métal lourd (USEPA, 2011).

Tableau IV.17. Les valeurs du CR estimées.

Métal	Paramètre	Statistiques	La valeur calculée dans la zone d'étude
Cr	CR	Interval	0 – 1.199
		moyenne	0.119
Pb		Interval	0 – 0.125
		moyenne	0.065

Le risque de cancer (RC) n'a été calculé que pour le Pb et le Cr, (Tableau IV. 17), tandis que les autres métaux Zn, Mn, Fe et Cu sont considérés comme non –cancérogènes, (OMS 2008).

Les valeurs élevées de DDA, HQ et CR pour les échantillons d'eau des deux aquifères Hauterivien et Barrémien de la zone d'étude, prédisaient des risques possibles pour la santé de la population locale en buvant ces eaux souterraines riches en métaux.

IV.3.2.15 Analyse statistique multi-variée

Cette étude a été réalisée en utilisant les teneurs des métaux lourds (Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn), les paramètres physicochimiques, (pH, TDS, EC, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻), et les indices d'évaluation de la pollution d'échantillons d'eau souterraine.

Les coefficients de corrélation, (Tableau IV. 18), entre Cr et Mn (r = 0,12), Fe et Cu (r = 0,15), Mn et Pb (r = 0,09), Zn et Pb (r = 0,37), Zn et Cu (r = 0,4), Pb et Cu (r = 0,42).

Afin d'établir les dispositions des données sur les concentrations de métaux lourds et les paramètres physicochimiques des échantillons d'eau souterraine, la carte factorielle, (Figure IV. 51), a été établie.

Tableau IV. 18. Coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds pour les échantillons d'eau souterraine.

	Cr	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu
Cr	1					
Fe	-0.26	1				
Mn	0.12	-0.41	1			
Zn	-0.11	-0.17	-0.16	1		
Pb	-0.40	-0.55	0.09	0.37	1	
Cu	-0.31	0.16	-0.32	0.40	0.43	1

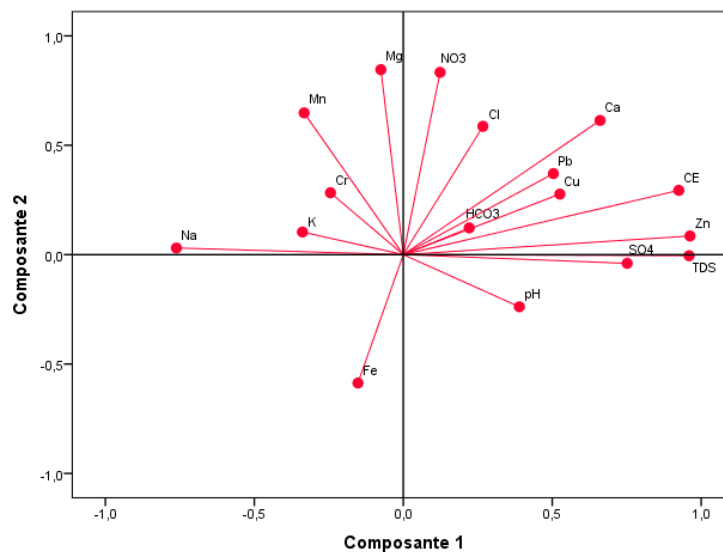


Figure IV. 51. Carte factorielle montrant le regroupement de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Cette carte montre qu'il n'y a pas de séparation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines. Subséquemment, certaines concentrations de métaux lourds dans les eaux souterraines correspondent aux caractéristiques physico-chimiques.

Ceci a été établi par la matrice de corrélation de Pearson, (Tableau IV. 19), qui a montré une corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines : K^+ et Fe ($r = 0,54$), Mg^{2+} et Cu ($r = 0,51$), Ca^{2+} et Zn ($r = 0,71$), NO_3^- et Mn ($r = 0,61$), HCO_3^- et Cu ($r = 0,51$), TDS et Zn ($r = 0,96$), CE et Zn ($r = 0,96$).

La matrice de corrélation réalisée entre les métaux lourds et les indices de pollution calculés, (Tableau IV.20), a révélé une forte corrélation positive significative entre HPI et Cr

($r = 0,94$), tandis que HEI et C_d sont fortement et significativement corrélés avec Pb ($r = 0,99$).

Tableau IV. 19. Les coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques pour les échantillons d'eau souterraine.

	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	CE	pH	Cr	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu
K ⁺	1.00																
Na ⁺	0.71	1.00															
Mg ²⁺	0.43	0.18	1.00														
Ca ²⁺	-0.01	-0.33	0.46	1.00													
NO ₃ ⁻	0.04	-0.13	0.69	0.50	1.00												
Cl ⁻	0.25	-0.05	0.33	0.64	0.45	1.00											
SO ₄ ²⁻	-0.02	-0.31	-0.23	0.67	0.09	0.49	1.00										
HCO ₃ ⁻	0.08	-0.17	0.38	0.01	0.05	-0.10	-0.29	1.00									
TDS	-0.22	-0.62	-0.06	0.68	0.09	0.28	0.81	0.09	1.00								
CE	-0.34	-0.66	0.12	0.78	0.35	0.46	0.72	0.24	0.89	1.00							
pH	0.12	-0.17	0.00	-0.08	-0.10	-0.06	0.09	0.63	0.36	0.37	1.00						
Cr	0.05	0.31	0.01	0.27	-0.05	0.50	0.12	-0.43	-0.23	-0.04	-0.35	1.00					
Fe	0.54	0.46	-0.37	-0.33	-0.35	-0.25	0.22	-0.12	-0.09	-0.34	0.09	-0.26	1.00				
Mn	-0.15	0.24	0.39	0.05	0.61	0.16	-0.28	-0.02	-0.30	-0.02	-0.23	0.12	-0.41	1.00			
Zn	-0.33	-0.67	-0.08	0.71	0.22	0.38	0.84	0.08	0.96	0.96	0.36	-0.11	-0.17	-0.16	1.00		
Pb	-0.51	-0.67	0.37	0.44	0.35	-0.14	-0.04	0.45	0.39	0.49	-0.04	-0.40	-0.55	0.09	0.37	1.00	
Cu	0.40	-0.15	0.51	0.59	0.27	0.28	0.37	0.51	0.49	0.46	0.23	-0.31	0.16	-0.32	0.40	0.43	1.00

Le tableau montre également qu'il existe une forte corrélation positive et significative entre les indices HEI et C_d ($r = 0,99$).

Cette corrélation indique que la quantité de Cr et de Pb a contribué de manière significative à la concentration de métaux lourds dans les différents échantillons analysés que les autres métaux. En outre, ils sont responsables aux valeurs élevés de HPI, HEI et C_d obtenus dans cette étude.

Par conséquent, cela indique qu'il y a une pollution au Plomb et au Chrome dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

Tableau IV.20. Matrice de Corrélation entre les métaux lourds et les indices de pollution analysés et évalués dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

	Cr	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu	HPI	HEI	Cd
Cr	1.00								
Fe	-0.26	1.00							
Mn	0.12	-0.41	1.00						
Zn	-0.11	-0.17	-0.16	1.00					
Pb	-0.40	-0.55	0.09	0.37	1.00				
Cu	-0.31	0.16	-0.32	0.40	0.43	1.00			
HPI	0.94	-0.30	0.41	-0.18	-0.43	-0.38	1.00		
HEI	-0.36	-0.58	0.18	0.36	0.99	0.39	-0.37	1.00	
Cd	-0.36	-0.59	0.18	0.35	0.99	0.37	-0.37	0.99	1.00

IV.4. Conclusion

Les résultats des analyses chimiques des eaux Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire et la classification de Piper, nous ont permis de déterminer trois faciès chimiques où le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien est prédominant.

- 1 Faciès bicarbonaté calcique et magnésien, (CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6 de l'Hauterivien et CH22, Afounes du Barrémien) ;
- 2 Faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique touche seulement les points 32, 76, 38, 41 et 57 du, Mio- Plio-Quaternaire ;
- 3 Faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, (CH16, CH17, CH19, CH20, CH21, mine KHY du Barrémien et tout le reste des points du Mio-Plio-Quaternaire).

Le diagramme de Gibbs montre que l'altération des roches contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes, Par contre, et pour certains points de l'aquifère Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire, l'évaporation est la responsable de la chimie des ions majeurs.

La comparaison des analyses physico-chimiques avec les normes OMS, NA et Ayers and Westcot montre la potabilité et l'aptitude des eaux Hauteriviennes à l'irrigation.

Vu l'élévation des concentrations de certains éléments chimiques, qui dépassent les normes OMS, NA et Ayers and Westcot, certains points d'eau du Barrémienn et du Mio-Plio-Quaternaire sont non potables et inaptes à l'irrigation.

La classification des eaux Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire à l'irrigation en se basant sur les valeurs du SSP et RSC, montre que tous les points d'eau sont de bonne qualité. Les valeurs du MH et KR confirment que ces eaux sont aptes à l'irrigation sans traitement.

L'analyse des métaux lourds des eaux Hauteriviennes et Barrémiennes et la comparaison entre les résultats des deux campagnes d'échantillonnage (Avril 2012 et Mai 2018) ont montré une évaluation de contamination métallique par la présence de certaines concentrations élevées en métaux lourds (Pb, Mn, Cr) de ces eaux.

De plus, l'utilisation des indices d'évaluation de la pollution HPI, HEI et C_d en se basant sur l'analyse des Cr, Fe, Mn, Zn, Cu et Pb découvre :

- Les valeurs de l'HPI se situent entre 0,00 et 68,79, (moyenne de 11,47). Les valeurs les plus élevées de l'HPI ont été trouvées à CH19 (68,79) ;
- La valeur plus élevée de l'HPI peut être attribuée à l'altération des roches et à la minéralisation des mines. Cependant, les résultats de l'HPI suggèrent que tous les échantillons d'eau étaient inférieurs à la limite critique de 100 pour l'eau potable ;
- L'indice calculé d'évaluation des métaux lourds (HEI) pour cette étude donne une moyenne de 76,8 avec des valeurs minimales et maximales de 0,77 et 141,8 respectivement, ce qui exprime que 63,63% des échantillons d'eau avaient une valeur élevée de HEI;
- Un taux de 72,72% du total des échantillons analysés ont des valeurs de C_d supérieures aux valeurs maximales de 3, indiquant une contamination élevée dans ces échantillons. Cela a révélé que le plus grand pourcentage de la zone d'étude possède une menace de contamination toxique et en termes du métal lourd dissous dans les eaux souterraines.

Aussi, l'emploi des paramètres d'évaluation des risques pour la santé montre :

- Les valeurs moyennes du ADD pour les eaux souterraines du territoire de Ain Azel différaient pour différents métaux par ordre décroissant de Cu (10,86) > Pb (7,62) > Mn (1,36) > Fe (0,4) > Cr (0,24) > Zn (0,08) ;
- Une valeur de HQ élevée a été observée pour le Pb (moyenne =21.77) et le Cu (moyenne =2.71) dans les eaux souterraines de la zone d'étude. Ces valeurs sont supérieures à 1 et considérées les eaux souterraines de la zone d'étude comme toxique à utiliser pour la consommation en ce qui concerne la teneur en métaux lourds.
- Le risque de cancer (RC) pour le Cr varie entre 0 et 1.199 avec une moyenne de 0.119 tandis qu'il fait une moyenne de 0.065 pour le Pb entre une valeur maximale de 0.125 et minimale de 0.

Pareillement, l'analyse statistique multi-variée expose :

- Une connexion impuissante entre les différents métaux lourds. Ces connexions faibles voir négatives ont traduit la source non identique pour les ions en relation.

- La matrice de corrélation de Pearson réalisée entre les métaux lourds et les paramètres physico-chimiques a montré une corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.
- La matrice de corrélation réalisée entre les métaux lourds et les indices de pollution calculés a révélé une forte corrélation positive significative entre HPI et Cr ($r = 0,94$), tandis que HEI et C_d sont fortement et significativement corrélés avec Pb ($r = 0,99$).
- Une forte corrélation positive et significative entre les indices HEI et C_d ($r = 0,99$) indique que les concentrations de Cr et de Pb ont contribué de manière significative à la concentration de métaux lourds dans les différents échantillons analysés que les autres métaux. En outre, ils sont responsables aux valeurs élevées de HPI, HEI et C_d obtenus dans cette étude.
- Par conséquent, cela indique qu'il y a une pollution au Plomb et au Chrome dans les eaux souterraines de la zone d'étude.



CONCLUSION

GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a été réalisé principalement en contexte minier et concerne les aquifères du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Ain- Azel, Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet- el- Hamra, au Sud de Sétif, à l'Est Algérien.

L'étude géologique de la plaine de Ain- Azel dont le gisement de Chaabet- el- Hamra consiste en une synthèse des travaux déjà réalisés.

Cette mine qui appartient au para-autochtone et autochtone Hodnéen des zones externes du tronçon Nord oriental de la chaîne des Maghrébides, occupe le Sud-Ouest de la terminaison périclinale de la grande structure en Horst anticlinal de Rahbet du district minier de Dj. Fourhal. Elle est constituée essentiellement par des formations sédimentaires de Crétacé inférieur recouvertes par du Miocène discordant. Il s'agit des dolomies gréseuses et argileuses, des argiles, des marnes et des calcaires. Elle se caractérise par une tectonique de type cassante représentée par des failles normales qui perturbent la lithologie du secteur.

Des cartes regroupant les principaux faciès géologiques de la plaine de Ain- Azel ainsi que ceux du gisement ont été produites à partir des cartes géologique du gisement de Chaabet- el- Hamra, de Ain- Azel et de Ain- Lahdjar.

L'étude hydroclimatique a révélé que le climat est de type semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de 365mm et des T° moyennes annuelles de 14,62°C.

L'excédent est évalué à 32,57 mm selon le bilan hydrologique de Thornthwaite.

Vu les valeurs estimées de l'ETP et l'ETR, l'infiltration est très faible, (3,07%).

L'étude hydrogéologique de la plaine de Ain-Azel montre que la région est caractérisée par une nappe superficielle d'âge Mio-Plio-Quaternaire, et du gisement de Chaabet- el- Hamra par un aquifère d'âge Hauterivien à perméabilité de fissure dans sa partie centrale, et qui est localisé dans des formations carbonatées sous forme des dolomies fissurées hématitisées et parfois cavernueuses, et un aquifère d'âge Barrémien localisé dans la partie Nord-Ouest du gisement et associé aux grès et dolomies gréseuses.

Les deux cartes piézométriques élaborées à partir des campagnes de Juin 2015 et Mai 2016 ne montrent pas une différence. Il s'agit d'un sens d'écoulement général vers le centre de la plaine de Ain- Azel, mais la comparaison entre les cotes piézométriques des deux périodes, (Juin 2015 et Mai 2016), indique un rabattement de 0,5m en moyenne.

Au niveau du gisement de Chaabet- el- Hamra, les courbes piézométriques sont serrées au début puis elles deviennent espacées dans le sens d'écoulement, reflétant une zone d'accumulation.

Les cartes piézométriques traitées permettent l'estimation des gradients hydrauliques variant entre 1,83 et 6,39% pour la période du Juin 2015 et entre 1,75 à 8,64% pour la période de mois de Mai 2015.

Les valeurs du gradient hydraulique sont relativement différentes. Cette variation est due à l'hétérogénéité des formations, donc à la perméabilité.

L'étude hydrodynamique révèle que la transmissivité au niveau de l'aquifère Hauterivien est de l'ordre de $1,48 \cdot 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$, $1,66 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ pour l'aquifère Barrémien et de $3,16 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ et $2,14 \cdot 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$.

L'étude hydrogéochimique, (Avril 2012 et Mai 2018), des eaux de forages de l'aquifère Hauterivien montre que ce dernier est caractérisé par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien pour l'aquifère Barrémien, et la majeure partie de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.

Le diagramme de Gibbs montre que l'altération des roches, (carbonatées surtout), contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes. Par contre, et pour certains points de l'aquifère Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire, l'évaporation des affleurements triasiques existants dans les bordures est la responsable de la chimie des ions majeurs.

En se référant aux normes internationales et locales, et vu les caractéristiques physico-chimiques, les eaux captées de l'Hauterivien sont propres à la consommation, tandis que certains points d'eau du Barrémien et du Mio-Plio-Quaternaire sont impropres.

L'analyse en composante principale (ACP) appliquée aux eaux souterraines de la région de Ain-Azel, dans le Sud de Sétif, apparaît que la forte corrélation entre les éléments chimiques exprime la même origine.

La classification des eaux Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire à l'irrigation en se basant sur les valeurs du SSP et RSC, tous les points d'eau sont de bonne qualité. Aussi, les valeurs du MH et KR confirment que ces eaux sont aptes à l'irrigation sans traitement.

La pollution par les métaux lourds (Pb, Mn, Cr) de l'aquifère Barrémien et Hauterivien est très inquiétante et impose une réaction urgente pour rechercher et appliquer des solutions adéquates.

De plus et pour affirmation de cette inquiétude, l'utilisation des indices d'évaluation de la pollution HPI (*Heavy metal pollution index*), HEI (*Heavy Metal Evaluation Index*) et C_d (*Degree of Contamination*), en se basant sur l'analyse des Cr, Fe, Mn, Zn, Cu et Pb nous faisons apparaître:

1 les résultats de l'HPI déterminent que tous les échantillons d'eau étaient inférieurs à la limite critique de 100 pour l'eau potable ;

2 L'indice d'évaluation des métaux lourds (HEI) calculé pour cette étude exprime que 63,63% des échantillons d'eau avaient une valeur élevée de HEI;

3 Un taux de 72,72% du total des échantillons analysés ont des valeurs de C_d supérieures aux valeurs maximales de 3, indiquant une contamination élevée dans ces échantillons. Cela a révélé que le plus grand pourcentage de la zone d'étude détient une menace de contamination toxique et en termes du métal lourd dissous dans les eaux souterraines.

Aussi, L'emploi des Paramètres d'évaluation des risques pour la santé montre que :

4 Les valeurs moyennes du ADD, (*The Average Daily Dose*) pour les eaux souterraines du gisement de Chaabet el Hamra ainsi que de Kherzet Youcef dans le territoire de Ain-Azel différaient pour différents métaux par ordre décroissant de Cu (10,86) > Pb (7,62) > Mn (1,36) > Fe (0,4) > Cr (0,24) > Zn (0,08) ;

5 Une valeur de HQ, (*The Hazard Quotient*) élevée a été observée pour le Pb (moyenne =21.77) et le Cu (moyenne =2.71) dans les eaux souterraines de la zone d'étude. Ces valeurs sont supérieures à 1 et considèrent les eaux souterraines de la zone d'étude comme toxiques à utiliser pour la consommation concernant la teneur en métaux lourds.

6 Le risque de cancer (RC) pour le Cr varie entre 0 et 1.199 avec une moyenne de 0.119, tandis qu'il fait une moyenne de 0.065 pour le Pb entre une valeur maximale de 0.125 et minimale de 0.

Alors, Les valeurs élevées de DDA, HQ et CR pour les échantillons d'eau des deux aquifères Hauterivien et Barrémien de la zone d'étude, prédisaient des risques possibles pour la santé de la population locale en buvant ces eaux souterraines riches en métaux.

Pareillement, l'analyse statistique multi-variée expose :

- 7 Une connexion impuissante entre les différents métaux lourds. Ces connexions faibles voire négatives ont traduit la source non identique pour les ions en relation.
- 8 La matrice de corrélation de Pearson réalisée entre les métaux lourds et les paramètres physico-chimiques a démontré une corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.
- 9 La matrice de corrélation réalisée entre les métaux lourds et les indices de pollution calculés a révélé une forte corrélation positive significative entre HPI et Cr ($r = 0,94$), tandis que HEI et C_d sont fortement et significativement corrélés avec Pb ($r = 0,99$).
- 10 une forte corrélation positive et significative entre les indices HEI et C_d ($r = 0,99$) indique que les concentrations de Cr et de Pb ont contribué de manière significative à la concentration de métaux lourds dans les différents échantillons analysés que les autres métaux. En outre, ils sont responsables aux valeurs élevées de HPI, HEI et C_d obtenues dans cette étude.

Par conséquent, cela indique qu'il y a une pollution au Plomb et au Chrome dans les eaux souterraines de la zone d'étude.



RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adepoju-Bello, A.A, O.O. Ojomolade, G.A. Ayoola and H.A.B. Coker, 2009. Quantitative analysis of some toxic metals in domestic water obtained from Lagos metropolis. *The Nig. J. Pharm.* 42(1): 57-60.
- Aissaoui D. 1984. Les structures liées à l'accident sud atlasique entre Biskra et le Djebel Menâa (Algérie). Évolution géométrique et cinématique. Thèse, 3^e cycle, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 150p.
- Aghazadeh N. and Mogaddam, A. A. 2010. Assessment of ground water quality and its suitability for drinking and agricultural Uses in the Oshnavieh area, northwest of Iran," *Journal of Environmental Protection*, Vol. 1 No. 1, 2010, pp. 30-40. DOI: 10.4236/jep.2010.11005.
- Al Obaidy A. H. M. J, Kadhem A. J, Hamiza N. H, Al Mashhady A. A.M. 2014. Assessment of Ground Water Quality for Drinking and Agricultural Uses in Mouqdadiya District, Diyala, Iraq, *Eng. &Tech.Journal*, Vol. 32 , Part (A), No.12, 2921-2936.
- Al Obaidy A. H. M. J, Al-Sameraiy M. A, Kadhem A. J, Abdul Majeed A. 2010. Evaluation of treated municipal wastewater quality for irrigation, *Journal of Environmental Protection*, 1(3), 216-225.DOI: 10.4236/jep.2010.13026.
- APAH 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21 St Edition, American Public Health Association, Washington D.C.:APHA-AWWA-WEF. ISBN 0875530478.
- Aris Y. 1994. Étude tectonique et microtectonique des séries Jurassiques à Plio-quaternaires du Constantinois central (Algérie Nord-Oriental) : Caractérisation des différentes phases de déformation. Thèse, Univ. Nancy I, 215p.
- Attoucheik L. 2006. Étude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youssef [SETIF] et son impact sur l'environnement, Mémoire de magistère, IST. USTHB, Algérie. Available at : <https://docplayer.fr/87770531-Eau-et-environnement.html>.
- Ayers R. S, Westcot D.W, 1994. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], Water Quality for Agriculture, Irrigation and Drainage, Rome, Italy. Paper no. 29. Rev. 1, M-56. ISBN: 92-5-102263-1.
- Backman B, Bodis D, Lahermo P, Rapant S, Tarvainen T .1998. Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environ Geol* 36:55–64
- Bagnouls F, Gaussen, H. 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie* 66: 193–220.
- Bhardwaj V, Singh D. S .2011. Surface and groundwater quality characterization of Deoria District ganga plain. *J Environ Earth Sci* 63: 383 – 395
- Belhadj M. Z. 2017. Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la Wilaya de Skikda, Thèse de doctorat en hydraulique, université de Biskra, 172 pages.
- Belkhiri L, Boudoukha A, Mouni L, Baouz T. 2010. Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater-A case study: Ain Azel plain [Algeria]. *Geoderma* 159: 390-398.

Bellouche M. A .2018. Les eaux des mines de la région de Ain Azel (Sud Sétifien), caractérisation hydrodynamiques, hydrochimique et l'impact sur l'environnement. Thèse de doctorat en hydrogéologie, université de Constantine, 154 pages.

Bellouche M. A .2016. Schéma hydrogéologique possible de la mine de Kherzet Youssef, Nord Est Algérien, Sciences et Technologie, D, n°44, Revue Semestrielle de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie. pp. 73-80. Available at: <http://revue.umc.edu.dz/index.php/d>.

Bellouche M.A. 1996. L'eau dans les mines et les travaux souterrains : cas de la mine de Kherzet Youssef -Ain Azel, Mémoire de magister en hydrogéologie, Université de Constantine, 134 p.

Belkhiri L. 2005. Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Ain Azel. Wilaya de Sétif Est Algérien, Mémoire de magistère, Université de Batna, Algérie.[2005 Batna].

Bencer S., Boudoukha A., Mouni L. 2016. Multivariate statistical analysis of the groundwater of Ain Djacer area [Eastern of Algeria]. Arab J Geosci 9:248.

Bertraneu J. 1955. Contribution à l'étude des Monts du Hodna : le massif de Boutaleb, Pub. Serv. Géol. Algérie, nouvelle série, Bull. n 04,183p.

Bertraneu J. 1952. Le massif du Boutaleb. Conq. Géol. Intern. XIXe Sess. Alger. Mon. rég. Alger .n°5.

Blowes D.W., Ptacek C.J. 1994. Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings, in: Jambor, J.L., Blowes, D.W. [Eds], The Environmental Geochemistry of Sulphide Mine-Wastes. Mineralogical Association of Canada, Nepean. 22 : 271–292.

Boateng T.K, Opoku F, Akoto O. 2019. Heavy metal contamination assessment of groundwater quality: a case study of Oti landfill site, Kumasi. Applied Water Science (2019) 9:33 <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0915-y>

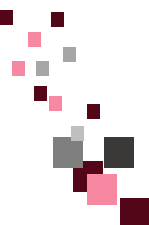
Bouaicha, F. 2018. Le géothermalisme de la region de Guelma, Thèse de doctorat en hydrogéologie, université de Constantine, 191 pages.

Boudoukha A. 1998. Hydrogéologie des hautes plaines Sétifiennes et qualité chimique des eaux souterraines, Thèse de doctorat. Inst. Chimie. Univ. Annaba. 230 pages. Avalaible at : <http://www.secheresse.info/spip.php?article32833>.

Boudoukha A. 1988. Étude hydrogéologique et modélisation du système aquifère fermé d'El Eulma-Ain- Lahdjar [région Est de Sétif – Algérie], Thèse de Doctorat.Labo. Géologie structurale et appliquée. Univ. Franche comté. France. 186 pages.1vol. (IX-186p.) ; 30cm.

Bouillin J.P. 1977. Géologie alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie). Thèse de doctorat, SC., Paris VI, 551 p.

Bouillin J.P. 1986. Le bassin maghrébin une ancienne limite entre l'Europe etl'Afrique à l'Ouest des Alpes. Bull. Soc. Géol. Fr., (8), t. II, n° 4, pp. 547-558.



- Boutaleb A, Marignac Ch , Pironon J ., Aissa D.E , Lekbal F .2014. Oil-bearing fluid inclusions from Hodna mounts ore deposits (North Eastern - ALGERIA). Asian Current Research On Fluids Inclusions ACROFI 2014, Xi'an, China
- Boutaleb A. 2001. Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna, géologie, pétrographie, micro thermométrie et implications métallogéniques , Thèse de doctorat en géologie minière, USTHB, Alger, 404 pages.
- Bureau D. 1986. Approche sédimentaire de la dynamique structurale : évolution mésozoïque et de venir orogénique de la partie septentrionale du fossé saharien (sud-ouest constantinois et Aurès, Algérie) Thèse d'Etat. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, 441p.
- Bureau D. 1984. Sédimentation contemporaine des basculements des blocs du substratum en domaine épicontinental. Caractères tirés d'un exemple pris autour de Batna, Algérie. 5^{ème} Cong. Europ. De Sédim., p. 84-85.
- Busson G. 1974. Le Trias évaporitique d'Afrique du Nord et d'Europe occidentale : donnée sur la paléogéographie et les conditions de dépôt. Bull. Soc géol, n°6, pp.653- 665.
- Caire A. 1957. Étude géologique de la région de Biban (Algérie). Publi. serv. Carte géol. Algérie. nov. Série., Bull.n°16, 818p.
- Castany G. 1982. Principes et méthode de l'hydrogéologie, Dunod-édit., Paris 236 pages
- Cederstorm D.J. 1946. Genesis of groundwater in the coastal plain of Virginia. Environ Geol 41:218–245.
- Chadi M. 2004. Cadre géologique et structural des séries crétacés néritiques du constantinois (Est- algérien) .Thèse de doct. Univ. Constantine, 197p.
- Chadi M. 1991. Étude géologique de monts de Ain M'Lila (Algérie orientale). Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy1, 191p.
- Coiffait P.E. 1992. Un bassin post- nappes dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord- Orientale). Thèse doct. Univ. Nancy, 505p.
- Cote M. 1998a. Les régions bioclimatiques de l'Est algérien, Rhumel, n° 6, pp. 57-71.
- Dalvie M. A, Cairncross E, Solomon A, London L. 2003. Contamination of rural surface and groundwater by endosulfan in farming areas of the Western cape. South Africa. Environ. Health 10, 2(1):1
- Deleau P. 1938. Les variations brusques de faciès du crétacé inférieur du Djebel Djaffa, C.R Acad. Sc. Paris, t. 206, p121.
- Delfaud J. 1974. Les grands traits de la paléogéographie de l'Algérie septentrionale durant le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur. CR Somm. Soc. Géol.Fr 6,167- 168.
- Demdoum A. 2010. Étude hydrogéochemique et impact de la pollution sur les Eaux de la région d'El Eulma , Thèse de doctorat d'état en hydrogéologie, université de Constantine, 231 pages. Available at: <http://www.bu.umc.edu.dz>theses>sc-terre>DEM 5750>.
- Demdoum A., Djebbar M. 2009. Caractérisation hydrochimique et apport isotopique sur la salinité du bassin d'El Eulma en région sud-Sétifienne, Algérie Nord Orientale, rev .sce. et



tech. Dec 2009 Université Mentouri Constantine. Available at : <http://revue.umc.edu.dz/index.php/d>.

Domenico PA. 1972. Concepts and models in groundwater hydrology. LCCN79168751. McGraw-Hill. New York. 405 pages. Available at : <https://books.google.dz/books?id=g8gYAQAIAAJ>.

Domzig A. et al. 2006. Searching for the Africa–Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (Maradja ‘03 cruise), C. R. Geosciences 338.80-91.

Doneen L .1962. The influence of crop and soil on percolating water. In: Proceeding 1961 biennial conference on groundwater recharge, Berkeley, CA, USA. 26–27 June 1962; pp. 156–163.

DREWS (Direction des Ressources en Eau, Wilaya de Sétif). 2011. Carte schématique descriptive des principales nappes aquifères existantes à travers la région de Sétif.

Durand-Delga M., Fontbote J.M. 1980. Le cadre structural de la Méditerranée occidentale, In : BRGM, Géologie des chaînes alpines. Issues de la Téthys. 26^{ème} Congr. Géol. Int. Paris. 1980. Colloque C5. Mém. 115, Orléan, pp. 67-85.

Durand-Delga M. 1969. Mise au point sur la structure de NE de Berbérie. Publ Serv. Carte géol. Algérie, n°39. pp. 89-131.

Durand-Delga M. 1955. Étude géologique de l’ouest de la chaîne numidique (Algérie). Thèse Sciences Paris et Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2 séries, N° 24, 533p.

Durozoy G. (1960). Étude géologique de la région du Châteaudun Rhumel. Publ. Serv. Géol. Algérie. Bulletin N°22, 456pp.

Eaton FM. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci 69:123–134.

Edet A. E, Offiong O.E .2002. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area Lower Cross River Basin (South-eastern Nigeria). Geo J 57:295–304

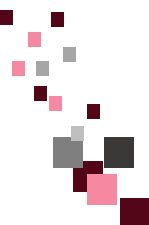
Ehya F, Firouzeh Moghadam Z. 2017. Hydrochemistry and water quality assessment of the Maroon River in Behbahan area, SW Iran. Water Pract Technol 12:818–831. Available at : <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.088>.

ENOF. 2003. Rapport final sur l’hydrogéologie du gisement de Chaabet el Hamra, Rapport interne. 40 pages.

EREM .1992. Rapport final sur les travaux d’évaluation du gisement de Chaabet-El-Hamra avec calcul de réserve, Volume 1. Rapport interne. 130 pages.

Esmaili A. and Moore F. 2012. Hydrogeochemical assessment of groundwater in Isfahan province, Iran. Environ Earth Sci 67:107–120.

Feng Z., Yong L., Huaicheng G. 2007. Application of multivariate statistical methods to water quality assessment of the water courses in Northwestern New Territories, Hong Kong. Environ Monit Assess 132:1–13.



- Ficheur E. 1893. Sur les terrains crétacés du massif du Boutaleb. Bull. Soc. Géol.Fr. p393-427, Paris.
- Ficheur E. 1890. Description géologique de la Kabylie du Djurdjura. Etude spéciale des terrains tertiaires. Thèse Paris. Fontana et Cie. Edit .Alger.
- Flandrin J. 1948. Contribution à l'étude stratigraphique du nummulitique Algérien. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, 2^{ème} sér, stratigr, n°19 ,332 p.
- Geller W., Friese K., Herzsprung P., Kringel R., Schultze M. 2000. Limnology of sulphuric acid mining lakes. II Chemical properties: The main constituents and buffering systems. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie 27: 2475–2479.
- Ghebouli S. 2010. Utilisation des A.C.P et des rapports caractéristiques dans l'explication du chimisme des eaux souterraines- cas de la plaine de Bir Haddada (Sud de Sétif). Sciences et Technologie, D, n°32, Revue Semestrielle de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie. pp. 51-59.
- Guellal S. et al. 1978. Les formations de type péni-tellien dans l'Est de l'Algérie : stratigraphique, faciès, position structurale et paléogéographique. Bull. Soc. p.101- 112, Alger.
- Gibbs R.J.1970. Mechanism controlling world water chemistry.Science 170:1088–1090. DOI: 10. 1126/science.170.3962.1088.
- Glaçon J. 1967. Recherche sur la géologie et les gites métallifères du tell Sétifien, Algérie. Tome 2, bulletin N° 32, Publication du service géologique de l'Algérie.
- Glaçon J. 1958. Les monts du Hodna, partie orientale, XIXème congrès géologique international, Monographie régionale 1, sérié, Algérie N° 7.
- Glangeaud L. 1932. Étude géologique de la région littorale de la province d'Alger. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, 2^e série, n°8,617p.
- Guan X., Liao S., Bai J., Wang F., Li Z., Wen Q., He J., Chen T. 2017. Urban land-use classification by combining high-resolution optical and long-wave infrared images. Geospatial Inform Sci 20: 299–308.
- Guiraud R. et al. 2005. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: an overview, J. African Earth Sci., 43 (1-3), 83-143.
- Guiraud R. 1990. L'évolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines: Thèse Doct. Sci. Univ. Nice, 259 p. Mémoires n03, Publ. de l'ONIG, Alger.
- Guiraud R. 1973. Évolution post-triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse ès Sciences, Université de Nice, 270 p.
- Guiraud R.1971. Aperçu sur les principaux traits du Hodna et des régions voisines, bulletin de service de l'Algérie N° 41, nouvelle série, Publication du service géologique de l'Algérie.



Gowd S.S. 2005. Assessment of ground water quality for drinking and irrigation purpose: a case study of Peddavanka watershed, Anantapur District, Andhra Pradesh, India,” *Environmental Geology*, 48(6): 702–712.

Hamzaoui-Azaza F, Ameer M, Chaouch R, Ben Cheikha L, Gueddari M, Carrillo-Rivera J. 2020. Assessment of groundwater quality based on GIS and geochemical methods: coastal aquifer of Bouficha (North-Eastern Tunisia). *Journal of Coastal Conservation* <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00762-8>

Hem J. D. 1986. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water,” *Water-Supply Paper 2254*, United States Government Printing of fice, Washington, DC.

Horton R. K. 1965. An index number system for rating water quality. *J Water Pollut Control Fed* 37:300–305

Huili Q., Herong G., Lin C., Zhenggao P., Biao L. 2019. Hydrogeochemical characteristics and water quality assessment of shallow groundwater: a case study from Linhuan coal-mining district in northern Anhui Province, China, *IWA Publishing Water Supply* 19(5):1572-1578.

Kada H., Demdoun A. 2020. Assessment of the Hauterivian groundwater quality in zinc mining area for drinking and irrigation uses: Case of Chaabet El Hamra, Algeria. *Journal of Water and Land Development*. No. 46 (VII–IX) p. 131–139. DOI: 10.24425/jwld.2020.134205.

Kada H .2014. Contexte Géologique, Hydrogéologique et Métallogénique du gisement de Zinc de Chaabet El Hamra à Ain Azel – Wilaya de Sétif-, Nord Oriental algérien. Mémoire de magister en Géologie Appliquée et Ressources Minérales, Univ. Setif, 114pages.

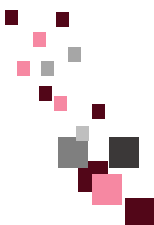
Khaldi A. 1987. Le gisement de Kherzet Youssef ; une minéralisation Pb-Zn-Fe- (Ba) stratiforme dans le membre médian marno-carbonaté du Barrémien de la région de Ain Azel (Hodna, Algérie), Th. Doct; 3 cycle, ENSG Nancy, 439 p.

Khalid. S, Shahid. M, Natasha, Shah A. H, Saeed F, Ali. M, Qaisran S. A, Dumat C. 2020. Heavy metal contamination and exposure risk assessment via drinking groundwater in Vehari, Pakistan, *Environmental Science and Pollution Research* <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10106-6>

Karmegam U., Chidambaram S., Prasanna M.V., Sasidhar P., Manikandan S., Johnsonbabu G.,Dheivanayaki V., Paramaguru P., Manivannan R., Srinivasamoorthy K. 2011. A study on the mixing proportion in groundwater samples by using Piper diagram and Phreeqc model. *Chin. J. Geochem*, 30: 490–495.

Kazi Tani N. 1986. Évolution géodynamique de la bordure Nord-africaine: le domaine intraplaque nord- algérien. Approche megaséquentielle. Thèse ès Sci. Univ. De Pau. 2 tomes, 886 pages.

Kazi Tani N. 1972. The north Sétif allochthonous formation: contribution toward solving certain paleogeographical and structural problems of the tellian area of Algeria. 8th.Arab.Petr.Paper N°88 (8.3).



- Kelly WP. 1940. Permissible composition and concentration of irrigated waters. In: Proceedings of the ASCF, vol. 66. 607pages.
- Kim K. and Yun S.T. 2005. Buffering of sodium concentration by cation exchange in the ground water system of a sandy aquifer,” *Geochemical Journal*, 39(3), 273-284.
- Khoshnam Z , Sarikhani R , Dehnavi A G , Ahmadnejad Z. 2017. Evaluation of Water Quality Using Heavy Metal Index and Multivariate Statistical Analysis in Lorestan Province, Iran. *J Adv. Environ Health Res* (2017) 5:29-37
- Kouassi A.M., Mamadou A., Ahoussi K.E., Biemi J. 2013. Simulation de la conductivité électrique des eaux souterraines en relation avec leurs propriétés géologiques : Cas de la Côte d’Ivoire . *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 21-22: 138-166.
- Lafitte R. 1939. Étude géologique de l’Aurès. Publ. Serv. Carte géol. Bull. n°15, 451p. Alger.
- Lahondère J. C. et al. 1979. Datation des grès numidien d’Algérie orientale, C.R. Acad. Sci .série, d. p.383-386, Paris.
- Lahondère J.C. 1987. Les séries ultra telliennes d’Algérie nord orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Th, doc, d’état-Sc. Nat. Univ. P. Sabatier-Toulouse. 242p.
- Lee J. S, Chon H. T, Kim H. T .2005. Human risk assessment of As, Cd, Cu and Zn in the abandoned metal mine site. *Environ Geochem Health* 27:185–191
- Leikine M. 1971. Étude géologique des Babors occidentaux (Algérie), Thèse Sci Univ. Paris.ronéot, 536p.
- Leikine M. et Velde B. 1974. Les transformations post sédimentaires des minéraux argileux du Sénonien, dans le NE algérien .Existence probable d’un épi métamorphisme anté-éocène .*Bull. Soc .géol. Fr. (7)*, p.177-182,3fig. Paris.
- Leikine M. et Vila J.M. 1975. Microfossiles jurassiques et crétacés des Hautes Plaines Sétifiennes au Djebel Youssef et au Djebel Braou (Algérie) : conséquences structurales .*Revue de Micropaléontologie*, p89-96, Paris.
- Marmi R. 1995. bassins continentaux de l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie nord orientale : Etudes stratigraphiques, sédimentaires, structurales et géochimiques .Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy.283pages.
- Matiatos I, Alexopoulos A, Godelitsas A .2014. Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in North-Eastern Peloponnesus (Greece). *SciTotal Environ* 476 – 477:577 – 590
- Mebarki A. 2005. Hydrologie des bassins de l’Est Algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement, thèse de doctorat, Université de Constantine. 360pages.
- Mezerzi A. 2011. Les formations évaporitiques triasiques des Hautes Plaines Sétifiennes (NE Algérien) : Répartition et caractérisation des substances minérales associées Mémoire de magister en Ressources Minérales, Univ. Constantine, 194pages.



- Mihoubi N. 2009. Fonctionnement et gestion hydrogéologique et hydrologique des ressources en eau du Bassin de Hammam Grouz. Mémoire de magister, univ Constantine. 244p.
- Mohan S. V, Nithila P, Reddy S.J. 1996. Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *J Environ Sci Health A* 31:283–289
- Nollet L.M.L. 2007. Handbook of water analysis, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, p 769.
- N.A.6360. 1992. Normes algériennes, ed. Ianor.
- Obert D. 1981. Étude géologique des Babors orientaux (domaine tellien, Algérie). Thèse Sc. Univ. Paris, Mém. Sc. Terre 81.32, 635p, 283fig, 8pl. ronéot.
- Obert D. 1974. Phases tectoniques mésozoïques d'âge anté cénomaniens dans les Babors (Tell nord sétifien, Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7 sér, XVI : p 171-176. Paris.
- OMS (WHO). 2008. (L'Organisation Mondiale de la Santé-World Health Organization) Guidelines for drinking-water quality: incorporating first and second addenda, recommendations, 3rd edn, vol.1. WHO Press, Geneva, p 668.
- OMS (WHO) .1993. (L'Organisation Mondiale de la Santé-World Health Organization) Guidelines for Drinking-Water Quality. Second Edition. Vol 1. Recommendations. 11p
- ONM. 2010. Données météorologiques de la station d'Aïn Azel.
- Paliwal K.V. 1972. Irrigation with saline water. In: Monogram no. 2 [new series]. IARI, New Delhi, p 198.
- Péron A. (1883). Essai d'une description géologique de l'Algérie pour servir de guide aux géologues dans l'Afrique française. *Ann. Soc. Géol.*, t, 14, 202 p., Paris.
- Pescod M.B. 1985. Wastewater Treatment and Use in Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 47, FAO, Rome.
- Piper A.M. 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Trans Am Geophys Union* 25:914–928. DOI: 10.1029/TR 025i006p00914.
- Pradhan B. and Pirasteh S. 2011. Hydro-chemical analysis of the ground water of the Basaltic Catchments: Upper Bhatsai Region, Maharashtra, *The Open Hydrology Journal*, 5, 51-57.
- Prasad B, Bose J. 2001. Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas. *Environ Geol* 41:183–188.
- Raju N.J. 2007. Hydrogeochemical parameters for assessment of ground water quality in the upper Gunjanaeru River basin, Cuddapah District, Andhara Pradesh, South India, *Environmental Geology*, 52(6): 1067-1074.
- Raoult J.F. 1974. Géologie de centre de la chaîne numidique (Nord du Constantinois, Algérie). Thèse. Sc. Paris. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S., t. LIII, n°121, 164 p.



Raoult J.F. 1969. Nouvelles données sur les flyschs du nord de Kef Sidi Driss et dans la zone de col des oliviers (Nord du Constantinois, Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XI, pp 516-543, 2 fig.

Raoult J.F. 1966. Sur l'allochtonie de la chaîne calcaire dans la région du Djebel Sidi Driss (Nord de Constantine, Algérie).C.R. somm. Soc. Géol. Fr., p.178, Paris.

Raoult J.F. 1972. Précision sur le flysch massylien : série stratigraphique, variations des faciès, nature du matériel remanié (Nord du Constantinois, Algérie). Bull.soc. Hist. nat. Afr. Nord. pp.73-92, Alger.

Raoult J.F. 1975. Évolution paléogéographique et structurale de la chaîne alpine entre le golfe de Skikda et Constantine (Algérie orientale). Bull, Soc. Géol. Fr. Pp. 394-409.Paris.

Riboni E. 2003. Purification de l'eau dans l'industrie, Chézard-Saint-Martin, Suisse, 164 pages.

Rubio B, Nombela M, Vilas F .2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution. Mar Pollut Bull 40:968–980

Roche M. 1963. Hydrologie de surface Gauthier villars édit Paris, 430 pages.

Rouvier H. 1977. Géologie de l'extrême Nord-Tunisien : Tectoniques et paléogéographies superposées à l'extrémité orientale de la chaîne Nord Maghrébine .Thèse .Sc. Paris .2 tomes.898p.

Raykov T., Marcoulides GA .2008. An introduction to applied multivariate analysis. Taylor & Francis, New York, NY. ISBN-13: 978-0-8058-6375-8.pp40.

Richards L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, Agric Handbook, US Department of Agriculture, Washington, DC. 60:69-82.

Rizwan U , Riffat N. M, Abdul Qadir .2009. Assessment of groundwater contamination in an industrial city, Sialkot, Pakistan. African Journal of Environmental Science and Technology Vol. 3 (12), pp. 429-446, December, 2009 Available online at <http://www.academicjournals.org/AJEST> ISSN 1991-637X © 2009 Academic Journals

Savornin F. 1920. Étude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien [Geological study of the Hodna region and the Sétifien plain]. Thèse és sce Nat. Lyon p 44-45 S. Publication du service géologique de l'Algérie. 720 pages

Savornin J. 1904. Structure du Dj. Maadid et du Talemtaga (Bull. Soc. géol. Fr, 4^{ème} sér. t. IV, p.137-155.

Schoeller H .1962. Les eaux souterraines. Masson Cie, Paris. 642pages. <https://doi.org/10.1002/iroh.19640490118>

Schiavo M.A., Hauser S., Cusimano G. and Gatto L. 2006. Geochemical characterization of ground water and submarine discharge in the south-eastern Sicily," Continental Shelf Research, 26 (7), 826-834.



Schuh W.M., Klinekebiel D.L., Gardner J.C., Meyer R.F. 1997. Tracer and nitrate movements to groundwater in the northern Great Plains. *J of Env Qual* 26: 1335-1347.

Siriwong W. 2006. Organophosphate pesticide residues in aquatic ecosystem and health risk assessment of local agriculture community. Chulalongkorn University, Bangkok

Srinivasamoorthy K, Chidambaram S, Sarma V.S, Vasanthavigar M, Vijayaraghavan K, Rajivgandhi R, Anandhan P. and Manivannan R. 2009. Hydrogeochemical characterization of ground water in Salem District of Tamilnadu, India, *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 1(2), 22-33.

Subramani T., Elango L., Damodarasamy S.R. 2005. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India. *Environ Geol* 47:1099–1110.

Szabolcs I. and Darab C. 1964. The Influence of Irrigation Water of High Sodium Carbonate Content of Soils,” *Proceedings of 8th International Congress of Soil Science*, 2, 803-812, 1964.

Tabassum R. A, Shahid M, Niazi N. K, Dumat C, Zhang Y, Imran M, Bakhat H. F, Hussain I, Khalid S. 2019b. Arsenic removal from aqueous solutions and groundwater using agricultural biowastes derived biosorbents and biochar: a column-scale investigation. *Int J Phytoremediation*:1 – 10

Tiwari A. K., De Maio M, Singh P.K, Mahato. K.M. 2015. Evaluation of surface water quality by using GIS and heavy metal pollution index (HPI) model in a coal mining area, India, *Bull Environ Contam Toxicol* (2015) 95:304–310. [http:// doi 10.1007/s00128-015-1558-9](http://doi.org/10.1007/s00128-015-1558-9)

Thornthwaite C.W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38: 55.

Turc L. 1961. Évaluation des besoins en eau d’irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron*, 12 (1), 13-49.

UNESCO .2007. Water portal newsletter, water related diseases.

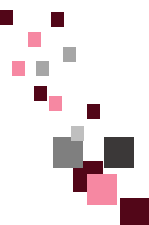
USEPA. 2011. Exposure factors handbook. National Center for Environmental Assessment. United State Environmental Protection Agency, Washington

USEPA IRIS . 2011. Integrated risk information system. Environmental Protection Agency Region I. United State Environmental Protection Agency, Washington, p 20460.

Vasanthavigar M, Srinivasamoorthy K, Vijayaraghavan K, Rajiv-Ganthi R, Chidambaram P, Anandhan S, Manivannan R, Vasudevan S. 2010. Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar Sub-Basin. Tamilnadu, India. *Environ.Monit Assess* 171:595 – 609

Verdeil P. 1988. Abaque de calcul de l'ETR (Régions semi-arides), 01 abaque.

Vila J.M. 1980. Chaîne alpine de l'Algérie orientale et des couffins Algéro-Tunisiens .Thèse Doct. d'Etat univ. Paris VI, 2t. 586 pages.



- Vila J.M. 1977. Carte de l'Algérie au 1/200 000, feuille de Sétif (N-Q ; 3-4). Publ. comm. Serv. Carte Géol., Algérie /SONATRACH, not. Expl. Détaillée, 48p.
- Vila J.M. 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°93, Sétif (2^{ème} Edition), avec notice explicative détaillée, (levés de R.Gonnard, N. Kazi Tani, A. Reymond et J.M. Vila). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.
- Vila J.M. 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°143, Ain Azel (Ampère) (1^{ere} Edition), avec notice explicative détaillée, 16p (levés de J. Glaçon, M. Leikine et J.M. Vila). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.
- Vila J.M. 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°144, d'Ain Lahdjar (Behagle) (1^{ere} Edition), avec notice explicative détaillée, 10p (levés de J.Glaçon, M. Leikine et J.M. Vila). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.
- Vila J.M. et Leikine M. 1976. Sur l'allochtonie des Biban orientaux (Algérie). 4^{eme} réunion, ann. Sc. Terre, Paris, S.G.F, p393.
- Vila J.M. et al. 1975. Sur l'allochtonie du Tell sétifien : la fenêtre de la Koudiat Touachra et la nappe de Djemila. Bull. Soc. Géol. Fr., 7^{ème} série, XVII : pp.1172- 1176.
- Vila J.M. et Sigal J. 1969. Le cadre structural de Djebel Debar (Nord du constantinois, Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., 7^{ème} série, XI .pp.75-81.Paris.
- Voûte C. 1967. Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Aïn akroun, Aine Babouche et des régions limitrophes Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, 2 tomes, 390 pages.
- Walton W.C .1970. Groundwater resource evaluation, McGraw Hill Book Co. New York, 664 pages.
- Wilcox L.V. 1955. Classification and use of irrigation water. Agric circ 969. USDA, Washington, DC p: 19.
- Wildi W. 1983. La chaîne tello-rifaine [Algérie, Maroc, Tunisie] structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène [The Tello-Rifaine chain -Algeria, Morocco, Tunisia-structure, stratigraphy and evolution from the Triassic to the Miocene]. Rev. Geol. Dynam. Geogr. Phys., 201-297.
- Wolfgang K.H and Léopold S. 2012. Applied multivariate statistical analysis. Edition 3:201-418.
- Wongsasuluk P, Chotpantararat S, Siriwong W, Robson M .2014. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural area in Ubon Ratchathani province, Thailand. Environ Geochem Health 36:169-182.





ANNEXES

ANNEXE 1 : HYDROCLIMATOLOGIE

	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.	Ann
1984	47,1	42,2	12,3	9,2	13	3	N.M	9	N.M	83,4	13	10,2	242,4
1985	31,5	21,6	75,5	18,8	84,5	N.M	N.M	N.M	7,5	41,6	28,7	42,4	352,1
1986	5,3	3	90	12,1	11,4	24	3	21,7	67,8	25,6	12,4	41,1	317,4
1987	17,7	30,9	4,8	10,5	44,3	1,5	57,9	N.M	2,3	17,4	34,3	92,9	314,5
1988	7,1	10,3	11,2	43,2	20,6	53,7	1,8	N.M	31,9	1,6	11,5	57,5	250,4
1989	8	21,1	8	83,2	31,8	50,8	9,2	12,1	41,8	7,9	19,5	15,5	308,9
1990	58,4	28,2	8,4	83,6	101,4	11,5	8,9	44,1	17,2	14,8	57	59	492,5
1991	7,3	29,7	94,3	48,7	58,7	13,7	33,4	10	29,6	97,5	15,8	16,8	455,5
1992	38,8	23,8	57,9	22,3	111,3	2,2	17,9	0,3	13,8	5,6	31,8	43,8	340,1
1993	14,6	32	32	1,2	47,4	2	3,2	15,2	11,8	3	44	27,1	218,3
1994	38,6	12,4	16,8	26,2	4,2	19,5	0	4,2	55,5	54,1	7,2	6,1	244,8
1995	42,7	19,8	41,3	20,8	5,1	39,3	1,6	20	84,8	8,8	6,4	34,5	325,1
1996	66,9	55	26,7	21,1	47,5	36,4	34,5	13	19,4	6,3	13,3	6,5	346,6
1997	24,6	2	8,8	59,5	12,7	13,2	0	7,6	53,1	30,5	45,2	32,8	244,8
1998	25,6	20,6	5,8	47,6	66,2	4,5	0	2	17,7	9,4	16,8	3,5	219,7
1999	59,5	11	17,9	19,9	6,8	3,7	2,6	2,5	49,8	41,4	46,4	N.M	261,5
2000	14,2	3,5	3	9,5	49,5	16,8	0	6	49,5	2,3	7,7	44,7	206,7
2001	20,7	18,1	5,7	3,6	20	2,4	9,6	8,4	38,8	3,3	18,5	9,2	158,3
2002	91,6	14,5	18,2	31,7	40,7	15,7	0	15,5	7,3	22,3	75,7	14,6	347,8
2003	42,6	5	41,2	50,7	87	67,5	0	12	47	61,7	16,2	50,3	481,2
2004	6	26,4	34,2	13	0,5	22,8	5,1	6,5	5	33,7	68,2	131,5	352,9
2005	79,2	53,8	4,4	71,6	41,3	14,6	12,9	7,4	53,1	31,7	38,8	63,2	472
2006	13,3	14,3	74,6	46,6	29,8	19,2	0	6	48,2	5,8	18,3	22,4	298,5
2007	3,5	1	2,4	9,4	122,2	10,5	13,7	16	135	15,8	8,5	8,2	346,2
2008	74,7	20,4	54,3	81,2	15,7	19,2	0	12,4	66,3	57,3	21,6	40	463,1
2009	11,8	50,8	49,2	63,2	54,3	38,9	6,3	7,2	32,1	28,2	2,7	11,5	356,2
2010	6	41,3	53,6	89	29,7	42,5	4	39,6	4,7	18,2	16,1	11,5	356,2
2011	2,9	9,2	25	35,1	2,1	3,5	N.M	N.M	16,5	55,3	11	10,1	170,7

**Tableau.A1.1. Précipitations mensuelles
(de la station de Ain Azel, Période 1984-2011).**

Années	Paramètres	jan	fév.	mar.	avar	mai	jun	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.
2000	P. totale mensuelle (mm)	5,9	5,7	21,5	28,8	61,9	20,3	0,0	23,9	39,4	47,3	15,2	61,3
	T. minimale moyenne (°C)	-0,2	3,1	5,7	8,1	14,3	16,6	20,7	20,3	16,4	9,7	6,3	4,2
	T. maximale moyenne (°C)	9,1	13,6	16,5	19,5	26,2	28,8	33,9	32,8	27,7	18,6	15,2	12,6
	V. Maximale du vent (m/s)	11	18	16	22	15	15	17	28	20	16	19	26
2001	P. totale mensuelle (mm)	79,0	20,1	8,6	13,2	19,3	0,0	0,0	4,0	47,2	14,4	37,1	8,4
	T. minimale moyenne (°C)	2,7	1,9	8,3	7,0	11,4	17,5	21,0	20,8	15,8	14,8	5,8	1,7
	T. maximale moyenne (°C)	10,3	11,1	18,9	17,8	22,6	30,9	34,6	33,3	27,1	26,1	13,8	10,2
	V. Maximale du vent (m/s)	21	21	27	20	18	19	21	20	29	22	18	16
2002	P. totale mensuelle (mm)	22,7	24,0	29,5	7,0	5,5	0,8	45,5	29,8	7,8	16,2	118,9	92,4
	T. minimale moyenne (°C)	1,7	3,2	5,6	5,4	9,4	14,8	17,6	17,1	12,5	8,6	5,4	1,8
	T. maximale moyenne (°C)	11,2	14,1	16,3	19,2	25,1	31,9	33,0	31,4	26,9	23,3	14,1	11,6
	V. Maximale du vent (m/s)	17	20	18	23	19	21	28	20	22	18	32	20
2003	P. totale mensuelle (mm)	130,7	28,8	38,2	87,7	37,9	36,5	36,6	28,7	14,1	63,3	13,0	89,8
	T. minimale moyenne (°C)	1,0	-0,6	2,7	6,6	9,5	14,8	19,1	18,0	13,5	11,6	4,7	0,2
	T. maximale moyenne (°C)	8,4	8,6	15,0	18,2	23,8	31,0	35,9	34,0	26,3	21,7	15,3	9,2
	V. Maximale du vent (m/s)	24	24	19	17	25	24	26	22	28	19	15	21
2004	P. totale mensuelle (mm)	47,9	15,4	27,5	66,1	66,0	9,6	0,3	23,9	13,2	28,1	52,7	91,1
	T. minimale moyenne (°C)	-0,3	0,8	3,1	4,1	7,1	12,4	16,3	17,9	12,5	10,2	2,6	1,3
	T. maximale moyenne (°C)	10,5	14,5	15,8	16,0	19,2	28,6	33,7	34,7	28,1	25,0	13,6	9,8
	V. Maximale du vent (m/s)	17	49	18	17	26	16	21	22	18	18	22	24
2005	P. totale mensuelle (mm)	29,4	43,3	12,2	54,4	3,4	28,0	21,9	4,8	30,6	21,2	68,9	57,4
	T. minimale moyenne (°C)	-3,6	-1,9	3,1	5,8	9,5	14,0	18,2	16,0	12,6	9,2	3,4	0,2
	T. maximale moyenne (°C)	8,9	7,5	16,2	18,3	26,8	30,6	35,6	32,3	26,7	22,7	14,9	9,1
	V. Maximale du vent (m/s)	25	23	18	21	17	23	28	22	20	15	18	17
2006	P. totale mensuelle (mm)	55,9	36,8	8,5	39,7	79,4	4,7	14,0	2,8	54,3	0,8	9,5	49,6
	T. minimale moyenne (°C)	-0,7	-0,6	2,7	7,6	12,9	15,7	17,8	16,8	12,8	11,0	4,5	2,1
	T. maximale moyenne (°C)	8,1	9,8	16,6	21,6	26,2	31,0	33,7	32,6	26,8	25,4	17,2	11,0
	V. Maximale du vent (m/s)	18	17	26	21	22	23	23	19	19	14	12	19
2007	P. totale mensuelle (mm)	8,6	28,6	102,0	89,2	27,2	59,5	3,0	2,4	79,3	21,8	17,3	10,5
	T. minimale moyenne (°C)	0,4	2,2	2,1	7,3	8,9	15,0	17,0	18,0	14,0	10,4	2,9	0,1
	T. maximale moyenne (°C)	14,0	13,3	13,1	17,2	23,1	31,3	33,9	33,6	27,9	21,1	14,3	10,4
	V. Maximale du vent (m/s)	17	26	22	16	17	21	16	21	22	18	15	17
2008	P. totale mensuelle (mm)	10,8	21,6	42,9	21,8	72,7	29,0	40,1	19,1	44,9	55,4	23,0	38,1
	T. minimale moyenne (°C)	0,0	0,6	2,2	5,0	10,7	13,8	18,7	17,9	14,6	9,8	3,5	0,5
	T. maximale moyenne (°C)	12,9	13,8	14,6	19,8	23,7	28,6	34,9	34,4	27,4	20,6	12,9	9,3
	V. Maximale du vent (m/s)	17	18	20	21	21	19	30	30	21	15	20	18
2009	P. totale mensuelle (mm)	66,3	38,2	31,5	79,1	4,9	4,7	3,0	29,7	63,8	9,0	28,1	26,1
	T. minimale moyenne (°C)	1,0	-0,2	1,8	3,3	9,3	13,6	19,0	17,9	13,4	8,4	4,1	2,6
	T. maximale moyenne (°C)	9,5	9,9	14,4	15,0	25,1	31,2	36,7	34,0	25,5	21,3	17,6	13,2
	V. Maximale du vent (m/s)	24	18	23	16	17	17	21	28	20	18	18	18
2010	P. totale mensuelle (mm)	30,9	38,2	38,3	55,1	73,4	22,6	6,0	35,3	5,0	40,9	43,7	18,0
	T. minimale moyenne (°C)	1,6	1,9	3,9	6,4	6,7	13,0	17,4	17,2	12,9	8,7	4,6	0,4
	T. maximale moyenne (°C)	11,2	12,4	16,2	18,7	20,1	29,3	34,7	33,8	27,3	21,5	14,1	11,7
	V. Maximale du vent (m/s)	21	20	17	19	16	20	22	24	22	21	22	19

Tableau.A1.2. Les données météorologiques
(Précipitation, Température, Vitesse du vent)
station de Sétif, Période 2000-2010

ANNEXE 2 : HYDROGÉOLOGIE

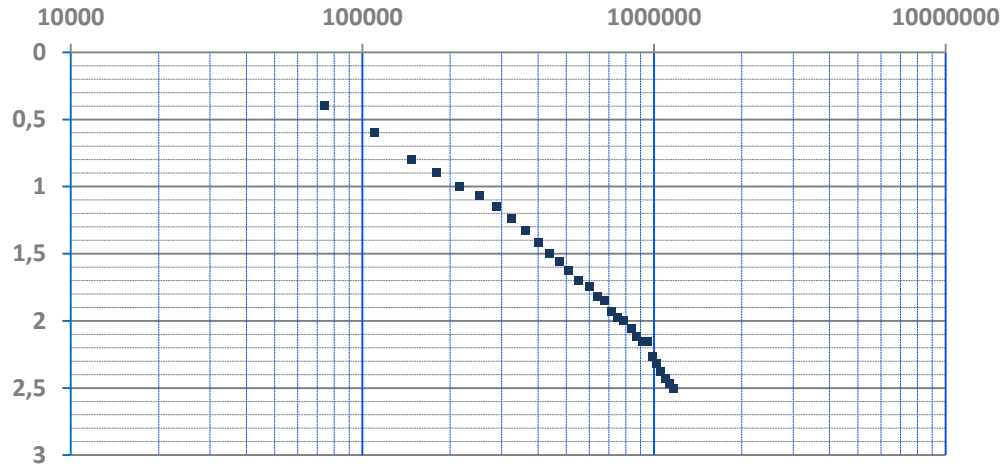


Fig.A2-1 Essai de pompage long duré : Pz1 de la nappe Hauterivienne

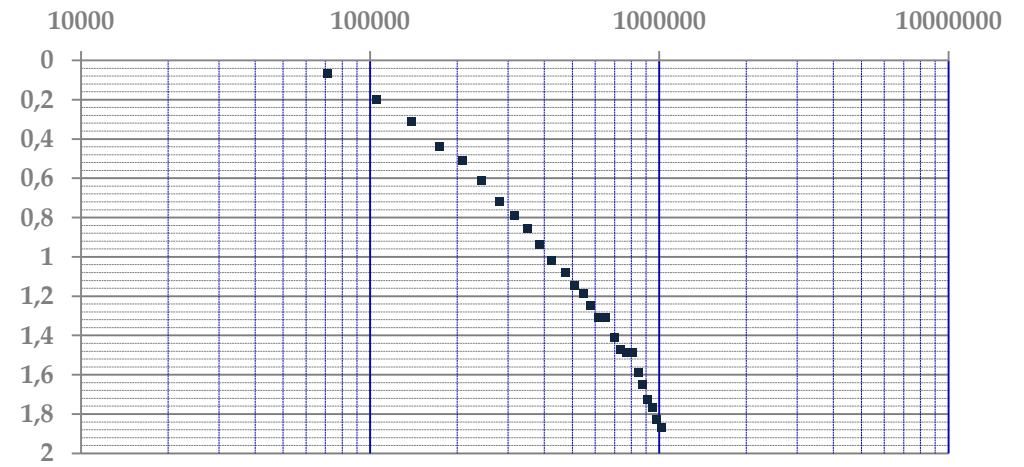


Fig. A2-2. Essai de pompage long duré : CH6 de la nappe Hauterivienne

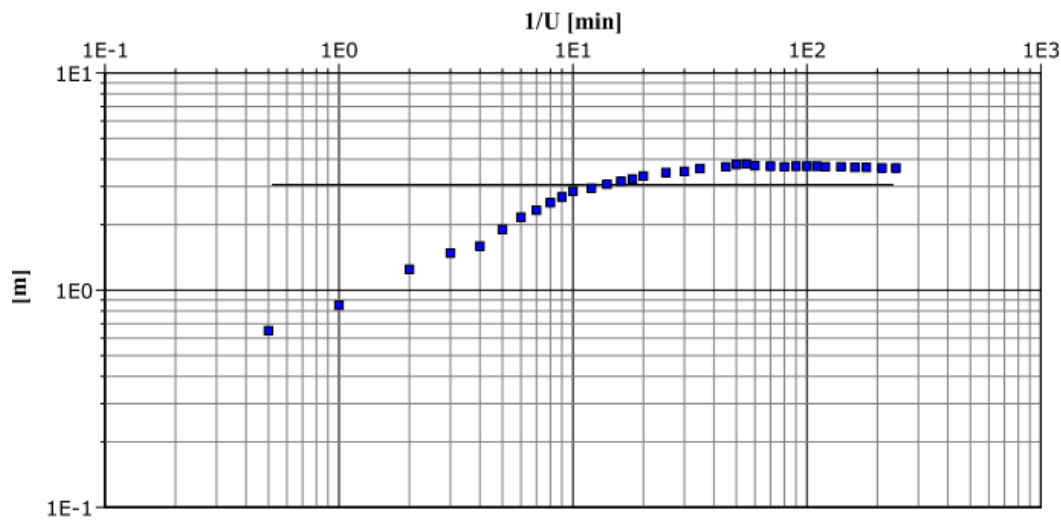


Fig. A2-3. Essai de pompage palier 1: Afounes de la nappe Barrémienne

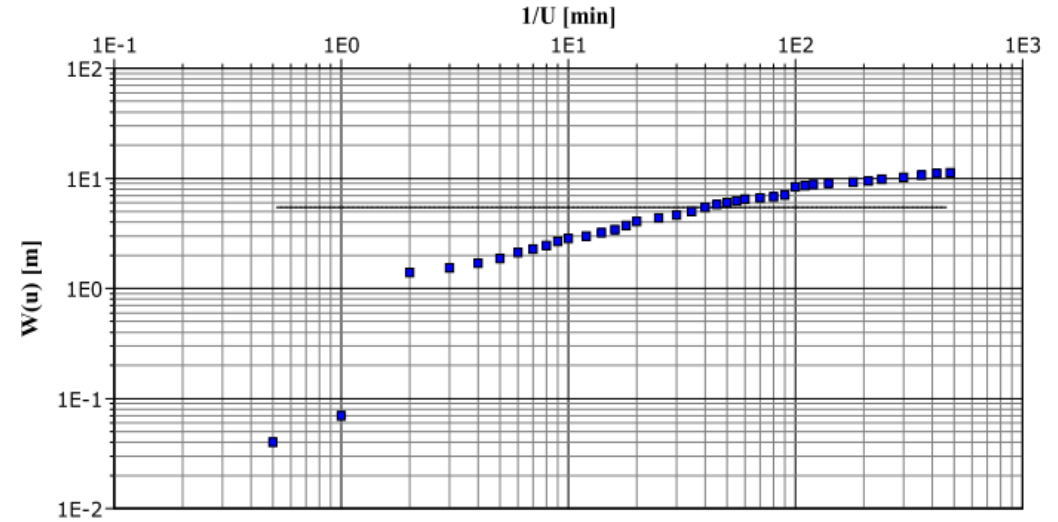


Fig. A2-4. Essai de pompage palier 2: Afounes de la nappe Barrémienne

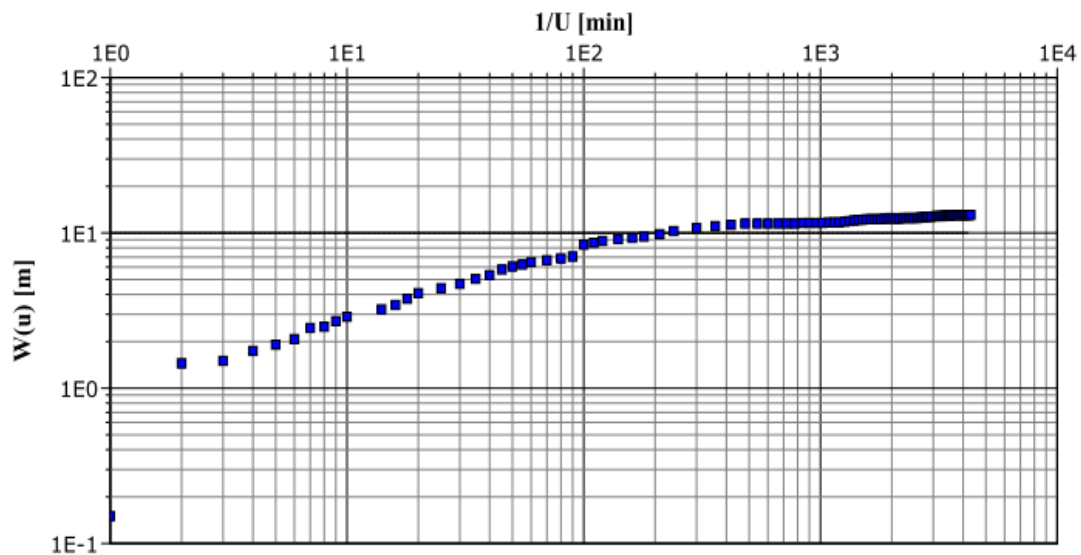


Fig.A2-5. Essai de pompage long duré: Afounes de la nappe Barrémienne

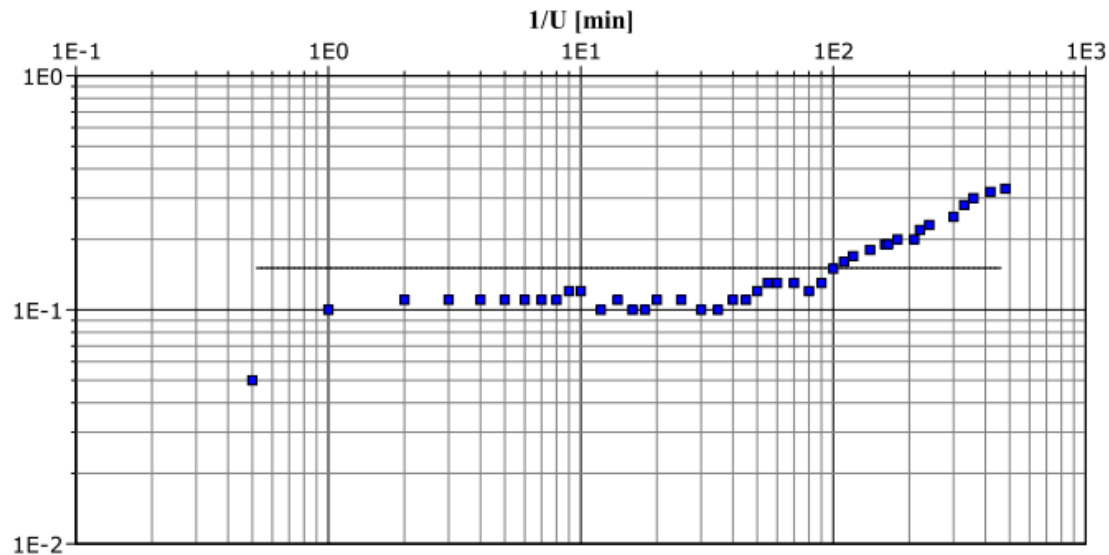


Fig. A2-6. Essai de pompage long duré: P1 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

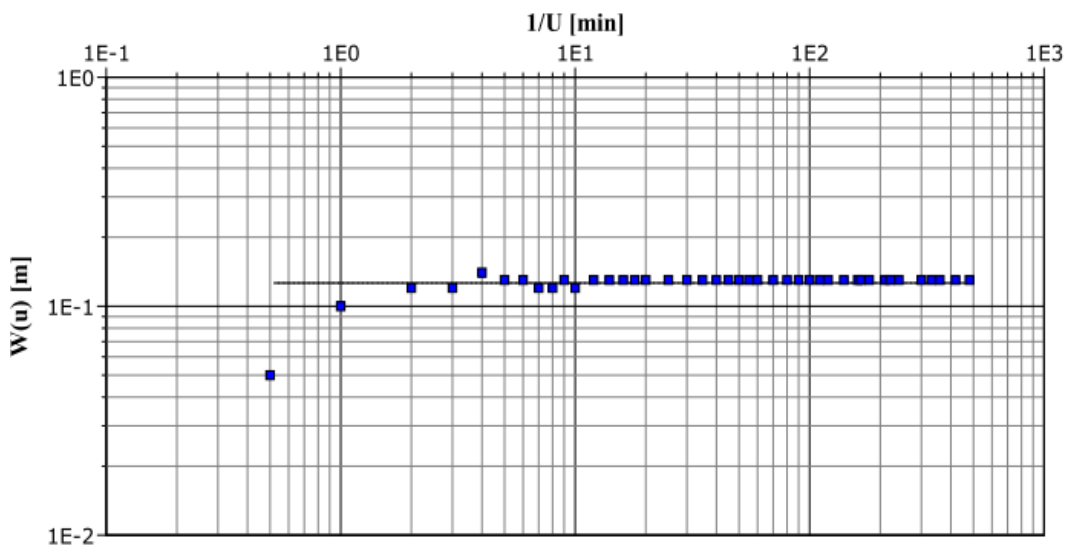


Fig. A2-7. Essai de pompage long duré: P2 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

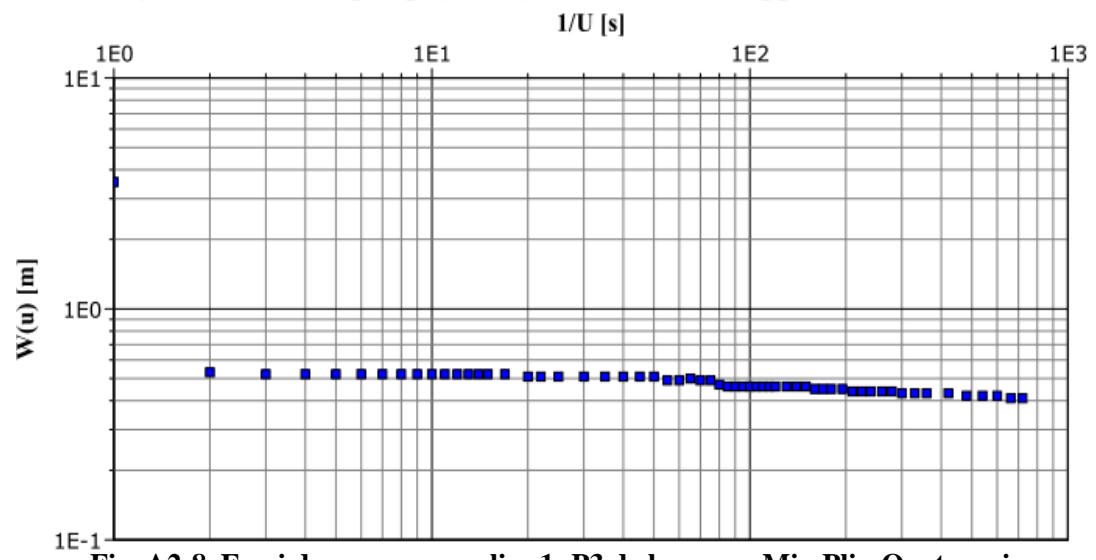


Fig. A2-8. Essai de pompage palier 1: P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

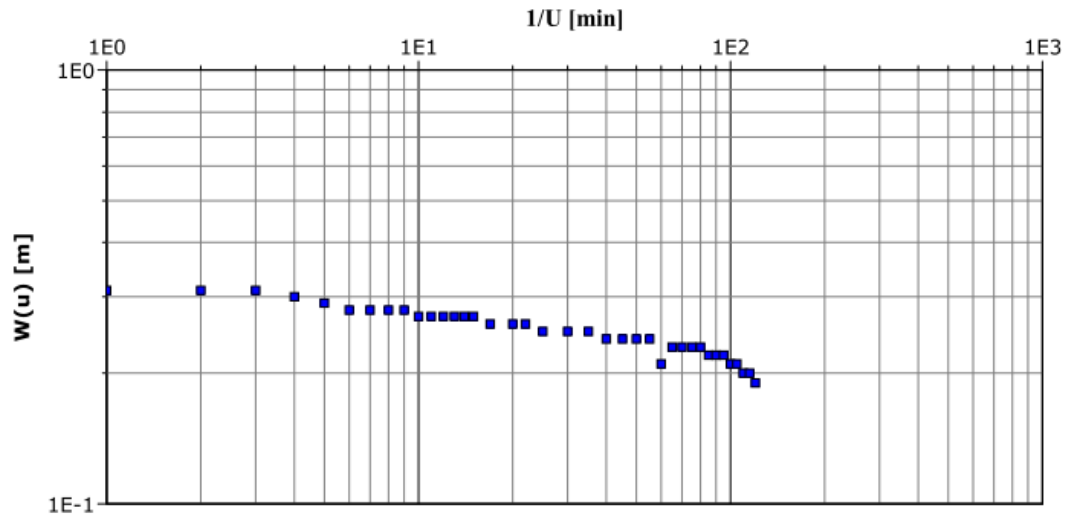


Fig. A2-9. Essai de pompage palier 2: P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

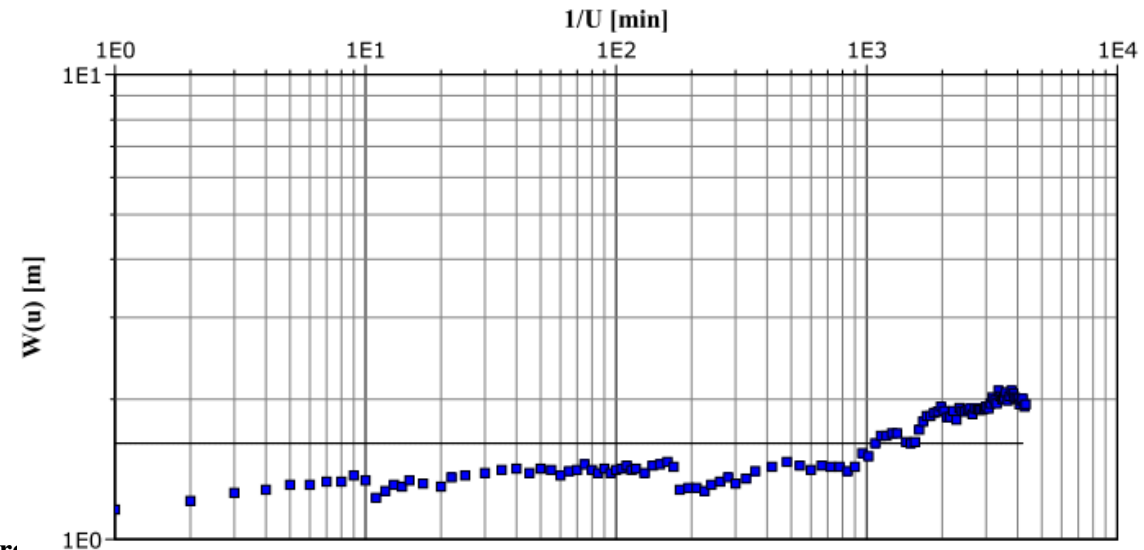


Fig. A2-10. Essai de pompage long duré : P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

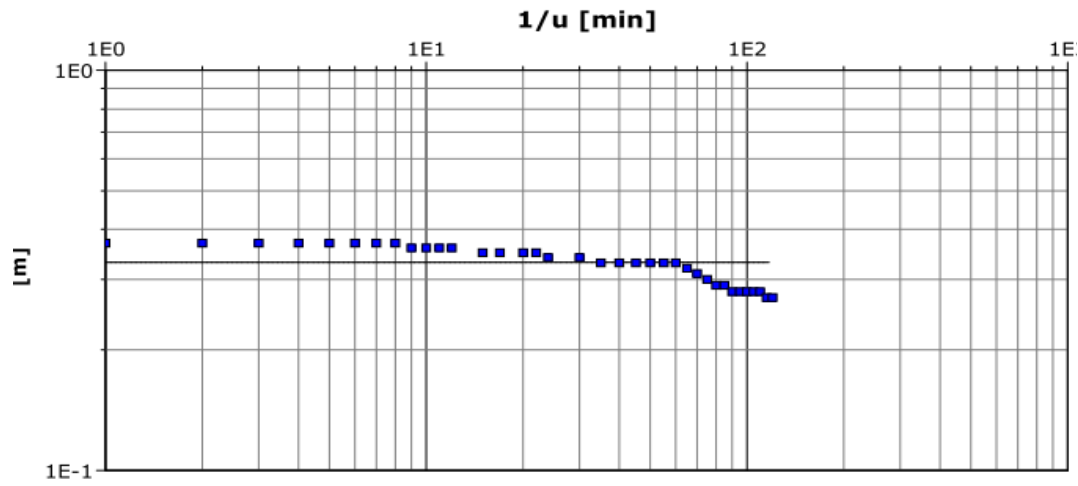


Fig. A2-11. Essai de pompage palier 1: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

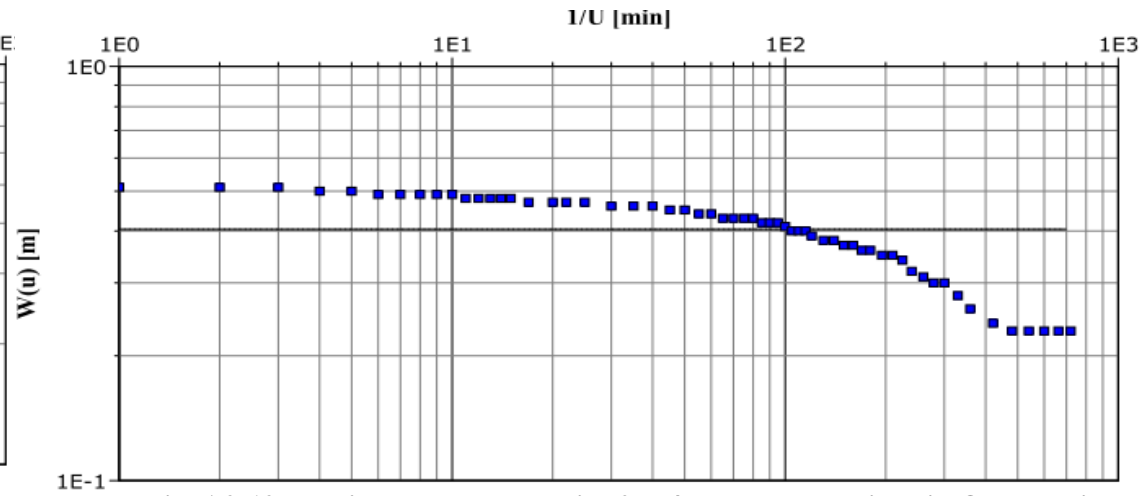


Fig. A2-12. Essai de pompage palier 2: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

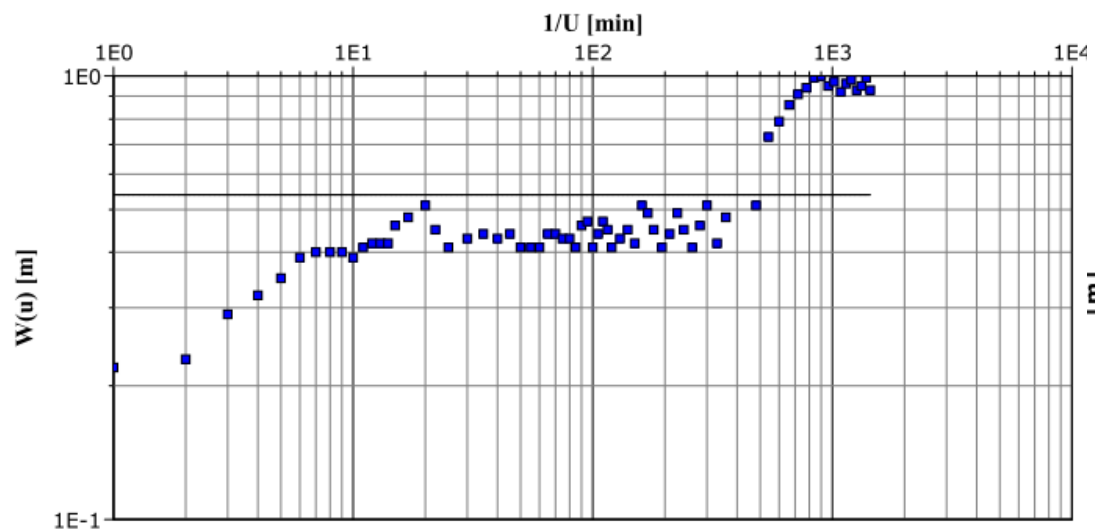


Fig. A2-13. Essai de pompage long duré: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

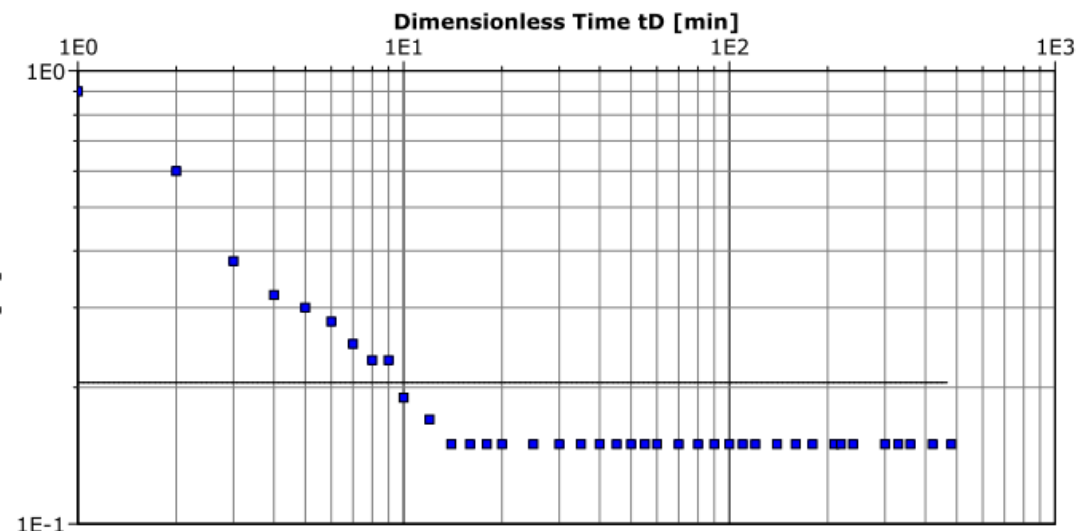


Fig. A2-14. Essai de pompage palier 1: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

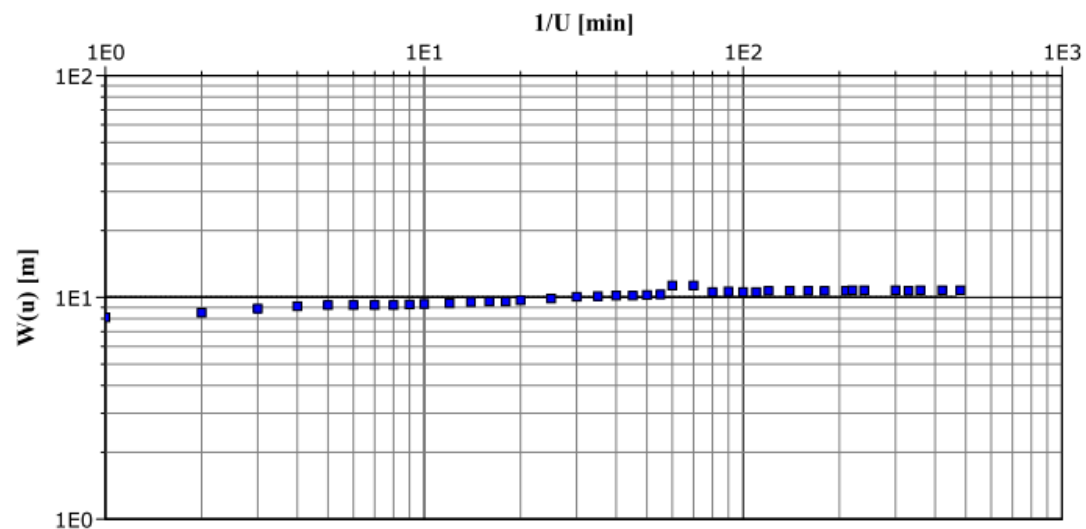


Fig. A2-15. Essai de pompage palier 2: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

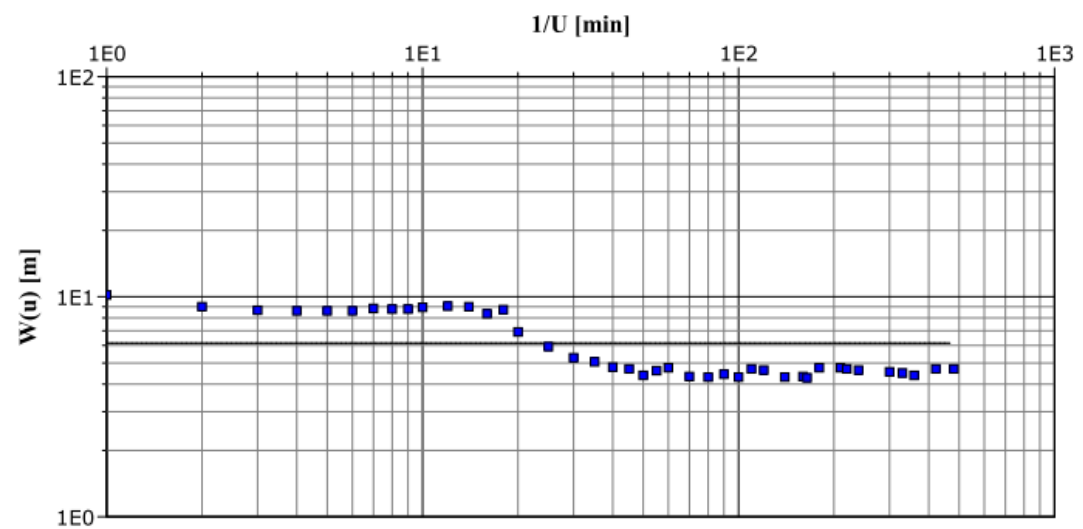


Fig. A2-16. Essai de pompage palier 1: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

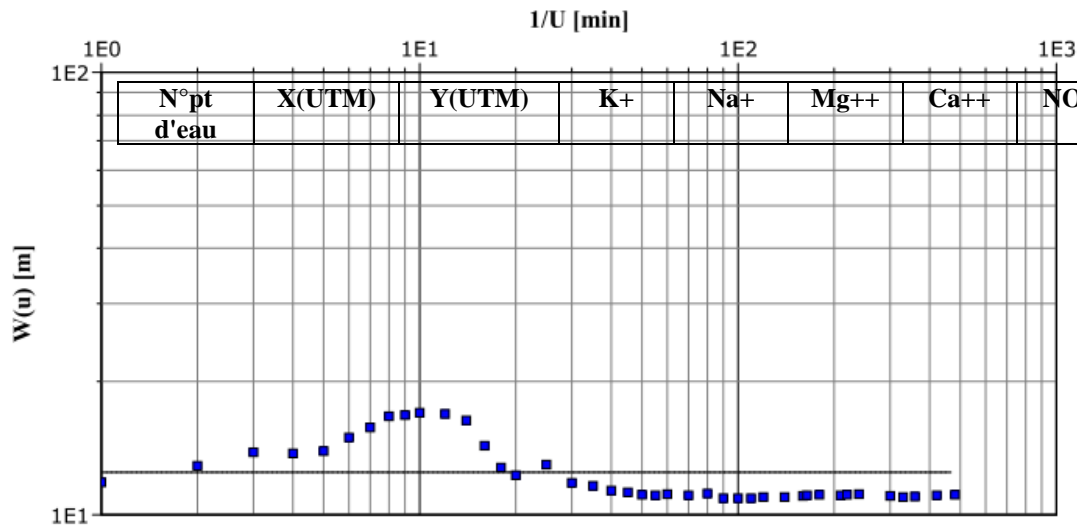


Fig. A2-17. Essai de pompage palier 2: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

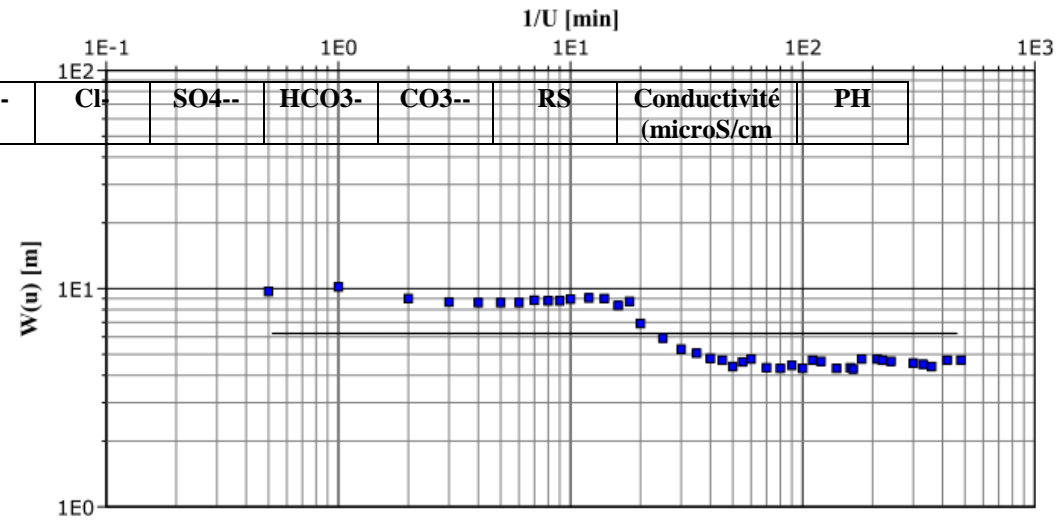


Fig. A2-18. Essai de pompage long duré : P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

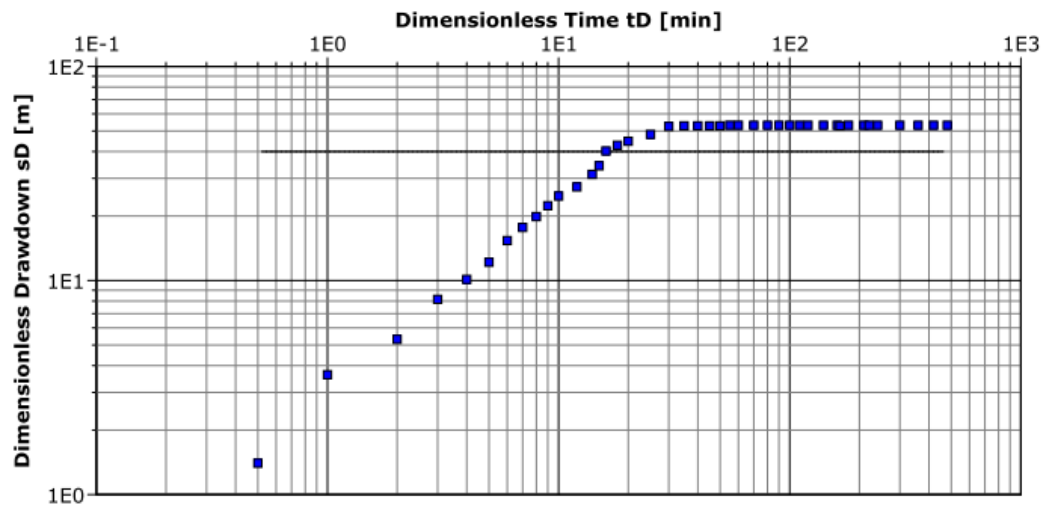


Fig. A2-19. Essai de pompage palier 3: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

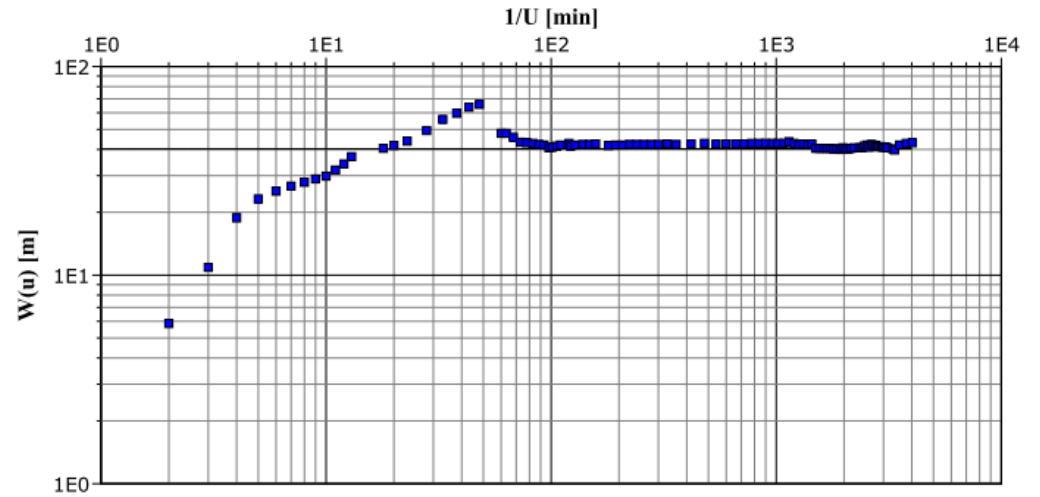


Fig. A2-20. Essai de pompage long duré: P9 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

Tableau A3.1. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Mio-Plio-Quaternaire

1	727576,63	3970670,69	2	32	48	56	45	55	80	281	/	506	800	7,66
2	727614,21	3971164,88	35	71	86	100	38	200	242	317	/	/	1500	7,07
3	727584,64	3969406,89	3	22	48	47	30	65	114	183	/	466	700	8,09
4	727659,69	3969408,65	1	52	26	52	53	85	58	195	/	500	700	7,4
5	727165,21	3967144,83	2	68	44	110	85	140	154	238	/	826	1200	7,9
6	727170,66	3967915,28	4	305	23	250	24	475	274	287	/	1534	2400	7,63
7	726459,37	3969223,34	3	51	60	76	23	90	230	281	/	698	1100	8,06
8	726919,19	3967499,83	2	30	58	60	5	105	104	262	/	588	900	7,59
9	723451,44	3966031,97	2	18	48	60	36	50	80	244	/	464	700	7,5
10	723440,66	3965476,67	2	28	60	72	41	70	128	234	/	598	900	7,67
11	725264,74	3973694,82	31	270	89	375	13	470	660	671	/	2290	3500	7,63
12	724832,12	3972943,72	2	106	44	78	33	185	180	177	/	774	1100	7,9
13	724947,46	3972392,03	2	100	60	144	16	215	374	281	/	1080	1600	7,73
14	725473,81	3972405,38	3	182	102	94	10	310	454	183	/	1300	2000	7,85
15	725982,29	3972140,62	2	86	48	128	30	125	292	317	/	940	1400	8,06
16	725450,61	3972343,42	3	134	30	225	18	290	400	207	/	1280	2000	7,7
17	724966,93	3970634,91	2	48	48	96	31	100	172	268	/	710	1000	7,94
18	726162,58	3969031,16	19	62	85	42	31	130	226	281	/		1200	7,73
19	725386,45	3965988,79	1	17	52	62	41	40	80	293	/	524	800	7,8
20	725830,45	3964335,37	1	13	35	22	3	25	64	73	30	256	400	9,63

21	725461,89	3965798,43	2	18	40	50	39	35	80	146	/	386	600	8,2
22	727153,29	3963721,78	2	21	16	34	1	40	82	85	28	266	400	9,39
23	727291,01	3965174,22	12	34	30	82	61	55	122	244	3		800	8,53
24	727762,13	3965432,88	1	49	97	86	66	160	300	140	/	930	1500	7,76
25	721447,88	3967801,37	6	95	86	168	9	150	500	305	/	1260	1800	7,67
26	728530,15	3968752,49	3	24	41	100	58	85	76	238	/	600	900	7,79
27	729128,38	3968076,17	2	71	41	84	51	110	112	311	/	720	1100	7,41
28	729727,75	3968074,27	2	64	38	116	40	120	120	299	/	720	1200	7,61
29	731851,64	3967616,24	1	140	43	48	7	210	148	226	/	756	1100	7,7
30	731724,51	3967602,63	2	45	38	120	110	100	160	220	/	720	1100	7,92
31	730310,67	3971728,73	6	170	92	330	3	425	750	274	/	1960	3100	7,09
32	735456,15	3972728,16	29	210	36	140	20	370	276	256	/	1320	2100	7,69
33	730796,07	3974300,83	3	67	61	98	25	170	146	336	/	786	1200	7,67
34	731580,76	3974999,81	3	77	50	168	41	215	278	244	/	1040	1600	7,64
35	732767,56	3975647,51	4	184	56	126	40	285	326	244	/	1214	1900	7,67
36	735847,51	3973077,16	6	200	67	136	10	340	358	287	/	1364	2100	7,14
37	735237,02	3975281,54	6	724	84	460	21	1125	998	329	/	3664	5800	7,13
38	735473,74	3976737,76	6	425	14	280	22	645	500	244	/	2100	3300	7,25
39	735964,36	3977151,50	6	500	182	220	19	1170	580	110	/	2880	4600	8,01
40	735724,03	3975819,37	2	280	34	320	23	590	500	244	/	1956	3100	7,48

41	735372,87	3974884,85	74	580	36	332	7	890	860	207	/	2888	4500	8,18
42	735888,69	3972492,64	3	122	83	98	24	260	210	299	/	1066	1600	7,79
43	735972,69	3972156,15	6	205	58	176	41	375	374	232	/	1400	2200	8,25
44	735549,08	3972051,42	3	120	74	112	41	230	266	281	/	1088	1700	7,5
45	737798,83	3971494,95	10	106	55	84	51	210	164	234	/	880	1400	7,61
46	737012,26	3969901,37	4	51	70	84	38	170	180	207	/	766	1100	7,36
47	736881,77	3971038,54	2	114	72	92	47	270	210	214	/	974	1500	7,17
48	735887,85	3970642,42	12	148	41	120	47	260	190	268	/	1046	1600	7,54
49	737130,30	3969256,56	2	83	48	88	35	155	162	275	/	800	1200	7,34
50	737341,28	3968892,65	1	152	91	96	83	335	276	183	/	1188	1900	6,97
51	737270,57	3969630,37	2	74	54	82	42	125	192	232	/	774	1200	6,95
52	737470,06	3965966,28	6	70	52	86	62	55	104	281	/	644	900	8,2
53	737394,60	3965835,43	4	152	55	160	30	300	340	214	/	1214	1900	7,97
54	736280,35	3966304,29	3	35	55	72	58	90	100	287	/	634	900	7,59
55	735869,12	3966632,82	2	46	24	100	58	100	124	201	/	566	900	7,83
56	736326,82	3965503,61	3	51	41	88	64	145	112	207	/	666	1000	7,65
57	735308,74	3966001,19	5	280	49	86	25	400	258	262	/	1284	2000	8,12
58	734198,60	3966186,85	2	56	70	80	17	105	210	287	/	798	1200	7,79
59	733995,70	3965317,93	9	37	50	52	40	85	100	244	/	576	900	7,45
60	734250,40	3965171,02	2	28	53	63	29	100	142	220	/	588	900	7,87

61	734065,04	3965095,56	2	18	42	54	37	45	76	244	/	476	700	6,9
62	735564,33	3963941,02	4	70	42	110	29	140	164	323	/	800	1200	7,59
63	734650,89	3965242,79	1	34	73	73	59	100	128	299	/	700	1100	7,69
64	735881,70	3965244,86	1	24	44	58	48	55	80	238	/	500	700	7,55
65	733208,21	3965636,65	3	110	94	120	74	420	204	177	/	1188	1900	7,84
66	733548,78	3967002,45	3	182	104	162	67	545	226	189	/	1550	2500	7,71
67	733034,79	3965540,14	1	212	67	320	37	705	300	207	/	1810	2900	7,64
68	732834,54	3965503,75	2	97	42	98	88	190	146	171	/	792	1200	7,91
69	732719,81	3964982,79	3	24	31	100	27	60	106	244	/	524	800	7,69
70	732435,86	3965369,94	2	28	52	18	24	75	142	305	/	622	900	7,34
71	732116,84	3965114,79	15	22	23	46	15	20	50	189	/	342	500	7,22
72	731933,60	3965387,55	3	40	54	74	36	110	136	329	/	660	1000	7,15
73	732111,43	3965299,93	2	29	48	64	26	70	138	250	/	566	800	7,46
74	732059,59	3965360,13	2	99	110	160	23	300	340	293	/	1286	2000	7,71
75	731483,02	3964358,34	6	294	120	216	14	600	710	177	/	2086	3300	7,7
76	731541,13	3965006,56	5	285	19	196	44	390	426	183	/	1512	2300	7,88
77	730644,38	3710965,79	2	23	42	74	25	55	146	244	/	528	800	7,6
78	732443,08	3965122,76	20	370	62	320	66	625	688	287	/	2312	3600	7,53
79	732129,33	3965578,05	3	146	92	154	75	375	286	256	/	1300	2000	7,73

80	735090,57	3970402,78	2	130	50	92	60	200	230	256	/	910	1400	7,54
81	735902,18	3969162,39	3	134	53	136	45	250	290	268	/	1140	1800	7,1
82	726071,70	3971619,02	5	150	38	192	63	265	400	165	/	1200	1800	7,9
83	605273,50	3702665,02	2	46	41	92	55	95	119	256	/	666	1000	7,92
max			74	724	182	460	110	1170	998	671	30	3664	5800	9,63
min			1	13	14	18	1	20	50	73	3	256	400	6,9
moyenne			5,70	122,53	56,80	125,24	37,93	240,66	251,60	246,27	20,33	1041,08	1589,16	7,70

Tableau A3.2. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau de l'Hauterivien

N°pt d'eau	X(lambert)	Y(Lambert)	K+	Na+	Mg++	Ca++	NO3-	Cl-	SO4- -	HCO3-	RS	CE	pH
CH1	755,042	280,534	0,9	25	35,23	61,43	1	36	69	310	455	756	7,32
CH2	754,884	280,55	0,86	15	36,98	64,23	4	30	56	298,14	435	688	7,32
CH3	754,907	280,643	0,88	17	40,56	70,48	2	38	78	305,58	452	734	7,33
CH4	754,904	280,736	0,91	18	40,67	74,54	1	39	80	317,54	470	755	7,24
CH5	754,703	280,73	0,94	20	42,59	73,21	5	47	90	288,4	544	774	7,25
CH6	754,703	280,73	0,97	19	41,78	72,18	1	37	78	294,59	541	723	7,4
max			0,97	25	42,59	74,54	5	47	90	317,54	544	774	7,4
min			0,86	15	35,23	61,43	1	30	56	288,4	435	688	7,24
moyenne			1	19	40	69	2	38	75	302	483	738	7

Tableau A3.3. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Barrémien

N°pt d'eau	X	Y	K+	Na+	Mg++	Ca++	NO3-	Cl-	SO4- -	HCO3-	RS	CE	pH
CH16	727394,07	3963623,53	3	23	82,13	135,47	4,27	83,66	187,32	222,45	456	833	6,97
CH17	727147,47	3962550,23	2,9	25	280,56	140,28	43,36	134,72	109,89	303,56	400	866	7,1
CH19	727431,73	3964229,83	2,5	28	86,02	141,88	3,25	163	222,8	234,56	398	782,79	6,95
CH20	727257,75	3963539,85	3	27	41,31	68,13	0,08	32,61	199,4	213,67	578	515	7,35
CH21	727133,79	3963474,99	2,5	25	77,76	128,25	0,75	39,7	225,25	266,89	566	626	6,62
CH22	727026,86	3963445,42	3,4	29	35,2	58,2	0,13	39,7	177,13	345,23	423	686	7,88
CH23	727441,15	3964381,18	3,4	24	43,74	72,14	0,04	153,15	198,45	296,12	511	625	7,31
mine KHY	748,632	284,964	1,18	11,69	68,76	205,49	15	145	484	311,1	1264	1920	7,72
Afounes	77983	281,955	3,6	25	248,49	124,24	1,94	73,74	52,78	393,56	600	855	7,75
max			3,6	29	280,56	205,49	43,36	163	484	393,56	1264	1920	7,88
min			1,18	11,69	35,2	58,2	0,04	32,61	52,78	213,67	398	515	6,62
moyenne			3	24	107	119	8	96	206	287	577	857	7

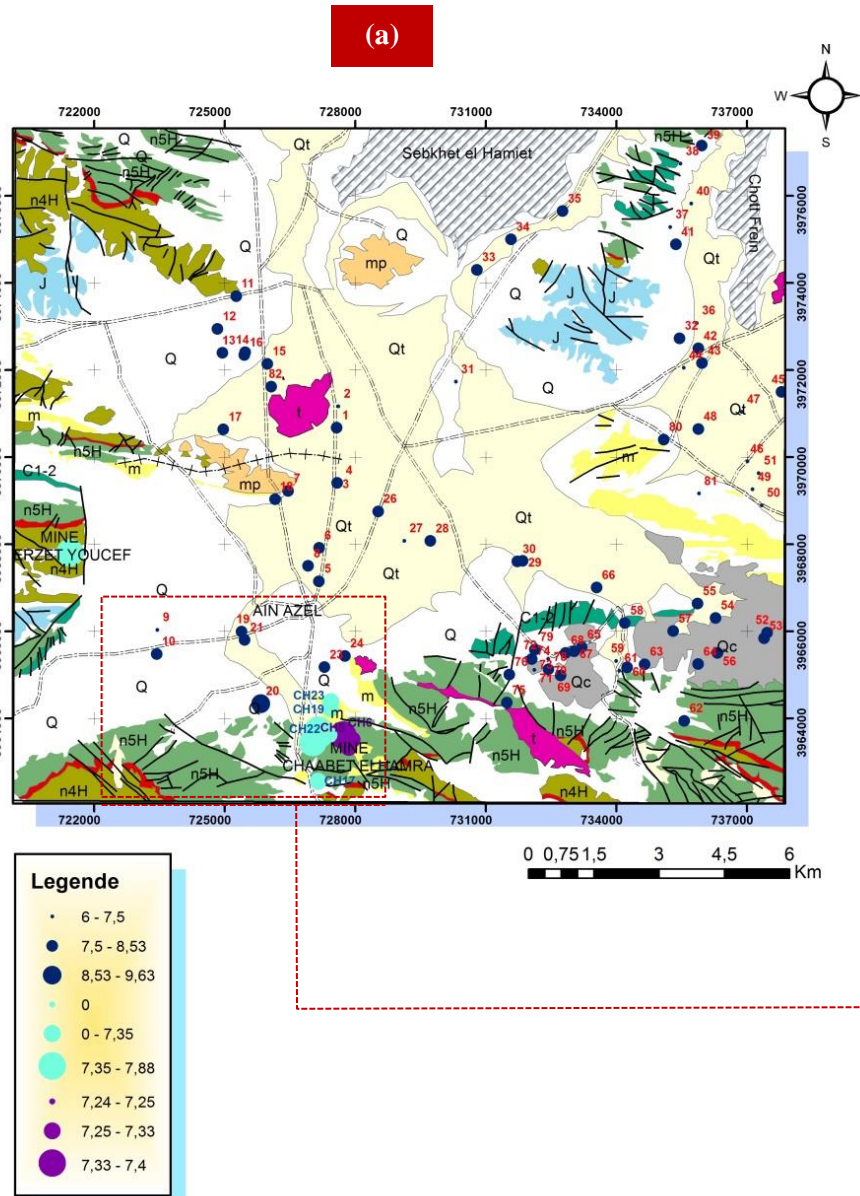
Tableau A3.5. Les indices d'irrigation calculés, la balance ionique vérifiée et les paramètres de Gibbs dans la zone d'étude.

Aquifère	Indice calculé	IB (%)	Gibbs		TH	SAR	RSC	Na%	PI	KR	MAR	MH
	Point d'eau		Na/ (Na+Ca)	Cl/(Cl+HCO3)								
Aquifère Hauterivien	CH1	3,295	0,28	0,18	615,94	2,05	-1,06	13,05	20,29	0,15	36,33	48,48
	CH2	4,543	0,18	0,17	645,28	1,17	-1,56	7,91	15,07	0,08	36,20	48,34
	CH3	6,145	0,18	0,18	720,97	1,24	-2,11	7,87	14,41	0,08	36,17	48,30
	CH4	5,437	0,18	0,18	735,27	1,23	-2,06	7,70	14,25	0,08	35,56	47,65
	CH5	7,649	0,18	0,23	757,62	1,28	-2,78	7,88	13,92	0,08	36,52	48,68
	CH6	5,763	0,19	0,18	711,47	1,32	-2,02	8,37	15,00	0,09	37,15	49,36
Aquifère Mio-Plio-Quaternaire	1	2,942	0,33	0,25	673,60	2,22	-2,14	14,05	20,15	0,15	46,15	58,57
	2	6,900	0,38	0,52	1205,20	3,68	-6,87	22,18	18,58	0,19	46,24	58,65
	3	5,937	0,29	0,38	628,60	1,60	-3,30	11,63	16,52	0,12	50,53	62,74
	4	-0,249	0,47	0,43	473,20	4,16	-1,54	25,36	31,56	0,33	33,33	45,19
	5	5,609	0,35	0,50	910,80	3,87	-5,21	18,52	22,07	0,22	28,57	39,75
	6	1,979	0,52	0,74	1438,60	13,05	-9,66	36,14	37,65	0,56	8,42	13,17
	7	5,297	0,37	0,36	872,00	3,09	-4,12	16,56	20,79	0,19	44,12	56,56
	8	3,976	0,30	0,41	775,60	1,95	-3,47	11,94	17,23	0,13	49,15	61,45
	9	6,516	0,21	0,26	693,60	1,22	-2,94	8,47	14,25	0,08	44,44	56,88
	10	1,309	0,25	0,34	852,00	1,72	-4,69	10,20	14,73	0,11	45,45	57,88
	11	10,315	0,39	0,55	2604,80	8,86	-15,04	24,49	24,08	0,29	19,18	28,13
	12	7,221	0,54	0,64	750,80	6,79	-4,61	30,68	33,89	0,43	36,07	48,19
	13	5,389	0,38	0,57	1212,00	4,95	-7,52	20,00	22,89	0,25	29,41	40,73
	14	1,742	0,63	0,74	1306,40	9,19	-10,08	32,06	33,89	0,46	52,04	64,15
	15	7,110	0,37	0,40	1033,60	4,58	-5,14	20,00	23,59	0,24	27,27	38,21
	16	9,985	0,34	0,71	1371,00	5,93	-10,30	21,17	22,93	0,26	11,76	18,02
	17	6,716	0,30	0,39	873,60	2,83	-4,35	14,79	19,04	0,17	33,33	45,19
	18	4,875	0,56	0,44	907,00	3,89	-4,48	24,18	23,51	0,24	66,93	76,94
	19	4,561	0,19	0,19	736,40	1,13	-2,57	7,32	13,87	0,07	45,61	58,04
	20	27,146	0,34	0,37	397,00	1,22	-2,78	10,94	16,83	0,11	61,40	72,40

21	1,492	0,24	0,29	578,00	1,34	-3,39	10,00	15,04	0,10	44,44	56,88
22	7,926	0,35	0,45	301,20	2,10	-1,62	18,70	24,57	0,21	32,00	43,69
23	3,334	0,27	0,28	656,00	2,27	-2,56	17,04	18,38	0,15	26,79	37,63
24	1,470	0,33	0,66	1225,40	2,56	-9,98	12,02	14,62	0,13	53,01	65,03
25	8,306	0,17	0,38	836,20	1,43	-4,46	8,74	12,76	0,09	29,08	40,34
26	2,440	0,42	0,38	756,20	4,49	-2,47	22,60	27,44	0,28	32,80	44,59
27	7,129	0,32	0,41	891,60	3,65	-4,01	17,65	21,74	0,21	24,68	35,07
28	3,244	0,72	0,62	592,60	10,38	-2,23	43,65	48,00	0,77	47,25	59,63
29	5,960	0,25	0,44	911,60	2,53	-5,51	12,95	16,48	0,14	24,05	34,31
30	1,919	0,31	0,73	2404,40	5,85	-19,55	17,25	18,29	0,20	21,80	31,49
31	5,256	0,57	0,71	995,20	11,19	-5,75	40,44	38,24	0,60	20,45	29,78
32	2,652	0,37	0,47	990,20	3,76	-4,40	18,04	21,99	0,21	38,36	50,65
33	7,759	0,29	0,60	1250,00	3,69	-8,50	38,63	17,95	0,18	22,94	32,92
35	7,504	0,56	0,67	1229,40	9,93	-7,59	33,66	35,45	0,49	33,00	44,82
36	12,433	0,58	0,85	2988,80	21,95	-24,47	40,15	40,82	0,67	15,44	23,14
37	9,717	0,57	0,82	1514,80	17,53	-11,12	42,30	43,24	0,72	4,76	7,62
38	7,472	0,66	0,95	2592,40	17,63	-24,15	38,63	38,97	0,62	45,27	57,70
39	8,299	0,43	0,81	1878,80	10,52	-14,77	28,48	29,86	0,40	9,60	14,91
40	1,739	0,60	0,88	1955,20	21,38	-16,14	47,05	42,76	0,79	9,78	15,17
41	7,151	0,52	0,60	1170,60	6,41	-6,82	25,67	28,60	0,34	45,86	58,27
42	8,832	0,50	0,74	1355,60	9,48	-9,75	31,08	32,43	0,44	24,79	35,21
43	7,740	0,48	0,59	1166,80	6,22	-7,07	24,85	27,63	0,32	39,78	52,14
44	4,966	0,52	0,61	871,00	6,36	-4,88	29,44	30,79	0,38	39,57	51,92
45	6,922	0,35	0,59	994,00	2,91	-6,56	15,15	18,01	0,17	45,45	57,88
46	4,879	0,52	0,68	1050,40	6,29	-7,01	26,13	28,97	0,35	43,90	56,34
47	5,336	0,52	0,63	936,20	8,25	-4,97	33,20	34,10	0,46	25,47	36,04
48	3,733	0,45	0,49	833,60	5,03	-3,83	23,81	27,89	0,31	35,29	47,35
49	6,290	0,58	0,76	1226,20	7,86	-9,28	29,03	31,41	0,41	48,66	60,99

50	8,221	0,44	0,48	852,80	4,49	-4,73	21,84	25,64	0,27	39,71	52,06
51	1,616	0,42	0,25	856,40	4,21	-3,96	21,59	24,65	0,25	37,68	49,93
52	9,127	0,45	0,71	1251,00	7,33	-9,00	26,62	28,43	0,35	25,58	36,18
53	2,605	0,30	0,35	811,00	2,20	-3,41	13,01	17,79	0,14	43,31	55,75
54	3,858	0,29	0,46	696,80	2,92	-3,67	16,22	20,33	0,19	19,35	28,35
55	1,883	0,34	0,55	776,20	3,18	-4,37	17,31	20,96	0,20	31,78	43,45
56	4,949	0,74	0,72	831,80	17,04	-4,03	51,35	53,37	1,04	36,30	48,44
57	9,416	0,38	0,39	974,00	3,23	-5,05	16,20	20,37	0,19	46,67	59,07
58	2,773	0,38	0,38	670,00	2,59	-2,71	18,40	21,05	0,18	49,02	61,32
59	2,308	0,28	0,44	749,60	1,84	-3,90	11,45	16,35	0,12	45,69	58,11
60	2,384	0,23	0,24	614,40	1,30	-2,15	9,43	15,86	0,09	43,75	56,19
61	2,834	0,36	0,43	894,40	4,01	-3,65	19,58	23,27	0,23	27,63	38,64
62	5,399	0,29	0,37	963,60	1,99	-4,75	10,70	15,69	0,12	50,00	62,25
63	3,561	0,27	0,28	650,80	1,68	-2,61	10,92	17,22	0,12	43,14	55,58
64	1,364	0,44	0,80	1370,80	5,32	-10,82	20,89	22,79	0,26	43,93	56,37
65	5,812	0,49	0,83	1662,80	7,89	-13,54	25,80	27,30	0,34	39,10	51,42
66	6,402	0,37	0,85	2149,40	7,62	-18,09	21,58	22,94	0,27	17,31	25,67
67	6,348	0,46	0,66	834,40	5,80	-5,54	26,12	29,04	0,35	30,00	41,41
68	8,978	0,17	0,30	754,20	1,48	-3,54	9,34	13,71	0,09	23,66	33,83
69	-16,451	0,58	0,30	516,40	2,37	-0,18	17,65	26,74	0,20	74,29	82,65
70	11,084	0,29	0,15	418,60	1,87	-1,09	21,14	20,43	0,16	33,33	45,19
71	-2,666	0,32	0,37	812,80	2,50	-2,74	14,38	19,44	0,16	42,19	54,61
72	3,194	0,28	0,33	713,60	1,94	-3,05	12,16	17,57	0,13	42,86	55,29
73	10,892	0,35	0,64	1702,00	4,26	-12,23	15,76	18,12	0,18	40,74	53,13
74	10,026	0,54	0,85	2064,00	11,34	-17,75	30,86	31,62	0,44	35,71	47,81
75	10,933	0,56	0,79	1135,80	13,74	-8,34	40,28	41,46	0,66	8,84	13,78
76	4,609	0,21	0,28	714,40	1,51	-3,15	9,73	15,03	0,10	36,21	48,35
77	10,378	0,50	0,79	2108,40	13,39	-16,36	33,80	33,53	0,48	16,23	24,21
78	6,650	0,45	0,72	1524,40	6,58	-11,06	23,24	25,27	0,30	37,40	49,63

	79	4,348	0,55	0,57	870,00	7,71	-4,51	31,73	35,10	0,46	35,21	47,26
	80	5,739	0,46	0,62	1114,60	6,89	-6,75	26,60	29,20	0,35	28,04	39,12
	81	1,000	0,41	0,73	1271,60	6,99	-10,00	25,20	26,48	0,33	16,52	24,61
	82	11,084	0,29	0,15	418,60	1,87	-1,09	21,14	20,43	0,16	33,33	45,19
	83	-2,666	0,32	0,37	812,80	2,50	-2,74	14,38	19,44	0,16	42,19	54,61
Aquifère Barrémien	CH16	29,018	0,13	0,39	1350,82	1,10	-9,87	5,64	8,22	0,05	37,74	49,99
	CH17	49,248	0,13	0,43	3001,99	0,86	-25,11	3,21	4,88	0,03	66,67	76,73
	CH19	17,581	0,15	0,54	1414,76	1,31	-10,31	6,27	8,91	0,06	37,74	49,99
	CH20	10,637	0,26	0,21	679,39	1,82	-3,30	12,05	16,72	0,12	37,75	50,00
	CH21	27,951	0,15	0,20	1278,88	1,23	-8,42	6,26	9,40	0,06	37,75	50,00
	CH22	-9,373	0,30	0,17	579,64	2,12	-0,14	14,78	21,71	0,16	37,69	49,93
	CH23	1,400	0,22	0,47	719,37	1,58	-2,34	10,57	15,90	0,10	37,75	50,00
	mine KHY	6,373	0,05	0,45	1591,28	0,50	-10,81	2,29	5,22	0,02	25,07	35,56
	Afounes	5,000	0,15	0,24	2658,82	0,92	-20,20		5,79	0,03	66,67	76,73



Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

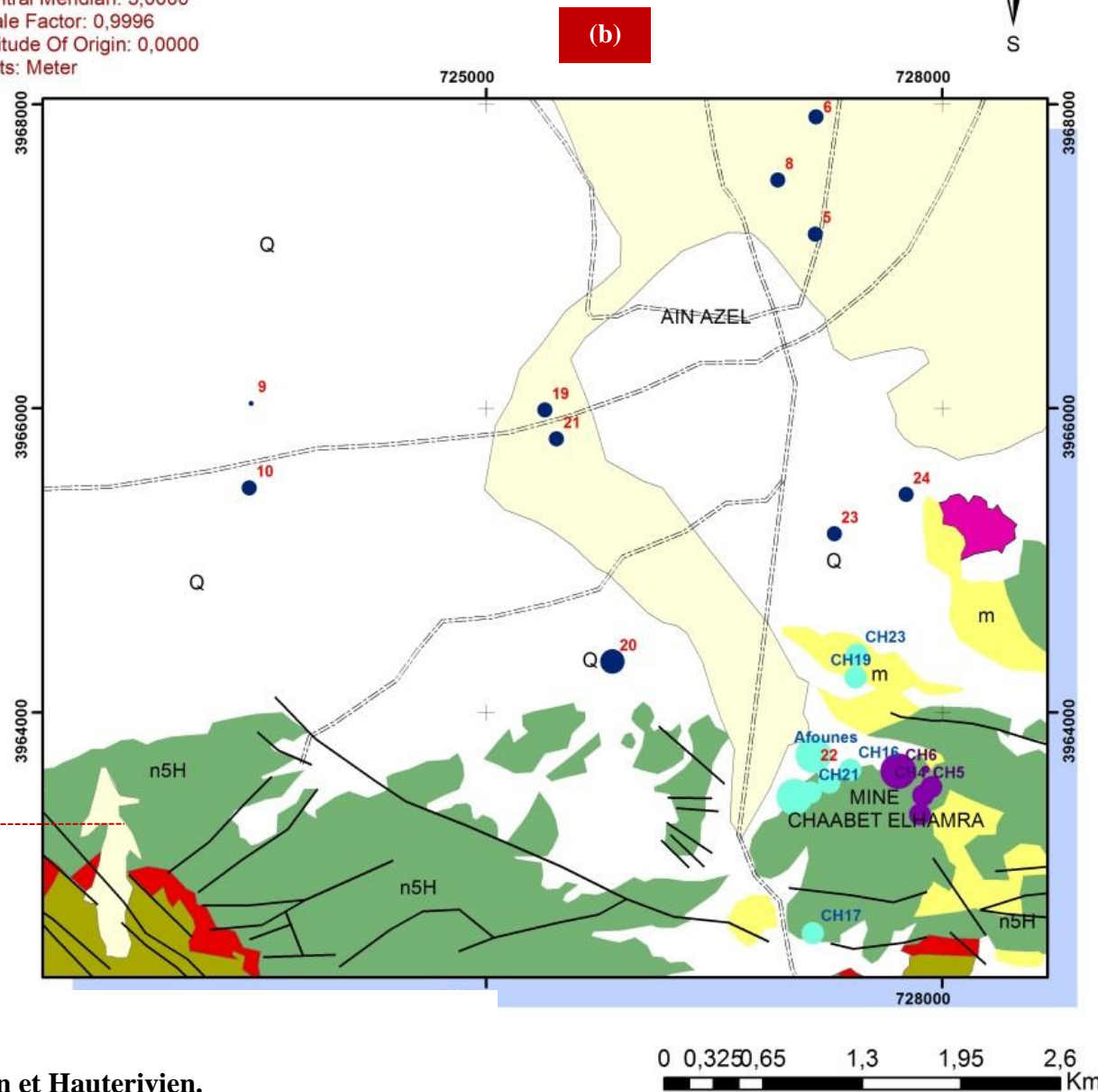
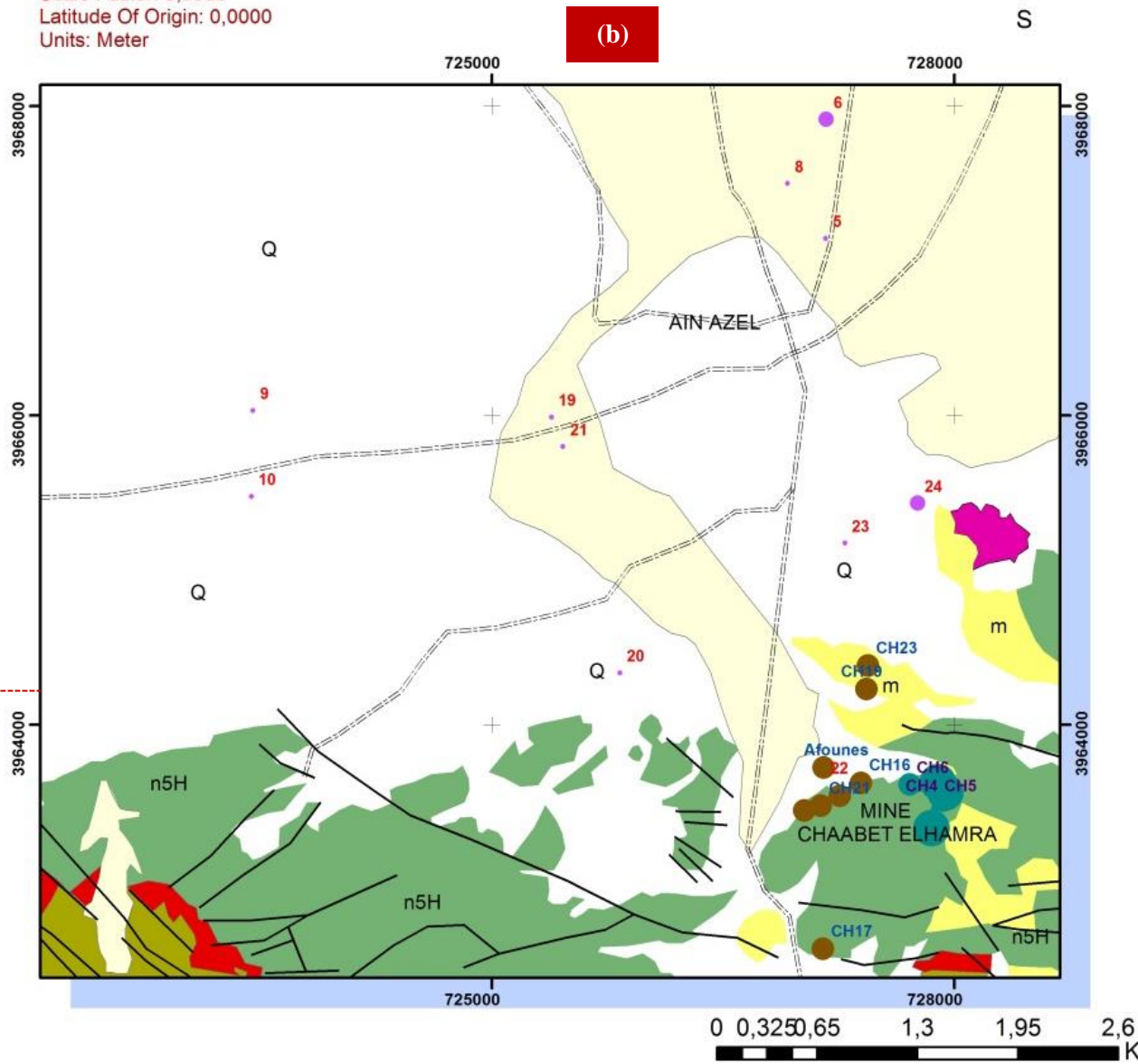
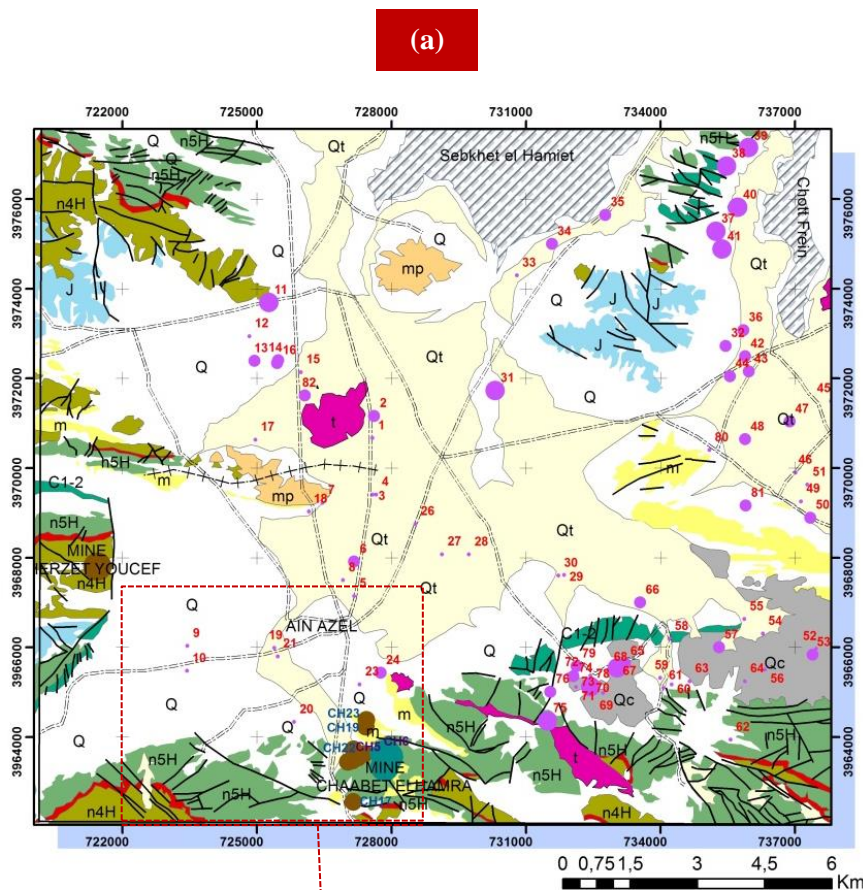
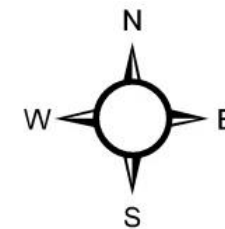


Figure A3.1 Variabilité spatiale du pH

(a) Tous les points prélevés.

(b) Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauteriviens.

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

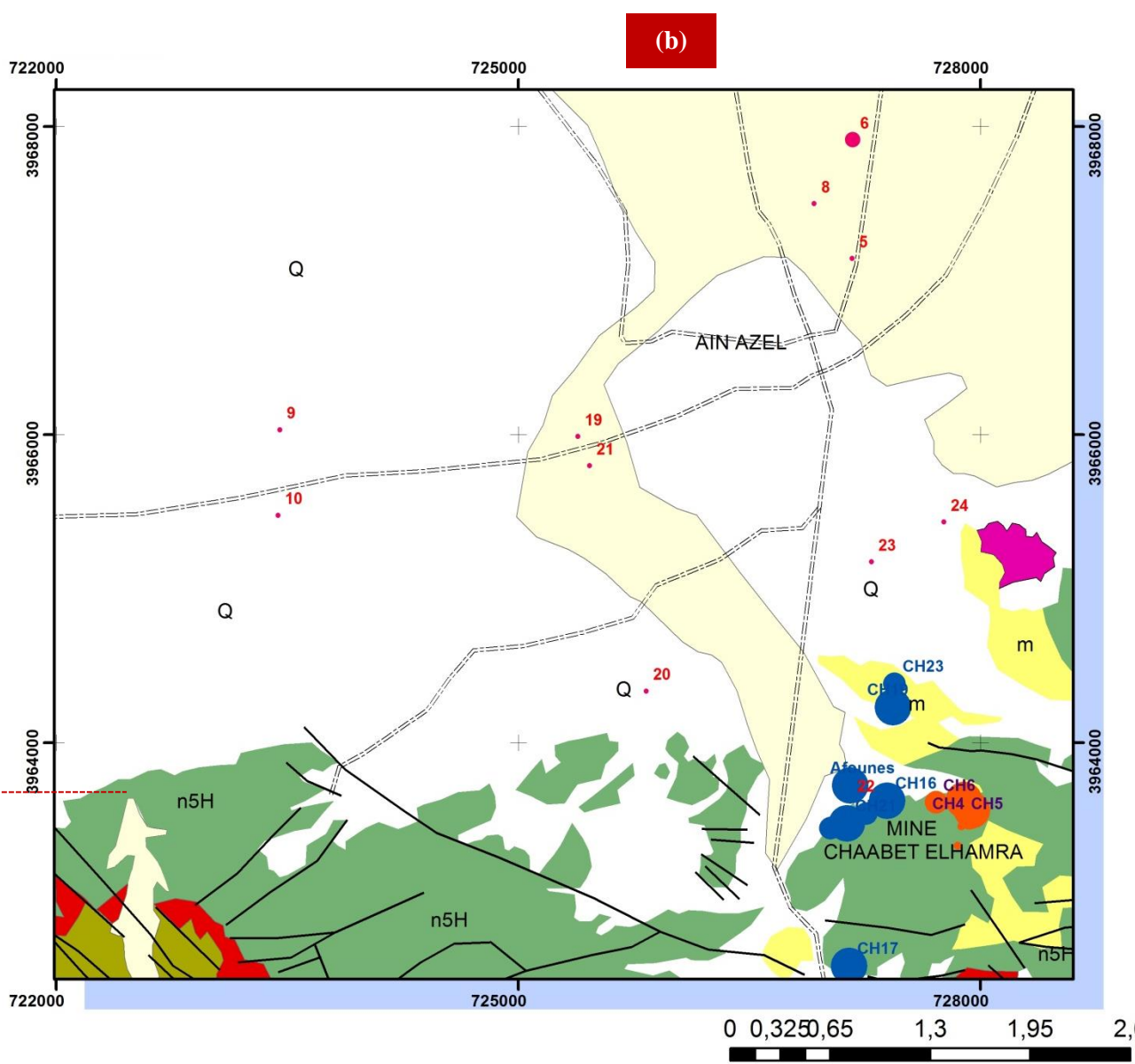
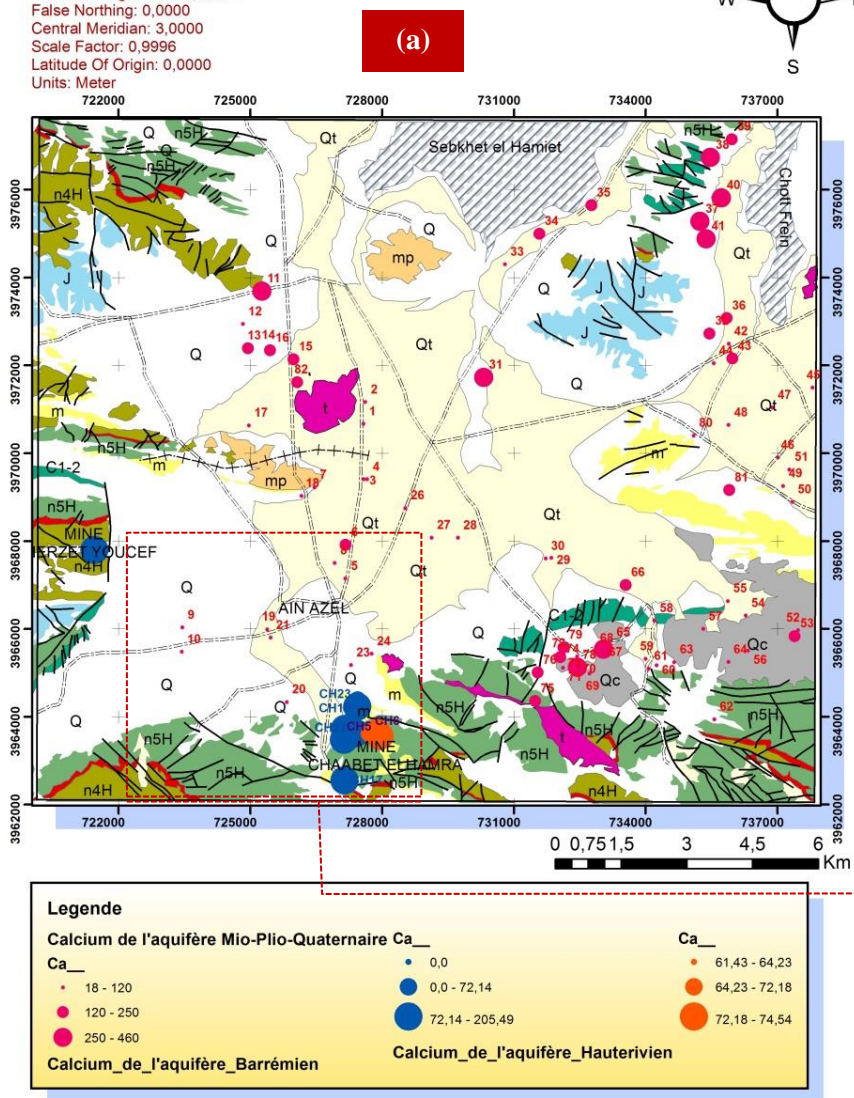
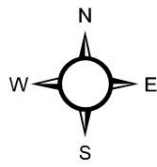


Legende

La Conductivité de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire CE		CE	
Conductivité			
400 - 1400	● 0	● 688	
1400 - 2500	● 0- 866	● 688 - 734	
2500 - 5800	● 866 - 1920	● 734 - 774	
Conductivité_de_l'aquifère_Barrémien		Conductivité_de_l'aquifère_Hauterivien	

Figure A3.2 Variabilité spatiale du CE
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Legende

Calcium de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire Ca ₁		Ca ₂	
• 18 - 120	• 0,0	• 61,43 - 64,23	
• 120 - 250	• 0,0 - 72,14	• 64,23 - 72,18	
• 250 - 460	• 72,14 - 205,49	• 72,18 - 74,54	
Calcium_de_l'aquifère_Barrémien	Calcium_de_l'aquifère_Hauterivien		

Figure A3.3 Variabilité spatiale du Calcium
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

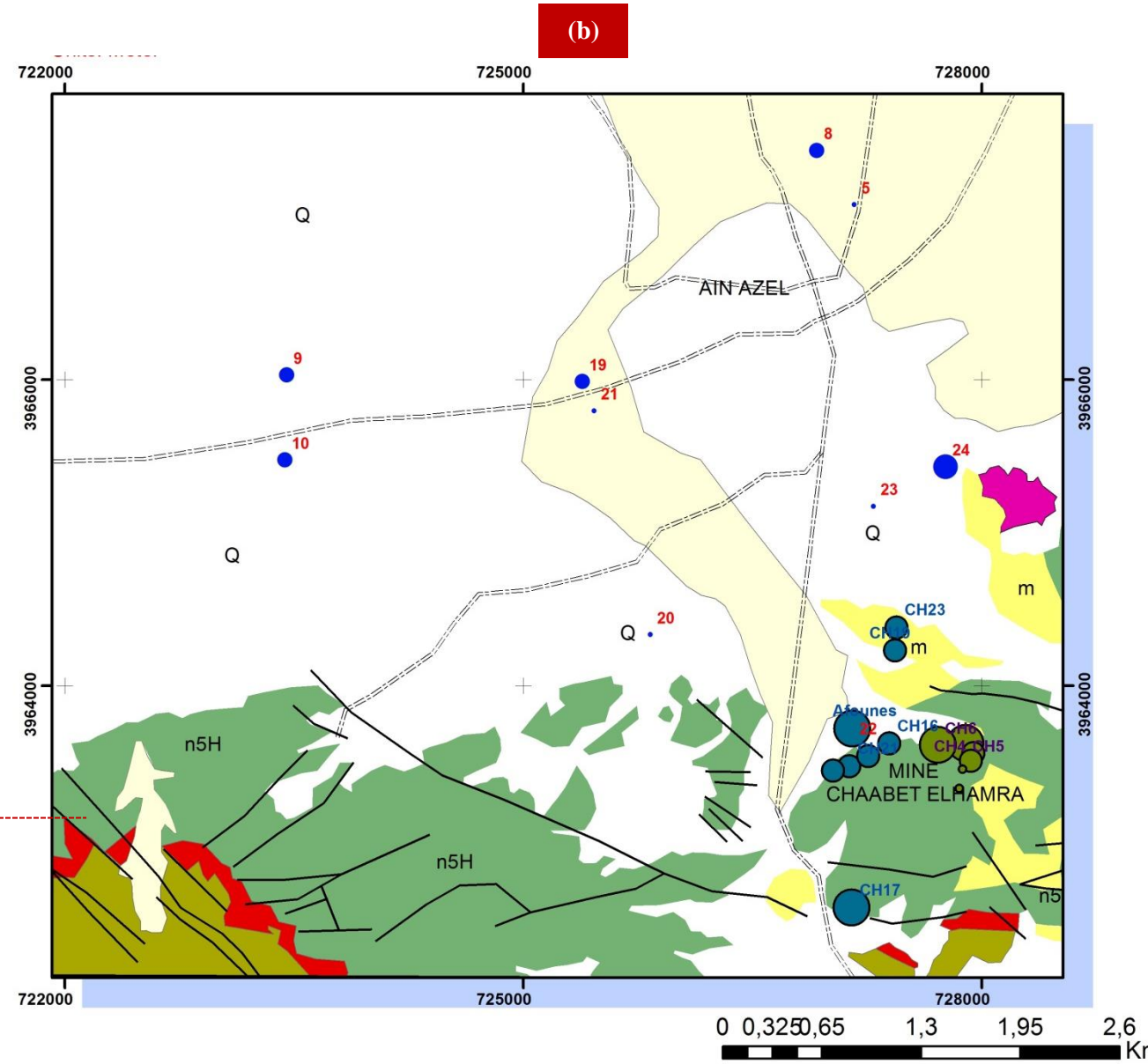
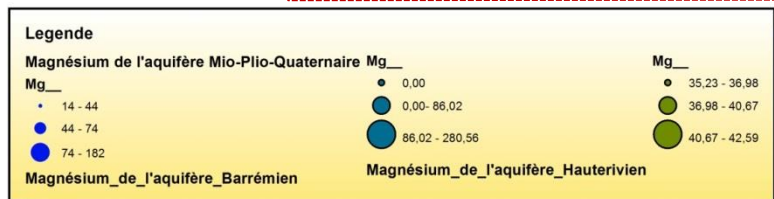
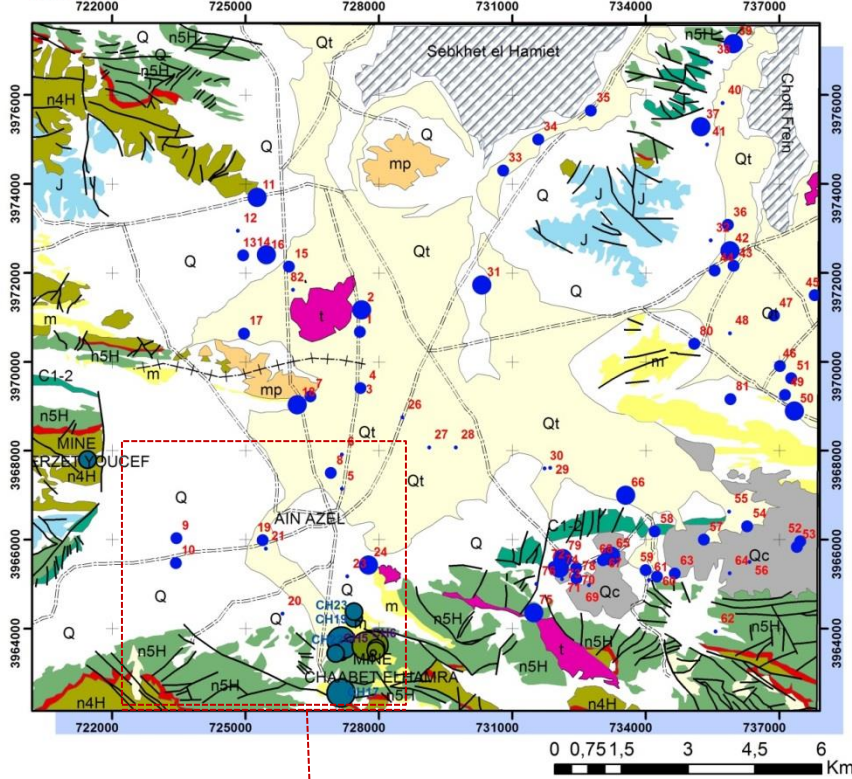
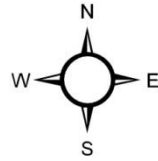
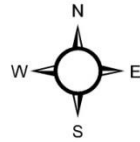
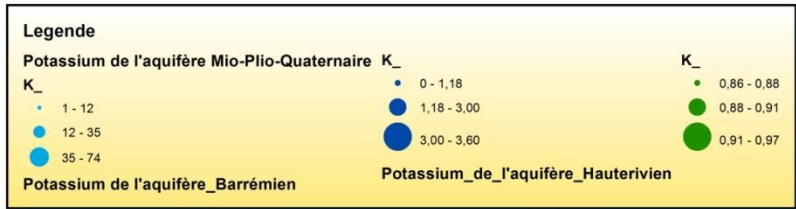
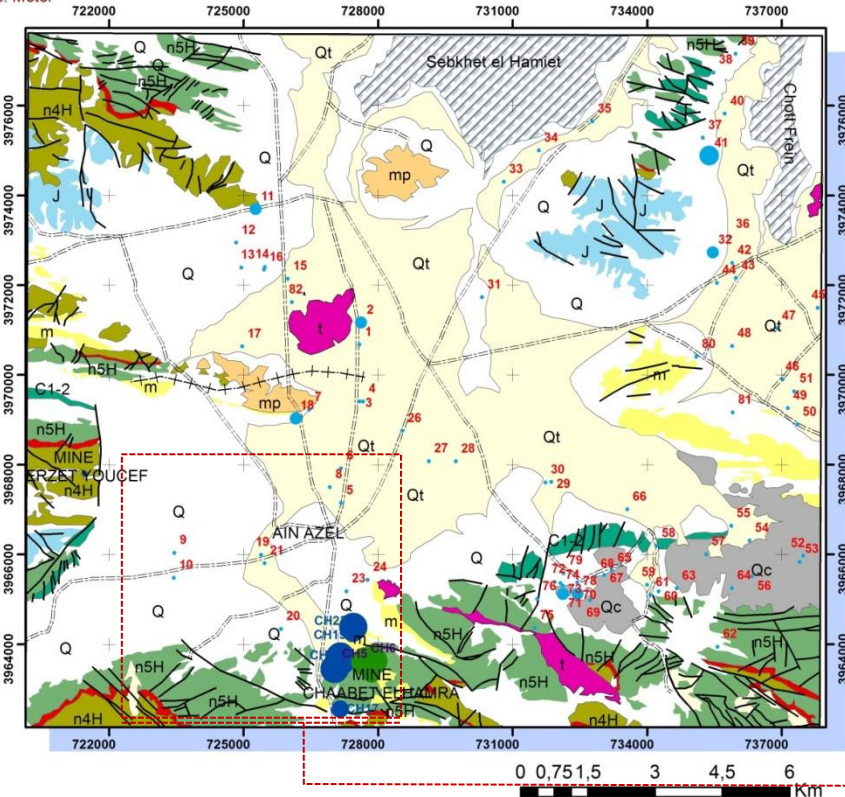


Figure A3.4 Variabilité spatiale du Magnésium
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



(a)



(b)

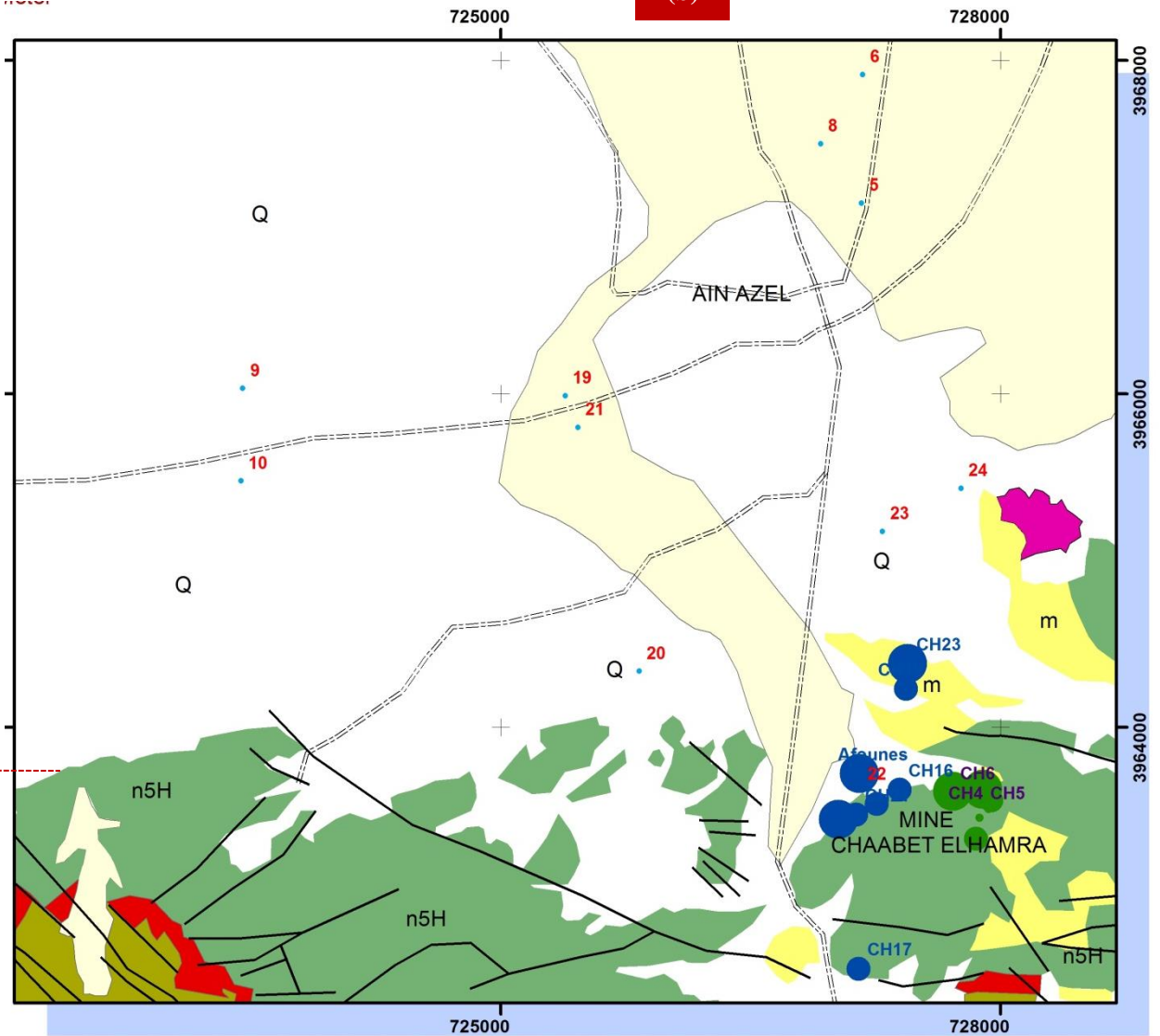


Figure A3.6 Variabilité spatiale du Potassium
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

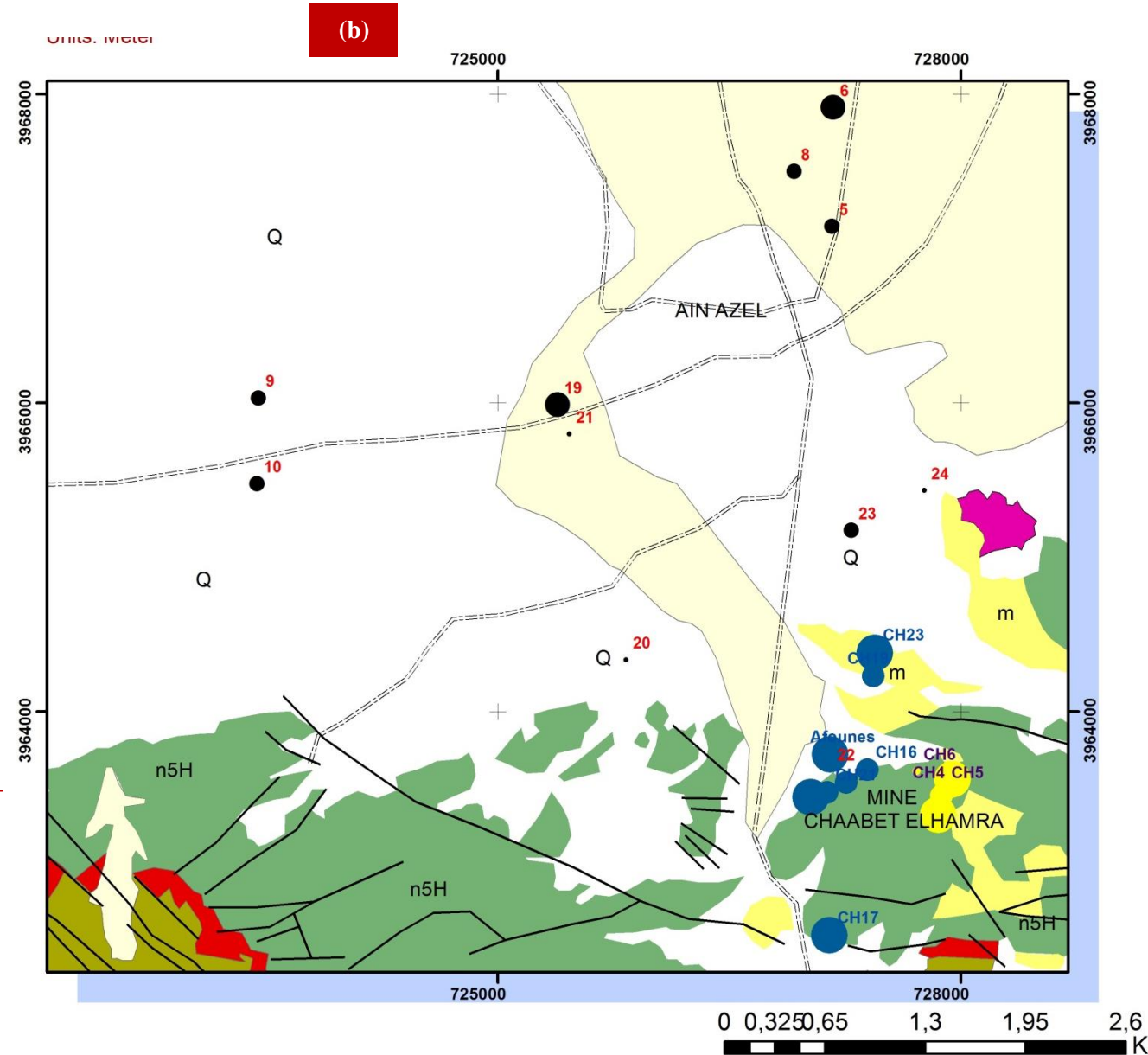
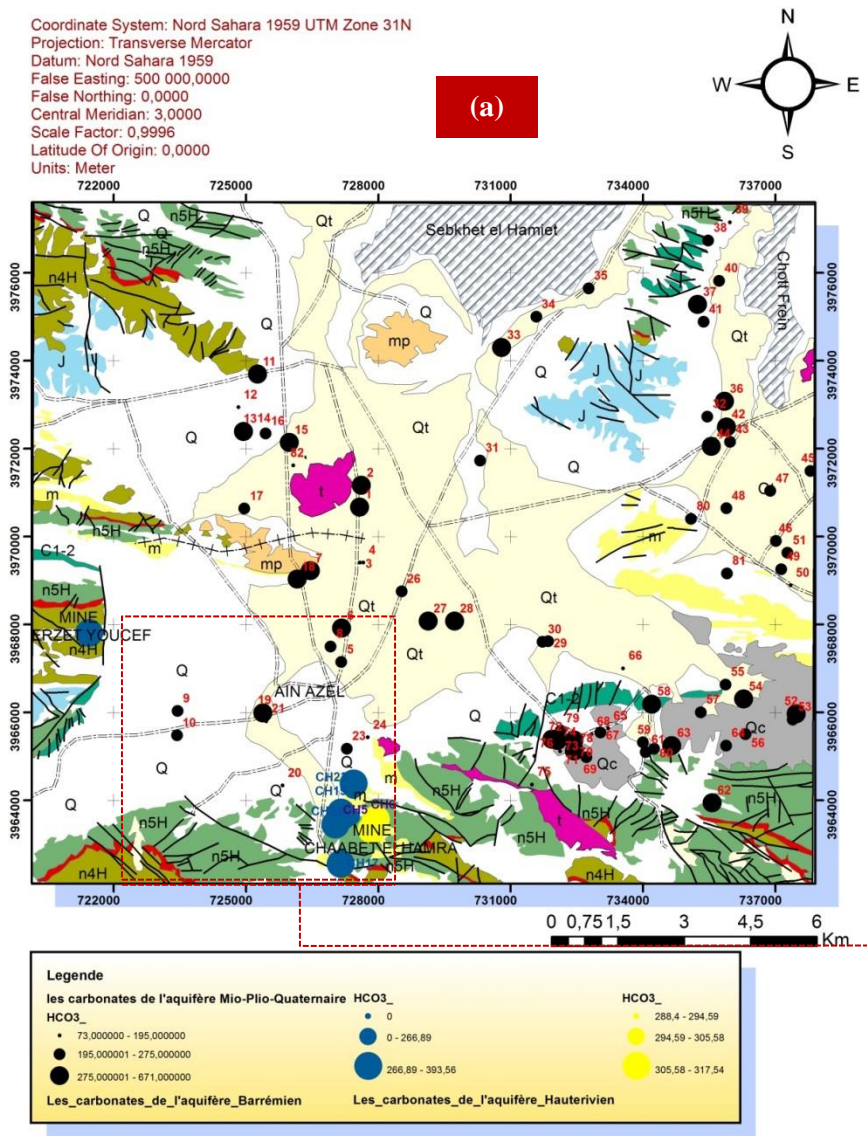


Figure A3.7 Variabilité spatiale du Bicarbonates
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

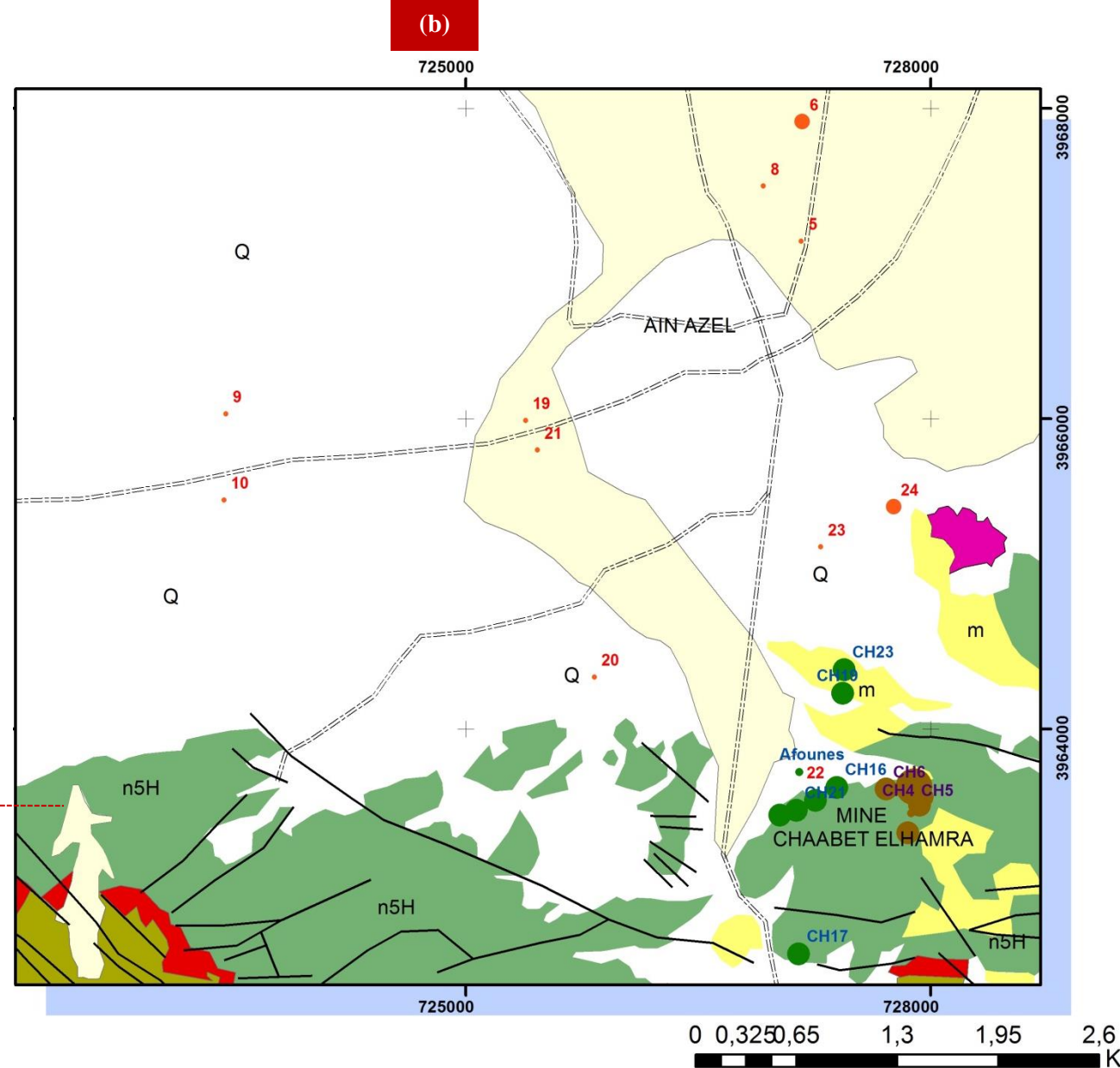
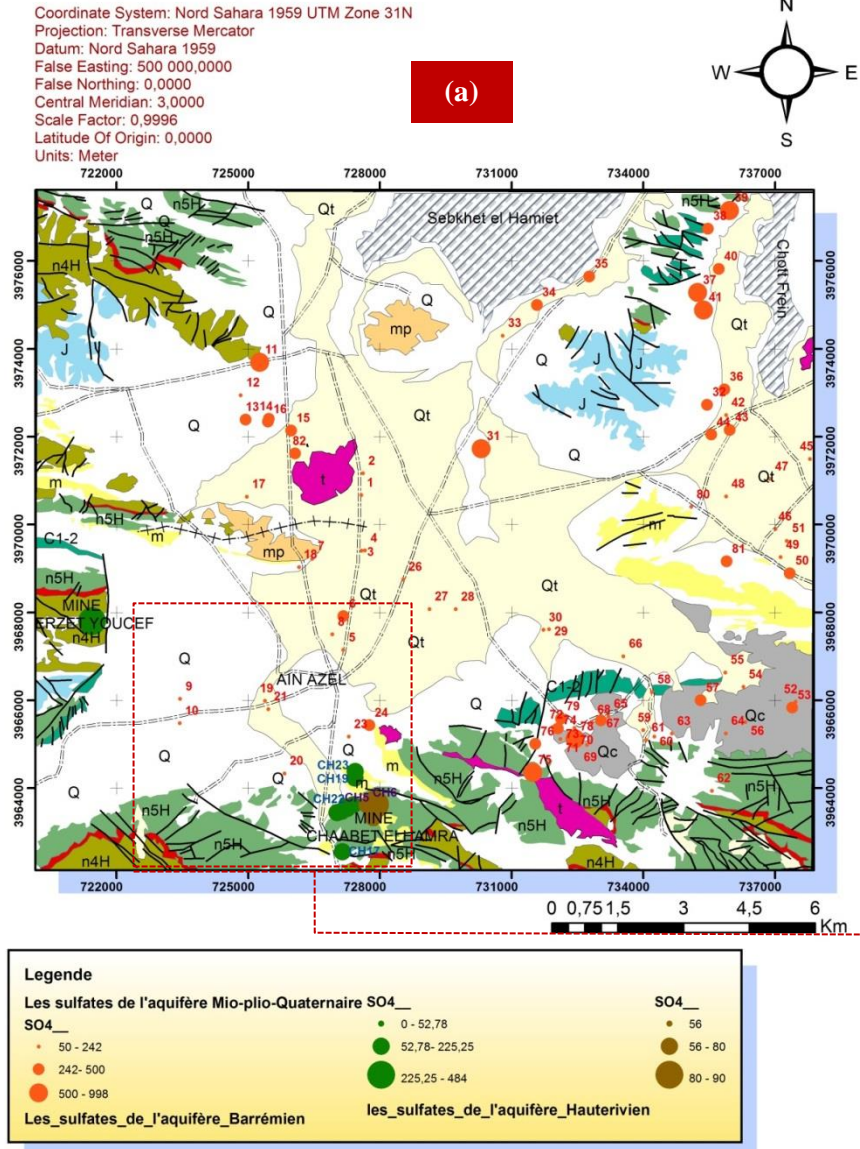


Figure A3.8 Variabilité spatiale des Sulfates
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

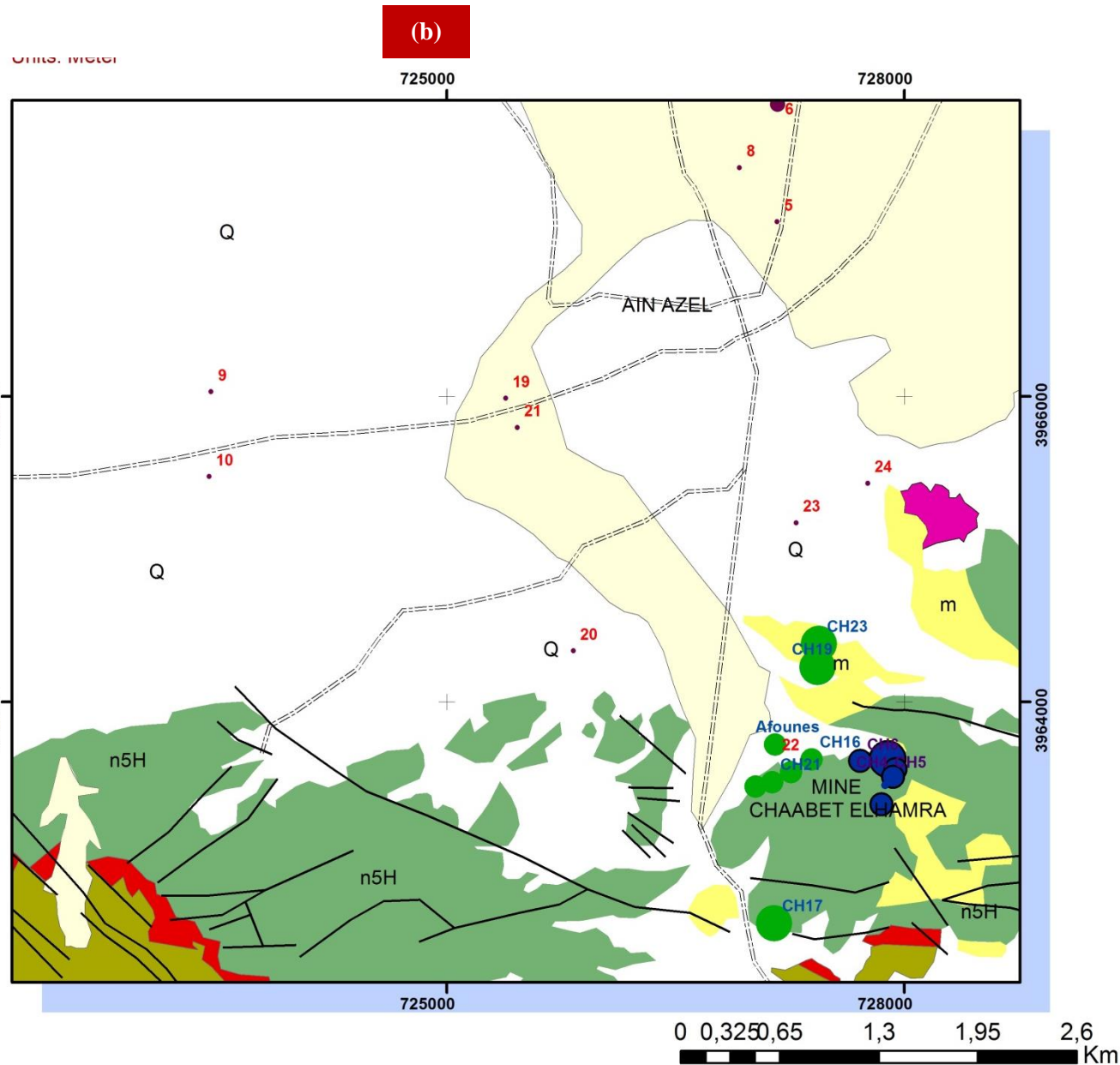
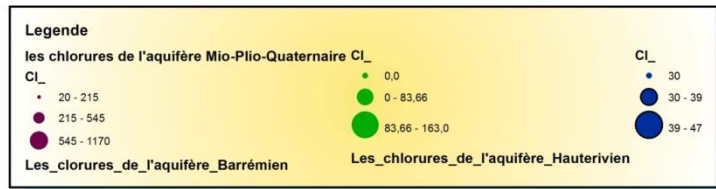
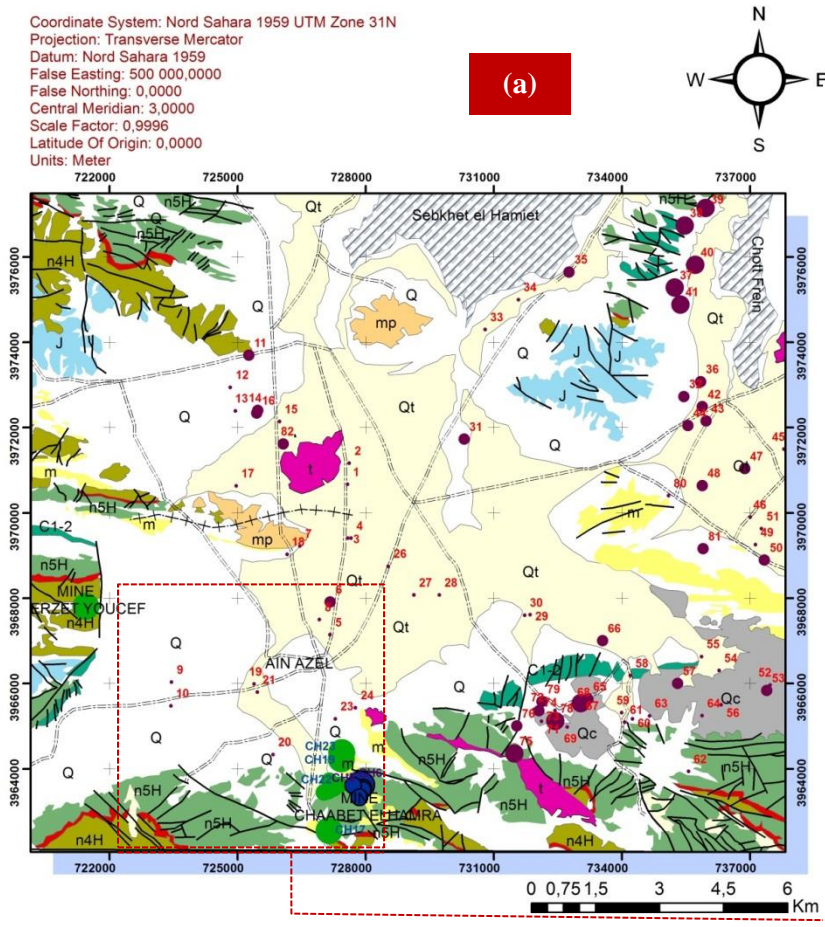


Figure A3.9 Variabilité spatiale des Chlorures
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

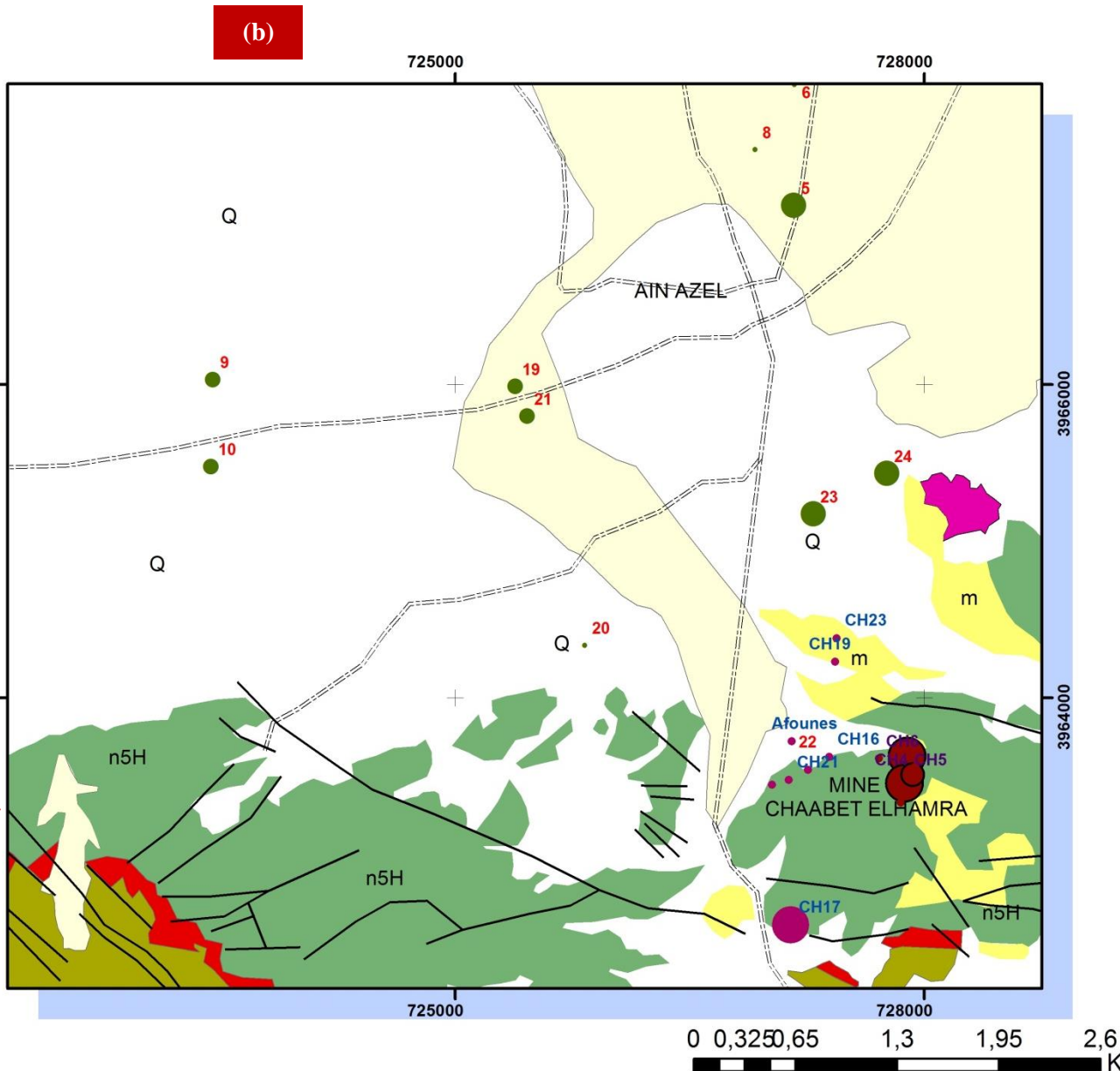
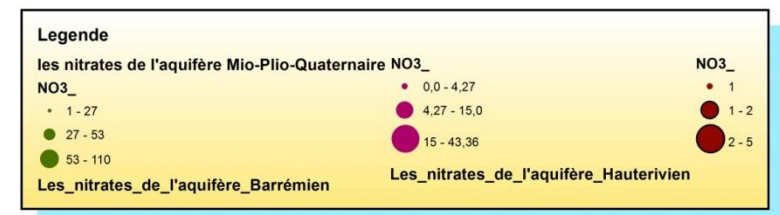
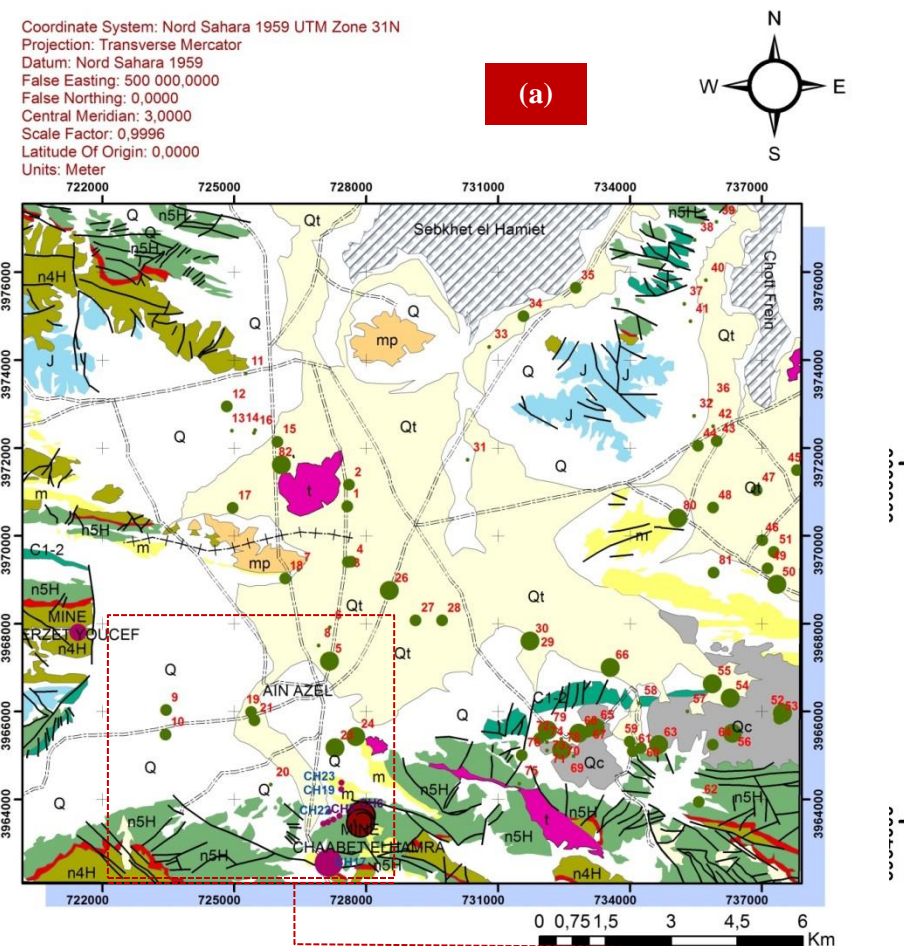


Figure A3.10 Variabilité spatiale des Nitrates
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

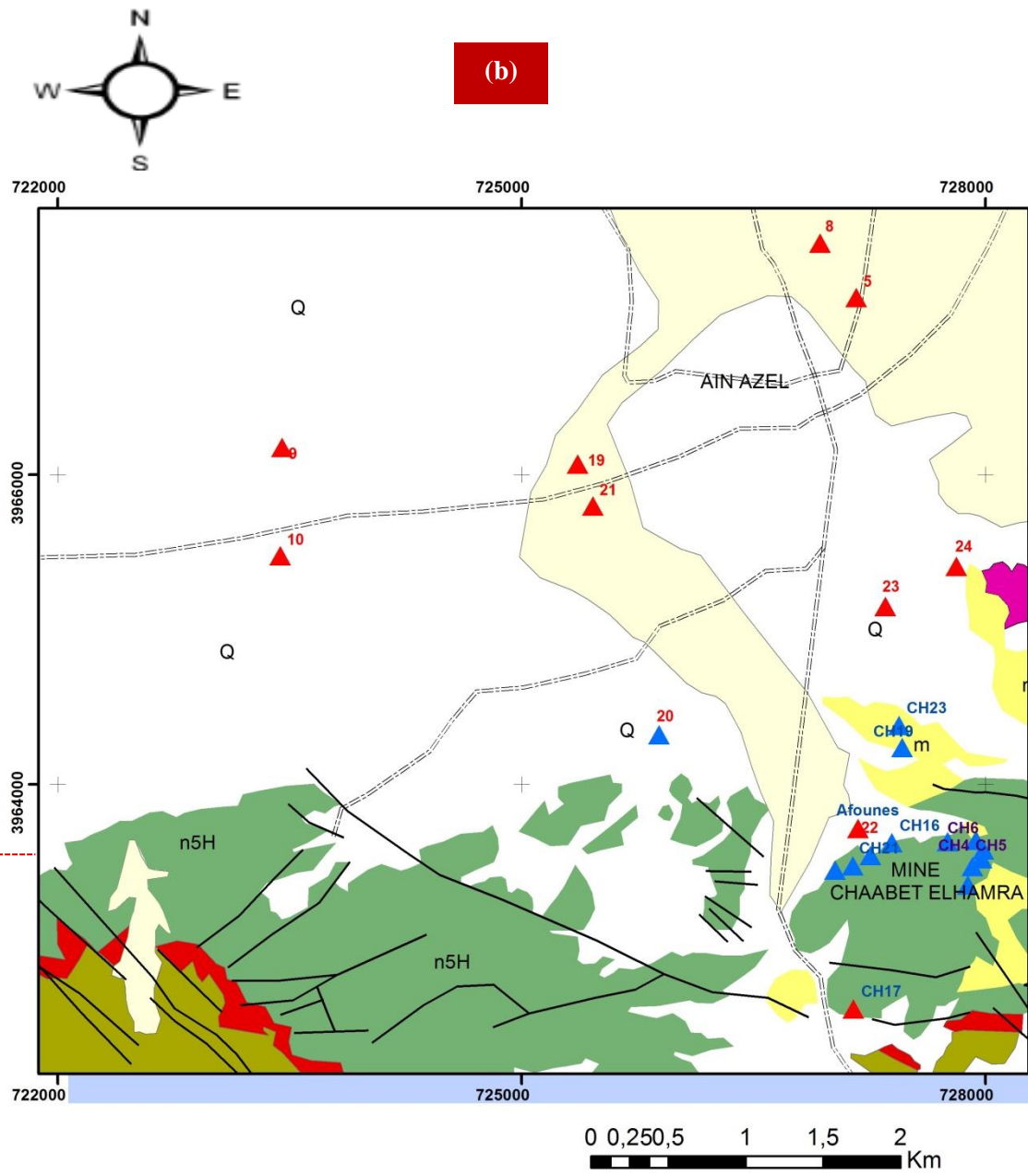
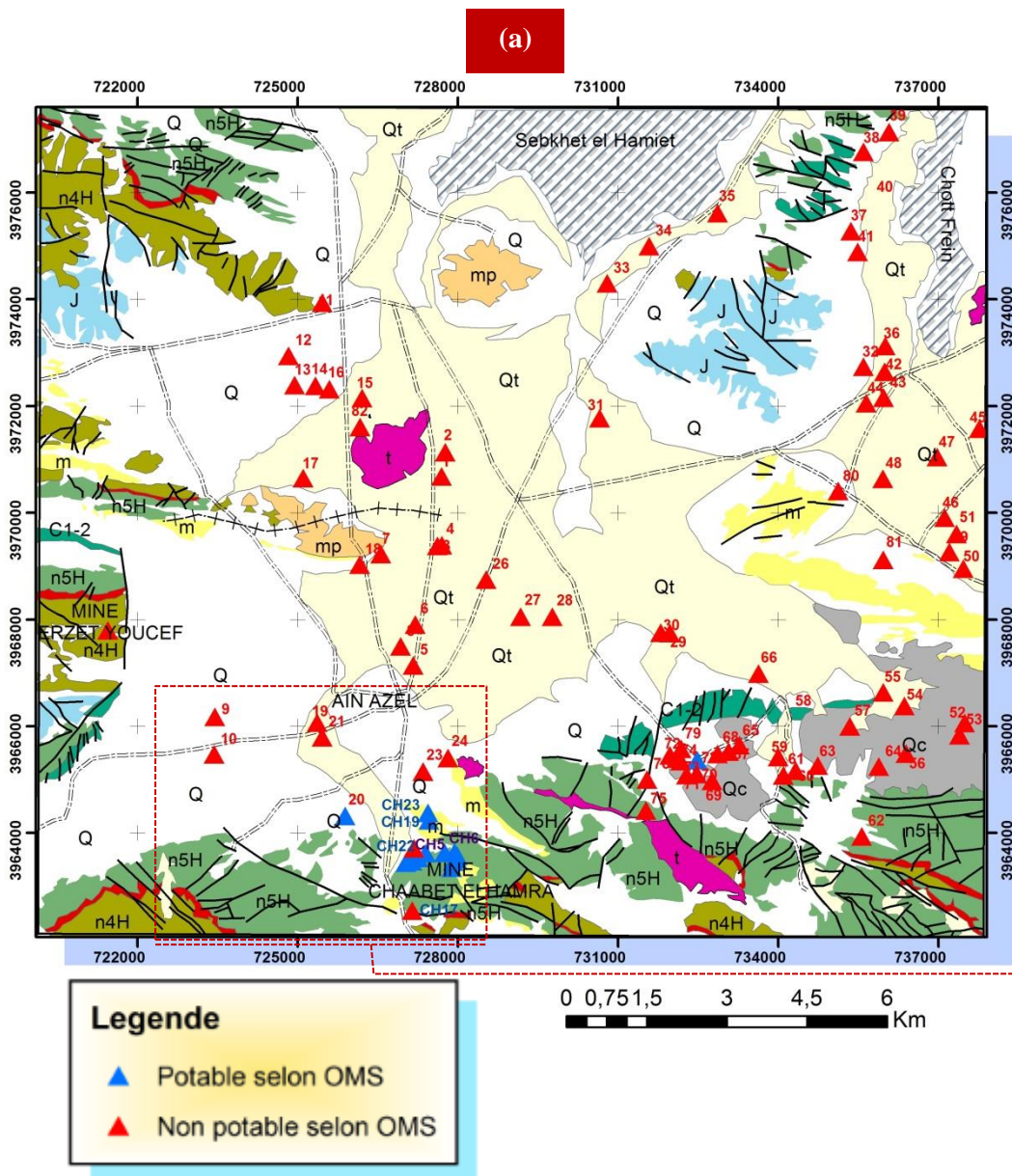


Figure A3.11 Potabilité des eaux selon OMS, 2008 (a): vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra.

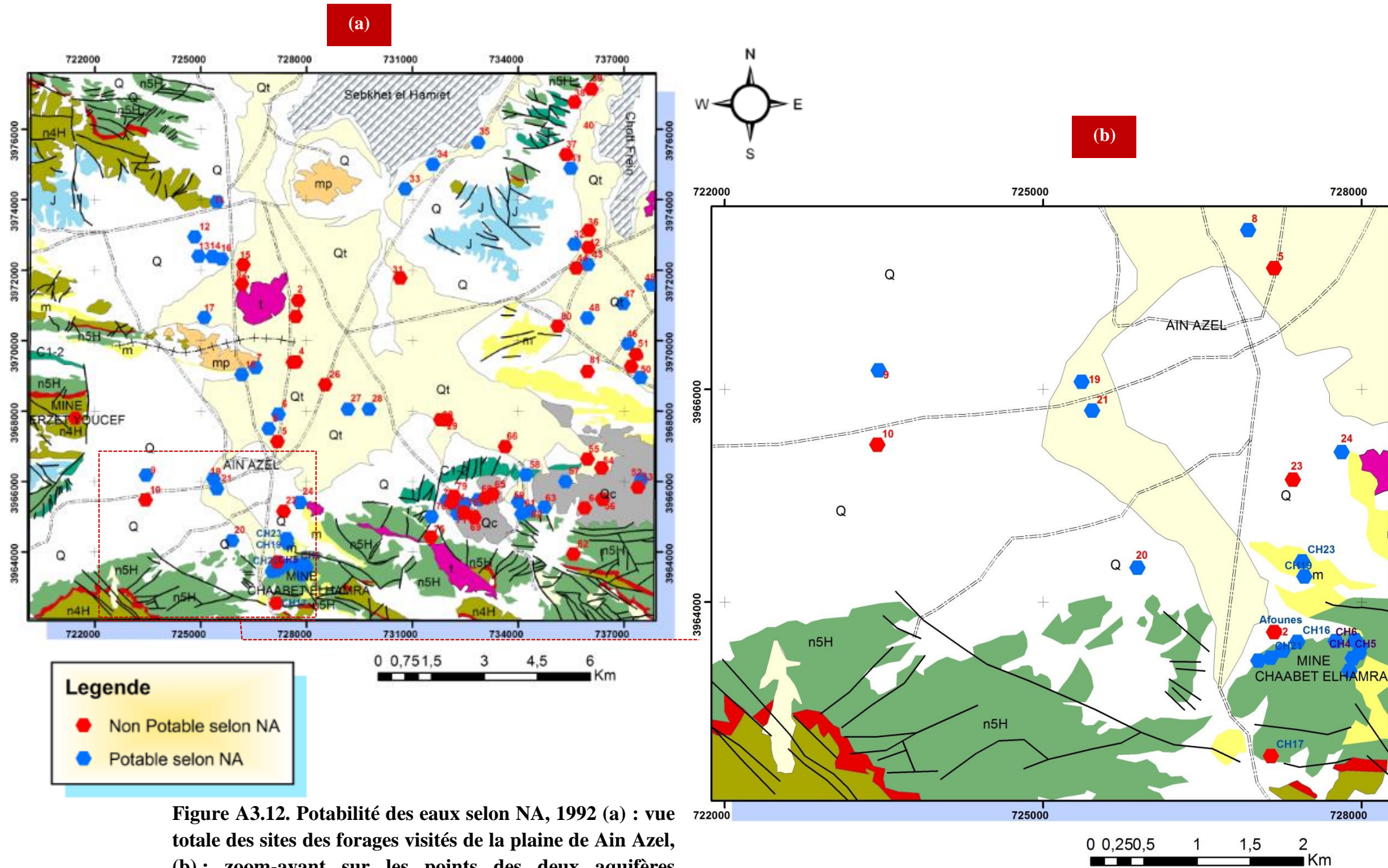


Figure A3.12. Potabilité des eaux selon NA, 1992 (a) : vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra.

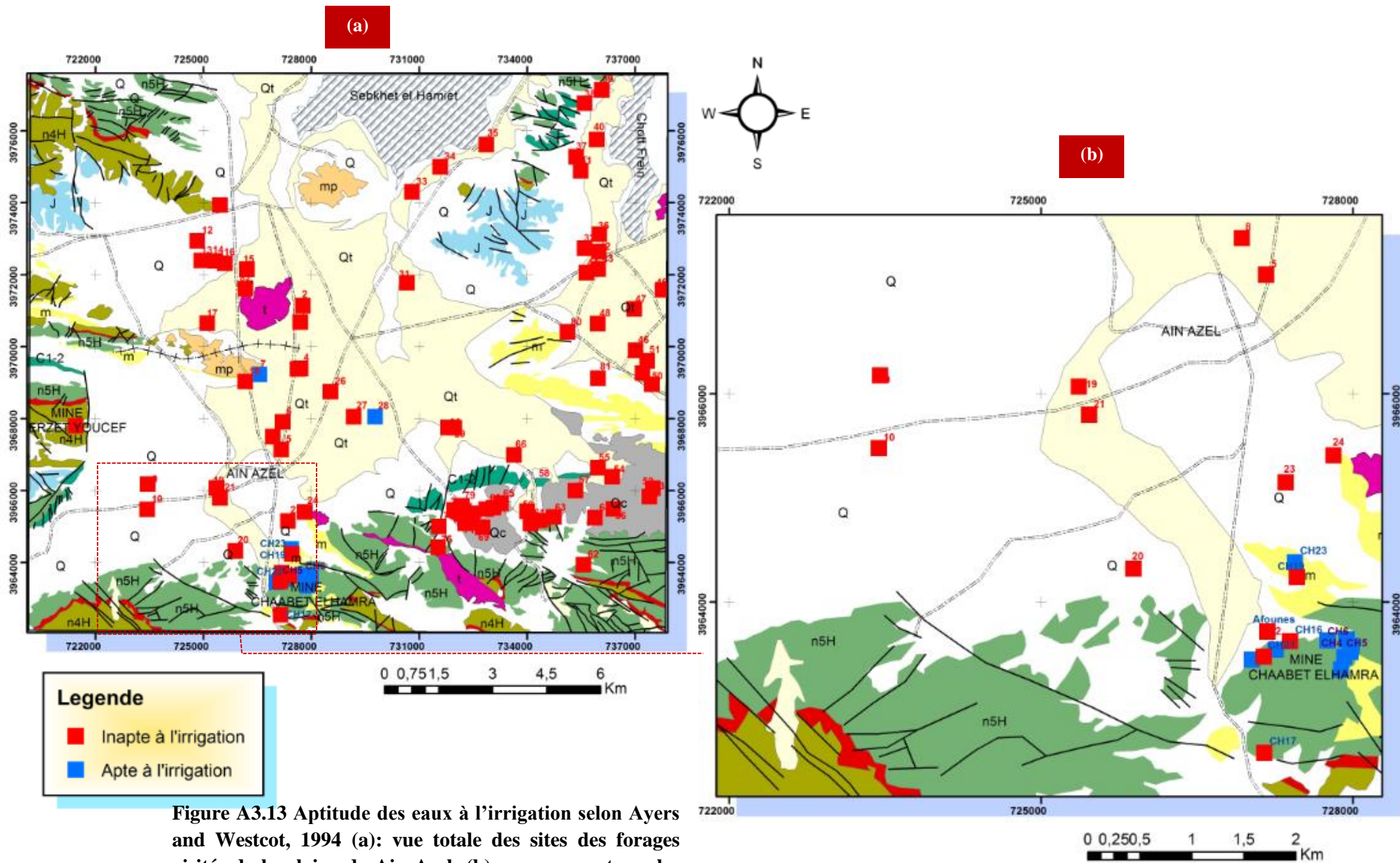


Figure A3.13 Aptitude des eaux à l'irrigation selon Ayers and Westcot, 1994 (a): vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra.

الملخص:

تعرف ولاية سطيف في الفترة الأخيرة موجة جفاف حادة وشدا كبيرا في كمية تساقط الأمطار و الثلوج، وبدرجة أكبر المناطق الجنوبية منها، وبالخصوص منطقة عين أزال التي تتميز بمناخها شبه جاف، مما أدى إلى تراجع هيب في مستوى المياه الجوفية المسجل في الآبار القليلة العمق، و التي كانت هي الملبأ الوحيد لسكان المنطقة بغية التزود بالمياه الصالحة للشرب وكذا سقي الأراضي الزراعية، ولا سيما ان المنطقة فلاحية. و بما ان المنطقة تزخر بعدة منابع للرياح و الزنك كالشعبة الحمراء وخرزة يوسف، واللذان يدورهما يحويان كميات كبيرة من المياه الجوفية و التي شطبت مانقا كبيرا في عملية الاستغلال المنجمي، فقد تم حفر عدة آبار ارتوازية بغية خفض منسوب المياه لمواصلة اشغال الاستغلال المنجمية، وكذا تزويد المنطقة بالمياه الصالحة للشرب و سقي الأراضي الزراعية.

وبهدف دراسة نوعية هذه المياه ومدى صلاحيتها للشرب والسقي بما انما في منطقة منجمية، فقد أجريت عدة حملات معاينة (2012- 2018) اين تمع معاينة كل من طبقة المياه الجوفية الصوتيرفيانية بالشعبة الحمراء، والبارميانية في كل من الشعبة الحمراء و خرزة يوسف، وكذا الميو بليو كواترنارية بمنطقة عين أزال من خلال اجراء جملة من التحليل الفيزيائية (T°, pH, CE, RS)، الكيميائية (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) وكذا المعادن الثقيلة (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb)، اين استعملت نتائجها في استنباط عدة معايير: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d, RC, HQ, ADD.

وكتيية اساسية لهذا العمل فان المياه الجوفية لذيين الطبقتين المانيتين العميقتين الموجودتين في تربياب جيولوجية من عمر الحقبة الطباشيرية السفلية (هوتيرفيان وبارميان)، و كذا المسطح المائي العلوي الميو بليو كواترناري، تعرف درجة من التلوث تمنعها من ان تكون صالحة للشرب او السقي.

الطلمار المتألمة: هوتيرفيان، بارميان، طبقة مياه جوفية، نوعية، سطيف، عين أزال

Résumé :

La wilaya de Sétif a récemment connu une grave sécheresse et une grande rareté des précipitations et de la neige, et dans une plus grande mesure dans les zones méridionales, et en particulier la région de Ain- Azel, qui se caractérise par son climat semi-aride, ce qui a entraîné un terrible rabattement du niveau des eaux souterraines enregistré dans les puits de faible profondeur, qui étaient le seul refuge pour les habitants de la région afin de fournir de l'eau potable, ainsi que l'irrigation des terres fertiles, d'autant plus que la zone est agricole.

Étant donné que la zone regorge de plusieurs mines de plomb et de zinc, telles que Chaabet –el-Hamra et Kherzet- Youcef, qui contiennent à leur tour de grandes quantités d'eau souterraine, qui ont été un obstacle majeur dans le processus d'exploitation minière, plusieurs forages ont été forés afin de rabattre le niveau piézométrique pour poursuivre l'exploitation minière, ainsi que pour fournir à la région de l'eau potable et d'irrigation.

Afin d'étudier la qualité de ces eaux et leur aptitude à la consommation, et à l'irrigation puisqu'elles se trouvent dans une zone minière, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été menées (2012-2018), pour les aquifères Hauterivien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra, Barrémien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra et Kherzet-Youcef, ainsi que le Mio-Plio-Quaternaire dans la plaine de Ain- Azel, afin de réaliser une série d'analyses : physiques (T°, pH, CE, RS), chimiques (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) ainsi que des métaux lourds (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), où leurs résultats ont été utilisés dans l'estimation de plusieurs indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d, ADD, HQ et RC.

Et comme résultat- clé de ce travail, les eaux souterraines de ces deux aquifères profonds, Hauterivien et Barrémien, et la nappe d'eau superficielle du Mio-Plio-Quaternaire, connaissent un degré de pollution qui l'empêche d'être potable ou à utiliser pour l'irrigation.

Mots clés : Hauterivien, Barrémien, Aquifère, Qualité, Sétif, Ain- Azel.

Abstract:

The wilaya of Setif has recently experienced a severe drought and a great scarcity of precipitation and snow, and to a greater extent the southern areas, and in particular the region of Ain-Azel, which is characterized by its semi-arid climate, this has led to a terrible drop in the level of groundwater recorded in the shallow wells, which were the only refuge for the inhabitants of the region to provide drinking water as well as irrigation of fertile land, especially since the area is agricultural.

Since the area is full of several lead and zinc mines, such as Chaabet –el-Hamra and Kherzet-Youcef, which in turn contain large amounts of groundwater, which have been a major obstacle in the mining process, several wells were drilled to lower the piezometric level to continue mining, as well as to provide the region with drinking water and irrigation.

In order to study the quality of these waters and their suitability for consumption and irrigation since they are located in a mining area, several sampling campaigns were conducted (2012-2018) for the Hauterivian aquifers in the Chaabet-el-Hamra deposit, Barremian in the Chaabet-el-Hamra and Kherzet-Youcef deposit, as well as the Mio-Plio-Quaternary in the Ain-Azel plain, in order to carry out a series of analyses: physical (T°, pH, EC, TDS), chemical (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) as well as heavy metals (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), where their results were used in the estimation of several indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d, ADD, HQ and RC.

As a key result of this work, the groundwater of these two deep aquifers, Hauterivian and Barremian, and the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary, experience a degree of pollution that prevents it from being drinkable or to be used for irrigation.

Key words: Hauterivian, Barremian, Aquifer, Quality, Setif, Ain- Azel.



P REMIER

C HAPITRE

I.1. Introduction :

Ce chapitre présente les traits majeurs du milieu d'étude notamment la localisation géographique, la physiographie du terrain, l'hydrographie, le cadre climatique, le couvert végétal et le cadre géologique. Ces éléments vont contribuer à situer le système aquifère dans le contexte régional et à cerner les données utiles à la compréhension des problématiques abordées au cours de l'étude.

I.2. Localisation géographique de la zone d'étude :

La région de Ain- Azel, au Sud de Sétif, est située dans la partie orientale de l'Algérie du Nord. Elle appartient au domaine des Hautes Plaines Sétifiennes.

Le secteur d'étude, notamment le gisement de zinc de Chaabet- el- Hamra se trouve à 3,5 Km au Sud-Est de Ain- Azel (ex : Ampère), à 8 Km de Kherzet- Youcef et à l'extrémité occidentale du massif du Djebel Fourhal, (chainon oriental des monts du Hodna). **(Figure I.1).**

Ses coordonnées géographiques sont : 35°45'N et 5°30'E. L'altitude du site varie de 950 à 1200 mètres

Cette région, limitée au Nord par les communes de Ain- Lahdjar et Bir- Haddada, au Sud par la commune de Ras- el- Aioun, à l'Est par la commune de Beida- Bordj, et à l'Ouest par la commune de Salah- Bey, couvre une superficie d'environ 252 km². **(Figure I.1).**

I.3. La géomorphologie :

Cette région est représentée par un ensemble de chaînons, **(Figure I.2)**, dont certains culminent à plus de 1800 m tel que Djebel Boutaleb, (1886m), qui se relayent pour former une barrière topographique et climatique entre l'Algérie septentrionale et le domaine saharien. La région de Ain- Azel est caractérisée par une planitude entourée par les massifs montagneux suivants :

- ❖ Djebel Sekrine au Nord,
- ❖ Djebel Guetiane au Sud,
- ❖ Djebel Fourhal à l'Est et Djebel Boutaleb à l'Ouest.

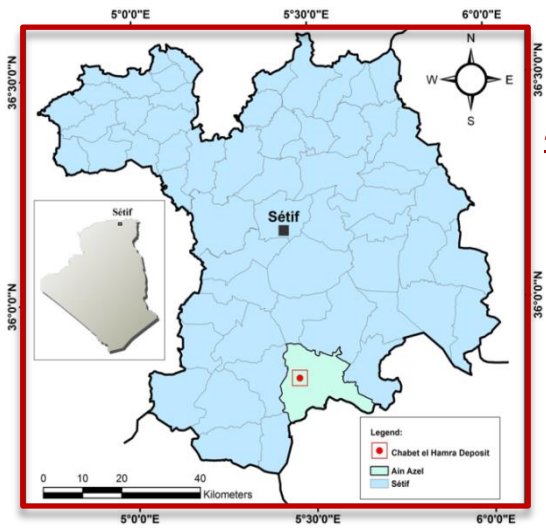


Figure I.1. Localisation géographique de la zone d'étude, (Google Maps, 2020)

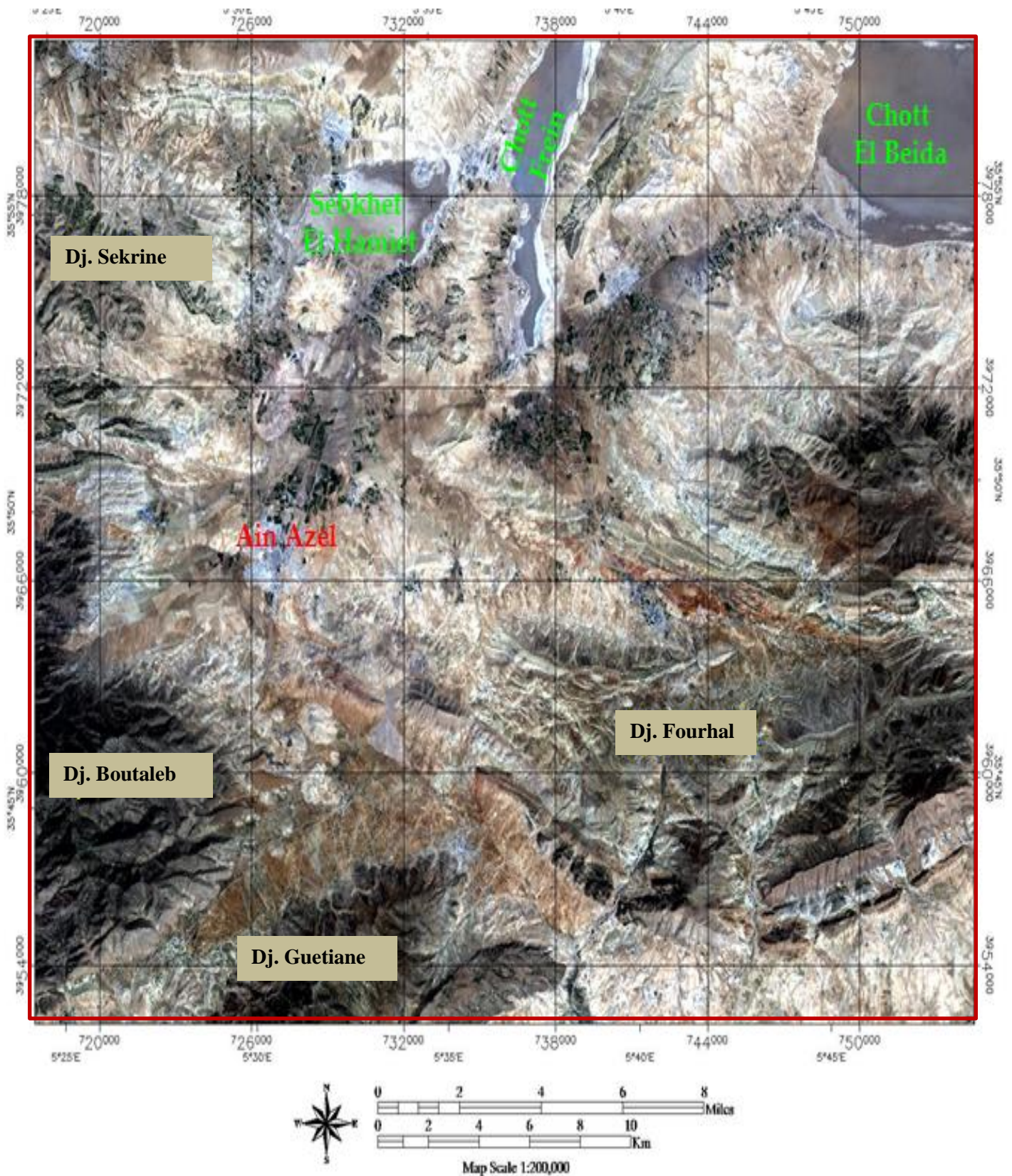


Figure I.2. Image satellitaire en combinaison des bandes 321 montrant les massifs montagneux.

I.4. Le cadre climatique :

Le secteur d'étude est attribué au climat semi -aride. Il est caractérisé par une période froide et humide, et une autre sèche et chaude.

La région d'étude reçoit de faibles quantités de pluies de l'ordre de 300-400 mm. Les températures se distinguent par des variations jusqu'à -5°C en période hivernale et plus de 40°C en été. En hiver, les chutes de neige sont considérables et de nombreuses gelées s'étendant jusqu'au début du printemps. Le régime pluviométrique de la région est défini par une période sèche, (Juin à Octobre) et une période pluvieuse, (Octobre à Mai), caractérisée par des averses torrentielles de courte durée. (H. Kada, 2014).

I.5. Le couvert végétal

Le développement d'une bonne couverture végétale est déterminé par les conditions climatiques et pédologiques. L'aspect général de la région est typique de celui des hautes plaines Sétifiennes : paysages faiblement vallonnés, sans reliefs, en teintes généralement jaunâtres. La semi-aridité du climat est l'indice d'une région, pauvre en végétation, favorable à la culture céréalière, (Orge et blé), et au pâturage.

I.6. Le cadre socio-économique :

La plus grande partie de la population est concentrée au niveau de la ville de Ain- Azel avec une densité moyenne estimée à cinq habitants par Km². (L. Attoucheik, 2006).

L'agriculture constitue la principale ressource de la région, l'industrie quant à elle est représentée par les complexes miniers de plomb et de zinc de Kherzet- Youssef et de Chaabet el- Hamra. (L. Attoucheik, 2006).

I.7. La géologie de la zone d'étude :

I.7.1. La géologie régionale :

La région de Ain- Azel fait partie des zones externes du tronçon Nord-oriental de la chaîne des Maghrébides de l'Afrique du Nord. (M. Durand-Delga, 1969). Cette chaîne s'étend de Gibraltar jusqu'à la Sicile, sur plus de 2000Km (**Figure I.3**), a été approchée par de nombreux auteurs : M. Durand Delga. (1955), R. Guiraud. (1973), J. F. Raoult. (1974), J. P. Bouillin. (1977), J. M. Vila. (1980), W. Wildi. (1983), N. Kazi Tani. (1986), D. Bureau. (1986), J. C. Lahondère. (1987), P. E. Coiffait. (1992), M. Chadi. (2004), A. Domzig. (2006), etc.....

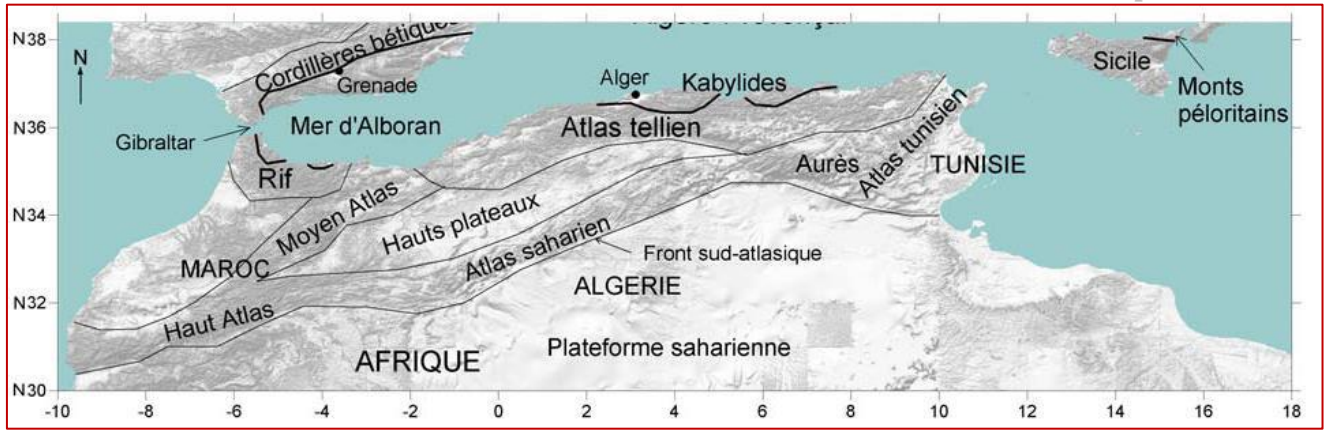


Figure I.3: Localisation des principales unités géologiques des Maghrébides. (A. Domzig, 2006).

La chaîne des Maghrébides résulte probablement de la convergence et de la collision d'un élément de la marge Sud européenne avec la marge Nord-africaine d'un bassin Téthysien Maghrébin qui faisait communiquer la Téthys avec l'Atlantique central. (W. Wildi, 1983).

Cette chaîne est généralement subdivisée en plusieurs domaines structuraux. (Figure I.4) et paléogéographiques bien distincts, qui sont actuellement en parties superposées.

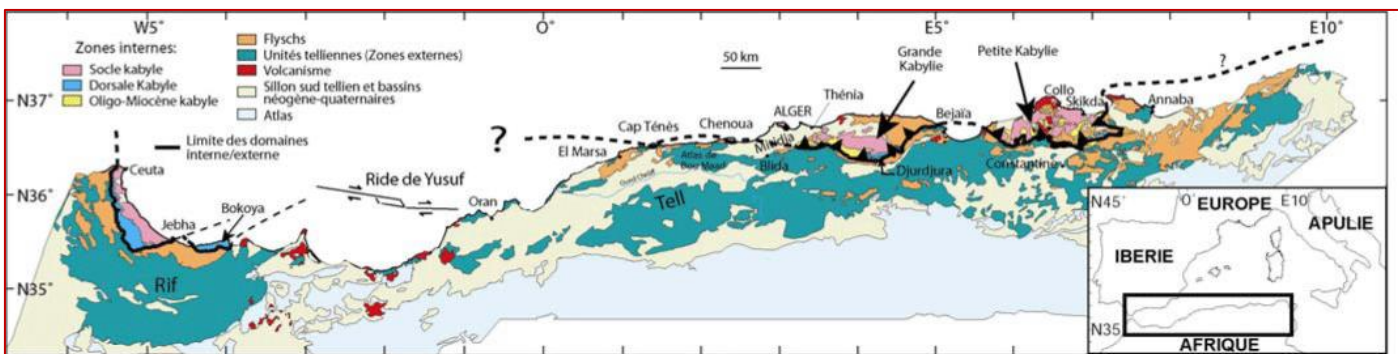


Figure I.4: Position des différentes unités géologiques des Maghrébides

(A. Domzig, 2006).

En Algérie, la chaîne des Maghrébides est structurée du Nord vers le Sud par : (Figure I.5 et I. 6) :

- 1- Domaine interne
- 2- Domaine intermédiaire
- 3- Domaine externe.

I.7.1.1 Domaine interne :

Ce domaine renferme le massif du Chénoua, (Tipaza), massif d'Alger, la grande Kabylie, (Djurdjura qui fait 60km de longueur allant de l'Est vers l'Ouest, et 20km pour sa largeur), Horst de Bou-Hatem, (près de Béjaïa), Petite Kabylie, (faisant 120km de longueur allant d'Est en Ouest, et 30km de largeur).

Il comprend le socle cristallophyllien, (socle kabyle) et une couverture sédimentaire qui constitue la chaîne calcaire appelée par la suite Dorsale Kabyle par [J. F. Raoult \(1974\)](#).

a. Socle kabyle :

Il est représenté par des formations cristallophylliennes. D'après [J. F. Raoult \(1974\)](#), [J. P. Bouillin. \(1977\)](#), [J. M. Vila. \(1980\)](#) et [W. Wildi. \(1983\)](#), on le rencontre dans les massifs littoraux de la grande et la petite Kabylie. Ce dernier, avec 120Km de long et 30Km de large, constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie. Il comporte les termes suivants :

- ❖ Un ensemble cristallophyllien inférieur, formé de gneiss à intercalations, parfois puissantes, de marbre et d'amphibolites.
- ❖ Un ensemble cristallophyllien supérieur comportant principalement des schistes satinés ou phyllades ayant subi un métamorphisme de basse pression avec une zone inférieure à biotite et une zone supérieure à chlorites. ([J. P. Bouillin, 1977](#)).
- ❖ Un ensemble essentiellement sédimentaire constituant la couverture Paléozoïque du socle cristallin. Les séries peu ou pas métamorphiques, comprennent des termes du Cambrien au Carbonifère. ([J. P. Bouillin, 1977](#)).

b. Dorsale Kabyle ou « chaîne calcaire » :

C'est un domaine étroit et discontinu qui constitue la couverture sédimentaire de la bordure méridionale du socle Kabyle, sa largeur ne dépasse jamais quelque Km, elle affleure au : Cap Ténès, Chénoua, Sud-Est d'Alger, (Bouzegza, Lakhdaria), sommet du Djurdjura, Nord de Constantine à Djbel Sidi-Driss et au Sud de Annaba, (Zit Emba).

En général, la dorsale kabyle est caractérisée par un style tectonique en écaille. Ces écailles comprennent également des formations paléozoïques ainsi que des terrains de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène.

La Dorsale Kabyle est subdivisée du Nord vers le Sud en trois unités plus ou moins individualisées et caractérisées par leur lithostratigraphie respective ([J. F. Raoult, 1974](#) ; [J. M. Vila, 1980](#)) :

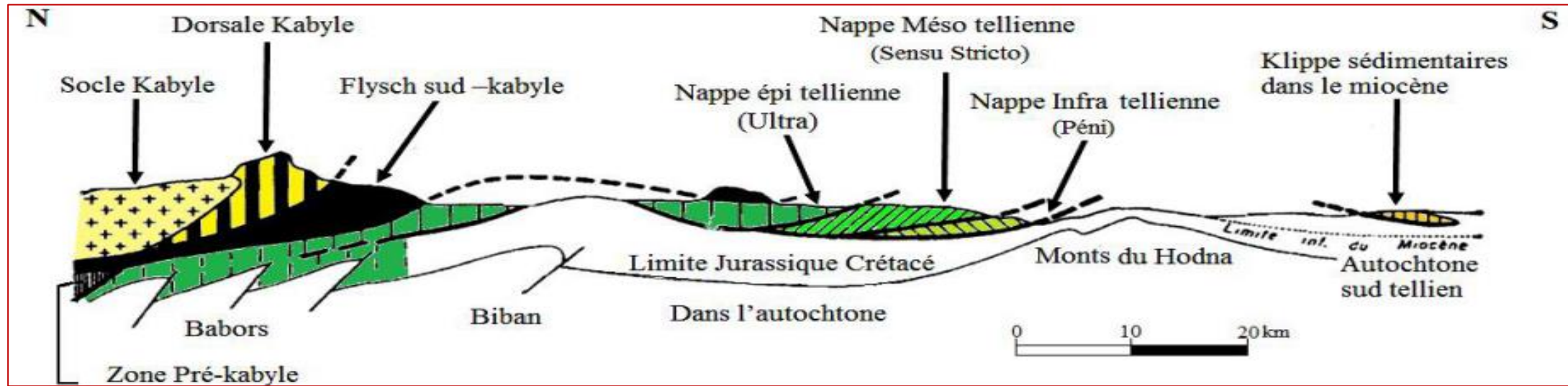


Figure I.5. Les différentes unités de la chaîne des Maghrébides. (D'après M. Durand Delga, 1969)

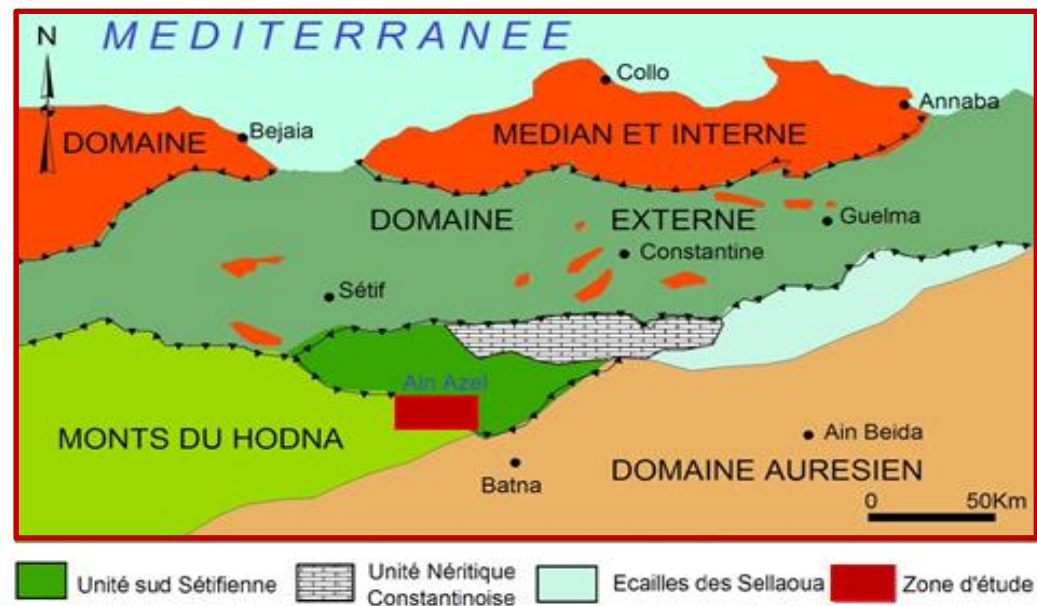


Figure I.6. Contexte structural du domaine d'étude. (D'après W. Wildi, 1983)

- ✿ La dorsale interne ;
- ✿ La dorsale médiane ;
- ✿ La dorsale externe.

Ces unités sont séparées par des limites correspondant à des accidents cisailants. (J. P. Bouillin, 1986).

En général, les faciès traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profondes lorsque l'on passe des formations de la dorsale interne (dépôts littoraux ou épicontinentaux), à celles de la dorsale médiane, (dépôts marneux et plus profonds du Crétacé à l'Eocène), puis aux formations de la dorsale externe, (qui montrent souvent des radiolarites au Dogger-Malm), (J. P. Bouillin, 1986).

b. 1. La dorsale interne :

Elle est très souvent condensée et montre nettement du Sud au Nord un amincissement de ses séries. Cette dorsale est caractérisée par une série transgressive sur le substratum paléozoïque. Elle débute par des microconglomérats du Permo-Trias, un Trias supérieur et un lias basal à calcaires néritiques et des calcaires du Néocomien, suivis par une lacune jusqu'au Sénonien supérieur. Puis vient un Paléocène – Yprésien caractéristique formé de calcaires du Nummulitique.

b. 2. La dorsale médiane :

C'est la plus développée de la dorsale kabyle. (J. Flandrin, 1948) et elle occupe une position centrale dans le dispositif structural du Djurdjura.

Elle est particulièrement déformée et limitée au Nord par les formations métamorphiques de Grande Kabylie et les terrains primaires de la dorsale interne par l'intermédiaire d'une zone tectonique importante. Au Sud, elle chevauche les formations de la dorsale externe.

Elle est aussi caractérisée par un Lias inférieur très développé et ne montre pas en général de différences avec celui de la dorsale interne.

b. 3. La dorsale externe :

Elle est chevauchée par les formations de la dorsale médiane. Elle se caractérise par une série détritique et lacuneuse avec un faciès intermédiaire entre la dorsale interne et médiane du Crétacé à l'Éocène.

On peut conclure qu'en général, les faciès traduisent des conditions de sédimentation de plus en plus profondes lorsque l'on passe des formations de la dorsale interne (dépôts littoraux ou épicontinentaux), à celles de la dorsale médiane, (dépôts marneux et plus profonds du Crétacé à l'Eocène), puis aux formations de la dorsale externe, (qui montrent souvent des radiolarites au Dogger-Malm). (J. P. Bouillin, 1986).

I.7.1.2. Le Domaine Des Flyschs

Domaine médian ou Domaine des flyschs, la zone des flyschs est caractérisée par la complexité structurale et la pauvreté en fossiles. Les flyschs sont des formations sédimentaires allochtones d'âge Crétacé à Éocène, ils sont classiquement subdivisés en trois groupes:

- ✿ Les flyschs de type « Guerrouch » (Tithonique- Crétacé inférieur), ou flyschs Maurétaniens.
- ✿ Les flyschs «schisto-quartzeux », (flyschs Albo-Aptiens de L. Glangeaud, 1932), ou flyschs Massyliens.
- ✿ Les flyschs Numidiens ou bien la nappe numidienne.

a. Le flysch Maurétanien :

D'après J. P. Bouillin (1977), le flysch Maurétanien montre dans ses séries médianes les plus typiques, de bas en haut:

- ✿ un complexe de base flyschoïde à petits bancs de micrites du Néocomien.
- ✿ un flysch argileux-gréseux, (dont les grès forment des bancs métriques), qui atteint l'Albien moyen.
- ✿ un Vracono- Cénomaniens- Turonien calcaire conglomératique ou micro conglomératique à bandes silicifiées blanches.
- ✿ Un Sénonien et un Paléocène -Eocène moyen argilo-conglomératiques, des niveaux bioclastiques à grands foraminifères de l'éocène au lutétien.

Localement des radiolarites sont connues à la base de cette série et rapportées au Malm.

b. Le flysch Massylien

Il a été défini par J. F. Raoult. (1969) au Nord du Kef Sidi- Driss, dans le Nord constantinois et comporte de bas en haut les termes suivants :

- ✿ Des calcaires sableux et des argiles du Néocomien.

- ✿ Un flysch pélito-quartzitique où dominant les couleurs vertes : c'est un flysch « Albo – Aptien ». Il est surmonté par des calcaires fins jaunâtres du Vraconien épais de quelques mètres.
- ✿ Des phtanites noires et blanches d'âge Cénomaniens. (J. F. Raoult, 1974).
- ✿ Un ensemble flyschoides marno- microbréchiqes du Sénonien.

Tous les critères sédimentologiques montrent que les formations massyliennes se sont déposées dans une zone profonde et sans doute à substratum océanique. (J. P. Bouillin, 1986). Le flysch massylien d'origine plus méridionale surmonte très généralement le flysch Maurétanien.

c. Le flysch Numidien

Ce terme a été proposé par E. Ficheur. (1890) pour désigner la trilogie suivante :

- ✿ Des argiles varicolores à Tubotomaculum, (Oligocène supérieur) dites : argiles sous-numidiennes.
- ✿ Des bancs de grés épais à grains hétérogènes.
- ✿ Des argiles, marnes et silexites appelées : supra-numidiennes.

La nappe numidienne dont les sédiments sont postérieurs à la tectonique tangentielle finioécène, forme un étage supérieur nettement moins tectonisé et recouvre indifféremment toutes les unités. Elle s'est désolidarisée de son substratum et se trouve dans une position structurale élevée. (J. M. Vila, 1980).

I.7.1.3. Domaine externe : (le Tell)

Il est constitué par des formations allochtones sous forme des nappes complexes à matériels marneux et calcaireux d'âge Méso- Cénozoïque, charriées largement sur un para-autochtone représenté par les calcaires jurassiques, situé au Sud des flyschs.

Ce domaine est représenté par les séries telliennes, les séries de l'avant pays.

a. Les séries telliennes ou nappes telliennes

Il s'agit des séries épaisses à dominante marneuse qui seraient issues du sillon Tellien. (J. M. Vila, 1980), après avoir mis en évidence des séries telliennes très méridionales, J. M. Vila les a subdivisées en trois grandes unités: Les unités ultra telliennes, les unités telliennes sensu stricto, les séries péni- telliennes et unités méridionales à Nummulites, dont les limites suivent à peu près les lignes paléogéographiques du Crétacé, du Paléocène et de l'Éocène.

a. 1. Les unités ultra- telliennes

Le terme ultra tellien a été proposé par [M. Durand Delga en 1969](#) pour désigner dans la région de Guelma les séries superposées anormalement au Crétacé néritique constantinois des Djebels Debar. ([J. M. Vila, 1969](#)). Elles ont été définies au Kef Sidi- Driss. ([J. F. Raoult, 1966](#)) et au Djebel Bousbaa dans la région de Guelma. ([J. M. Vila, 1969](#)). Les formations typiques comportent un Crétacé inférieur marneux et des calcaires clairs à Ammonites (Valanginien à Vraconien), un Crétacé moyen de même nature à Rotalipores, un Sénonien marneux et micritique riche en microfaunes de Globotruncana. L'Eocène comporte trois termes :

- ✿ Marnes sombres à boules jaunes d'âge Dano-Paléogène.
- ✿ Calcaire à silex noir et cassure grise, d'âge Yprésien- Lutétien inférieur.
- ✿ Marnes sombres d'âge Lutétien supérieur.

Les unités ultra- telliennes forment un ensemble particulièrement homogène, limité à l'Ouest par le témoin du Djebel Mégriss, ses séries se prolongent par contre largement en Tunisie avec les séries de Ain- Draham définie par [H. Rouvier. \(1977\)](#). Elles constituent les séries suivantes : la série de Medjez Sfa , la série d'Oulbane, la série de Mechta El Grar, les affleurements de la région d'Oued Zenati, entre Constantine et El Aria, les affleurements de Djebel Mégriss au Nord de Sétif, la série de Djebel Safia et la couverture mésozoïque de Djebel l'Edough.

a. 2. Les séries telliennes Sensu Stricto (Centralo-Telliennes)

Elles Correspondent à la définition de [L. Glangeaud \(1932\)](#) en deux restrictions simples :

- ✿ Absence des caractères définissant les séries ultra telliennes, Crétacé inférieur clair strictement marneux ou micritique à Ammonites, Crétacé moyen et supérieur analogues, respectivement à Rotalipores, et à Globotruncana.
- ✿ Absence d'intercalation néritique à caractère prépondérant quelle que soit l'époque considérée, du Crétacé inférieur au Lutétien supérieur.

Elles ont été définies par ([J. M. Vila, 1980](#)) et représentant l'équivalent de la série méso-tellienne dans la nomenclature de ([M. Durand Delga, 1969](#)). Ces unités se caractérisent par un Crétacé inférieur riche en sédiments terrigènes où les intercalations des faciès néritiques restent modérées du Crétacé supérieur à l'Oligocène. Les séries telliennes peuvent être rassemblées, du Nord au Sud, en:

- ✿ Les nappes Baboriennes. (D. Obert, 1981) ;
- ✿ Les unités Bibaniques. (A. Caire, 1957 ; M. Leikine, 1971) ;
- ✿ Les nappes de Djemila, béni Abdallah, Barbacha, Drâa el Arba.
- ✿ Les unités Gouraya, Arbalou, Brek.
- ✿ Les nappes Sétifiennes à matériel Éocène. (M. Leikine, 1971 ; D. Obert, 1981).

a. 3. Les séries péni- telliennes

D'après J. M. Vila. (1980), le terme péni-tellien a été créé pour désigner une série allochtone du versant Nord du Djebel Zouaoui dans le massif de Chettaba, au Sud-Ouest de Constantine. Il s'agit des formations constituant d'Ouest en Est les reliefs suivants : les Djebels Hellel, El Halfa, Boucharef, Ouaskissène, le massif d'Ahmed Rachedi, Djebel Lakhal, le Nord du Djebel Khenag, l'Est du Djebel Grouz, le versant Nord de Djebel Zouaoui et l'ensemble de Djebel Karkra-Chettaba. Elles s'étalent sur une étendue de 150km d'Est à l'Ouest et de 40km du Nord au Sud. (J. M. Vila, 1977 ; S. Guellal et al, 1978).

Les séries péni- telliennes sont caractérisées par des formations Jurassiques carbonatées intermédiaires ; le Lias et le Dogger analogue respectivement à ce qui est connu dans les Babors et les séries de Debar, le Malm débute par des carbonates massifs comme dans les séries néritiques, Sétifiennes ou constantinoise.

Selon (J. M. Vila ,1980), le Crétacé inférieur est pélito-marneux avec de rares intercalations gréseuses fines, ainsi que des niveaux de pélites discordants et des niveaux conglomératiques intra-formationnels qui se poursuivent jusqu'à l'Albien élevé, une barre de calcaire avec ses faciès bio-détritiques indiquant la limite Albo-Cénomaniens. Le Crétacé supérieur montre une série composée d'alternance de marnes à rotalipores et de calcaires bio micritiques du Cénomaniens, à intercalations de niveaux de silex du Turonien. Le Sénonien est représenté par un faciès marneux et marno-calcaire avec des niveaux conglomératiques du Campanien. Les séries péni-telliennes ne dépassent pas le Maestrichien moyen. Elles apparaissent de deux façons différentes :

- ✿ Au Nord : en fenêtre sous les nappes telliennes, comme au Djebel Hellel, Djebel Bou- cheref et Ouaskissène, massif d'Ahmed Rachedi et au Djebel El Akhal.
- ✿ Au Sud et à l'Est : en klippe sur les massifs néritiques constantinois, cas du Djebel Grouz, Djebel Khenag et Djebel Chettaba.

b. Domaine de l'avant- pays

Les séries de l'avant-pays ont été abordées par de nombreux auteurs : A. Péron. (1883), E. Ficheur. (1893), J. Savornin. (1920), R. Lafitte. (1939), J. Bertraneu. (1955), R. Guiraud. (1973), J. M. Vila. (1977,1980), D. Aissaoui. (1984), N. Kazi Tani. (1986), D. Bureau. (1986), J. C. Lahondère. (1987), M. Chadi. (1991), F. E. Coiffait. (1992), R. Marmi. (1995), etc.... Il correspond aux formations calcaires et marneuses de la plate- forme néritique et du domaine atlasique. Il comporte l'avant- pays allochtone et l'avant- pays autochtone. (J. M. Vila, 1980).

b. 1. L'avant pays -allochtone

Les séries de l'avant pays allochtone ont été regroupées. (J. M. Vila ,1980) en deux grandes familles :

b.1.1. Une organisation Sétifienne.

b.1.2. Une organisation Constantinoise.

b.1.1. L'organisation Sétifienne

Elle est considérée comme terrains autochtones à parautochtones depuis les travaux de A. Péron (1883), J. Savornin. (1920), J. Glaçon. (1967) et M. Durand Delga. (1969). Cependant, R. Guiraud. (1973), les associe à celles du Môle néritique constantinois. À l'exception des Djebels de Guergour et de Anini qui apparaissent en fenêtre sous la nappe de Djemila, les formations allochtones Sud Sétifiennes, (au sens de J. M. Vila, 1980), présentent une grande homogénéité de caractères et constituent un vaste domaine d'écailles, développées entre Ain- Taghrouit à l'Ouest et Ain- M'lila à l'Est. Elles forment d'Ouest en Est et du Nord au Sud des alignements de reliefs de Koudiat Della, des Djebels Zdim, Youssef, Braou et Tnoutit, un peu plus au Sud les Djebels Sekrine, Kalaoun, Tella et Tafourer à la bordure Nord du mont du Hodna , Agmérrouel, Zana ,Hammam ,Messaouda, Mestaoua ,Azraouat, Tizourirt-Guedmane, et Hamouda au Nord du mont du Belezma. Elle comporte des séries argilo-marneuses, dolomitiques, calcaro-dolomitiques, de calcaires massifs et marneux dont l'âge va du Lias à l'Eocène. La limite Jurassique-Crétacé est marquée par un Hard-ground à encroutements ferrugineux. Les massifs de cette organisation présentent :

❖ Au Sud, ils recouvrent anormalement les plis emboutis de l'autochtone.

- ❖ Dans les Hautes Plaines Sétifiennes, ils présentent des accidents tangentiels internes jalonnés de Trias ; ce sont les écailles sétifiennes. (J. Savornin, 1920).
- ❖ Au Nord, les Djebels Guergour et Anini qui apparaissent en fenêtre sous la nappe de Djemila. (J. M. Vila et M. Leikine, 1976).
- ❖ À l'Est, les séries Sétifiennes s'intercalent entre l'unité néritique constantinoise et les écailles atlastiques des Sellaoua. (W. Wildi, 1983).

b.1.2. L'organisation Constantinoise

Les séries de l'avant-pays allochtone constantinois présentent une différenciation remarquable avec au Nord, les séries néritiques constantinoises et au Sud, les séries de type Sellaoua.

a. Le môle néritique constantinois

Ce sont des formations carbonatées du Mésozoïque. (J. M. Vila, 1980). Il correspond à des reliefs calcaires caractérisés par la tectonique cassante et des plissements à grand rayon de courbure lors des phases tectoniques alpines. Ces derniers constituent l'essentiel des massifs de Tadjenamet, d'Oued- Athménia, de Constantine, de Aïn- M'lila, d'Hammam- Meskhoutine et de Guelma.

b. Le sillon écaillé de Sellaoua

Il est représenté par des formations allochtones à sédimentation argilo-marneuse et marno-calcaire allant du Valanginien à la fin du Maestrichtien. Les plissements datent de l'Éocène supérieur, les écaillages et les chevauchements du Tortonien.

M. Chadi. (1991), propose un modèle pour l'organisation constantinoise dans lequel les épaisses séries marneuses du Crétacé supérieur-Éocène des Sellaoua représenteraient la couverture stratigraphique normale de la plate-forme constantinoise (Figure I.7).

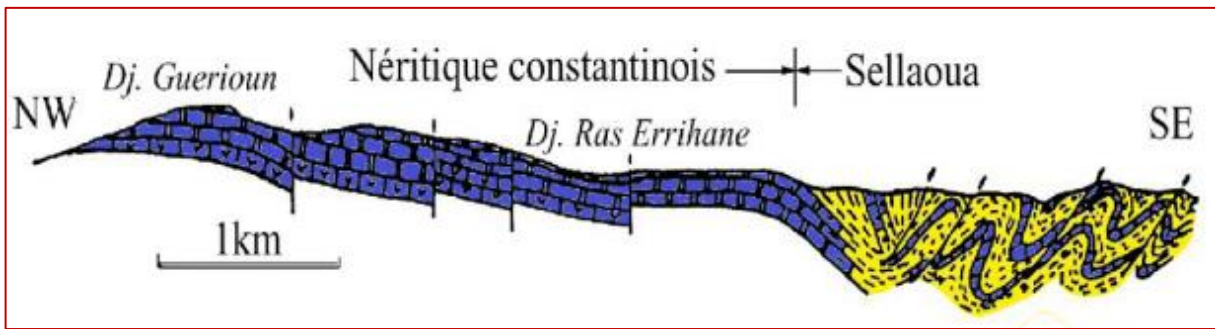


Figure I.7. Coupe géologique schématique expliquant les relations structurales et sédimentaires entre le Néritique et les Sellaoua. (M. Chadi et al, 1999 ; in : A. Mezerzi, 2015).

b. 2. Le domaine de l'avant- pays para-autochtone et autochtone

Les séries de l'avant- pays atlasique sont représentées d'Ouest vers l'Est par les formations parautochtones et autochtones des monts du Hodna, du Belezma et de Batna, le massif de l'Aurés, les Hautes Plaines d'Oum –El- Bouaghi et d'Ain- Beida et la vaste zone des diapirs. (J. M. Vila, 1980). L'avant pays se distingue par des séries sédimentaires mésozoïques très homogènes plissées et très épaisses de plateforme subsidente, à intercalations gréseuses, entre le Berriasien et l'Albien (R. Guiraud, 1973; G. Busson, 1974; L. Delfaud, 1974; J. M. Vila, 1980).

b. 2.1. Le parautochtone et l'autochtone Hodnéens

Les formations parautochtones sont représentées par la série renversée du col de Tifelouine et les terrains du compartiment Nord des failles inverses d'El Bahira (Sud de Salah- Bey), Djebel Hadjar- Labiod, Ain- Azel, et Djebel Gouzi.

Les formations autochtones des monts du Hodna correspondent à un domaine plissé où se développent une série de petits massifs qui s'étendent sur une centaine de kilomètres, d'Ouest en Est ; on distingue: Les massifs de Maadid, des Ouled-- Tebben, de Hadjar Labiod, du Boutaleb, du Guetiane, du Fourhal et du Talkhempt. (**Figure I.8**) (A. Boutaleb, 2001). Les séries mésozoïques et tertiaires autochtones des Monts du Hodna constituent la plus grande portion de la transversale Sétifienne. Elles forment une bande allongée d'Ouest en Est depuis le massif des Maadid jusqu'au Talkhempt. (A. Boutaleb, 2001).

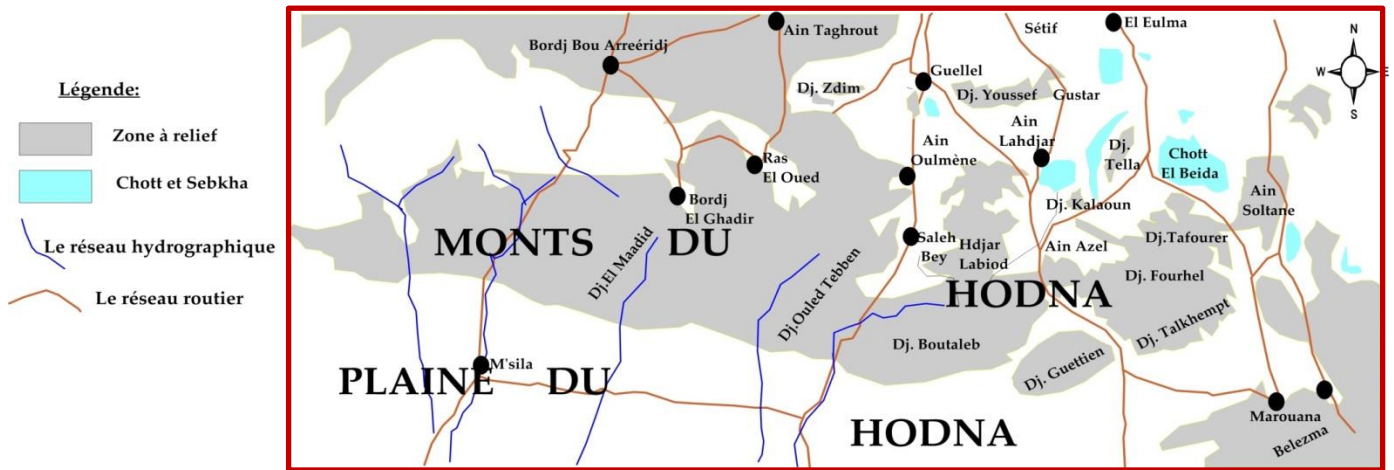


Figure I.8. Les principaux massifs des Monts du Hodna. (A. Khaldi, 1987).

Tout l'ensemble porte le nom de Monts du Hodna. Ils constituent une sorte de barrière qui sépare les plaines Sétifiennes de la dépression récente et profonde du Hodna. Ils sont formés par des roches carbonatées du Crétacé inférieur et supérieur, (calcaires, marno-calcaires et dolomies) et constituent le début de l'Atlas saharien qui développe ses grandes structures plissées et faillées jusqu'aux portes du désert. (A. Boutaleb, 2001).

b. 2.2. Les monts de Belezma

Les monts du Belezma ou monts de Batna forment deux grands ensembles : un ensemble parautochtone, représenté par les écailles du Djebel Metrassi et la série renversée d'El Guelaâ, et un ensemble autochtone dont font partie les chaînons des Djebel Bou Ari, Bou Rhioul, Refaâ, le Ravin bleu ... (A. Boutaleb, 2001).

Les Aurès constituent l'autochtone le plus méridional sur ce tronçon de la chaîne tellienne d'Algérie nord-orientale. Il appartient à l'Atlas saharien, limité au sud par « la flexure sud atlasique » ou l'Accident sud atlasique qui le sépare de la Plateforme Saharienne au Sud. L'Aurès comprend un ensemble de monts qui forment avec les Nemenchas le prolongement oriental de l'Atlas Saharien. (A. Boutaleb, 2001).

b. 2.3. Les Monts de l'Aurès

Les Aurès constituent l'autochtone le plus méridional sur ce tronçon de la chaîne tellienne d'Algérie nord-orientale. Ils appartiennent à l'Atlas Saharien, limités au Sud par « la flexure sud atlasique » ou l'accident sud atlasique qui le sépare de la plate-forme saharienne au Sud. La structure de ces massifs est bien connue depuis les travaux de (R. Lafitte, 1939).

Elle est représentée par des vastes plis plus au moins réguliers orientés Nord-Est et Sud-Ouest, esquissés lors d'une phase tectonique post- Lutétienne ayant abouti à l'émersion de ce relief.

I.7.2. Les phases tectoniques

La période préectogénique a commencé dès le Trias, la chaîne alpine d'Algérie s'est surtout structurée au cours des phases tectoniques tertiaires. La structuration du bassin maghrébin est héritée d'une structuration ancienne. (R. Guiraud, 1973), il s'agit d'un ancien accident fracturé profond coïncidant actuellement avec la flexure sud atlasique qui sépare la plateforme saharienne stable des domaines de l'avant pays de la chaîne des Maghrébides. (R. Guiraud, 1973 ; D. Bureau, 1984 et 1986).

I.7.2. 1. Les phases tectoniques mésozoïques

Depuis les anciens travaux jusqu'à nos jours, les auteurs confirment que le Trias correspond à une période de distension généralisée, accompagnée d'un volcanisme basique contemporain à une sédimentation argilo-gypseuse dominante. (D. Bureau, 1970 ; R. Guiraud, 1973 ; D. Aissaoui, 1984). Durant le Jurassique inférieur une subsidence différentielle provoquée par la distension et qui continue jusqu'à la fin du Crétacé inférieur marquée par une direction générale des structures E-W, caractéristique des bassins maghrébins. (P. Deleau, 1938 ; G. Durozoy, 1960 ; C. Voûte, 1967).

Selon plusieurs auteurs, (M. Durand Delga, 1955 ; R. Guiraud, 1973 ; D. Obert, 1974, M. Leikine et B. Velde, 1974), deux phases tectoniques sont localisées au passage Jurassique –Crétacé et au Crétacé supérieur.

a. La phase du Jurassique supérieur

Elle est particulièrement marquée dans les Babors (M. Durand Delga, 1955 et D. Obert, 1981) et dans l'Atlas Saharien. (N. Kazi Tani, 1970 et 1986). Cette phase tectonique est attestée par des discordances angulaires qui marquent la base du Crétacé inférieur (E. Ficheur, 1893 ; J. Savornin, 1904 ; M. Durand Delga, 1955).

b. La phase anté- Sénonienne

C'est une phase de compression associée à des plis E-W. (M. Durand Delga, 1955 ; P. Deleau, 1938). Dans l'avant- pays autochtone, la tectonique anté- sénonienne est connue depuis les travaux de J. Bertraneu. (1952) dans le massif du Boutaleb et dans la

région du Hodna. Ultérieurement et dans le même secteur, R. Guiraud. (1990), montre que cette phase est caractérisée par une compression NNW-SSE à sub- méridienne, et d'après lui, il s'agit en général de bombements accompagnés parfois de cassures orientées au NW au NE ou à l'ENE (Boutaleb, Khenchela). Certaines cassures ont permis à des pointements triasiques de la mise en surface, comme le cas d'Annoual dans le Boutaleb. Les structures issues de cette phase, sont souvent déversées vers le Sud, et sont liées à des discordances, des lacunes et des intercalations détritiques comme le cas de l'ensemble des massifs constantinois, (lacune régionale du Turonien supérieur et Sénonien inférieur), décrit par G. Durozoy. (1960).

I.7.2. 2. Les phases tectoniques tertiaires

a. La phase fini-Lutétienne, (l'Éocène)

Cette phase compressive se situe vers la fin du Lutétien, c'est la phase atlasique. (R. Guiraud, 1973), fini-Lutétienne (M. Durand Delga, 1955 et al), priabonienne. (J.M. Vila, 1980). Elle marque la fin d'un grand cycle sédimentaire. (Y. Aris ,1994). Cette phase aurait structuré la chaîne calcaire, les flyschs et les séries telliennes en lames ou en plis couchés à vergence Sud (**Figure I.9**). Dans le domaine autochtone externe, elle est manifestement la plus évidente, elle montre une direction de raccourcissement NW-SE. (J. M. Vila, 1980).

b. Les phases du Miocène

En Algérie du Nord, il existe deux phases tectoniques compressives durant cet épisode : une phase se situant au Miocène inférieur et une phase attribuée au Miocène supérieur (Tortonien).

b. 1. La phase Miocène inférieur

Cette phase est caractérisée par une déformation compressive générale qui s'est manifestée au Burdigalien à travers tout le Nord-Ouest de la marge de la plaque africaine (R. Guiraud et al. 2005). La partie occidentale de la plaque d'Alboran continue sa migration vers l'Ouest, pour entrer finalement en collision avec la marge rifaine de l'Afrique. Cette migration contribue à l'ouverture du bassin Nord Algérien. (W. Wildi, 1983). Elle est responsable des déformations suivantes :

- ❖ La mise en place des complexes volcano-plutoniques. (J. P. Bouillin, 1977).
- ❖ Des structures plissées, au sud du domaine kabyle. (J. M. Vila, 1980).
- ❖ Le bombement de l'aplomb de la Kabylie méridionale. (J. M. Vila, 1980).

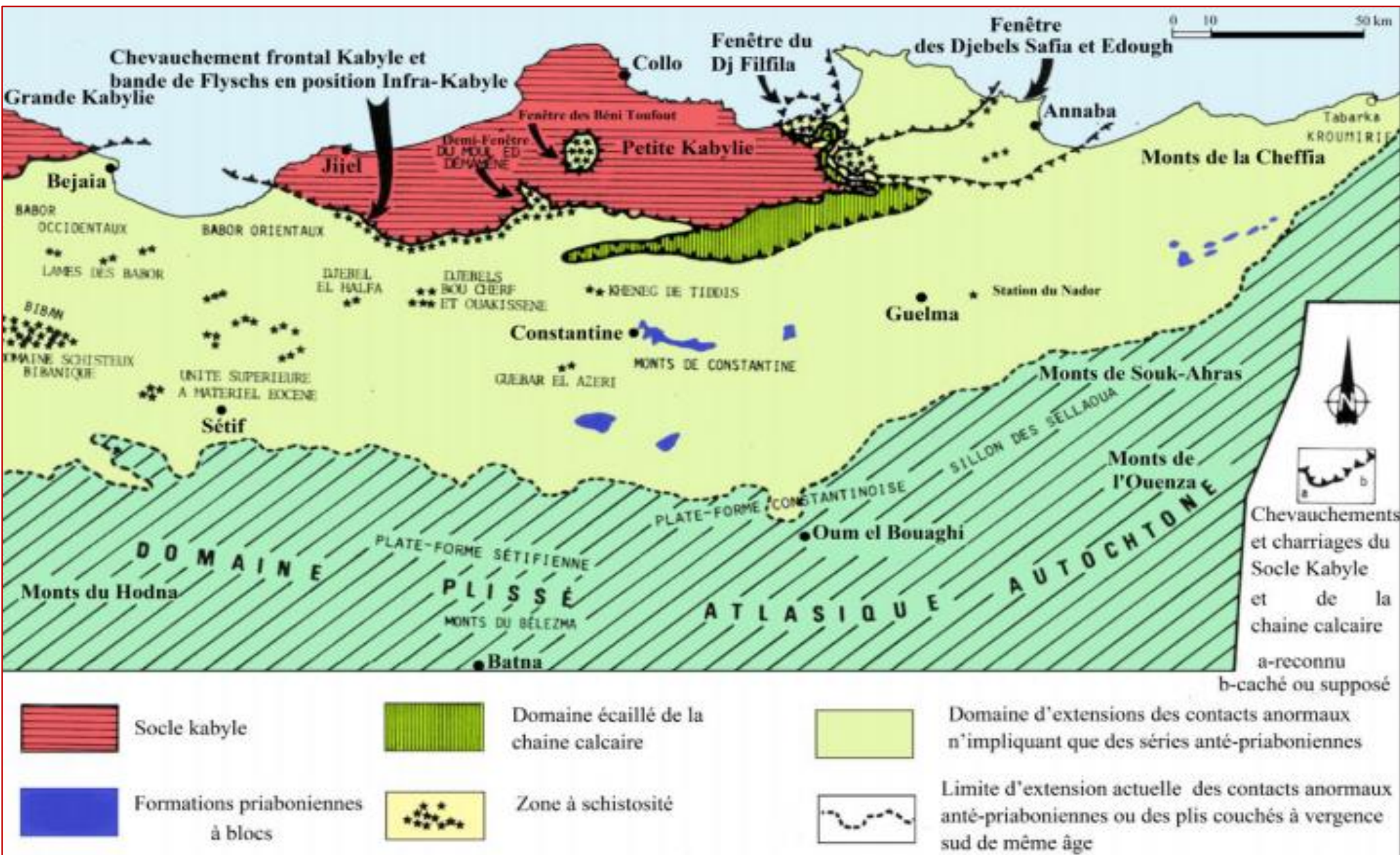


Figure I.9. Localisation des structures et des formations imputables à la tectonique priabonienne (J. M. Vila, 1980)
In A. Mezarzi, 2015

b. 2. La phase alpine tangentielle Tortonienne

Pour [J. M. Vila \(1980\)](#), c'est la phase majeure Tortonienne à vergence sud qui est responsable des vastes recouvrements anormaux impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur dont la nappe numidienne. Elle serait responsable des grands chevauchements vers le Sud des unités méridionales à nummulites, des unités Sud-Sétifiennes et des écailles de Sellaoua, ainsi que des plissements à axes E-W et la genèse des plis emboutis dans les monts du Hodna. Selon le même auteur, cette phase est responsable de la genèse de la nappe néritique constantinoise, des unités allochtones des Sellaoua, de l'ensemble Sud-Sétifien et des unités méridionales à nummulites.

❖ I.7.2. 3. La tectonique récente

Cette phase tectonique post-nappes est responsable de l'orographie actuelle. C'est la Phase post- Pontienne et post- Pliocène, (néotectonique). Elle a induit le comblement des bassins Mio-Pliocènes, alimentés par la destruction des reliefs environnants. La tectonique récente, (**Figure I.10**) est marquée par des déformations plicatives qui sont essentiellement localisées dans les confins Algéro-Tunisiens et les monts de Souk- Ahras, la déformation des dépôts villafranchiens et par l'effet des grandes failles verticales. Selon [R. Guiraud. \(1990\)](#), cette phase est responsable de la mise en surface de certains pointements triasiques.

Dans le constantinois, [J. M. Vila. \(1980\)](#) et [P. E. Coiffait. \(1992\)](#), considèrent que les formations liées à la tectonique récente sont représentées par des failles normales, de directions variables, en bordure des massifs calcaires Jurassico-Crétacé.

I.8. La géologie locale :

I.8. 1. La stratigraphie des Monts du Hodna

La zone d'étude couvre deux domaines paléogéographiques, qui sont : le domaine de la plate-forme Sétifienne au Nord et le domaine Hodnéen au Sud qui occupe méridionalement la région de Sétif. (**Figure.I.11**).

D'après de nombreux auteurs. ([J. Savornin, 1920](#); [J. Glaçon, 1967](#); [R. Guiraud, 1973](#); [J. M. Vila, 1980](#)), deux ensembles sont à distinguer :

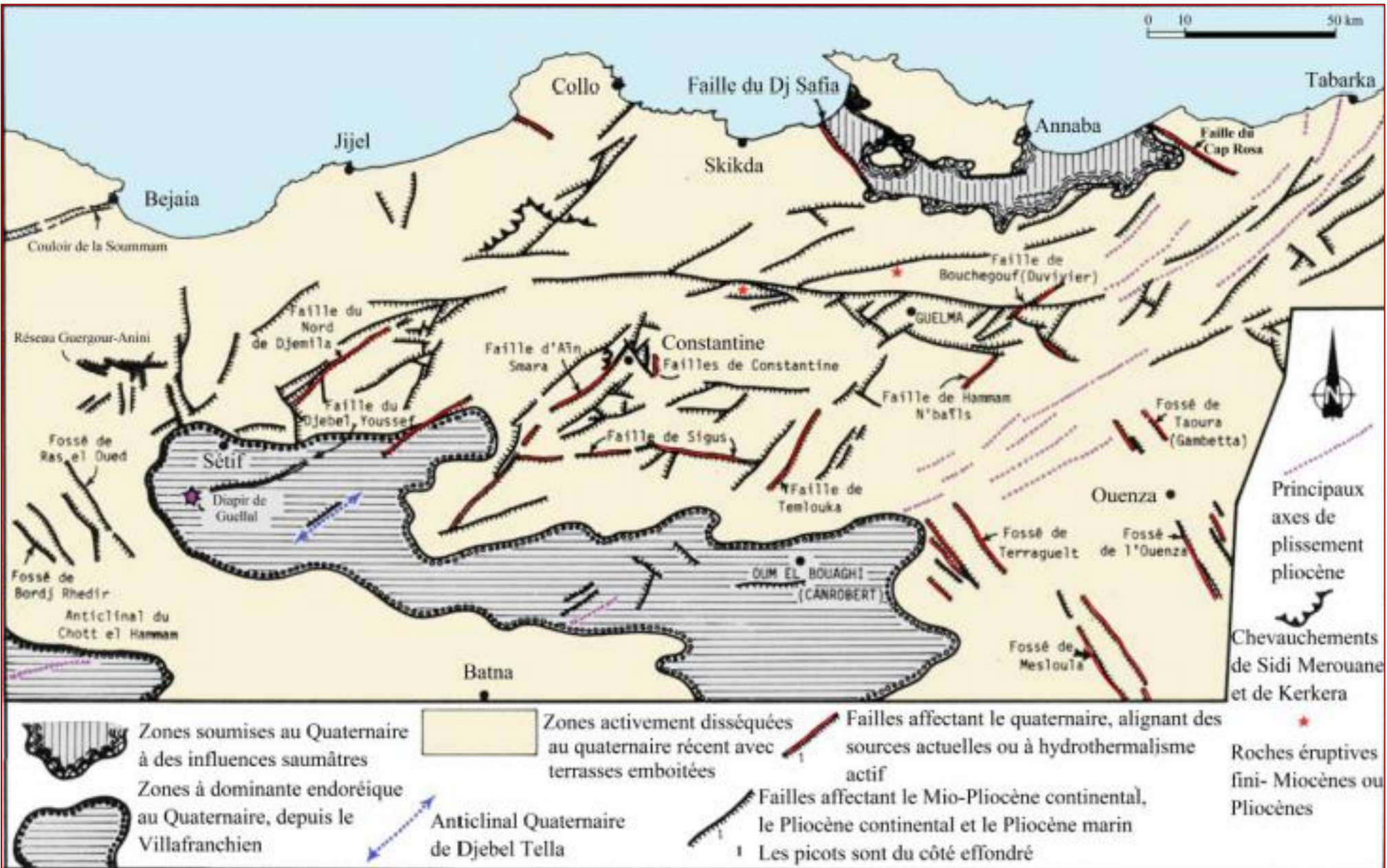


Figure I.10. Représentation schématique des principaux effets de la néotectonique. (J. M. Vila, 1980)
(In Mezarzi, 2015)

- ❑ Au Sud, l'autochtone essentiellement carbonaté, d'âge Jurassique et Crétacé, représenté dans la partie des monts du Hodna par les Djebel Boutaleb et Fourhal d'allongement ENE-WSW.
- ❑ Au Nord, le domaine des nappes de charriage avec l'ensemble allochtone Sud Sétifien représenté du Sud au Nord par l'unité inférieure de Djebel Kalaoun et l'écaille de Djebel Sekrine.

Les terrains et les structures entourant la zone d'étude (**Figure.I.11**) sont résumés par plusieurs auteurs tels que : [J. Glaçon. \(1967\)](#) ; [R. Guiraud. \(1973\)](#) ; [J. M. Vila. \(1980\)](#).

I.8. 1.1. Les terrains triasiques

Les affleurements triasiques de la région d'étude ont été décrits par plusieurs auteurs : [J. Savornin. \(1920\)](#), [J. Bertraneu. \(1955\)](#), [J. Glaçon. \(1967\)](#), [J. M. Vila. \(1980\)](#), [R. Guiraud. \(1990\)](#), [A. Boutaleb. \(2001\)](#), [A. Mezerzi. \(2015\)](#), etc.... Ils correspondent aux formations les plus anciennes connues à l'affleurement dans la région d'étude, Ils n'affleurent jamais en position stratigraphique normale, sous les assises liasiques, mais, au contraire, ils se présentent en pointements diapiriques et en lames injectées le long des accidents tectoniques, sans aucune stratification. Le complexe triasique est constitué essentiellement d'argilites bariolées et gypse. Il s'agit surtout d'argillites bigarrées, d'évaporites, de roches carbonatées, (calcaro-dolomitiques, des cargneules, des grés et marnes bariolées), et des roches vertes.

Le Trias affleure en plusieurs endroits ; au Nord de Ain- Azel (Koudiat -el -Bassour), au Nord-Est de Salah- Bey, (El Maafer), au front de l'allochtone sud Sétifien (Draa- el- Djebbas), au Sud-Ouest de Salah- Bey (El- Bahira), dans le massif du Boutaleb (Annoual, Bouich et El- Hamma), et au Sud-Est de Ain- Azel le long de l'axe anticlinal Gouzi-Debba (diapir d'El Gouzi).

I.8. 1.2. Ensemble parautochtone et autochtone Hodnéen

Les différents ensembles lithostratigraphiques représentés dans les monts du Hodna, (**Figure. I. 12**), sont résumés d'après les auteurs suivants : [J. Savornin. \(1920\)](#), [J. Glaçon. \(1967\)](#), [R. Guiraud. \(1990\)](#), [J. M. Vila. \(1980\)](#), [A. Boutaleb. \(2001\)](#). Les formations de cet ensemble comportent des termes allant du Jurassique jusqu'au Miocène.

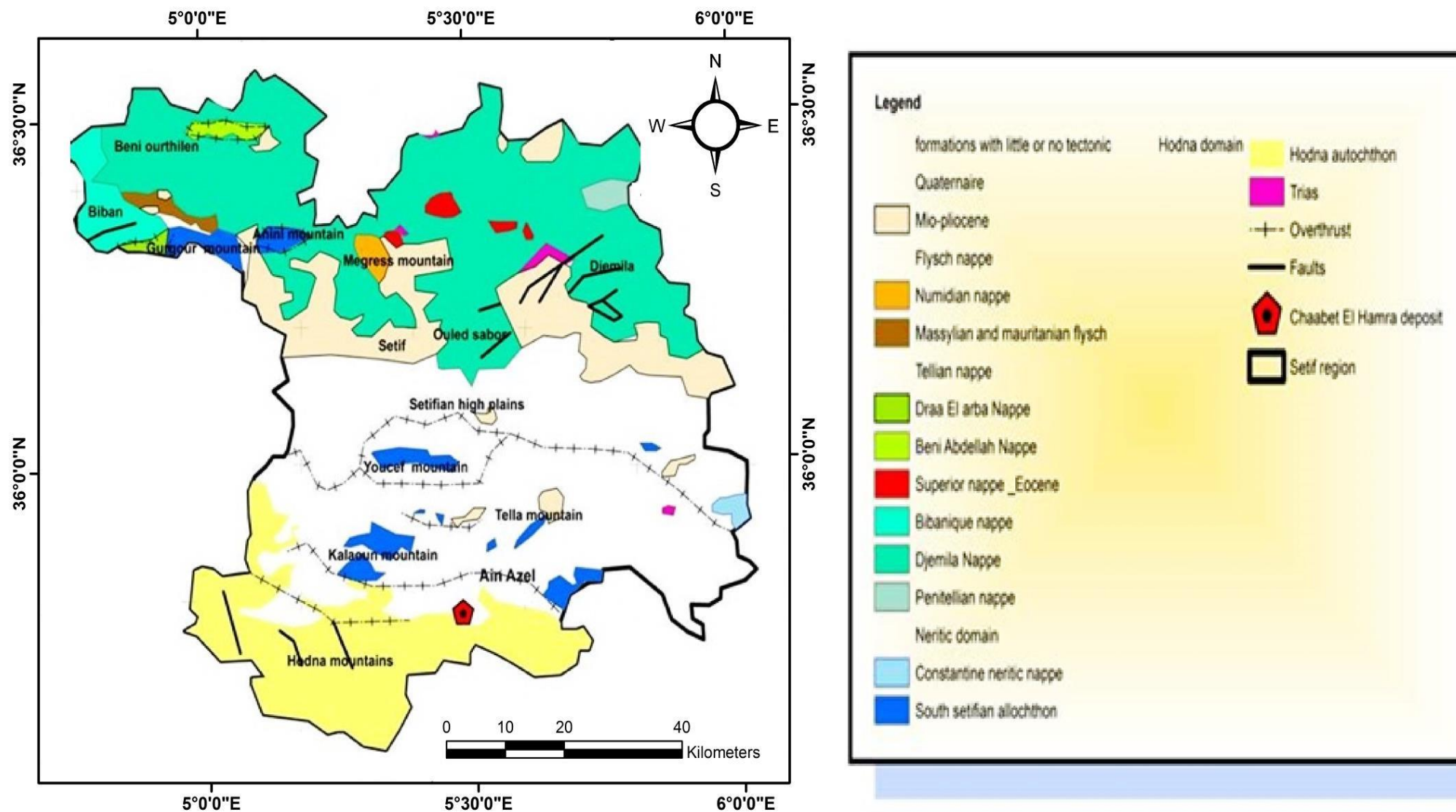


Figure I.11. Schéma structural de la région de Sétif montrant le cadre de la géologie régionale de la zone d'étude. (J. M. Vila, 1980)

❖ **Le Jurassique** : Les affleurements Jurassiques recouvrent des surfaces considérables et sont surtout développés à l'Est de Ain- Azel. Ils sont essentiellement calcaro-dolomitiques et représentés par les étages suivants :

- **Le Lias** : il est essentiellement calcaro-dolomitique en bancs massifs, mal lités à algues. Au sommet, il devient plus fossilifère avec quelques niveaux de calcaires à silex et des dolomies à nodules siliceux. Cette série affleure sur une centaine de mètres d'épaisseur, il s'agit de Lias moyen à inférieur à Toarcien.
- **Lias supérieur (Toarcien)**: le lias supérieur est représenté par des faciès marneux à ammonites, ce sont des marnes jaunâtres grisâtres et blanchâtres avec plaquettes calcaires et des marno-calcaires. Le toarcien ne dépasse pas une vingtaine de mètres.
- **Le Dogger** : il est représenté par des calcaires noduleux rouges et des marnes à ammonites. Ce sont d'abord une centaine de mètres de calcaires argileux, surmontée par 40 mètres de couches marneuses, puis 50 mètres de dolomies et enfin la série se termine par 40 mètres de formations marneuses à nombreuses intercalations de calcaires à Bélemnites. L'épaisseur de l'ensemble varie de 200 à 300 mètres.

❖ **Les formations crétacées**

Le Crétacé affleure largement dans les monts du Hodna et constitue la couverture normale des noyaux jurassiques, il est représenté par les termes suivants:

- **Berriasien Sup-Valanginien inf.** : cette formation est constituée essentiellement par des calcaires marneux extrêmement fins, d'âge attribué au berriasien supérieur à Valanginien inférieur grâce aux ammonites pyrriteuses. Le sommet s'enrichit en éléments détritiques.
- **Le Valanginien** : il est essentiellement marneux et à marnes silteuses gris-verdâtres à rares intercalations de calcaires à la base, pour devenir gréseux en bancs épais vers le sommet.
- **L'Hauterivien** : il est essentiellement dolomitico-gréseux et se caractérise par l'apparition de calcaires dolomitiques. Il comprend des dolomies massives et rouges, alternant avec des grès, des dolomies gréseuses plus ou moins quartzitiques et quelques niveaux argilo-marneux. Les dolomies sont souvent minéralisées en Pb-Zn-Fe (Menes, Chaabat el Hamra, Kherzet Youcef et Kef Aoumar). La série néocomienne peut atteindre 1000 mètres d'épaisseur.

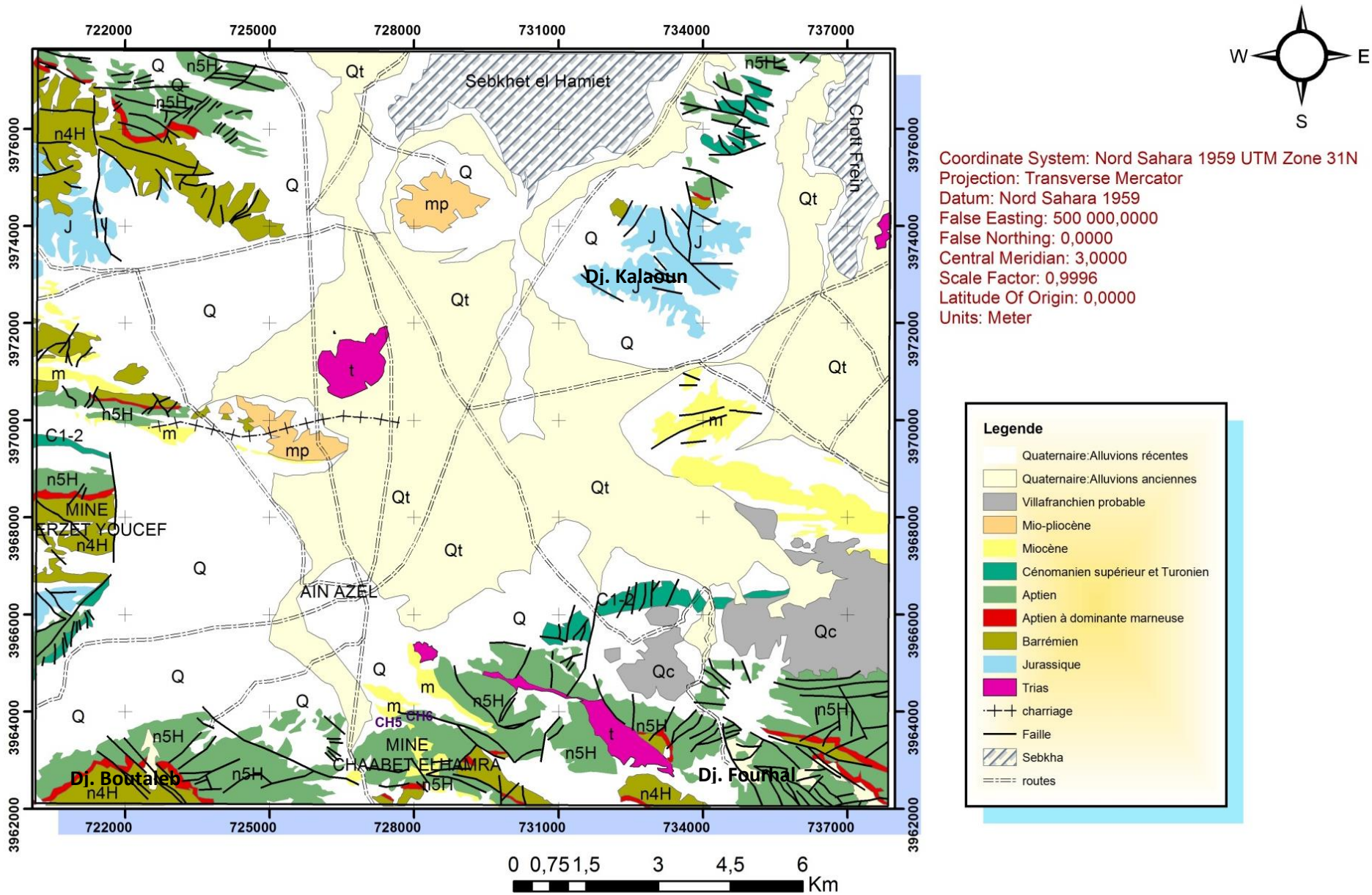


Figure I.12. Carte géologique de la région d'étude, extrait de la carte géologique de Ain -Azet et Ain- Lahdjar, 1/50000

(J. M. Vila, 1980, modifiée).

- **Le Barrémien** : il s'agit d'une série complexe et très variée, on y rencontre des calcaires à lumachelles, des dolomies, des grès et des minces intercalations argileuses ou marneuses. La série barrémienne se caractérise par la présence des lumachelles à petites huitres à la base et par l'apparition des orbitolinidés au sommet. Elle atteint près de 700 mètres d'épaisseur et affleure largement dans le massif de Hadjar Labiod. À sa base, elle est définie par une faune supposée du Barrémien: *Exogyra boussinganti*. (J. Glaçon, 1967); et à son sommet par le genre *Puchelnicères* qui marque l'Aptien inférieur. (R. Guiraud, 1973).
- **L'Aptien inférieur** : il s'agit d'une série à dominante marneuse avec des intercalations d'argiles verdâtres dures, de petits bancs de grès et de calcaires marneux à Orbitolines. C'est la formation « argilo-calcaire-gréseuse » au sens de R. Guiraud. (1973), la série pouvant dépasser les 100 mètres d'épaisseur.
- **L'Aptien supérieur** ; il commence par une barre dolomitique de 10 à 20 mètres d'épaisseur. (J. Glaçon, 1967), repère stratigraphique minéralisé, et se poursuit par des calcaires en gros bancs bien lités, des argiles et des marnes. L'épaisseur de l'ensemble varie de 300 à 350 mètres.
- **Albien-Vraconien-Cénomaniens inférieurs** : l'Albien inférieur n'a pas été caractérisé dans les chaînons orientaux, il correspond à un hard-ground. Au Djebel Hadjar-Labiod, le Vraconien repose directement sur l'Aptien supérieur ; il est constitué par un ensemble de calcaires en petites dalles de grès et de marnes gréseuses jaunes. Au-dessus, on a des intercalations de calcaires marneux en plaquettes et enfin au sommet, le Cénomaniens marneux, (inférieur) épais de 250 à 300 mètres avec une très riche faune de Lamellibranches.
- **Le Cénomaniens supérieur et Turonien** : À la base des calcaires dolomitiques à rognons de silex clairs et à lits de chailles blanches ou beiges, c'est le Cénomaniens supérieur, (100 m).
- **Le Turonien** : il est également carbonaté, représenté par des marnes et des calcaires dolomitiques à débris d'hippuritidés, dont l'épaisseur ne dépasse pas les 100 mètres.
- **Le Sénonien** :
Le Maestrichtien est transgressif dans la partie occidentale du Hodna, il correspond à des calcaires gris compacts avec des intercalations marneuses. La faune y est abondante avec des Oursins, des Inocérames, des Gastéropodes et de nombreux Lamellibranches. Cette formation a une épaisseur de 150 à 200 mètres et elle est constituée de calcaires massifs. Les calcaires du Maestrichtien sont bioclastiques à

débris de bryozoaires et échinides. Le Coniacien et le Santonien sont nombreux, ils deviennent ensuite calcaires. La limite Santonien-Campanien est caractérisée par un niveau calcaire peu épais à *Inoceramus regularis* très constant. Le Campanien est marneux ou à calcaires crayeux à faune très abondante, (Ammonites, Oursins, Huîtres, Plicatules), à l'Est, il ne présente que des Foraminifères.

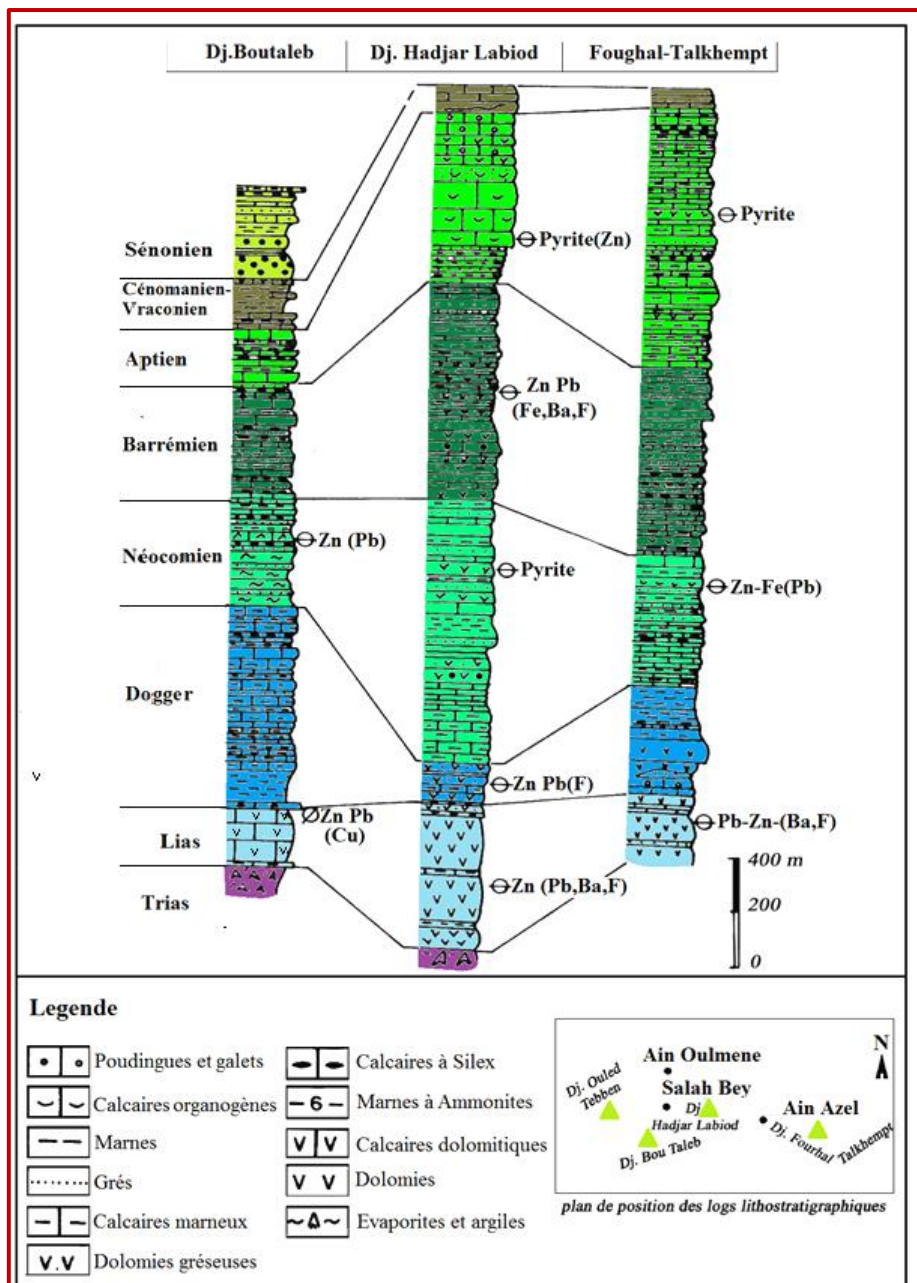


Figure I.13 Colonne lithostratigraphique des massifs des Monts du Hodna. (Compilation faite par A. Boutaleb, 2001 à partir des travaux de J. Glaçon, 1967; R. Guiraud, 1973; J. M. Vila, 1980)

❖ **Le Tertiaire**
 ▪ **Le Paléocène Eocène**

Les formations du Paléocène-Eocène n'affleurent que sur des surfaces réduites autour des massifs occidentaux, (Maadid et Ouled- Tebben). Le Tertiaire débute par des

marnes sombres attribuées au Dano-Montien. Localement s'intercalent des lumachelles à *Cardita beumonti*, *Exogyra overwegi*. Plus haut se situe un repère à *Ostréa aucapitenei*. La microfaune comprend beaucoup de formes benthoniques à côté de Globigérines cf. *belli* et *Globorotalia Velascoensis*. L'Eocène calcaire est constitué essentiellement par des calcaires à silex et des niveaux phosphatés. Ces derniers, d'aspect souvent conglomératique peuvent renfermer d'abondants petits galets de silex. Ces niveaux livrent une abondante faune de vertébrés et surtout des sélaciens comme *Myliobatis dixoni* et *Lamna oblique*. Au sommet de cette série un repère à nodules de calcédoine et géodes de quartz. La série débute par une couche bréchoïde phosphatée qui repose directement sur le Crétacé supérieur. Le Lutétien supérieur débute par des niveaux dolomitiques massifs surmontés par une série de calcaires grisâtres à jaunâtres lités, marneux ou gréseux, souvent plus ou moins dolomités, alternant avec des marnes grises ou verdâtres. Certains niveaux sont pétris de *Thersithéa ponderosa*, *Hemithersthéa maroccana* et *Hedbergella ventricosa*.

▪ **Le Miocène**

Il est marin, transgressif. Le Miocène débute par des poudingues rouges et des grès à Pectinidés et Lithothamniée. Les poudingues remanient de gros blancs d'Éocène à silex et de Crétacé supérieur, (calcaires à Orbitoides et Laffitéines). Au-dessus, une centaine de mètres de calcaires gréseux fauves ou roux à *Pecten convexior*, *P. josslingi* et *Ostrea crassissima* représentant le Burdigalien supérieur. Au-dessus, une puissante série marneuse se développe, surtout sur les périphéries du Boutaleb.

I.8. 1.3. Séries à Jurassiques intermédiaires de l'unité inférieure de Djebel Kalaoun

Cette unité constitue l'essentiel de la masse de Djebel Kalaoun à l'Ouest de Beida- Bordj. Elle comporte les termes suivants : (**Figure I.14**) :

❖ **Jurassique dolomitique**

Il s'agit de dolomies grises ou noires d'épaisseur d'environ 100 mètres, ces dolomies constituent le cœur de l'anticlinal de l'unité inférieure et identique à celles de l'ensemble Sud Sétifien.

- **Le Malm** : Le Malm est représenté par quelques mètres de biomicrites à Calpionelles. La base de la série est constituée par des calcaires fins à radiolaires et saccocoma, il peut s'agir de Kimméridgien ou Portlandien. L'ensemble ne dépasse guère une dizaine de mètres.

❖ **Néocomien**

Il s'agit d'un ensemble bien lité de calcaire fin en petits bancs de 5 à 60 cm dont l'épaisseur est de 150 à 200 mètres. Ces calcaires sont à patine claire, blanche ou jaunâtre; la cassure présente la même couleur de patine. Comme faune on a les *Tintinnopsella Longa*, par ailleurs *Calpionellites Darderi* ont daté le Valanginien inférieur, le Berriasien a été daté par *Tintinnopsella Carpathice*.

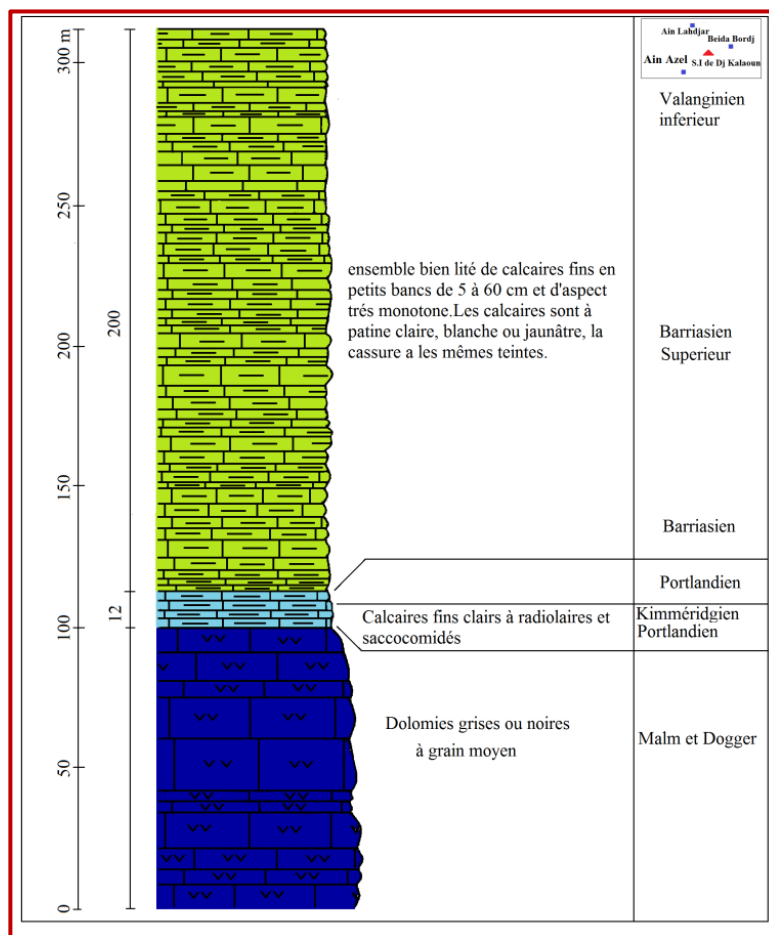


Figure. I.14 : Log lithostratigraphique de l'échelle inférieure de Djebel Kalaoun. (J. M. Vila, 1980).

I.8. 1.4. Ensemble allochtone Sud-Sétifien

Il compose les séries des Djebels ; Sekrine, l'échelle d'Ain- Lahdjar, Koudiat- Tella et séries supérieures du Djebel Kalaoun. Cet ensemble comporte des formations allant du Jurassique jusqu'au Miocène. (Figure I.15).

➤ **Les formations Jurassiques**

Le Jurassique comporte les termes suivants :

- **Le Lias** : Le Lias dolomitique affleure au Djebel Tafourer, au Djebel Sekrine et au Djebel Youssef. Parfois, il correspond à une mince série argilo-marneuse qui recouvre un ensemble dolomitique assez épais. Il peut dépasser une centaine de mètres d'épaisseur.
- **Le Dogger** : Il a été reconnu au Djebel Sekrine et au Djebel Tafourer. Cette série est constituée par des lentilles de calcaires gris en petits bancs à grains fins qui auraient livré des débris d'Ammonites. En lames minces leur faciès à « Filaments » a permis à **J. M. Vila, (1980)** de leur attribuer un âge Dogger.
- **Le Jurassique dolomitique indifférencié** : C'est une série dolomitique qui envahit la série supra-Liasique, ailleurs elles s'intercalent entre le lias daté et le Jurassique supérieur, donc elles peuvent représenter la totalité du jurassique moyen et supérieur ou le jurassique moyen seulement.
- **Le Malm** : Il s'achève dans beaucoup d'endroits, (Dj. Youssef, Dj. Sekrine) par des calcaires massifs gris en gros bancs dont l'épaisseur totale est de 80 mètres à Djebel Youssef. La datation de cet ensemble calcaire repose sur la présence dans les niveaux les plus élevés de gros débris de Lamellibranches, de Polypiers, *Clypéina jurassica* qui indique le Jurassique terminal.
- **Les formations crétacées** : les séries du Crétacé sont représentées par :
 - **Le Néocomien** : Le Néocomien représente un nouvel épisode argileux ou marneux. Il affleure largement dans l'ensemble allochtone Sud Sétifien. L'épaisseur de cette série est d'une centaine de mètres.
 - **Le Valanginien** a livré des Ammonites, (Djebel Sékrine), dans les chaînons du Sud-Est Sétifien, y a été récolté une faune à *Exogyra couloni* et des Térébratules. L'Hauterivien contient une microfaune à *Lenticulina schreiteri*. La série Néocomienne commence presque toujours par un hard-ground.
 - **Le Barrémien** : il correspond à une série complexe composée de calcaires, dolomies et des grès avec de minces intercalations argileuses ou marneuses. Il affleure pratiquement dans tous les massifs qui constituent l'ensemble allochtone Sud Sétifien, néanmoins son épaisseur augmente du Nord au Sud, (de 100 à plus de 500 mètres). La partie inférieure de cette série a livré des *Salpingoporella dinarica*, *Orbitolinopsis capuensis*, *Choffatella decipiens*. Le sommet de la série contient des niveaux à

Palorbitolina lenticularias, Néotrocholina friburgensis, Palaeodictyoconua arabicus qui indiquent le Barrémien supérieur. (R. Guiraud, 1973).

- **L'Aptien** : l'Aptien débute par un mince repère où dominent les marnes jaunâtres très caractéristiques de l'Aptien inférieur datées grâce à la présence de Palorbitolina lenticularias et de Glavelinella flandrin. Ces marnes ne dépassent guère les 60 mètres d'épaisseur. Il est surmonté d'un ensemble calcaire en gros bancs à Orbitolines, de calcaires grossiers ou noduleux à Nérinées, de biosparites à Rudistes avec de minces intercalations marneuses. Cette épaisse formation de 250 à 300 mètres n'affleure que dans les massifs septentrionaux et contient une association à Orbitolina subconcava, Cunéolina laurentii, Sabaudia minuta, des milioles et Ovaléolina reicheli.
- **L'Albien-Vraconien** : l'Albien et le Vraconien correspondent à un ensemble d'une épaisseur de 100 à 200 mètres à dominance marneuse dont le sommet peut représenter le Cénomaniens inférieur. Les intercalations à Pithonella ovalis et Favusella washitensis indiquent l'Albien supérieur et le Vraconien.
- **Le Cénomano-Turonien** : cette formation, d'épaisseur de 100 à 150 mètres, est représentée par une barre carbonatée qui débute par des niveaux dolomitiques ou par des biosparites à Orbitolina conica. Elle s'achève par des calcaires micritiques avec des faciès à Foraminifères benthiques.
- **Le Sénonien**
 - **Le Sénonien inférieur** : il a été reconnu à l'Ouest du Djebel Zdimm, où il débute par un hard-ground et ne comprend qu'une dizaine de mètres de marnes sombres.
 - **Le Sénonien supérieur** : il n'affleure qu'au Nord du Djebel Sekrine, au Djebel Kalaoun, au Chouf Et Tine et à la Koudiat Tella. Il est constitué par des barres calcaires rousses bien datées du Maestrichtien au Chouf et Tine. La série a une épaisseur qui varie de quelques mètres à 200 mètres.
- **Le Tertiaire** : Le Tertiaire comporte les termes suivants :
 - **Paléocène-Éocène** : Dans la partie centrale de l'allochtone Sud Sétifien au Chouf-Tine et à Koudiet Tella, cette formation est constituée de 10 à 20 mètres de marnes à débris d'Exogyra overwegi ou à Globigérina pseudobuloooides et à nombreux Ostracodes. L'Eocène calcaire du Sud Sétifien est caractérisé par quelques mètres

de calcaires clairs à silex, qui renferment d'abondants débris de Gastéropodes silicifiés et *Hemithersithea ventricosa*. Ce sont des biosparites à débris d'Echinodermes, de phosphates, à rares galets, silex et grains de quartz. Ces calcaires affleurent au Chouf et Tine. Des faciès identiques existent près de Beida- Bordj, du Djebel Tafourer et d'Oum- el- Adjoul

▪ **Le Miocène**

Le Miocène est constitué de conglomérats rougeâtres à la base qui ravinent largement son substratum; viennent ensuite des calcaires gréseux roux et des marnes. Il affleure sur le versant Sud du Djebel Sekrine où la discordance avoisine 30° et atteint le Barrémien. Les niveaux marneux remanient en abondance les microfaunes du Sénonien et de l'Éocène; les nombreux Foraminifères benthiques qu'ils renferment indiquent qu'il s'agit au moins du Burdigalien.

➤ **Les formations du Plio-Quaternaire :**

Dans le Hodna, le Pliocène est généralement concordant sur le Miocène. La série est d'abord détritique, à affinité deltaïque, puis marneuse et enfin envahie à son sommet par de nouveaux apports conglomératiques. Le Quaternaire est essentiellement représenté par des dépôts de pente à recouvrements détritiques et de terres arables au pied des reliefs. Ils peuvent se raccorder à des glacis des hautes plaines et des terrasses anciennes étagées des basses plaines entre Ouled Tebbene et Djebel Boutaleb.

- ❖ Glacis des hautes plaines: ces glacis sont représentés principalement par un matériel clastique anguleux et plus grossier au voisinage des montagnes. Il devient très fragmentaire vers le bas. Ce matériel est constitué de cailloux, de gravier et de quelques blocs à remplissage limono-argileux.
- ❖ Terrasses des basses plaines: dans les basses plaines, c'est la fraction fine qui prédomine; elle est composée d'argiles, de limons et des sables avec graviers disséminés dans les différentes couches.

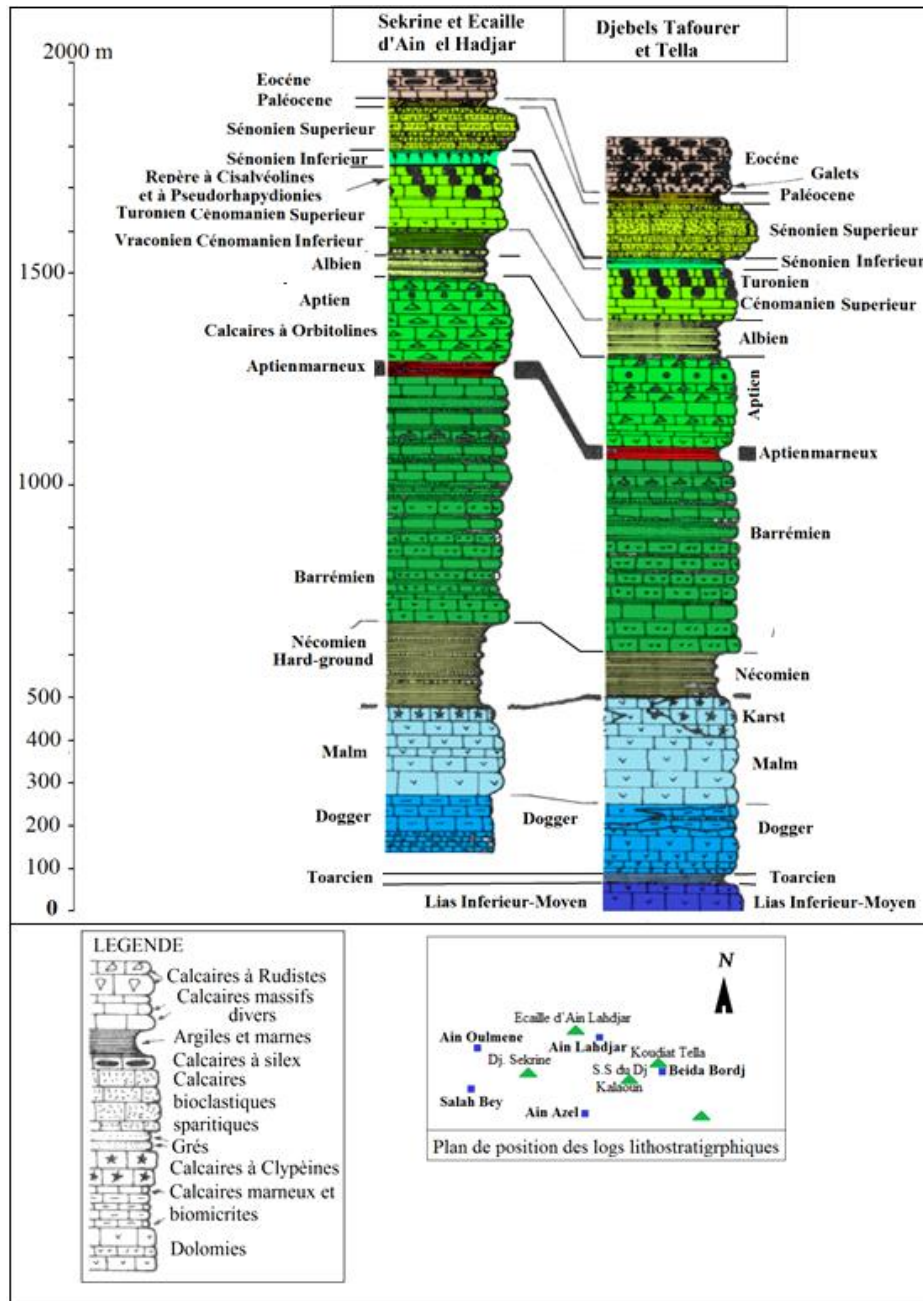
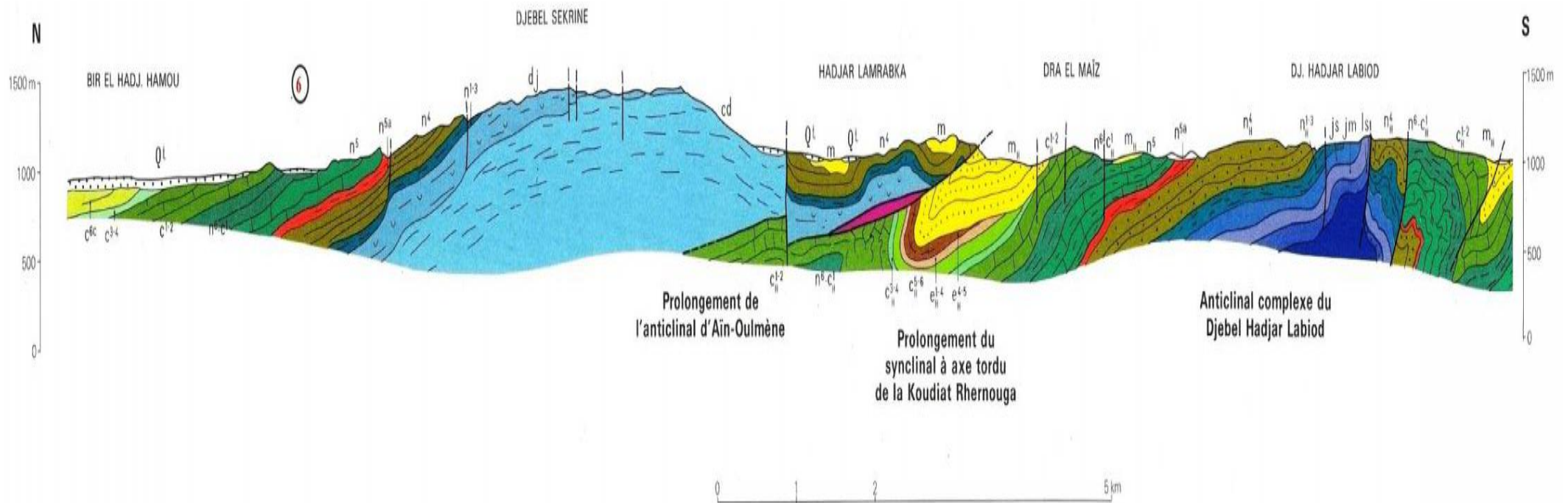


Figure I.15. Corrélation des séries typiques de l'ensemble allochtone Sud-Sétifien. (J. M. Vila, 1980)

I.8. 2. La tectonique des monts du Hodna

Dans les Monts du Hodna se distinguent deux unités tectoniques séparées par le front Sud-Sétifien. (Figure I.16).

- ❖ L'allochtone Sud Sétifien au Nord, constitué d'un vaste empilement d'écailles limitées par des cisaillements. (J. M Vila, 1980).
- ❖ L'autochtone Hodnéen au Sud, dont fait partie le Djebel Hadjar- Labiod est affecté essentiellement par trois structures tectoniques liées à l'orogénèse Alpine qui sont :



Q	Quaternaire
mp	Mio-Pliocène continental
Nappe du Djebel Sattor	
m _n	Miocène marin : grès calcareux à Méliobésiés et marnes.
e ⁶⁻⁷	Lutétien supérieur : marnes jaunâtres et lumachelles d'Huîtres.
Ecaillés d'Aïn el Ahdjar et du Djebel Sekrine	
m	Miocène : conglomérats, grès roux, argiles et marnes à Huîtres.
e ⁷⁻⁵	Éocène : calcaires massifs détritiques à Theristées silicifiées.
e ³⁻³	Paléocène : niveau phosphaté.
e ³⁻⁶	Sénonien supérieur : biosparites jaunâtres et lumacholles à Orbitoides.
e ¹⁻²	Cénomaniens supérieur et Turonien : calcaires fins ou graveleux à Miliolidés.
n ^{6-c1}	Albien supérieur (?) et Cénomaniens marneux.
n ³	Aptien calcaire à Orbitolines.
e ¹⁻⁴	Aptien marneux.
n ⁴	Barrémien calcaro-dolomitique.
n ⁵	Néocomien à Ammonites.
j ¹⁻¹¹	Passage Jurassique-Crétacé à Algues ou à Calpionelles.
d ₁	Jurassique (supérieur ?) dolomitique.
cd	Dogger (?) : calcaires marneux lités.

PARAUTOCHTONE ET AUTOCHTONE HODNÉENS			
m _n	Miocène : conglomérats, marnes à Huîtres et calcaires gréseux.	n ₆	Aptien : calcaires à Orbitolines, dolomies.
e ¹⁻⁷	Lutétien supérieur : argiles gypsifères et calcaires.	n ₅	Aptien à dominante marneuse.
e ²⁻³	Yprésien-Lutétien inférieur : calcaires à silex, calcaires phosphatés et couches à Theristées.	n ₄	Barrémien : dolomies, calcaires et grès.
e ¹⁻⁴	Dano-Paléocène à Yprésien (?) : marnes noirâtres.	n ₃	Néocomien : grès, pélites, marnes à Ammonites et Brachiopodes.
e ³⁻⁶	Sénonien supérieur : marnes à galets, marno-calcaires et calcaires parfois gréseux à Orbitoides.	j ₁	Jurassique supérieur : calcaires fins à Saccocomidés, biomicroites à Calpionelles et à Pygopes.
e ³⁻⁴	Sénonien inférieur : marnes sableuses ou à galets, calcaires, calcaires marneux, lumachelles à Ostréidés.	j _m	Jurassique moyen : calcaires varicolores à Bélemnites.
e ¹⁻⁵	Cénomaniens supérieur et Turonien : dolomies et calcaires à silex ou à Miliolidés.	l ₁	Lias supérieur marneux à Ammonites.
n ^{6-c1}	Vraconien (?) et Cénomaniens : marnes grises à <i>Aspidiscus</i> et calcaires à Ammonites, calcaires glauconieux et marno-calcaires noduleux.	l ₂	Lias carbonaté massif.
TRIAS EXOTIQUE OU EXTRUSIF		Trias : marnes beriolées à gypses bréchiqes, glaçons calcaro-dolomitiques (d1) et ophites (w)	

Figure I.16 : Coupe interprétative au 1/50.000. (Extrait de la carte géologique de Ain- Azel au 1/50.000. D'après J. M. Vila ,1977).

a. Les failles :

L'analyse du réseau de failles permet de distinguer plusieurs familles d'accidents tectoniques qui affectent les terrains carbonatés du Jurassique et du crétacé. Il s'agit :

- ❖ Des failles de Direction NE-SW et NW-SE très nettes au Djebel Boutaleb et Djebel Hadjar Labiod ;
- ❖ Des failles de direction EW de plus grande importance affectant surtout les formations de Djebel Hadjar Labiod et Djebel Fourhal. Elles se sont formées lors du plissement au moment de la formation du grand anticlinal du Hodna.
- ❖ Une faille importante de direction N-S, (faille de Kherzet- Youssef) affectant le crétacé du Djebel Hadjar Labiod sur son flanc Est. (**Figure I.18**).

b. Les plis :

Les plis ont généralement une orientation E-W. La direction WNW-ESE correspond à des synclinaux à larges rayons de courbure, représentant l'ensemble de hauts reliefs avec des axes de direction :

- ❖ NW-SE tels que ceux observés au niveau du Djebel Sekrine, Djebel Kalaoun, Djebel Gouzi et Djebel Fourhal. (**Figure I.17**).
- ❖ NE-SW rencontrés au niveau de Djebel Hadjar- Labiod et Djebel Boutaleb.

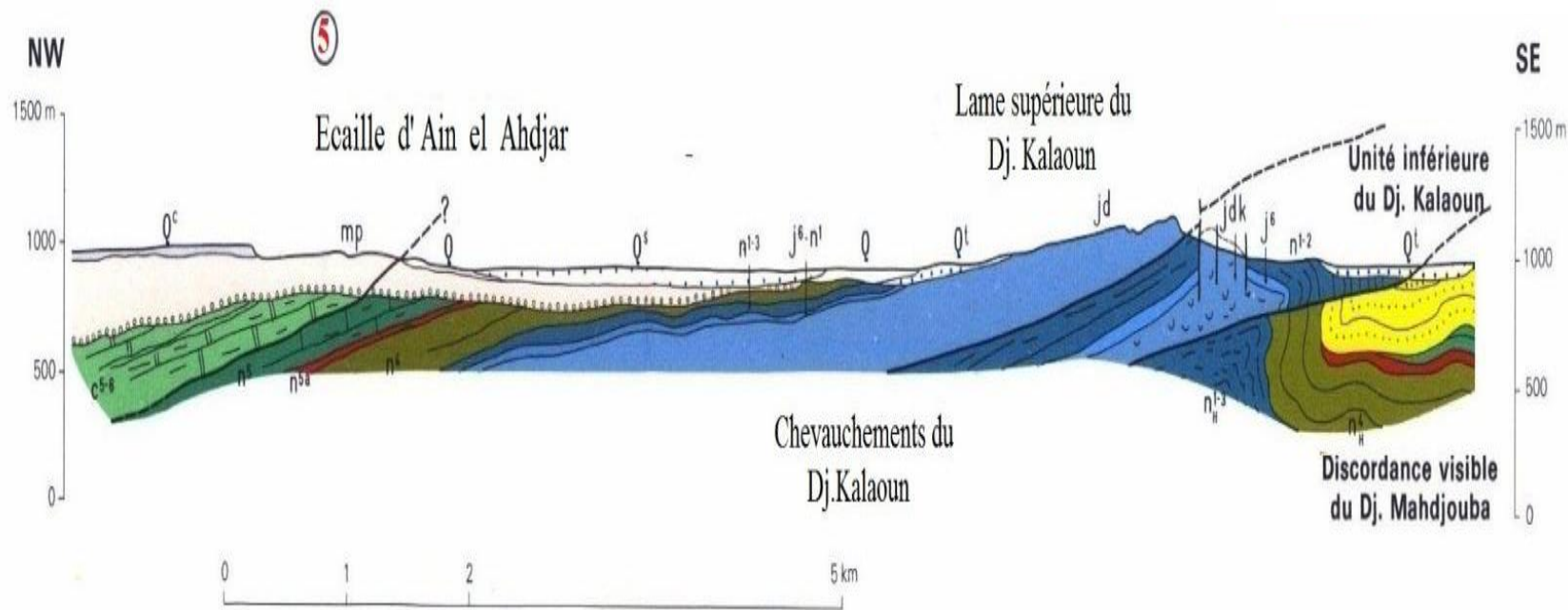
c. Les relations du Trias

Le Trias se localise en grande majorité sur les lignes de dislocation, leur relation structurale est bien différente. Au front de chevauchement, les affleurements triasiques de Koudiat el Bassour, el Maafeur et de Draa el Djebbas laissent supposer qu'ils auraient joué le rôle d'une semelle de glissement des nappes vers le Sud ([A. Mezerzi, 2015](#)). En ce qui concerne les masses triasiques d'El Gouzi et du massif du Boutaleb, ils sont situés sur de vastes failles, et son origine est clairement à la base des séries Hodnéennes. ([J. M. Vila, 1980](#)), ce sont de vraies structures diapiriques. ([J. Bertraneu, 1955](#) et [J. Glaçon, 1967](#)). La mise en place du Trias est liée principalement à des contraintes compressives de direction N-S ([R. Guiraud, 1973](#)), c'est à dire à la phase Priabonnienne et la phase Tortonienne.

I.8. 3. Les phases tectoniques

La configuration structurale actuelle de la région d'étude a laissé apparaître les traces de plusieurs phases tectoniques du cycle alpin. Les principales phases tectoniques qui sont à l'origine de ce dispositif structural actuel sont :

- **La phase anté- Sénonienne :** Cette phase est connue dans le massif du Boutaleb depuis les travaux de [J. Bertraneu \(1952\)](#), [R. Guiraud \(1990\)](#), et qui montre que cette phase est caractérisée par une compression NNW-SSE à sub méridienne et d'après lui, il s'agit en général de bombements accompagnés parfois de cassures orientées au NW au NE ou à l'ENE (Boutaleb). Certaines cassures ont permis à des pointements triasiques de la mise en surface (d'Annoual et El Hammam) dans le Boutaleb.
- **La phase fini-Lutétienne :** Cette phase compressive se situe vers la fin du Lutétien, c'est la phase atlasique ([R. Guiraud, 1973](#)), et la phase priabonienne à vergence sud au sens de [J. M. Vila \(1980\)](#). Cette phase aurait structuré les séries hodnéennes en plis et montre une direction de raccourcissement NW-SE. ([J. M. Vila, 1980](#)). Elle est marquée par l'arrêt des séries à la fin de l'Eocène. L'Oligocène qui y fait suite ne reflète plus du tout l'appartenance à une quelconque unité.
- **La phase du Miocène basal :** Cette phase marquée par un hiatus dans la sédimentation, lequel n'est rompu que par la transgression du Burdigalien supérieur. Dans certains secteurs, ce Burdigalien fossilise des structures plissées à flancs verticaux évoquant des plis coffrés au Sud du Djebel Sekrine.
- **La phase Alpine :** elle est responsable des grands chevauchements méridionaux où le Miocène est largement impliqué. C'est la phase Tortonienne qui est responsable des torsions d'axes, décrochements, des plissements à axes E-W et la genèse des plis emboutis des monts du Hodna.
- **La tectonique récente :** elle est responsable de l'orographie actuelle et la montée récente des gypses triasiques de Guellal. ([J. M. Vila, 1980](#)). Ainsi, elle est responsable des accidents cassants traversant d'Est en Ouest la partie méridionale de Djebel Sekrine et qui on fait rejouer les décrochements de même direction du Djebel Hadjar Labiod.



Q Quaternaire mp Mio-Pliocène continental

c⁵⁻⁶ **Sénonien supérieur** : calcaires gréseux roux et biosparites jaunes à Orbitoïdes.
n⁵ **Aptien calcaire** à Orbitolines et couches à *Ovalveolina reicheli* au sommet.
n^{5a} **Aptien marneux** jaune.

n⁴ **Barrémien** : calcaires massifs, dolomies, marnes et grès.
n¹⁻³ **Néocomien** argileux à Ammonites.
j⁶, n¹ **Jurassique supérieur** : calcaires à Dasycladacées du Djebel Kalaoun.
jd **Jurassique moyen-supérieur** dolomitique.

Unité inférieure du Djebel Kalaoun

n¹⁻² **Berrisien à Valanginien** : biomicrites à Calbionelles.
j⁶ **Jurassique supérieur** à Saccocomidés puis à Calbionelles.
jdk Dolomies.

m_{ii} **Miocène** : marnes jaunes, grès roux, conglomérats.
n⁵ **Aptien carbonaté** : dolomies et calcaires à Orbitolines.
n^{5a} **Aptien marneux**.
n⁴ **Barrémien** : grès, calcaires dolomies et petits niveaux marneux.
n¹⁻³ **Néocomien** argilo-péltique.

Figure I .17. Coupe interprétative au 1/50.000, (Extrait de la carte géologique de Ain- Lahdjar au 1/50.000. J. M. Vila ,1977).

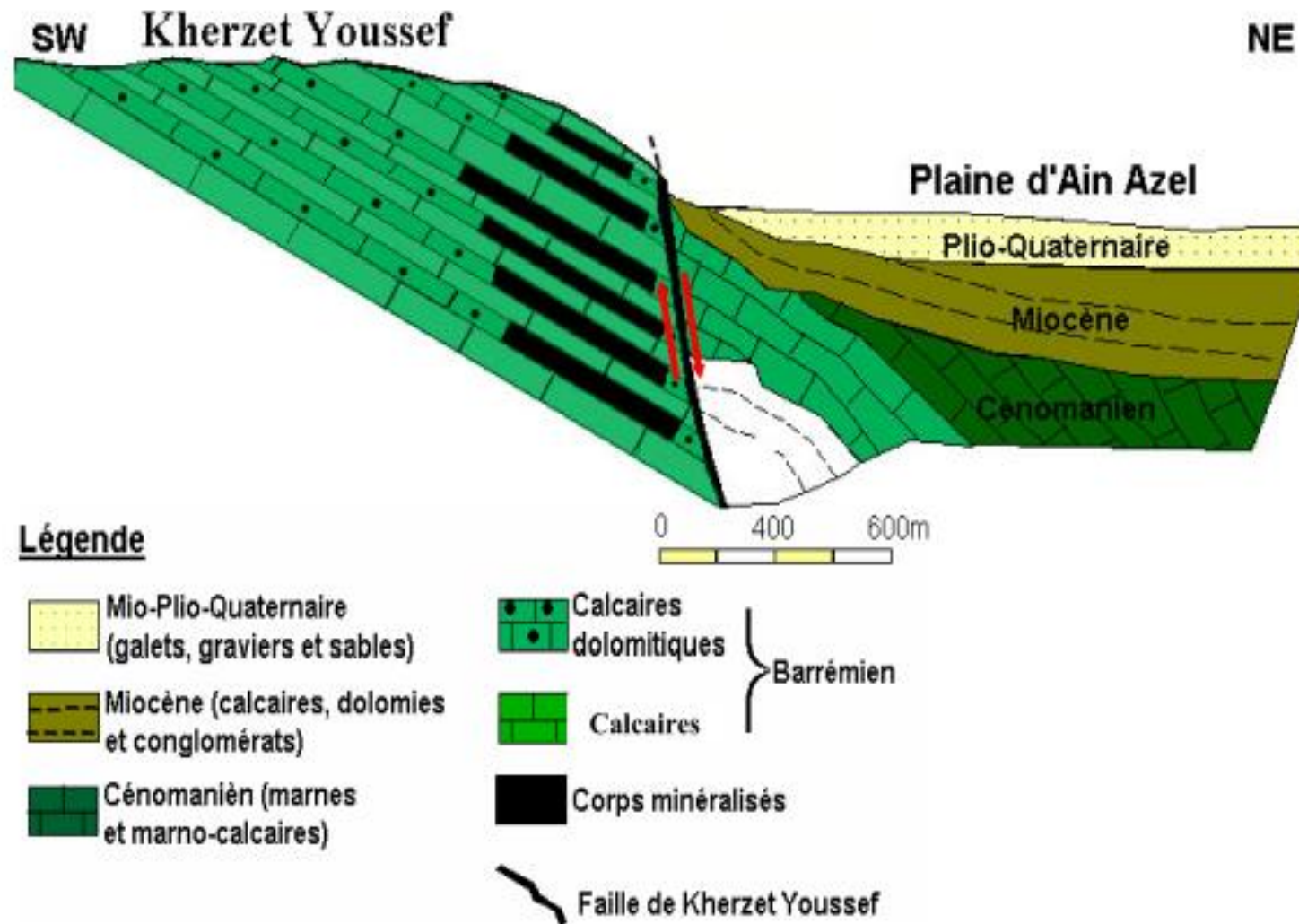


Figure L.18 : Coupe géologique schématique de la région de Kherzet -Youssef.(J. Glaçon, 1956), in L. Attoucheik, 2006

I.8. 4. La géologie locale

Les deux aquifères en question ont été captés dans le gisement de Chaabet el Hamra. Sa stratigraphie est caractérisée principalement par les dépôts du Crétacé, dont l'Hauterivien présente le plus grand intérêt, car il renferme la minéralisation. La carte géologique de ce secteur a été levée par l'E.R.E.M (1992). (Fig. I.19).

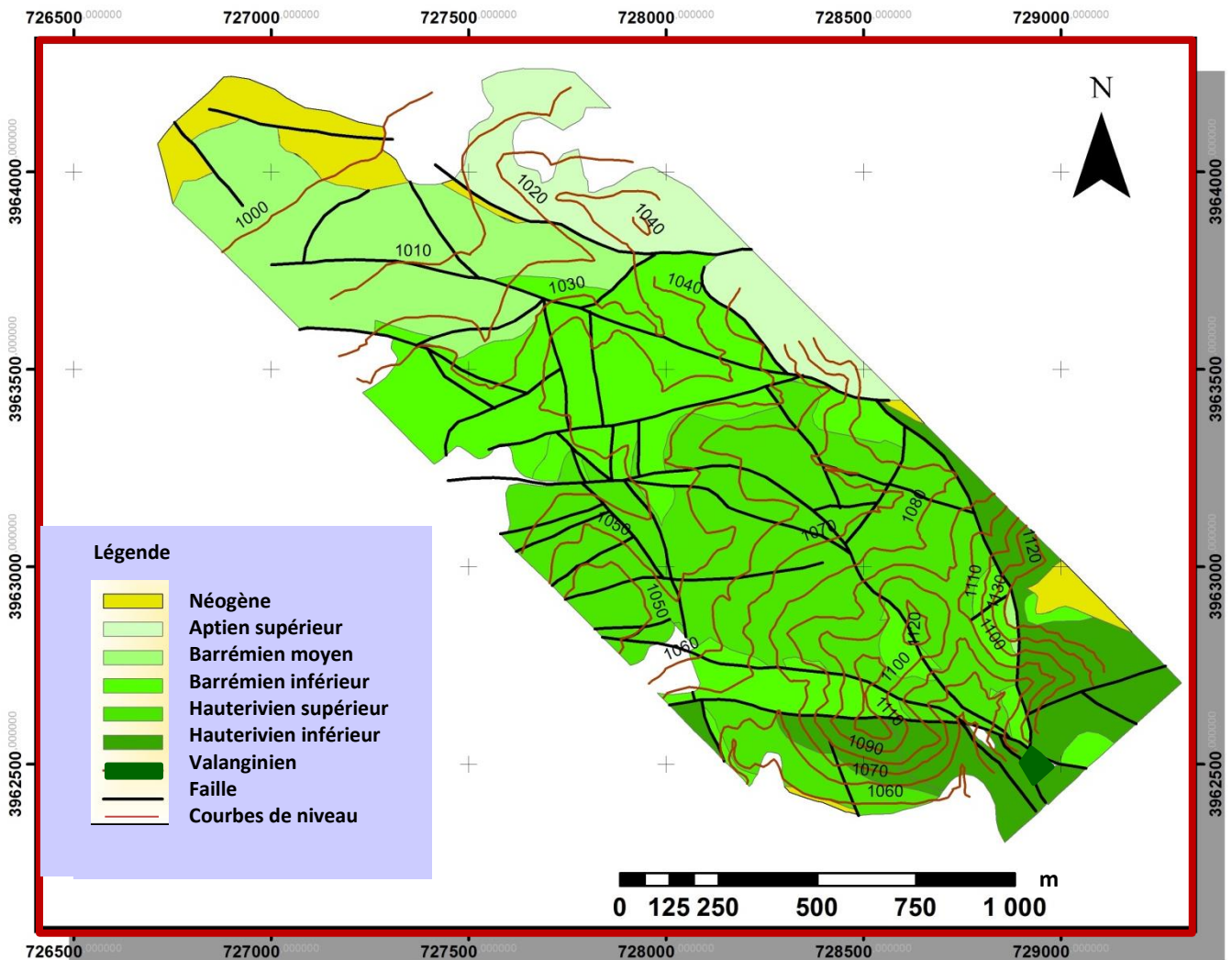


Figure I.19. Carte géologique du gisement de Chaabet el Hamra (e : 1/2000, E. R. E. M, 1992, modifiée)

I.8. 4. 1 La stratigraphie du gisement de Chaabet el Hamra, (Figure I.20)

a. Valanginien [épaisseur: 150 à 220m]: Les dépôts du Valanginien (stériles) affleurent à l'Est de la faille orientale et à l'Ouest du gisement et sont représentés par une alternance

d'aleurolites grises avec des grés quartzeux gris clair, des dolomies gréseuses et argileuses, des calcaires et des marnes gris-verdâtres.

b. Hauterivien [épaisseur: 150 à 200m]: La minéralisation zincifère d'intérêt industriel est localisée dans la partie inférieure de l'Hauterivien, dont la puissance varie de 100 à 150 m. Cet étage est subdivisée en deux (02) niveaux :

b. 1. Hauterivien inférieur:

Ce niveau, d'une puissance totale variant de 70 à 120 m, est à son tour divisé en trois (03) termes :

- 1- Composé de dolomies grises massives, à grains fins, parfois gréseuses, souvent à petites inclusions et nodules, de couleur blanchâtre, et parfois de calcarénites noires dans la partie supérieur de 2 à 5 m du toit ; ce terme est discontinu et son épaisseur est de 1 à 2 m.
- 2- Représenté par une superposition, de bas en haut, de marnes gris-verdâtres (0,5 à 2 m), d'aleurites gris-brun (2 à 5 m), de dolomies grises (2 à 10 m), de dolomies gréseuses (3 à 8 m) et de marnes bariolées (5 à 10 m).

b. 2. Hauterivien supérieur :

Ce niveau, d'une puissance globale variant de 80 à 120 m, est subdivisé en cinq- (05)-termes :

- 1- Formé de grés, parfois en alternance avec des argiles, de marnes et aleurolites verdâtres, avec toujours à la base de l'alternance un niveau calcaire gris-clair, dont une partie, de 1 à 3m d'épaisseur, est dolomitisée.
- 2- Représenté par des dolomies massives à grains fins plus ou moins hématitisées.
- 3- Représenté par un calcaire gris argileux, (parfois renfermant des passées argilo-marneuses ou siliceuses), dont l'épaisseur varie de 10 à 15 m.
- 4- Constitué de dolomies à grains fins, de couleur gris-brun, souvent argileuses, dont la puissance totale varie de 15 à 20 m.
- 5- Caractérisé par une irrégularité de composition et de puissance ; essentiellement représenté par des calcaires gris en alternance grossière avec des marnes et des aleurolites ; dans la partie inférieure de ce terme, les calcaires sont remplacés par des dolomies recristallisées.

c. Barrémien [épaisseur: 300m] :

Il est développé au Nord-Ouest et au Sud du gisement, et il est subdivisé en deux - (02)- niveaux :

c. 1. Barrémien inférieur (B1) : Ce niveau est à son tour divisé en trois (03) termes :

- 1-** Formé essentiellement par des grès et des dolomies gréseuses parfois argilo-bitumineuses, avec une fine dissémination de pyrite et de passées de dolomies légèrement oxydée ; la puissance de ce terme varie de 40 à 60 m.
- 2-** Constitué par une alternance de dolomies marneuses massives, de marnes et de calcaires marneux ; sa puissance varie aussi de 40 à 60 m.
- 3-** Représenté par des dolomies massives à grain fins, avec des fissures remplies d'oxydes et de calcite, et une puissance variant de 15 à 20 m.

c. 2. Barrémien supérieur (B2) : Ce niveau est subdivisé en quatre (04) termes :

- 1-** Représenté par des dolomies gréseuses, massives à grains fins ou moyens, avec souvent des fissures remplies par la calcite et, vers la fin du terme, par la pyrite disséminée ; la puissance de ce terme varie de 20 à 30 m.
- 2-** Formé de grès brun, avec une alternance d'aleurolites et d'une **dolomie** très gréseuse, et, en fin d'intervalle, un aspect broyé de la roche. La puissance du terme varie de 30 à 40 m.
- 3-** Constitué d'une alternance de dolomie gréseuse, de grès bruns et d'argiles verdâtres, (dolomies et grès compacts, massifs et légèrement hématitisés). Sa puissance varie de 60 à 130 m.
- 4-** Formé de dolomies gréseuse et argileuse et de calcaire brun-violet, avec des passées d'argile verdâtre. Sa puissance est d'environ 60 m.

d. Aptien :

Les formations aptiennes ont été rencontrées par certains sondages au Nord-Ouest du champ minier sous le Miocène et le Quaternaire. Elles sont représentées par une alternance de calcaires gréseux et grès calcaireux avec des passées de calcaires très fins et des grès friables.

e. Miocène :

Le Miocène existe à 1200m d'altitude- (Chouf Bou Arket)- et est discordant sur l'Hauterivien. Il est constitué par des brèches à la base, des calcaires blancs, gris et de calcaires gréseux au sommet. (J. Glaçon, 1967).

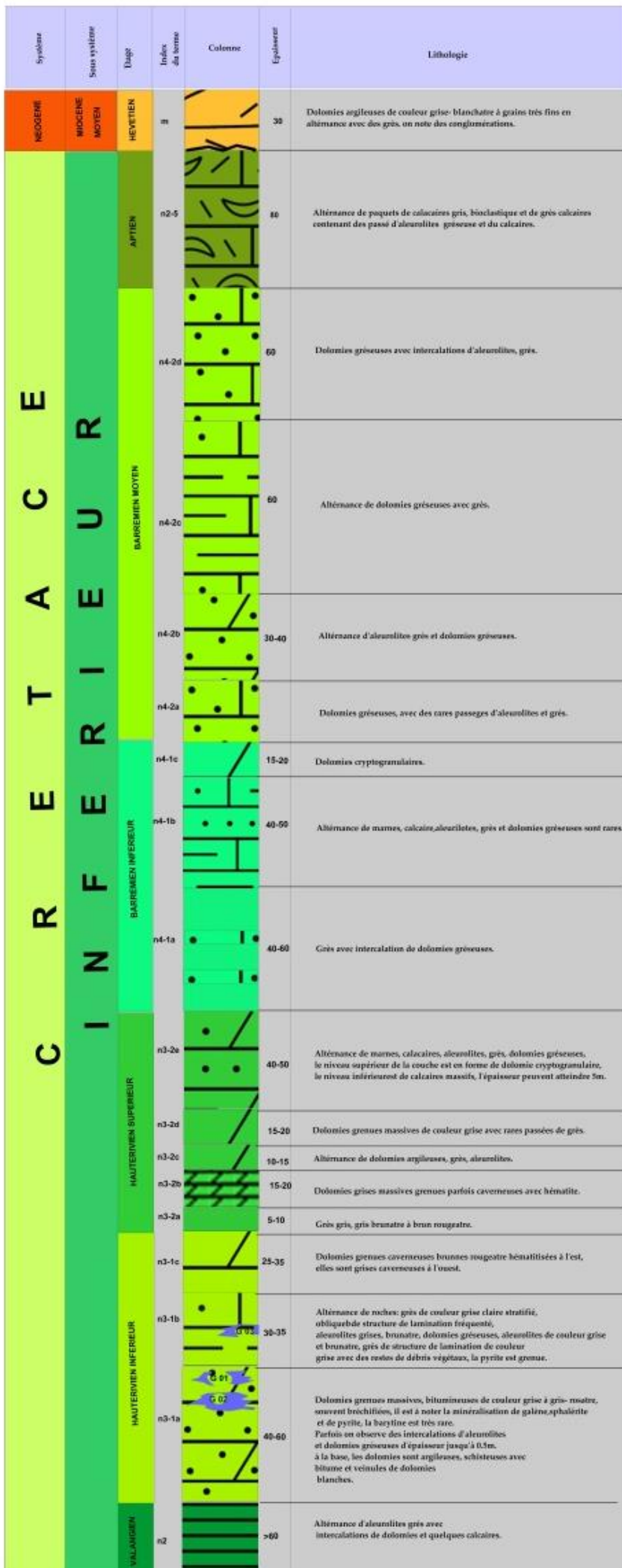


Figure I.20. La colonne lithostratigraphique du gisement de Chaabet- el- Hamra, (E.R.E.M, 1992).

c. Quaternaire (Q):

Il se résume dans des débris de roches en place sous forme des dolomies, calcaires, grès avec un ciment argileux.

I.8. 5. La tectonique du gisement de Chaabet el Hamra

Le gisement de Chaabet el Hamra est situé dans la partie Sud-Ouest de la terminaison périclinale de la grande structure en horst anticlinal de Rahbet, district de Fourhal.

Selon l'EREM (1992) et d'après le caractère du plissement, le gisement est subdivisé en trois (03) gros blocs: Est, centre et Ouest.

a. Le Bloc Est:

Trois (3) côtés de ce bloc sont limités par des failles, (la faille Est en Est, la faille Latitudinale au Nord et Nord-Ouest et les failles Ouest et Sud en Ouest), tandis que le côté Sud est ouvert et se trouve en contact avec les calcaires du Néogène.

Sur le plan structural, le bloc représente un brachyanticlinal et le pendage des flancs du pli est : 10° à 15° NE et 15° à 20° SW. Le pli est compliqué par des accidents cassants :

- ❖ **La faille Sud** : de direction latitudinale dans le flanc Sud-Est du brachyanticlinal, c'est une faille normale à rejet vertical de 100 à 120 m avec un pendage au Nord inférieur à 65-75°. Cette faille a soulevé ce bloc. (J. Glaçon, 1967).
- ❖ **La faille Diagonale** : elle s'étend vers le Nord-Est sub-parallèlement au plan axial.

b. Le bloc Centre:

Il a la forme d'un coin, dont l'angle aigu est formé par le raccordement des failles centrale et latitudinale dans la partie Est. La partie opposée du coin s'en va en s'élargissant à l'Ouest du gisement. Sur le plan structural, le bloc Central est plus compliqué. Dans son ensemble, le coin représente un Graben à amplitude d'affaissement de 15 à 20 m.

c. Le Bloc Ouest:

Il est localisé au Nord-Ouest de la faille centrale et se trouve limité par des dislocations cassantes Ouest, Sud et latitudinale.

- ❖ **La faille centrale** : c'est une faille normale qui s'étend de l'extrémité Nord jusqu'à l'extrémité Sud, avec un pendage au Sud-Est inférieur à 70-75° et un rejet vertical

de 10 à 15 m dans sa partie Nord-Est. Elle coupe un chevauchement à pente douce.

- ❖ **La faille latitudinale** : c'est une faille normale dérivée de la faille centrale. Elle se prolonge à l'Ouest au-delà du gisement, avec un pendage au Nord de 75 à 80° et un rejet vertical de 10 à 20 m.
- ❖ **La faille Est** : dérivée aussi de la faille centrale, cette faille normale est orientée vers l'Est, de direction subméridienne, avec une amplitude verticale du rejet de 80 m, voire de 100 m suivant le plan de faille, et un pendage Sud-ouest inférieur à 65-70°.
- ❖ **La faille Ouest** : cette faille normale se dégage du dessous du dépôt quaternaire, bordant le flanc Sud-est du brachyanticlinal du bloc Est, et change de direction jusqu'à 300°, se faisant couper par la faille latitudinale ; c'est une faille en escalier formant des plaques, des coins, dans une zone d'environ 70 m de large, et le pendage est à l'Est inférieur à 70-85°, tandis que les rejets verticaux atteignent 10 m.

L'étude de la fracturation qui affecte la région de Chaabet- el- Hamra est faite grâce au relevé de plusieurs directions de failles à partir de la carte de réseaux de faille, déduite de la carte géologique du gisement, permet la réalisation d'un diagramme de rosace. (**Figure I .21**).

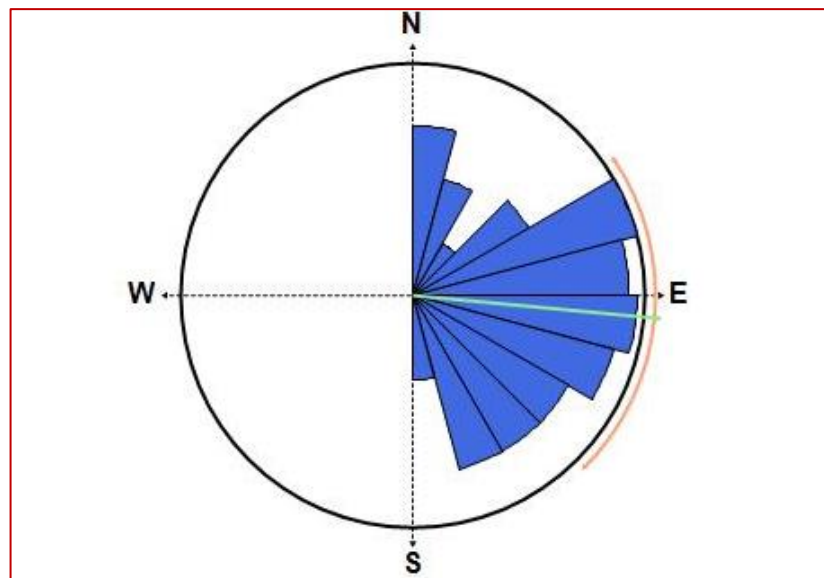


Fig. I. 21. Rosace du gisement de Chaabet el Hamra

L'interprétation de la rosace directionnelle montre que les failles s'organisent selon les directions majeures suivantes: N010, N060, N100, N140.

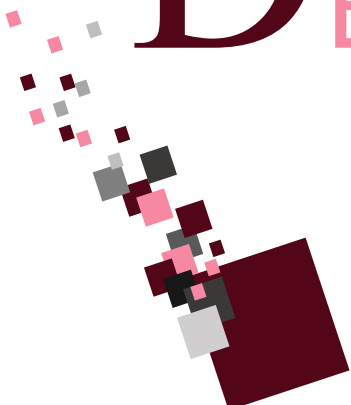
I.9. Conclusion :

Le gisement de Chaabet el Hamra qui occupe le Sud-Ouest de la terminaison périclinale de la grande structure en horst anticlinal de Rahbet, district de Fourhal, (l'un des Monts du Hodna) dans la région de Ain- Azel, au Sud de Sétif, appartient aux zones externes du tronçon Nord oriental de la chaîne des Maghrébides de l'Afrique du Nord. Précisément, Il fait partie du domaine autochtone et para-autochtone Hodnéen.

Il est constitué essentiellement par des formations sédimentaires de Crétacé inférieur recouvertes par du Miocène discordant. Il s'agit des dolomies gréseuses et argileuses, des argiles, des marnes et des calcaires...

Il se caractérise par une tectonique de type cassante représentée par des failles normales qui perturbent la lithologie du secteur.

Cette approche géologique a permis de définir la nature lithologique des terrains qui sont favorables aux développements d'éventuels aquifères, et d'après la description géologique, les formations du Barrémien et de l'Hauterivien pourraient constituées des aquifères.



DEUXIÈME
CHAPITRE

II.1. Introduction :

Avant d'aborder l'étude hydrogéologique du secteur étudié, une étude hydrologique s'avère nécessaire, puisque cette dernière est la science qui étudie le cycle de l'eau et son évolution à la surface de la terre. Elle permet donc de quantifier l'eau qui alimente les nappes d'eau souterraines.

Cette étude est basée sur le bassin hydrographique et qui est par définition un espace géographique dont les apports hydriques naturels sont alimentés exclusivement par les canaux ou en matières solides transportés par l'eau forment, en un point unique dans l'espace, une embouchure ou en un exutoire.

Généralement, un bassin versant est déterminé par sa morphologie, et essentiellement par les lignes des crêtes topographiques et de partage des eaux.

De par la nature et le sens d'écoulement des oueds, l'Est algérien juxtapose deux grands types de bassins hydrographiques. (Figure.II.1), (A. Mebarki, 2005).

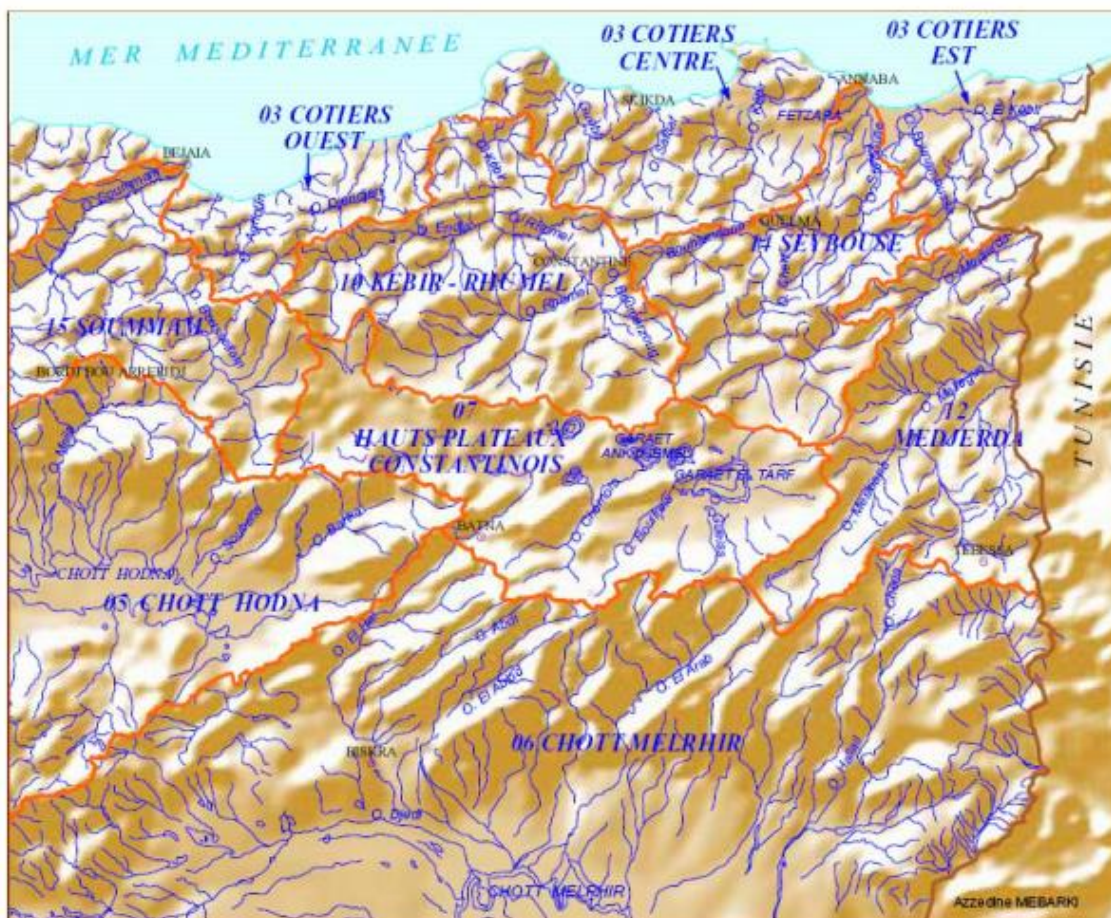


Figure II.1 : Bassins hydrographiques de l'Algérie orientale. (A. Mebarki, 2005).

- Au Nord, des bassins à écoulement exoréique, (les oueds se jettent dans la mer Méditerranée), et à régime quasiment pérenne : Côtiers constantinois (11570 km²), Boussellam, affluent de l'oued Soummam (5 010 km²), Kébir-Rhumel (8 815 km²), Seybouse (6 475 km²) et Medjerda (7 785 km²). (A. Mebarki, 2005).
- Au Sud, des bassins à écoulement endoréique, (les oueds se jettent dans des dépressions fermées) et à régime quasi-temporaire : les Hauts Plateaux constantinois (9 578 km²), le bassin Nord-Est du Chott Melrhir, (près de 28 000 km² pour une superficie totale de 68 751 km²), et le bassin Est du Chott Hodna (autour de 13 000 km² pour un total de 25 843 km²), (A. Mebarki, 2005).

II.2 Le bassin versant de la zone d'étude:

La dépression de Ain- Azel fait partie d'un vaste bassin hydrologique qui s'étale sur 9578Km² depuis la région de Ain- Beida à l'Est à celle d'El-Eulma à l'Ouest. Il est limité par le 35^{ème} parallèle au Sud et par le parallèle 36°N au Nord.

L'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H) lui attribue le N° 07 sous le nom des hauts plateaux constantinois.

La plaine de Ain- Azel occupe le sous-bassin (s/ BV) le plus occidental codé 07-01. (**Figure II.1**)

II.3 Étude morphométrique :

L'étude morphométrique du bassin versant repose sur les mesures et les calculs géométriques des différents paramètres morphométriques. (Surface, altitude, pente...).

Ces paramètres obtenus à partir des données topographiques nous permettent d'avoir une idée sur la forme du bassin versant, son relief, son régime et même l'ordre des cours d'eau.

II.3.1 Les caractéristiques morphométriques du sous- bassin:

La forme des bassins versants est importante à étudier, car elle conditionne directement le temps de réponse du bassin versant aux précipitations, c'est-à-dire la durée du ruissellement de surface et le temps de parcours à travers le réseau de drainage.

II.3.2 Indice de compacité ou coefficient de Gravelius (Kc):

C'est la forme du bassin versant qui conditionne le temps de la concentration des eaux à l'exutoire de ce dernier. En effet, un bassin versant qui possède une forme allongée ne réagira pas de la même manière qu'un autre qui a une forme plus compacte.

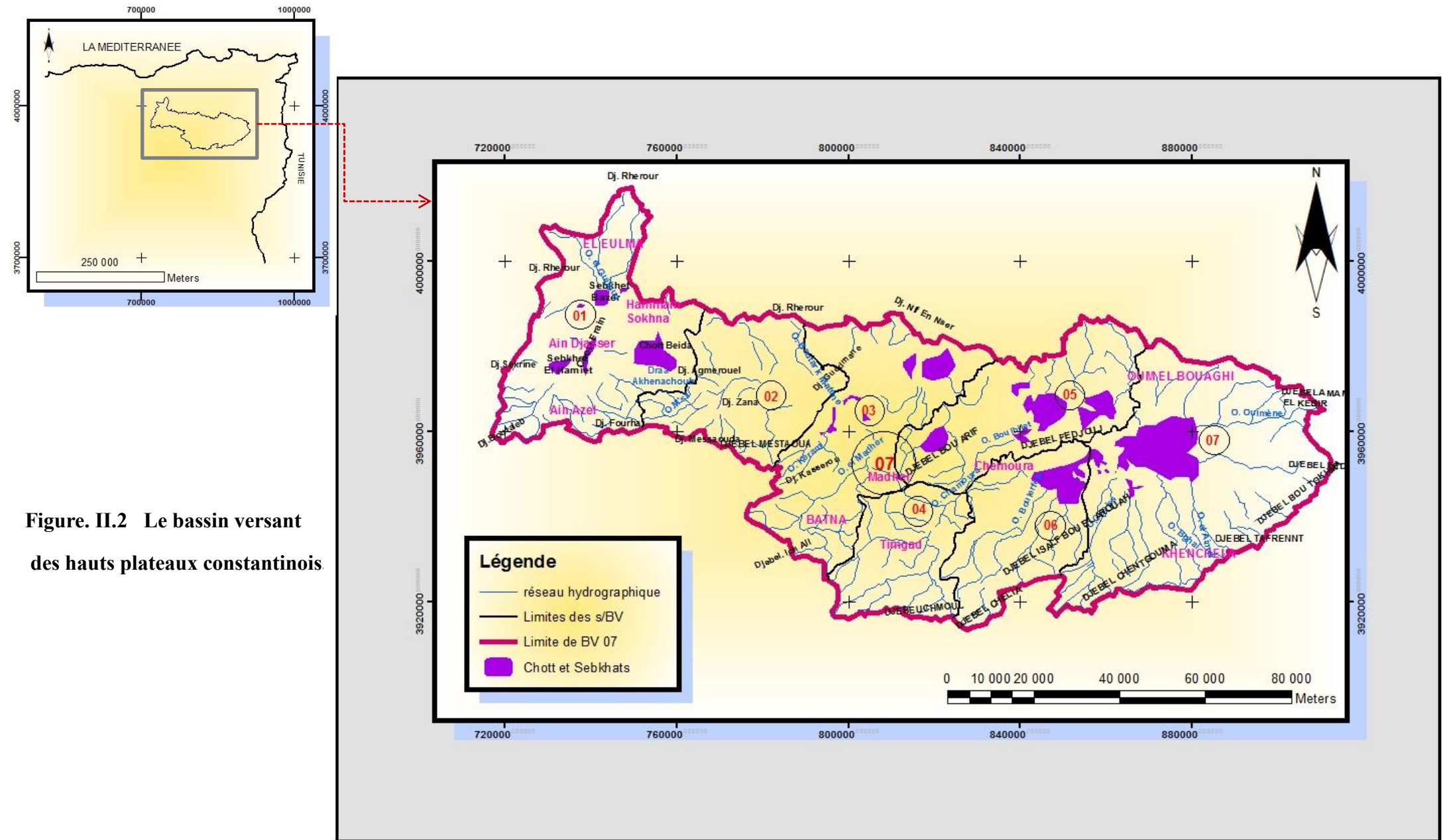


Figure. II.2 Le bassin versant des hauts plateaux constantinois

Alors, la forme des bassins versants est exprimée par l'indice de compacité de Gravelius Kc, qui correspond au rapport du périmètre P du bassin, (Sous-bassin) à celui d'un cercle ayant la même surface.

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots(Eq.1)$$

- **Kc:** Indice de compacité de Gravelius ;
- **P:** Périmètre du sous- bassin versant à étudier;
- **A:** Superficie du sous- bassin versant à étudier;

(La surface et le périmètre sont deux paramètres principaux, ils s'obtiennent par planimétrie sur la carte topographique après le tracé des limites du bassin versant à étudier sous ArcGis. La surface s'exprime en Km² et le périmètre en Km).

Tableau II.1. L'indice de compacité de Gravelius Kc du sous-bassin de la région d'étude.

A (Km ²)	P (Km)	Kc
584, 76	112	1, 29

- ❖ On remarque que la valeur du Kc, (indice de compacité), est supérieure à 1,12, ce qui permet de dire que la forme du bassin versant de la région étudiée est allongée.
- ❖ du point de vue hydrologique, la durée de ruissellement de surface ou le temps de parcours à travers le réseau de drainage sera plus lent par comparaison avec un bassin ramassé.

II.3.3 Recherche d'un modèle de représentation:

- ❖ **Les dimensions du rectangle équivalent, (Rectangle du Gravelius):**

Cette notion introduite par L. Roche (1963), permet la simple comparaison des bassins versants entre eux en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le contour devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveau des droites parallèles au petit côté du rectangle, l'exutoire l'un des petits côtés du rectangle appelé, « Rectangle équivalent ».

Si l'indice de compacité de Gravelius Kc est supérieur ou égal à 1.12 ($Kc \geq \frac{2}{\sqrt{\pi}}$), les dimensions du rectangle équivalent seront obtenues à l'aide des deux relations suivantes:

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] \dots\dots\dots(Eq. 2)$$

$$l = \frac{Kc \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (Eq. 3) \quad \text{Tel que:}$$

- **Kc**: l'indice de compacité de Gravelius,
- **A**: la superficie du sous- bassin versant à étudier,
- **L**: la longueur du rectangle équivalent,
- **l**: la largeur du rectangle équivalent.

Le tableau II.2 qui suit récapitule la simple application numérique des deux relations précédentes:

Tableau.II.2. Les dimensions du rectangle équivalent du sous- bassin 07-01

A (Km ²)	Kc	L (Km)	l (Km)
584, 76	1, 29	41. 6	14. 03

II.3.4 Caractéristiques des altitudes:

Les variations d'altitudes à l'intérieur du bassin versant, (**Figure II.3**) jouent un rôle très important dans la répartition spatiale des éléments climatiques et le taux de concentration.

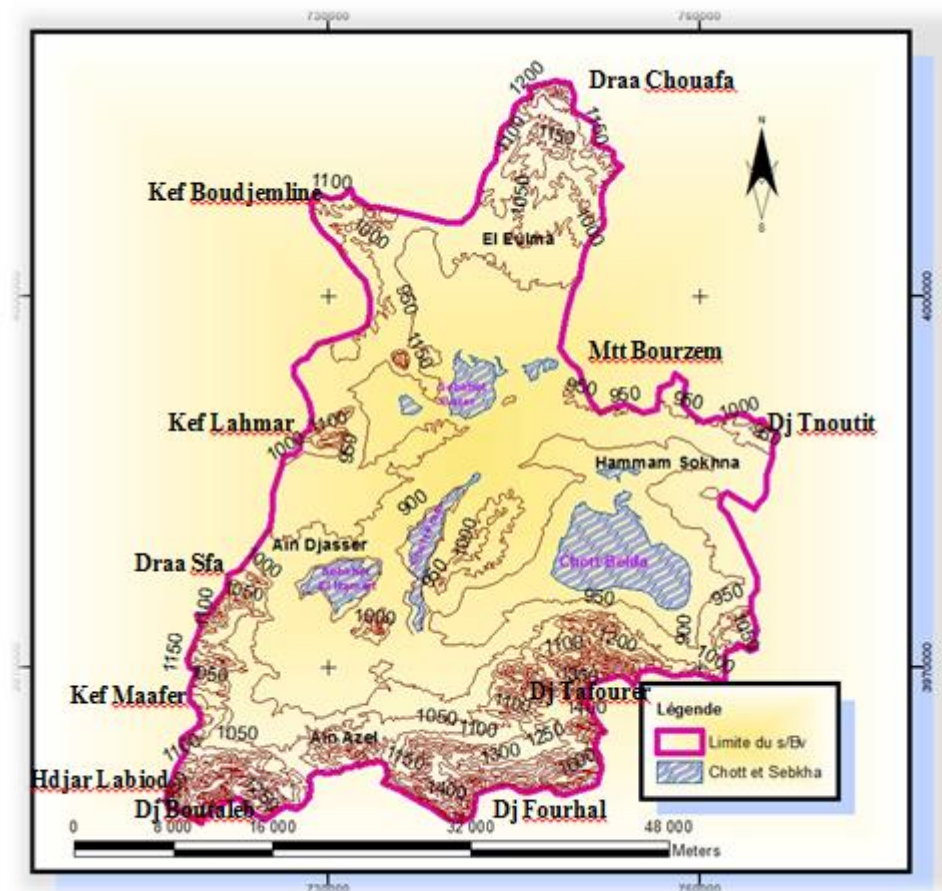


Fig. II.3 L'orographie du sous- bassin versant de la zone d'étude.

Le portrait le plus précis des altitudes est représenté par la courbe hypsométrique, (Figure II.4). Cette courbe exprime la répartition de la surface du B.V par tranches d'altitudes. Le tableau suivant montre la répartition altimétrique.

Tableau. II. 3. La répartition des surfaces par tranches d'altitudes.

Classe d'altitude (m)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
1350- 1300	1,87	1,87
1300- 1250	1,87	3,74
1250-1200	2,8	6,54
1200- 1150	2,81	9,35
1150-1100	5,61	14,96
1100-1050	6,55	21,51
1050-1000	10,28	31,79
1000-950	21,5	53,29
950- 900	35,51	88,8
900-850	8,41	97,21
850- 800	1,87	99,08
800 -750	0,92	100

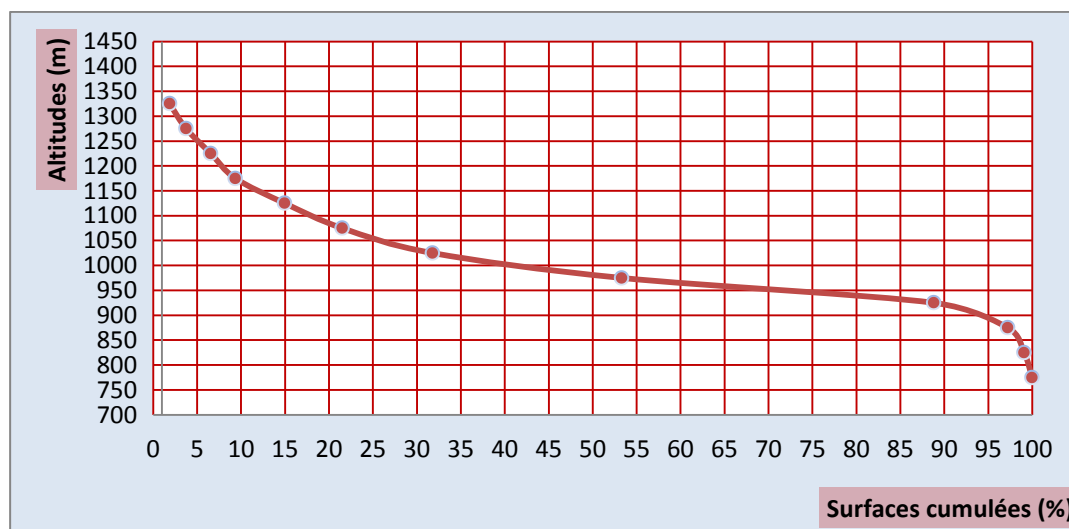


Fig. II.4 La courbe hypsométrique du sous- bassin versant de la zone d'étude.

Alors, la répartition hypsométrique de chaque secteur est plus significative, les tranches les plus dominantes sont celles de 800-850m et 850- 900m, (99, 08% et 97,21%

successivement), ce qui implique l'abondance de planitude avec une faible pente, c'est-à-dire un sous-bassin sénile à relief âgé avec quelques buttes.

En outre, la réalisation du modèle numérique d'altitude, MNA, (Figure II.5) du sous-bassin en sujet montre aussi que les altitudes de ce dernier varient entre 800 et 1600m, dont les fortes occupent sa partie sud d'où se trouvent **Dj. Fourfal et Boutaleb**.

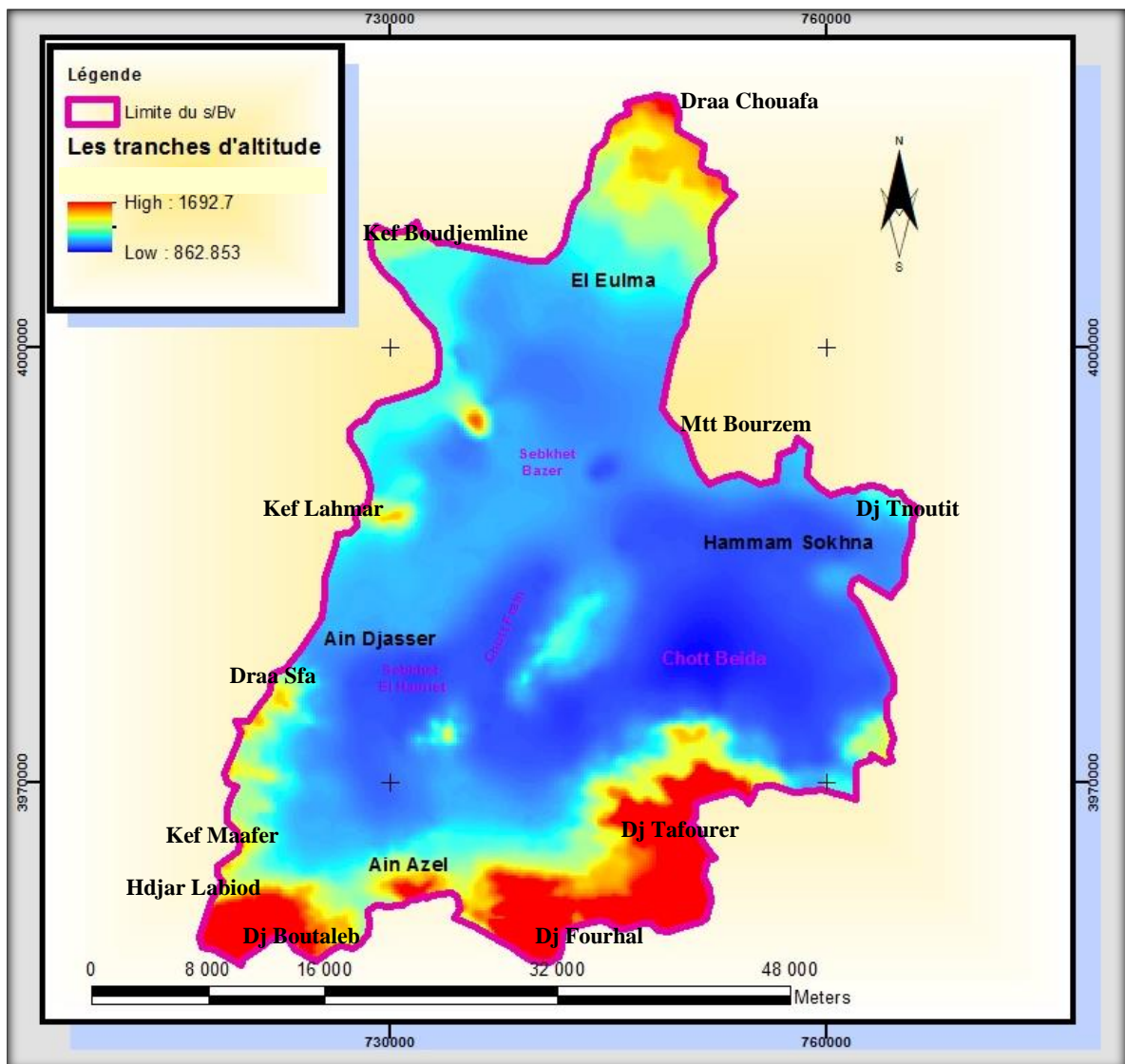


Fig. II. 5. MNA du sous- bassin versant de la zone d'étude.

II.3.5 Altitude médiane H50%:

Elle est déduite directement de la courbe hypsométrique, (Figure II.4). H50% = 975m

II.3.6 Dénivelée simple D:

On définit la dénivelée D comme étant la différence de cote entre H5% et H95%.

H5%= 1250m

H95%= 900m

$$D= 1250 - 900 = 350m$$

II.3.7 Indice de pente et relief:

L'effet du relief apparaît dans la vitesse d'écoulement et donc dans le temps de concentration.

Si la pente dans une région donnée est forte, l'écoulement sera rapide, ce qui donne un temps de concentration court.

II.3.8 Indice de pente globale I_g :

L'indice de pente globale est évalué par **M. Roche, (1963)** à partir du rectangle équivalent, facile à calculer et permet une classification de relief selon l'ORSTOM.

- Classe R1: Relief très faible: $I_g < 0,002\%$
- Classe R2: Relief faible: $0,002 < I_g < 0,005\%$
- Classe R3: Relief assez faible: $0,005 < I_g < 0,01\%$
- Classe R4: Relief modéré: $0,01 < I_g < 0,02\%$
- Classe R5: Relief assez fort: $0,02 < I_g < 0,05\%$
- Classe R6: Relief fort: $0,05 < I_g < 0,1\%$
- Classe R7: Relief très fort: $0,1 < I_g$

$$I_g = \frac{D}{L} \dots\dots\dots(\text{Eq.4})$$

Tableau. II.4. L'indice de pente globale I_g

D (m)	L (m)	I_g	Relief
350	41600	0,008	Assez faible

II.3.9 Carte des pentes:

L'analyse globale de la carte des pentes, (**Figure II.6**) effectuée en utilisant l'image satellitaire du sous- bassin en sujet montre ce qui suit :

- ❖ Les pentes d'ordre **30 à 70%** se trouvent intensément dans le Nord de cette entité, tandis que les pentes d'ordre 2% occupent les chotts et les Sebkhass.
- ❖ Les pentes **18 à 10%** occupent toute sa superficie et elles sont remarquables surtout dans sa partie centrale, ce qui permet de dire que le bassin possède **un relief âgé**.

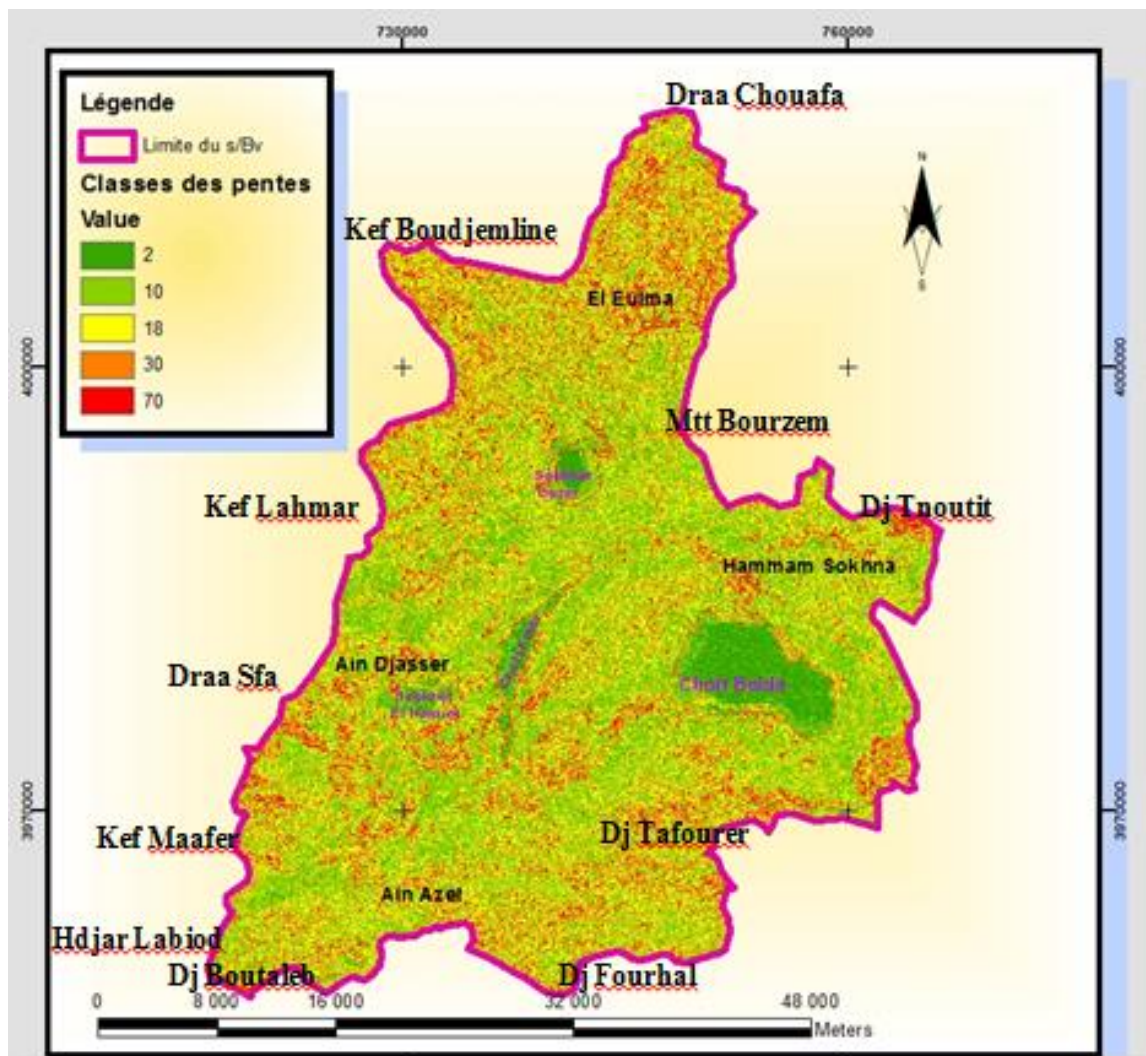


Fig. II. 6. Carte des pentes du sous- bassin versant de la zone d'étude.

II.4 Caractéristiques du réseau hydrographique:

Un réseau hydrographique est l'ensemble des canaux de drainage naturel permanents ou temporaires par où s'écoulent les eaux. Ces eaux proviennent des eaux de ruissellement ou restituées par les eaux souterraines.

Le réseau hydrographique du sous-bassin versant **07- 01** est représenté par une série de cours d'eau intermittents, dont la plupart se perdent dans les formations du quaternaire, au niveau des dépressions fermées, représentées par les Chotts et les Sebkhass indiquant un écoulement de type endoréique.

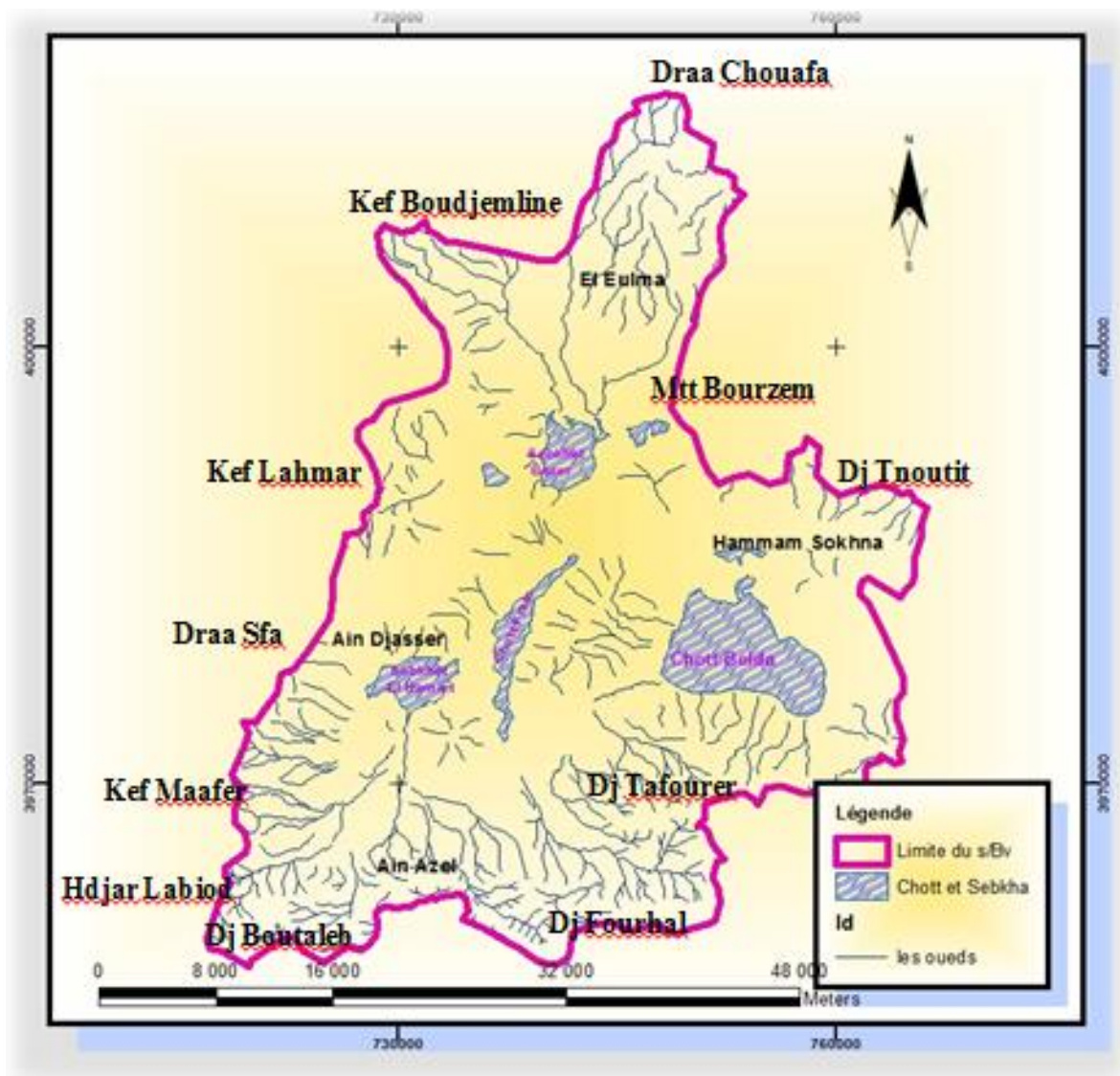


Fig. II.7 Le réseau hydrographique du sous -bassin versant de la zone d'étude.

II.5 Récapitulation des caractéristiques morphométriques:

Le tableau II.5 sera une récapitulation des différentes caractéristiques du sous -bassin versant 07-01 de la zone d'étude.

Tableau. II.5. Récapitulation des caractéristiques du sous- bassin versant 07-01.

s/Bassin versant		Sebkhet- el -Hamiet
Code		07-01
Surface A (Km ²)		584,76
Périmètre P (Km)		112
L'indice de compacité Kc		1,29
Rectangle équivalent	Longueur L (Km)	41,6
	Largeur l (Km)	14,03

Altitude moyenne H50% (m)		975	
Dénivelée D (m)	H5% (m)	350	1250
	H95% (m)		900
Indice de pente Ig		0,008	
Classification du relief		Relief assez faible	

Le sous-bassin versant **07-01** couvre une superficie de **584,76Km²**. Il a une forme allongée, (Indice de compacité **Kc = 1,29**) et un relief assez faible (**Ig = 0,008**) avec une altitude moyenne de **975m**.

La majorité des oueds sont temporaires, prenant naissance dans la partie sud de ce dernier, et ont comme exutoire Sebket-El-Hamiet, caractérisant ainsi un écoulement endoréique.

II.6 L'étude hydroclimatique:

L'Algérie, du fait de sa situation géographique se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes; la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde à climat semi-aride vers l'intérieur du pays, (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara.

L'Algérie se subdivise du Nord au Sud, en cinq zones bioclimatiques en relation avec le relief et les précipitations. **Figure II.8 (A)**. (M. COTE, 1998a). Les hautes plaines Sétifiennes appartiennent au domaine bioclimatique semi-aride. **Figure II.8 (B)**.

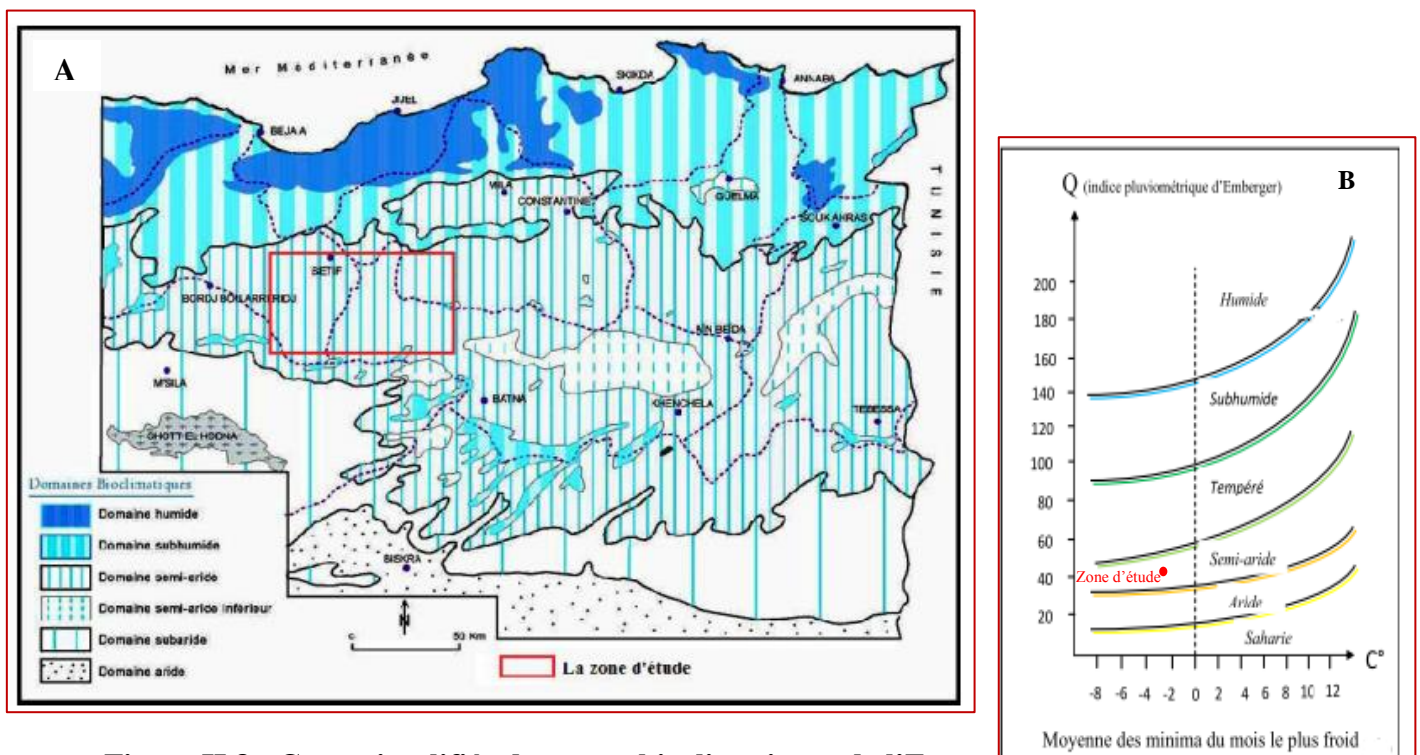


Figure II.8 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (A). (M. Côte, 1998a) In A. Mebarki, 2005 et **Climagramme d'Emberger (B)**, In M. Z. Belhadji, 2017.

Le trait le plus frappant du climat semi-aride dans les hautes plaines Sétifiennes, dont notre zone d'étude fait partie, est sans doute la grande variabilité des précipitations P et des températures T liées bien sûr aux irrégularités topographiques et aux oppositions de la Méditerranée et du Sahara. Ainsi, les montagnes de l'Atlas Saharien et celles de l'Atlas Tellien protègent les hautes plaines Sétifiennes respectivement des vents désertiques du Sud et ceux chargés en humidité venant du Nord.

Le climat de type semi-aride y est avec des hivers perturbés, rigoureux et pluvieux et des étés chauds et secs.

II.7 Données de l'O.N.M:

Il existe plusieurs stations météorologiques dans l'environnement du bassin versant de la zone d'étude qui vont nous permettre de caractériser la climatologie, entre autre la station de Ain- Azel, Ain- Djasser, El Eulma. Mais vu la discontinuité des données enregistrées au niveau de ces stations, seules celles de la station hydroclimatologique de Ain- Azel, (**Tableau II.6**) vont être utilisées pour la caractérisation du climat de cette zone d'étude, car elle se trouve pratiquement dans le gisement de Chaabet- el- Hamra, (à 700 m de la limite Nord-Ouest du gisement) et présente moins de lacunes de données.

Pour étudier ces données, nous sommes basés sur une série de mesures sur une période de 27 ans d'observations s'étalant depuis l'an 1984 à l'an 2011. Cette série est la plus récente et ne présente pas de lacunes.

Tableau II.6. Coordonnées Lambert de la station.

Station	Code	X Lambert (m)	Y Lambert (m)	Z(m)
Ain- Azel	07- 01- 02	754.000	287.700	0960

II.7.1 les précipitations:

La pluie est un facteur climatique très important pour la caractérisation du climat, elle conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau, ainsi que celui des nappes aquifères. La région d'étude est considérée parmi les régions les moins arrosées avec une moyenne interannuelle de 350mm. (**Figure II.9**).

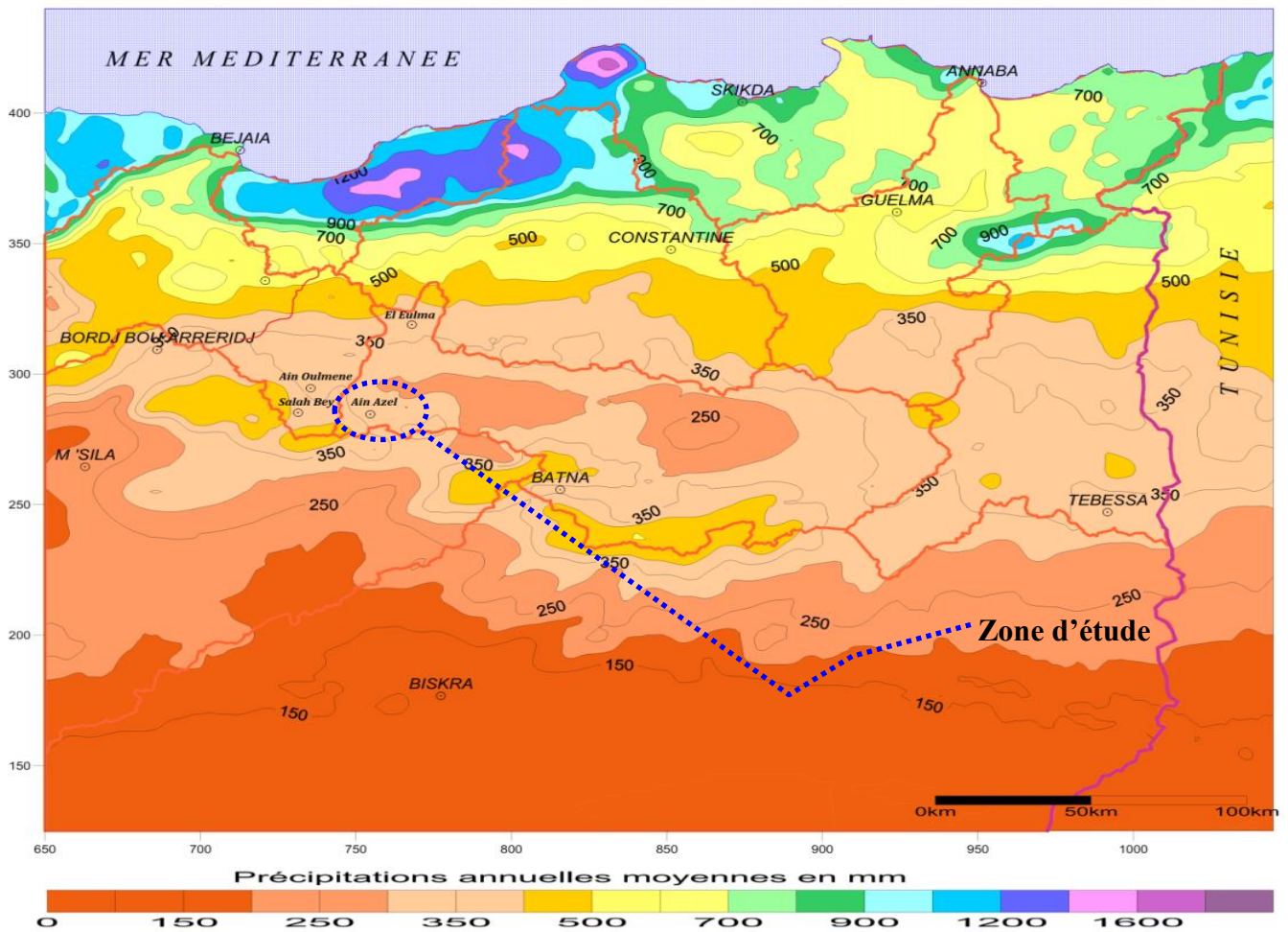


Fig. II.9. Carte des précipitations annuelles moyennes de l’Est algérien, (Établie d’après L’A.N.R.H, 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1^{er} septembre 1921 au 31 Août 1960 et du 1^{er} Septembre 1968 au 31 Août 1989).

II.7.2 Étude des précipitations de la station de Ain- Azel

La série d’observations sur la précipitation de 1984 à 2011, (Période de 27 ans) de la station de Ain- Azel est donnée, (Tableau A1.1 en Annexe 1).

Les données disponibles permettent l’estimation de la quantité de pluie moyenne annuelle reçue par le sous- bassin versant.

II.7.2.1 Variation des précipitations dans le temps

II. 7.2.1.1 Précipitations moyennes mensuelles

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations sont portées dans le tableau qui suit.

**Tableau II.7 Précipitations moyennes mensuelles
(Station de Ain- Azel, période de 1984- 2011)**

Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
30,72	21,36	31,34	36,88	41,42	19,74	8,06	10,13	35,98	27,82	23,62	32,39

Le tableau des précipitations moyennes mensuelles exprimé en histogramme, (**Figure II.10**) montre que la dépression de Ain- Azel est caractérisée par une saison plus ou moins pluvieuse des mois de **Septembre à Mai**.

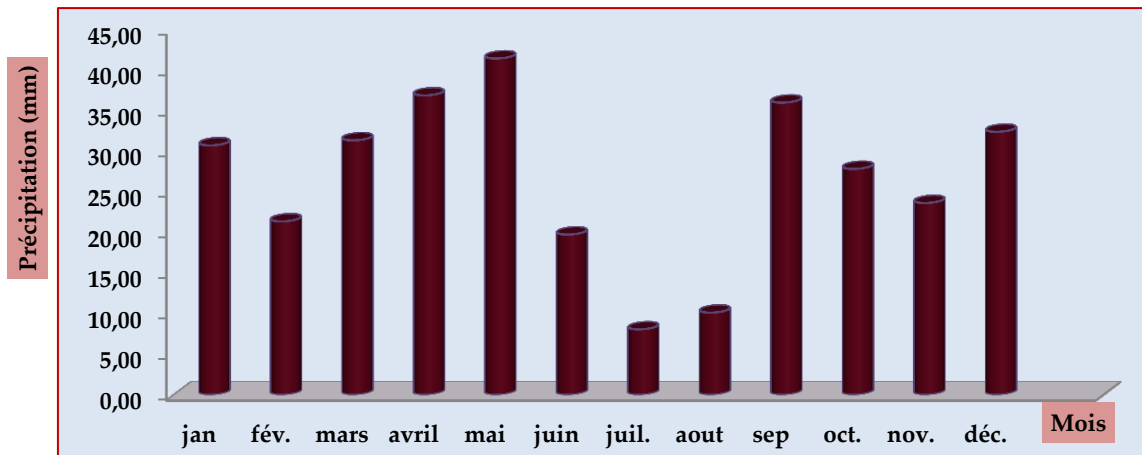


Fig.II.10. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Station de Ain- Azel, période de 1984- 2011).

II. 7.2.1.2 Précipitations moyennes annuelles:

L’histogramme de la figure, (**Figure.II.11**) représente les valeurs moyennes annuelles des précipitations issues des précipitations de la station de Ain- Azel.

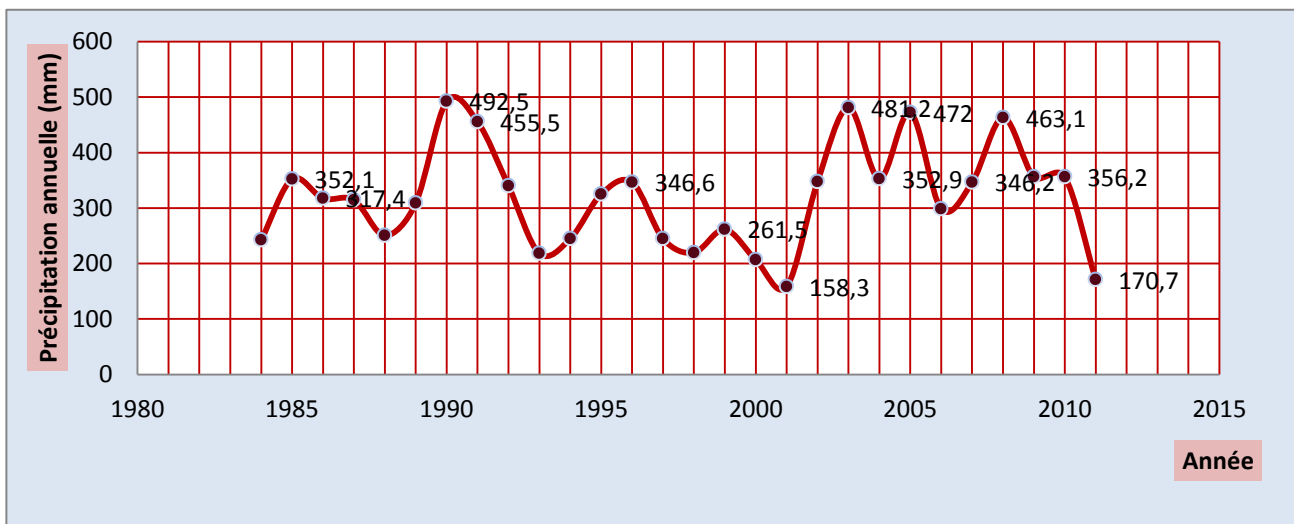


Fig. II.11. Histogramme des précipitations moyennes annuelles (Station de Ain -Azel, période de 1984- 2011).

La simple analyse de l’histogramme montre que l’année 1990 est l’année la plus pluvieuse de la série observée avec 492,5mm, et plus particulièrement les mois d’Avril et Mai, (83,6 mm et 101,4 mm respectivement). Ces précipitations représentent presque plus de 2,5 fois les précipitations moyennes de ces deux mois.

II. 7.2.1.3 Variation des précipitations dans l'espace

(Détermination de la lame d'eau précipitée)

Il existe plusieurs méthodes qui permettent finalement la détermination de la lame d'eau précipitée sur le sous- bassin versant à partir des précipitations moyennes annuelles, mesurées au niveau des différentes stations.

❑ **Méthode de Thiessen:**

Par manque de données, cette méthode ne peut être convenablement appliquée, elle nécessite des stations régulièrement réparties dans le sous- bassin versant à étudier.

❑ **Méthode de la moyenne arithmétique:**

$$P = N^{-1} \sum_{i=1}^N P_i \dots\dots\dots(\text{Eq.5})$$

Telle que:

- P: la précipitation enregistrée dans la station i;
- N: nombre de stations.
- ❖ L'application numérique donne une valeur de 334,15 mm.

II. 7.2. Température de l'air:

Contrairement aux précipitations qui constituent l'apport en eau dans le bilan hydrologique, les températures de l'air jouent un rôle très important dans les pertes par le phénomène de l'évapotranspiration.

Par manque de données des températures de l'air de la région de Ain- Azel, on ne trouve que les valeurs enregistrées de la station de Sétif (Tableau A2-Annexe 1-), seul choix, pour faire le reste du calcul (Tableau II.8).

Tableau II.8. Coordonnées Lambert de la station.

Station	Code	X Lambert (m)	Y Lambert (m)	Z(m)
Sétif	15- 06- 12	735. 274	323. 492	1009 m

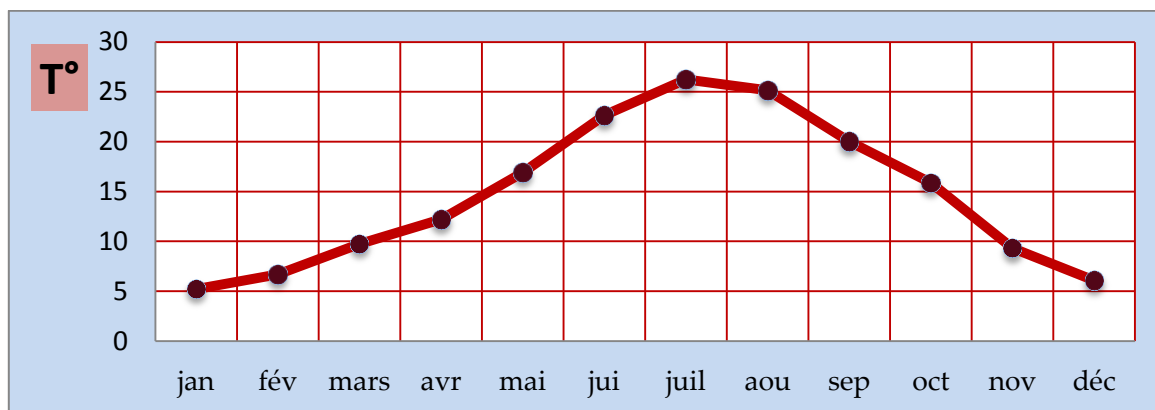
II. 7.2.1 Variation de la T° de l'air dans le temps

La distribution des températures moyennes mensuelles est très irrégulière, on note que les mois les plus chauds sont Juin, Juillet et Août, et les mois les plus froids sont Décembre, Janvier et Février.

Tableau II.9. Températures moyennes mensuelles (Station de Sétif, période 2000-2011).

Mois	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.
T°	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20,0	16,0	9,3	5,9

La figure suivante, (Figure II.12) représente le graphe $T^{\circ} = f(t)$ de la station de Sétif.



**Fig. II.12. Les températures moyennes mensuelles
(Station de Sétif, période de 2000- 2011).**

II. 8 Courbe ombrothermique:

Selon la définition de H. Gaussen et F. Bagnouls, (1957), un mois sec est un mois où la somme totale de précipitation est égale ou inférieure au double de la température moyenne mensuelle du même mois $P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$, cette méthode simplifiée permet de déterminer la période humide ainsi que la période sèche.

L'établissement du diagramme ombro-thermique à partir des données de températures et de précipitations de la station de Sétif et de Ain- Azel peut nous conduire à distinguer deux périodes, (Figure.II.13) :

1. Une période froide et humide, pluvieuse qui s'étale sur neuf mois, (de Septembre jusqu'au Mai), avec de faibles températures.
2. La seconde est une période chaude et sèche relativement courte, qui s'étale sur trois mois, (du mois de Juin jusqu'à Août), caractérisée par de faibles précipitations, (Tableau II.10).

Tableau II.10. Températures et précipitations moyennes mensuelles (Température: Station de Sétif, période 2000-2011, Précipitations: Station de Ain- Azel, période 2000-2011).

	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.
P (mm)	33	23	33	46	45	25	5	12	46	31	28	38
T°	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20,0	16,0	9,3	5,9

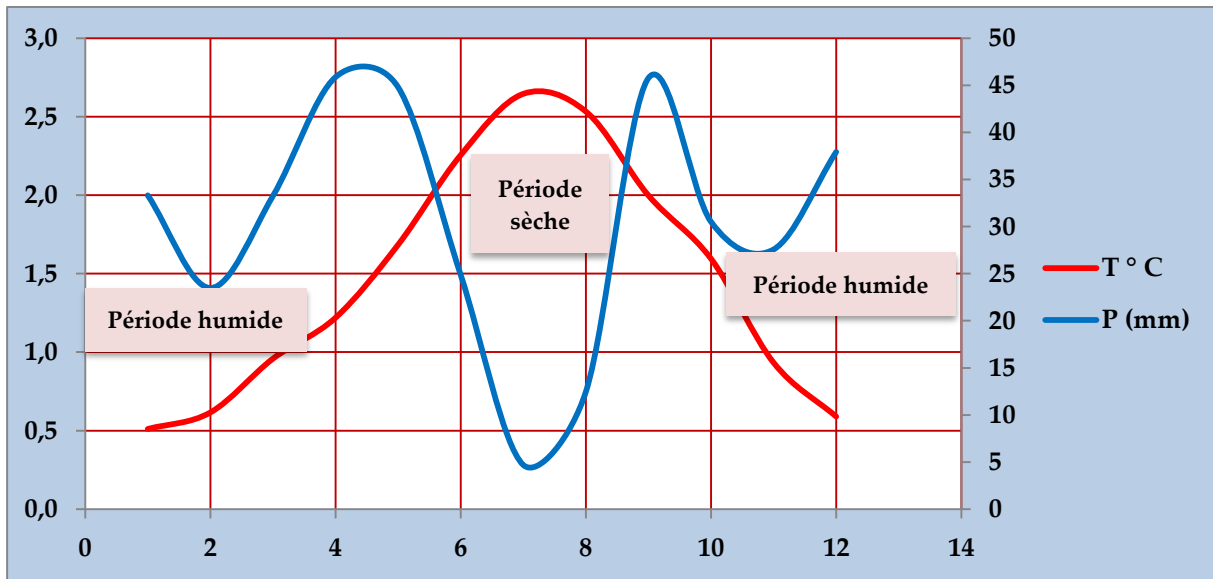


Fig. II.13 Courbe ombrothermique (Température: Station de Sétif, période 2000-2011et (Précipitation: Station de Ain- Azel, période 2000-2011).

II. 9 Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte)

La méthode d'Euverte fait appel à deux paramètres essentiels qui sont la température et la précipitation établies mensuellement, où le rapport P/T permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol. Le rapport permet également de définir quatre types de régimes :

- $(P/T) < 1$, le régime est très sec ;
- $1 < (P/T) < 2$, le régime est sec ;
- $2 < (P/T) < 3$, le régime est sub-humide ;
- $(P/T) > 3$, le régime est humide.

Tableau II.11. Variation des valeurs de rapport (P/T) d'après la méthode d'Euverte.

	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	33	23	33	46	45	25	5	12	46	31	28	38
T°	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20	16	9,3	5,9
P/T	6,47	3,71	3,44	3,77	2,68	1,11	0,19	0,47	2,30	1,94	3,01	6,44

Les résultats obtenus du rapport (P/T) synthétisés dans le **tableau II.11** montrent que la période humide commence du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril, la période sub-humide correspond aux mois de Septembre et Mai, alors que la période sèche correspond au mois de Juin, le régime très sec présenté par les mois de Juillet et Août.

II.10 Indice d'aridité

Cet indice permet d'identifier le type du climat caractérisant la région étudiée. La formule de De Martonne permet d'apprécier ce paramètre.

$$I = P / (T + 10) \dots\dots\dots (\text{Eq.6})$$

Où :

P : précipitation moyenne mensuelle (mm) ;

T : température moyenne mensuelle (°C).

Pour :

- 20 < I < 30 : le climat est tempéré;
- 10 < I < 20 : le climat est semi-aride,
- 7.5 < I < 10 : le climat est steppique;
- 5 < I < 7.5 : le climat est désertique ;
- I < 5 : le climat est hyper -aride.

Pour notre région, comme T= 14,62° C et P = 365 mm permettent de donner un indice d'aridité de l'ordre de 14.82, ce qui détermine un climat semi-aride, (**Figure II.14**).

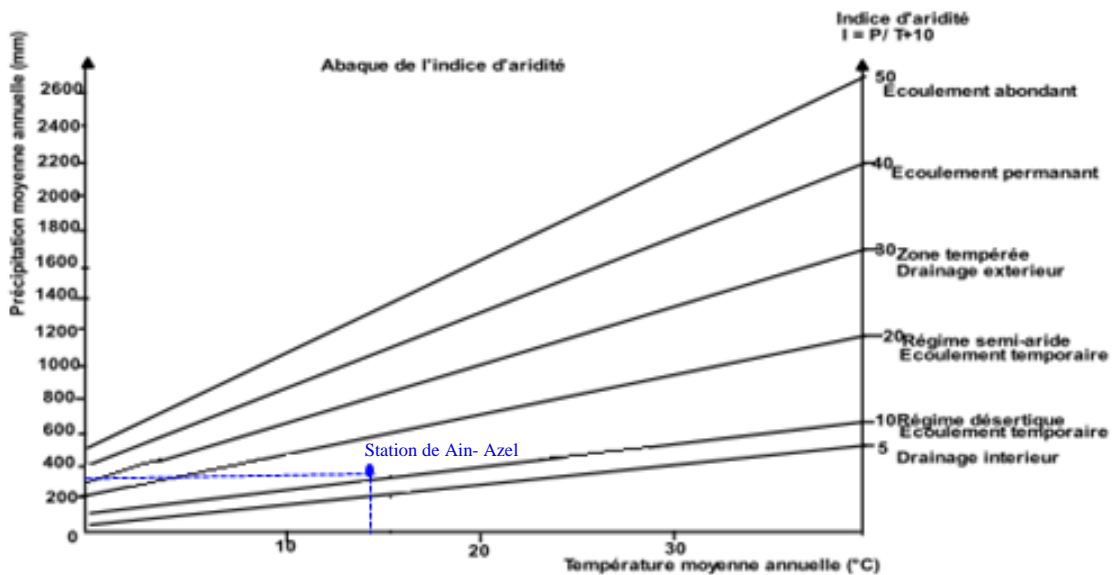


Figure II.14. Abaque de l'Indice d'aridité annuel de De Martonne.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots \dots \dots (Eq.8)$$

- **P**: Précipitation moyenne annuelle en mm
- **T**: Température moyenne annuelle en C°
- **L = 300 + 25T + 0.05T³** : pouvoir évaporant de l’atmosphère

Après le calcul, on trouve ETR = 384,44mm.

II.12.1.2 Formule de Coutagne:

Cette formule fait intervenir deux paramètres: précipitation P et température T.

$$D = P - \lambda P^2 \dots \dots \dots (Eq.9)$$

Avec : $\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 T}$ et cette formule ne sera valable qu’après la vérification de la condition suivante:

$$\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$$

Où:

- **D**: déficit d’écoulement en mm par an
- **P**: précipitation moyenne annuelle en mm
- **T**: température moyenne annuelle en °C
- **λ**: paramètre dépendant de la température.

Tableau II.12. Vérification de la condition.

T°	λ	1/8λ	1/2λ	P (m)
14.62	0.35	0.356	1.42	0.365

- La condition n’est pas vérifiée, ce qui implique que la valeur de l’ETR ne peut pas être calculée par cette formule.
- Apparemment, **la formule de Coutagne** n’est pas justifiée en zone semi-aride.

II.12.1.3 L’abaque de Wundt:

L’évapotranspiration réelle peut être évaluée à partir de l’abaque de **Wundt**, (modifié par **Coutagne**, **Figure II.15**), donnant le déficit d’écoulement moyen annuel en fonction de la température T° et la précipitation moyenne annuelle.

La valeur obtenue à la station de **Ain- Azel** est égale à **350mm**.

II.12.1.4 Abaque de P. Verdeil

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou du déficit d'écoulement, P. Verdeil (1988) a établi un abaque bi-logarithmique en tenant compte uniquement des précipitations annuelles.

C'est une méthode applicable pour les régions semi-arides en Algérie, (In Mihoubi, 2009), et dont les précipitations ne dépassent pas les 600 mm, comme c'est le cas de la station de Ain- Azel.

L'ETR déterminé par la projection sur la droite représentée dans l'abaque, (Figure.II.16), pour la station de Ain- Azel est égale à 350mm.

Les résultats de l'ETR obtenue par différentes méthodes sont exposés au **Tableau II.13.**

Tableau II.13. Estimation de l'évapotranspiration réelle avec différentes méthodes.

Méthode	ETR (mm)	Taux / P
Turc	348,44	95.46%
Coutagne	Non justifiée	
Abaque de Wundt	350	95.89%
Abaque de Verdeil	350	95.89%

On constate que les résultats de l'ETR selon les différentes méthodes présentent des valeurs identiques.

II.12.2 L'évapotranspiration potentielle ETP :

Thornthwaite (1948) a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'ETP, où le pouvoir évaporant pour chaque mois est déterminé à partir de la relation suivante:

$$EP = 16 \times \left(\frac{10T}{I}\right)^A \dots\dots\dots(\text{Eq.10})$$

Avec:

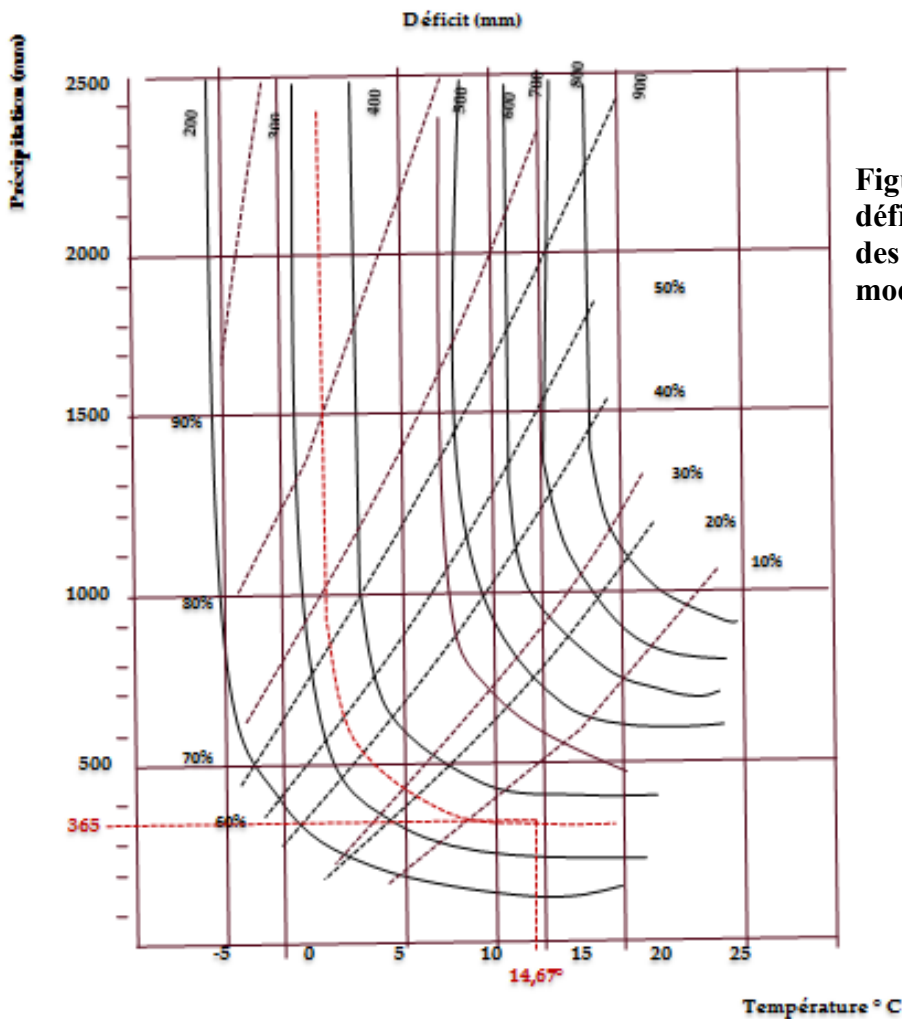


Figure II.15 Évaluation des éléments et déficit en fonction de la température et des précipitations (Abaque de Wundt modifié par Coutagne).

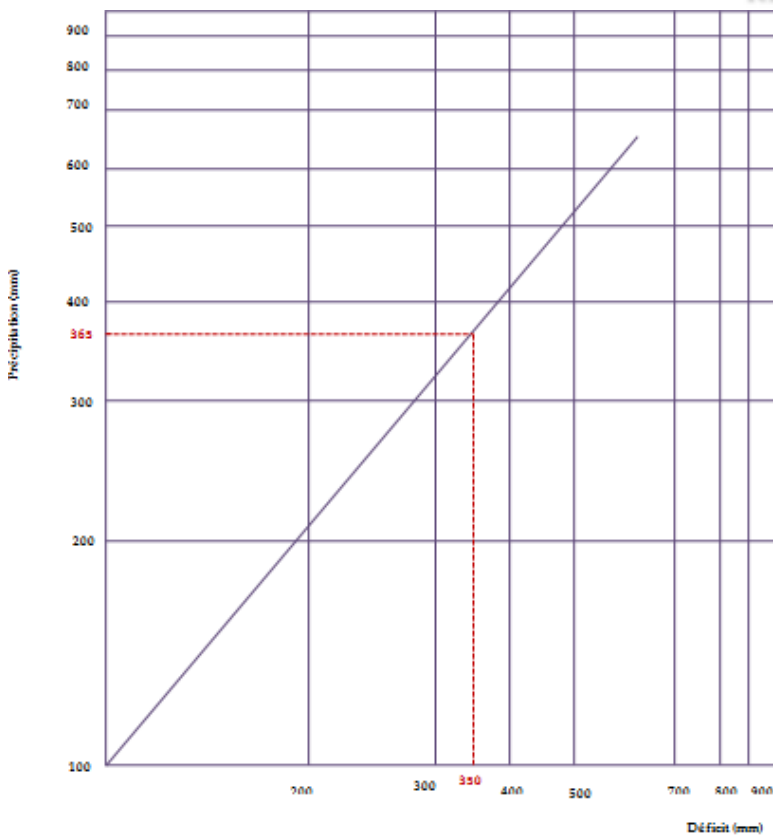


Figure II.16 Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement Algérie, d'après P. Verdeil, 1988.

- EP désigne l'évapotranspiration potentielle non corrigée (mm) ;
- T est la température moyenne mensuelle (°C) ;
- I désigne l'indice thermique annuel : $I = \sum_{i=1}^{12} i$
i désigne l'indice thermique mensuel : $i = (T / 5)^{1,514}$
- $A = (6.75 \times 10^{-7} \times I^3) - (7.71 \times 10^{-5} \times I^2) + (1.79 \times 10^{-2} \times I) + 0.49239$

L'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée est obtenue en multipliant EP par un coefficient de correction **K**, dépendant de la latitude du sous- bassin versant.

**Tableau II.14. Évapotranspiration potentielle ETP selon Thornthwaite
(Période 2000-2010).**

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
T(°C)	5,1	6,2	9,6	12,2	16,8	22,6	26,5	25,3	20	16	9,3	5,9
i	1.03	1.38	2.68	3.85	6.26	9.81	12.48	11.64	8.15	5.81	2.55	1.28
I	1.03	1.38	2.68	3.85	6.26	9.81	12.48	11.64	8.15	5.81	2.55	1.28
EP (mm)	10.50	14.21	27.96	40.51	66.45	105.14	134.50	125.20	87.03	61.62	26.62	13.16
K (36°)	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
ETP _{corr} (mm)	9,13	12,07	28,79	44,15	80,40	127,21	165,43	145,23	89,64	59,77	22,89	11,18

II.13 Bilan hydrique selon Thornthwaite

Le but ultime d'une étude de ressources hydriques d'un sous- bassin versant est l'établissement de son bilan hydrologique pour une année moyenne. Ce bilan est établi (**Tableau II.15**), à l'échelle mensuelle, basé sur des données connues des précipitations P et de l'évapotranspiration potentielle ETP.

II.13.1 Calcul des réserves facilement utilisables RFU:

Avant de commencer le calcul du bilan, il faut mentionner que la RFU, (Réserves facilement utilisables) est calculée à partir de la formule de Hallaire.

Tel que:

$$RFU = \frac{C-F}{100} \times H \times d + 30 \dots\dots\dots (Eq.11)$$

- RFU: Réserves facilement utilisées
- C: capacité de rétention du sol: c'est- à- dire, elle correspond au maximum d'eau que le sol peut retenir lorsque son drainage est assuré librement;

- **F**: capacité au point de flétrissement: c'est-à-dire : c'est la limite inférieure de l'eau absorbable par les plantes;
 - **H**: profondeur d'enracinement;
 - **D**: densité apparente du sol.
 - **Les 30mm** correspondent à l'enracinement capillaire pour les sables limoneux.
- Ne disposant pas de ces paramètres, nous retenons une valeur de **36mm pour la RFU** correspondant à la quantité d'eau optimale que le sol peut retenir, (M. A. Bellouche, 1996). La valeur de 36mm pour la RFU est utilisée pour les calculs.
- Le bilan de Thornthwaite est établi à partir du mois de Septembre, au moment où les réserves commencent à se reconstituer.
- $P > ETP$: $ETP = ETR$
 - $P < ETP$: a/ $ETP \leq P + RFU$: $ETR = ETP$
b/ $ETP > P + RFU$: $ETR = P + RFU$
 - $RFU > 36mm$: un excédent (water surplus)
 - $RFU < 0mm$: un déficit agricole.

Tableau II. 15. Estimation du bilan hydrologique selon Thornthwaite pour la station de Ain- Azel (Période 2000-2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Ann
T°	20,00	16,00	9,30	5,90	5,10	6,20	9,60	12,20	16,80	22,60	26,50	25,30	14.62
P	46,00	31,00	28,00	38,00	33,00	23,00	33,00	46,00	45,00	25,00	05,00	12,00	365,00
i	08.15	5.81	02.55	01.28	01.03	01.38	02.68	03.85	06.26	09.81	12.48	11.64	66.92
K	01,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	-
EP	87,03	61,62	26,62	13,16	10,50	14,21	27,96	40,51	66,45	105,14	134,50	125,20	712,9
ETP	89,64	59,77	22,89	11,18	9,13	12,07	28,79	44,15	80,40	127,21	165,43	145,23	795,95
ETR	46,00	31,00	22,89	11,18	9,13	12,07	28,79	44,15	80,40	25,6	5,00	12,00	328,21
RFU	0	0	5,11	31,93	36	36	36	36	0,6	0	0	0	
Da	43,64	28,77	0	0	0	0	0	0	0	102,21	160,43	133,23	468,28
Ws	0	0	0	0	19,80	10,93	4,21	1,85	0	0	0	0	32,57

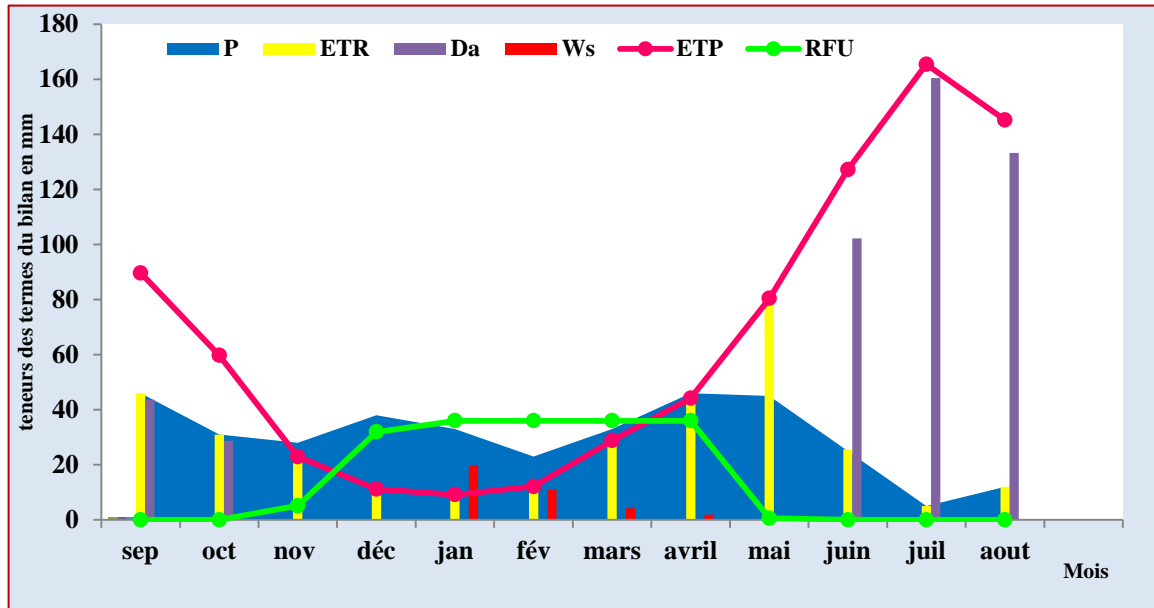


Figure II.17 Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Ain-Azel (Période 2000-2010).

L'analyse des résultats du **Tableau II. 15.** et **Figure. II.17,** nous a permis de faire les remarques suivantes

- L'ETR est égale à 328,21mm, et représente 89,92% des précipitations.
- Le renouvellement des réserves du sol débute au mois de Novembre jusqu'au mois de Mai.
- Le déficit agricole est de l'ordre de l'ordre de 468,28mm, la saison commence du mois de Mai jusqu'au mois de Novembre.
- Un excès de l'ordre de 32,57mm qui représente les mois de Janvier, Février, Mars et Avril.

II.14 Bilan hydrologique :

L'équation du bilan s'écrit comme suit:

$$P = ETR + R + I \dots\dots\dots(\text{Eq.12})$$

- P: la hauteur de la lame d'eau précipitée en mm
- E: l'évapotranspiration réelle en mm
- R: le ruissellement en mm
- I: l'infiltration

II.14.1 Estimation du ruissellement annuel:

La formule de **Tixeront- Berkaloff** applicable en zone semi-aride, permet d'estimer le ruissellement à l'aide de la relation suivante:

$$R = \frac{P^3}{3 \times ETP^2} \dots\dots\dots (Eq.13)$$

- R: Ruissellement annuel en mm;
- P: Précipitations moyennes annuelles en mm;
- ETP: Évapotranspiration potentielle annuelle en mm.

Soit : P= 365mm

$$ETP=795,95mm \quad \longrightarrow \quad R=25,58mm$$

II.14.2 Infiltration

L'infiltration est le passage d'eau à travers la surface du sol en mouvement descendant de la zone non saturée jusqu'à la zone saturée. (G. Castany et J. Margat, 1977).

On peut estimer ce paramètre suivant la formule suivante :

$$I = P - (ETR + R) \dots\dots\dots (Eq.14)$$

De ce qui précède, on retient les valeurs suivantes:

- P = 365mm
- ETR = 328,21mm \longrightarrow I = 11,21 mm soit un 3.07%.
- R = 25,58 mm

II.14.3 lame d'eau écoulee (E)

$$E = R + I \dots\dots\dots (Eq.15)$$

$$E = 25,58 + 11,21 = 36,79 \text{ mm}$$

L'ensemble de La lame d'eau ruisselée et infiltrée est égal à 36,79 mm et représente 10,07% des précipitations moyennes annuelles enregistrées sur la région de Ain- Azel.

II.15 Conclusion:

Le secteur étudié est caractérisé par un climat sec semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de 365mm et des températures moyennes annuelles de 14.62°C.

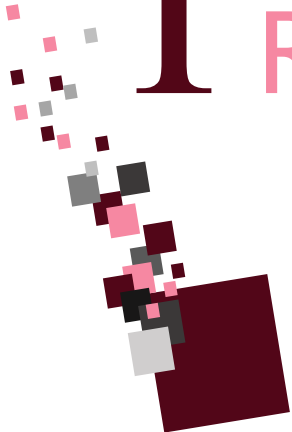
L'analyse des précipitations mensuelles montre que la courbe des précipitations est en dessous de la courbe thermique depuis le mois du Juin jusqu'au mois d'août, ce qui correspond à une période de sécheresse.

L'évapotranspiration réelle retenue est estimée à 328,21mm et qui représente 89.92% des précipitations, et l'évapotranspiration potentielle est estimée à 795,95mm, donc, le bilan hydrique de la région est très déficitaire: le déficit est estimé à 467,68 mm.

L'excédent est évalué à 32,57 mm selon le bilan hydrologique de Thornthwaite.

Le ruissellement est estimé par la formule de Tixeront- Berkaloff à 25,28mm.

L'infiltration représente la qualité d'eau qui pénètre dans le sous-sol, ce paramètre est très important du point de vue hydrogéologique, mais il est difficile à apprécier, et vu les valeurs estimées de l'ETP et l'ETR, on peut dire que l'infiltration est très faible, (3,07%).



TROISIÈME
CHAPITRE

III. 1. Introduction :

L'étude hydrogéologique permet de compléter et de confirmer ce qui a été précédemment prédéterminé par la géologie. Cette étude s'avère nécessaire pour arriver à une bonne connaissance des caractéristiques hydrogéologiques des différents aquifères existants, elle permet donc de reconnaître les potentialités en eaux souterraines de la région.

Pour mieux appréhender l'hydrogéologie de notre région d'étude, nous avons suivi les démarches classiques de toute étude hydrogéologique :

- ❖ Mesure piézométrique sur terrain, (inventaire des points d'eau) ;
- ❖ Élaboration de la carte piézométrique ;
- ❖ Interprétation de la carte piézométrique ;
- ❖ Étude des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère.

III. 2. Aperçu sur l'hydrogéologie de la région de Sétif:

Du point de vue hydrogéologique, la région de Sétif est répartie en deux grandes zones:

- ❑ La zone Nord dite à faible potentialité hydrique souterraine qui est caractérisée par un relief très morcelé par la néotectonique, l'agressivité de l'érosion, la faiblesse des masses calcaires et la large dominance des formations argileuses ou marneuses qui créent de mauvaises conditions pour l'existence d'aquifères. Les sources sont faibles, dispersées et peu intéressantes à cause de l'irrégularité de leur débit.
- ❑ La zone Sud de la région Sétifienne ; dont notre zone d'étude fait partie ; dite à moyenne et forte potentialité hydrique, est par contre représentée par un grand développement des formations Subhorizontaux détritiques Mio-Plio-Quaternaire qui détermine l'existence d'une nappe superficielle déjà surexploitée. Par ailleurs, il y a un grand nombre d'aquifères potentiels correspondant à des formations carbonatées épaisses et qui sont répertoriés comme suit : **(Fig. III.1)**

- ❖ L'aquifère de l'Yprésien-Lutétien inférieur (e4-5);
- ❖ L'aquifère du Campano-Maestrichtien (C6c)
- ❖ L'aquifère du Cénomano-Turonien (C1-2);
- ❖ L'aquifère de l'Aptien (n5);
- ❖ L'aquifère du Barrémien (n4);
- ❖ L'aquifère de l'Hauterivien (n3)
- ❖ L'aquifère du Jurassique (Jd)

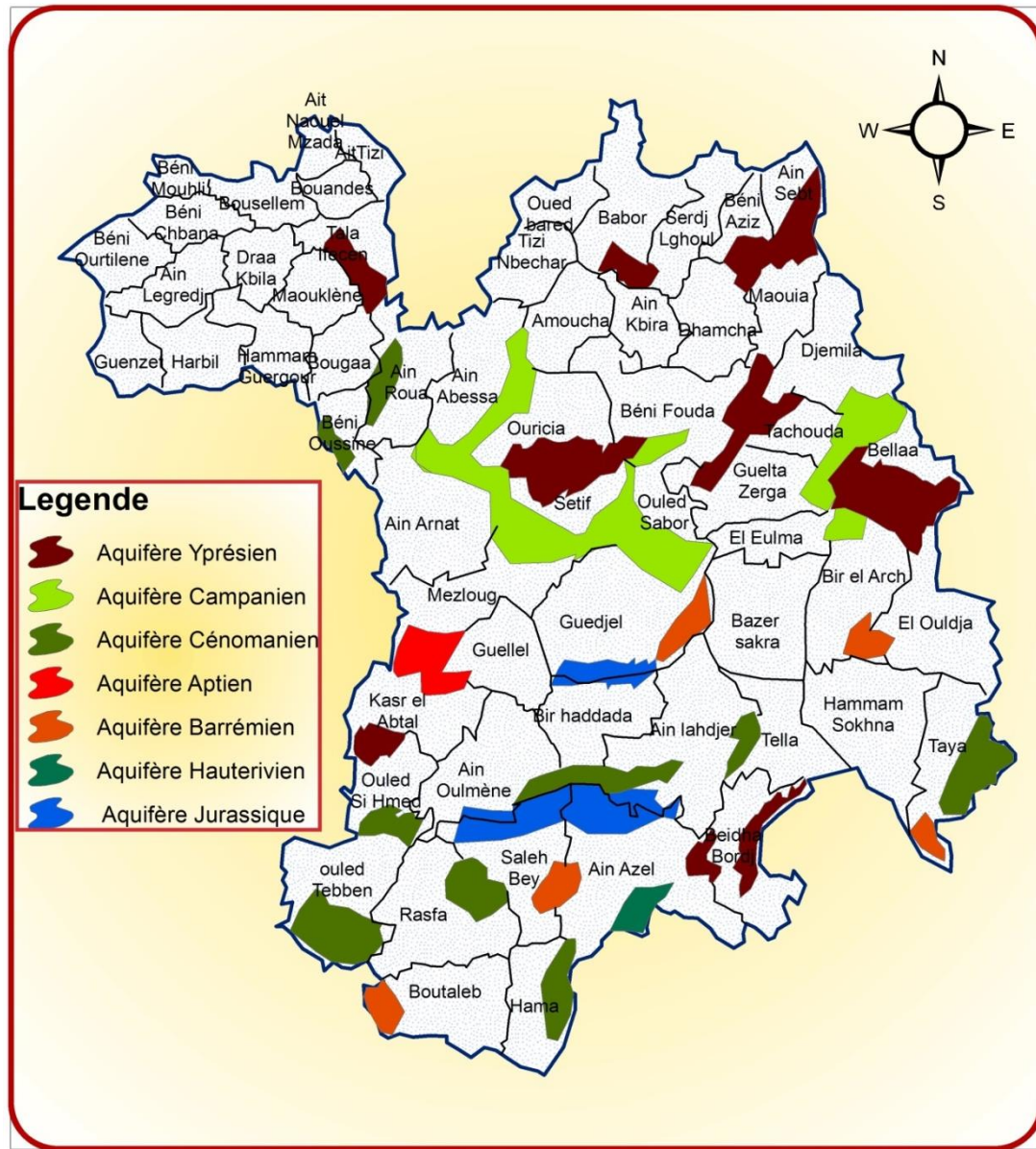


Fig. III.1 Carte schématique descriptive des principales nappes aquifères existantes à travers la région de Sétif (DREWS, 2011).

III.3. Contexte hydrogéologique de Ain- Azel :

La région des hautes plaines Sétifiennes allant d'El- Eulma vers Ain- Azel dont le gisement de Chaabet- el- Hamra fait partie a fait l'objet de plusieurs investigations hydrogéologiques, (H. Kada et A. Demdoug, 2020 ; H. Kada, 2014 ; M. A. Bellouche, 2016, 1996; A. Demdoug, 2010; A. Demdoug et M. Djebbar, 2009; L. Belkhiri et al, 2010; L. Belkhiri, 2005; A. Boudoukha, 1998; 1988) où ils ont identifié deux aquifères importants. Du point de vue hydrogéologique, la zone d'étude renferme :

III.3.1. Aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire :

La couverture Mio-Plio-Quaternaire représente un aquifère superficiel, c'est un aquifère hétérogène, constitué essentiellement par des alluvions anciennes et récentes, des

terres arables, des glacis polygéniques, des calcaires villafranchiens, des calcaires lacustres et cailloutis du Pliocène, des sables, limons et conglomérats du Miocène. L'épaisseur de ces formations varie d'un endroit à un autre.

III.3.2. Aquifère profond (Crétacé inférieur) :

Les niveaux d'aquifères sont édifiés au niveau des bancs carbonatés fortement tectonisés et bien fissurés et karstifiés, ceci leur donne la capacité de renfermer des potentiels hydriques considérables. Ce sont des aquifères à porosité secondaire qui sont constitués dans des formations profondes du Crétacé.

III.4. Inventaire des points d'eau

La zone d'étude présente un grand nombre de forages qui sont dispersés en fonction de la situation de l'agglomération et qui sont destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation.

Deux campagnes piézométriques, (**Juin 2015 et Mai 2016**), en collaboration avec les services techniques de l'ANRH ont été effectuées dans la plaine de Ain- Azel. Nous avons recensé 11 forages, (**Fig.III.2**), dont la majorité sont des ouvrages récents et imparfaits de 32 à 120m de profondeur, répartis irrégulièrement sur toute la plaine et qui servent en grande partie à l'irrigation et aux besoins domestiques.

Le tracé des deux cartes piézométriques, (**Figure III.3 et III.4**), à partir des deux campagnes, (**Juin 2015, Mai 2016**), est basé sur un inventaire de 11 points d'eau dont les données sont reportées au tableau III.1, nous permet cependant de faire quelques observations sur l'écoulement des eaux souterraines et l'évolution de la surface piézométrique dans le temps.

Tableau III.1. Inventaire des points d'eau dans la zone d'étude

N° du point d'eau	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	PROFONDEUR (m)	CP(m) JUIN 2015	CP(m) Mai 2016
1	724938,52	3972731,26	930	120	856,55	857,86
2	725386,45	3965988,79	952	50	933,4	932,75
3	725830,45	3964335,37	985	99	952,55	952,83
4	727487,53	3975108,71	905	43	893,75	891,62
5	723465,68	3965477,6	974	32	944,22	943,56
6	729727,75	3968074,27	919	90	857,68	857,18
7	735724,03	3975819,37	900	55	859,35	858,22
8	727768,84	3971015,3	914	/	841,11	840,06
9	736679,58	3970001,56	920	/	821,88	822,81
10	737010,13	3965867,43	1010	89	991,02	990,67
11	735090,57	3970402,78	925	/	827,55	825,99

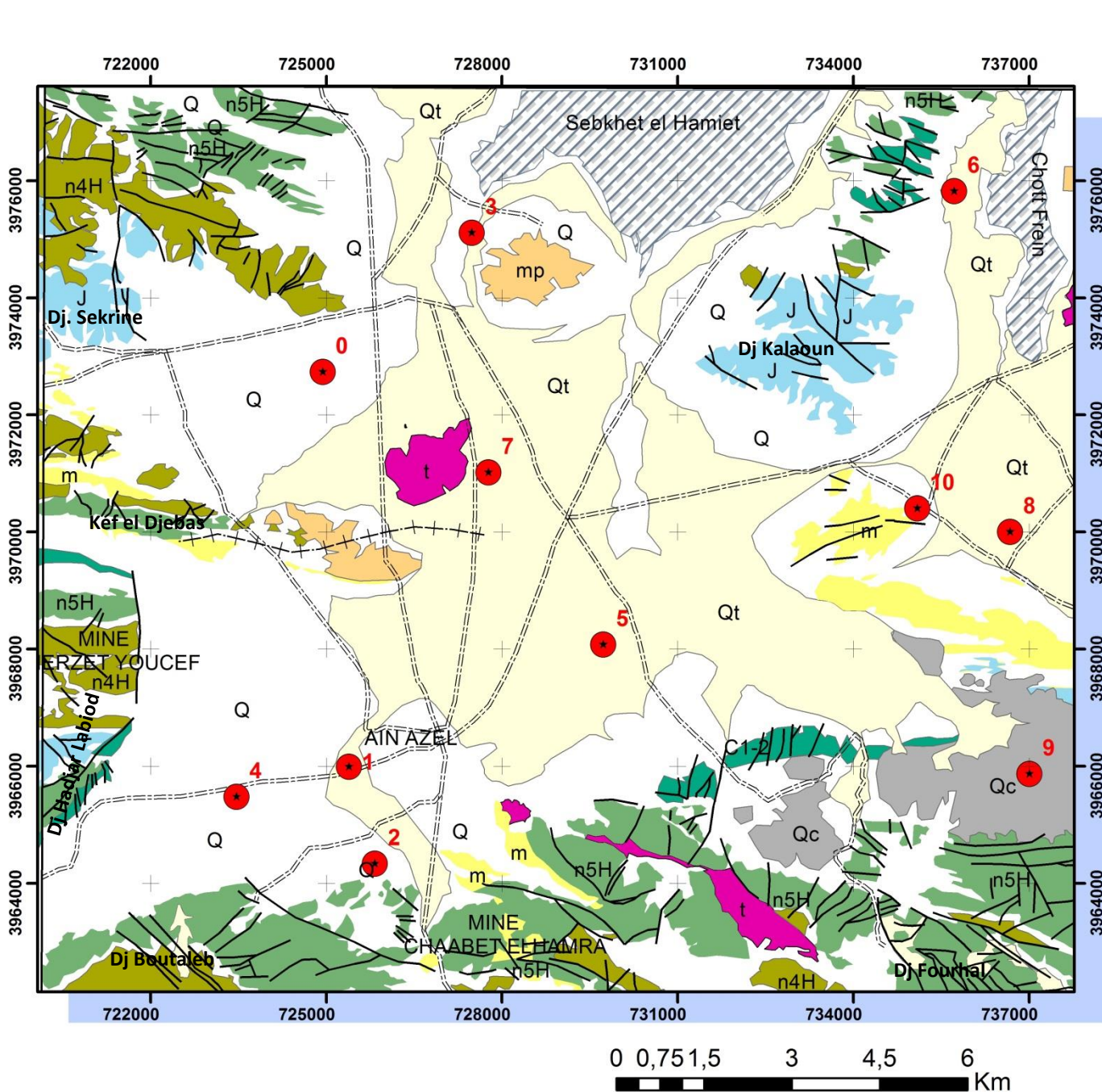
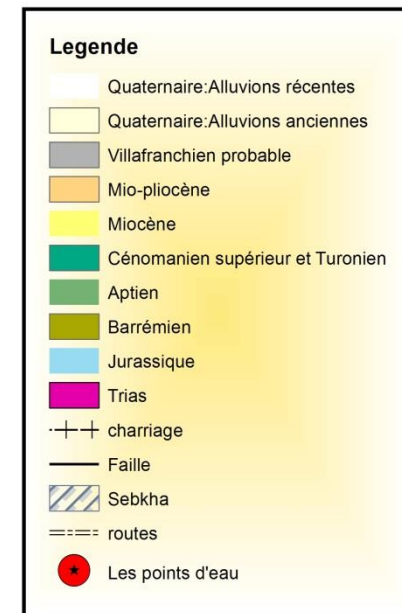


Figure III.2 : Carte d'inventaire des points d'eau dans la région de Ain- Azel (D'après la carte géologique de Ain- Azel, feuille n°143, et Ain- Lahdjer feuille n° 144, Échelle 1/50000)



III.5 Interprétation de la carte piézométrique

Les cartes piézométriques dressées, (**Figure III.3 et III.4**), nous a permis de faire quelques observations sur l'écoulement des eaux souterraines et l'évolution de la surface piézométrique dans l'espace.

À partir de l'examen de la carte piézométrique couvrant la zone d'étude, il en ressort :

III. 5.1 Pour la première campagne (Juin 2015):

- Nous avons constaté un sens d'écoulement principal vers le plaine de Ain Azel, c'est-à-dire : du Nord vers le Sud et du Sud vers le Nord ;
- La cote piézométrique la plus élevée est située à l'Est de la mine de Chaabet- el-Hamra, où le sens d'écoulement est toujours vers le plaine ;
- Les cotes piézométriques les plus basses s'expliquent par une élévation du substratum ;
- Toute la zone d'étude est caractérisée par des courbes piézométriques régulières plus ou moins espacées, (gradient hydraulique moyen et une bonne perméabilité), traduisant une zone d'accumulation ;
- La zone Sud de la zone d'étude, à l'Est et à l'Ouest du gisement de Chaabet- el-Hamra, les courbes piézométriques sont serrées au début puis elles deviennent espacées dans le sens d'écoulement, reflétant une zone d'accumulation ;
- Aussi, un sens d'écoulement SE a été observé à l'Est du DJ. Kalaoune.

III. 5.2 Pour la deuxième campagne (Mai 2016) :

- Le sens d'écoulement principal est toujours vers le centre de la zone d'étude, c'est-à-dire vers la plaine ;
- La comparaison des deux cartes piézométriques n'indique aucun changement dans l'allure des courbes piézométriques et son espacement, mais les cotes piézométriques enregistrées, (**Tableau III. 1**), montrent un rabattement de l'ordre de 0,5m en moyenne, avec un maximum de 2,13m, ce qui est expliqué par la surexploitation qu'a connue la région ;
- Les deux points 1 et 9 enregistrent un soulèvement du niveau piézométrique, (**Tableau III. 1**), de 1,31 m et 0,93 respectivement s'explique par la situation des deux points dans le sens d'écoulement des eaux.

III.6 Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique correspond à la perte de charge par unité de longueur, ou à la pente de la nappe, c'est la différence du niveau piézométrique entre deux points de la surface piézométrique. Il est donné par la relation suivante:

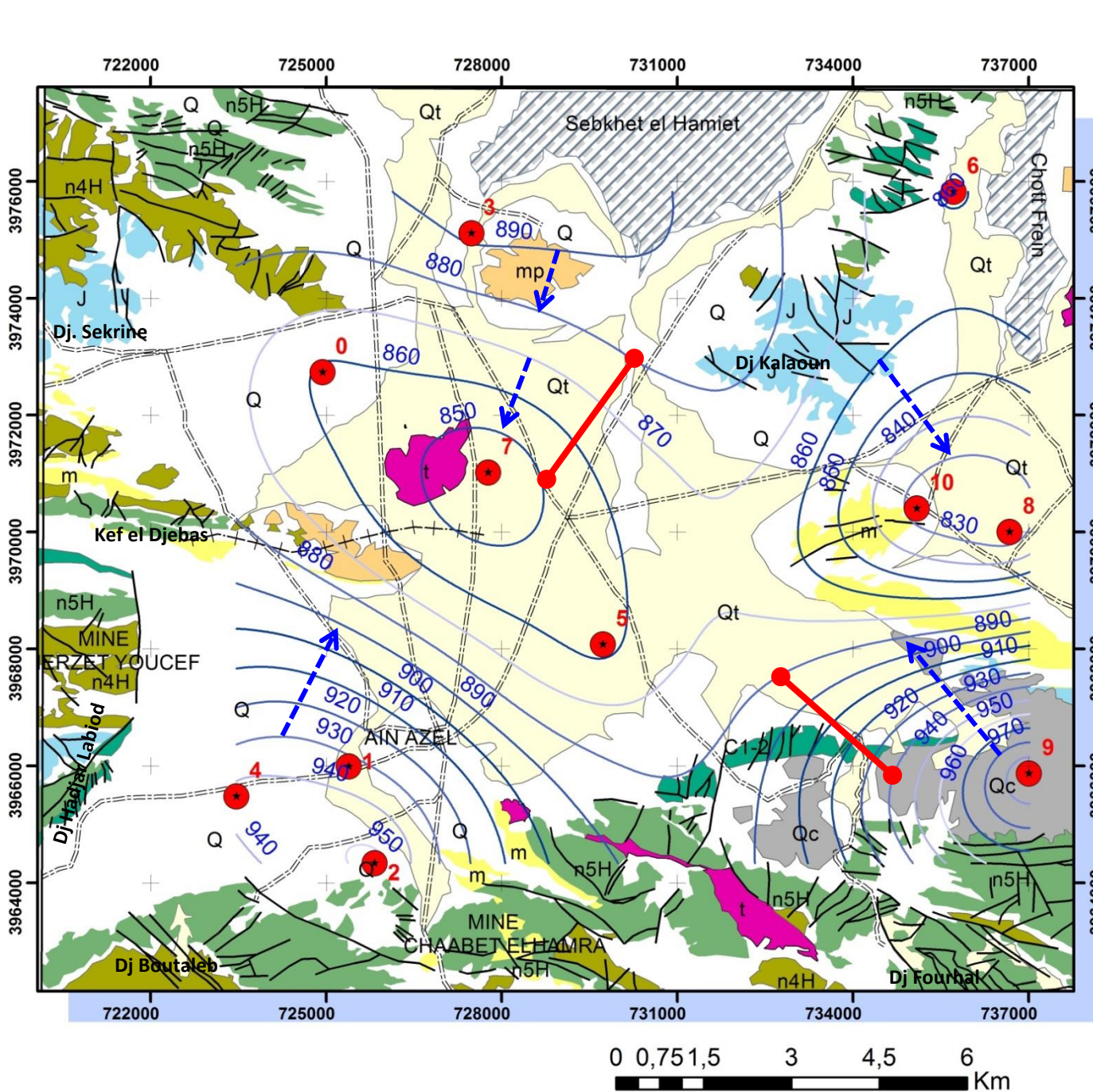
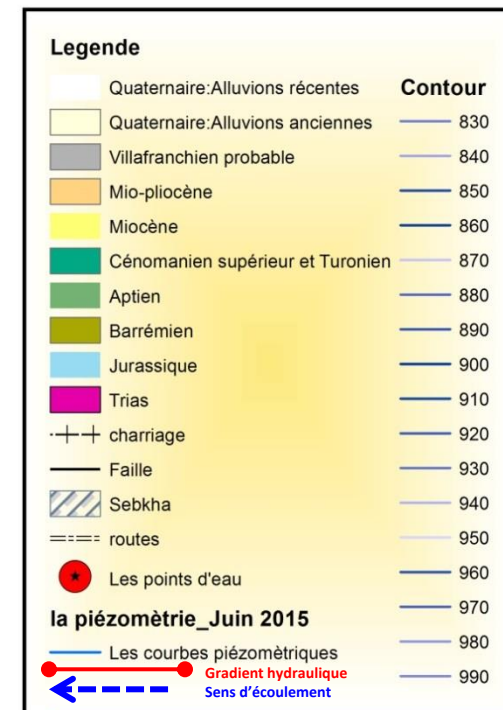


Figure III.3 : La carte piézométrique de Ain- Azel, (Juin 2015).



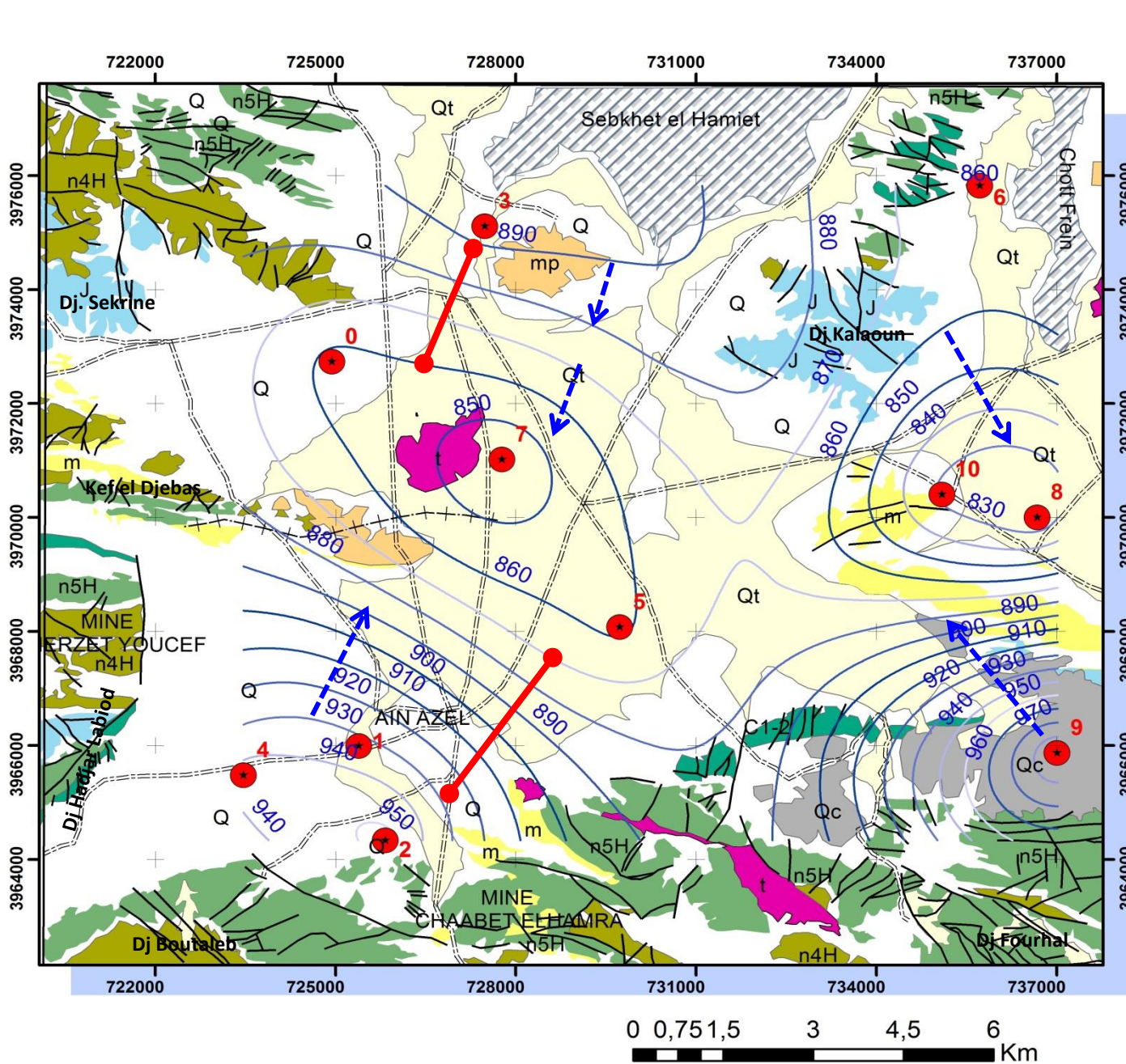
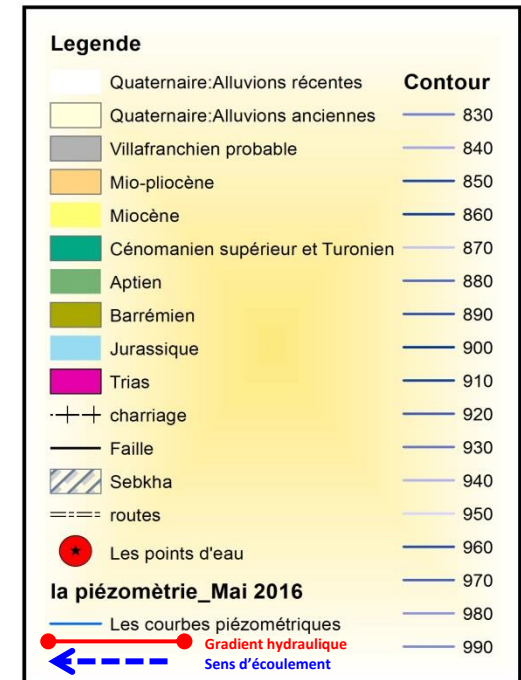


Figure III.4 : La carte piézométrique de Ain- Azel, (Mai 2016).



$$I = (H_1 - H_2) / L \dots \dots \dots (Eq. 1)$$

Avec :

- **H1 et H2** : désignent les niveaux piézométriques déterminés par les courbes hydro-isohypses.
- **L** : désigne la distance entre les deux points H1 et H2, déterminée par l'échelle de la carte piézométrique.

Tableau III.2. Calcul du gradient hydraulique de la plaine de Ain- Azel, au Sud de Sétif.

Périodes	H ₁ (m)	H ₂ (m)	L(m)	I	i(%)
Juin 2015	980	890	1407	0,063	6,39
	880	850	1633	0,018	1,83
Mai 2016	890	860	1712	0,017	1,75
	940	870	810	0,086	8,64

Les valeurs du gradient hydraulique sont relativement différentes. Cette variation est due à l'hétérogénéité des formations, donc à la perméabilité.

III.7 Contexte hydrogéologique du gisement de Chaabet- el- Hamra

Les études et les données hydrogéologiques montrent la mise en évidence de la présence de deux (02) aquifères sous forme des nappes libres:

- ✿ Un aquifère d'âge Hauterivien à perméabilité de fissure dans la partie centrale du gisement. Il est localisé dans des formations carbonatées sous forme des dolomies fissurées hématitisées et parfois cavernueuses. Cet aquifère a été étudié par la réalisation d'une batterie de forage et de piézomètre, afin de dénoyer la mine.
- ✿ Une coupe hydrogéologique, (**Figure III.5**), a été effectuée dans cette partie, où nous avons utilisé les coupes techniques des forages de la batterie Hauterivienne (F1, F2, F3, F4, F5 et F6) et les coupes des différents sondages d'exploitation de la même zone.

La première lecture à cette coupe nous montre un niveau piézométrique irrégulier de l'aquifère qui touche les formations géologiques de l'Hauterivien.

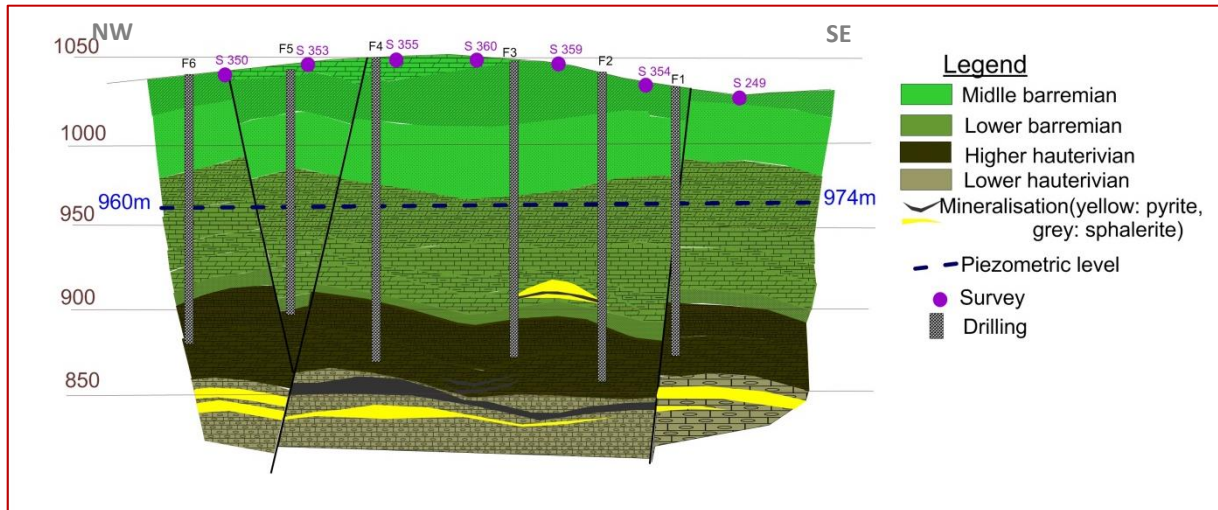


Figure III.5. Coupe hydrogéologique dans la partie centrale du gisement touchant l'aquifère Hauterivien.

- ✿ Un second aquifère d'âge Barrémien, (**Figure III.6**), localisé dans la partie Nord-Ouest du gisement. Il est associé aux grès et dolomies gréseuses. Cet aquifère a été précisé par la réalisation d'une deuxième batterie de forage afin d'alimenter la région de Ain- Azel et ses bordures par l'eau potable et d'irriguer les terres fertiles de la région.

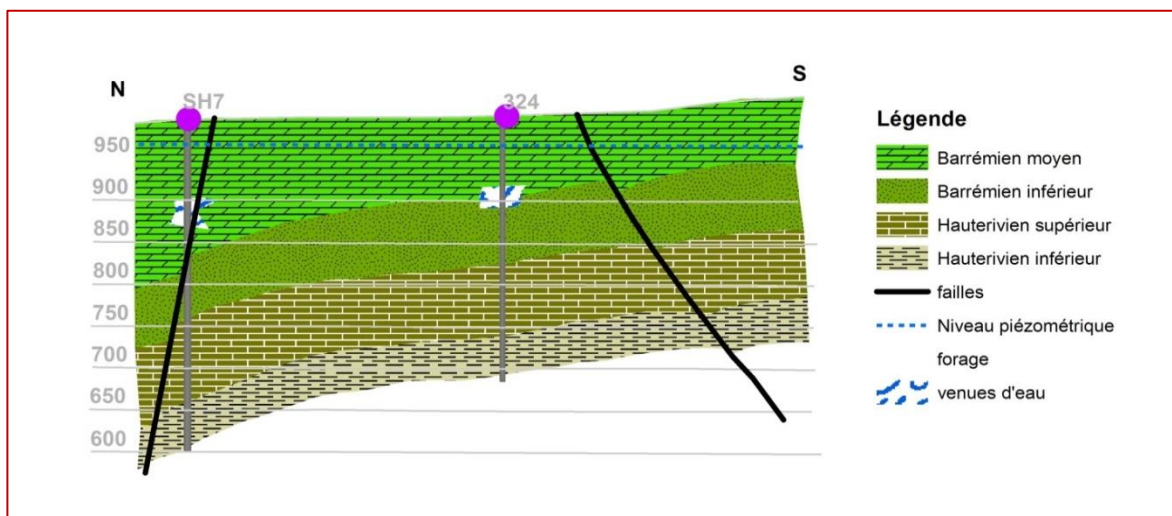


Figure III.6. Coupe hydrogéologique dans la partie Nord- Ouest du gisement touchant l'aquifère Barrémien

- ✿ La partie Est du gisement: deux sondages hydrogéologiques ont été exécutés, ces derniers ont donné des résultats négatifs et une absence des venues d'eau a été notée.

III.8 Inventaire des points d'eau

En 400 sondages de prospection, **vingt-quatre** ont été utilisés comme des ouvrages hydrauliques qui servent à contrôler le niveau piézométrique du gisement, (**Figure III.7**).

La collecte des données des différents niveaux piézométriques à travers les différents ouvrages datés de l'année **1990**, nous a permis l'élaboration d'une carte piézométrique pour le gisement.

III.9 Interprétation de la carte piézométrique

- La carte piézométrique (**Figure III.8**) nous montre que le sens d'écoulement des eaux se fait vers le NW et NE de l'aquifère ;
- Les courbes piézométriques sont serrées régulièrement, (c'est –à-dire un gradient hydraulique fort et une vitesse d'écoulement souterraine forte et une perméabilité faible), au début puis elles deviennent plus ou moins espacées, (c'est –à-dire un gradient hydraulique moyen et une bonne perméabilité), au centre présentant une concavité, ce qui traduit une zone d'accumulation où est concentrée la majorité des forages du gisement.

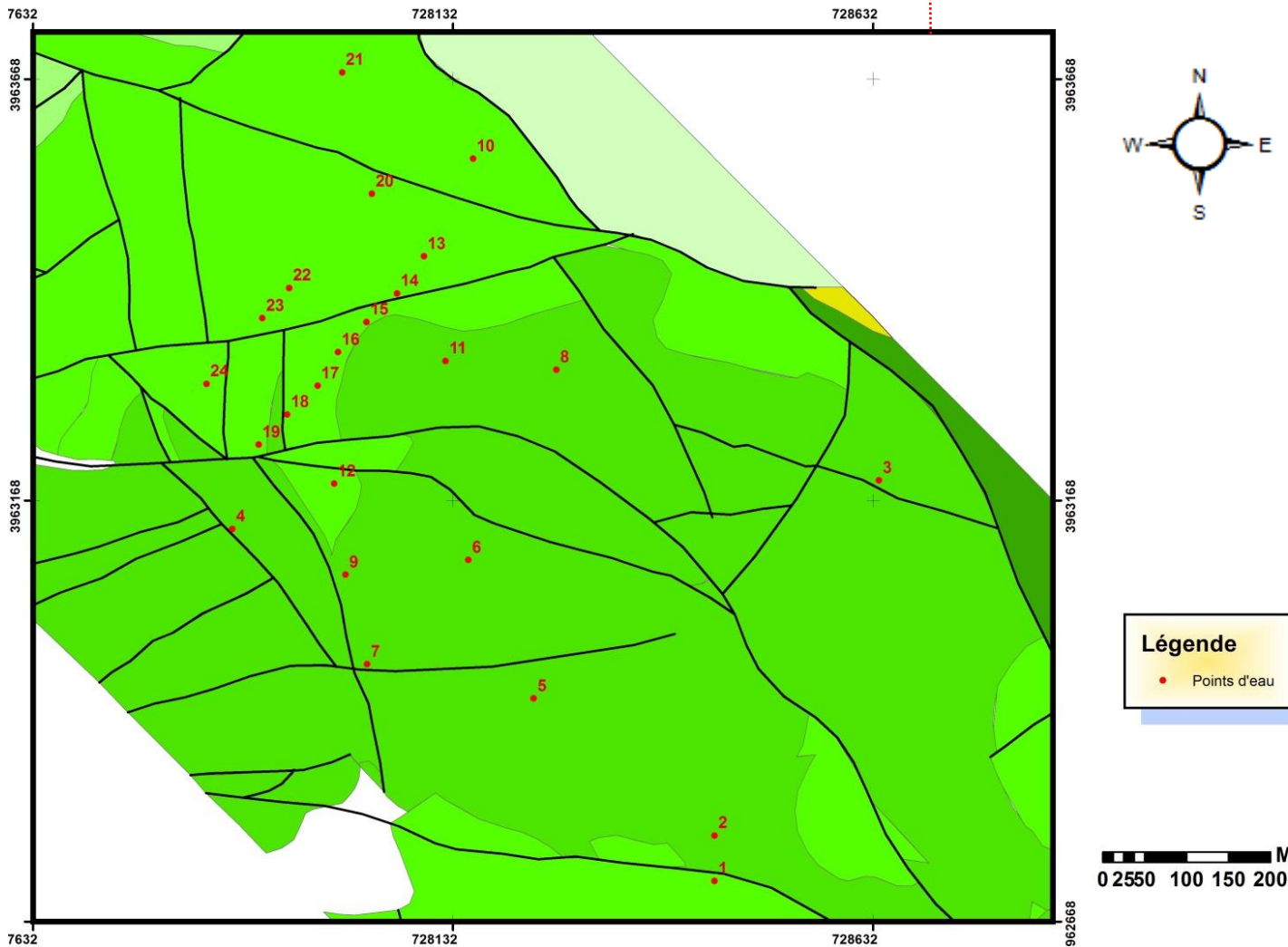
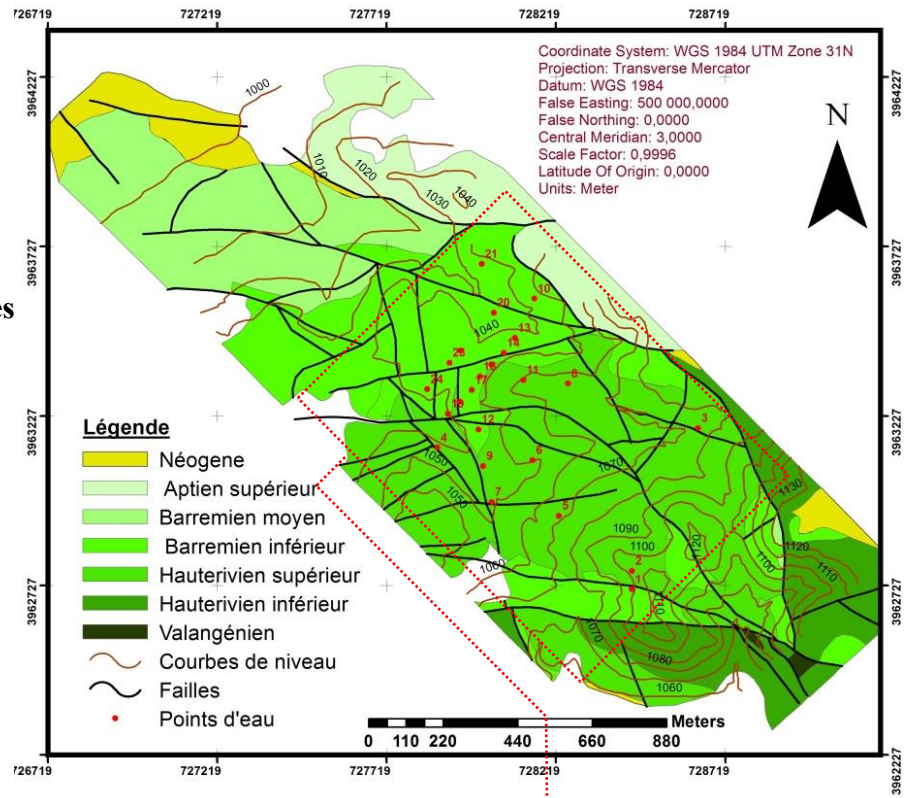
III.10 Gradient hydraulique

Pour exprimer le gradient hydraulique dans le gisement de Chaabet- el- Hamra, nous avons choisi deux endroits où les courbes iso- pièzes sont serrées et espacées.

Tableau III.3. Calcul du gradient hydraulique du gisement de Chaabet- el -Hamra.

Périodes	H₁(m)	H₂(m)	L(m)	I	i(%)
1990	970	964	129	0,046	4,6
	992	185	185	0,054	5,4

Figure III.7: Carte d'inventaire des points d'eau du gisement de Chaabet-el-Hamra, (Juin 1990).



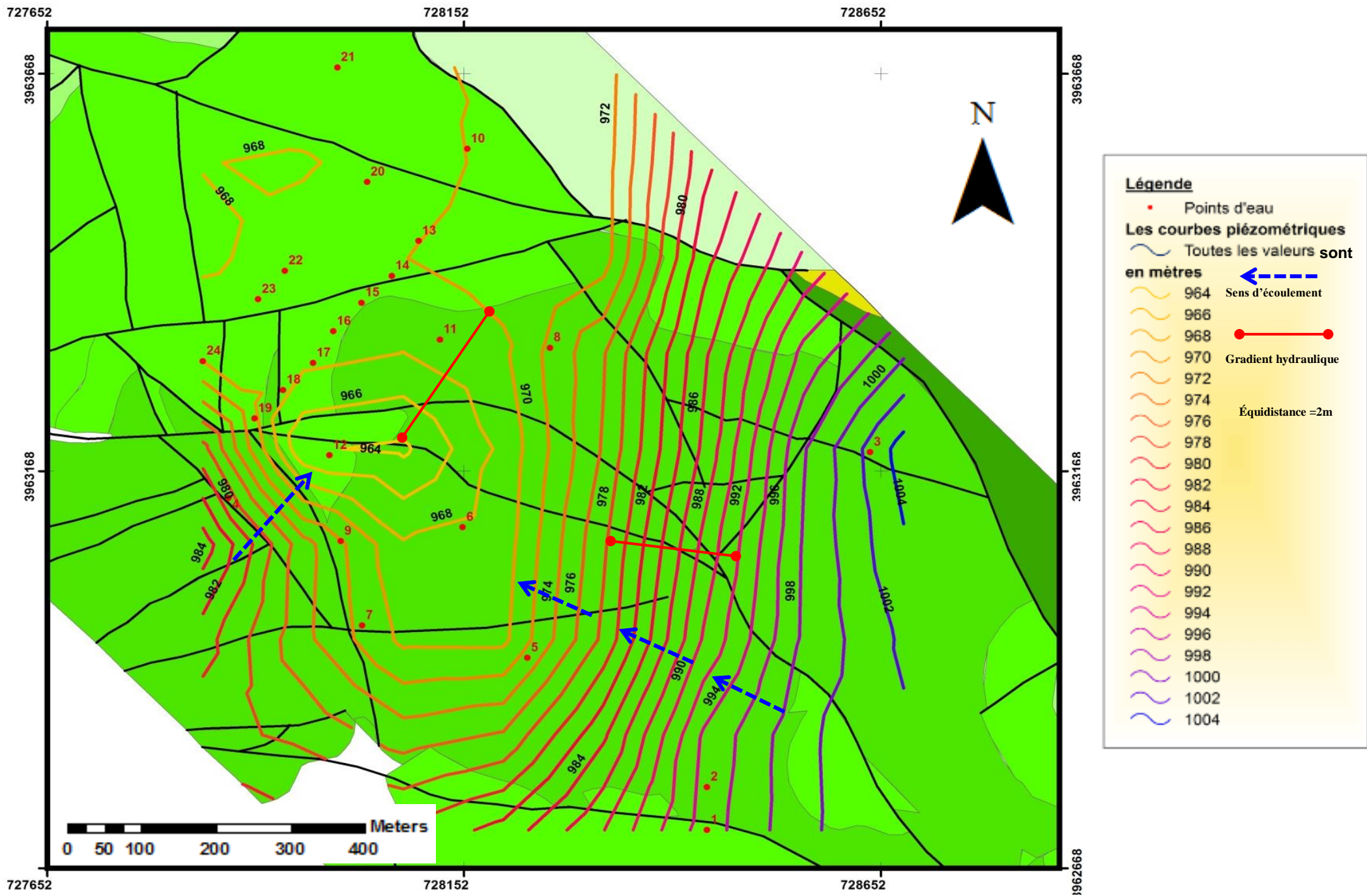


Figure III.8: Carte piézométrique du gisement de Chaabet el Hamra, (Juin 1990).

III.11 Les paramètres hydrodynamiques

Dans le but d'identifier les paramètres hydrodynamiques à savoir la transmissivité (T) et la perméabilité (K) au sein des deux nappes Hauterivienne et Barrémienne captées dans le gisement de Chaabet- el- Hamra et la nappe Mio- Plio- Quaternaire autour de Kherzet- Youcef à Ain-Azel, au Sud de Sétif, nous avons utilisé les résultats des essais définitifs des forages déjà effectués par la Direction des Ressources en Eau (DRE) de Sétif.

Dix localités pour lesquelles nous disposons des données de pompage d'essai ont permis l'estimation de « T » et de « K » (Tableau III. 3). Les figures **A2.1 jusqu'au A2.20** en annexe 2 représentent les graphes du rabattement « S » en fonction du temps « t » des sites de pompage.

Leur interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de **C. E. Jacob (1950)**.

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log 2.25 \frac{Tt}{x^2S} \dots\dots\dots(\text{Eq.2}) \text{ où}$$

- **s** : rabattement observé en fonction du temps **t**, en **m**.
- **Q** : débit du pompage, en **m³/s**.
- **T** : transmissivité de l'aquifère, en **m²/s**.
- **t** : durée du pompage, en **s**.
- **S** : coefficient d'emmagasinement.
- **X** : distance séparant le puits de pompage du puits d'observation, en **m**.

❖ **La transmissivité :**

La productivité d'un captage dans un aquifère est fonction de son coefficient de perméabilité « K » et de son épaisseur « H ». C'est pourquoi un nouveau paramètre, noté T a été créé. La transmissivité « T » d'un aquifère est le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur, « L » d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique « i ».

Ici, elle est obtenue par la résolution graphique de l'expression de Jacob en reportant sur papier semi-logarithmique, les rabattements exprimés en mètre en ordonnées arithmétiques et le temps de pompage exprimé en secondes en abscisses logarithmiques. La transmissivité en m²/s est déterminée à partir de la pente de la droite obtenue, pour un cycle logarithmique, par la formule suivante :

$$T = \frac{0.183Q}{c} \dots\dots\dots(\text{Eq.3})$$

Où :

- **T** : transmissivité de l'aquifère, en m^2/s .
- **Q** : débit du pompage, en m^3/s .
- **C** : pente de la droite.

❖ **La perméabilité :**

La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique, (G. Castany, 1982). Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité « K » défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement en 1 seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique.

La perméabilité « K » est exprimée en m/s et donnée par la formule simplifiée suivante :

$$K = \frac{T}{e} \dots\dots\dots (Eq.4)$$

Où

K : désigne la perméabilité en m/s ;

T : désigne la transmissivité en m^2/s ;

e : désigne l'épaisseur de la couche aquifère ;

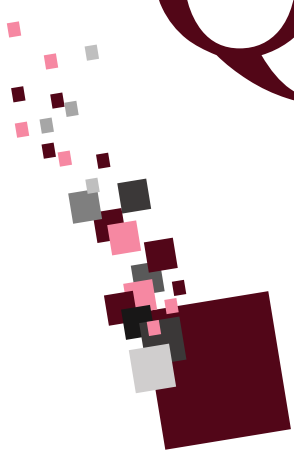
Tableau III.4. Quelques valeurs des paramètres hydrodynamiques (K et T).

Système aquifères	Forages	Palier/ long duré	T (m^2/s)	K (m/s)
Hauterivien	CH6	Long Duré	$1.48 \cdot 10^{-2}$	$9.84 \cdot 10^{-5}$
	PZ1	Long Duré	$1 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-6}$
Barrémien	Afounes	palier 1	$5.28 \cdot 10^{-3}$	$4.40 \cdot 10^{-5}$
		Palier 2	$2.98 \cdot 10^{-3}$	$2.48 \cdot 10^{-5}$
		Long Duré	$1.66 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-5}$
Mio-Plio-Quaternaire	P1	Long Duré	$1.69 \cdot 10^{-1}$	$1.13 \cdot 10^{-3}$
	P2	Long Duré	$2.14 \cdot 10^{-1}$	$1.43 \cdot 10^{-3}$
	P3	palier 1	$1 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-5}$
		palier 2	$1 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-5}$
		Long Duré	$1.39 \cdot 10^{-2}$	$9.28 \cdot 10^{-5}$
	P4	palier 1	$5.78 \cdot 10^{-2}$	$3.85 \cdot 10^{-4}$
		palier 2	$3.16 \cdot 10^{-4}$	$4.74 \cdot 10^{-2}$
		Long Duré	$3.55 \cdot 10^{-2}$	$2.37 \cdot 10^{-4}$
	P5	palier 1	$1.17 \cdot 10^{-1}$	$7.77 \cdot 10^{-4}$
		palier 2	$2.45 \cdot 10^{-3}$	$1.63 \cdot 10^{-5}$
	P6	palier 1	$4.62 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-5}$
		palier 2	$2.33 \cdot 10^{-3}$	$1.55 \cdot 10^{-5}$
		palier 3	$6.95 \cdot 10^{-4}$	$4.63 \cdot 10^{-5}$
		Long Duré	$4.56 \cdot 10^{-3}$	$3.04 \cdot 10^{-5}$
P7	Long Duré	$5.69 \cdot 10^{-4}$	$3.79 \cdot 10^{-6}$	

III.12 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, quelques points essentiels méritent d'être soulignés :

- ❖ L'hydrogéologie du secteur étudié concerne principalement deux grands systèmes aquifères :
- ❖ Un aquifère superficiel correspondant aux formations du Mio-Plio-Quaternaire et un complexe d'aquifères profonds du Crétacé inférieur, (Hauterivien et Barrémien précisément), qui est important pour les besoins en eau de la région.
- ❖ Les deux cartes piézométriques élaborées dans la plaine de Ain- Azel, à partir des campagnes de Juin 2015 et Mai 2016, montrent que le sens d'écoulement général est du Nord vers le Sud et de Sud vers le Nord, c'est-à-dire vers la plaine de Ain Azel ;
- ❖ En comparant les deux périodes, (Juin 2015 et Mai 2016), un rabattement de 0,5m en moyenne a été enregistré ;
- ❖ Au niveau du gisement de Chaabet- el- Hamra, les courbes piézométriques sont serrées au début puis elles deviennent espacées dans le sens d'écoulement, reflétant une zone d'accumulation ;
- ❖ Les cartes piézométriques traitées permettent l'estimation des gradients hydrauliques variant entre **1,83 et 6,39%** pour la période du Juin 2015 et entre **1,75 à 8,64%** pour la période du Mai 2015.
- ❖ Les valeurs du gradient hydraulique sont relativement différentes. Cette variation est due à l'hétérogénéité des formations, donc à la perméabilité.
- ❖ L'étude hydrodynamique nous démontre que la transmissivité au niveau de l'aquifère Hauterivien est de l'ordre de $1,48 \cdot 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$, $1,66 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ pour l'aquifère Barrémien et de $3,16 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ et $2,14 \cdot 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ pour l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.

A decorative graphic consisting of a trail of small squares in shades of pink, grey, and dark red, leading to a larger dark red square at the bottom.

QUATRIÈME
CHAPITRE

IV.1. Introduction :

Ce travail apporte une caractérisation géochimique globale des eaux souterraines Hauterivienne et Barrémienne du gisement de Chaabet- el- Hamra et les eaux du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Ain- Azel, au Sud de Sétif.

Pour la caractérisation géochimique des deux aquifères Hauterivien et Barrémien de Chaabet- el- Hamra, des campagnes de reconnaissance et d'échantillonnage des points d'eau ont été effectuées dans cette région (d'abord en contexte minier de Chaabet- el- Hamra, puis à travers toute la région de Ain- Azel tant en contexte agricole que péri-urbain), notamment pendant l'année 2012 et 2018.

Les résultats obtenus lors de ces campagnes de mesures ont permis tout d'abord à caractériser les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines. Ces derniers contribuent à définir les familles d'eau au sein des différents aquifères, à montrer leur variabilité latérale et à préciser l'origine de la minéralisation des eaux souterraines. Enfin, à établir les aptitudes de ces aquifères à l'irrigation des terres fertiles de la région d'étude.

En outre, plus de 15 gisements de Pb, Zn, Ba et Fe sont connues dans les monts du Hodna, au Nord-Est de l'Algérie ([A. Boutaleb et al. 2014](#)) où le territoire de Ain- Azel comprend deux gisements: Kherzet- youcef à l'Ouest et Chaabet- el- Hamra au Sud-Est, le risque de la présence de métaux lourds dans les eaux souterraines est un problème majeur. C'est l'une des préoccupations les plus importantes qui ont attiré l'attention aux niveaux régional, local et mondial en raison de leur importance toxicologique dans les écosystèmes et de leur impact sur la santé publique ([U. Rizwan et al., 2009](#)).

Les métaux lourds peuvent causer des effets graves sur la santé avec des symptômes variés selon la nature et la quantité de métal ingéré ([A. A. Adepoju-Bello et O. M. Alabi 2005](#), [Z. Khoshnam et al. 2017](#)). Cependant, l'eau de mine peut varier considérablement dans la concentration de contaminants présents et, dans certains cas, elle peut même répondre aux spécifications de l'eau potable. Et pour cela, l'analyse des métaux lourds s'avère nécessaire.

IV.2. Échantillonnage et analyse des eaux souterraines :

Cette rubrique s'appesantit sur le prélèvement des échantillons d'eau, la représentativité de l'échantillon et les méthodes analytiques utilisées.

L'échantillonnage a été réalisé au niveau des points d'eau aménagés pour l'alimentation en eau potable de la population, dont l'accès nous a été autorisé. Ces points d'eau appartiennent soit à des particuliers, soit à l'Algérienne des eaux (ADE) chargée de la distribution d'eau potable dans la région de Ain- Azel, soit à l'entreprise nationale des

substances ferreuses et non-ferreuses (ENOF). Ils couvrent spatialement toute la zone d'étude. En effet, les activités industrielles et commerciales sont présentées dans la zone de Ain- Azel, tandis que l'agriculture constitue l'activité principale des habitants de la plaine de Ain- Azel.

IV.3. Les campagnes de prélèvement d'eau :

IV.3.1. Période d'Avril 2012 :

Les eaux de six forages différents dont la profondeur varie de 150 à 200 m ont été collectées au cours du mois d'Avril 2012 dans la zone d'étude, (**Fig. IV.1**), touchant l'aquifère Hauterivien dans le gisement de Chaabet- el- Hamra. Tous les échantillons d'eau ont été stockés dans des bouteilles en polyéthylène (250 ml), préalablement lavées avec une solution acide et de l'eau distillée. Au moment de l'échantillonnage, les bouteilles ont également été soigneusement rincées deux fois avec l'eau de forage. Avant l'échantillonnage, la pompe a fonctionné pendant 15 min et une fois que les valeurs des caractéristiques de l'eau (T, EC et PH) ont atteint une quantité constante, les échantillons ont été prélevés. Les échantillons d'eau ont été filtrés pour séparer les éventuels solides en suspension. De plus, pour éviter des variations imprévisibles de la composition de l'eau, les échantillons ont été conservés dans un réfrigérateur à moins de 4 ° C. ([APHA, 2005](#)).

Les valeurs de conductivité électrique (EC) et de pH des échantillons ont été déterminées sur le site d'échantillonnage à l'aide d'un conductimètre portable (Consort C 5010).

Les concentrations de cations telles que Na^+ et K^+ ont été déterminées par spectrophotomètre à flamme, (Jenway Clinic PFP7) dans les 24 h suivant l'échantillonnage. Les ions Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Bicarbonates (HCO_3^-) et Chlorures (Cl^-) ont été analysés par titrage volumétrique, tandis que NO_3^- et SO_4^{2-} ont été déterminés par chromatographie ionique. Les métaux lourds (Pb, Zn, Fe, Cd, Cr, Mn) ont été détectés par le spectromètre d'absorption atomique, (WFX-110B) et les solides dissous totaux, (TDS) par des méthodes de séchage, ([L. M. L Nollet, 2007](#)). Toutes ces analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), Constantine, Algérie. Les valeurs des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau souterraines ont été comparées aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé

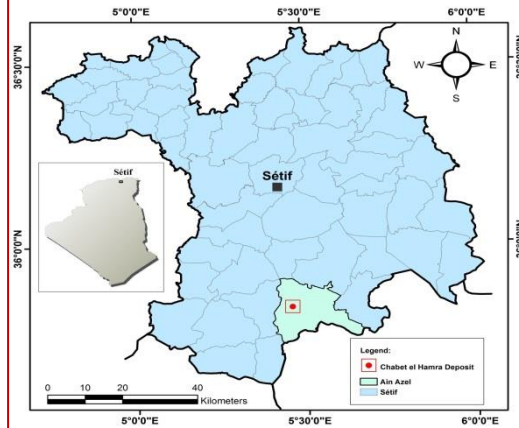
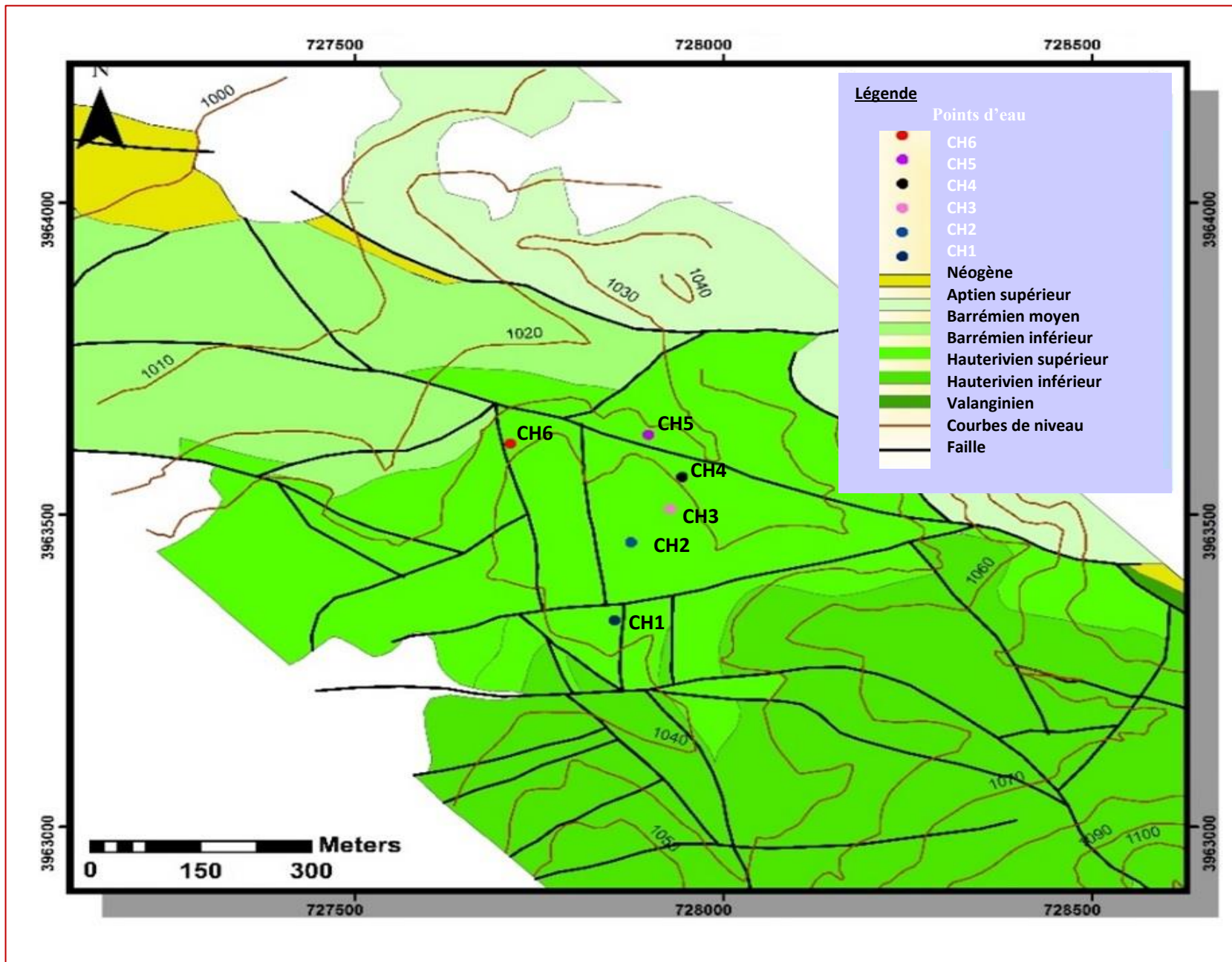


Fig. IV.1. Localisation des forages testés de l'aquifère Hauterivien sur la carte géologique du gisement de zinc de Chaabet- el- Hamra, (Tirée du rapport E. R. E. M, 1992), modifiée.

(OMS, 2008), aux Normes Algériennes (NA.6360, 1992) pour l'eau potable, et à la norme de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO ; Ayers et Westcot, 1994) pour l'eau d'irrigation, (Tableau IV. 1).

Tableau IV.1. Les normes Algériennes (NA. 6360), 1992 ; OMS, (2008) et Ayers and Westcot (1994) pour potabilité et irrigation.

Paramètre	Les normes Algérienne (NA. 6360).1992	WHO (2008)	Ayers and Westcot (1994)
pH	6.5 - 8.5	6.5 to 9.225	8.5
EC (µS/cm)	2800	≤ 1500	3000
TDS (mg/l)	2000	1500	2000
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	200/400	250	960
Cl (mg/l)	200/500	200	1063
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	-	-	610
NO ₃ ⁻ (mg/l)	50	20	10
Ca ²⁺ (mg/l)	75/200	200	400
Mg ²⁺ (mg/l)	150	50	60
Na ⁺ (mg/l)	200	100	919
K ⁺ (mg/l)	20	12	2
Zn (mg/l)	5	3	2
Pb (mg/l)	0.05	0.01	5
Fe (mg/l)	0.3	0.3	0.3
Mn (mg/l)	0.5	0.4	0.2
Cd (mg/l)	0.01	0.003	0.01
Cr (mg/l)	0.05	0.05	0.1
Cu (mg/l)	2	2	0,2

IV.3.1.1 Résultats et discussion

❖ Caractéristiques hydrochimiques

Les données des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines Hauteriviennes du gisement Chaabet- el- Hamra sont données dans le tableau IV.2.

La précision des données sur la qualité de l'eau peut être testée en calculant l'erreur de l'équilibre ionique (IB%) à l'aide de l'équation (1). Il donne une indication de la qualité de

la valeur recommandée pour l'eau d'irrigation est de 6,5 à 8,4, (Ayers et Westcot, 1994). L'eau d'irrigation dont le pH est supérieur à la normale peut provoquer un déséquilibre nutritionnel ou contenir des ions toxiques, (M. B. Pescod, 1985; A. H. M. J. Al-Obaidy et al., 2010).

Les résidus secs de tous les échantillons d'eau souterraine varient de l'ordre de 440 à 522 mg/l avec une moyenne de 457 mg/l, (tableau IV. 2), se situent à l'intérieur des limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994). Selon la classification des résidus secs dans l'eau, (J. D. Hem, 1986), tous les échantillons d'eau souterraine sont étiquetés à l'intérieur de la classe d'eau douce.

La conductivité électrique (CE) est le paramètre le plus important pour déterminer l'adéquation de l'eau à des fins de consommation et d'irrigation, car la CE excessive entraîne la formation de sols salins. (A. Esmaeili et F. Moore, 2012). Pour la CE dans les eaux souterraines Hauteriviennes de la zone d'étude, toutes les valeurs varient entre 690 et 770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 735 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (tableau IV.2). Ainsi, nous pouvons conclure que les eaux souterraines de la région sont acceptables pour la consommation, (OMS, 2008; N / A. 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

❖ Paramètres chimiques

La concentration en calcium (Ca^{2+}) se situe entre 63, 64 et 77, 97 mg /l avec une moyenne de 73, 49 mg /l (**Tableau IV.2**). La teneur en calcium dans la zone d'étude se situe dans les limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992), et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994). La calcite et la dolomite sont responsables de l'enrichissement des eaux souterraines en ions calcium. (K. Kim et S. T. Yun, 2005).

La concentration de magnésium (Mg^{2+}) dans les échantillons d'eau souterraine se situe entre 36, 31 et 44,85 mg /l et avec une moyenne de 42,47 mg /l, (**Tableau IV.2**). La teneur en magnésium dans la zone d'étude se situe dans les limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992), et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

La concentration de sodium (Na^+) dans les échantillons d'eau souterraine de l'aquifère Hauterivien varie de 17 à 29 mg /l avec une valeur moyenne de 19,5 mg /l, (**Tableau IV.2**). Tous les échantillons d'eau souterraine se situent dans la limite autorisée de la norme pour l'eau potable, (OMS, 2008; NA 6360, 1992). De plus, la teneur en sodium est la plus problématique des ions majeurs et un facteur important dans l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

Les concentrations des bicarbonates (HCO_3^-) trouvées dans les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude varient de 292,8 à 323,3 mg/l avec une moyenne de 311,1 mg/l (**Tableau IV.2**). Ainsi, l'eau de la zone d'étude convient à l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994). Par conséquent, les eaux souterraines hauteriviennes de la mine de Chaabet- el- Hamra sont submergées par les bicarbonates (HCO_3^-), qui représentent plus de 54% des anions et des cations. Ces valeurs se situent à l'intérieur des limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers and Westcot, 1994).

L'ion chlorure (Cl^-) est une forme naturelle prédominante de chlore et est extrêmement soluble dans l'eau. La principale source de chlorure dans l'eau naturelle est particulièrement les roches sédimentaires d'évaporation. (B. Pradhan et S. Pirasteh, 2011). Dans la zone d'étude, la teneur en ions chlorure dans tous les échantillons d'eau souterraine varie de 35 à 50 mg/l avec une valeur moyenne de 40 mg/l, (**Tableau IV.2**). Ces valeurs se situent dans les limites autorisées pour la consommation, (OMS, 2008; NA 6360, 1992) et l'irrigation, (Ayers et Westcot, 1994).

Les nitrates (NO_3^-) et le potassium (K^+) ont une offre minimale en concentrations absolues d'anions et de cations avec 1% de l'agrégat de fixation des particules.

La prédominance de HCO_3^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les eaux souterraines est principalement due à la dissolution des roches carbonatées des formations du Crétacé.

IV.3.1.3. Analyse en composantes principales (IBM SPSS statistics, 22)

L'analyse statistique multi-variée est une impulsion qui a été spécialement créée pour examiner et décomposer les ensembles de données, (T. Raykov et G. A. Marcoulides, 2008; K. H. Wolfgang et S. Léopold, 2012).

Dans la recherche sur les eaux souterraines, l'analyse statistique multi variée est une approche quantitative de la classification des eaux souterraines qui permet de regrouper les échantillons d'eau souterraine et d'établir des corrélations entre les échantillons et leurs paramètres chimiques, (Z. Feng et al., 2007; L. Belkhiri et al., 2010; S. Bencer et al., 2016). Les interrelations entre les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines ont été inspectées à l'aide de la matrice de corrélation de Pearson, (**Tableau IV. 3**).

Les coefficients de corrélation de Pearson montrent que le pH affiche une corrélation négative avec tous les paramètres et une forte corrélation entre TDS, Cl⁻ et EC (r = 0, 88; r = 0, 87 respectivement), TDS et Cl⁻ (r = 0,95).

Entourés de cations, seuls Ca²⁺ et Mg²⁺ déterminent une corrélation négative (r = - 0, 56; r = -0,53) avec Na⁺ qui peut être indiqué qu'ils proviennent de diverses sources. La corrélation positive la plus élevée, (r = 0, 96), qui existe entre Ca²⁺ et Mg²⁺ peut être traduite, car ils proviennent des mêmes sources (dissolution des minéraux carbonatés).

Tableau IV.3. Matrice de corrélation multiple des eaux Hauterivienne dans la mine de Chaabet el Hamra.

Var	pH	EC	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
PH	1.00										
EC	-0.71	1.00									
TDS	-0.74	0.88	1.00								
Ca ²⁺	-0.77	0.58	0.62	1.00							
Mg ²⁺	-0.59	0.54	0.61	0.96	1.00						
Na ⁺	0.29	0.31	0.04	-0.56	-0.53	1.00					
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00				
HCO ₃ ⁻	-0.04	0.04	-0.38	0.06	-0.06	0.16	0.00	1.00			
SO ₄ ²⁻	-0.60	0.79	0.70	0.87	0.91	-0.15	0.00	0.13	1.00		
Cl ⁻	-0.57	0.87	0.95	0.60	0.66	0.11	0.00	-0.40	0.77	1.00	
NO ₃ ⁻	-0.23	-0.12	0.31	0.14	0.14	-0.50	0.00	-0.87	-0.16	0.24	1.00

IV.3.1.4. Métaux lourds

Le terme métal lourd comprend les métaux d'une densité supérieure à 5 g • cm⁻³, à l'exception des alcalins terreux. Les métaux lourds sont: bismuth (Bi), cadmium (Cd), chrome (Cr), cobalt (Co), cuivre (Cu), étain (Sn), fer (Fe), manganèse (Mn), Mercure (Hg), Molybdène (Mo), Nickel (Ni), Plomb (Pb) et Zinc (Zn).

Étant donné que cette étude de zone concerne une mine d'exploitation du Zn, les investigations sur les métaux lourds sont ainsi nécessaires pour affirmer la dissolution ou la non-dissolution du Zn dans les eaux de la nappe Hauterivienne. L'analyse des métaux lourds confirme leur faible teneur dans ces eaux, (**Tableau IV.4**).

Tableau IV.4. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauteriviennes du gisement de Chaabet el Hamra en mg/l (Avril 2012).

Métal	F1	F2	F3	F4	F6
Zn	0	0.007	0.035	0.048	0.016
Pb	Non décelable				
Fe	0.073	0.071	0.085	0.307	0.141
Cr	Non décelable				
Mn	0.009	0.014	0.014	0.017	0.018
Cd	Non décelable				

IV.3.1.5. Mécanismes contrôlant la chimie des eaux souterraines

❖ Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est largement utilisé pour comprendre les problèmes concernant l'évolution géochimique des eaux souterraines, ([U. Karmegam et al., 2011](#)). Le diagramme se compose de trois champs distincts, dont deux champs triangulaires et un champ en forme de losange. Les cations exprimés en pourcentage du total des cations en meq / l comme un seul point sur le triangle gauche, tandis que le tracé des anions est dans le triangle droite, ([A. M. Piper, 1944](#)). Afin de comprendre le mécanisme d'évolution chimique des eaux souterraines de l' Hauterivien dans la zone minière de Chaabet- el- Hamra, le trigramme Piper a été tracé à l'aide du logiciel Diagramme, (**Figure.IV.2**).

Comme le montre la figure IV.2, le diagramme de Piper a classé tous les échantillons d'eau en Bicarbonaté calcique et magnésien (Ca^{2+} - Mg^{2+} - HCO_3^-), ce qui pourrait être dû à la dissolution des roches carbonatées des séquences sédimentaires adjacentes.

❖ Diagramme de Schoeller

Le diagramme de [Schoeller \(1962\)](#) est utilisé de manière correspondante pour évaluer la qualité de la consommation d'eau. Il est basé sur huit paramètres chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , TDS, TH, Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-). Il représente un diagramme semi-logarithmique des concentrations des échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude. Les points sur les lignes également espacées représentent la concentration de chaque ion dans chaque échantillon et les points sont reliés par une ligne. Dans l'ensemble TDS et TH et selon ce diagramme, l'eau est classée en six classes: admissible, intermédiaire, désagréable, très désagréable, bonne et non potable. En conséquence, les échantillons d'eau souterraine de Chaabet el Hamra se classent dans de bonnes catégories, (**Fig.IV.3**).

Les teneurs relatives des ions en mg/l montre $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ pour les cations et $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ pour les anions.

❖ Diagrammes de Gibbs

La réaction entre les minéraux de l'aquifère et les eaux souterraines joue un rôle important dans la qualité de l'eau, ce qui est également utile pour comprendre la genèse des eaux souterraines, ([D. J. Cederstorm, 1946](#)). Généralement, différents processus et mécanismes contrôlent la chimie des eaux souterraines. Par conséquent, les graphes de Gibbs sont utilisés pour comprendre et différencier les influences de l'interaction roche-eau, de l'évaporation et des précipitations sur la chimie de l'eau, ([R. J. Gibbs, 1970](#)). Une représentation réaliste et recommandée pour comprendre les importantes procédures contrôlant la chimie des eaux souterraines, compte tenu des solides dissous par rapport à $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ pour les cations et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ pour les anions. Les diagrammes de Gibbs ont montré que l'altération des roches contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes dans la zone d'étude, (**Fig.IV.4**).

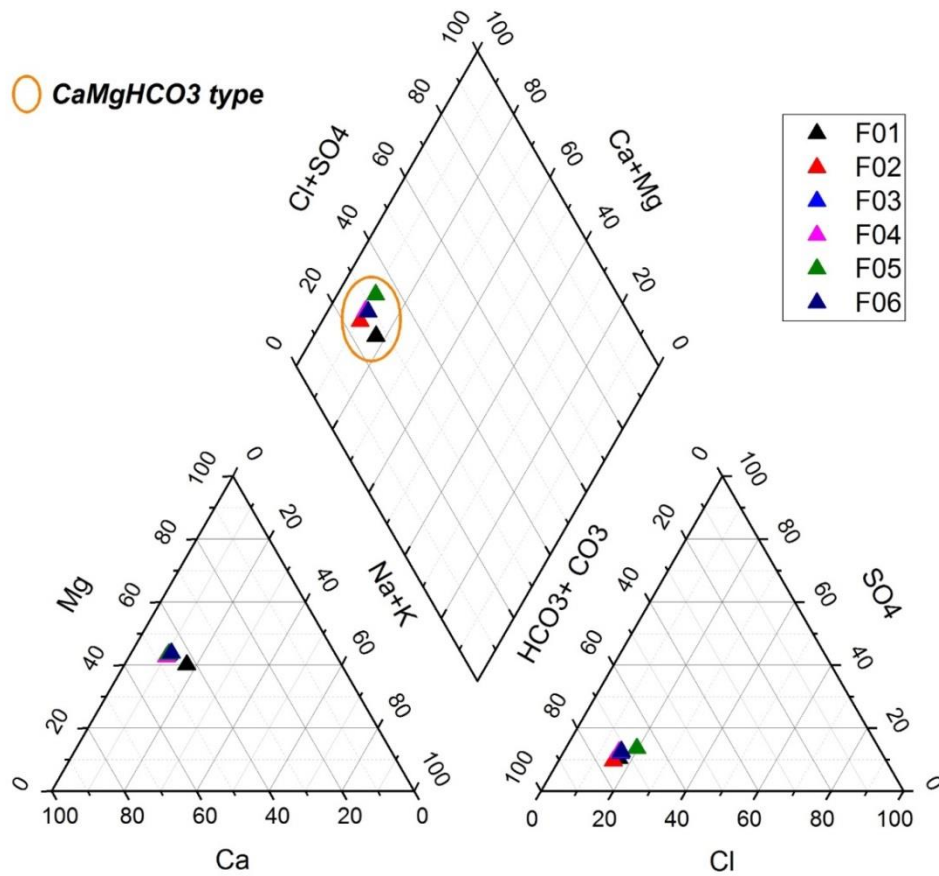


Fig.IV.2. Diagramme de Piper des eaux Hauterivienne de la zone d'étude, (Période d'Avril 2012).

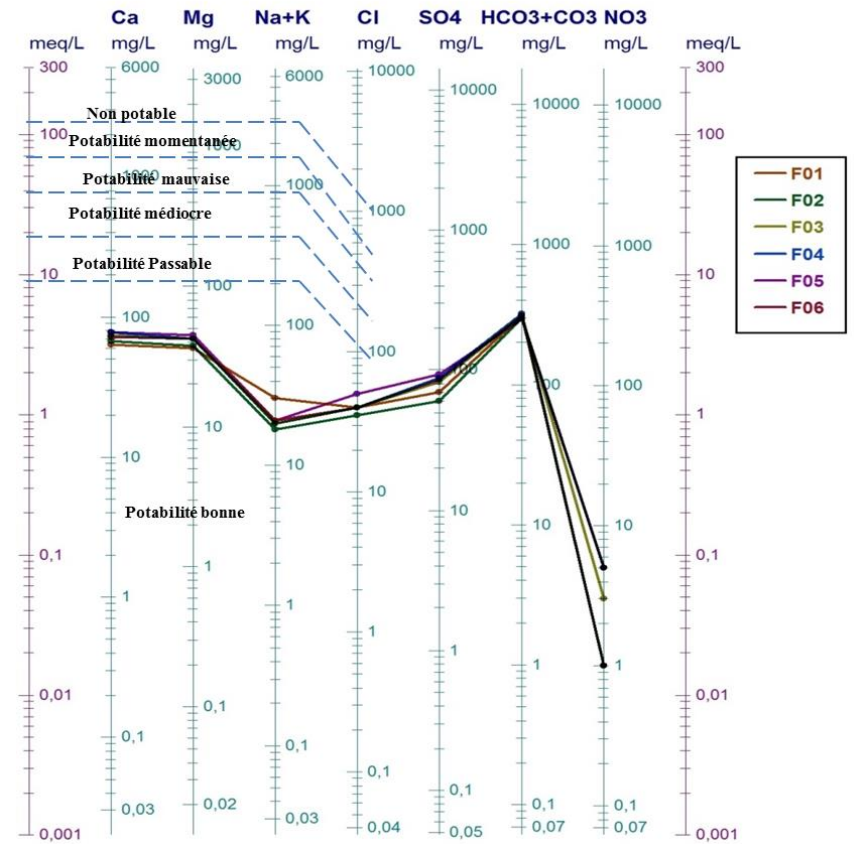


Fig.IV.3. Diagramme de Schoeller des eaux Hauterivienne de la zone d'étude, (Période d'Avril 2012).

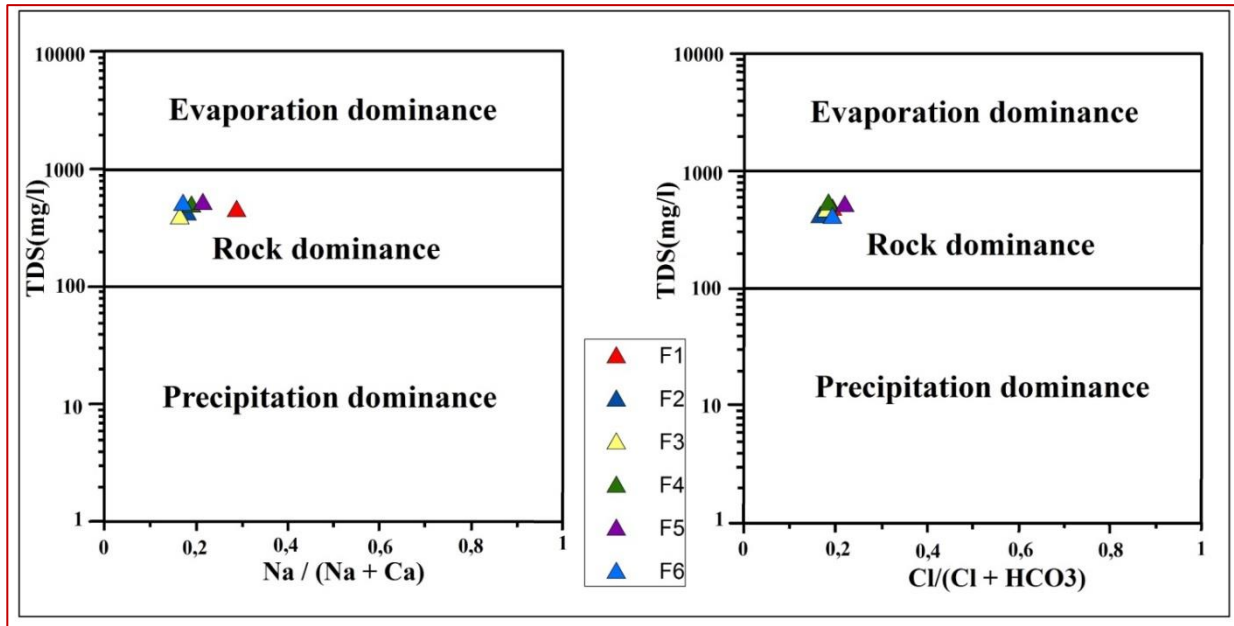


Fig.IV.4. Diagramme de Gibbs, (Période d’Avril 2012)

IV.3.1.6. Les eaux souterraines pour l’irrigation

Des indices tels que le rapport d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium soluble (SSP), le carbonate de sodium résiduel (RSC), l'indice de perméabilité (PI), le magnésium hasard (MH) et le rapport de Kelly (KR) sont des paramètres importants pour déterminer la pertinence des eaux souterraines pour l'irrigation, (S.S.Gowd, 2005; N. J. Raju, 2007, A. Aghazadeh et N. N. Mogaddam, 2010; F. Ehya et Z. Moghadam, 2017; X. Guan et al., 2017; Q. Huili et al., 2019).

A. Ratio d'absorption du sodium (SAR)

La concentration de sodium joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation, car le sodium entraîne une réduction de la perméabilité du sol. Le risque de sodium de l'eau d'irrigation peut être bien compris par SAR qui détermine son utilité pour l'agriculture, (A. H. M. J. Al Obaidy et al., 2014).

Le rapport d'absorption du sodium (SAR) est défini par l'équation 2, où toutes les teneurs sont en meq /l, (L. A. Richard, 1954).

$$S.A.R = \frac{Na +}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \dots\dots\dots (Eq. 2)$$

Les valeurs SAR varient de 1,17 à 2,05 dans les eaux souterraines de l'Hauterivien. Il est rapporté que si la valeur de SAR est inférieure à 10, l'eau est d'excellente qualité pour l'irrigation, (L. A. Richard, 1954). Par conséquent, tous les échantillons d'eau sont excellents pour l'irrigation.

B. Diagramme de Wilcox

Le diagramme de L. V. Wilcox (1955) est l'une des classifications les plus importantes de cette étude. Dans le diagramme de Wilcox, l'axe horizontal est sélectionné pour la salinité de l'eau, tandis que l'axe vertical correspond au SAR. Comme le montre la **figure IV. 5**, tous les échantillons se trouvent dans la catégorie C2S1, ce qui signifie «à peine saline - convient à l'irrigation», (Tableau IV. 5).

Tableau IV.5. Classification des eaux pour l'irrigation selon L. V. Wilcox (1955).

Classes des eaux	Qualité pour l'irrigation
C1S1	Eau douce—Absolument acceptable pour l'irrigation
C1S2, C2S2, C2S1	Moyennement saline— Acceptable pour l'irrigation
C1S3, C2S3, C3S1, C3S2, C4S2, C4S1	Saline— Acceptable pour l'irrigation avec traitement.
C1S4, C2S4, C3S4, C4S4, C4S3, C4S2, C4S1	Très saline—Non acceptable pour l'irrigation

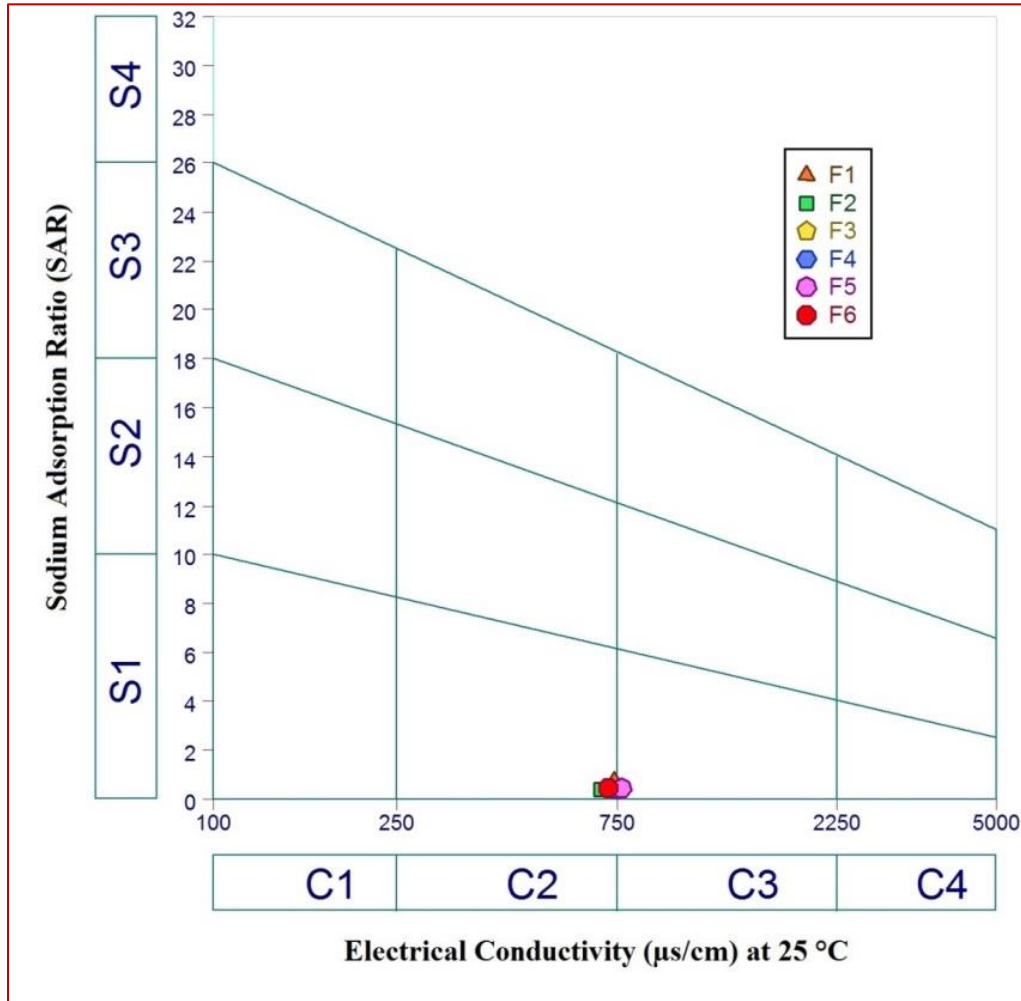


Fig.IV.5. Diagramme de Wilcox pour les eaux Hauteriviennes de la mine de Chaabet- el- Hamra.

C. Pourcentage de sodium soluble (SSP)

Le pourcentage de sodium soluble (SSP) est également utilisé pour évaluer le risque lié au sodium. De plus, le SSP connu sous le nom de % Na est calculé par l'équation 3, où toutes les concentrations ioniques sont en meq /l, (L.V. Wilcox, 1955).

$$\%Na = 100 \times \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K} \dots \dots \dots (Eq. 3)$$

Les valeurs calculées de SSP variaient de 7,70 à 13,05%. . Il est rapporté que si la valeur du SSP est inférieure à 20, l'eau est d'excellente qualité pour l'irrigation, (L.V. Wilcox, 1955). Par conséquent, tous les échantillons d'eau sont répertoriés d'excellente qualité quant à l'utilisation de cette eau souterraine dans l'irrigation.

D. Carbonate de sodium résiduel (RSC)

Le RSC a été utilisé pour déterminer l'effet dangereux du carbonate et du bicarbonate sur la qualité de l'eau pour l'irrigation. RSC est une valeur calculée exprimant l'excès de teneur en CO_3^{2-} et HCO_3^- , qui reste après la consommation de Ca^{2+} et de Mg^{2+} . Le RSC a été calculé selon l'équation 4 recommandée par Eaton, (F. M. Eaton, 1950).

$$RSC = (HCO_3 + CO_3) - (Ca + Mg) \dots \dots \dots (Eq. 4)$$

Toutes les concentrations ioniques sont en meq /l.

Les valeurs de RSC calculées vont de -2,78 à - 1,06, ce qui indique que tous les échantillons d'eau souterraine ont un RSC inférieur à zéro. Il est rapporté que si la valeur de RSC est inférieure à 10, l'eau est excellente pour l'irrigation, (F. M. Eaton, 1950). Ainsi, tous les échantillons d'eau présentent une excellente qualité pour les propositions d'irrigation.

E. Indice de perméabilité (IP)

L'indice de perméabilité (IP) a également été utilisé pour évaluer le risque lié au sodium et l'adéquation de l'eau à un usage agricole. Cet indice est calculé par la méthode suggérée par Doneen, (L. Doneen, 1962) dans l'équation suivante.

$$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO_3}}{Ca + Mg + Na + K} \times 100 \dots \dots \dots (Eq. 5)$$

Tous les ions sont exprimés en meq /l.

Les valeurs de PI dans cette étude varient de 13, 92 à 20,29%. Il est rapporté que si la valeur de RSC est inférieure à 25%, l'eau est impropre à l'irrigation, (L. Doneen, 1962). Paradoxalement les valeurs de PI indiquent que les eaux souterraines Hauteriviennes ne conviennent pas à l'irrigation.

F. Risque de magnésium (MH)

Pour identifier l'eau d'irrigation, I. Szabolcs et C. Darab, (1964) ont proposé le calcul du risque de magnésium (MH) comme dans la formule suivante:

$$MH = \frac{Mg}{Ca + Mg} \times 100 \dots \dots \dots (Eq. 6)$$

Les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont en meq /l.

Les valeurs de MH calculées dans les échantillons d'eau de la zone d'étude varient entre 35, 56 et 37,15%. Il est rapporté que si la valeur de MH est inférieure à 50, l'eau est sûre et adaptée à l'irrigation, (K. V. Paliwal, 1972). Néanmoins les eaux souterraines de l'Hauterivien peuvent être classées comme convenant à l'irrigation.

G. Rapport de Kelly (KR)

Le KR est calculé par l'utilisation de l'équation 7, où les ions Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont en meq /l, (W. P. Kelly, 1940).

$$KR = \frac{Na}{Ca + Mg} \dots \dots \dots (Eq.7)$$

Si la valeur KR est inférieure à 1, la quantité de Na^+ dans l'eau est faible et l'eau convient à l'irrigation, (W. P. Kelly, 1940).

Dans les échantillons d'eau de l'aquifère Hauterivien de la zone d'étude, le KR est inférieur à 1 (0, 08 à 0, 15). Par conséquent, les eaux souterraines de l'Hauterivien conviennent à l'irrigation.

IV.3.2. Période de Mai 2018 :

IV.3.2. 1 Points échantillonnés :

Quatre-vingt-dix-huit (98) points de prélèvement d'eau, comprenant l'aquifère Hauterivien et Barrémien dans la mine de zinc de Chaabet el Hamra et les forages de l'aquifère superficiel du Mio-Plio- Quaternaire dans la plaine de Ain Azel, ont été échantillonnés. Leurs coordonnées ont été déterminées à l'aide d'un GPS (GARMIN). Les coordonnées UTM sont reprises en annexe 3. L'ensemble des prélèvements réalisés dans la région de Ain- Azel est reporté sur la **figure IV.6**.

IV.3.2. 2 Méthode de prélèvement et conservation des échantillons :

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modification de ses caractéristiques physico-chimiques, raison pour

laquelle le préleveur doit avoir une connaissance précise des conditions de prélèvement très importantes pour la qualité des résultats des analyses.

Pour notre étude hydrochimique, les échantillons ont été prélevés jusqu'au débordement dans des bouteilles en polyéthylène bouchonnées de 1500ml, préalablement rincées avec de l'eau distillée puis de l'eau du forage. Tous les échantillons ont été conservés à basse T° (réfrigérateur) jusqu'au moment d'analyse.

IV.3.2. 3 Méthodes d'analyse :

❖ Mesures in-situ : paramètres physiques :

Les mesures des paramètres physiques in-situ sont essentielles pour la reconstitution de l'état de l'eau à la sortie de l'hydro-système. Les paramètres physiques de l'eau mesurés sur site sont : pH, température (T°), résidus secs (RS) et conductivité électrique (CE).

Ces mesures in-situ ont été effectuées immédiatement après le prélèvement de l'échantillon, à l'aide d'un multi-paramètre, (HANNA HI 76/98195).

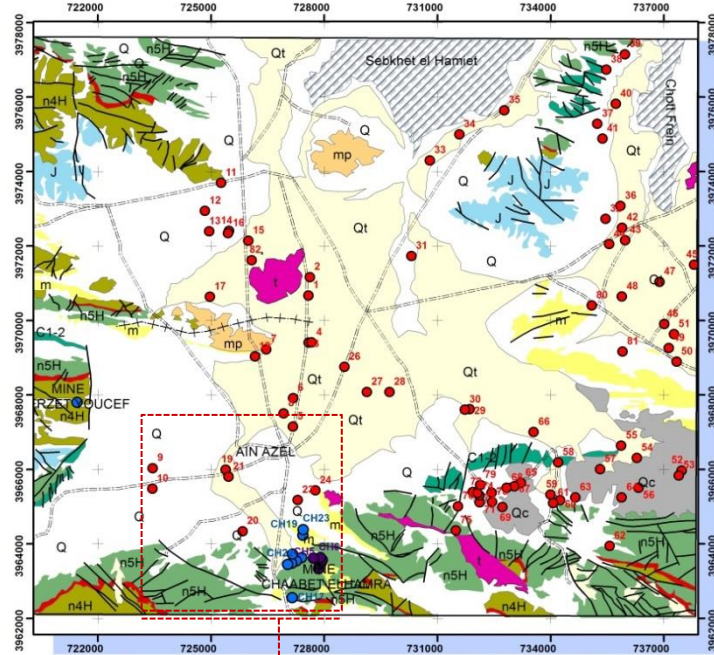
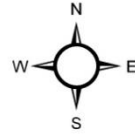
❖ Teneurs en éléments majeurs et mineurs : analyses chimiques

Le sodium et le potassium ont été dosés par photométrie de flamme, (JENWAY PPP7 flamme Photometer). Les ions de calcium et magnésium ont été analysés par spectrométrie à flux continu auto analyseur, (AxFlow III systema). Les bicarbonates ont été analysés par volumétrie, les sulfates par dosage turbidimétrique et les chlorures ainsi que les nitrates ont été dosés par colorimétrie auto-analyseur à flux continu,, (Bluvision TM). Toutes ces analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'ADE de Sétif.

❖ Teneurs des métaux lourds :

Le Zn, Fe, Pb, Cr, Al, Mn et Cu ont été analysés par spectromètre d'absorption atomique (Shimadzu AA-6200) au niveau du laboratoire de chimie, faculté des sciences, Université Ferhat Abbas, Sétif (UFAS).

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



(a)



- Légende
- les forages du Mio-Plio-Quaternaire
 - les forages du Barrémien
 - les forages de l'Hauterivien

(b)

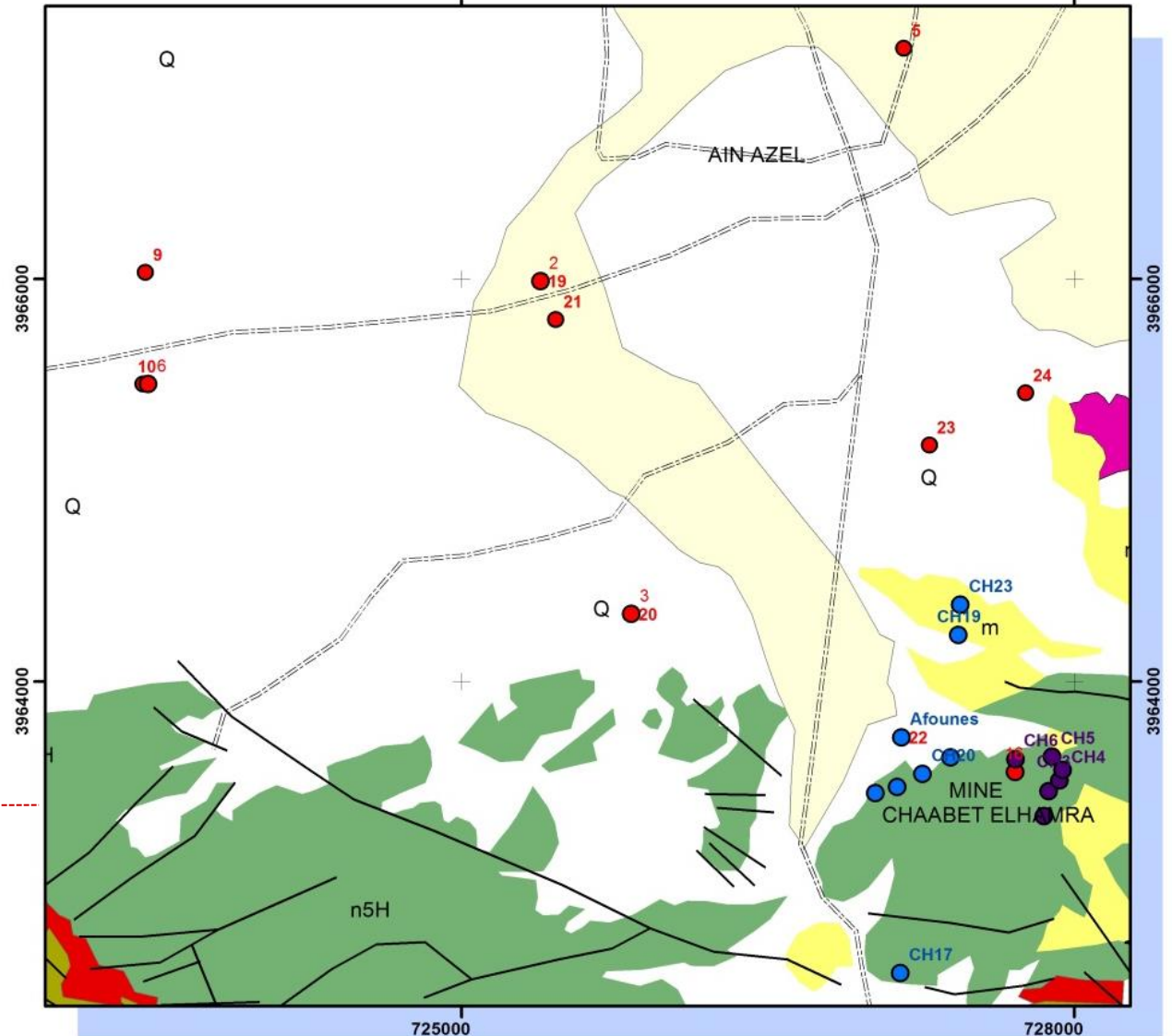


Figure IV.6. Inventaire des points d'eau prélevés (a): vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain- Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet- el- Hamra.

IV.3.2. 4 Caractérisations hydrochimiques :

Les données obtenues dans la zone d'étude, suite à la campagne d'échantillonnage de 2018, (98 prélèvements), sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau sont présentées et discutées.

Les données traitées ont été groupées en fonction de l'âge des aquifères (Hauterivien et Barrémien dans la mine de zinc de Chaabet- el- Hamra et le Mio -Plio- Quaternaire dans la plaine de Ain- Azel) touchés afin d'appréhender éventuellement l'évolution géochimique de l'eau de chaque aquifère.

IV.3.2. 5. Les principaux paramètres physico-chimiques :

❖ La température de l'eau :

La température moyenne des eaux varie entre 17.6 et 21.7 pour l'aquifère Hauterivien, 19.5 et 20.14 pour le Barrémien et 19 à 19.28°C pour le Mio-Plio- Quaternaire.

Ces données, proches de la température moyenne atmosphérique de la zone d'étude (15°C), nous permettent de penser que les différents aquifères sont en équilibre thermique avec l'atmosphère.

❖ pH de l'eau :

Le pH de l'aquifère Hauterivien à travers les forages testés s'inscrit dans la plage de 7,24 à 7,40, 6,62 à 7,8 pour l'aquifère Barrémien et enfin entre 6,9 et 9,63 pour le Mio-Plio-Quaternaire.

Le pH moyen des eaux de l'Hauterivien et du Barrémien est de 7, tandis que celui du Mio-Plio-Quaternaire est de 7,7.

La figure **A3.1 en annexe 3** présente la variabilité spatiale du pH de l'eau souterraine de la région de Ain- Azel au sud de Sétif.

❖ La conductivité électrique (CE) :

La conductivité électrique (CE) mesurée, quoique forte dans la région d'étude, présente une amplitude de variation de $400 \leq CE \leq 5800 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Au niveau de l'aquifère Hauterivien, la CE varie entre 688 et 774 $\mu\text{S/cm}$ pour une valeur médiane de 744,5 $\mu\text{S/cm}$ et pour le Barrémien, la CE est comprise entre 515 et 1920 $\mu\text{S/cm}$ (médiane = 782,79 $\mu\text{S/cm}$).

Par ailleurs, les forages du Mio-Plio-Quaternaire présentent CE comprise entre 400 et 5800 $\mu\text{S/cm}$ sur la conductivité électrique des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

La figure **A3.2 en annexe 3** présente la variabilité spatiale du CE de l'eau souterraine de la région de Ain- Azel au sud de Sétif.

❖ Les éléments chimiques majeurs :

Avant d'interpréter les données acquises au laboratoire, il est indispensable de vérifier leur fiabilité à travers un bilan ionique. Une analyse chimique est considérée comme fiable, lorsque la balance ionique ne dépasse pas 10%. L'expression de la balance ionique considérée dans ces analyses est la suivante :

$$IB\% = 100 \times \frac{(\sum \text{cations} - \sum \text{anions})}{(\sum \text{cations} + \sum \text{anions})} \dots \dots \dots (Eq. 8)$$

Pour l'ensemble des analyses des échantillons, le calcul de la balance ionique a été effectué, il est inférieur ou égal à 10%, (**Tableau A3.4 en Annexe 3**).

Les données présentées ci-dessous se rapportent aux forages des aquifères de l'Hauterivien et Barrémien.

L'importance des ions majeurs, (valeurs exprimées en mg/l), suit l'ordre suivant dans les eaux de l'aquifère :

- Hauterivien: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- et K^+ .
- Barrémien: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , NO_3^- et K^+ .

La contribution relative des ions dominants à la minéralisation des eaux est illustrée sur les **figures IV.7 et 8**.

Figure IV.7 Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Barrémiennes.

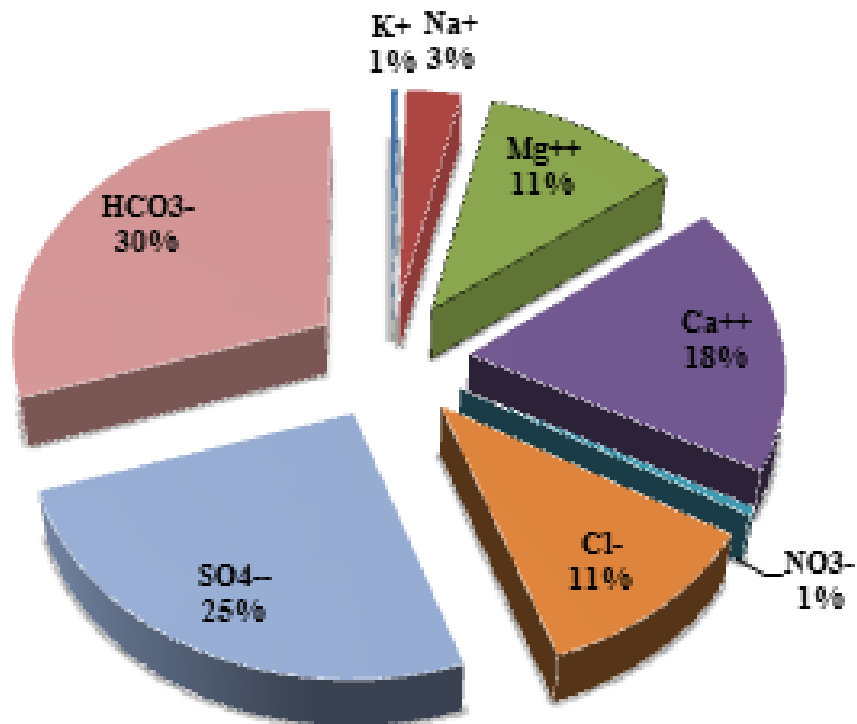
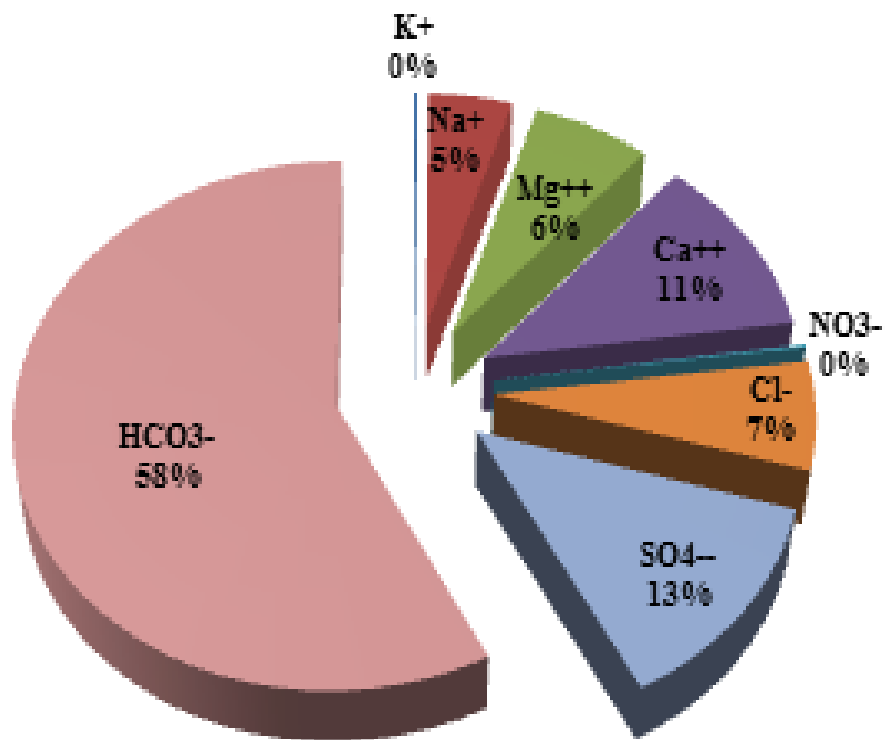


Figure IV.8 Contribution relative des ions à la minéralisation totale des eaux Hauteriviennes.



Il apparaît que les bicarbonates et les sulfates sont équitables dans l'aquifère Barrémien, tandis que, les bicarbonates sont les plus dominants dans les forages de l'aquifère Hauterivien.

❖ **Les cations :**

Les teneurs en Ca^{2+} sont très fortes et varient de 61,43 et 74,54mg/l au niveau des forages de l'Hauterivien (moyenne 69 mg/l), et de 58,2 à 205,49 mg/l, (moyenne 119 mg/l) au niveau des forages du Barrémien, Par ailleurs, Ca^{2+} varie de 18 à 460 mg/l dans les forages considérés du Mio-Plio-Quaternaire, (moyenne 125,24 mg/l). Par conséquent, la concentration optimale de Ca^{2+} aide à prévenir les troubles cardiaques et le bon fonctionnement des processus métaboliques humains, (F. Hamzaoui-Azaza et al. 2020). La **figure A3.3 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en calcium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

Les teneurs en Mg^{2+} sont comprises entre 35,23 à 42,59mg/l pour les forages de l'Hauterivien, (moyenne 39,63mg/l), de 35,2 à 280,56mg/l (moyenne 107 mg/l), pour les forages du Barrémien et de 14 à 182 mg/l, (moyenne 56,8 mg/l) pour les forages du Mio-Plio-Quaternaire. L'OMS fournit de l'eau potable au-delà des limites recommandées pour Mg^{2+} augmente le risque d'affections cardiovasculaires et d'abaissement sévère de la pression artérielle. La **figure A3.4 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en Magnésium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

Quant au Na^+ , les teneurs sont comprises entre 15 et 25mg/l, (moyenne 19 mg/l), pour les forages de l'Hauterivien, de 11,69 à 29mg/l pour les forages du Barrémien (moyenne 24 mg/l) et de 13 à 724 mg/l pour les forages du Mio-Plio-Quaternaire. La **figure A3. 5 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en Sodium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel. Dans la citation, la teneur en Na^+ supérieure à la limite recommandée de 200 mg/l dans l'eau potable provoque une hyper- tension, des maladies congénitales, des troubles rénaux et des troubles nerveux dans le corps humain, (M. A. Dalvie et al. 2003).

Les données du K^+ sont par ailleurs comprises 0,86 et 0,97mg/l pour les forages de l'Hauterivien, (moyenne 0,91mg/l), de 1,18 à 3,6mg/l, (moyenne 3,03mg/l) pour les forages du Barrémien et de 1 à 74 mg/l, (moyenne 5,7 mg/l) pour le Mio-Plio-Quaternaire. La **figure A3.6 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs en Potassium des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

❖ Les anions :

Les bicarbonates prennent une part importante à la minéralisation des deux aquifères : Hauterivien et Barrémien, (teneurs comprises entre 317,5 et 288,4mg/l, avec une moyenne de 302mg/l pour l'aquifère Hauterivien et 393,5 à 213,6mg/l –moyenne de 287mg/l- pour l'aquifère Barrémien). Pour l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire, les teneurs varient entre 73 et 671mg/l avec une moyenne de 246,27mg/l, La **figure A3.7 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des Bicarbonates des eaux souterraines dans la région de Ain-Azel.

Les sulfates sont également présents. Leur teneur varie entre 90 et 56mg/l pour l'aquifère Hauterivien, de 52,7 à 484 mg/l pour le Barrémien, puis entre 50 et 998 mg/l avec une moyenne de 251,6 mg/l pour les forages du Mio-Plio-Quaternaire. Une teneur élevée en SO_4^{2-} dans l'approvisionnement en eau domestique peut générer un goût désagréable et une altération gastro-intestinale se manifestant par une diarrhée, (OMS 1993). La **figure A3.8 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des sulfates des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

La limite admissible de Cl^- pour l'eau potable est de 200 mg/l pour l'OMS. Des niveaux élevés de Cl^- dans l'eau potable peuvent causer des vomissements et de la diarrhée répétés, (V. Bhardwaj et D. S. Singh 2011). La teneur moyenne des chlorures des forages de l'Hauterivien est de 38mg/l (minimum : 30mg/l, maximum : 47mg/l), Pour les forages du Barrémien, cette teneur varie entre 32,6 et 163mg/l (moyenne 96 mg/l), Par ailleurs, et pour les forages de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire. Cette teneur varie entre 20 et 1170 mg/l avec une moyenne de 240,66 mg/l. Alors, c'est l'un des éléments majeurs qui détermine le faciès chimique des eaux dans la région. La **figure A3.9 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des chlorures des eaux souterraines dans la région de Ain- Azel.

La présence du NO_3^- plus de 10 mg/L devient une référence de la pollution anthropique due au débit de retour de l'irrigation due à l'utilisation intensive d'engrais chimiques (I. Matiatos et al. 2014). L'OMS a suggéré que la limite maximale admissible pour le NO_3^- est de 50 mg/L.

Les nitrates se présentent sous forme de faibles teneurs dans les forages de l'Hauterivien, (minimum : 1mg/l, maximum : 5mg/l, avec une moyenne de 2mg/l). Cet élément présente des valeurs élevées dans l'aquifère du Barrémien (0,04 et 43,3mg/l) et Mio-

Plio-Quaternaire, (1 et 110 mg/l avec une moyenne de 37,93 mg/l). Ces valeurs élevées suggèrent qu'elles soient dues aux apports d'engrais, (Contexte agricole). Les échantillons qui présentent des teneurs du NO_3^- au-dessus de la norme assurant un risque pour la consommation humaine causant cyanose (méthémoglobinémie), hypertension, diabète, goitre et cancer gastrique, (M. Vasanthavigar et al. 2010) ainsi que la mort par asphyxie lorsqu'elle est combinée avec Viagra.

La **figure A3.10 en annexe 3** représente la variation spatiale des teneurs des nitrates des eaux souterraines dans la région de Ain Azel.

IV.3.2.6 Diagramme de Gibbs :

Généralement, Le diagramme de R. J. Gibbs, (1970), (**Figure IV.9**) montre que l'altération des roches contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes.

Par contre, les eaux souterraines du Barrémien et du Mio-Plio-Quaternaire, le même diagramme, (**Figure IV.10 et IV.11**), montre que l'altération des roches est la responsable de la chimie des ions majeurs pour certains échantillons, et l'évaporation pour d'autres. Ce diagramme représente les mécanismes mixtes pour ces deux aquifères.

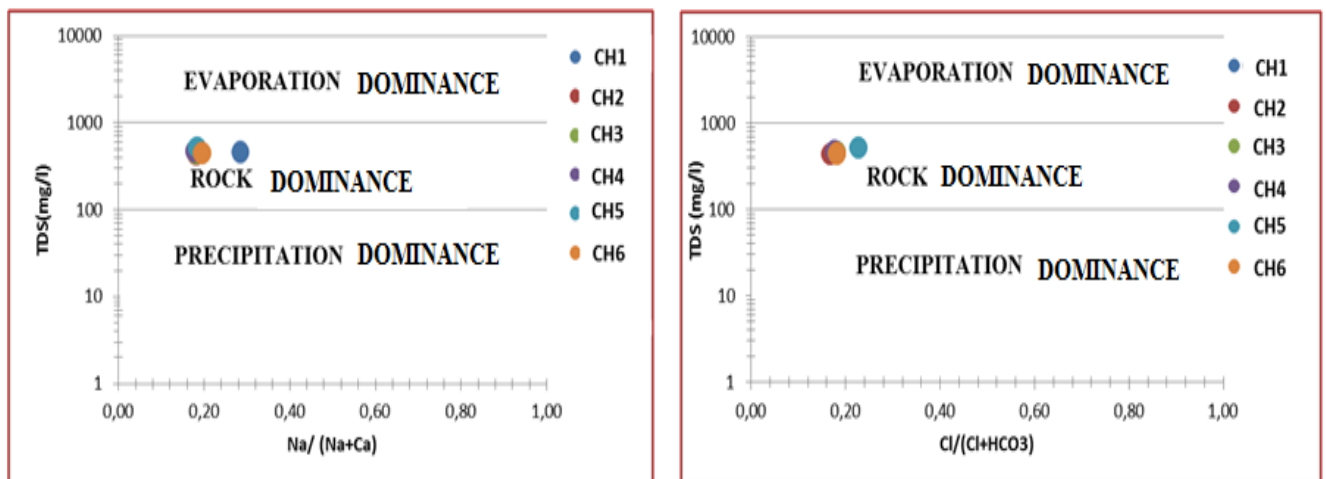


Figure IV. 9 Diagramme de Gibbs des eaux Hauteriviennes, (Mai 2018).

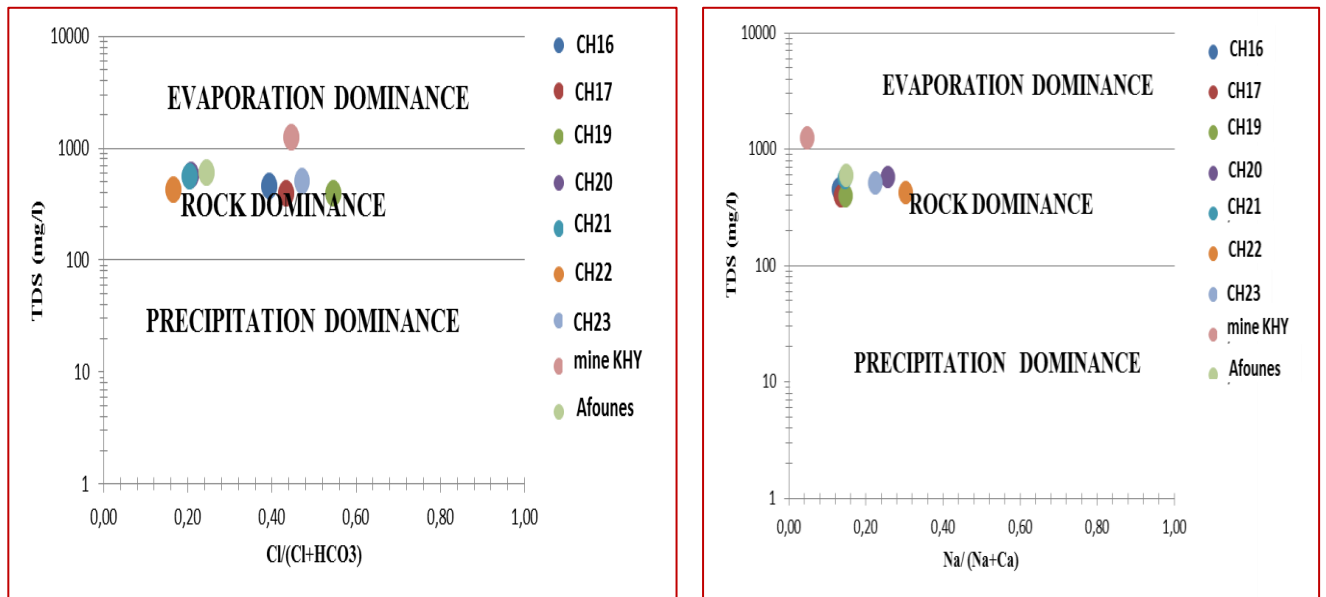


Figure IV.10 Diagramme de Gibbs des eaux Barrémiennes, (Mai 2018).

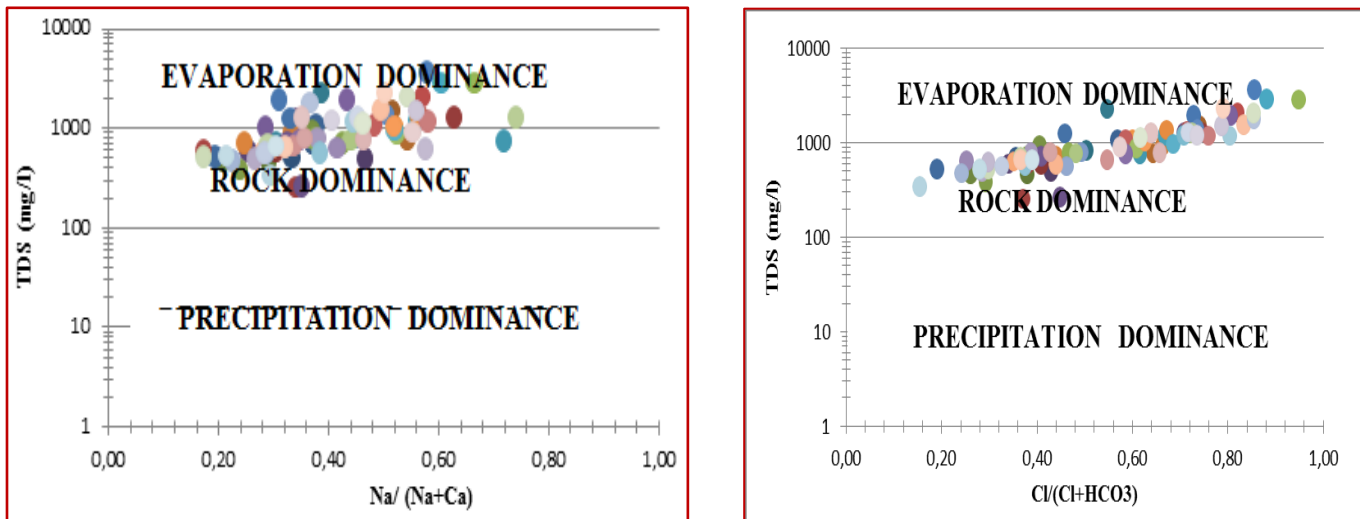


Figure IV. 11 Diagramme de Gibbs des eaux du Mio-Plio-Quaternaire, (Mai 2018).

IV.3.2. 7 Faciès chimiques des eaux :

Le faciès chimique des eaux a été déterminé classiquement à l'aide du diagramme de Piper en ayant recours au logiciel Diagrammes. Les données des ions majeurs, reportées sur ce diagramme, (Figures IV.12, IV.13, IV.14, a-b-c), ont permis d'identifier les faciès chimiques pour les eaux souterraines de la zone d'étude, dont la répartition spatiale est reprise sur la figure IV.15. Ces faciès sont :

- ❖ L'aquifère Hauterivien :
 - Bicarbonaté calcique et magnésien
- ❖ L'aquifère Barrémien :
 - Chloruré et sulfaté calcique et magnésien
 - Bicarbonaté calcique et magnésien
- ❖ L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire :
 - Bicarbonaté calcique et magnésien
 - Chloruré et sulfaté calcique et magnésien
 - Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique

Tableau IV. 6. Classification hydrochimique des eaux de la zone d'étude.

- Faciès chimique	Les points d'eau
- Bicarbonaté calcique et magnésien	L'aquifère Hauterivien : CH1,CH2,CH3,CH4,CH5,CH6
	L'aquifère Barrémien : CH22, Afounes
	L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire : 1, 9, 19,61,71
- Chloruré et sulfaté calcique et magnésien	L'aquifère Hauterivien : aucun forage
	L'aquifère Barrémien : CH16,CH17,CH19,CH20,CH21,mine Kherzet Youssef
	L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire : 2 à 83(sauf les points déjà cités)
- Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique,	L'aquifère Hauterivien : aucun forage
	L'aquifère Barrémien: aucun forage
	L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire : 32, 76, 37, 38, 41,57

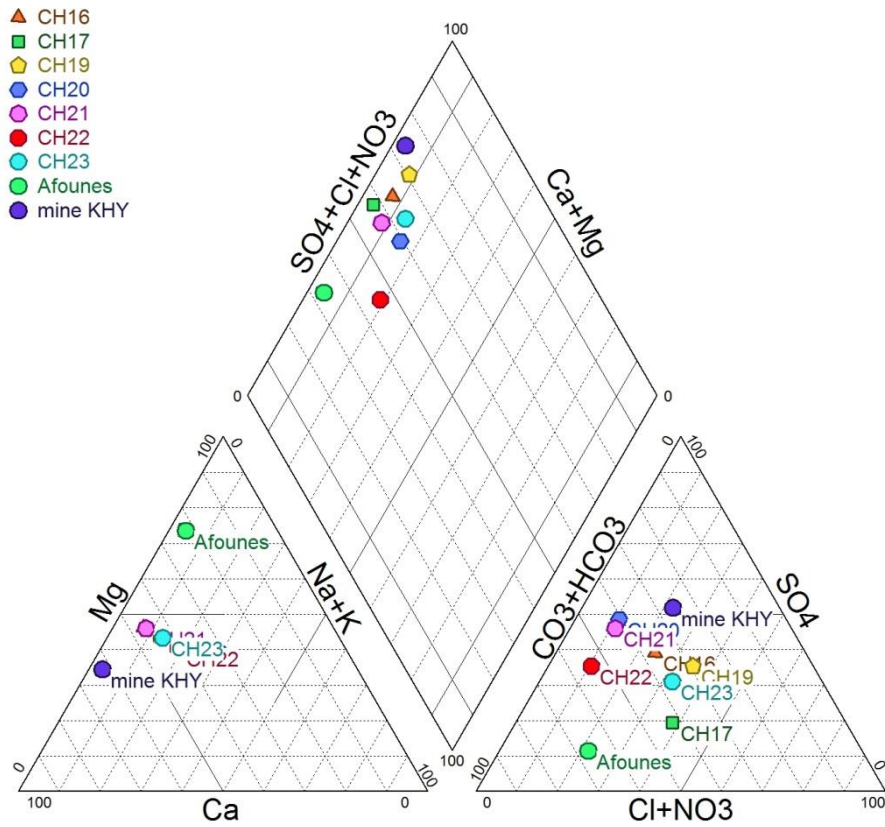


Fig.IV.12. Diagramme de Piper, (les eaux du Barrémien), période de Mai 2018

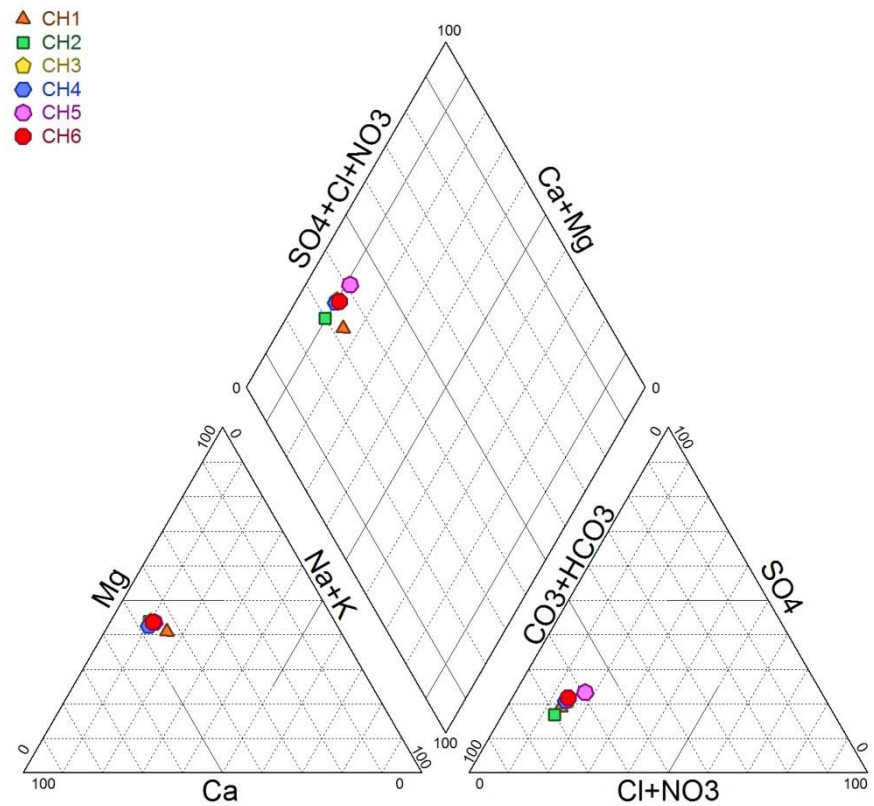


Fig.IV.13. Diagramme de Piper, (les eaux de l'Hauterivien), période de Mai 2018

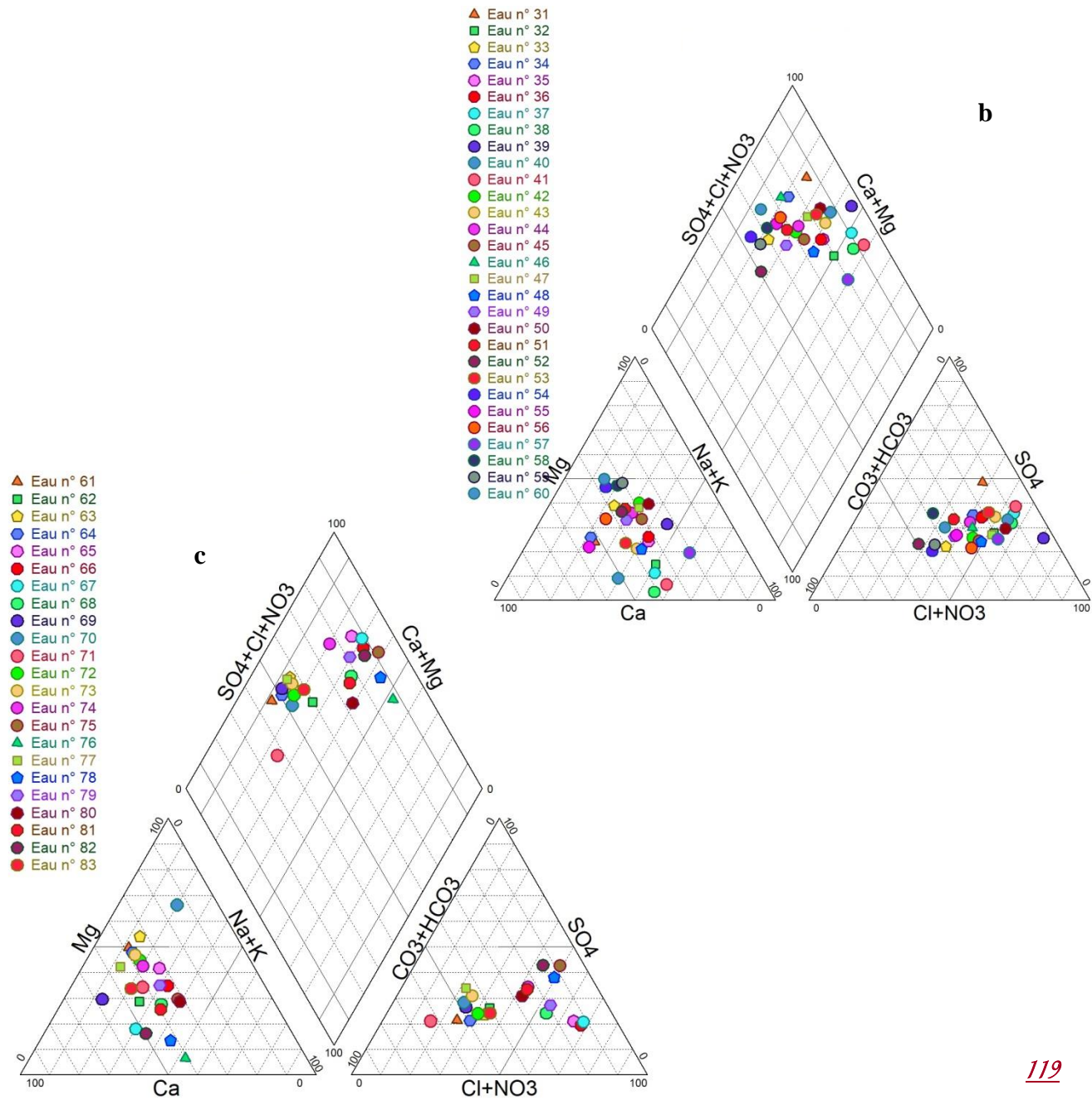
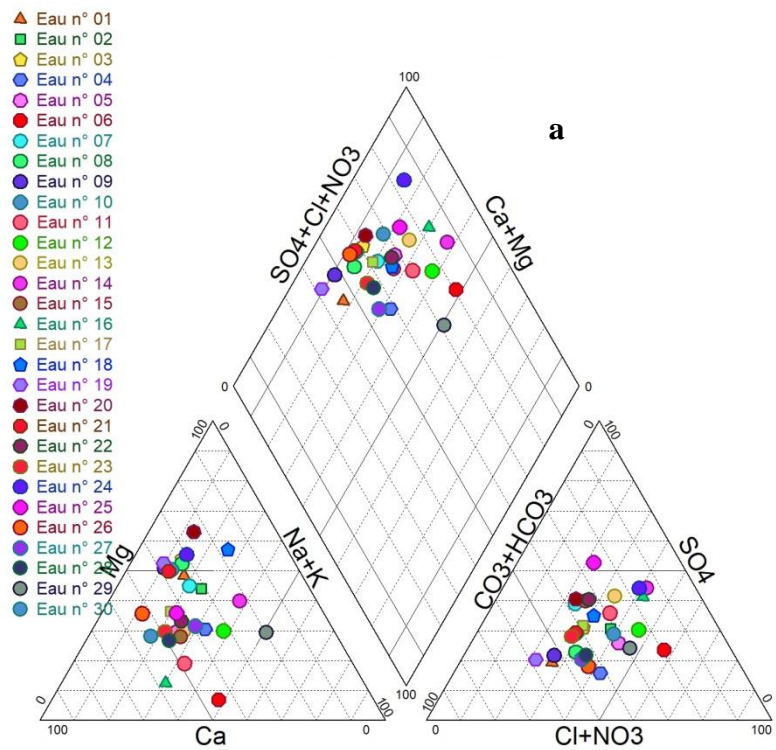
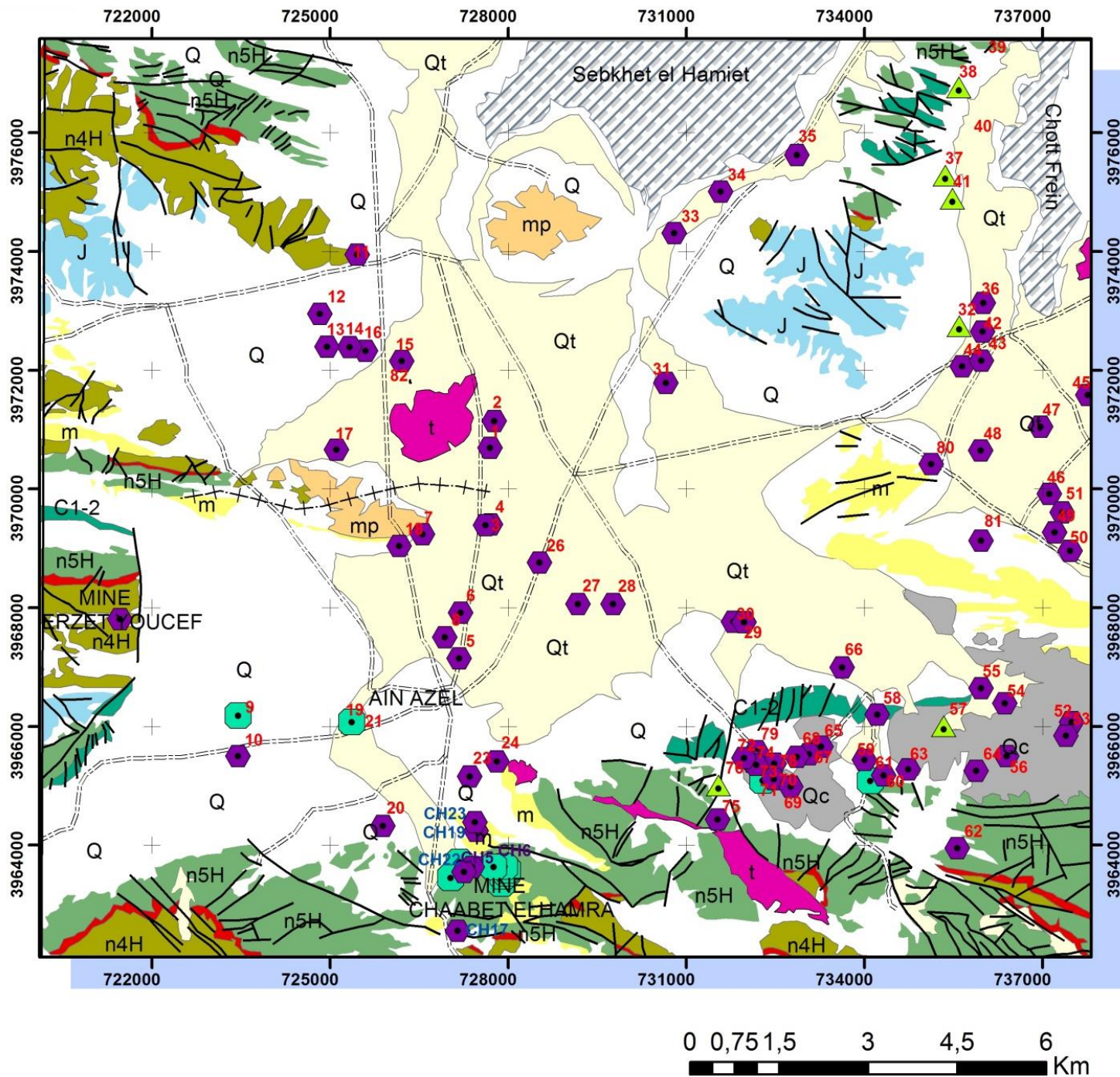


Fig.IV.14a, b, c. Diagramme de Piper, (les eaux du Mio-Plio-Quaternaire), période de Mai 2018



Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Légende

- ◆ Facies: Chlorurée et sulfatée calcique et magnésien
- ▲ Facies: Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique
- Facies: Bicarbonatée calcique et magnésien

Fig.IV.15. Faciès chimiques des eaux de la zone d'étude, (Période de Mai 2018).

IV.3.2. 8 Corrélation entre les éléments majeurs :

Les relations entre les éléments chimiques sont établies à l'aide d'une analyse statistique à plusieurs variables, (matrice de corrélation), pour identifier les groupes des paramètres chimiques qui peuvent avoir un type de variation semblable,

L'utilisation de l'analyse en composante principale (ACP) pour l'étude globale des eaux souterraines des aquifères Hauterivien, Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire dans la région d'étude, permet une différenciation sur leurs particularités chimiques,

IV.3.2. 8. 1 ACP pour les eaux Hauteriviennes :

Le tableau IV. 7 reprend la matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Hauterivien,

Tableau IV. 7 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Hauterivien.

Variables	K+	Na+	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	RS	CE	PH		
K+	1,00												
Na+	0,34	1,00											Bonne corrélation
Mg ⁺⁺	0,63	-0,32	1,00										Moyenne corrélation
Ca ⁺⁺	0,55	-0,34	0,95	1,00									Faible corrélation
NO ₃ ⁻	-0,17	-0,34	0,19	0,03	1,00								Forte anti corrélation
Cl ⁻	0,57	0,30	0,70	0,65	0,28	1,00							Moyenne anti corrélation
SO ₄ ⁻⁻	0,67	0,22	0,81	0,79	0,05	0,95	1,00						Faible anti corrélation
HCO ₃ ⁻	-0,40	0,15	-0,40	-0,11	-0,70	-0,29	-0,18	1,00					
RS	0,94	0,20	0,75	0,61	0,17	0,70	0,73	-0,63	1,00				
CE	0,43	0,65	0,32	0,36	-0,05	0,86	0,80	0,13	0,43	1,00			
PH	0,20	-0,01	-0,13	-0,29	-0,37	-0,50	-0,35	-0,26	0,08	-0,57	1,00		

L'examen du tableau de cette matrice de corrélation permet de voir qu'il existe une bonne corrélation, (Plus de 70%) entre :

- RS et K⁺;
- Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, RS et Mg²⁺;
- SO₄²⁻, RS, CE et Cl⁻ ;
- RS, CE et SO₄²⁻,

La corrélation est moyenne ($\pm 60\%$) entre :

- Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , et K^+ ;
- CE et Na^+ ;
- Cl^- , RS et Ca^{2+} ,

Par ailleurs, on observe une anti-corrélation forte entre NO_3^- et HCO_3^- .

IV.3.2. 8.2 ACP pour les eaux Barrémiennes:

La matrice de corrélations multiples de l'analyse en composantes principales appliquée aux descripteurs chimiques des eaux Barrémiennes est présentée dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Barrémien.

Variables	K+	Na+	Mg++	Ca++	NO3-	Cl-	SO4--	HCO3-	RS	CE	PH
K+	1,00										
Na+	0,77	1,00									
Mg++	0,20	0,04	1,00								
Ca++	-0,79	-0,75	0,31	1,00							
NO3-	-0,25	-0,25	0,67	0,44	1,00						
Cl-	-0,36	-0,39	0,18	0,49	0,41	1,00					
SO4--	-0,90	-0,78	-0,54	0,54	-0,02	0,30	1,00				
HCO3-	0,24	-0,11	0,47	0,01	0,12	-0,01	-0,22	1,00			
RS	-0,77	-0,92	-0,16	0,62	0,05	0,19	0,82	0,19	1,00		
CE	-0,80	-0,92	0,06	0,82	0,33	0,44	0,76	0,24	0,88	1,00	
PH	0,11	-0,21	0,01	-0,15	-0,08	-0,07	0,09	0,68	0,39	0,36	1,00

On observe une très bonne corrélation, (plus de 70%), entre les descripteurs chimiques suivants :

- K^+ et Na^+ ;
- Ca^{2+} et CE
- RS, CE et SO_4^{2-}
- RS et CE

Et une forte anti- corrélation entre :

- Ca^{2+} , SO_4^{2-} , RS, CE et K^+
- Ca^{2+} , SO_4^{2-} , RS, CE et Na^+

IV.3.2.8.3 ACP pour les eaux du Mio-Plio-Quaternaire:

L'analyse du tableau IV.9 de la matrice de corrélation multiple pour les eaux du Mio-Plio-Quaternaire montre :

❖ Une bonne corrélation (+ de 70%) entre :

- Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , RS, CE et Na^+
- Cl^- , SO_4^{2-} , RS, CE et Ca^{2+}
- SO_4^{2-} , RS, CE et Cl^-
- RS, CE et SO_4^{2-}

❖ Une moyenne corrélation entre :

- Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , RS, CE et K^+
- SO_4^{2-} , RS et Mg^{2+}
- HCO_3^- et Ca^{2+}

Tableau IV. 9 La matrice de corrélation multiple pour les eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire,

Variables	K+	Na+	Mg++	Ca++	NO3-	Cl-	SO4--	HCO3-	RS	CE	PH
K+	1,00										
Na+	0,42	1,00									
Mg++	0,30	0,29	1,00								
Ca++	0,63	0,81	0,36	1,00							
NO3-	-0,20	-0,20	-0,22	-0,17	1,00						
Cl-	0,42	0,98	0,36	0,86	-0,22	1,00					
SO4--	0,55	0,78	0,56	0,91	-0,30	0,83	1,00				
HCO3-	0,66	0,30	0,38	0,52	-0,13	0,32	0,38	1,00			
RS	0,56	0,92	0,50	0,95	-0,21	0,95	0,94	0,47	1,00		
CE	0,54	0,92	0,49	0,94	-0,21	0,96	0,94	0,46	1,00	1,00	
PH	-0,11	-0,29	-0,39	-0,40	-0,17	-0,32	-0,34	-0,51	-0,42	-0,41	1,00

	Bonne corrélation
	Moyenne corrélation
	Faible corrélation
	Faible anti corrélation

En conclusion de cette analyse en composante principale (ACP) appliquée aux eaux souterraines de la région de Ain- Azel, dans le Sud de Sétif, il apparaît que la forte corrélation entre les éléments chimiques exprime la même origine. Cette information va être précisée en utilisant les diagrammes binaires.

IV.3.2. 9 Relations binaires entre les éléments majeurs :

IV.3.2. 9.1 L'aquifère Hauterivien :

❖ Couple $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ - Conductivité :

À l'aide de la figure IV.16, on note que 100% des points analysés présentent un rapport supérieur à 1, indiquant la dominance des ions du calcium, et cela nous permet de dire que la conductivité est influencée par le calcium.

❖ Couple Ca^{2+} - Na^+ :

Le graphe, (figure IV .17) montre deux groupes :

- 1- Une diminution du Ca^{2+} alors que le Na^+ reste en évolution, (un échange de base est probable) ;
- 2- Évolution simultanée du calcium et sodium, (probablement dissolution des évaporites sachant que l'aquifère Hauterivien est carbonaté).

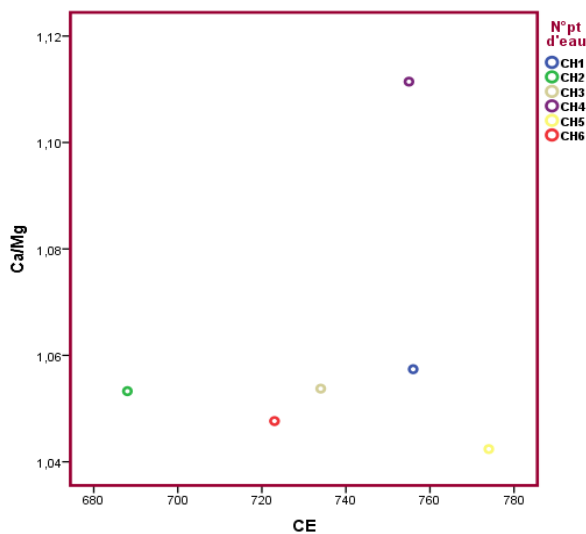


Figure IV.16. Relation $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -CE.

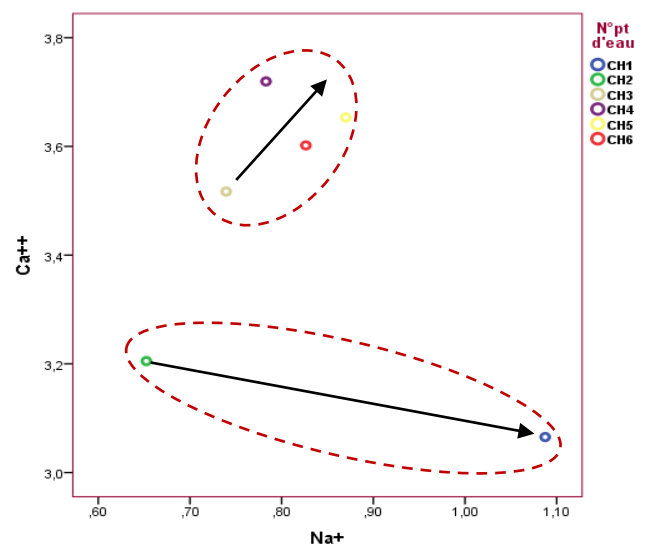


Figure IV.17. Relation Ca^{2+} - Na^+ .

❖ Couple Mg^{2+} - Na^+ :

Le graphe, (figure IV.18), met en évidence également deux tendances :

- 1- Une évolution simultanée du Mg^{2+} et Na^+ (dissolution des évaporites) constatée dans les forages CH3, CH4, CH5 et CH6 ;

2- Une diminution du Mg^{2+} alors que le sodium reste en évolution (un échange de base peut-être) constatée dans les forages CH1 et CH2.

❖ **Couple SO_4^{2-} - Cl^- :**

Le graphe, (**figure IV.19**), montre que les eaux captées dans les forages de l'aquifère Hauterivien, (CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6), présentent un excès de Cl^- (probablement dissolution des évaporites sachant que l'aquifère Hauterivien est carbonaté).

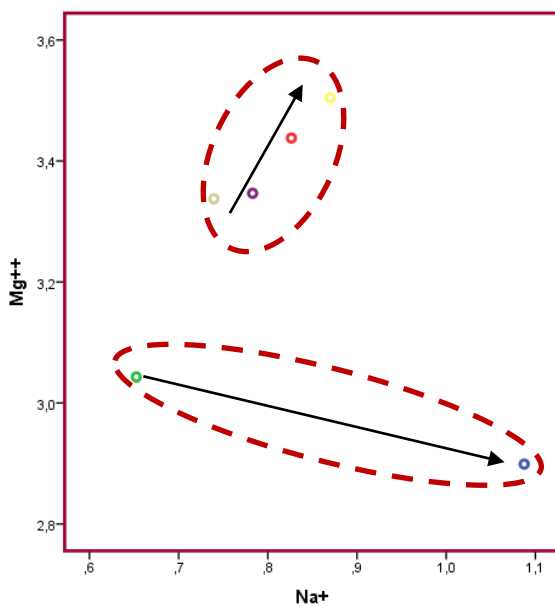


Figure IV.18. Relation Mg^{2+} - Na^+ .

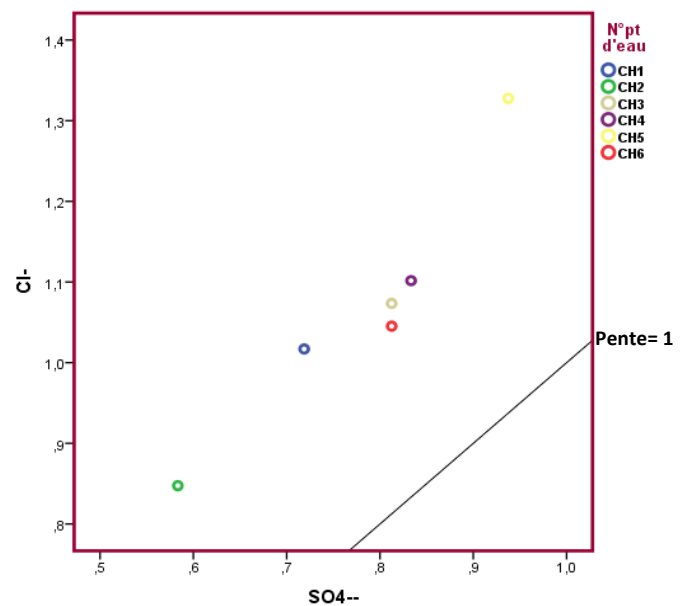


Figure IV.19. Relation SO_4^{2-} - Cl^- .

❖ **Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du calcium, (**Figure IV.20**), et une absence totale du SO_4^{2-} . Cette relation traduit la dissolution du calcium d'origine carbonaté.

❖ **Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du Mg, (**Figure IV.21**), et une absence totale du SO_4 . Cette relation traduit la dissolution des formations carbonatées riches en Mg telle que les dolomies. Cette relation confirme la présence du faciès bicarbonaté magnésien.

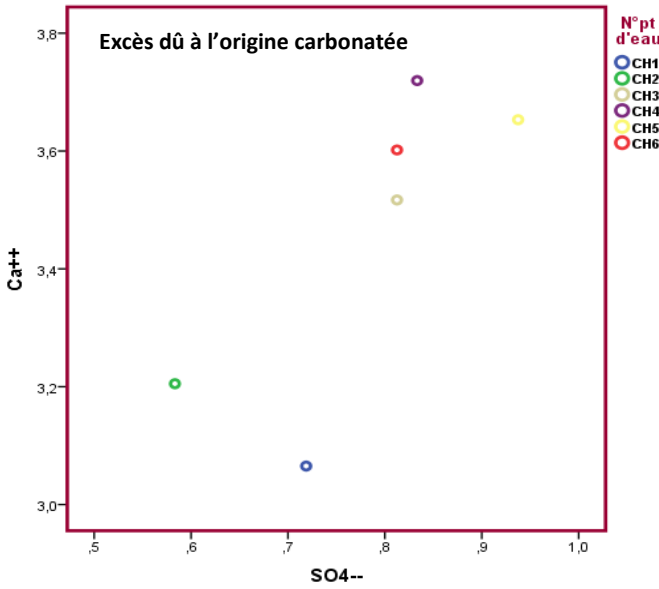


Figure IV.20. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}

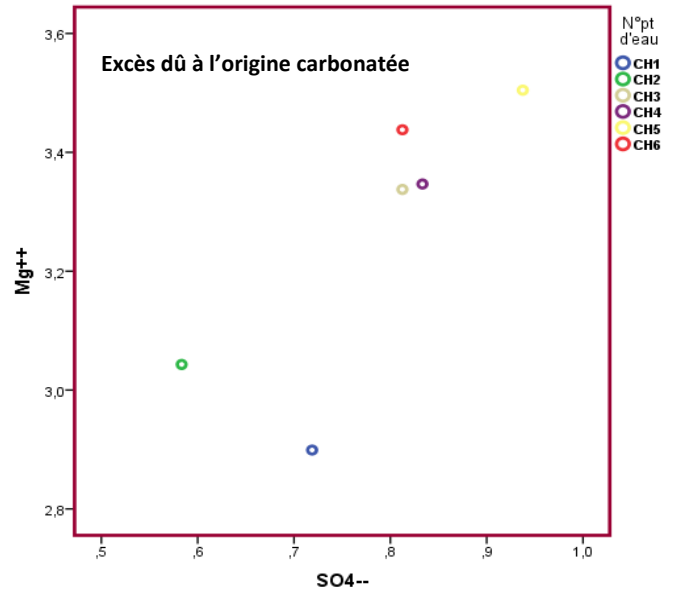


Figure IV.21. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}

❖ Couple Ca^{2+} - Cl^- :

Lorsque ce rapport est supérieur à 1 (Figure IV.22), le Ca prédomine, c'est le cas de tous les forages : CH1, CH2, CH3, CH4, CH5 et CH6.

❖ Couple Mg^{2+} - Cl^- :

Lorsque ce rapport est supérieur à 1, le Magnésium prédomine, ce qui est notable dans la Figure IV.23.

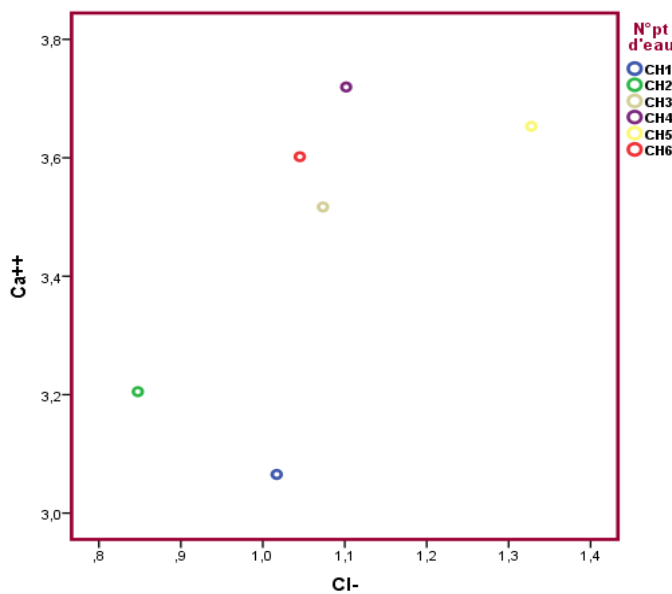


Figure IV.22. Relation Ca^{2+} - Cl^-

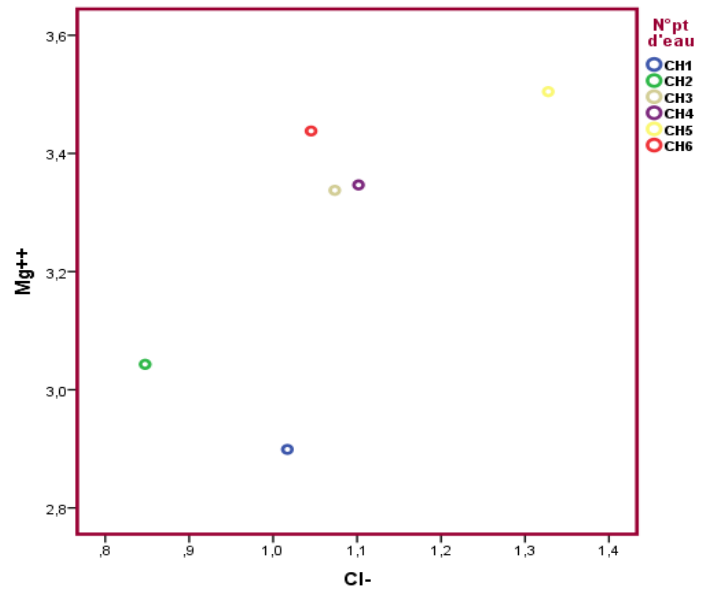
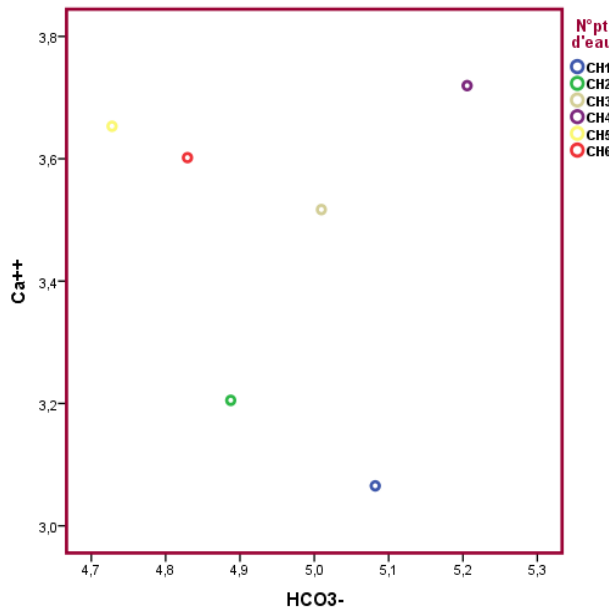
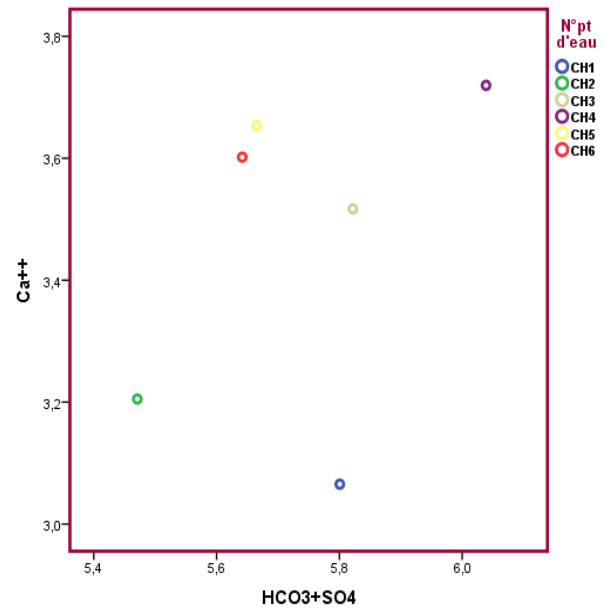


Figure IV.23. Relation Mg^{2+} - Cl^-

❖ Couple Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-} :

La figure IV. 24 montre l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates. Tous les forages CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6 indiquent une origine carbonatée comme source du calcium. La figure IV.25 confirme ce fait.

Figure IV.24. Relation Ca^{2+} - HCO_3^- Figure IV.25. Relation Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}

IV.3.2. 9.2 L'aquifère Barrémien :

❖ Couple SO_4^{2-} - Cl^- :

Tenant compte de la dominance de faciès chloruré et sulfaté, il est important de vérifier la relation entre ces deux éléments. Le graphe, (figure IV.26), montre une dispersion des points où on constate que les eaux captées dans les forages, (CH19, CH23, CH16, Afounes et CH17), présentent un excès de Cl^- , tandis que les forages, (CH21, CH22 et CH20), présentent un excès de SO_4^{2-} .

❖ Couple SO_4^{2-} / Cl^- - Conductivité:

Ce rapport permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la mise en solution des ions évaporitiques en fonction de la conductivité électrique. On note que la conductivité est influencée par les sulfates et les chlorures.

La présentation graphique, (**Figure IV. 27**), montre que 38% des points analysés et précisément les forages, (CH20, CH21 et CH22), présentent un rapport supérieur à 1, indiquant une légère dominance des ions du gypse par rapport aux ions chlorurés, (62% des points analysés : CH16, CH17, CH19, CH23 et Afounes).

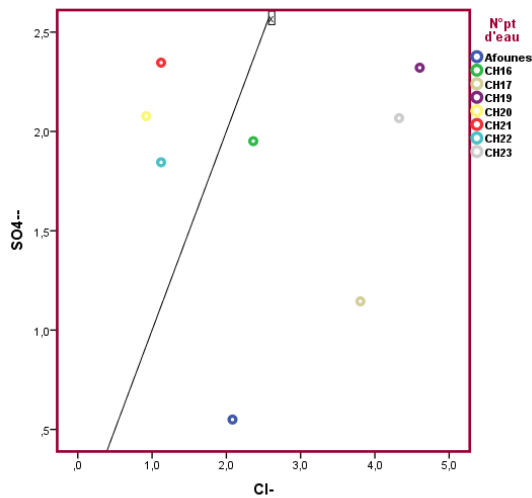


Figure IV.26. Relation Cl⁻ - SO₄²⁻

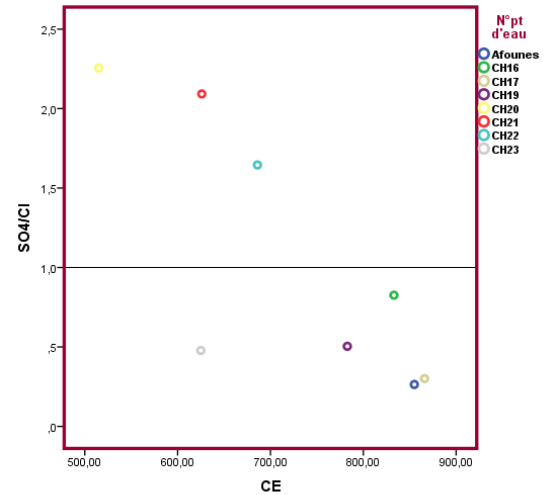


Figure IV.27. Relation SO₄²⁻ / Cl⁻ - CE

❖ **Couple Ca²⁺/Mg²⁺ - Conductivité :**

L'influence de ces deux éléments sur la conductivité électrique de l'eau barrémienne est vérifiée par la figure IV.28. On note que la conductivité est influencée par le calcium et le magnésium, La représentation graphique montre que 80% des points analysés présentent un rapport égal à 1, indiquant une égalité des ions de calcium et magnésium, tandis que 20% des points analysés, (CH23 et Afounes), présentent une dominance de Mg²⁺.

❖ **Couple Ca²⁺ - Na⁺ :**

Le graphe de la **figure IV.29** met en lumière trois tendances :

- 1- Une diminution du Ca²⁺ alors que Na⁺ reste en évolution, (probablement un échange de base entre Na⁺ et Ca²⁺) ;
- 2- Le calcium évolue indépendamment du Na⁺ (une autre origine que les évaporites) ;
- 3- Une évolution simultanée de Ca²⁺ et Na⁺, (dissolution des évaporites).

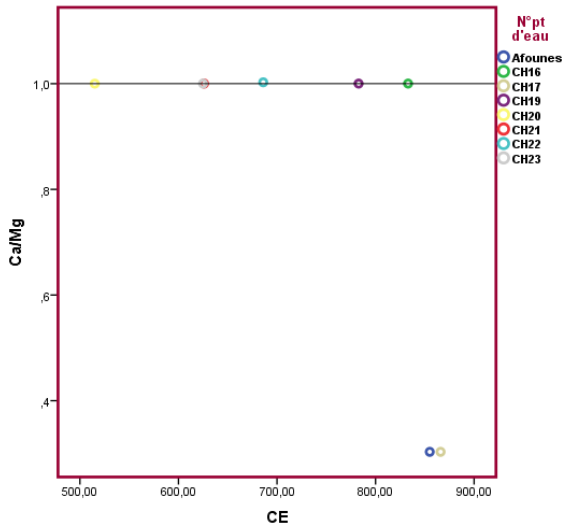


Figure IV.28. Relation Ca^{2+}/Mg^{2+} - CE

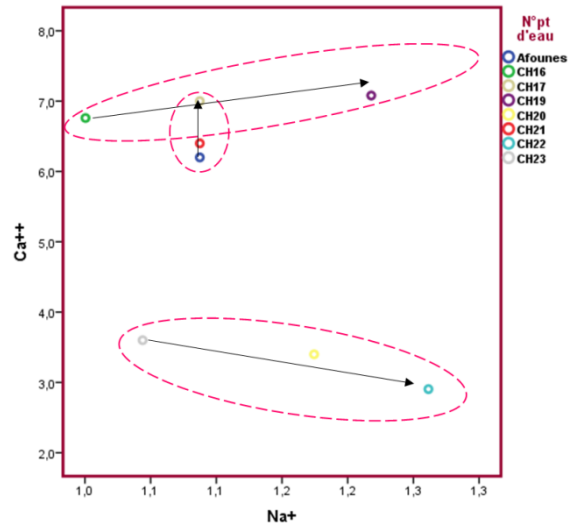


Figure IV.29. Relation Ca^{2+} - Na^+

❖ **Couple Mg^{2+} - Na^+ :**

Le graphe de la **figure IV. 30** révèle aussi trois tendances :

- 1- Une diminution de Mg^{2+} alors que le Na^+ reste en évolution, (probablement un échange de base entre Na^+ et Mg^{2+}) ;
- 2- Le Mg^{2+} évolue indépendamment du Na^+ , (une autre origine que les évaporites) ;
- 3- Évolution simultanée du Na^+ et Mg^{2+} , (dissolution des évaporites).

❖ **Couple Ca^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du calcium, (**Figure IV.31**) et une absence totale du SO_4^{2-} . Cette relation traduit la dissolution du calcium d'origine carbonatée. Cette relation traduit la présence du faciès bicarbonaté calcique.

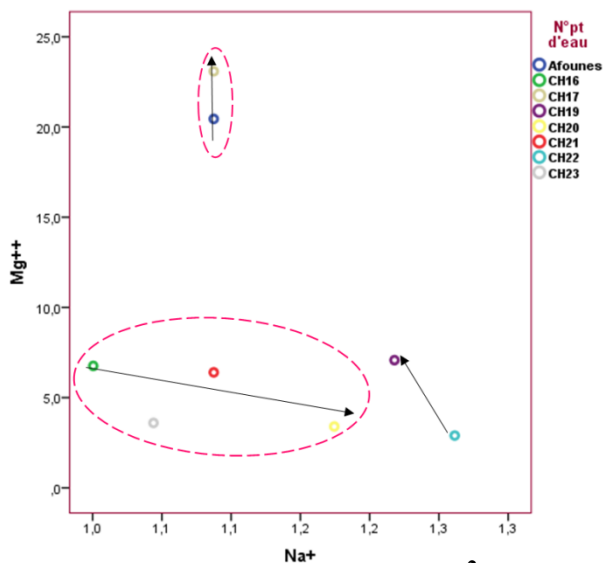


Figure IV.30. Relation Mg^{2+} - Na^+

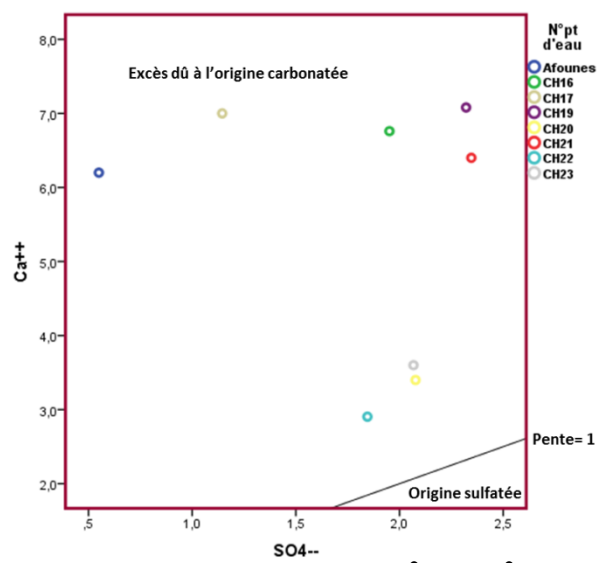


Figure IV.31. Relation Ca^{2+} - SO_4^{2-}

❖ **Couple Mg^{2+} - SO_4^{2-} :**

L'examen de cette relation montre un excès du Mg^{2+} , (**Figure IV.32**) et une absence totale du SO_4^{2-} . Cette relation traduit la dissolution des formations carbonatées riches en Mg^{2+} , telle que les dolomies. Cette relation confirme la présence du faciès bicarbonaté magnésien.

❖ **Couple Ca^{2+} - Cl^- :**

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des chlorures et du calcium, (**Figure IV.33**).

Lorsque ce rapport est supérieur à 1, le Ca^{2+} prédomine. C'est le cas des forages : Afounes, CH16, CH17, CH19, CH20, CH21, et CH22. Néanmoins, les chlorures prédominent dans le forage CH23, (**Figure IV.33**).

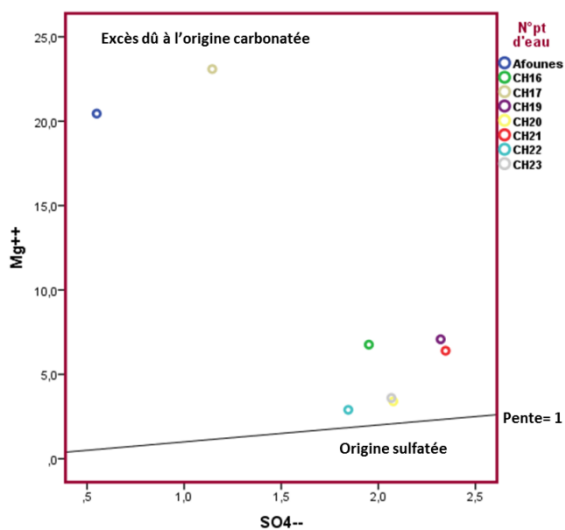


Figure IV.32. Relation Mg^{2+} - SO_4^{2-}

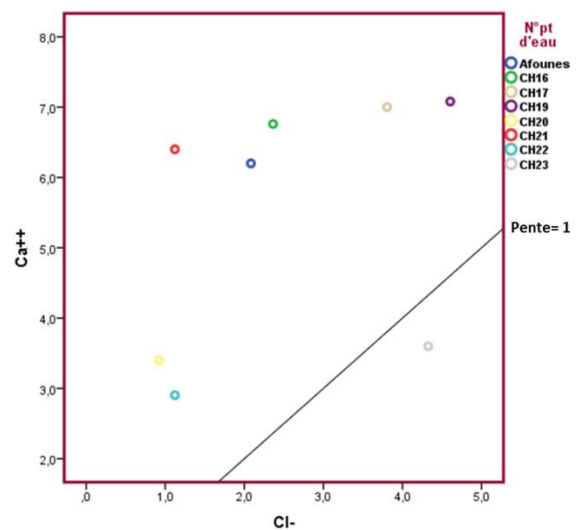


Figure IV.33. Relation Ca^{2+} - Cl^-

❖ **Couple Mg^{2+} - Cl^- :**

Lorsque ce rapport est inférieur à 1, les chlorures prédominent, ce qui est notable dans le forage CH23, (**Figure IV.34**), tandis que le reste des forages et qui représentent 90% des points de l'aquifère Barrémien présente une prédominance du Mg.

❖ **Couple Ca^{2+} - Mg^{2+} :**

Lorsque ce rapport est inférieur à 1, cela indique la prédominance du Mg. C'est le cas des forages CH23 et Afounes, (**Figure IV.35**). Cependant les forages qui se positionnent sur la droite de la pente 1, (CH16, CH17, CH19, CH20, CH21, CH22) indiquent la même origine du calcium.

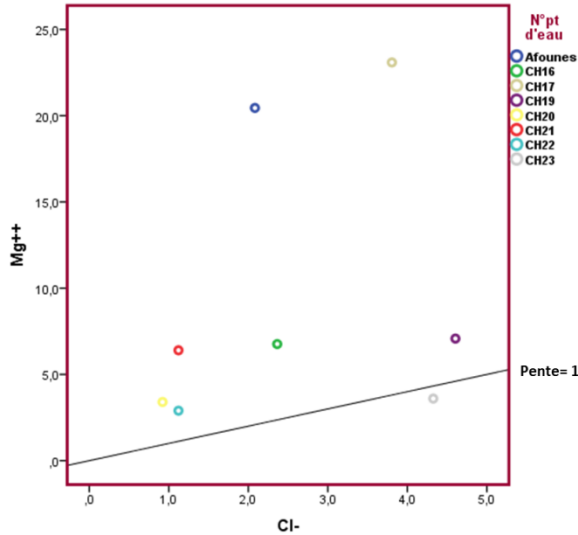


Figure IV.34. Relation Mg^{2+} - Cl^-

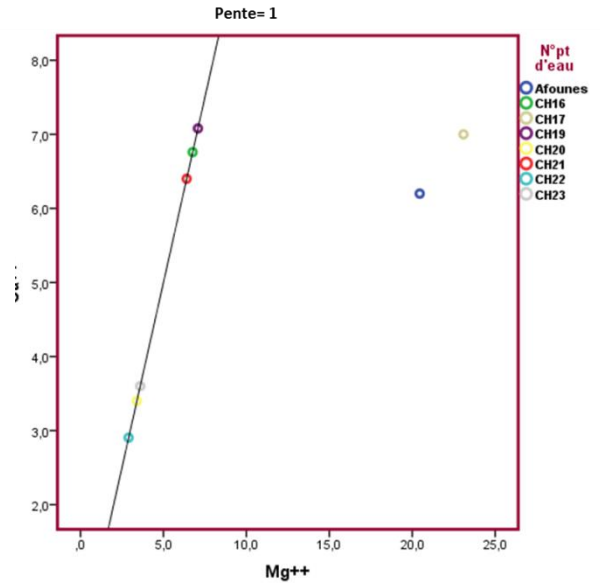


Figure IV.35. Relation Ca^{2+} - Mg^{2+}

❖ **Couple Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-} :**

La **figure IV. 36a** montre l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates. Les forages CH21, CH16, CH19 et CH23 montre un excès du calcium suite peut être à la dissolution du gypse.

Par opposition, les forages CH20, CH23, CH22 et Afounes indiquent une origine carbonatée comme source du calcium. La figure IV.36b confirme cette tendance.

❖ **Diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$:**

Le report de tous les points d'eau sur le diagramme, (**Figure IV.37**) montre que 24% (CH22, CH20) ont subi un échange de base, 38% des points présentent un déficit en Na et en Ca et 38%, certains points présentent un excès en Ca par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} .

❖ **Diagramme $Mg^{2+}/(HCO_3^- + SO_4^{2-}) - Na^+/Cl^-$:**

Le report de tous les points d'eau sur le diagramme, (**Figure IV.38**) montre que 24% (CH20 et CH22) ont subi un échange de base. 24% des points (CH21 et CH23) présentent un déficit en Na et Mg, et 52% aussi des points présentent un excès en Mg par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} .

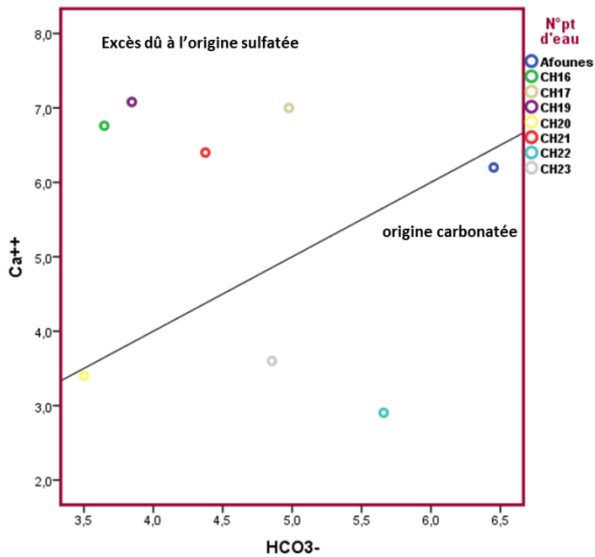


Figure IV.36a. Évolution du calcium

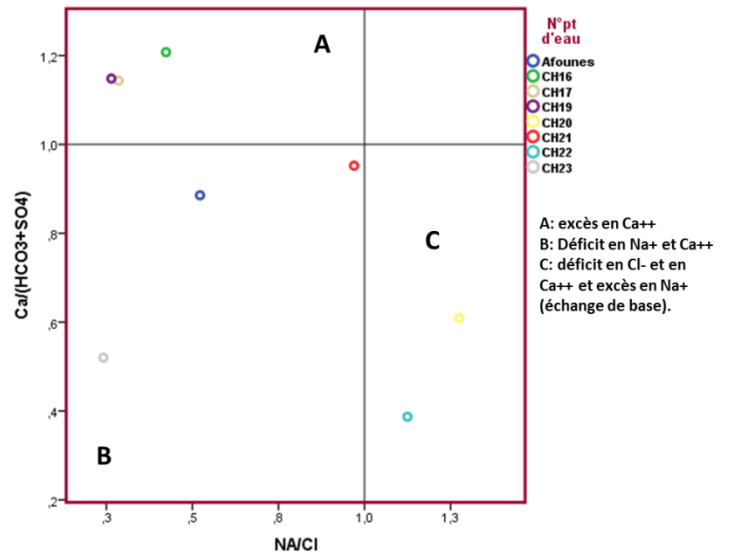


Figure IV.37. Échange de base

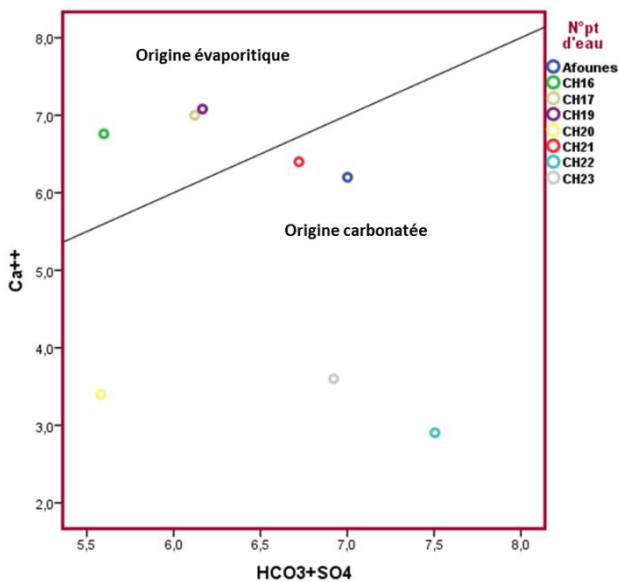


Figure IV.36b. Évolution du calcium

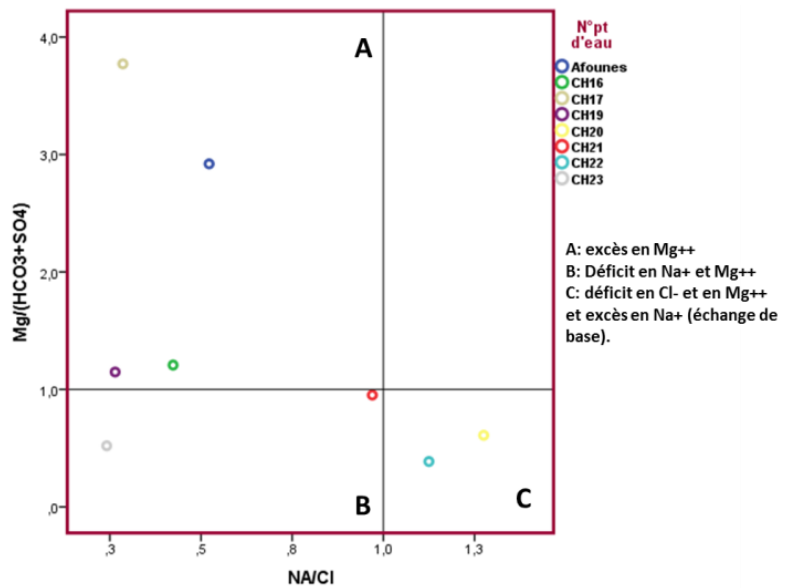


Figure IV.38. Échange de base

Les études d'échange ionique dans les formations géologiques ont révélé, qu'en général, au cours du processus d'échange, un des ions est retenu très fortement contre tout déplacement par les autres ions, C'est une absorption préférentielle connue par sélectivité d'échange ionique, (S. Ghebouli, 2010).

Au cours de leurs trajets souterrains, les eaux entrent en contact avec les différentes formations géologiques qui ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans les eaux, (S. Ghebouli, 2010).

IV.3.2. 10 Qualité des eaux à la consommation humaine et à des fins d'irrigation:

Lors de l'utilisation de l'eau hors de son milieu, sa qualité est souvent mentionnée, elle est fonction du type d'usage. Ainsi, les exigences relatives à la qualité sont différentes d'une utilisation à l'autre. Dans ce travail, seule la qualité d'eau destinée à la consommation humaine et aux activités agricoles est soulevée. Dans cette optique, nous allons profiter des données analytiques disponibles pour évaluer la qualité des eaux destinées à la consommation humaine et aux activités agricoles. En effet, la quasi-totalité des eaux mobilisables dans la région sont utilisées pour ces deux activités.

La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture. La mauvaise qualité des eaux peut être induite par des activités anthropiques ou par des phénomènes naturels.

De ce fait, la comparaison des données des analyses chimiques des eaux du secteur d'étude avec les normes de l'OMS, 2008 et Algérienne NA 6360 ,1992, ainsi qu' avec Ayers and Westcot, 1994, fait ressortir que dans les aquifères Hauterivien, Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire dans la région de Ain- Azel, au Sud de Sétif, nous avons des eaux potables et de bonne qualité et aptes à l'irrigation, et d'autres signalées comme non potables et inaptées à l'irrigation, parce que certaines concentrations en éléments chimiques sont élevées et dépassent les normes, ce qui impose un traitement antérieur avant leur utilisation, (**Tableau IV.10 et figures A3.11, A3.12 et A3.13 en annexe 3**).

Tableau IV. 10. La qualité des eaux selon les différentes normes.

L'aquifère	Norme	Qualité
Hauterivien	OMS, 2008	Toutes les eaux de forages sont potables et apte à l'irrigation sans traitement,
	NA, 6360,1992	
	Ayers and Westcot, 1994	
Barrémien	OMS, 2008	Les eaux des forages CH16, CH19, CH20, CH21, CH22, CH23 sont potables sans traitement,
	NA, 6360,1992	
	Ayers and Westcot, 1994	Seulement les eaux des forages CH20, CH22 et CH23 sont aptes à l'irrigation sans traitement,
Mio-Plio-Quaternaire	OMS, 2008	Seulement les eaux du point 70 sont potables sans traitement,
	NA, 6360,1992	Les eaux des points 2, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 27, 28, 32, 33, 34, 35, 41, 43, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 76 sont potables sans traitement,
	Ayers and Westcot, 1994	Seulement les eaux des points 7 et 28 qui sont aptes à l'irrigation sans traitement,

La représentation des points d'eau, (période de Mai 2018), sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff, (Figure IV.39 .40 .41), a montré que tous les points se rangent dans la classe de potabilité sauf les points CH17 et Afounes, (l'aquifère Barrémien), 33, 37, 38, 41, 57, 65, et 78, (l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire) qui se classent dans la classe médiocre.

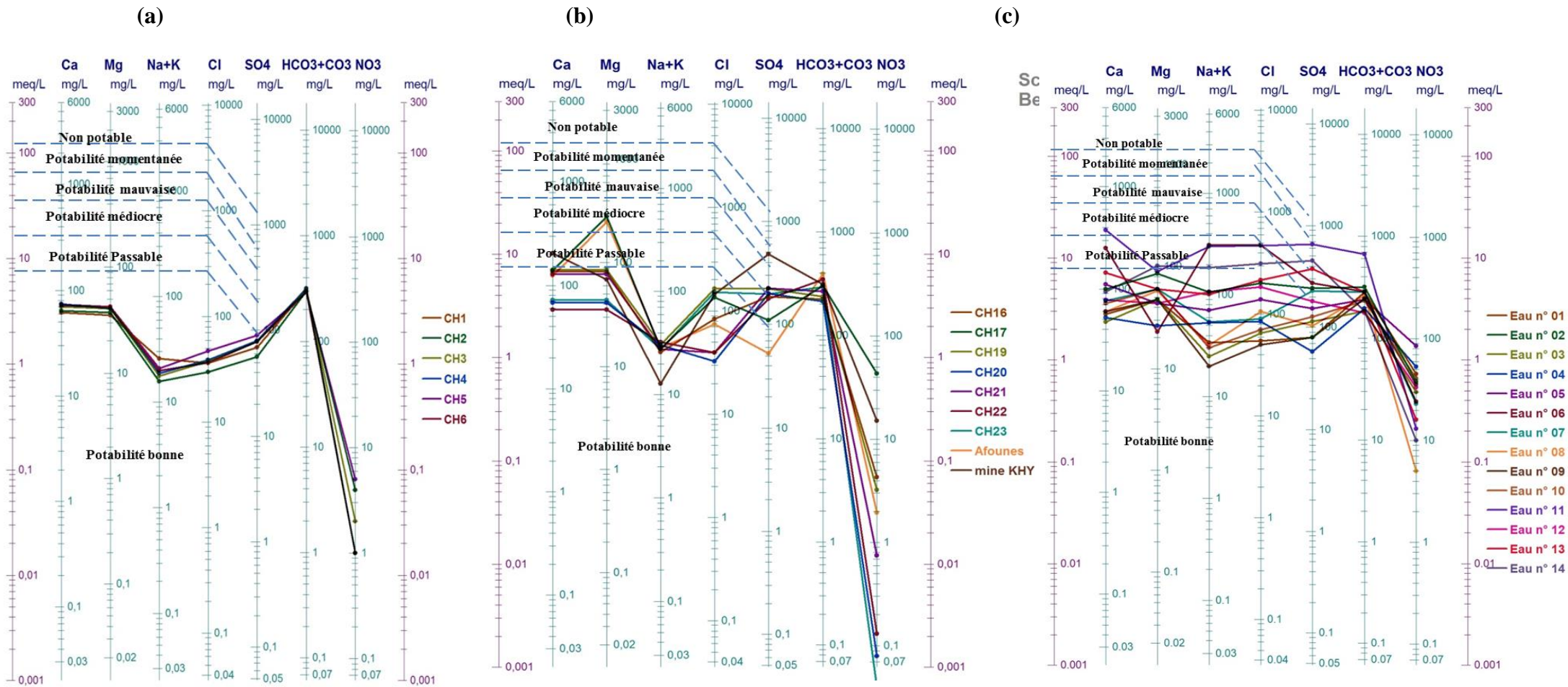


Figure IV.39. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff, (Mai 2018).

- (a) Les eaux de l' Hauterivien
- (b) Les eaux du Barrémien
- (c) Les eaux du Mio-Plio-Quaternaire

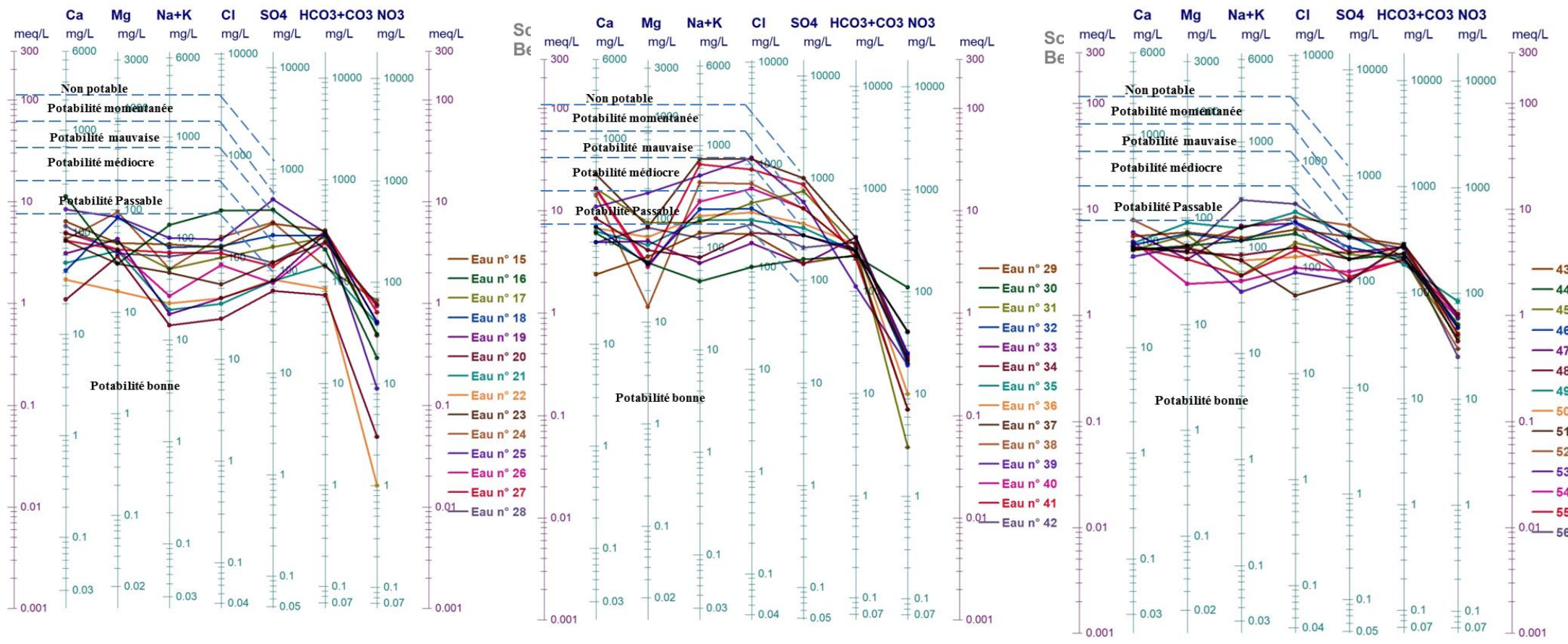


Figure IV.40. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff

(Période de Mai 2018) des eaux du Mio-Plio-Quaternaire.

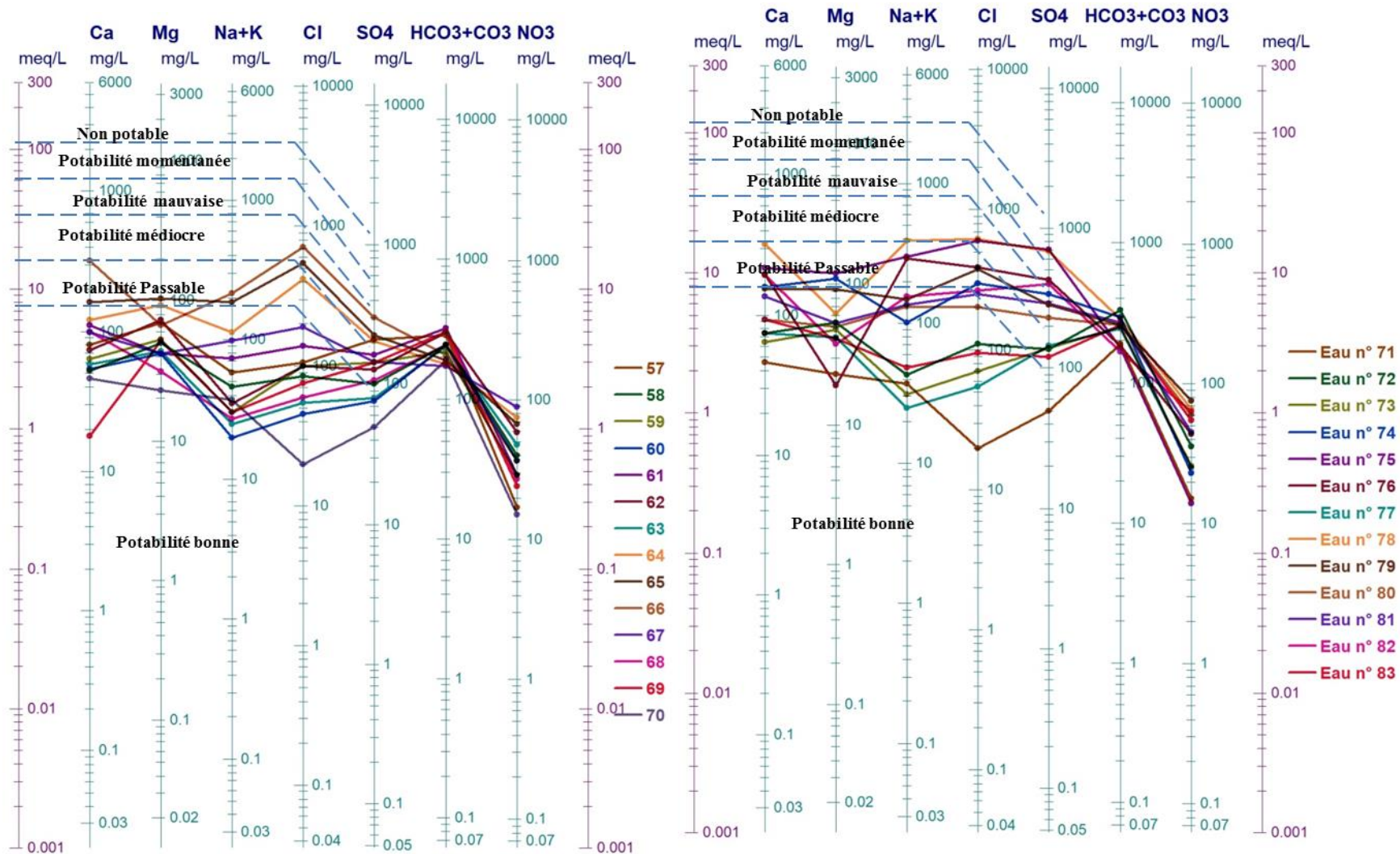


Figure IV.41. Représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff

(Période de Mai 2018) des eaux du Mio-Plio-Quaternaire.

IV.3.2. 11 Aptitude des eaux à l'irrigation :

Pour déterminer la qualité des eaux de la nappe Hauterivienne, Barrémienne et Mio-Plio-Quaternaire dans la région Sud Sétifienne à des fins d'irrigation, nous avons eu recours au calcul de quelques indices (KR, SAR, RSC, SSP, PI, et MH), ainsi que le diagramme de Wilcox qui peuvent donner des indications pertinentes sur la qualité de ces eaux. Les figures IV .42 à IV.47 résument les valeurs calculées pour chaque indice.

IV.3.2. 11.1 Kelly ratio (KR) :

On constate que les valeurs du KR calculées, (Tableau A3.4. en Annexe 3), des différents points d'eau prélevés sont inférieures ou égales à 1, (Figure IV.42), ce qui confère à ces eaux une bonne qualité vis-à-vis de son utilisation en irrigation, (W. P. Kelly, 1940).

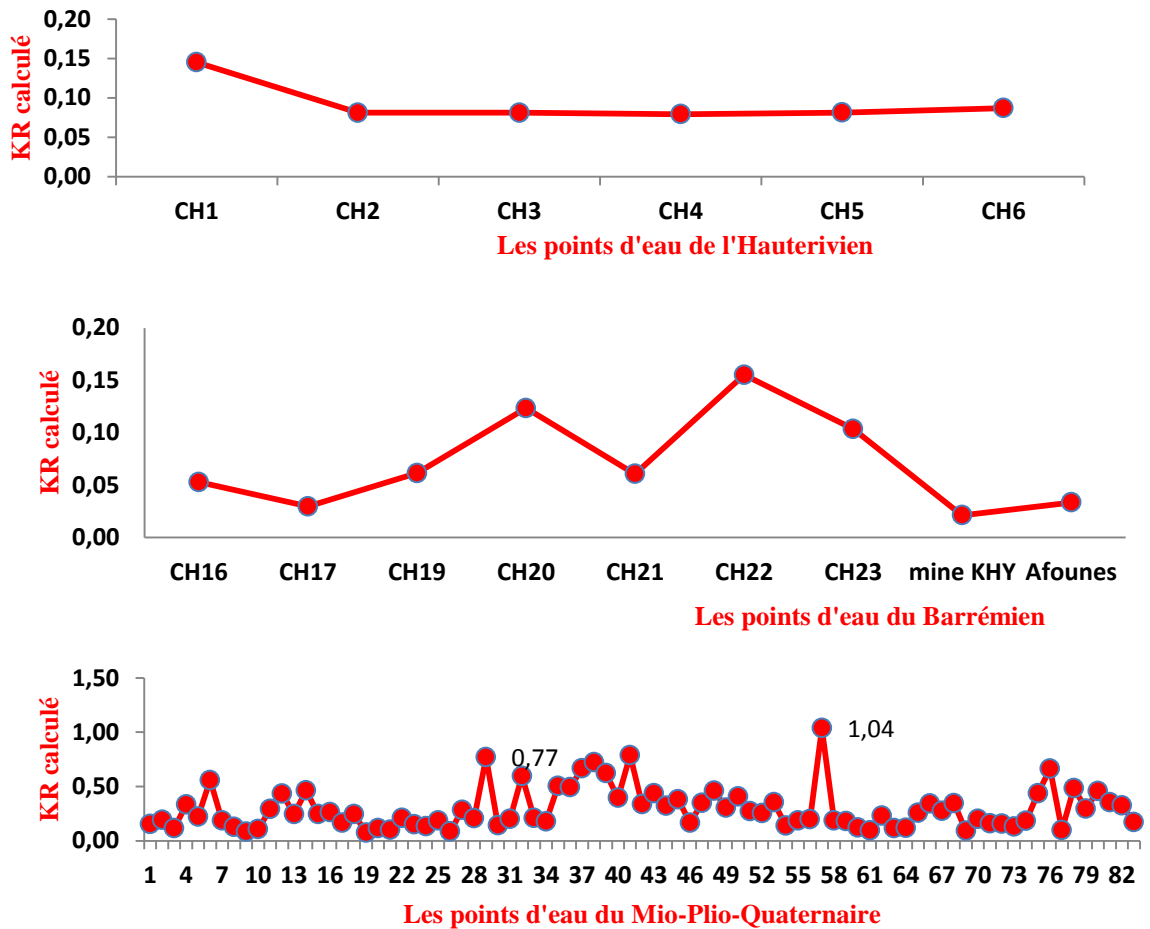


Figure IV.42. Histogramme des valeurs du KR des différents points d'eau.

IV.3.2. 11.2 Sodium absorption ratio (SAR)

Les valeurs du SAR calculées, (Tableau A3.4. en Annexe 3), des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.43), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont d'excellente qualité pour l'irrigation, (valeurs < à 10), contrairement aux points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire qui sont de qualités différentes : Excellente, Bonne et médiocre, (L. A. Richard, 1954).

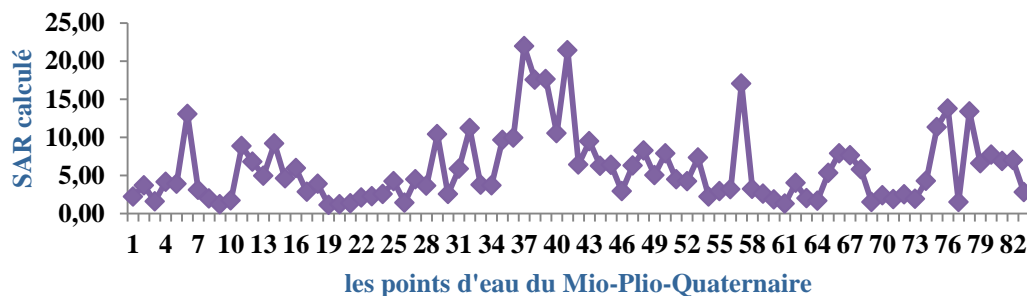
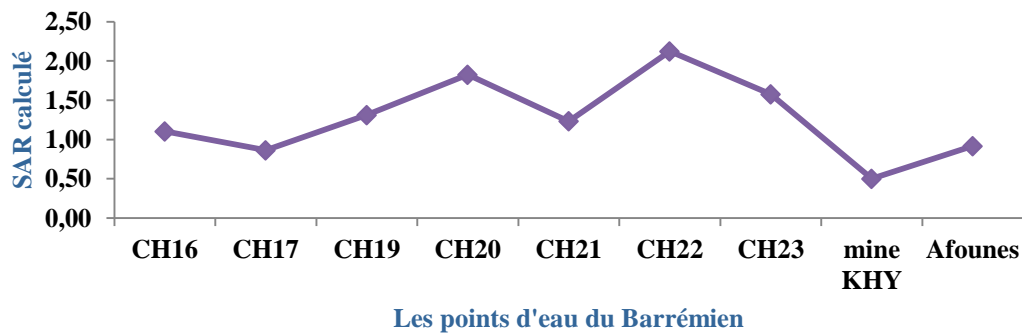
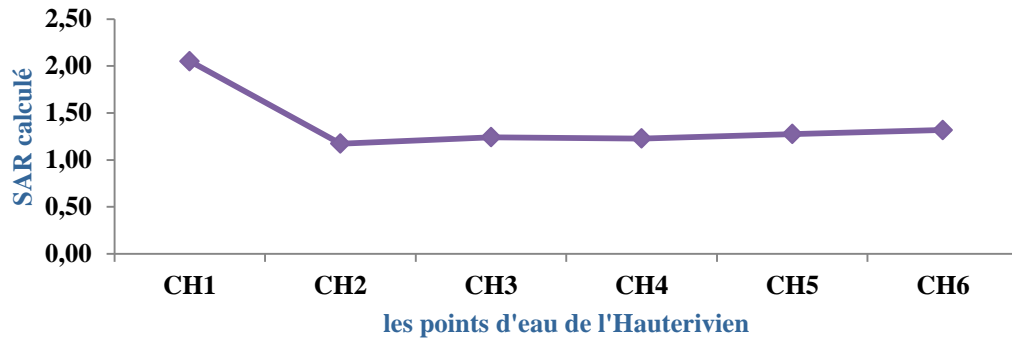


Figure IV.43. Histogramme des valeurs du SAR des différents points d'eau.

IV.3.2. 11. 3 Residual Sodium Carbonate (RSC)

Le calcul du RSC, (Tableau A3.4. en Annexe 3), montre que les points d'eau de tous les aquifères sont rangés dans la classe 1, (Figure IV.44), c'est à dire que leur qualité est excellente pour l'irrigation.

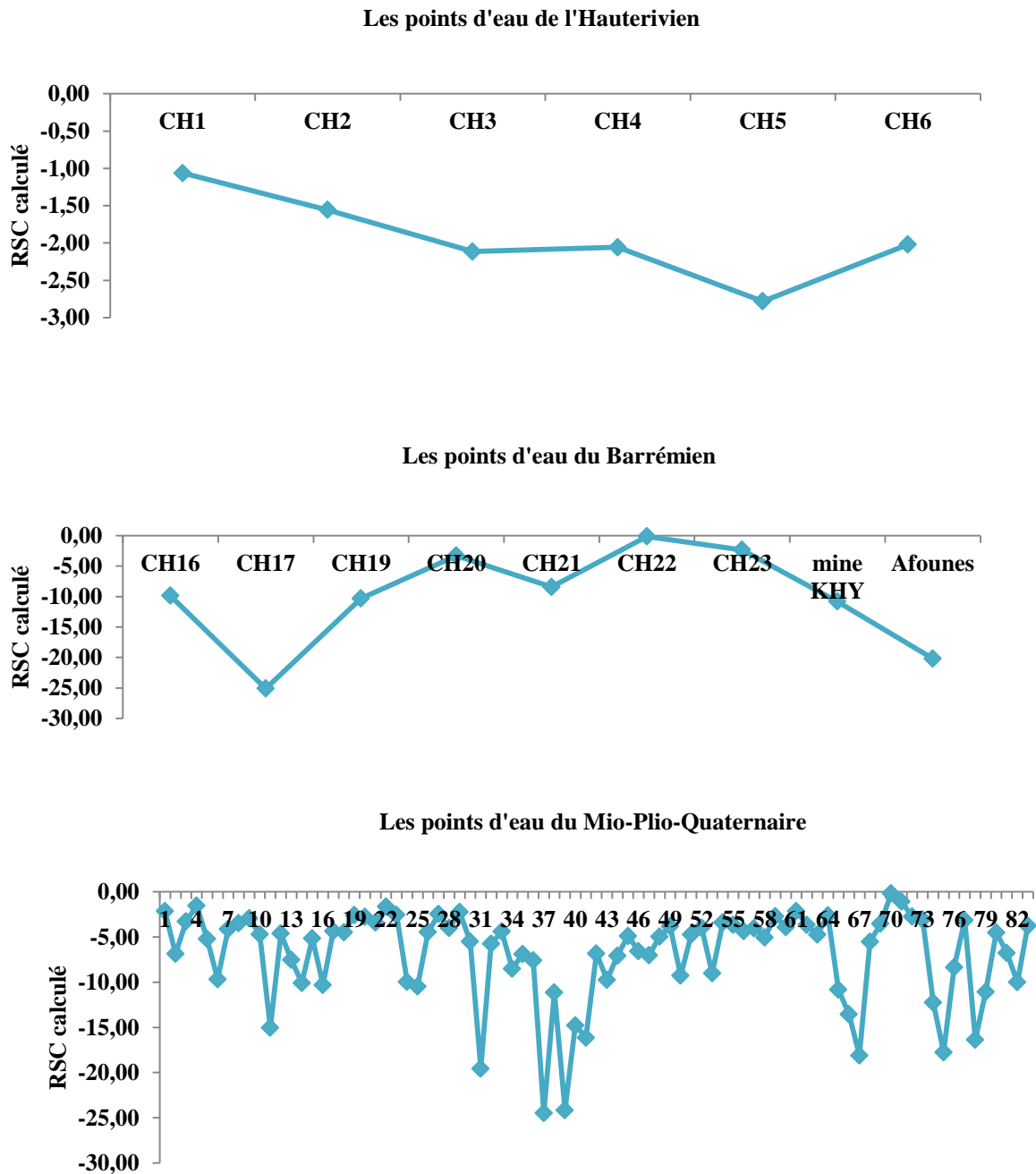


Figure IV.44. Histogramme des valeurs du RSC des différents points d'eau.

IV.3.2. 11.4 Soluble Sodium Percentage (SSP)

Les valeurs du SSP calculées des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.45), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont d'excellente qualité pour l'irrigation, (valeurs < à 20), (Tableau A3.4. en Annexe 3), contrairement aux points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire qui sont de qualités différentes : Excellente, Bonne et moyennement bonne, (L. V. Wilcox, 1955).

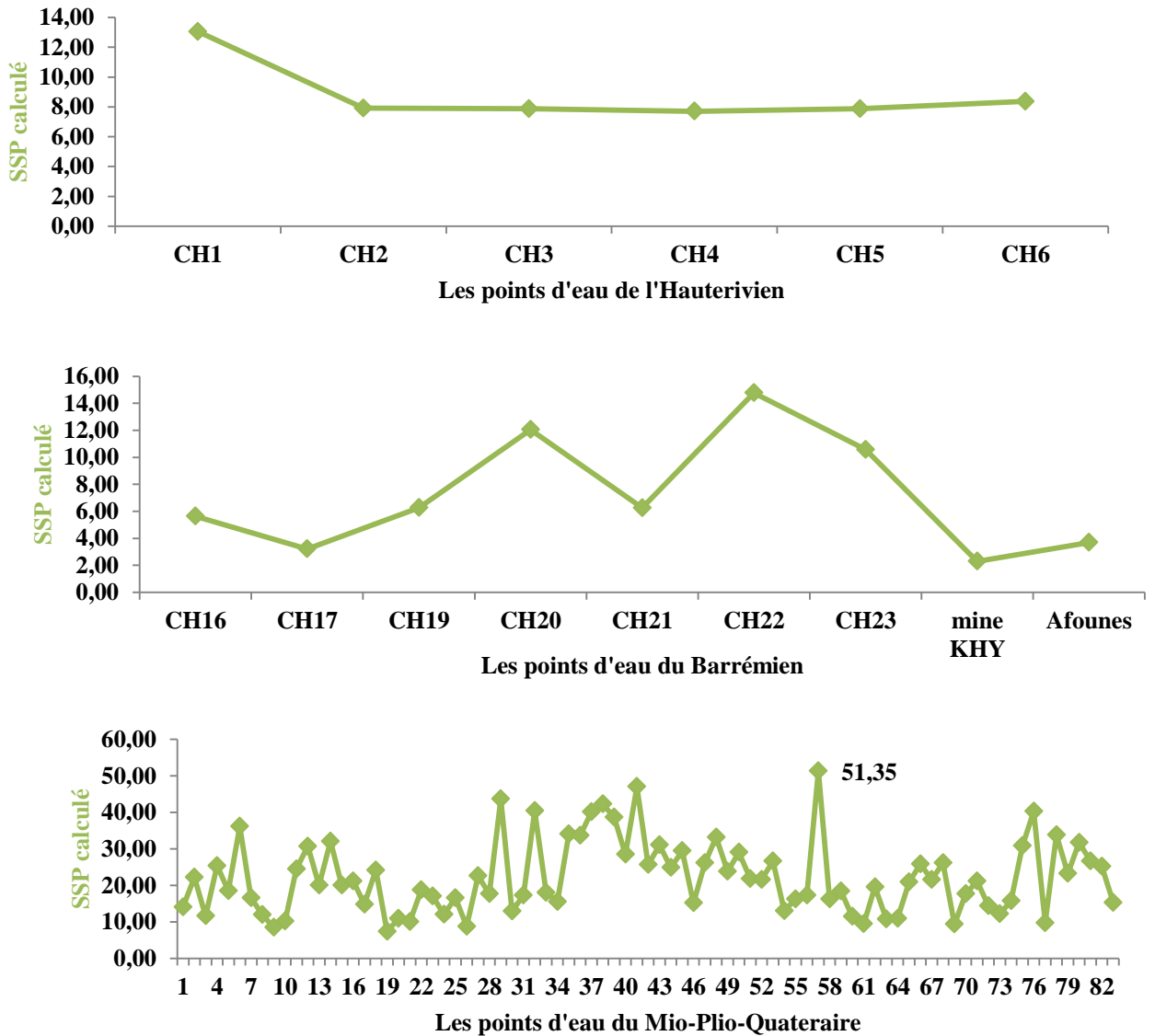


Figure IV.45. Histogramme des valeurs du SSP des différents points d'eau.

IV.3.2. 11.5 Permeability Index (PI)

Les valeurs du PI calculées, (Tableau A3.4. en Annexe 3), des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.46), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont de mauvaise qualité pour l'irrigation, (valeurs < à 25), contrairement aux points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire qui se rangent dans les classes de bonne et de mauvaise qualité, (L. Doneen, 1962).

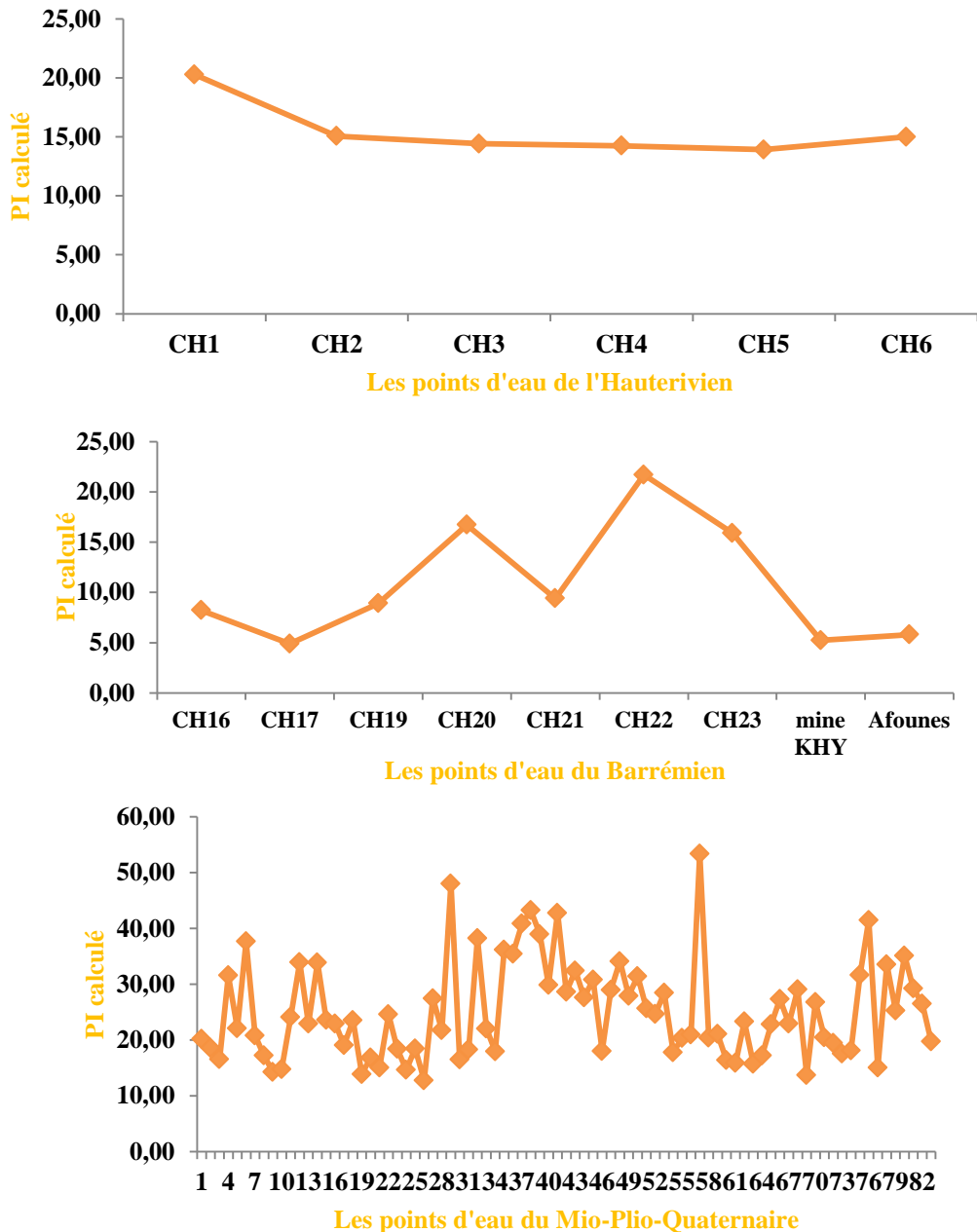


Figure IV.46. Histogramme des valeurs du PI des différents points d'eau

IV.3.2.11.6 Magnesium Hazard (MH)

Les valeurs du MH calculées des différents points d'eau prélevés, (Figure IV.47), montrent que tous les points de l'aquifère Barrémien et Hauterivien sont acceptables pour l'irrigation, (valeurs < à 50), sauf, CH17 et le forage de Afounes qui sont dans la classe >50, ce qui indique leur mauvaise qualité pour l'irrigation.

De même, les points de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire renferment des valeurs < à 50 ce qui indique leur bonne qualité à l'irrigation, (K. V. Paliwal, 1972), (Tableau A3.4. en Annexe 3), et d'autres > 50 ce qui indique leur mauvaise qualité pour l'irrigation.

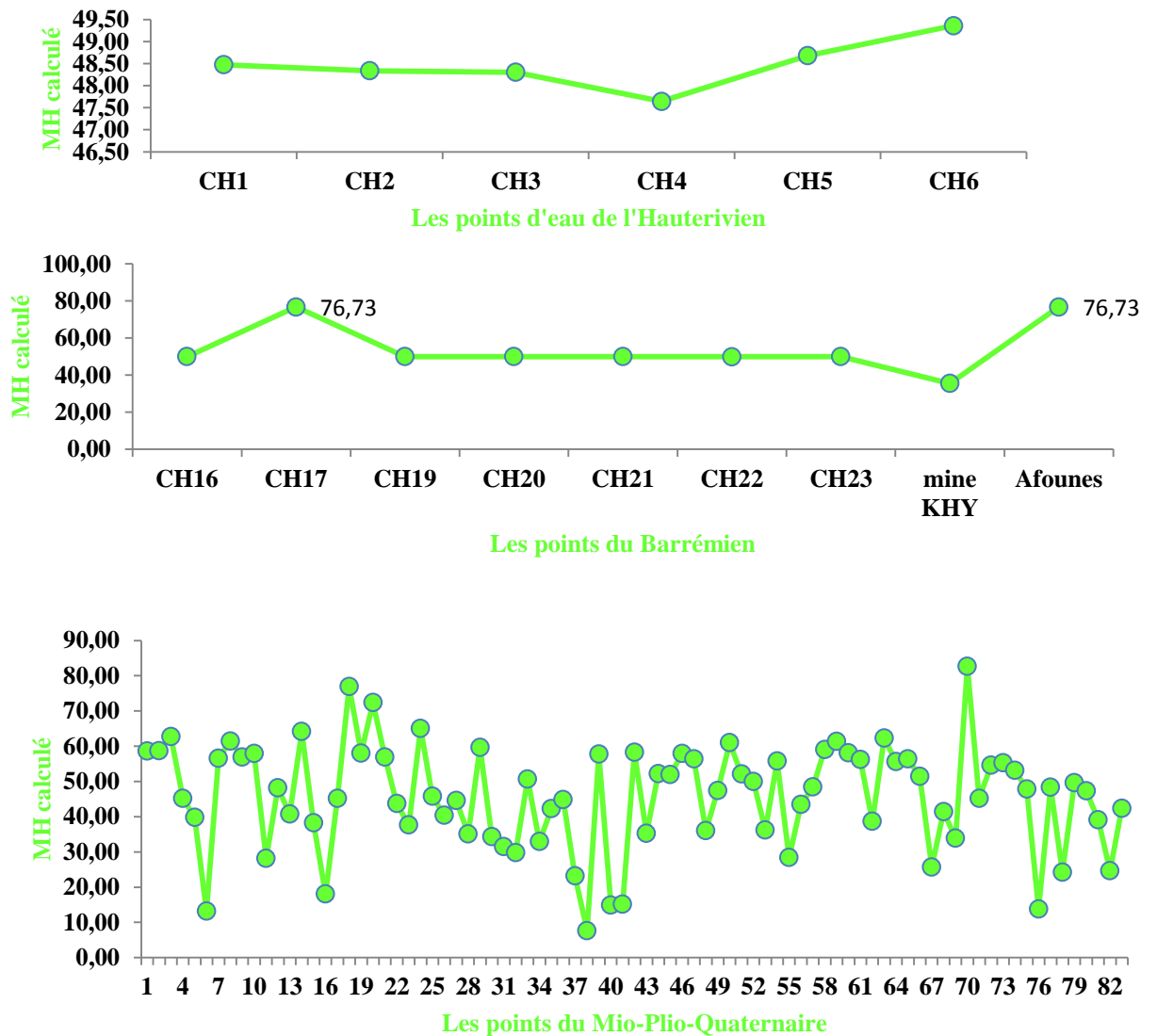


Figure IV.47. Histogramme des valeurs du MH des différents points d'eau.

IV.3.2.11.7 Le diagramme de Wilcox

La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau, généralement connue en pourcentage du sodium, est définie par la relation $Na\% = \frac{Na}{(Ca+Mg+Na+K)} \times 100$ où tous les éléments sont exprimés en méq/l, Cette classification définit cinq classes d'eau : Excellente, bonne, admissible, médiocre, et mauvaise.

Les diagrammes de Wilcox, (**Figure IV.48**), montrent que la quasi-totalité des points d'eau de l'aquifère Hauterivien et Barrémien sont dans les normes : 11 points d'eau (74%) sont rangés dans la classe excellente, 4 points (26%) dans la classe bonne. La représentation du pourcentage de sodium en fonction de la conductivité des points d'eau de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire sur le diagramme de Wilcox, (**Figure IV.49**), permet de constater que 15 % des points d'eau ont une qualité excellente pour l'irrigation, 44 % ont une qualité bonne, 27% ont une qualité médiocre et 14 % ont une qualité mauvaise.

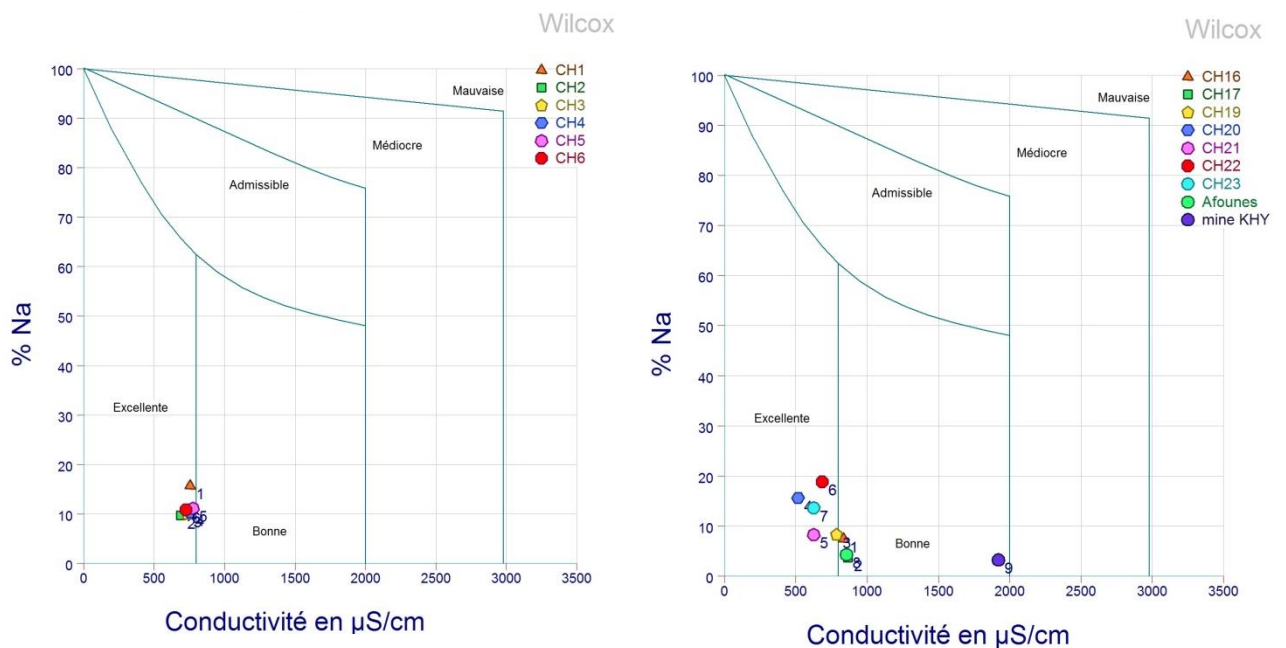


Figure IV. 48. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox, (L'aquifère Hauterivien et Barrémien_Période de Mai 2018).

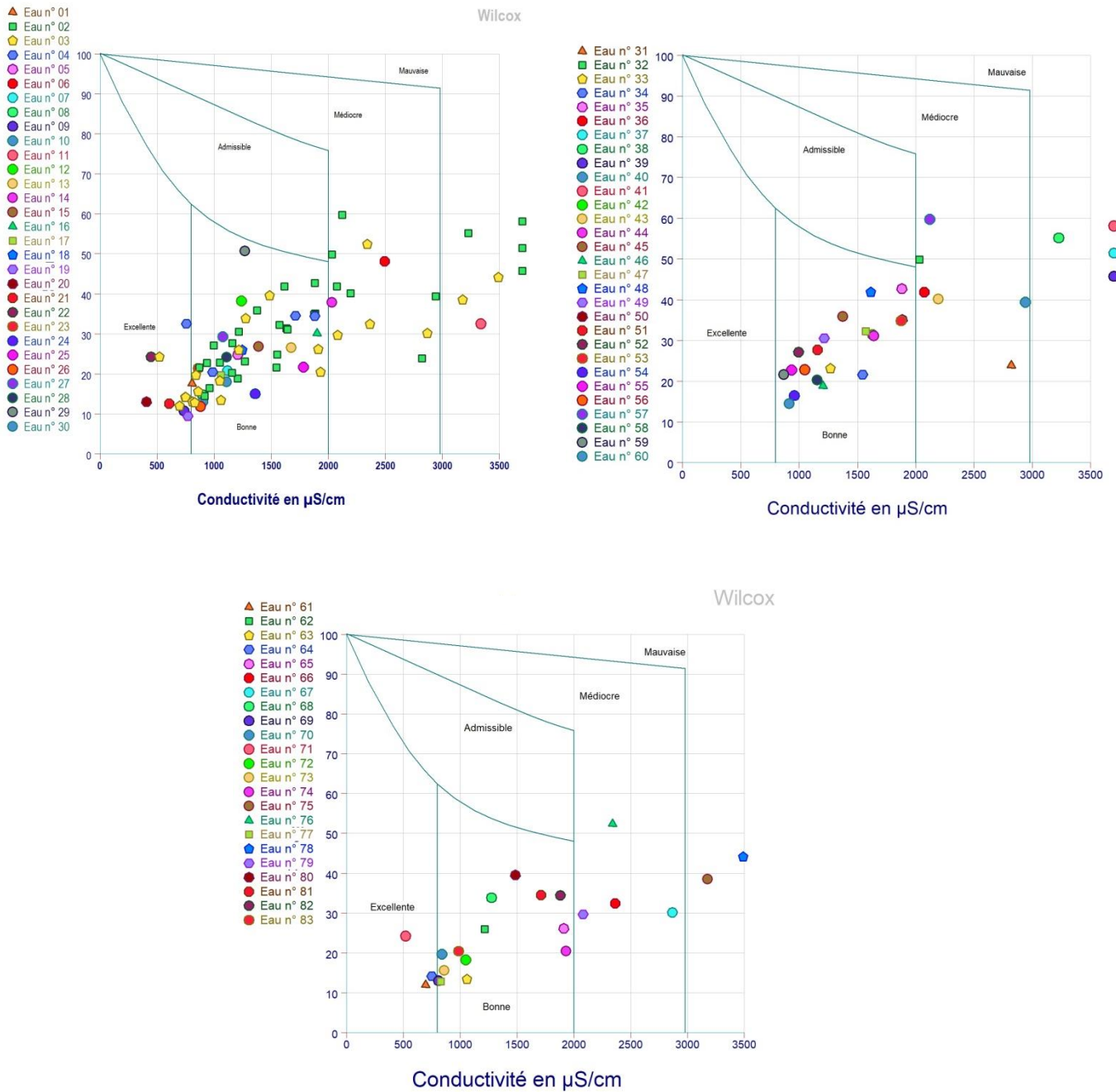


Figure IV .49. Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox, (L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire_ Période de Mai 2018).

IV.3.2. 12 Les métaux lourds :

La représentation des données, (période de Mai 2018), des teneurs des métaux lourds des points d'eau du Barrémien et Hauterivien, (Tableau IV.11) en histogrammes, (Figure IV.50), et la comparaison des résultats aux normes (OMS, 2008 ; NA 6360,1992 ; Ayers and Westcot, 1994) montrent des anomalies de pollution de ces eaux par le Plomb (Pb),

Manganèse (Mn) et Chrome (Cr), dû principalement à la minéralisation plombo-zincifère de la région d'étude.

Tableau IV. 11. Les teneurs des métaux lourds des eaux Hauteriviennes et Barrémiennes du gisement de Chaabet –el- Hamra en mg/l, (période de Mai 2018).

L'aquifère	Métal (mg/L)	Al	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb
Hauterivien	CH1	0	0,01	0	0,61	0	0,99	0,76
	CH2		0		0		1,01	1,10
	CH4		0		0		1,04	1,25
Barrémien	CH17		0,01	0,64	1,06		1,10	
	CH19		0,23	0,18	1,02		0	
	CH20		0	0,08	0		1,02	0
	CH21			0,1	0		1,06	1,15
	CH22			0,15			1,05	0
	CH23			0,01			0,08	1,05
	Afounes	0	0	0	1,08	1,23		
mine KHY	0,011		0,008	0,08	1,08	1,40		

La concentration moyenne de Pb était de 0,76 mg/L avec une concentration maximale de 1,4 mg/L et une concentration minimale de 0,00 mg/ (elle varie entre 0,76 et 1,25 mg/l dans l'aquifère Hauterivien, et entre 0,0 et 1,4 mg/l pour les eaux Barrémiennes). La valeur moyenne du Pb de la zone d'étude était beaucoup plus élevée que les limites admissibles des normes OMS, (0,01 mg/L), et algériennes (0,05 mg/L). La valeur maximale du Pb, (1,41 mg/L), était presque 141 et 28 fois supérieure aux valeurs limites recommandées respectivement par l'OMS et les normes algériennes.

Quant au Manganèse, les valeurs dans les eaux souterraines de la zone d'étude varient entre 0,00 et 0,64 mg / L avec une concentration moyenne de 0,131 mg / L, (de 0,0 et 0,61 mg/l pour l'aquifère Hauterivien, et les eaux du Barrémien enregistrent une teneur minimale 0,0 et maximale 0,64 mg/l). Par rapport à la valeur recommandée par l'OMS, (0,4 mg / L) et, aux normes algériennes (0,5 mg / L), certains échantillons d'eau ont montré une concentration de Mn plus élevée.

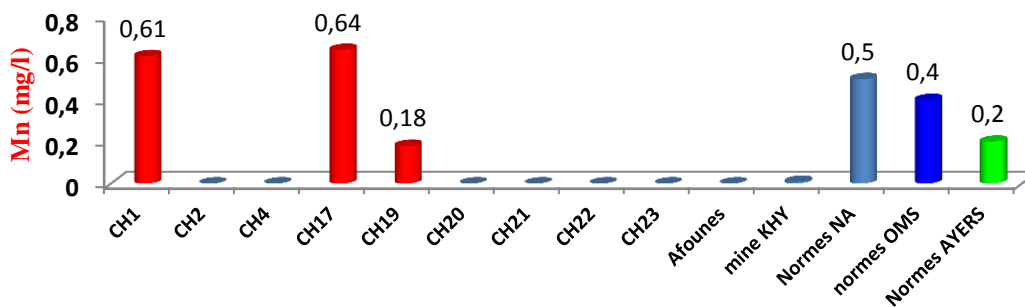
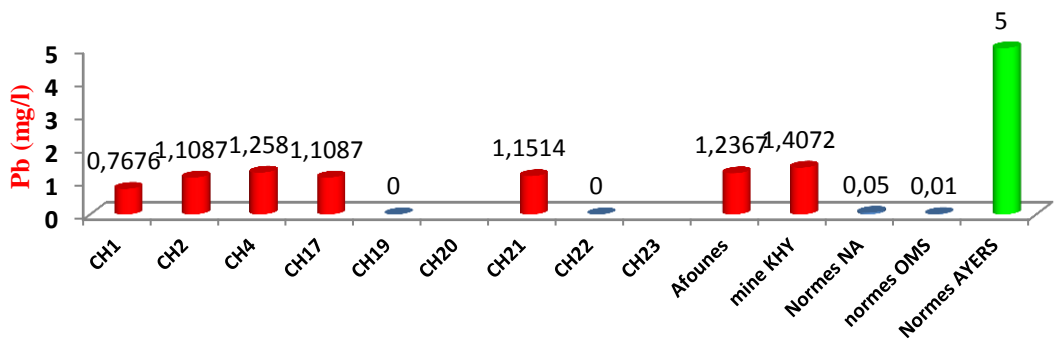
La plupart des sites de la zone d'étude n'ont montré aucune concentration de Zn dans les eaux souterraines. La plage de concentration de Zn observée dans les eaux souterraines de la zone d'étude était de 0,00 à 0,08 mg/L avec une valeur moyenne de 0,007 mg/L. La

concentration de Zn dans les échantillons d'eau souterraine était inférieure aux valeurs limites fixées par l'OMS, (3 mg/L), et les normes algériennes, (5 mg/L). À partir de maintenant, il n'y a pas de problème sérieux de contamination par le Zn dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

La forte teneur en Cr est enregistrée dans l'aquifère Barrémien avec une valeur de 0,23 mg/l, tandis qu'il varie entre 0,0 et 0,01 mg/l dans les eaux Hauteriviennes.

Les résultats ont montré une faible concentration de Fe dans les échantillons d'eau souterraine avec une concentration moyenne de 0,038 mg / L. Tous les échantillons d'eau contiennent des teneurs de Fe inférieures à ses limites. Donc, pas d'eau contaminée par Fe dans le district.

La concentration moyenne de Cu dans les eaux souterraines était de 1,04 mg/L avec une plage de 0,99 à 1,08 mg/L. Toutes les valeurs de Cu étaient inférieures aux limites admissibles de Cu (2 mg/L) dans l'eau potable. Par conséquent, on peut dire qu'il existe un très faible risque de concentration de Cu dans les eaux souterraines.



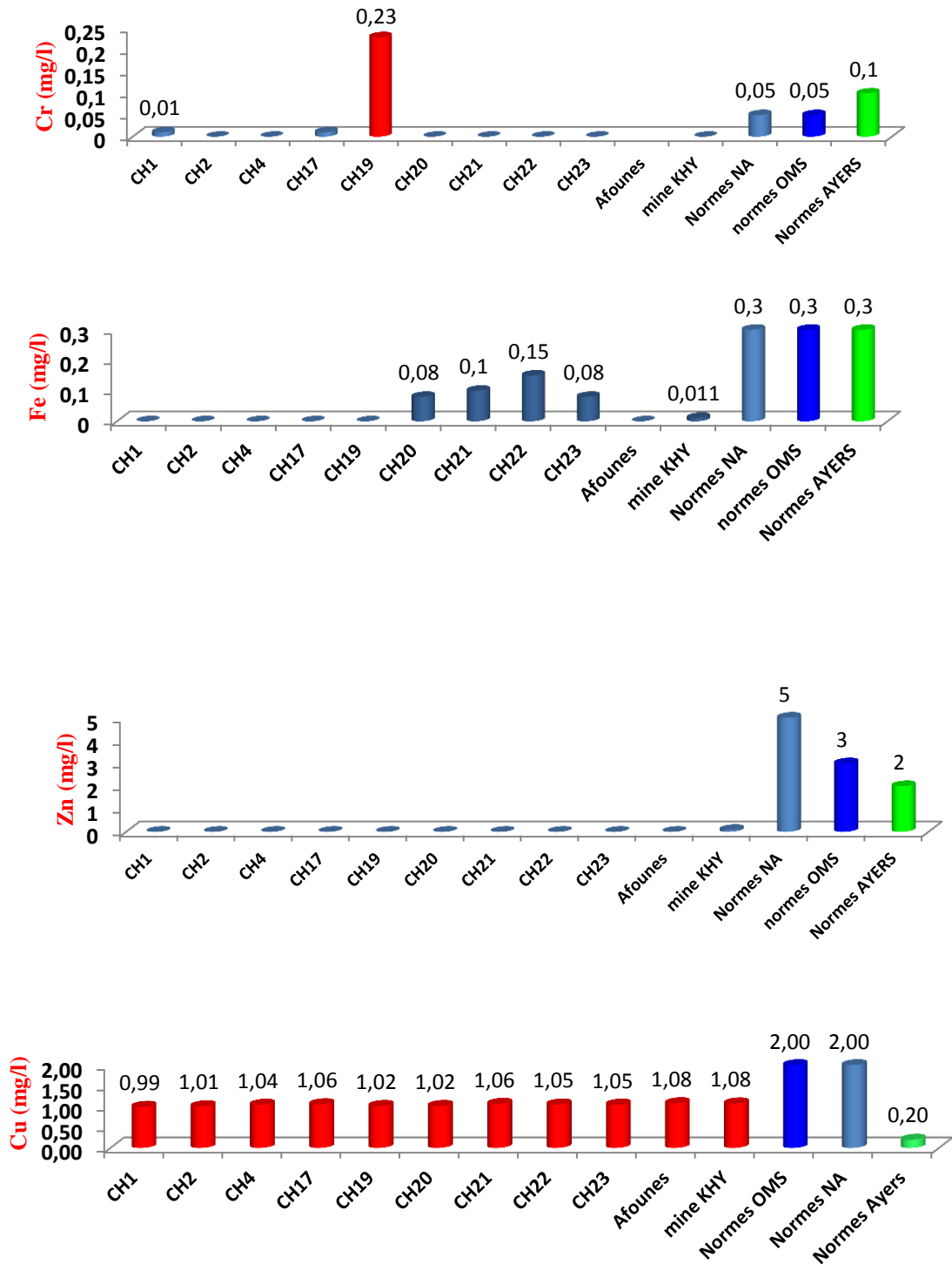


Figure IV. 50. Histogrammes des teneurs des métaux lourds dans l'aquifère Barrémien et Hauterivien, (Période de Mai 2018).

IV.3.2.13 Estimation des indices d'évaluation de la pollution

Pour comprendre la qualité globale de l'eau des deux aquifères du Crétacé inférieur, (Hauterivien et Barrémien), par rapport aux métaux lourds sélectionnés, (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu

et Pb), l'indice de pollution par les métaux lourds (HPI), l'indice d'évaluation des métaux lourds (HEI) et le degré de contamination (Cd) ont été utilisés.

A. Indice de pollution par les métaux lourds (HPI : Heavy metal pollution index)

L'indice de pollution par les métaux lourds (HPI) est une technique d'évaluation qui fournit l'influence des métaux lourds sur la qualité globale de l'eau, (A. K. Tiwari et al. 2015). Il représente la qualité totale de l'eau par rapport au métal lourd, (T. K. Boateng et al. 2019).

L'HPI était inversement proportionnel à la norme du métal lourd résultant, (R. K. Horton, 1965). La valeur de l'indice de pollution critique est de 100. La moyenne arithmétique pondérée des concentrations a été utilisée pour calculer les valeurs de l'IPH à l'aide de l'Eq.9 donnée par S.V Mohan et al. (1996).

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \dots\dots\dots (Eq.9)$$

Où:

n: est le nombre de paramètres pris en compte,

W_i: est la pondération unitaire définie comme la valeur réciproque de S_i,

Q_i : est le sous-indice de chaque paramètre, et calculé par Eq.10.

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - I_i|}{S_i - I_i} \times 100 \dots\dots\dots (Eq.10)$$

Où:

M_i : est la valeur mesurée des métaux lourds,

I_i: est la valeur maximale souhaitable,

S_i: est la valeur standard du chaque paramètre en µg/L

Le signe (-) indique la différence numérique des deux valeurs, ignorant le signe algébrique.

La première limite de concentration est la valeur permissive la plus élevée pour l'eau potable (S_i), telle que spécifiée par les normes Algériennes.

La deuxième limite de concentration est la valeur maximale souhaitable (Ii) telle que définie par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Afin de calculer l'HPI des eaux souterraines, les valeurs de concentration des métaux sélectionnés, (Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn), de chaque échantillon ont été prises en compte.

Les valeurs de l'HPI se situent entre 0,00 et 68,79, (moyenne de 11,47). Les valeurs les plus élevées de l'HPI ont été trouvées à CH19 (68,79), (**Tableau IV.12**).

La valeur plus élevée de l'HPI peut être attribuée à l'altération des roches et à la minéralisation des mines. Cependant, les résultats de l'HPI suggèrent que tous les échantillons d'eau étaient inférieurs à la limite critique de 100 pour l'eau potable, ([B. Prasad et J. Bose, 2001](#)).

Tableau IV.12. Les valeurs de l'HPI estimées.

L'aquifère	Hauterivien			Barrémien							
Le forage	CH1	CH2	CH4	CH17	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	Afounes	KHY
HPI	19.69	0.00	0.00	20.53	68.79	0.61	0.76	1.14	14.35	0.00	0.31

B. Indice d'évaluation des métaux lourds (HEI : Heavy metal evaluation index)

L'HEI a été calculé selon Eq.13. Il offre de l'information sur la qualité globale de l'eau par rapport aux métaux lourds ([Edet et Offiong, 2002](#)).

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{Hc}{Hmac} \dots\dots\dots (Eq.13)$$

Où:

Hmac: la concentration maximale admissible du chaque paramètre,

Hc : valeur mesurée du chaque paramètre.

L'indice calculé d'évaluation des métaux lourds (HEI) pour cette étude donne une moyenne de 76,8 avec des valeurs minimales et maximales de 0,77 et 141,8 respectivement (**Tableau IV.13**).

Les critères proposés pour l'indice d'évaluation des métaux lourds sont classés comme faibles (HEI<10), moyens (HEI = 10 -20) et élevés (HEI>20), ([A. E. Edet et O. E. Offiong 2002](#)).

Sur cette base, 4 emplacements qui représentent 36,36% de tous les emplacements avaient de faibles valeurs de HEI, tandis que 7 emplacements couvrant 63,63% des échantillons d'eau avaient une valeur élevée de HEI dans cette étude.

Tableau IV.13. Les valeurs de l'HEI estimées.

L'aquifère	Hauterivien			Barrémien							
	CH1	CH2	CH4	CH17	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	Afounes	KHY
HEI	85.66	109.37	126.32	124.40	8.71	0.77	116.01	1.03	0.79	124.21	141.48

C. Degré de contamination (C_d : Degree of contamination)

Le degré de contamination (C_d) a été largement utilisé comme méthode de référence pour estimer l'étendue de la pollution par les métaux lourds dans les échantillons d'eau, (B. Rubio et al.2000).

Il tient en compte à la fois du nombre de paramètres qui dépassent les limites supérieures admissibles ou les valeurs guides des éléments potentiellement nocifs et de la concentration dépassant ces valeurs limites, (B. Backman et al., 1998). Cet indice a été considéré comme un indice de toxication pour les consommateurs et a été déterminé par la formule suivante :

$$Cd = \sum_{i=1}^n \left[\frac{CAi}{CNI} - 1 \right] \dots\dots\dots(Eq.14)$$

Où:

CAi: la valeur mesurée de chaque métal;

CNi: concentration maximale admissible du chaque métal (OMS 2008).

Les valeurs du C_d dans les échantillons d'eau de la zone d'étude variaient de -5,21 à 135,48 (moyenne de 72,52), comme indiqué dans le tableau IV.14.

Selon B. Backman et al. (1998), le degré de contamination des échantillons d'eau peut être classé comme élevé si tous les échantillons ont enregistré des valeurs de C_d supérieures à 3.

Dans la zone d'étude, seuls 3 échantillons, (CH20, CH22 et CH23) qui représentent 27,27% du total des échantillons analysés ont des valeurs de Cd inférieures à 1, (-1,23, -4,98,

-5,21 respectivement), qui indiquent une statue de faible contamination pour ces échantillons d'eau. Inversement, tout le reste des échantillons qui représentent 72,72% du total des échantillons analysés ont des valeurs de C_d supérieures aux valeurs maximales de 3, indiquant une contamination élevée dans ces échantillons. Cela a révélé que le plus grand pourcentage de la zone d'étude possède une menace de contamination en termes du métal toxique lourd dissous dans les eaux souterraines.

Tableau IV.14. Les valeurs du C_d estimées.

L'aquifère	Hauterivien			Barrémien							
Le forage	CH1	CH2	CH4	CH17	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	Afounes	KHY
C_d	89.66	111.37	124.32	120.40	5.71	-1.23	110.01	-4.98	-5.21	118.21	135.48

IV.3.2.14 Paramètres d'évaluation des risques pour la santé

Selon [J. S. Lee et al. \(2005\)](#), l'évaluation des risques pour la santé comprend la dose-réponse, l'évaluation de l'exposition, l'identification des dangers et la caractérisation des risques.

A. ADD de métal lourd (ADD : The average daily dose)

La dose quotidienne moyenne (ADD) de chaque métal lourd, (Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn), a été calculée par [W. Siriwong \(2006\)](#), d'après Eq.15.

$$ADD_i = \frac{C_i \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \dots\dots\dots (Eq.15)$$

Où:

- **C_i**: La teneur de métaux lourds (mg/L) dans les échantillons d'eau,
- **IR**: Taux d'ingestion d'eau en une journée (2,2 L / jour),
- **ED**: Durée d'exposition aux eaux souterraines (70 ans),
- **EF**: Fréquence d'exposition aux eaux souterraines (365 jours/an),
- **BW**: Poids corporel des individus locaux (70 Kg),
- **AT**: Espérance de vie moyenne (70 ans).

Les valeurs moyennes du ADD (**Tableau IV.15**) pour les eaux souterraines du territoire de Ain- Azel différaient pour différents métaux par ordre décroissant de Cu (10,86) > Pb (7,62) > Mn (1,36) > Fe (0,4) > Cr (0,24) > Zn (0,08).

Tableau IV.15. Les valeurs du ADD estimées.

Métal	Paramètre	Statistiques	La valeur calculée dans la zone d'étude
Cr	ADD	Interval	0 - 2.4
		Moyenne	0.24
Fe		Interval	0 – 1.56
		Moyenne	0.4
Mn		Interval	0 - 6.67
		Moyenne	1.36
Zn		Interval	0 – 0.83
		Moyenne	0.08
Pb		Interval	0 – 14.68
		Moyenne	7.62
Cu	Interval	10.36 – 11.27	
	Moyenne	10.86	

B. HQ du métal lourd (HQ : The Hazard Quotient)

Le quotient de danger (QG) de Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn pour les eaux souterraines d'Ain Azel a été estimé à l'aide de l'Eq.16 (R. A. Tabassum et al. 2019b).

$$HQ = \frac{ADD}{RFD} \dots\dots\dots (Eq.16)$$

Où:

- RFD (Reference Dose: Dose de référence) indique la dose orale de référence des métaux lourds (USEPA IRIS, 2011 ; P. Wongsasuluk et al., 2014).

L'eau dont la valeur HQ est inférieure à 1 est considérée comme non-toxique à utiliser pour la consommation en ce qui concerne la teneur en métaux lourds, (S. Khalid et al. 2020).

Contrairement aux valeurs du DDA, une valeur de HQ élevée a été observée pour le Pb et le Cu dans les eaux souterraines de la zone d'étude, (Tableau IV.16).

Tableau IV.16. Les valeurs du HQ estimées.

Métal	Paramètre	Statistiques	La valeur calculée dans la zone d'étude
Cr	HQ	Interval	0 - 0.016
		Moyenne	0.0016
Fe		Interval	0 – 0.0223
		Moyenne	0.0057
Mn		Interval	0 – 0.476
		Moyenne	0.0974
Zn		Interval	0 – 0.027
		Moyenne	0.0025
Pb		Interval	0 – 41.92
		Moyenne	21.77
Cu	Interval	2.59 – 2.81	
	Moyenne	2.71	

C. CR du métal lourd (CR: The Cancer Risk)

Le risque de cancer (RC) a été estimé à l'aide de l'équation suivante, (Tabassum et al. 2019b).

$$RC = ADD \times OSF \dots\dots\dots (Eq.17).$$

Où:

OSF indique les valeurs du facteur orale pour chaque métal lourd (USEPA, 2011).

Tableau IV.17. Les valeurs du CR estimées.

Métal	Paramètre	Statistiques	La valeur calculée dans la zone d'étude
Cr	CR	Interval	0 – 1.199
		moyenne	0.119
Pb		Interval	0 – 0.125
		moyenne	0.065

Le risque de cancer (RC) n'a été calculé que pour le Pb et le Cr, (Tableau IV. 17), tandis que les autres métaux Zn, Mn, Fe et Cu sont considérés comme non –cancérogènes, (OMS 2008).

Les valeurs élevées de DDA, HQ et CR pour les échantillons d'eau des deux aquifères Hauterivien et Barrémien de la zone d'étude, prédisaient des risques possibles pour la santé de la population locale en buvant ces eaux souterraines riches en métaux.

IV.3.2.15 Analyse statistique multi-variée

Cette étude a été réalisée en utilisant les teneurs des métaux lourds (Cu, Pb, Zn, Cr, Fe et Mn), les paramètres physicochimiques, (pH, TDS, EC, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻), et les indices d'évaluation de la pollution d'échantillons d'eau souterraine.

Les coefficients de corrélation, (Tableau IV. 18), entre Cr et Mn (r = 0,12), Fe et Cu (r = 0,15), Mn et Pb (r = 0,09), Zn et Pb (r = 0,37), Zn et Cu (r = 0,4), Pb et Cu (r = 0,42).

Afin d'établir les dispositions des données sur les concentrations de métaux lourds et les paramètres physicochimiques des échantillons d'eau souterraine, la carte factorielle, (Figure IV. 51), a été établie.

Tableau IV. 18. Coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds pour les échantillons d'eau souterraine.

	Cr	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu
Cr	1					
Fe	-0.26	1				
Mn	0.12	-0.41	1			
Zn	-0.11	-0.17	-0.16	1		
Pb	-0.40	-0.55	0.09	0.37	1	
Cu	-0.31	0.16	-0.32	0.40	0.43	1

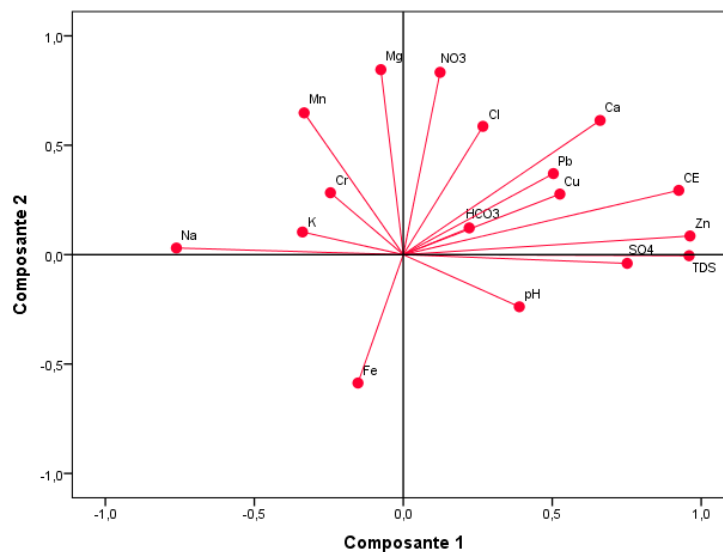


Figure IV. 51. Carte factorielle montrant le regroupement de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Cette carte montre qu'il n'y a pas de séparation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines. Subséquemment, certaines concentrations de métaux lourds dans les eaux souterraines correspondent aux caractéristiques physico-chimiques.

Ceci a été établi par la matrice de corrélation de Pearson, (Tableau IV. 19), qui a montré une corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines : K^+ et Fe ($r = 0,54$), Mg^{2+} et Cu ($r = 0,51$), Ca^{2+} et Zn ($r = 0,71$), NO_3^- et Mn ($r = 0,61$), HCO_3^- et Cu ($r = 0,51$), TDS et Zn ($r = 0,96$), CE et Zn ($r = 0,96$).

La matrice de corrélation réalisée entre les métaux lourds et les indices de pollution calculés, (Tableau IV.20), a révélé une forte corrélation positive significative entre HPI et Cr

($r = 0,94$), tandis que HEI et C_d sont fortement et significativement corrélés avec Pb ($r = 0,99$).

Tableau IV. 19. Les coefficients de corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques pour les échantillons d'eau souterraine.

	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	CE	pH	Cr	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu
K ⁺	1.00																
Na ⁺	0.71	1.00															
Mg ²⁺	0.43	0.18	1.00														
Ca ²⁺	-0.01	-0.33	0.46	1.00													
NO ₃ ⁻	0.04	-0.13	0.69	0.50	1.00												
Cl ⁻	0.25	-0.05	0.33	0.64	0.45	1.00											
SO ₄ ²⁻	-0.02	-0.31	-0.23	0.67	0.09	0.49	1.00										
HCO ₃ ⁻	0.08	-0.17	0.38	0.01	0.05	-0.10	-0.29	1.00									
TDS	-0.22	-0.62	-0.06	0.68	0.09	0.28	0.81	0.09	1.00								
CE	-0.34	-0.66	0.12	0.78	0.35	0.46	0.72	0.24	0.89	1.00							
pH	0.12	-0.17	0.00	-0.08	-0.10	-0.06	0.09	0.63	0.36	0.37	1.00						
Cr	0.05	0.31	0.01	0.27	-0.05	0.50	0.12	-0.43	-0.23	-0.04	-0.35	1.00					
Fe	0.54	0.46	-0.37	-0.33	-0.35	-0.25	0.22	-0.12	-0.09	-0.34	0.09	-0.26	1.00				
Mn	-0.15	0.24	0.39	0.05	0.61	0.16	-0.28	-0.02	-0.30	-0.02	-0.23	0.12	-0.41	1.00			
Zn	-0.33	-0.67	-0.08	0.71	0.22	0.38	0.84	0.08	0.96	0.96	0.36	-0.11	-0.17	-0.16	1.00		
Pb	-0.51	-0.67	0.37	0.44	0.35	-0.14	-0.04	0.45	0.39	0.49	-0.04	-0.40	-0.55	0.09	0.37	1.00	
Cu	0.40	-0.15	0.51	0.59	0.27	0.28	0.37	0.51	0.49	0.46	0.23	-0.31	0.16	-0.32	0.40	0.43	1.00

Le tableau montre également qu'il existe une forte corrélation positive et significative entre les indices HEI et C_d ($r = 0,99$).

Cette corrélation indique que la quantité de Cr et de Pb a contribué de manière significative à la concentration de métaux lourds dans les différents échantillons analysés que les autres métaux. En outre, ils sont responsables aux valeurs élevés de HPI, HEI et C_d obtenus dans cette étude.

Par conséquent, cela indique qu'il y a une pollution au Plomb et au Chrome dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

Tableau IV.20. Matrice de Corrélation entre les métaux lourds et les indices de pollution analysés et évalués dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

	Cr	Fe	Mn	Zn	Pb	Cu	HPI	HEI	Cd
Cr	1.00								
Fe	-0.26	1.00							
Mn	0.12	-0.41	1.00						
Zn	-0.11	-0.17	-0.16	1.00					
Pb	-0.40	-0.55	0.09	0.37	1.00				
Cu	-0.31	0.16	-0.32	0.40	0.43	1.00			
HPI	0.94	-0.30	0.41	-0.18	-0.43	-0.38	1.00		
HEI	-0.36	-0.58	0.18	0.36	0.99	0.39	-0.37	1.00	
Cd	-0.36	-0.59	0.18	0.35	0.99	0.37	-0.37	0.99	1.00

IV.4. Conclusion

Les résultats des analyses chimiques des eaux Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire et la classification de Piper, nous ont permis de déterminer trois faciès chimiques où le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien est prédominant.

- 1 Faciès bicarbonaté calcique et magnésien, (CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6 de l'Hauterivien et CH22, Afounes du Barrémien) ;
- 2 Faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique touche seulement les points 32, 76, 38, 41 et 57 du, Mio- Plio-Quaternaire ;
- 3 Faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, (CH16, CH17, CH19, CH20, CH21, mine KHY du Barrémien et tout le reste des points du Mio-Plio-Quaternaire).

Le diagramme de Gibbs montre que l'altération des roches contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes, Par contre, et pour certains points de l'aquifère Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire, l'évaporation est la responsable de la chimie des ions majeurs.

La comparaison des analyses physico-chimiques avec les normes OMS, NA et Ayers and Westcot montre la potabilité et l'aptitude des eaux Hauteriviennes à l'irrigation.

Vu l'élévation des concentrations de certains éléments chimiques, qui dépassent les normes OMS, NA et Ayers and Westcot, certains points d'eau du Barrémienn et du Mio-Plio-Quaternaire sont non potables et inaptes à l'irrigation.

La classification des eaux Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire à l'irrigation en se basant sur les valeurs du SSP et RSC, montre que tous les points d'eau sont de bonne qualité. Les valeurs du MH et KR confirment que ces eaux sont aptes à l'irrigation sans traitement.

L'analyse des métaux lourds des eaux Hauteriviennes et Barrémiennes et la comparaison entre les résultats des deux campagnes d'échantillonnage (Avril 2012 et Mai 2018) ont montré une évaluation de contamination métallique par la présence de certaines concentrations élevées en métaux lourds (Pb, Mn, Cr) de ces eaux.

De plus, l'utilisation des indices d'évaluation de la pollution HPI, HEI et C_d en se basant sur l'analyse des Cr, Fe, Mn, Zn, Cu et Pb découvre :

- Les valeurs de l'HPI se situent entre 0,00 et 68,79, (moyenne de 11,47). Les valeurs les plus élevées de l'HPI ont été trouvées à CH19 (68,79) ;
- La valeur plus élevée de l'HPI peut être attribuée à l'altération des roches et à la minéralisation des mines. Cependant, les résultats de l'HPI suggèrent que tous les échantillons d'eau étaient inférieurs à la limite critique de 100 pour l'eau potable ;
- L'indice calculé d'évaluation des métaux lourds (HEI) pour cette étude donne une moyenne de 76,8 avec des valeurs minimales et maximales de 0,77 et 141,8 respectivement, ce qui exprime que 63,63% des échantillons d'eau avaient une valeur élevée de HEI;
- Un taux de 72,72% du total des échantillons analysés ont des valeurs de C_d supérieures aux valeurs maximales de 3, indiquant une contamination élevée dans ces échantillons. Cela a révélé que le plus grand pourcentage de la zone d'étude possède une menace de contamination toxique et en termes du métal lourd dissous dans les eaux souterraines.

Aussi, l'emploi des paramètres d'évaluation des risques pour la santé montre :

- Les valeurs moyennes du ADD pour les eaux souterraines du territoire de Ain Azel différaient pour différents métaux par ordre décroissant de Cu (10,86) > Pb (7,62) > Mn (1,36) > Fe (0,4) > Cr (0,24) > Zn (0,08) ;
- Une valeur de HQ élevée a été observée pour le Pb (moyenne =21.77) et le Cu (moyenne =2.71) dans les eaux souterraines de la zone d'étude. Ces valeurs sont supérieures à 1 et considérées les eaux souterraines de la zone d'étude comme toxique à utiliser pour la consommation en ce qui concerne la teneur en métaux lourds.
- Le risque de cancer (RC) pour le Cr varie entre 0 et 1.199 avec une moyenne de 0.119 tandis qu'il fait une moyenne de 0.065 pour le Pb entre une valeur maximale de 0.125 et minimale de 0.

Pareillement, l'analyse statistique multi-variée expose :

- Une connexion impuissante entre les différents métaux lourds. Ces connexions faibles voir négatives ont traduit la source non identique pour les ions en relation.

- La matrice de corrélation de Pearson réalisée entre les métaux lourds et les paramètres physico-chimiques a montré une corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.
- La matrice de corrélation réalisée entre les métaux lourds et les indices de pollution calculés a révélé une forte corrélation positive significative entre HPI et Cr ($r = 0,94$), tandis que HEI et C_d sont fortement et significativement corrélés avec Pb ($r = 0,99$).
- Une forte corrélation positive et significative entre les indices HEI et C_d ($r = 0,99$) indique que les concentrations de Cr et de Pb ont contribué de manière significative à la concentration de métaux lourds dans les différents échantillons analysés que les autres métaux. En outre, ils sont responsables aux valeurs élevées de HPI, HEI et C_d obtenus dans cette étude.
- Par conséquent, cela indique qu'il y a une pollution au Plomb et au Chrome dans les eaux souterraines de la zone d'étude.



CONCLUSION

GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a été réalisé principalement en contexte minier et concerne les aquifères du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Ain- Azel, Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet- el- Hamra, au Sud de Sétif, à l'Est Algérien.

L'étude géologique de la plaine de Ain- Azel dont le gisement de Chaabet- el- Hamra consiste en une synthèse des travaux déjà réalisés.

Cette mine qui appartient au para-autochtone et autochtone Hodnéen des zones externes du tronçon Nord oriental de la chaîne des Maghrébides, occupe le Sud-Ouest de la terminaison périclinale de la grande structure en Horst anticlinal de Rahbet du district minier de Dj. Fourhal. Elle est constituée essentiellement par des formations sédimentaires de Crétacé inférieur recouvertes par du Miocène discordant. Il s'agit des dolomies gréseuses et argileuses, des argiles, des marnes et des calcaires. Elle se caractérise par une tectonique de type cassante représentée par des failles normales qui perturbent la lithologie du secteur.

Des cartes regroupant les principaux faciès géologiques de la plaine de Ain- Azel ainsi que ceux du gisement ont été produites à partir des cartes géologique du gisement de Chaabet- el- Hamra, de Ain- Azel et de Ain- Lahdjar.

L'étude hydroclimatique a révélé que le climat est de type semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles de 365mm et des T° moyennes annuelles de 14,62°C.

L'excédent est évalué à 32,57 mm selon le bilan hydrologique de Thornthwaite.

Vu les valeurs estimées de l'ETP et l'ETR, l'infiltration est très faible, (3,07%).

L'étude hydrogéologique de la plaine de Ain-Azel montre que la région est caractérisée par une nappe superficielle d'âge Mio-Plio-Quaternaire, et du gisement de Chaabet- el- Hamra par un aquifère d'âge Hauterivien à perméabilité de fissure dans sa partie centrale, et qui est localisé dans des formations carbonatées sous forme des dolomies fissurées hématitisées et parfois cavernueuses, et un aquifère d'âge Barrémien localisé dans la partie Nord-Ouest du gisement et associé aux grès et dolomies gréseuses.

Les deux cartes piézométriques élaborées à partir des campagnes de Juin 2015 et Mai 2016 ne montrent pas une différence. Il s'agit d'un sens d'écoulement général vers le centre de la plaine de Ain- Azel, mais la comparaison entre les cotes piézométriques des deux périodes, (Juin 2015 et Mai 2016), indique un rabattement de 0,5m en moyenne.

Au niveau du gisement de Chaabet- el- Hamra, les courbes piézométriques sont serrées au début puis elles deviennent espacées dans le sens d'écoulement, reflétant une zone d'accumulation.

Les cartes piézométriques traitées permettent l'estimation des gradients hydrauliques variant entre 1,83 et 6,39% pour la période du Juin 2015 et entre 1,75 à 8,64% pour la période de mois de Mai 2015.

Les valeurs du gradient hydraulique sont relativement différentes. Cette variation est due à l'hétérogénéité des formations, donc à la perméabilité.

L'étude hydrodynamique révèle que la transmissivité au niveau de l'aquifère Hauterivien est de l'ordre de $1,48 \cdot 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$, $1,66 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ pour l'aquifère Barrémien et de $3,16 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ et $2,14 \cdot 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$.

L'étude hydrogéochimique, (Avril 2012 et Mai 2018), des eaux de forages de l'aquifère Hauterivien montre que ce dernier est caractérisé par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien pour l'aquifère Barrémien, et la majeure partie de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.

Le diagramme de Gibbs montre que l'altération des roches, (carbonatées surtout), contrôlait principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines Hauteriviennes. Par contre, et pour certains points de l'aquifère Barrémien et Mio-Plio-Quaternaire, l'évaporation des affleurements triasiques existants dans les bordures est la responsable de la chimie des ions majeurs.

En se référant aux normes internationales et locales, et vu les caractéristiques physico-chimiques, les eaux captées de l'Hauterivien sont propres à la consommation, tandis que certains points d'eau du Barrémien et du Mio-Plio-Quaternaire sont impropres.

L'analyse en composante principale (ACP) appliquée aux eaux souterraines de la région de Ain-Azel, dans le Sud de Sétif, apparaît que la forte corrélation entre les éléments chimiques exprime la même origine.

La classification des eaux Hauteriviennes, Barrémiennes et du Mio-Plio-Quaternaire à l'irrigation en se basant sur les valeurs du SSP et RSC, tous les points d'eau sont de bonne qualité. Aussi, les valeurs du MH et KR confirment que ces eaux sont aptes à l'irrigation sans traitement.

La pollution par les métaux lourds (Pb, Mn, Cr) de l'aquifère Barrémien et Hauterivien est très inquiétante et impose une réaction urgente pour rechercher et appliquer des solutions adéquates.

De plus et pour affirmation de cette inquiétude, l'utilisation des indices d'évaluation de la pollution HPI (*Heavy metal pollution index*), HEI (*Heavy Metal Evaluation Index*) et C_d (*Degree of Contamination*), en se basant sur l'analyse des Cr, Fe, Mn, Zn, Cu et Pb nous faisons apparaître:

1 les résultats de l'HPI déterminent que tous les échantillons d'eau étaient inférieurs à la limite critique de 100 pour l'eau potable ;

2 L'indice d'évaluation des métaux lourds (HEI) calculé pour cette étude exprime que 63,63% des échantillons d'eau avaient une valeur élevée de HEI;

3 Un taux de 72,72% du total des échantillons analysés ont des valeurs de C_d supérieures aux valeurs maximales de 3, indiquant une contamination élevée dans ces échantillons. Cela a révélé que le plus grand pourcentage de la zone d'étude détient une menace de contamination toxique et en termes du métal lourd dissous dans les eaux souterraines.

Aussi, L'emploi des Paramètres d'évaluation des risques pour la santé montre que :

4 Les valeurs moyennes du ADD, (*The Average Daily Dose*) pour les eaux souterraines du gisement de Chaabet el Hamra ainsi que de Kherzet Youcef dans le territoire de Ain-Azel différaient pour différents métaux par ordre décroissant de Cu (10,86) > Pb (7,62) > Mn (1,36) > Fe (0,4) > Cr (0,24) > Zn (0,08) ;

5 Une valeur de HQ, (*The Hazard Quotient*) élevée a été observée pour le Pb (moyenne =21.77) et le Cu (moyenne =2.71) dans les eaux souterraines de la zone d'étude. Ces valeurs sont supérieures à 1 et considèrent les eaux souterraines de la zone d'étude comme toxiques à utiliser pour la consommation concernant la teneur en métaux lourds.

6 Le risque de cancer (RC) pour le Cr varie entre 0 et 1.199 avec une moyenne de 0.119, tandis qu'il fait une moyenne de 0.065 pour le Pb entre une valeur maximale de 0.125 et minimale de 0.

Alors, Les valeurs élevées de DDA, HQ et CR pour les échantillons d'eau des deux aquifères Hauterivien et Barrémien de la zone d'étude, prédisaient des risques possibles pour la santé de la population locale en buvant ces eaux souterraines riches en métaux.

Pareillement, l'analyse statistique multi-variée expose :

- 7 Une connexion impuissante entre les différents métaux lourds. Ces connexions faibles voire négatives ont traduit la source non identique pour les ions en relation.
- 8 La matrice de corrélation de Pearson réalisée entre les métaux lourds et les paramètres physico-chimiques a démontré une corrélation entre les concentrations de métaux lourds et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.
- 9 La matrice de corrélation réalisée entre les métaux lourds et les indices de pollution calculés a révélé une forte corrélation positive significative entre HPI et Cr ($r = 0,94$), tandis que HEI et C_d sont fortement et significativement corrélés avec Pb ($r = 0,99$).
- 10 une forte corrélation positive et significative entre les indices HEI et C_d ($r = 0,99$) indique que les concentrations de Cr et de Pb ont contribué de manière significative à la concentration de métaux lourds dans les différents échantillons analysés que les autres métaux. En outre, ils sont responsables aux valeurs élevées de HPI, HEI et C_d obtenues dans cette étude.

Par conséquent, cela indique qu'il y a une pollution au Plomb et au Chrome dans les eaux souterraines de la zone d'étude.



RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adepoju-Bello, A.A, O.O. Ojomolade, G.A. Ayoola and H.A.B. Coker, 2009. Quantitative analysis of some toxic metals in domestic water obtained from Lagos metropolis. *The Nig. J. Pharm.* 42(1): 57-60.
- Aissaoui D. 1984. Les structures liées à l'accident sud atlasique entre Biskra et le Djebel Menâa (Algérie). Évolution géométrique et cinématique. Thèse, 3^e cycle, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 150p.
- Aghazadeh N. and Mogaddam, A. A. 2010. Assessment of ground water quality and its suitability for drinking and agricultural Uses in the Oshnavieh area, northwest of Iran," *Journal of Environmental Protection*, Vol. 1 No. 1, 2010, pp. 30-40. DOI: 10.4236/jep.2010.11005.
- Al Obaidy A. H. M. J, Kadhem A. J, Hamiza N. H, Al Mashhady A. A.M. 2014. Assessment of Ground Water Quality for Drinking and Agricultural Uses in Mouqdadiya District, Diyala, Iraq, *Eng. &Tech.Journal*, Vol. 32 , Part (A), No.12, 2921-2936.
- Al Obaidy A. H. M. J, Al-Sameraiy M. A, Kadhem A. J, Abdul Majeed A. 2010. Evaluation of treated municipal wastewater quality for irrigation, *Journal of Environmental Protection*, 1(3), 216-225. DOI: 10.4236/jep.2010.13026.
- APAH 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21 St Edition, American Public Health Association, Washington D.C.:APHA-AWWA-WEF. ISBN 0875530478.
- Aris Y. 1994. Étude tectonique et microtectonique des séries Jurassiques à Plio-quaternaires du Constantinois central (Algérie Nord-Oriental) : Caractérisation des différentes phases de déformation. Thèse, Univ. Nancy I, 215p.
- Attoucheik L. 2006. Étude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youssef [SETIF] et son impact sur l'environnement, Mémoire de magistère, IST. USTHB, Algérie. Available at : <https://docplayer.fr/87770531-Eau-et-environnement.html>.
- Ayers R. S, Westcot D.W, 1994. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], Water Quality for Agriculture, Irrigation and Drainage, Rome, Italy. Paper no. 29. Rev. 1, M-56. ISBN: 92-5-102263-1.
- Backman B, Bodis D, Lahermo P, Rapant S, Tarvainen T .1998. Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environ Geol* 36:55–64
- Bagnouls F, Gaussen, H. 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie* 66: 193–220.
- Bhardwaj V, Singh D. S .2011. Surface and groundwater quality characterization of Deoria District ganga plain. *J Environ Earth Sci* 63: 383 – 395
- Belhadj M. Z. 2017. Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la Wilaya de Skikda, Thèse de doctorat en hydraulique, université de Biskra, 172 pages.
- Belkhiri L, Boudoukha A, Mouni L, Baouz T. 2010. Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater-A case study: Ain Azel plain [Algeria]. *Geoderma* 159: 390-398.

Bellouche M. A .2018. Les eaux des mines de la région de Ain Azel (Sud Sétifien), caractérisation hydrodynamiques, hydrochimique et l'impact sur l'environnement. Thèse de doctorat en hydrogéologie, université de Constantine, 154 pages.

Bellouche M. A .2016. Schéma hydrogéologique possible de la mine de Kherzet Youssef, Nord Est Algérien, Sciences et Technologie, D, n°44, Revue Semestrielle de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie. pp. 73-80. Available at: <http://revue.umc.edu.dz/index.php/d>.

Bellouche M.A. 1996. L'eau dans les mines et les travaux souterrains : cas de la mine de Kherzet Youssef -Ain Azel, Mémoire de magister en hydrogéologie, Université de Constantine, 134 p.

Belkhiri L. 2005. Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Ain Azel. Wilaya de Sétif Est Algérien, Mémoire de magistère, Université de Batna, Algérie.[2005 Batna].

Bencer S., Boudoukha A., Mouni L. 2016. Multivariate statistical analysis of the groundwater of Ain Djacer area [Eastern of Algeria]. Arab J Geosci 9:248.

Bertraneu J. 1955. Contribution à l'étude des Monts du Hodna : le massif de Boutaleb, Pub. Serv. Géol. Algérie, nouvelle série, Bull. n 04,183p.

Bertraneu J. 1952. Le massif du Boutaleb. Conq. Géol. Intern. XIXe Sess. Alger. Mon. rég. Alger .n°5.

Blowes D.W., Ptacek C.J. 1994. Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings, in: Jambor, J.L., Blowes, D.W. [Eds], The Environmental Geochemistry of Sulphide Mine-Wastes. Mineralogical Association of Canada, Nepean. 22 : 271–292.

Boateng T.K, Opoku F, Akoto O. 2019. Heavy metal contamination assessment of groundwater quality: a case study of Oti landfill site, Kumasi. Applied Water Science (2019) 9:33 <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0915-y>

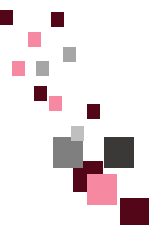
Bouaicha, F. 2018. Le géothermalisme de la region de Guelma, Thèse de doctorat en hydrogéologie, université de Constantine, 191 pages.

Boudoukha A. 1998. Hydrogéologie des hautes plaines Sétifiennes et qualité chimique des eaux souterraines, Thèse de doctorat. Inst. Chimie. Univ. Annaba. 230 pages. Avalaible at : <http://www.secheresse.info/spip.php?article32833>.

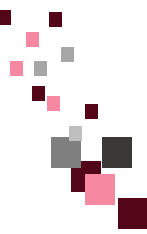
Boudoukha A. 1988. Étude hydrogéologique et modélisation du système aquifère fermé d'El Eulma-Ain- Lahdjar [région Est de Sétif – Algérie], Thèse de Doctorat.Labo. Géologie structurale et appliquée. Univ. Franche comté. France. 186 pages.1vol. (IX-186p.) ; 30cm.

Bouillin J.P. 1977. Géologie alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie). Thèse de doctorat, SC., Paris VI, 551 p.

Bouillin J.P. 1986. Le bassin maghrébin une ancienne limite entre l'Europe etl'Afrique à l'Ouest des Alpes. Bull. Soc. Géol. Fr., (8), t. II, n° 4, pp. 547-558.



- Boutaleb A, Marignac Ch , Pironon J ., Aissa D.E , Lekbal F .2014. Oil-bearing fluid inclusions from Hodna mounts ore deposits (North Eastern - ALGERIA). Asian Current Research On Fluids Inclusions ACROFI 2014, Xi'an, China
- Boutaleb A. 2001. Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna, géologie, pétrographie, micro thermométrie et implications métallogéniques , Thèse de doctorat en géologie minière, USTHB, Alger, 404 pages.
- Bureau D. 1986. Approche sédimentaire de la dynamique structurale : évolution mésozoïque et de venir orogénique de la partie septentrionale du fossé saharien (sud-ouest constantinois et Aurès, Algérie) Thèse d'Etat. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, 441p.
- Bureau D. 1984. Sédimentation contemporaine des basculements des blocs du substratum en domaine épicontinental. Caractères tirés d'un exemple pris autour de Batna, Algérie. 5^{ème} Cong. Europ. De Sédim., p. 84-85.
- Busson G. 1974. Le Trias évaporitique d'Afrique du Nord et d'Europe occidentale : donnée sur la paléogéographie et les conditions de dépôt. Bull. Soc géol, n°6, pp.653- 665.
- Caire A. 1957. Étude géologique de la région de Biban (Algérie). Publi. serv. Carte géol. Algérie. nov. Série., Bull.n°16, 818p.
- Castany G. 1982. Principes et méthode de l'hydrogéologie, Dunod-édit., Paris 236 pages
- Cederstorm D.J. 1946. Genesis of groundwater in the coastal plain of Virginia. Environ Geol 41:218–245.
- Chadi M. 2004. Cadre géologique et structural des séries crétacés néritiques du constantinois (Est- algérien) .Thèse de doct. Univ. Constantine, 197p.
- Chadi M. 1991. Étude géologique de monts de Ain M'Lila (Algérie orientale). Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy1, 191p.
- Coiffait P.E. 1992. Un bassin post- nappes dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord- Orientale). Thèse doct. Univ. Nancy, 505p.
- Cote M. 1998a. Les régions bioclimatiques de l'Est algérien, Rhumel, n° 6, pp. 57-71.
- Dalvie M. A, Cairncross E, Solomon A, London L. 2003. Contamination of rural surface and groundwater by endosulfan in farming areas of the Western cape. South Africa. Environ. Health 10, 2(1):1
- Deleau P. 1938. Les variations brusques de faciès du crétacé inférieur du Djebel Djaffa, C.R Acad. Sc. Paris, t. 206, p121.
- Delfaud J. 1974. Les grands traits de la paléogéographie de l'Algérie septentrionale durant le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur. CR Somm. Soc. Géol.Fr 6,167- 168.
- Demdoum A. 2010. Étude hydrogéochemique et impact de la pollution sur les Eaux de la région d'El Eulma , Thèse de doctorat d'état en hydrogéologie, université de Constantine, 231 pages. Available at: <http://www.bu.umc.edu.dz>theses>sc-terre>DEM 5750>.
- Demdoum A., Djebbar M. 2009. Caractérisation hydrochimique et apport isotopique sur la salinité du bassin d'El Eulma en région sud-Sétifienne, Algérie Nord Orientale, rev .sce. et



tech. Dec 2009 Université Mentouri Constantine. Available at : <http://revue.umc.edu.dz/index.php/d>.

Domenico PA. 1972. Concepts and models in groundwater hydrology. LCCN79168751. McGraw-Hill. New York. 405 pages. Available at : <https://books.google.dz/books?id=g8gYAQAIAAJ>.

Domzig A. et al. 2006. Searching for the Africa–Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (Maradja ‘03 cruise), C. R. Geosciences 338.80-91.

Doneen L .1962. The influence of crop and soil on percolating water. In: Proceeding 1961 biennial conference on groundwater recharge, Berkeley, CA, USA. 26–27 June 1962; pp. 156–163.

DREWS (Direction des Ressources en Eau, Wilaya de Sétif). 2011. Carte schématique descriptive des principales nappes aquifères existantes à travers la région de Sétif.

Durand-Delga M., Fontbote J.M. 1980. Le cadre structural de la Méditerranée occidentale, In : BRGM, Géologie des chaînes alpines. Issues de la Téthys. 26^{ème} Congr. Géol. Int. Paris. 1980. Colloque C5. Mém. 115, Orléan, pp. 67-85.

Durand-Delga M. 1969. Mise au point sur la structure de NE de Berbérie. Publ Serv. Carte géol. Algérie, n°39. pp. 89-131.

Durand-Delga M. 1955. Étude géologique de l’ouest de la chaîne numidique (Algérie). Thèse Sciences Paris et Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2 séries, N° 24, 533p.

Durozoy G. (1960). Étude géologique de la région du Châteaudun Rhumel. Publ. Serv. Géol. Algérie. Bulletin N°22, 456pp.

Eaton FM. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci 69:123–134.

Edet A. E, Offiong O.E .2002. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area Lower Cross River Basin (South-eastern Nigeria). Geo J 57:295–304

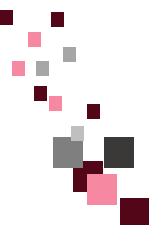
Ehya F, Firouzeh Moghadam Z. 2017. Hydrochemistry and water quality assessment of the Maroon River in Behbahan area, SW Iran. Water Pract Technol 12:818–831. Available at : <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.088>.

ENOF. 2003. Rapport final sur l’hydrogéologie du gisement de Chaabet el Hamra, Rapport interne. 40 pages.

EREM .1992. Rapport final sur les travaux d’évaluation du gisement de Chaabet-El-Hamra avec calcul de réserve, Volume 1. Rapport interne. 130 pages.

Esmaili A. and Moore F. 2012. Hydrogeochemical assessment of groundwater in Isfahan province, Iran. Environ Earth Sci 67:107–120.

Feng Z., Yong L., Huaicheng G. 2007. Application of multivariate statistical methods to water quality assessment of the water courses in Northwestern New Territories, Hong Kong. Environ Monit Assess 132:1–13.



- Ficheur E. 1893. Sur les terrains crétacés du massif du Boutaleb. Bull. Soc. Géol.Fr. p393-427, Paris.
- Ficheur E. 1890. Description géologique de la Kabylie du Djurdjura. Etude spéciale des terrains tertiaires. Thèse Paris. Fontana et Cie. Edit .Alger.
- Flandrin J. 1948. Contribution à l'étude stratigraphique du nummulitique Algérien. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, 2^{ème} sér, stratigr, n°19 ,332 p.
- Geller W., Friese K., Herzsprung P., Kringel R., Schultze M. 2000. Limnology of sulphuric acid mining lakes. II Chemical properties: The main constituents and buffering systems. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie 27: 2475–2479.
- Ghebouli S. 2010. Utilisation des A.C.P et des rapports caractéristiques dans l'explication du chimisme des eaux souterraines- cas de la plaine de Bir Haddada (Sud de Sétif). Sciences et Technologie, D, n°32, Revue Semestrielle de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie. pp. 51-59.
- Guellal S. et al. 1978. Les formations de type péni-tellien dans l'Est de l'Algérie : stratigraphique, faciès, position structurale et paléogéographique. Bull. Soc. p.101- 112, Alger.
- Gibbs R.J.1970. Mechanism controlling world water chemistry.Science 170:1088–1090. DOI: 10. 1126/science.170.3962.1088.
- Glaçon J. 1967. Recherche sur la géologie et les gites métallifères du tell Sétifien, Algérie. Tome 2, bulletin N° 32, Publication du service géologique de l'Algérie.
- Glaçon J. 1958. Les monts du Hodna, partie orientale, XIXème congrès géologique international, Monographie régionale 1, sérié, Algérie N° 7.
- Glangeaud L. 1932. Étude géologique de la région littorale de la province d'Alger. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, 2^e série, n°8,617p.
- Guan X., Liao S., Bai J., Wang F., Li Z., Wen Q., He J., Chen T. 2017. Urban land-use classification by combining high-resolution optical and long-wave infrared images. Geospatial Inform Sci 20: 299–308.
- Guiraud R. et al. 2005. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: an overview, J. African Earth Sci., 43 (1-3), 83-143.
- Guiraud R. 1990. L'évolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines: Thèse Doct. Sci. Univ. Nice, 259 p. Mémoires n03, Publ. de l'ONIG, Alger.
- Guiraud R. 1973. Évolution post-triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse ès Sciences, Université de Nice, 270 p.
- Guiraud R.1971. Aperçu sur les principaux traits du Hodna et des régions voisines, bulletin de service de l'Algérie N° 41, nouvelle série, Publication du service géologique de l'Algérie.



Gowd S.S. 2005. Assessment of ground water quality for drinking and irrigation purpose: a case study of Peddavanka watershed, Anantapur District, Andhra Pradesh, India,” *Environmental Geology*, 48(6): 702–712.

Hamzaoui-Azaza F, Ameer M, Chaouch R, Ben Cheikha L, Gueddari M, Carrillo-Rivera J. 2020. Assessment of groundwater quality based on GIS and geochemical methods: coastal aquifer of Bouficha (North-Eastern Tunisia). *Journal of Coastal Conservation* <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00762-8>

Hem J. D. 1986. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water,” *Water-Supply Paper 2254*, United States Government Printing of fice, Washington, DC.

Horton R. K. 1965. An index number system for rating water quality. *J Water Pollut Control Fed* 37:300–305

Huili Q., Herong G., Lin C., Zhenggao P., Biao L. 2019. Hydrogeochemical characteristics and water quality assessment of shallow groundwater: a case study from Linhuan coal-mining district in northern Anhui Province, China, *IWA Publishing Water Supply* 19(5):1572-1578.

Kada H., Demdoun A. 2020. Assessment of the Hauterivian groundwater quality in zinc mining area for drinking and irrigation uses: Case of Chaabet El Hamra, Algeria. *Journal of Water and Land Development*. No. 46 (VII–IX) p. 131–139. DOI: 10.24425/jwld.2020.134205.

Kada H .2014. Contexte Géologique, Hydrogéologique et Métallogénique du gisement de Zinc de Chaabet El Hamra à Ain Azel – Wilaya de Sétif-, Nord Oriental algérien. Mémoire de magister en Géologie Appliquée et Ressources Minérales, Univ. Setif, 114pages.

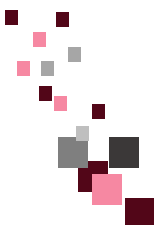
Khaldi A. 1987. Le gisement de Kherzet Youssef ; une minéralisation Pb-Zn-Fe- (Ba) stratiforme dans le membre médian marno-carbonaté du Barrémien de la région de Ain Azel (Hodna, Algérie), Th. Doct; 3 cycle, ENSG Nancy, 439 p.

Khalid. S, Shahid. M, Natasha, Shah A. H, Saeed F, Ali. M, Qaisran S. A, Dumat C. 2020. Heavy metal contamination and exposure risk assessment via drinking groundwater in Vehari, Pakistan, *Environmental Science and Pollution Research* <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10106-6>

Karmegam U., Chidambaram S., Prasanna M.V., Sasidhar P., Manikandan S., Johnsonbabu G.,Dheivanayaki V., Paramaguru P., Manivannan R., Srinivasamoorthy K. 2011. A study on the mixing proportion in groundwater samples by using Piper diagram and Phreeqc model. *Chin. J. Geochem*, 30: 490–495.

Kazi Tani N. 1986. Évolution géodynamique de la bordure Nord-africaine: le domaine intraplaque nord- algérien. Approche megaséquentielle. Thèse ès Sci. Univ. De Pau. 2 tomes, 886 pages.

Kazi Tani N. 1972. The north Sétif allochthonous formation: contribution toward solving certain paleogeographical and structural problems of the tellian area of Algeria. 8th.Arab.Petr.Paper N°88 (8.3).



- Kelly WP. 1940. Permissible composition and concentration of irrigated waters. In: Proceedings of the ASCF, vol. 66. 607pages.
- Kim K. and Yun S.T. 2005. Buffering of sodium concentration by cation exchange in the ground water system of a sandy aquifer,” *Geochemical Journal*, 39(3), 273-284.
- Khoshnam Z , Sarikhani R , Dehnavi A G , Ahmadnejad Z. 2017. Evaluation of Water Quality Using Heavy Metal Index and Multivariate Statistical Analysis in Lorestan Province, Iran. *J Adv. Environ Health Res* (2017) 5:29-37
- Kouassi A.M., Mamadou A., Ahoussi K.E., Biemi J. 2013. Simulation de la conductivité électrique des eaux souterraines en relation avec leurs propriétés géologiques : Cas de la Côte d’Ivoire . *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 21-22: 138-166.
- Lafitte R. 1939. Étude géologique de l’Aurès. Publ. Serv. Carte géol. Bull. n°15, 451p. Alger.
- Lahondère J. C. et al. 1979. Datation des grès numidien d’Algérie orientale, C.R. Acad. Sci .série, d. p.383-386, Paris.
- Lahondère J.C. 1987. Les séries ultra telliennes d’Algérie nord orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Th, doc, d’état-Sc. Nat. Univ. P. Sabatier-Toulouse. 242p.
- Lee J. S, Chon H. T, Kim H. T .2005. Human risk assessment of As, Cd, Cu and Zn in the abandoned metal mine site. *Environ Geochem Health* 27:185–191
- Leikine M. 1971. Étude géologique des Babors occidentaux (Algérie), Thèse Sci Univ. Paris.ronéot, 536p.
- Leikine M. et Velde B. 1974. Les transformations post sédimentaires des minéraux argileux du Sénonien, dans le NE algérien .Existence probable d’un épi métamorphisme anté-éocène .*Bull. Soc .géol. Fr. (7)*, p.177-182,3fig. Paris.
- Leikine M. et Vila J.M. 1975. Microfossiles jurassiques et crétacés des Hautes Plaines Sétifiennes au Djebel Youssef et au Djebel Braou (Algérie) : conséquences structurales .*Revue de Micropaléontologie*, p89-96, Paris.
- Marmi R. 1995. bassins continentaux de l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie nord orientale : Etudes stratigraphiques, sédimentaires, structurales et géochimiques .Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy.283pages.
- Matiatos I, Alexopoulos A, Godelitsas A .2014. Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in North-Eastern Peloponnesus (Greece). *SciTotal Environ* 476 – 477:577 – 590
- Mebarki A. 2005. Hydrologie des bassins de l’Est Algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement, thèse de doctorat, Université de Constantine. 360pages.
- Mezerzi A. 2011. Les formations évaporitiques triasiques des Hautes Plaines Sétifiennes (NE Algérien) : Répartition et caractérisation des substances minérales associées Mémoire de magister en Ressources Minérales, Univ. Constantine, 194pages.



- Mihoubi N. 2009. Fonctionnement et gestion hydrogéologique et hydrologique des ressources en eau du Bassin de Hammam Grouz. Mémoire de magister, univ Constantine. 244p.
- Mohan S. V, Nithila P, Reddy S.J. 1996. Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *J Environ Sci Health A* 31:283–289
- Nollet L.M.L. 2007. Handbook of water analysis, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, p 769.
- N.A.6360. 1992. Normes algériennes, ed. Ianor.
- Obert D. 1981. Étude géologique des Babors orientaux (domaine tellien, Algérie). Thèse Sc. Univ. Paris, Mém. Sc. Terre 81.32, 635p, 283fig, 8pl. ronéot.
- Obert D. 1974. Phases tectoniques mésozoïques d'âge anté cénomaniens dans les Babors (Tell nord sétifien, Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7 sér, XVI : p 171-176. Paris.
- OMS (WHO). 2008. (L'Organisation Mondiale de la Santé-World Health Organization) Guidelines for drinking-water quality: incorporating first and second addenda, recommendations, 3rd edn, vol.1. WHO Press, Geneva, p 668.
- OMS (WHO) .1993. (L'Organisation Mondiale de la Santé-World Health Organization) Guidelines for Drinking-Water Quality. Second Edition. Vol 1. Recommendations. 11p
- ONM. 2010. Données météorologiques de la station d'Aïn Azel.
- Paliwal K.V. 1972. Irrigation with saline water. In: Monogram no. 2 [new series]. IARI, New Delhi, p 198.
- Péron A. (1883). Essai d'une description géologique de l'Algérie pour servir de guide aux géologues dans l'Afrique française. *Ann. Soc. Géol.*, t, 14, 202 p., Paris.
- Pescod M.B. 1985. Wastewater Treatment and Use in Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 47, FAO, Rome.
- Piper A.M. 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Trans Am Geophys Union* 25:914–928. DOI: 10.1029/TR 025i006p00914.
- Pradhan B. and Pirasteh S. 2011. Hydro-chemical analysis of the ground water of the Basaltic Catchments: Upper Bhatsai Region, Maharashtra, *The Open Hydrology Journal*, 5, 51-57.
- Prasad B, Bose J. 2001. Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas. *Environ Geol* 41:183–188.
- Raju N.J. 2007. Hydrogeochemical parameters for assessment of ground water quality in the upper Gunjanaeru River basin, Cuddapah District, Andhara Pradesh, South India, *Environmental Geology*, 52(6): 1067-1074.
- Raoult J.F. 1974. Géologie de centre de la chaîne numidique (Nord du Constantinois, Algérie). Thèse. Sc. Paris. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S., t. LIII, n°121, 164 p.



Raoult J.F. 1969. Nouvelles données sur les flyschs du nord de Kef Sidi Driss et dans la zone de col des oliviers (Nord du Constantinois, Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XI, pp 516-543, 2 fig.

Raoult J.F. 1966. Sur l'allochtonie de la chaîne calcaire dans la région du Djebel Sidi Driss (Nord de Constantine, Algérie).C.R. somm. Soc. Géol. Fr., p.178, Paris.

Raoult J.F. 1972. Précision sur le flysch massylien : série stratigraphique, variations des faciès, nature du matériel remanié (Nord du Constantinois, Algérie). Bull.soc. Hist. nat. Afr. Nord. pp.73-92, Alger.

Raoult J.F. 1975. Évolution paléogéographique et structurale de la chaîne alpine entre le golfe de Skikda et Constantine (Algérie orientale). Bull, Soc. Géol. Fr. Pp. 394-409.Paris.

Riboni E. 2003. Purification de l'eau dans l'industrie, Chézard-Saint-Martin, Suisse, 164 pages.

Rubio B, Nombela M, Vilas F .2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution. Mar Pollut Bull 40:968–980

Roche M. 1963. Hydrologie de surface Gauthier villars édit Paris, 430 pages.

Rouvier H. 1977. Géologie de l'extrême Nord-Tunisien : Tectoniques et paléogéographies superposées à l'extrémité orientale de la chaîne Nord Maghrébine .Thèse .Sc. Paris .2 tomes.898p.

Raykov T., Marcoulides GA .2008. An introduction to applied multivariate analysis. Taylor & Francis, New York, NY. ISBN-13: 978-0-8058-6375-8.pp40.

Richards L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, Agric Handbook, US Department of Agriculture, Washington, DC. 60:69-82.

Rizwan U , Riffat N. M, Abdul Qadir .2009. Assessment of groundwater contamination in an industrial city, Sialkot, Pakistan. African Journal of Environmental Science and Technology Vol. 3 (12), pp. 429-446, December, 2009 Available online at <http://www.academicjournals.org/AJEST> ISSN 1991-637X © 2009 Academic Journals

Savornin F. 1920. Étude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien [Geological study of the Hodna region and the Sétifien plain]. Thèse és sce Nat. Lyon p 44-45 S. Publication du service géologique de l'Algérie. 720 pages

Savornin J. 1904. Structure du Dj. Maadid et du Talemtaga (Bull. Soc. géol. Fr, 4^{ème} sér. t. IV, p.137-155.

Schoeller H .1962. Les eaux souterraines. Masson Cie, Paris. 642pages. <https://doi.org/10.1002/iroh.19640490118>

Schiavo M.A., Hauser S., Cusimano G. and Gatto L. 2006. Geochemical characterization of ground water and submarine discharge in the south-eastern Sicily," Continental Shelf Research, 26 (7), 826-834.



Schuh W.M., Klinekebiel D.L., Gardner J.C., Meyer R.F. 1997. Tracer and nitrate movements to groundwater in the northern Great Plains. *J of Env Qual* 26: 1335-1347.

Siriwong W. 2006. Organophosphate pesticide residues in aquatic ecosystem and health risk assessment of local agriculture community. Chulalongkorn University, Bangkok

Srinivasamoorthy K, Chidambaram S, Sarma V.S, Vasanthavigar M, Vijayaraghavan K, Rajivgandhi R, Anandhan P. and Manivannan R. 2009. Hydrogeochemical characterization of ground water in Salem District of Tamilnadu, India, *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 1(2), 22-33.

Subramani T., Elango L., Damodarasamy S.R. 2005. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India. *Environ Geol* 47:1099–1110.

Szabolcs I. and Darab C. 1964. The Influence of Irrigation Water of High Sodium Carbonate Content of Soils,” *Proceedings of 8th International Congress of Soil Science*, 2, 803-812, 1964.

Tabassum R. A, Shahid M, Niazi N. K, Dumat C, Zhang Y, Imran M, Bakhat H. F, Hussain I, Khalid S. 2019b. Arsenic removal from aqueous solutions and groundwater using agricultural biowastes derived biosorbents and biochar: a column-scale investigation. *Int J Phytoremediation*:1 – 10

Tiwari A. K., De Maio M, Singh P.K, Mahato. K.M. 2015. Evaluation of surface water quality by using GIS and heavy metal pollution index (HPI) model in a coal mining area, India, *Bull Environ Contam Toxicol* (2015) 95:304–310. [http:// doi 10.1007/s00128-015-1558-9](http://doi.org/10.1007/s00128-015-1558-9)

Thornthwaite C.W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38: 55.

Turc L. 1961. Évaluation des besoins en eau d’irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron*, 12 (1), 13-49.

UNESCO .2007. Water portal newsletter, water related diseases.

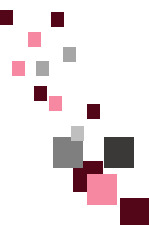
USEPA. 2011. Exposure factors handbook. National Center for Environmental Assessment. United State Environmental Protection Agency, Washington

USEPA IRIS . 2011. Integrated risk information system. Environmental Protection Agency Region I. United State Environmental Protection Agency, Washington, p 20460.

Vasanthavigar M, Srinivasamoorthy K, Vijayaraghavan K, Rajiv-Ganthi R, Chidambaram P, Anandhan S, Manivannan R, Vasudevan S. 2010. Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar Sub-Basin. Tamilnadu, India. *Environ.Monit Assess* 171:595 – 609

Verdeil P. 1988. Abaque de calcul de l'ETR (Régions semi-arides), 01 abaque.

Vila J.M. 1980. Chaîne alpine de l'Algérie orientale et des couffins Algéro-Tunisiens .Thèse Doct. d'Etat univ. Paris VI, 2t. 586 pages.



- Vila J.M. 1977. Carte de l'Algérie au 1/200 000, feuille de Sétif (N-Q ; 3-4). Publ. comm. Serv. Carte Géol., Algérie /SONATRACH, not. Expl. Détaillée, 48p.
- Vila J.M. 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°93, Sétif (2^{ème} Edition), avec notice explicative détaillée, (levés de R.Gonnard, N. Kazi Tani, A. Reymond et J.M. Vila). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.
- Vila J.M. 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°143, Ain Azel (Ampère) (1^{ere} Edition), avec notice explicative détaillée, 16p (levés de J. Glaçon, M. Leikine et JM. Vila). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.
- Vila J.M. 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°144, d'Ain Lahdjar (Behagle) (1^{ere} Edition), avec notice explicative détaillée, 10p (levés de J.Glaçon, M. Leikine et JM. Vila). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.
- Vila J.M. et Leikine M. 1976. Sur l'allochtonie des Biban orientaux (Algérie). 4^{eme} réunion, ann. Sc. Terre, Paris, S.G.F, p393.
- Vila J.M. et al. 1975. Sur l'allochtonie du Tell sétifien : la fenêtre de la Koudiat Touachra et la nappe de Djemila. Bull. Soc. Géol. Fr., 7^{ème} série, XVII : pp.1172- 1176.
- Vila J.M. et Sigal J. 1969. Le cadre structural de Djebel Debar (Nord du constantinois, Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., 7^{ème} série, XI .pp.75-81.Paris.
- Voûte C. 1967. Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Aïn akroun, Aine Babouche et des régions limitrophes Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, 2 tomes, 390 pages.
- Walton W.C .1970. Groundwater resource evaluation, McGraw Hill Book Co. New York, 664 pages.
- Wilcox L.V. 1955. Classification and use of irrigation water. Agric circ 969. USDA, Washington, DC p: 19.
- Wildi W. 1983. La chaîne tello-rifaine [Algérie, Maroc, Tunisie] structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène [The Tello-Rifaine chain -Algeria, Morocco, Tunisia-structure, stratigraphy and evolution from the Triassic to the Miocene]. Rev. Geol. Dynam. Geogr. Phys., 201-297.
- Wolfgang K.H and Léopold S. 2012. Applied multivariate statistical analysis. Edition 3:201-418.
- Wongsasuluk P, Chotpantararat S, Siriwong W, Robson M .2014. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural area in Ubon Ratchathani province, Thailand. Environ Geochem Health 36:169-182.





ANNEXES

ANNEXE 1 : HYDROCLIMATOLOGIE

	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.	Ann
1984	47,1	42,2	12,3	9,2	13	3	N.M	9	N.M	83,4	13	10,2	242,4
1985	31,5	21,6	75,5	18,8	84,5	N.M	N.M	N.M	7,5	41,6	28,7	42,4	352,1
1986	5,3	3	90	12,1	11,4	24	3	21,7	67,8	25,6	12,4	41,1	317,4
1987	17,7	30,9	4,8	10,5	44,3	1,5	57,9	N.M	2,3	17,4	34,3	92,9	314,5
1988	7,1	10,3	11,2	43,2	20,6	53,7	1,8	N.M	31,9	1,6	11,5	57,5	250,4
1989	8	21,1	8	83,2	31,8	50,8	9,2	12,1	41,8	7,9	19,5	15,5	308,9
1990	58,4	28,2	8,4	83,6	101,4	11,5	8,9	44,1	17,2	14,8	57	59	492,5
1991	7,3	29,7	94,3	48,7	58,7	13,7	33,4	10	29,6	97,5	15,8	16,8	455,5
1992	38,8	23,8	57,9	22,3	111,3	2,2	17,9	0,3	13,8	5,6	31,8	43,8	340,1
1993	14,6	32	32	1,2	47,4	2	3,2	15,2	11,8	3	44	27,1	218,3
1994	38,6	12,4	16,8	26,2	4,2	19,5	0	4,2	55,5	54,1	7,2	6,1	244,8
1995	42,7	19,8	41,3	20,8	5,1	39,3	1,6	20	84,8	8,8	6,4	34,5	325,1
1996	66,9	55	26,7	21,1	47,5	36,4	34,5	13	19,4	6,3	13,3	6,5	346,6
1997	24,6	2	8,8	59,5	12,7	13,2	0	7,6	53,1	30,5	45,2	32,8	244,8
1998	25,6	20,6	5,8	47,6	66,2	4,5	0	2	17,7	9,4	16,8	3,5	219,7
1999	59,5	11	17,9	19,9	6,8	3,7	2,6	2,5	49,8	41,4	46,4	N.M	261,5
2000	14,2	3,5	3	9,5	49,5	16,8	0	6	49,5	2,3	7,7	44,7	206,7
2001	20,7	18,1	5,7	3,6	20	2,4	9,6	8,4	38,8	3,3	18,5	9,2	158,3
2002	91,6	14,5	18,2	31,7	40,7	15,7	0	15,5	7,3	22,3	75,7	14,6	347,8
2003	42,6	5	41,2	50,7	87	67,5	0	12	47	61,7	16,2	50,3	481,2
2004	6	26,4	34,2	13	0,5	22,8	5,1	6,5	5	33,7	68,2	131,5	352,9
2005	79,2	53,8	4,4	71,6	41,3	14,6	12,9	7,4	53,1	31,7	38,8	63,2	472
2006	13,3	14,3	74,6	46,6	29,8	19,2	0	6	48,2	5,8	18,3	22,4	298,5
2007	3,5	1	2,4	9,4	122,2	10,5	13,7	16	135	15,8	8,5	8,2	346,2
2008	74,7	20,4	54,3	81,2	15,7	19,2	0	12,4	66,3	57,3	21,6	40	463,1
2009	11,8	50,8	49,2	63,2	54,3	38,9	6,3	7,2	32,1	28,2	2,7	11,5	356,2
2010	6	41,3	53,6	89	29,7	42,5	4	39,6	4,7	18,2	16,1	11,5	356,2
2011	2,9	9,2	25	35,1	2,1	3,5	N.M	N.M	16,5	55,3	11	10,1	170,7

**Tableau.A1.1. Précipitations mensuelles
(de la station de Ain Azel, Période 1984-2011).**

Années	Paramètres	jan	fév.	mar.	avar	mai	jun	juil.	aout	sep	oct.	nov.	déc.
2000	P. totale mensuelle (mm)	5,9	5,7	21,5	28,8	61,9	20,3	0,0	23,9	39,4	47,3	15,2	61,3
	T. minimale moyenne (°C)	-0,2	3,1	5,7	8,1	14,3	16,6	20,7	20,3	16,4	9,7	6,3	4,2
	T. maximale moyenne (°C)	9,1	13,6	16,5	19,5	26,2	28,8	33,9	32,8	27,7	18,6	15,2	12,6
	V. Maximale du vent (m/s)	11	18	16	22	15	15	17	28	20	16	19	26
2001	P. totale mensuelle (mm)	79,0	20,1	8,6	13,2	19,3	0,0	0,0	4,0	47,2	14,4	37,1	8,4
	T. minimale moyenne (°C)	2,7	1,9	8,3	7,0	11,4	17,5	21,0	20,8	15,8	14,8	5,8	1,7
	T. maximale moyenne (°C)	10,3	11,1	18,9	17,8	22,6	30,9	34,6	33,3	27,1	26,1	13,8	10,2
	V. Maximale du vent (m/s)	21	21	27	20	18	19	21	20	29	22	18	16
2002	P. totale mensuelle (mm)	22,7	24,0	29,5	7,0	5,5	0,8	45,5	29,8	7,8	16,2	118,9	92,4
	T. minimale moyenne (°C)	1,7	3,2	5,6	5,4	9,4	14,8	17,6	17,1	12,5	8,6	5,4	1,8
	T. maximale moyenne (°C)	11,2	14,1	16,3	19,2	25,1	31,9	33,0	31,4	26,9	23,3	14,1	11,6
	V. Maximale du vent (m/s)	17	20	18	23	19	21	28	20	22	18	32	20
2003	P. totale mensuelle (mm)	130,7	28,8	38,2	87,7	37,9	36,5	36,6	28,7	14,1	63,3	13,0	89,8
	T. minimale moyenne (°C)	1,0	-0,6	2,7	6,6	9,5	14,8	19,1	18,0	13,5	11,6	4,7	0,2
	T. maximale moyenne (°C)	8,4	8,6	15,0	18,2	23,8	31,0	35,9	34,0	26,3	21,7	15,3	9,2
	V. Maximale du vent (m/s)	24	24	19	17	25	24	26	22	28	19	15	21
2004	P. totale mensuelle (mm)	47,9	15,4	27,5	66,1	66,0	9,6	0,3	23,9	13,2	28,1	52,7	91,1
	T. minimale moyenne (°C)	-0,3	0,8	3,1	4,1	7,1	12,4	16,3	17,9	12,5	10,2	2,6	1,3
	T. maximale moyenne (°C)	10,5	14,5	15,8	16,0	19,2	28,6	33,7	34,7	28,1	25,0	13,6	9,8
	V. Maximale du vent (m/s)	17	49	18	17	26	16	21	22	18	18	22	24
2005	P. totale mensuelle (mm)	29,4	43,3	12,2	54,4	3,4	28,0	21,9	4,8	30,6	21,2	68,9	57,4
	T. minimale moyenne (°C)	-3,6	-1,9	3,1	5,8	9,5	14,0	18,2	16,0	12,6	9,2	3,4	0,2
	T. maximale moyenne (°C)	8,9	7,5	16,2	18,3	26,8	30,6	35,6	32,3	26,7	22,7	14,9	9,1
	V. Maximale du vent (m/s)	25	23	18	21	17	23	28	22	20	15	18	17
2006	P. totale mensuelle (mm)	55,9	36,8	8,5	39,7	79,4	4,7	14,0	2,8	54,3	0,8	9,5	49,6
	T. minimale moyenne (°C)	-0,7	-0,6	2,7	7,6	12,9	15,7	17,8	16,8	12,8	11,0	4,5	2,1
	T. maximale moyenne (°C)	8,1	9,8	16,6	21,6	26,2	31,0	33,7	32,6	26,8	25,4	17,2	11,0
	V. Maximale du vent (m/s)	18	17	26	21	22	23	23	19	19	14	12	19
2007	P. totale mensuelle (mm)	8,6	28,6	102,0	89,2	27,2	59,5	3,0	2,4	79,3	21,8	17,3	10,5
	T. minimale moyenne (°C)	0,4	2,2	2,1	7,3	8,9	15,0	17,0	18,0	14,0	10,4	2,9	0,1
	T. maximale moyenne (°C)	14,0	13,3	13,1	17,2	23,1	31,3	33,9	33,6	27,9	21,1	14,3	10,4
	V. Maximale du vent (m/s)	17	26	22	16	17	21	16	21	22	18	15	17
2008	P. totale mensuelle (mm)	10,8	21,6	42,9	21,8	72,7	29,0	40,1	19,1	44,9	55,4	23,0	38,1
	T. minimale moyenne (°C)	0,0	0,6	2,2	5,0	10,7	13,8	18,7	17,9	14,6	9,8	3,5	0,5
	T. maximale moyenne (°C)	12,9	13,8	14,6	19,8	23,7	28,6	34,9	34,4	27,4	20,6	12,9	9,3
	V. Maximale du vent (m/s)	17	18	20	21	21	19	30	30	21	15	20	18
2009	P. totale mensuelle (mm)	66,3	38,2	31,5	79,1	4,9	4,7	3,0	29,7	63,8	9,0	28,1	26,1
	T. minimale moyenne (°C)	1,0	-0,2	1,8	3,3	9,3	13,6	19,0	17,9	13,4	8,4	4,1	2,6
	T. maximale moyenne (°C)	9,5	9,9	14,4	15,0	25,1	31,2	36,7	34,0	25,5	21,3	17,6	13,2
	V. Maximale du vent (m/s)	24	18	23	16	17	17	21	28	20	18	18	18
2010	P. totale mensuelle (mm)	30,9	38,2	38,3	55,1	73,4	22,6	6,0	35,3	5,0	40,9	43,7	18,0
	T. minimale moyenne (°C)	1,6	1,9	3,9	6,4	6,7	13,0	17,4	17,2	12,9	8,7	4,6	0,4
	T. maximale moyenne (°C)	11,2	12,4	16,2	18,7	20,1	29,3	34,7	33,8	27,3	21,5	14,1	11,7
	V. Maximale du vent (m/s)	21	20	17	19	16	20	22	24	22	21	22	19

Tableau.A1.2. Les données météorologiques
(Précipitation, Température, Vitesse du vent)
station de Sétif, Période 2000-2010

ANNEXE 2 : HYDROGÉOLOGIE

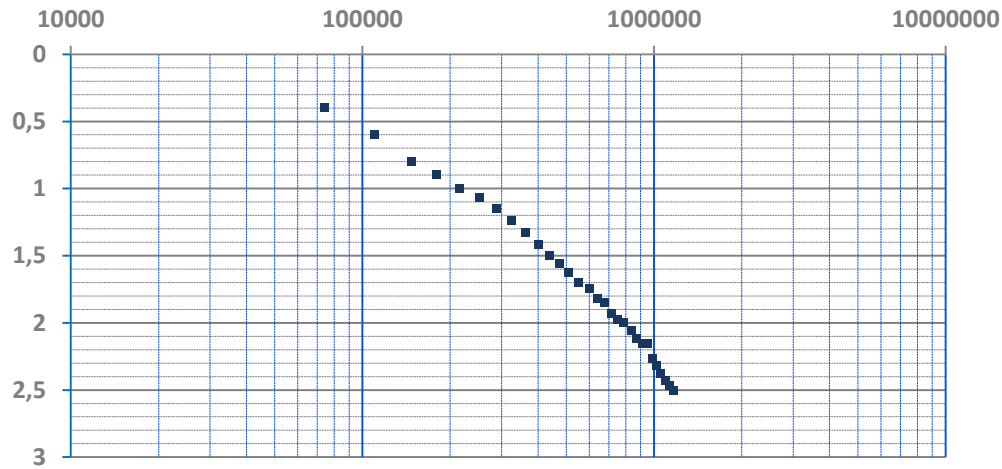


Fig.A2-1 Essai de pompage long duré : Pz1 de la nappe Hauterivienne

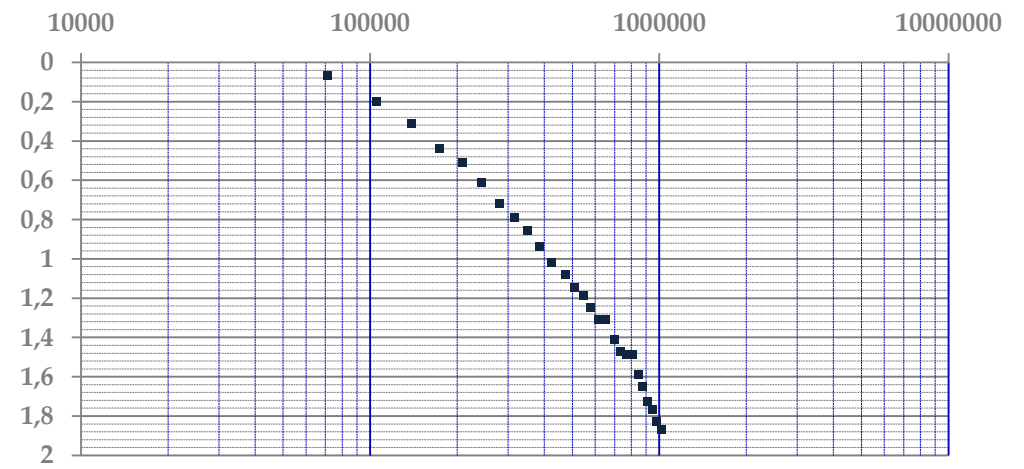


Fig. A2-2. Essai de pompage long duré : CH6 de la nappe Hauterivienne

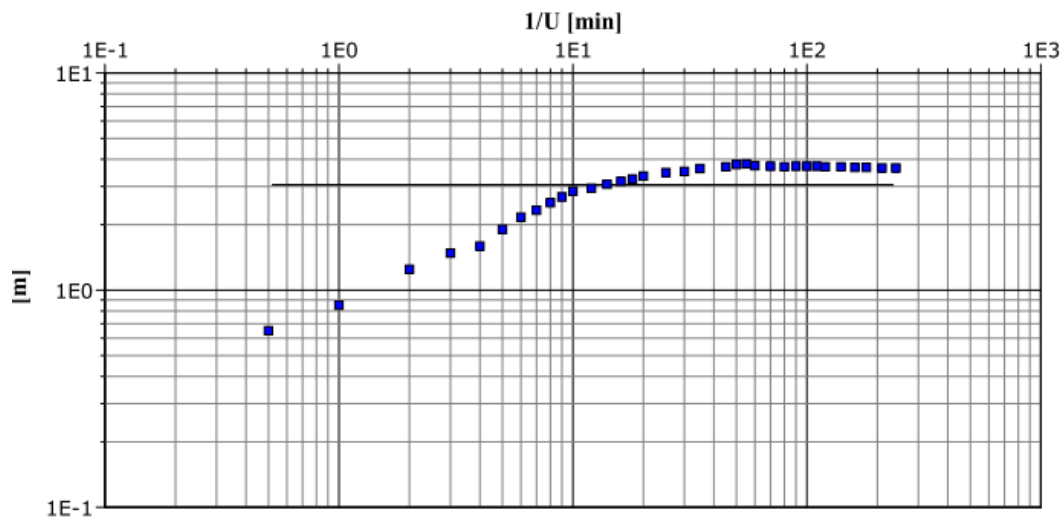


Fig. A2-3. Essai de pompage palier 1: Afounes de la nappe Barrémienne

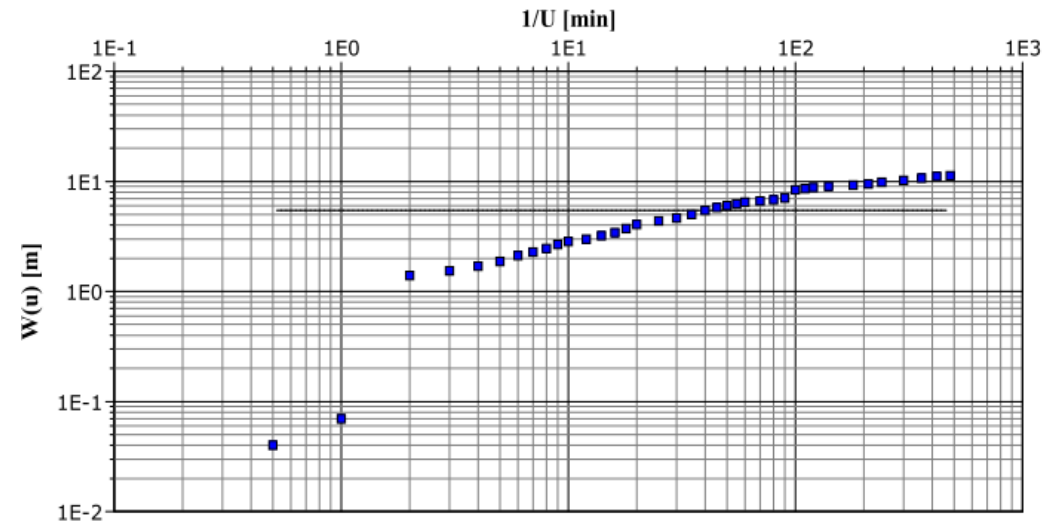
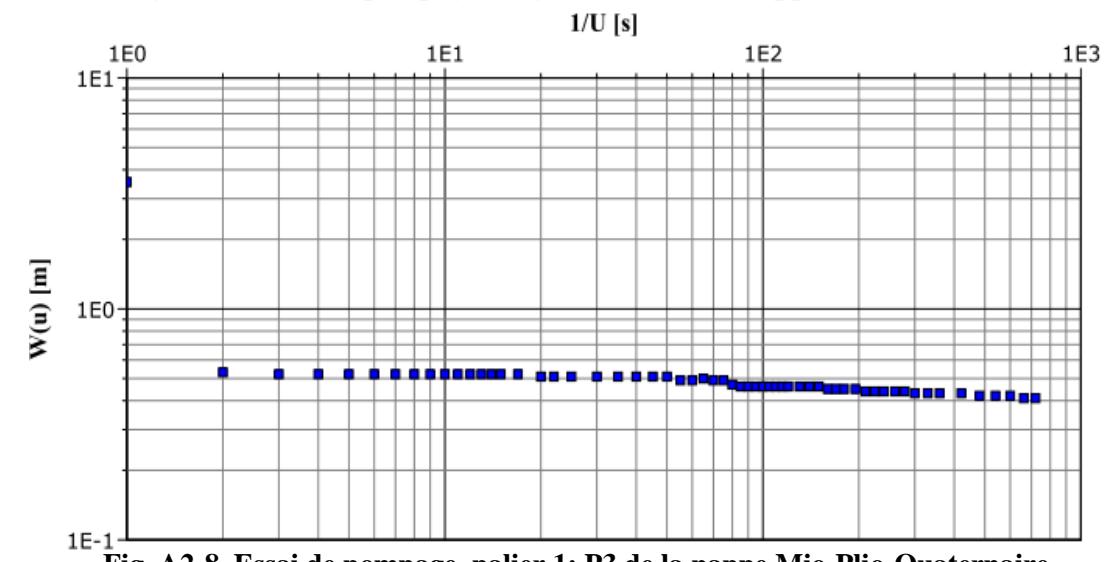
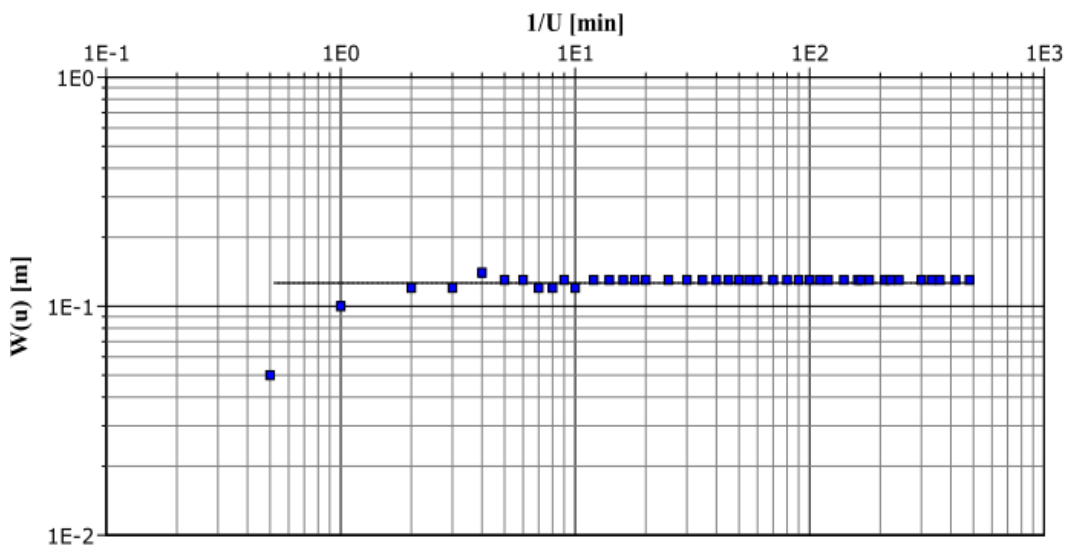
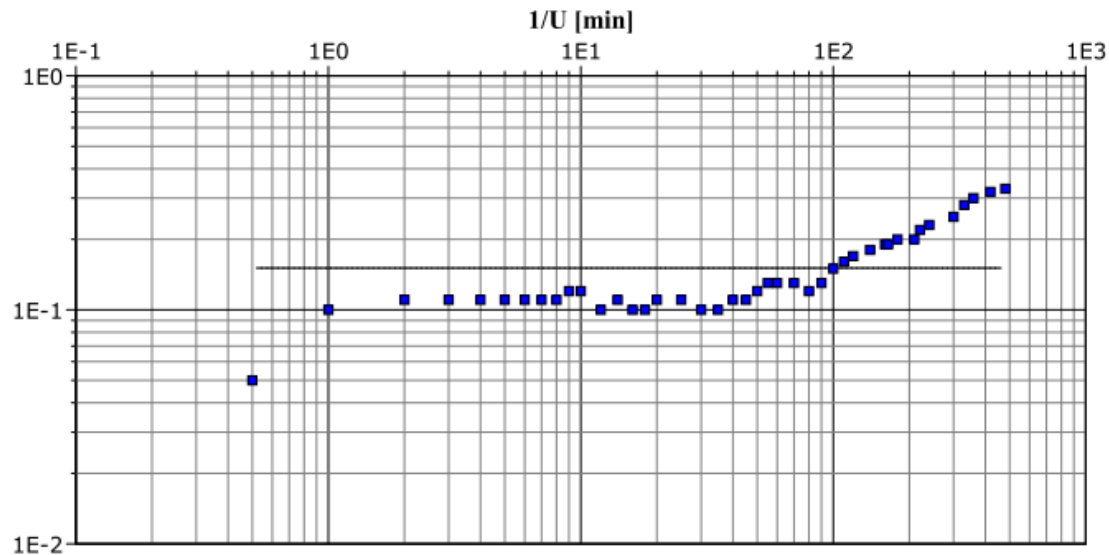
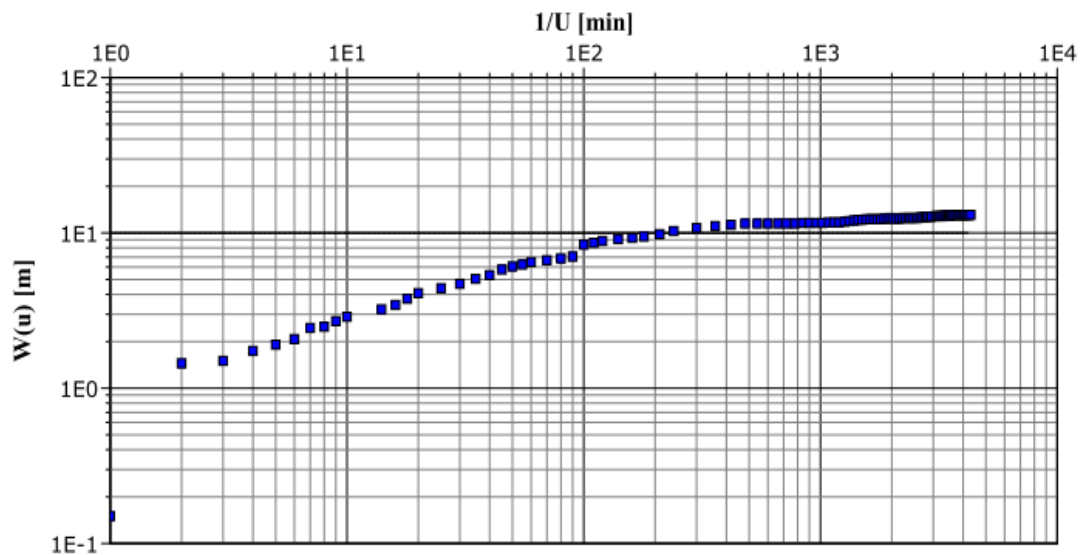


Fig. A2-4. Essai de pompage palier 2: Afounes de la nappe Barrémienne



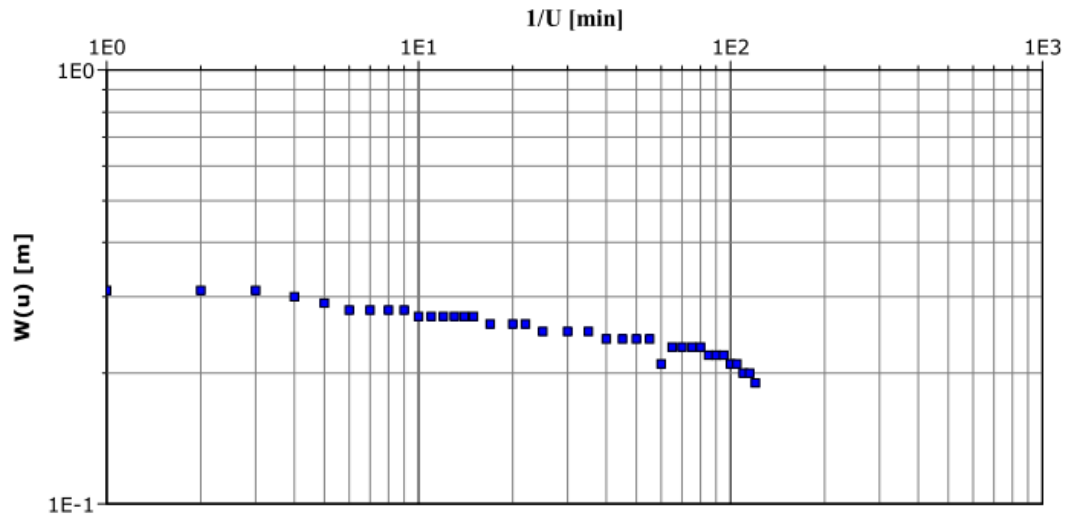


Fig. A2-9. Essai de pompage palier 2: P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

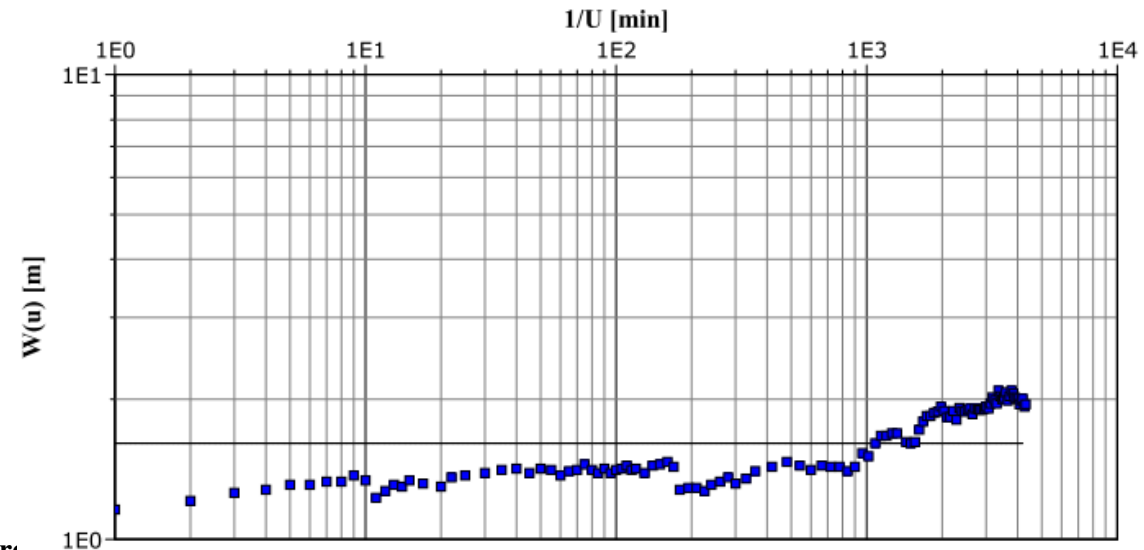


Fig. A2-10. Essai de pompage long duré : P3 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

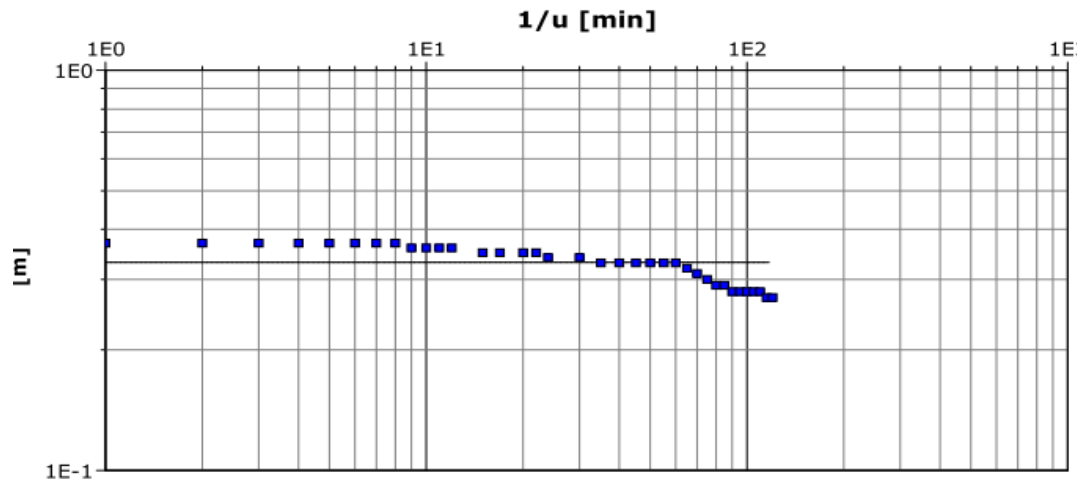


Fig. A2-11. Essai de pompage palier 1: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

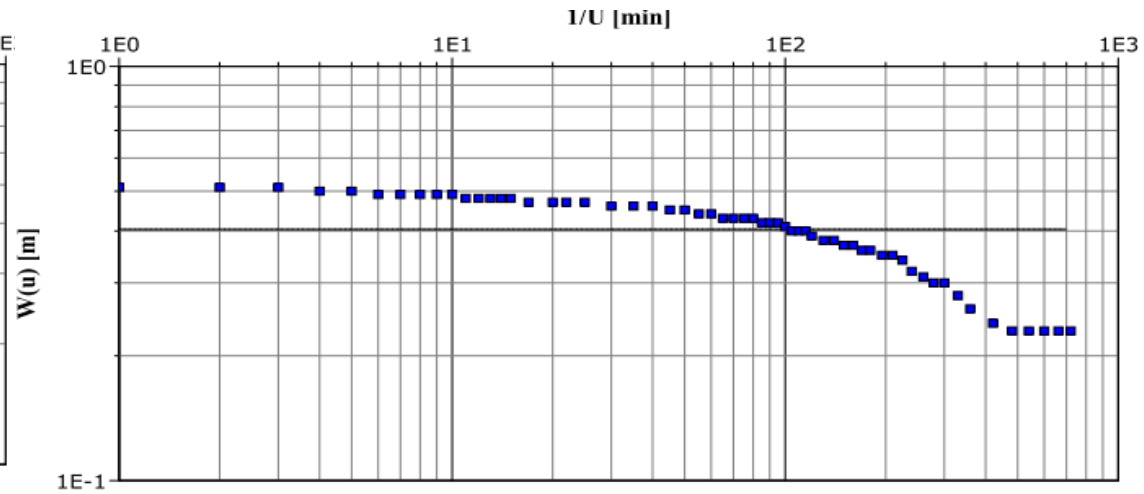


Fig. A2-12. Essai de pompage palier 2: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

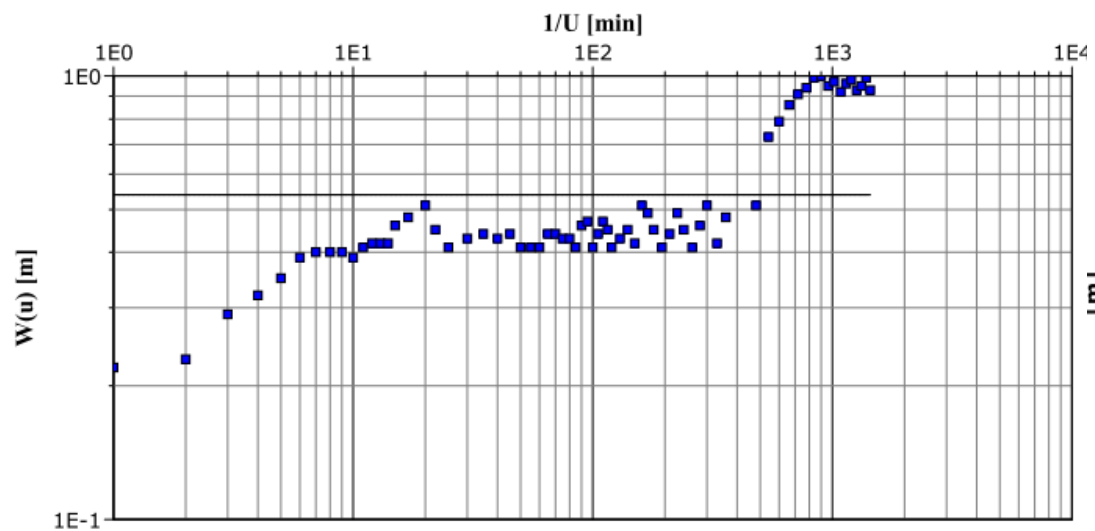


Fig. A2-13. Essai de pompage long duré: P4 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

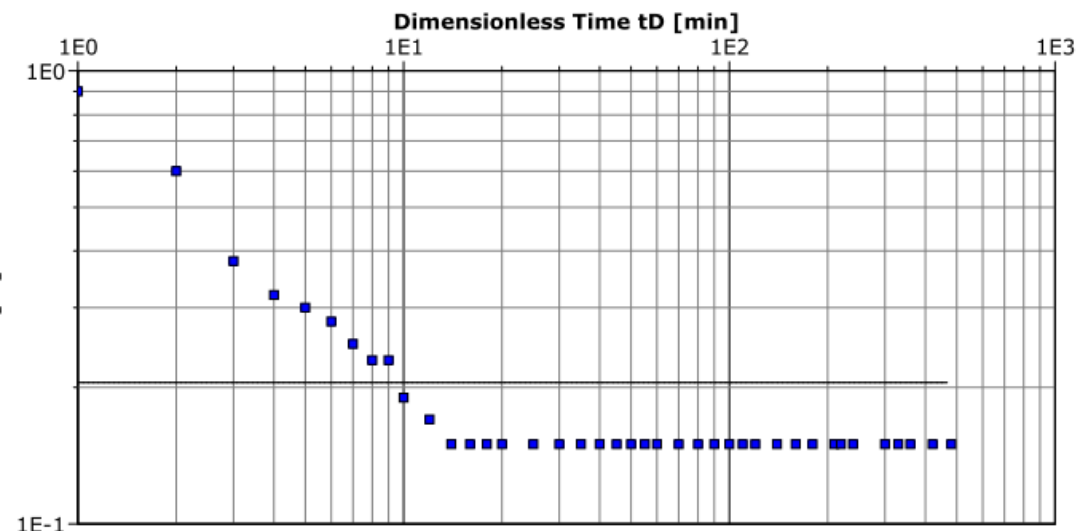


Fig. A2-14. Essai de pompage palier 1: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

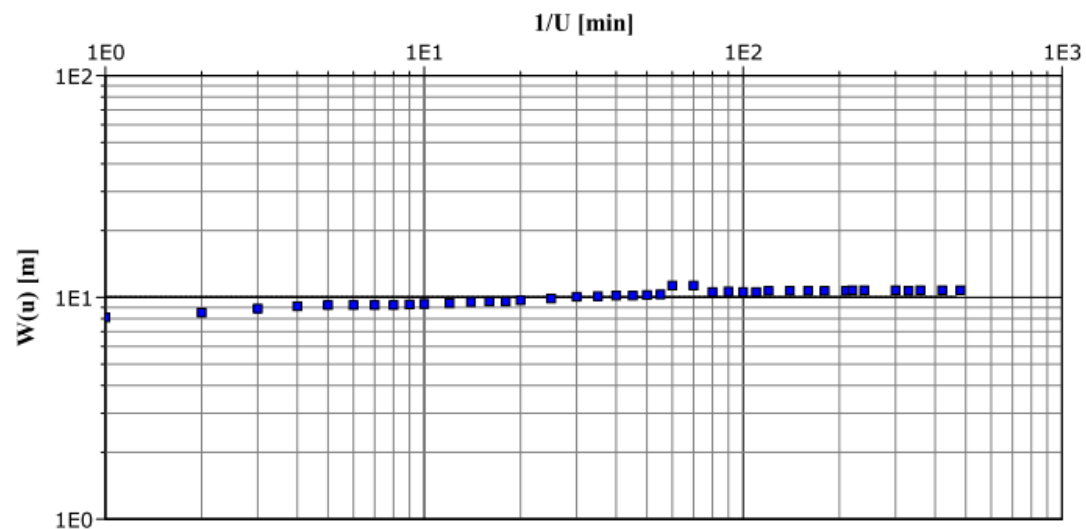


Fig. A2-15. Essai de pompage palier 2: P5 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

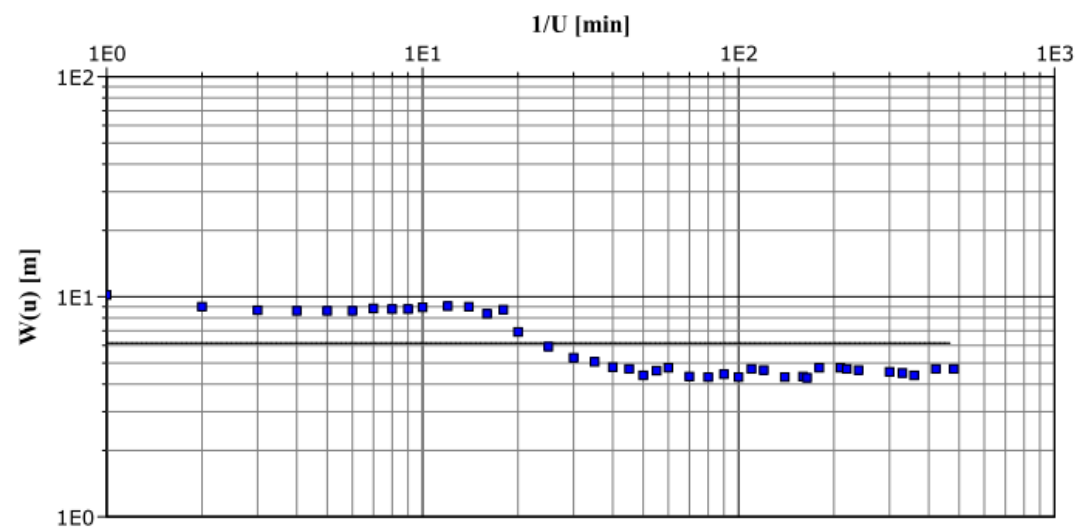


Fig. A2-16. Essai de pompage palier 1: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

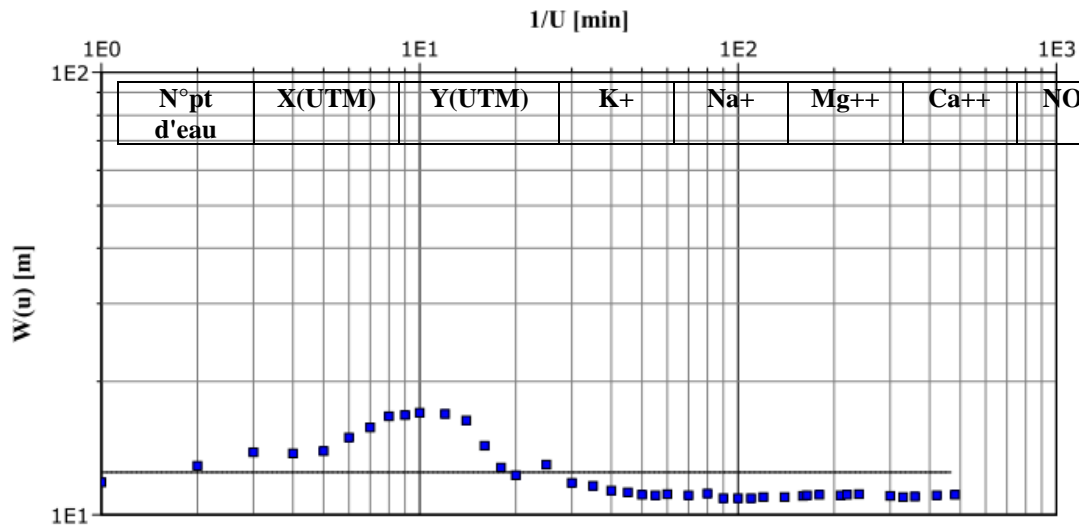


Fig. A2-17. Essai de pompage palier 2: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

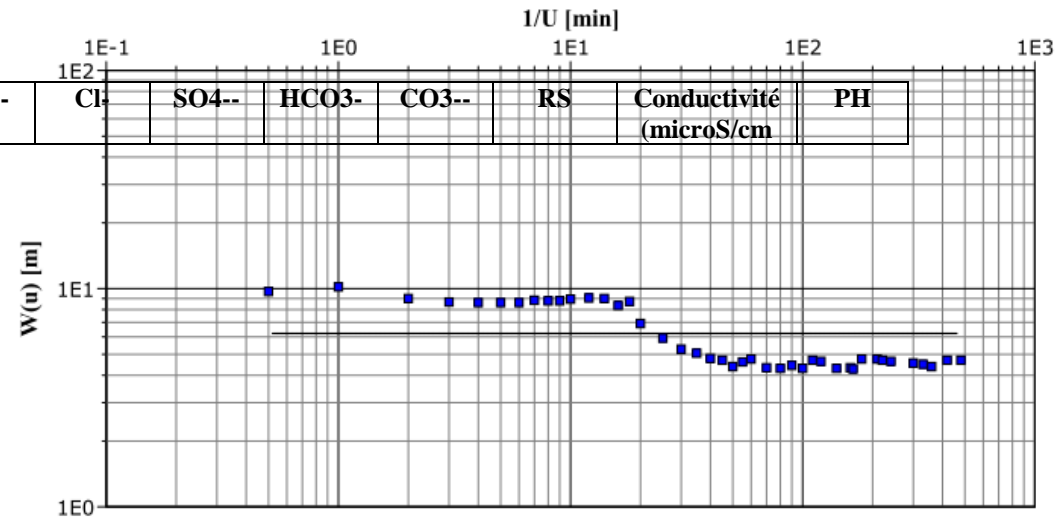


Fig. A2-18. Essai de pompage long duré : P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

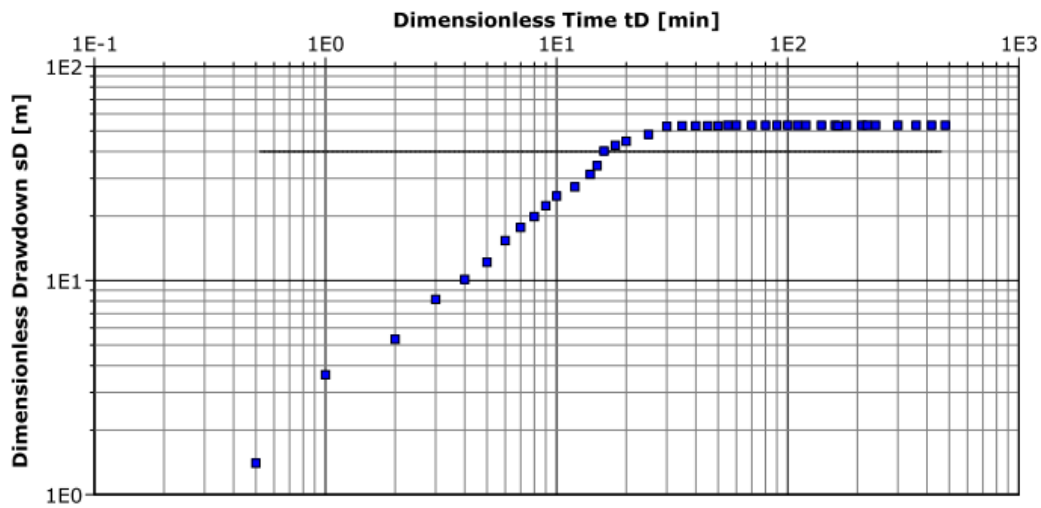


Fig. A2-19. Essai de pompage palier 3: P6 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

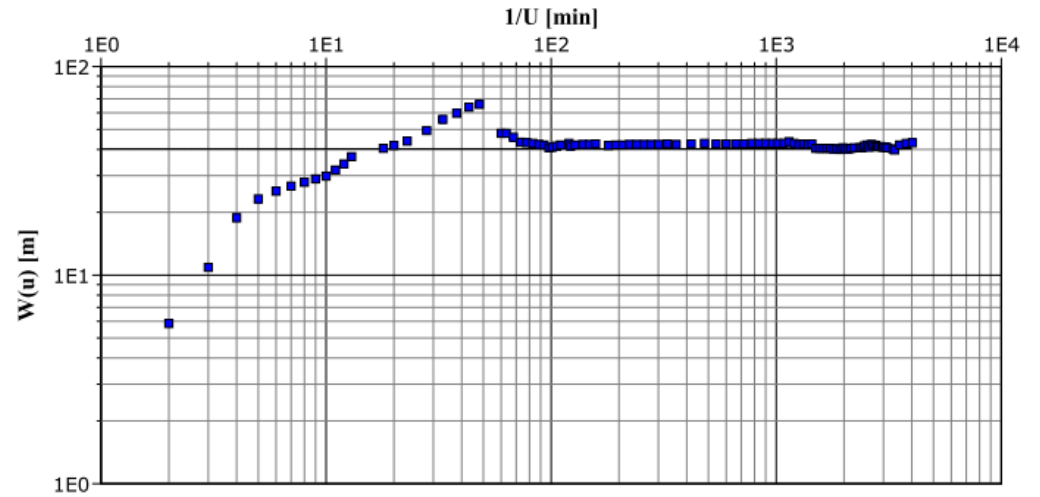


Fig. A2-20. Essai de pompage long duré: P9 de la nappe Mio-Plio-Quaternaire

Tableau A3.1. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Mio-Plio-Quaternaire

1	727576,63	3970670,69	2	32	48	56	45	55	80	281	/	506	800	7,66
2	727614,21	3971164,88	35	71	86	100	38	200	242	317	/	/	1500	7,07
3	727584,64	3969406,89	3	22	48	47	30	65	114	183	/	466	700	8,09
4	727659,69	3969408,65	1	52	26	52	53	85	58	195	/	500	700	7,4
5	727165,21	3967144,83	2	68	44	110	85	140	154	238	/	826	1200	7,9
6	727170,66	3967915,28	4	305	23	250	24	475	274	287	/	1534	2400	7,63
7	726459,37	3969223,34	3	51	60	76	23	90	230	281	/	698	1100	8,06
8	726919,19	3967499,83	2	30	58	60	5	105	104	262	/	588	900	7,59
9	723451,44	3966031,97	2	18	48	60	36	50	80	244	/	464	700	7,5
10	723440,66	3965476,67	2	28	60	72	41	70	128	234	/	598	900	7,67
11	725264,74	3973694,82	31	270	89	375	13	470	660	671	/	2290	3500	7,63
12	724832,12	3972943,72	2	106	44	78	33	185	180	177	/	774	1100	7,9
13	724947,46	3972392,03	2	100	60	144	16	215	374	281	/	1080	1600	7,73
14	725473,81	3972405,38	3	182	102	94	10	310	454	183	/	1300	2000	7,85
15	725982,29	3972140,62	2	86	48	128	30	125	292	317	/	940	1400	8,06
16	725450,61	3972343,42	3	134	30	225	18	290	400	207	/	1280	2000	7,7
17	724966,93	3970634,91	2	48	48	96	31	100	172	268	/	710	1000	7,94
18	726162,58	3969031,16	19	62	85	42	31	130	226	281	/		1200	7,73
19	725386,45	3965988,79	1	17	52	62	41	40	80	293	/	524	800	7,8
20	725830,45	3964335,37	1	13	35	22	3	25	64	73	30	256	400	9,63

21	725461,89	3965798,43	2	18	40	50	39	35	80	146	/	386	600	8,2
22	727153,29	3963721,78	2	21	16	34	1	40	82	85	28	266	400	9,39
23	727291,01	3965174,22	12	34	30	82	61	55	122	244	3		800	8,53
24	727762,13	3965432,88	1	49	97	86	66	160	300	140	/	930	1500	7,76
25	721447,88	3967801,37	6	95	86	168	9	150	500	305	/	1260	1800	7,67
26	728530,15	3968752,49	3	24	41	100	58	85	76	238	/	600	900	7,79
27	729128,38	3968076,17	2	71	41	84	51	110	112	311	/	720	1100	7,41
28	729727,75	3968074,27	2	64	38	116	40	120	120	299	/	720	1200	7,61
29	731851,64	3967616,24	1	140	43	48	7	210	148	226	/	756	1100	7,7
30	731724,51	3967602,63	2	45	38	120	110	100	160	220	/	720	1100	7,92
31	730310,67	3971728,73	6	170	92	330	3	425	750	274	/	1960	3100	7,09
32	735456,15	3972728,16	29	210	36	140	20	370	276	256	/	1320	2100	7,69
33	730796,07	3974300,83	3	67	61	98	25	170	146	336	/	786	1200	7,67
34	731580,76	3974999,81	3	77	50	168	41	215	278	244	/	1040	1600	7,64
35	732767,56	3975647,51	4	184	56	126	40	285	326	244	/	1214	1900	7,67
36	735847,51	3973077,16	6	200	67	136	10	340	358	287	/	1364	2100	7,14
37	735237,02	3975281,54	6	724	84	460	21	1125	998	329	/	3664	5800	7,13
38	735473,74	3976737,76	6	425	14	280	22	645	500	244	/	2100	3300	7,25
39	735964,36	3977151,50	6	500	182	220	19	1170	580	110	/	2880	4600	8,01
40	735724,03	3975819,37	2	280	34	320	23	590	500	244	/	1956	3100	7,48

41	735372,87	3974884,85	74	580	36	332	7	890	860	207	/	2888	4500	8,18
42	735888,69	3972492,64	3	122	83	98	24	260	210	299	/	1066	1600	7,79
43	735972,69	3972156,15	6	205	58	176	41	375	374	232	/	1400	2200	8,25
44	735549,08	3972051,42	3	120	74	112	41	230	266	281	/	1088	1700	7,5
45	737798,83	3971494,95	10	106	55	84	51	210	164	234	/	880	1400	7,61
46	737012,26	3969901,37	4	51	70	84	38	170	180	207	/	766	1100	7,36
47	736881,77	3971038,54	2	114	72	92	47	270	210	214	/	974	1500	7,17
48	735887,85	3970642,42	12	148	41	120	47	260	190	268	/	1046	1600	7,54
49	737130,30	3969256,56	2	83	48	88	35	155	162	275	/	800	1200	7,34
50	737341,28	3968892,65	1	152	91	96	83	335	276	183	/	1188	1900	6,97
51	737270,57	3969630,37	2	74	54	82	42	125	192	232	/	774	1200	6,95
52	737470,06	3965966,28	6	70	52	86	62	55	104	281	/	644	900	8,2
53	737394,60	3965835,43	4	152	55	160	30	300	340	214	/	1214	1900	7,97
54	736280,35	3966304,29	3	35	55	72	58	90	100	287	/	634	900	7,59
55	735869,12	3966632,82	2	46	24	100	58	100	124	201	/	566	900	7,83
56	736326,82	3965503,61	3	51	41	88	64	145	112	207	/	666	1000	7,65
57	735308,74	3966001,19	5	280	49	86	25	400	258	262	/	1284	2000	8,12
58	734198,60	3966186,85	2	56	70	80	17	105	210	287	/	798	1200	7,79
59	733995,70	3965317,93	9	37	50	52	40	85	100	244	/	576	900	7,45
60	734250,40	3965171,02	2	28	53	63	29	100	142	220	/	588	900	7,87

61	734065,04	3965095,56	2	18	42	54	37	45	76	244	/	476	700	6,9
62	735564,33	3963941,02	4	70	42	110	29	140	164	323	/	800	1200	7,59
63	734650,89	3965242,79	1	34	73	73	59	100	128	299	/	700	1100	7,69
64	735881,70	3965244,86	1	24	44	58	48	55	80	238	/	500	700	7,55
65	733208,21	3965636,65	3	110	94	120	74	420	204	177	/	1188	1900	7,84
66	733548,78	3967002,45	3	182	104	162	67	545	226	189	/	1550	2500	7,71
67	733034,79	3965540,14	1	212	67	320	37	705	300	207	/	1810	2900	7,64
68	732834,54	3965503,75	2	97	42	98	88	190	146	171	/	792	1200	7,91
69	732719,81	3964982,79	3	24	31	100	27	60	106	244	/	524	800	7,69
70	732435,86	3965369,94	2	28	52	18	24	75	142	305	/	622	900	7,34
71	732116,84	3965114,79	15	22	23	46	15	20	50	189	/	342	500	7,22
72	731933,60	3965387,55	3	40	54	74	36	110	136	329	/	660	1000	7,15
73	732111,43	3965299,93	2	29	48	64	26	70	138	250	/	566	800	7,46
74	732059,59	3965360,13	2	99	110	160	23	300	340	293	/	1286	2000	7,71
75	731483,02	3964358,34	6	294	120	216	14	600	710	177	/	2086	3300	7,7
76	731541,13	3965006,56	5	285	19	196	44	390	426	183	/	1512	2300	7,88
77	730644,38	3710965,79	2	23	42	74	25	55	146	244	/	528	800	7,6
78	732443,08	3965122,76	20	370	62	320	66	625	688	287	/	2312	3600	7,53
79	732129,33	3965578,05	3	146	92	154	75	375	286	256	/	1300	2000	7,73

80	735090,57	3970402,78	2	130	50	92	60	200	230	256	/	910	1400	7,54
81	735902,18	3969162,39	3	134	53	136	45	250	290	268	/	1140	1800	7,1
82	726071,70	3971619,02	5	150	38	192	63	265	400	165	/	1200	1800	7,9
83	605273,50	3702665,02	2	46	41	92	55	95	119	256	/	666	1000	7,92
max			74	724	182	460	110	1170	998	671	30	3664	5800	9,63
min			1	13	14	18	1	20	50	73	3	256	400	6,9
moyenne			5,70	122,53	56,80	125,24	37,93	240,66	251,60	246,27	20,33	1041,08	1589,16	7,70

Tableau A3.2. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau de l'Hauterivien

N°pt d'eau	X(lambert)	Y(Lambert)	K+	Na+	Mg++	Ca++	NO3-	Cl-	SO4- -	HCO3-	RS	CE	pH
CH1	755,042	280,534	0,9	25	35,23	61,43	1	36	69	310	455	756	7,32
CH2	754,884	280,55	0,86	15	36,98	64,23	4	30	56	298,14	435	688	7,32
CH3	754,907	280,643	0,88	17	40,56	70,48	2	38	78	305,58	452	734	7,33
CH4	754,904	280,736	0,91	18	40,67	74,54	1	39	80	317,54	470	755	7,24
CH5	754,703	280,73	0,94	20	42,59	73,21	5	47	90	288,4	544	774	7,25
CH6	754,703	280,73	0,97	19	41,78	72,18	1	37	78	294,59	541	723	7,4
max			0,97	25	42,59	74,54	5	47	90	317,54	544	774	7,4
min			0,86	15	35,23	61,43	1	30	56	288,4	435	688	7,24
moyenne			1	19	40	69	2	38	75	302	483	738	7

Tableau A3.3. Les résultats des analyses physico-chimiques (en mg/l) des points d'eau du Barrémien

N°pt d'eau	X	Y	K+	Na+	Mg++	Ca++	NO3-	Cl-	SO4- -	HCO3-	RS	CE	pH
CH16	727394,07	3963623,53	3	23	82,13	135,47	4,27	83,66	187,32	222,45	456	833	6,97
CH17	727147,47	3962550,23	2,9	25	280,56	140,28	43,36	134,72	109,89	303,56	400	866	7,1
CH19	727431,73	3964229,83	2,5	28	86,02	141,88	3,25	163	222,8	234,56	398	782,79	6,95
CH20	727257,75	3963539,85	3	27	41,31	68,13	0,08	32,61	199,4	213,67	578	515	7,35
CH21	727133,79	3963474,99	2,5	25	77,76	128,25	0,75	39,7	225,25	266,89	566	626	6,62
CH22	727026,86	3963445,42	3,4	29	35,2	58,2	0,13	39,7	177,13	345,23	423	686	7,88
CH23	727441,15	3964381,18	3,4	24	43,74	72,14	0,04	153,15	198,45	296,12	511	625	7,31
mine KHY	748,632	284,964	1,18	11,69	68,76	205,49	15	145	484	311,1	1264	1920	7,72
Afounes	77983	281,955	3,6	25	248,49	124,24	1,94	73,74	52,78	393,56	600	855	7,75
max			3,6	29	280,56	205,49	43,36	163	484	393,56	1264	1920	7,88
min			1,18	11,69	35,2	58,2	0,04	32,61	52,78	213,67	398	515	6,62
moyenne			3	24	107	119	8	96	206	287	577	857	7

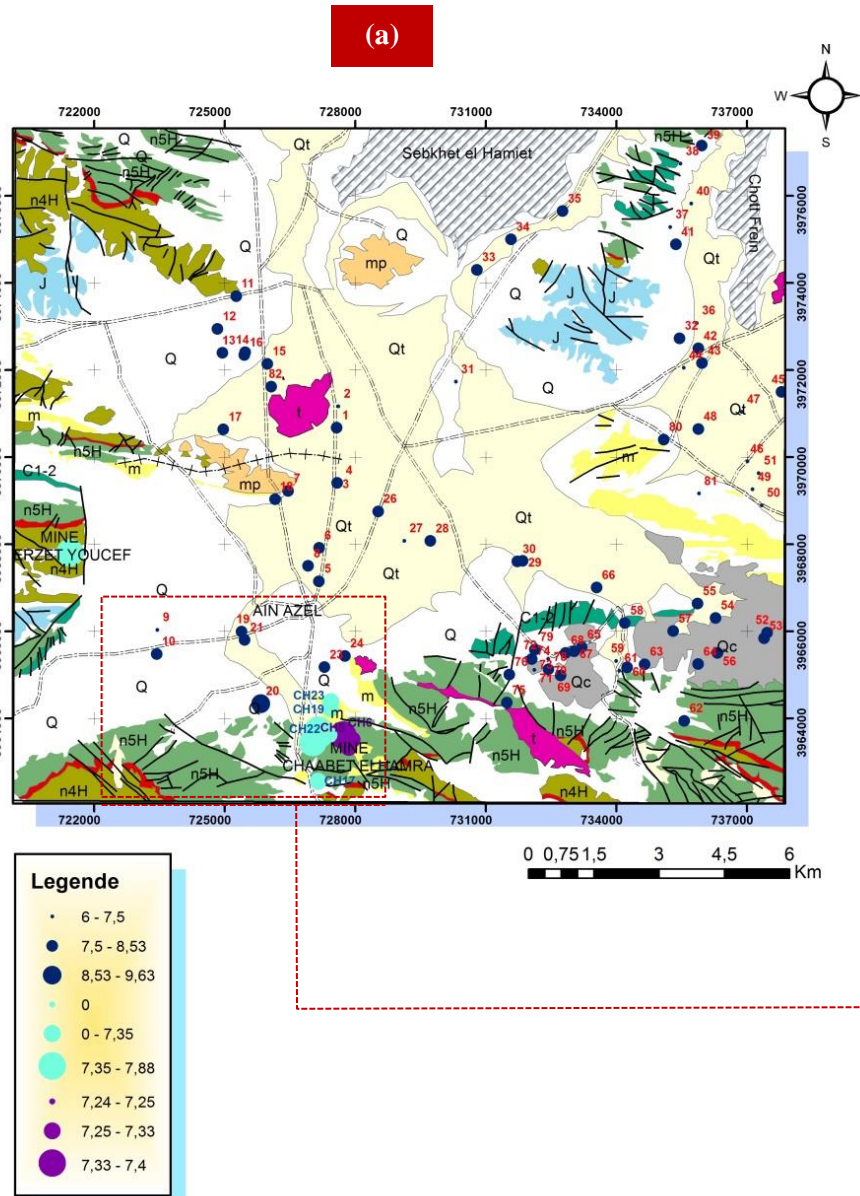
Tableau A3.5. Les indices d'irrigation calculés, la balance ionique vérifiée et les paramètres de Gibbs dans la zone d'étude.

Aquifère	Indice calculé	IB (%)	Gibbs		TH	SAR	RSC	Na%	PI	KR	MAR	MH
	Point d'eau		Na/ (Na+Ca)	Cl/(Cl+HCO3)								
Aquifère Hauterivien	CH1	3,295	0,28	0,18	615,94	2,05	-1,06	13,05	20,29	0,15	36,33	48,48
	CH2	4,543	0,18	0,17	645,28	1,17	-1,56	7,91	15,07	0,08	36,20	48,34
	CH3	6,145	0,18	0,18	720,97	1,24	-2,11	7,87	14,41	0,08	36,17	48,30
	CH4	5,437	0,18	0,18	735,27	1,23	-2,06	7,70	14,25	0,08	35,56	47,65
	CH5	7,649	0,18	0,23	757,62	1,28	-2,78	7,88	13,92	0,08	36,52	48,68
	CH6	5,763	0,19	0,18	711,47	1,32	-2,02	8,37	15,00	0,09	37,15	49,36
Aquifère Mio-Plio-Quaternaire	1	2,942	0,33	0,25	673,60	2,22	-2,14	14,05	20,15	0,15	46,15	58,57
	2	6,900	0,38	0,52	1205,20	3,68	-6,87	22,18	18,58	0,19	46,24	58,65
	3	5,937	0,29	0,38	628,60	1,60	-3,30	11,63	16,52	0,12	50,53	62,74
	4	-0,249	0,47	0,43	473,20	4,16	-1,54	25,36	31,56	0,33	33,33	45,19
	5	5,609	0,35	0,50	910,80	3,87	-5,21	18,52	22,07	0,22	28,57	39,75
	6	1,979	0,52	0,74	1438,60	13,05	-9,66	36,14	37,65	0,56	8,42	13,17
	7	5,297	0,37	0,36	872,00	3,09	-4,12	16,56	20,79	0,19	44,12	56,56
	8	3,976	0,30	0,41	775,60	1,95	-3,47	11,94	17,23	0,13	49,15	61,45
	9	6,516	0,21	0,26	693,60	1,22	-2,94	8,47	14,25	0,08	44,44	56,88
	10	1,309	0,25	0,34	852,00	1,72	-4,69	10,20	14,73	0,11	45,45	57,88
	11	10,315	0,39	0,55	2604,80	8,86	-15,04	24,49	24,08	0,29	19,18	28,13
	12	7,221	0,54	0,64	750,80	6,79	-4,61	30,68	33,89	0,43	36,07	48,19
	13	5,389	0,38	0,57	1212,00	4,95	-7,52	20,00	22,89	0,25	29,41	40,73
	14	1,742	0,63	0,74	1306,40	9,19	-10,08	32,06	33,89	0,46	52,04	64,15
	15	7,110	0,37	0,40	1033,60	4,58	-5,14	20,00	23,59	0,24	27,27	38,21
	16	9,985	0,34	0,71	1371,00	5,93	-10,30	21,17	22,93	0,26	11,76	18,02
	17	6,716	0,30	0,39	873,60	2,83	-4,35	14,79	19,04	0,17	33,33	45,19
	18	4,875	0,56	0,44	907,00	3,89	-4,48	24,18	23,51	0,24	66,93	76,94
	19	4,561	0,19	0,19	736,40	1,13	-2,57	7,32	13,87	0,07	45,61	58,04
	20	27,146	0,34	0,37	397,00	1,22	-2,78	10,94	16,83	0,11	61,40	72,40

21	1,492	0,24	0,29	578,00	1,34	-3,39	10,00	15,04	0,10	44,44	56,88
22	7,926	0,35	0,45	301,20	2,10	-1,62	18,70	24,57	0,21	32,00	43,69
23	3,334	0,27	0,28	656,00	2,27	-2,56	17,04	18,38	0,15	26,79	37,63
24	1,470	0,33	0,66	1225,40	2,56	-9,98	12,02	14,62	0,13	53,01	65,03
25	8,306	0,17	0,38	836,20	1,43	-4,46	8,74	12,76	0,09	29,08	40,34
26	2,440	0,42	0,38	756,20	4,49	-2,47	22,60	27,44	0,28	32,80	44,59
27	7,129	0,32	0,41	891,60	3,65	-4,01	17,65	21,74	0,21	24,68	35,07
28	3,244	0,72	0,62	592,60	10,38	-2,23	43,65	48,00	0,77	47,25	59,63
29	5,960	0,25	0,44	911,60	2,53	-5,51	12,95	16,48	0,14	24,05	34,31
30	1,919	0,31	0,73	2404,40	5,85	-19,55	17,25	18,29	0,20	21,80	31,49
31	5,256	0,57	0,71	995,20	11,19	-5,75	40,44	38,24	0,60	20,45	29,78
32	2,652	0,37	0,47	990,20	3,76	-4,40	18,04	21,99	0,21	38,36	50,65
33	7,759	0,29	0,60	1250,00	3,69	-8,50	38,63	17,95	0,18	22,94	32,92
35	7,504	0,56	0,67	1229,40	9,93	-7,59	33,66	35,45	0,49	33,00	44,82
36	12,433	0,58	0,85	2988,80	21,95	-24,47	40,15	40,82	0,67	15,44	23,14
37	9,717	0,57	0,82	1514,80	17,53	-11,12	42,30	43,24	0,72	4,76	7,62
38	7,472	0,66	0,95	2592,40	17,63	-24,15	38,63	38,97	0,62	45,27	57,70
39	8,299	0,43	0,81	1878,80	10,52	-14,77	28,48	29,86	0,40	9,60	14,91
40	1,739	0,60	0,88	1955,20	21,38	-16,14	47,05	42,76	0,79	9,78	15,17
41	7,151	0,52	0,60	1170,60	6,41	-6,82	25,67	28,60	0,34	45,86	58,27
42	8,832	0,50	0,74	1355,60	9,48	-9,75	31,08	32,43	0,44	24,79	35,21
43	7,740	0,48	0,59	1166,80	6,22	-7,07	24,85	27,63	0,32	39,78	52,14
44	4,966	0,52	0,61	871,00	6,36	-4,88	29,44	30,79	0,38	39,57	51,92
45	6,922	0,35	0,59	994,00	2,91	-6,56	15,15	18,01	0,17	45,45	57,88
46	4,879	0,52	0,68	1050,40	6,29	-7,01	26,13	28,97	0,35	43,90	56,34
47	5,336	0,52	0,63	936,20	8,25	-4,97	33,20	34,10	0,46	25,47	36,04
48	3,733	0,45	0,49	833,60	5,03	-3,83	23,81	27,89	0,31	35,29	47,35
49	6,290	0,58	0,76	1226,20	7,86	-9,28	29,03	31,41	0,41	48,66	60,99

50	8,221	0,44	0,48	852,80	4,49	-4,73	21,84	25,64	0,27	39,71	52,06
51	1,616	0,42	0,25	856,40	4,21	-3,96	21,59	24,65	0,25	37,68	49,93
52	9,127	0,45	0,71	1251,00	7,33	-9,00	26,62	28,43	0,35	25,58	36,18
53	2,605	0,30	0,35	811,00	2,20	-3,41	13,01	17,79	0,14	43,31	55,75
54	3,858	0,29	0,46	696,80	2,92	-3,67	16,22	20,33	0,19	19,35	28,35
55	1,883	0,34	0,55	776,20	3,18	-4,37	17,31	20,96	0,20	31,78	43,45
56	4,949	0,74	0,72	831,80	17,04	-4,03	51,35	53,37	1,04	36,30	48,44
57	9,416	0,38	0,39	974,00	3,23	-5,05	16,20	20,37	0,19	46,67	59,07
58	2,773	0,38	0,38	670,00	2,59	-2,71	18,40	21,05	0,18	49,02	61,32
59	2,308	0,28	0,44	749,60	1,84	-3,90	11,45	16,35	0,12	45,69	58,11
60	2,384	0,23	0,24	614,40	1,30	-2,15	9,43	15,86	0,09	43,75	56,19
61	2,834	0,36	0,43	894,40	4,01	-3,65	19,58	23,27	0,23	27,63	38,64
62	5,399	0,29	0,37	963,60	1,99	-4,75	10,70	15,69	0,12	50,00	62,25
63	3,561	0,27	0,28	650,80	1,68	-2,61	10,92	17,22	0,12	43,14	55,58
64	1,364	0,44	0,80	1370,80	5,32	-10,82	20,89	22,79	0,26	43,93	56,37
65	5,812	0,49	0,83	1662,80	7,89	-13,54	25,80	27,30	0,34	39,10	51,42
66	6,402	0,37	0,85	2149,40	7,62	-18,09	21,58	22,94	0,27	17,31	25,67
67	6,348	0,46	0,66	834,40	5,80	-5,54	26,12	29,04	0,35	30,00	41,41
68	8,978	0,17	0,30	754,20	1,48	-3,54	9,34	13,71	0,09	23,66	33,83
69	-16,451	0,58	0,30	516,40	2,37	-0,18	17,65	26,74	0,20	74,29	82,65
70	11,084	0,29	0,15	418,60	1,87	-1,09	21,14	20,43	0,16	33,33	45,19
71	-2,666	0,32	0,37	812,80	2,50	-2,74	14,38	19,44	0,16	42,19	54,61
72	3,194	0,28	0,33	713,60	1,94	-3,05	12,16	17,57	0,13	42,86	55,29
73	10,892	0,35	0,64	1702,00	4,26	-12,23	15,76	18,12	0,18	40,74	53,13
74	10,026	0,54	0,85	2064,00	11,34	-17,75	30,86	31,62	0,44	35,71	47,81
75	10,933	0,56	0,79	1135,80	13,74	-8,34	40,28	41,46	0,66	8,84	13,78
76	4,609	0,21	0,28	714,40	1,51	-3,15	9,73	15,03	0,10	36,21	48,35
77	10,378	0,50	0,79	2108,40	13,39	-16,36	33,80	33,53	0,48	16,23	24,21
78	6,650	0,45	0,72	1524,40	6,58	-11,06	23,24	25,27	0,30	37,40	49,63

	79	4,348	0,55	0,57	870,00	7,71	-4,51	31,73	35,10	0,46	35,21	47,26
	80	5,739	0,46	0,62	1114,60	6,89	-6,75	26,60	29,20	0,35	28,04	39,12
	81	1,000	0,41	0,73	1271,60	6,99	-10,00	25,20	26,48	0,33	16,52	24,61
	82	11,084	0,29	0,15	418,60	1,87	-1,09	21,14	20,43	0,16	33,33	45,19
	83	-2,666	0,32	0,37	812,80	2,50	-2,74	14,38	19,44	0,16	42,19	54,61
Aquifère Barrémien	CH16	29,018	0,13	0,39	1350,82	1,10	-9,87	5,64	8,22	0,05	37,74	49,99
	CH17	49,248	0,13	0,43	3001,99	0,86	-25,11	3,21	4,88	0,03	66,67	76,73
	CH19	17,581	0,15	0,54	1414,76	1,31	-10,31	6,27	8,91	0,06	37,74	49,99
	CH20	10,637	0,26	0,21	679,39	1,82	-3,30	12,05	16,72	0,12	37,75	50,00
	CH21	27,951	0,15	0,20	1278,88	1,23	-8,42	6,26	9,40	0,06	37,75	50,00
	CH22	-9,373	0,30	0,17	579,64	2,12	-0,14	14,78	21,71	0,16	37,69	49,93
	CH23	1,400	0,22	0,47	719,37	1,58	-2,34	10,57	15,90	0,10	37,75	50,00
	mine KHY	6,373	0,05	0,45	1591,28	0,50	-10,81	2,29	5,22	0,02	25,07	35,56
	Afounes	5,000	0,15	0,24	2658,82	0,92	-20,20		5,79	0,03	66,67	76,73



Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

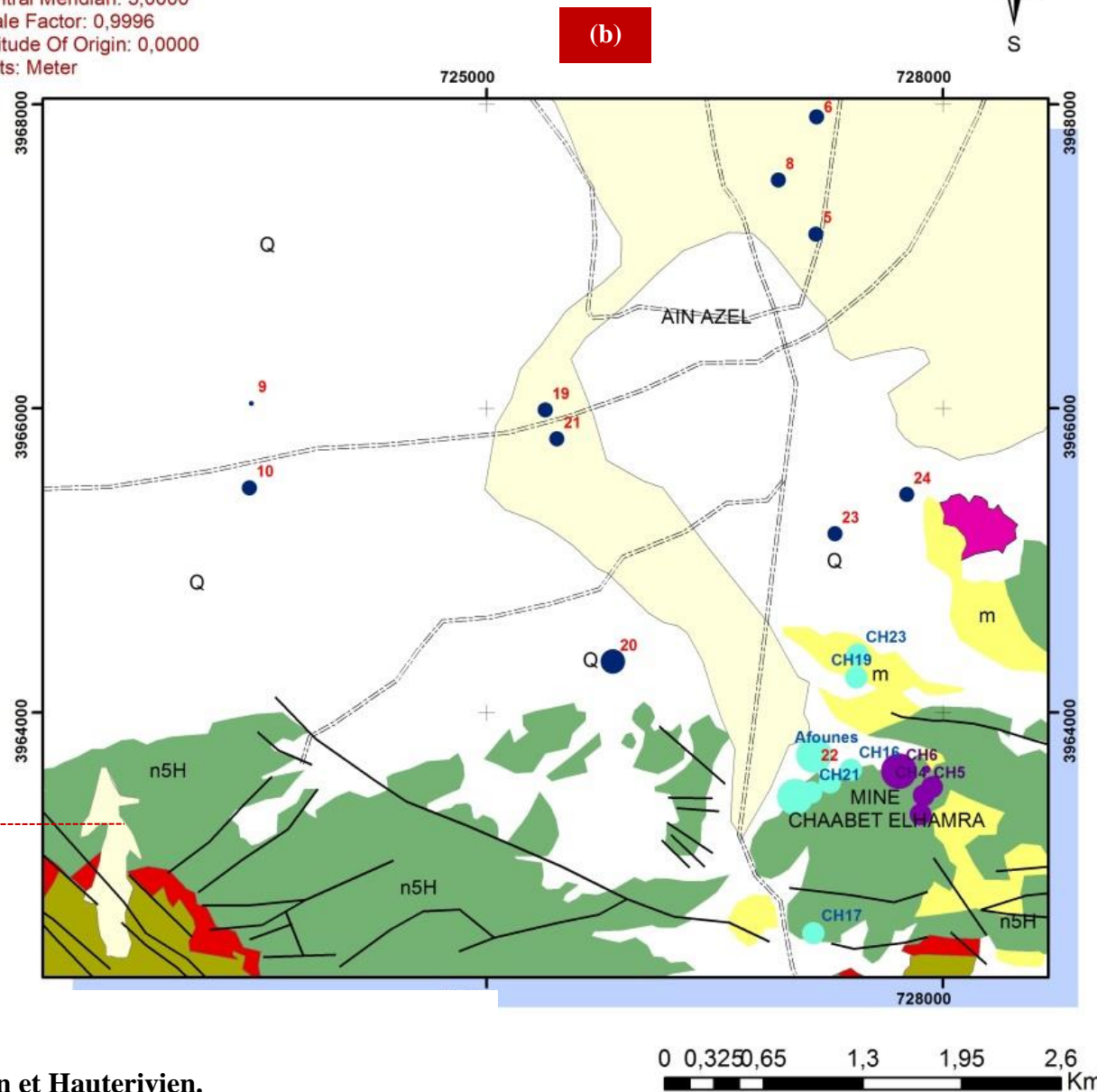
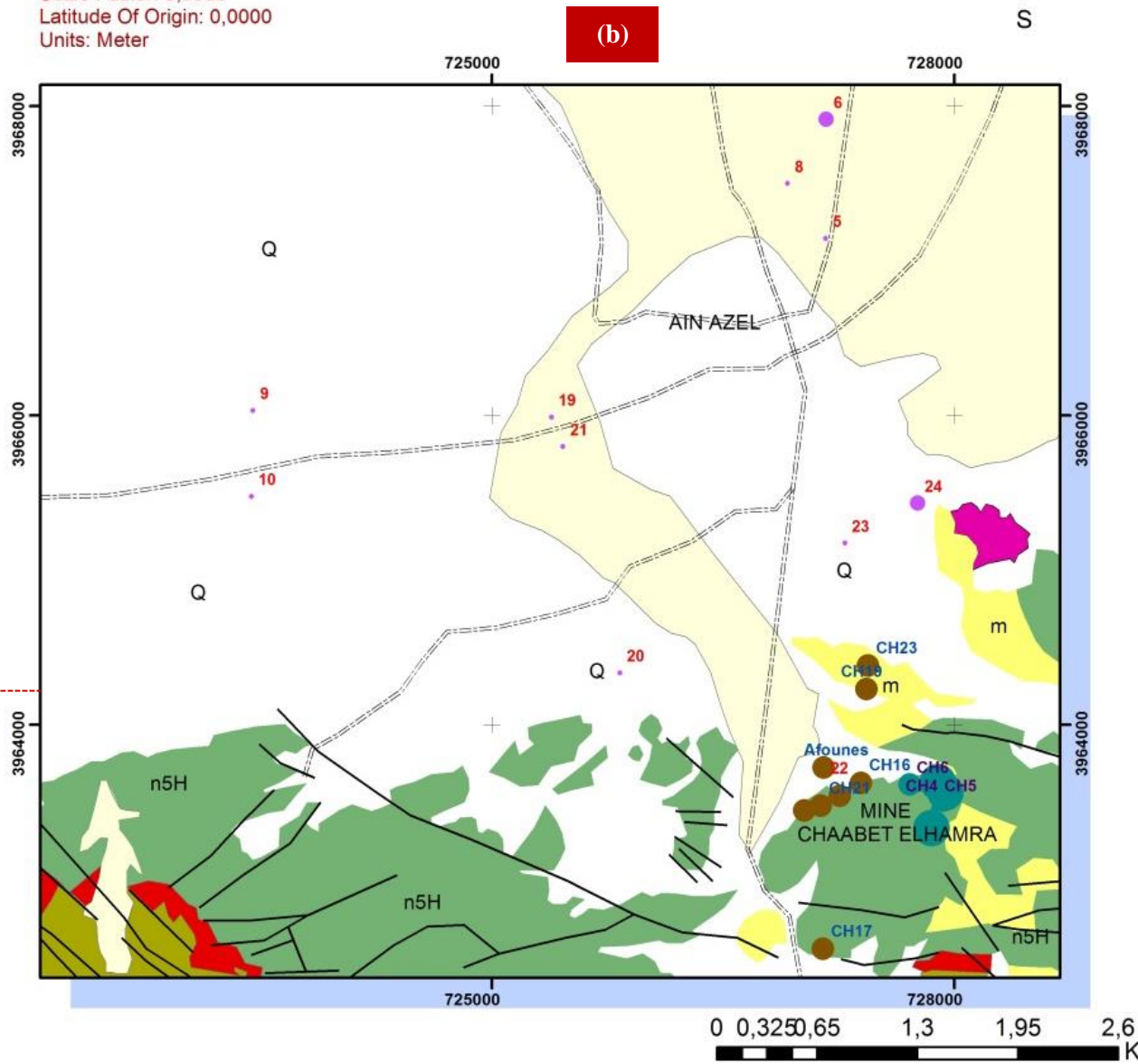
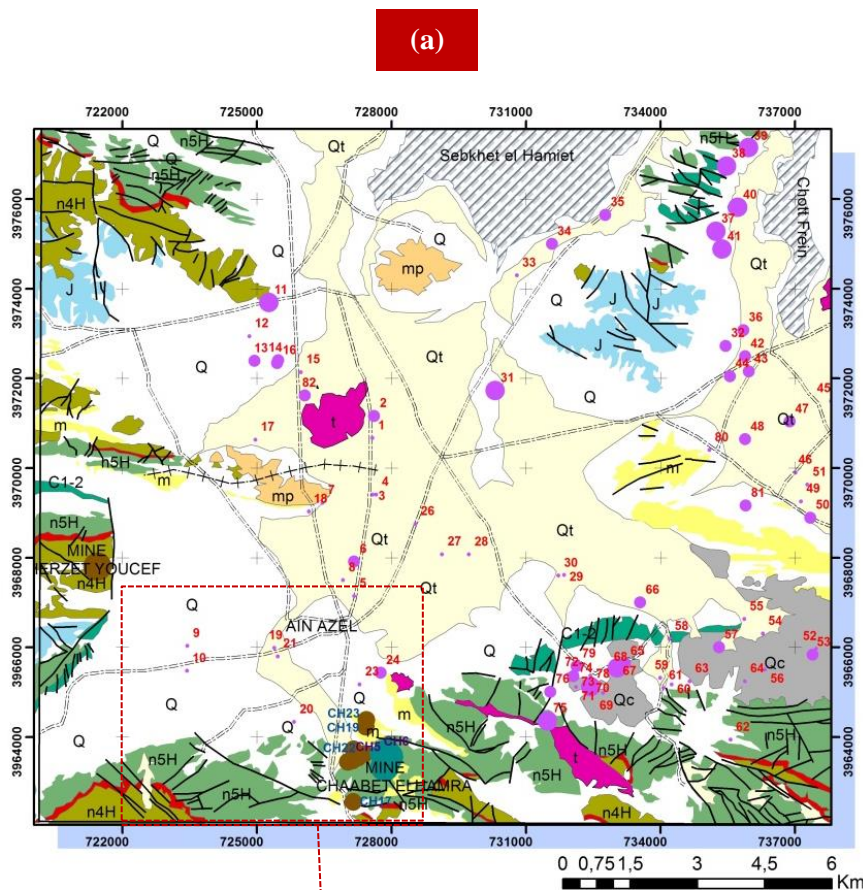
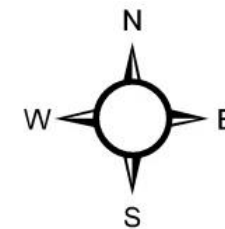


Figure A3.1 Variabilité spatiale du pH

(a) Tous les points prélevés.

(b) Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauteriviens.

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

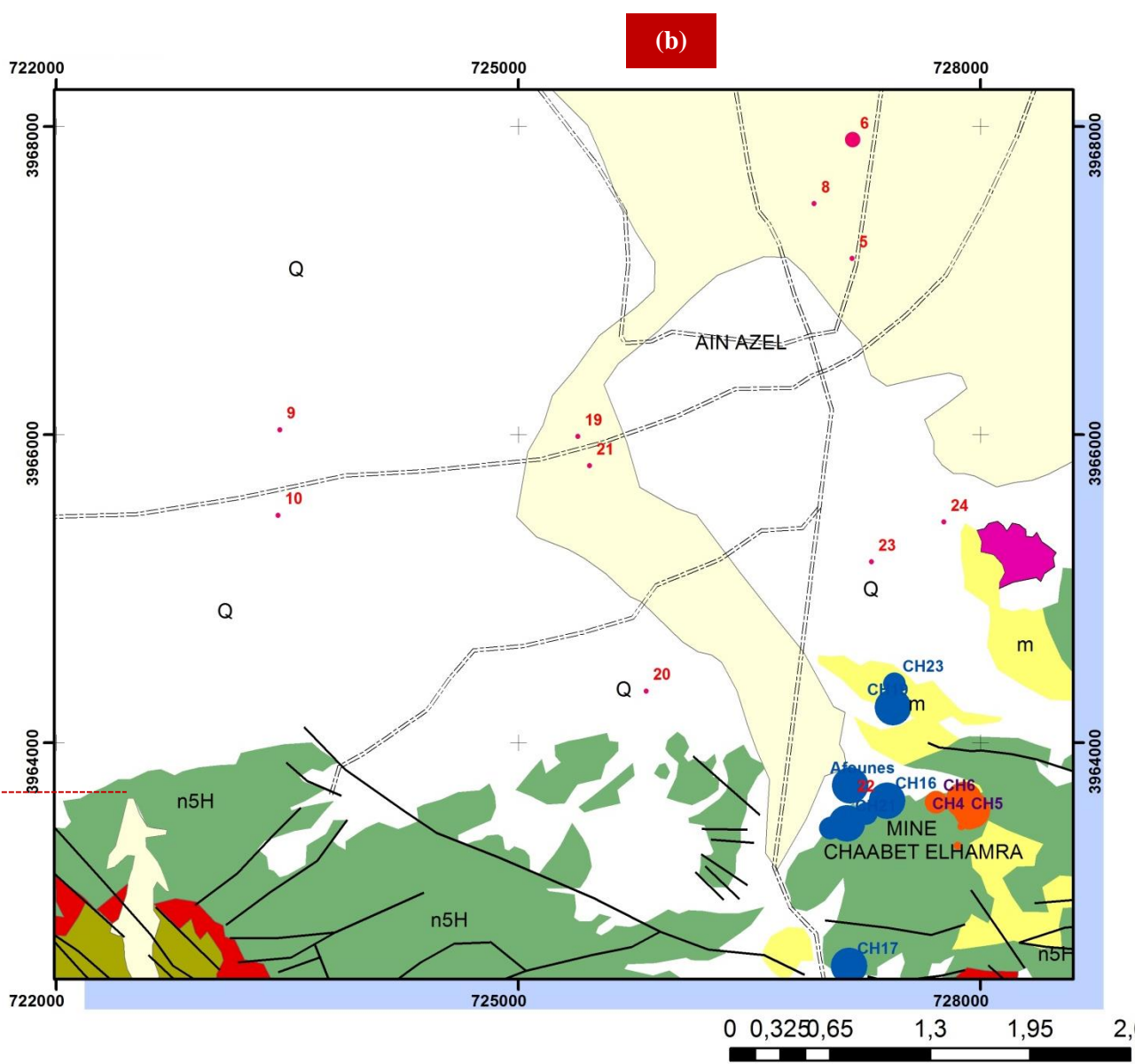
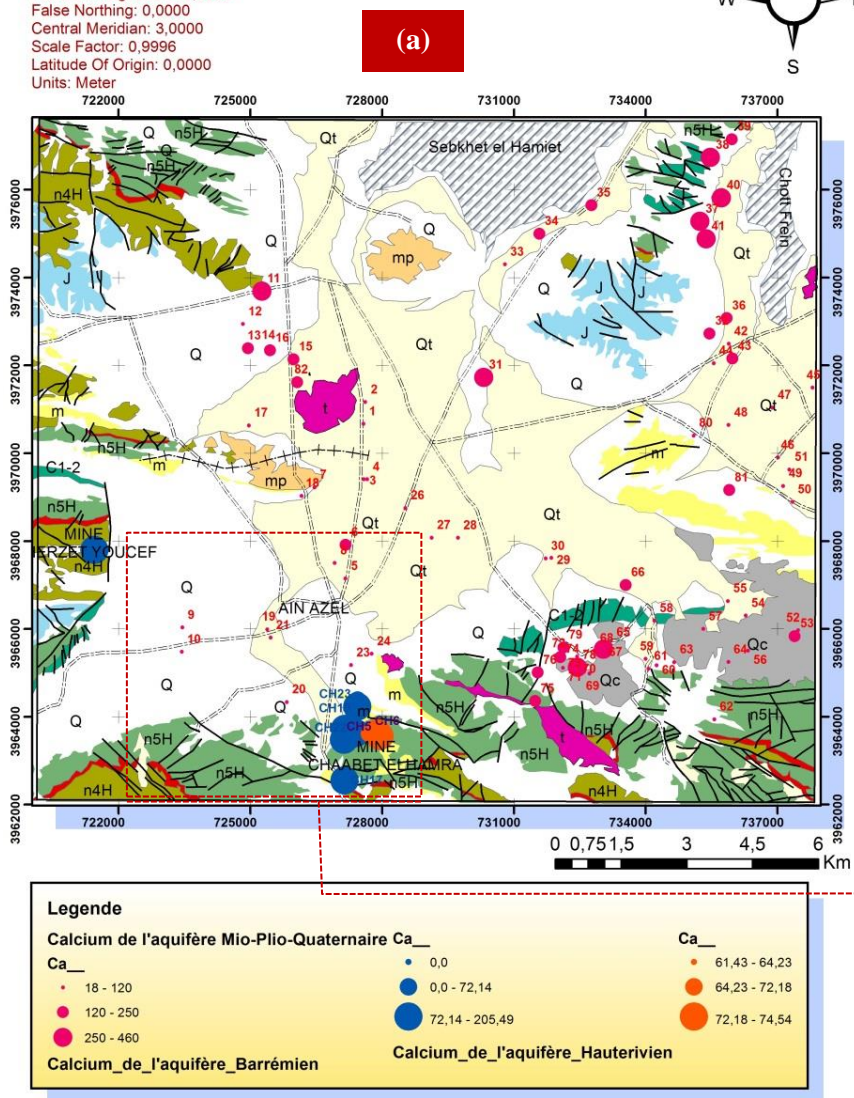
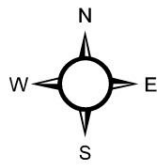


Legende

La Conductivité de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire CE	
Conductivité	CE
400 - 1400	0 - 866
1400 - 2500	868 - 734
2500 - 5800	734 - 774
Conductivité_de_l'aquifère_Barrémien	Conductivité_de_l'aquifère_Hauterivien

Figure A3.2 Variabilité spatiale du CE
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Legende

Calcium de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire Ca ₁		Ca ₂	
• 18 - 120	• 0,0	• 61,43 - 64,23	
• 120 - 250	• 0,0 - 72,14	• 64,23 - 72,18	
• 250 - 460	• 72,14 - 205,49	• 72,18 - 74,54	
Calcium_de_l'aquifère_Barrémien	Calcium_de_l'aquifère_Hauterivien		

Figure A3.3 Variabilité spatiale du Calcium
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

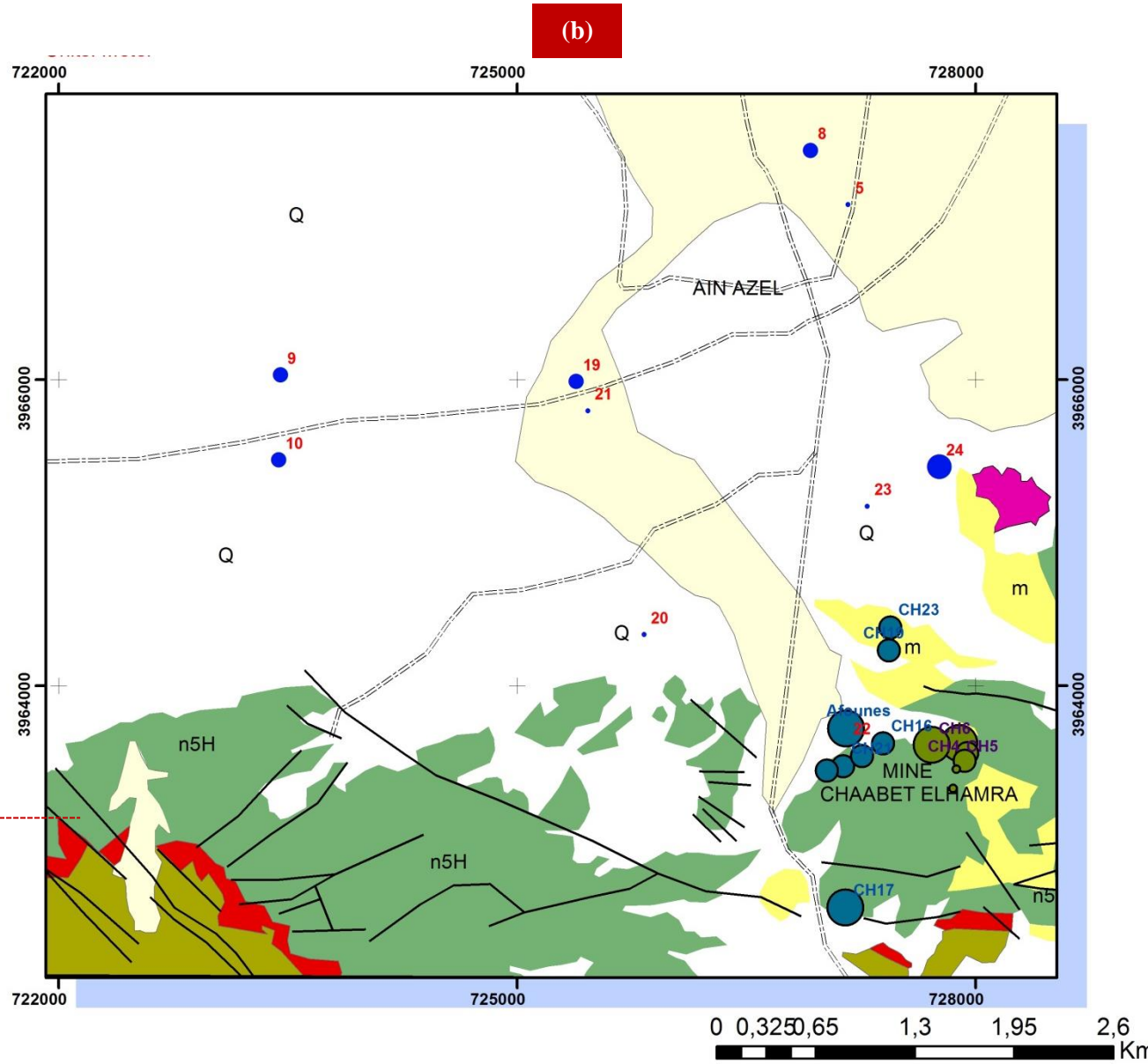
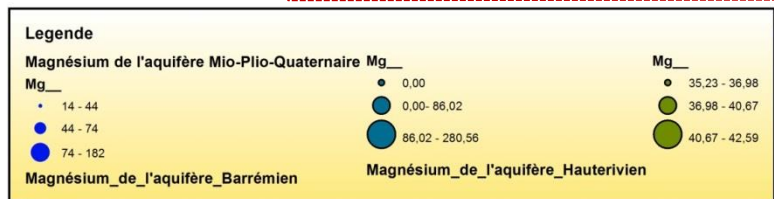
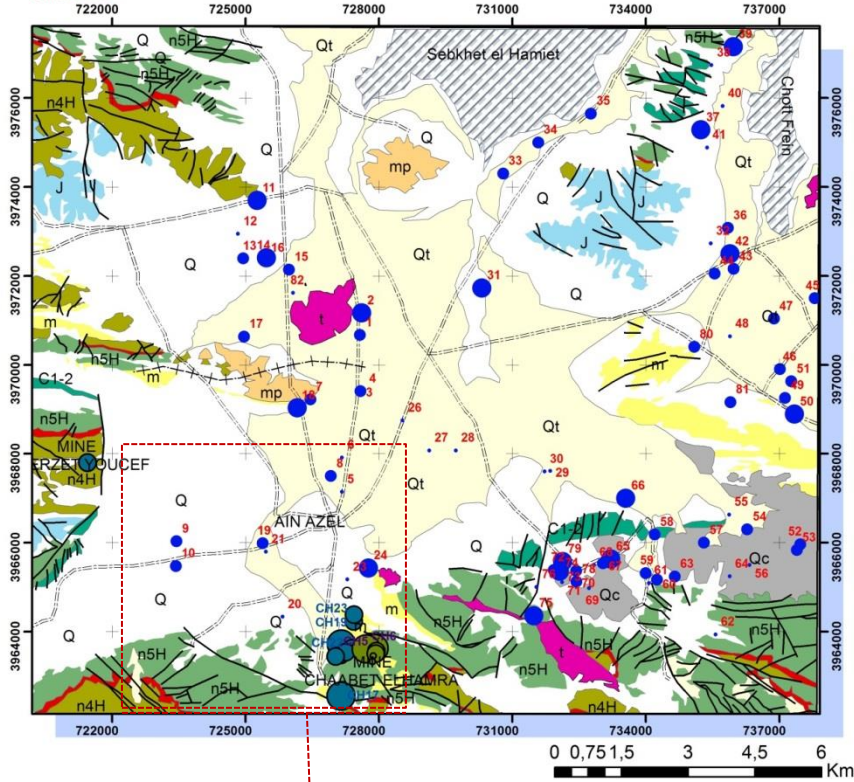
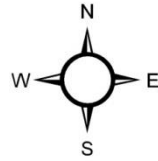
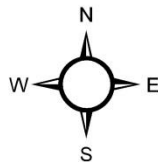
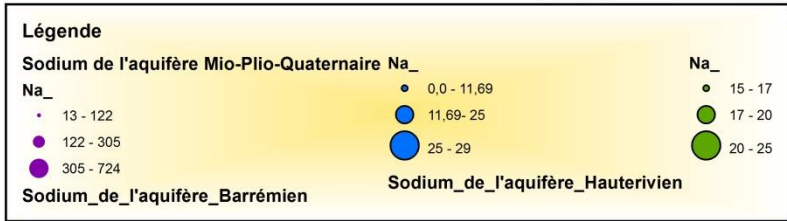
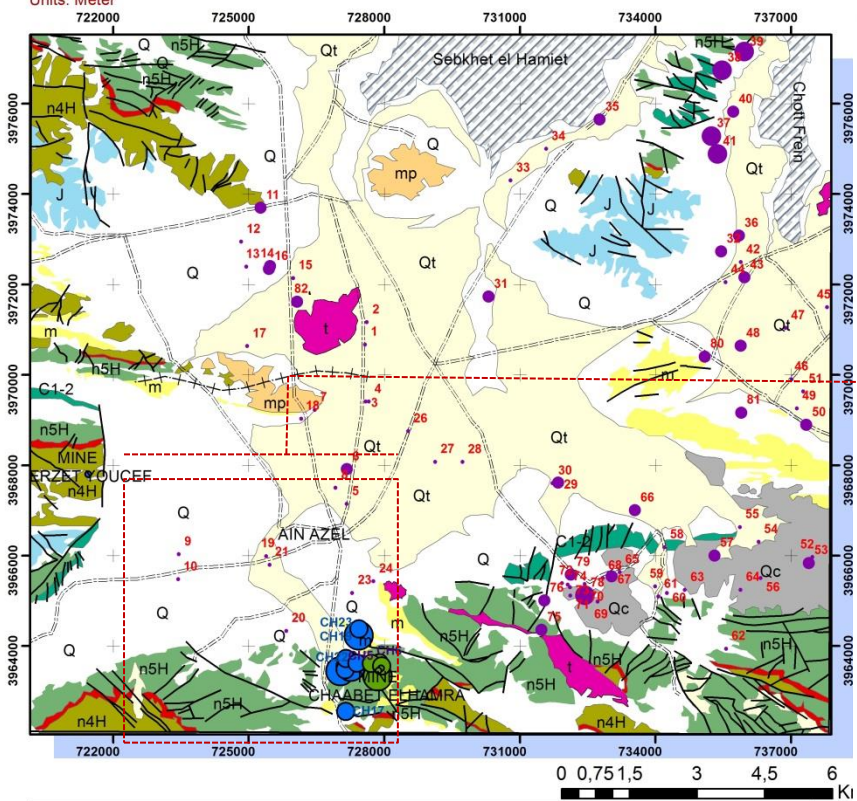


Figure A3.4 Variabilité spatiale du Magnésium
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



(a)



(b)

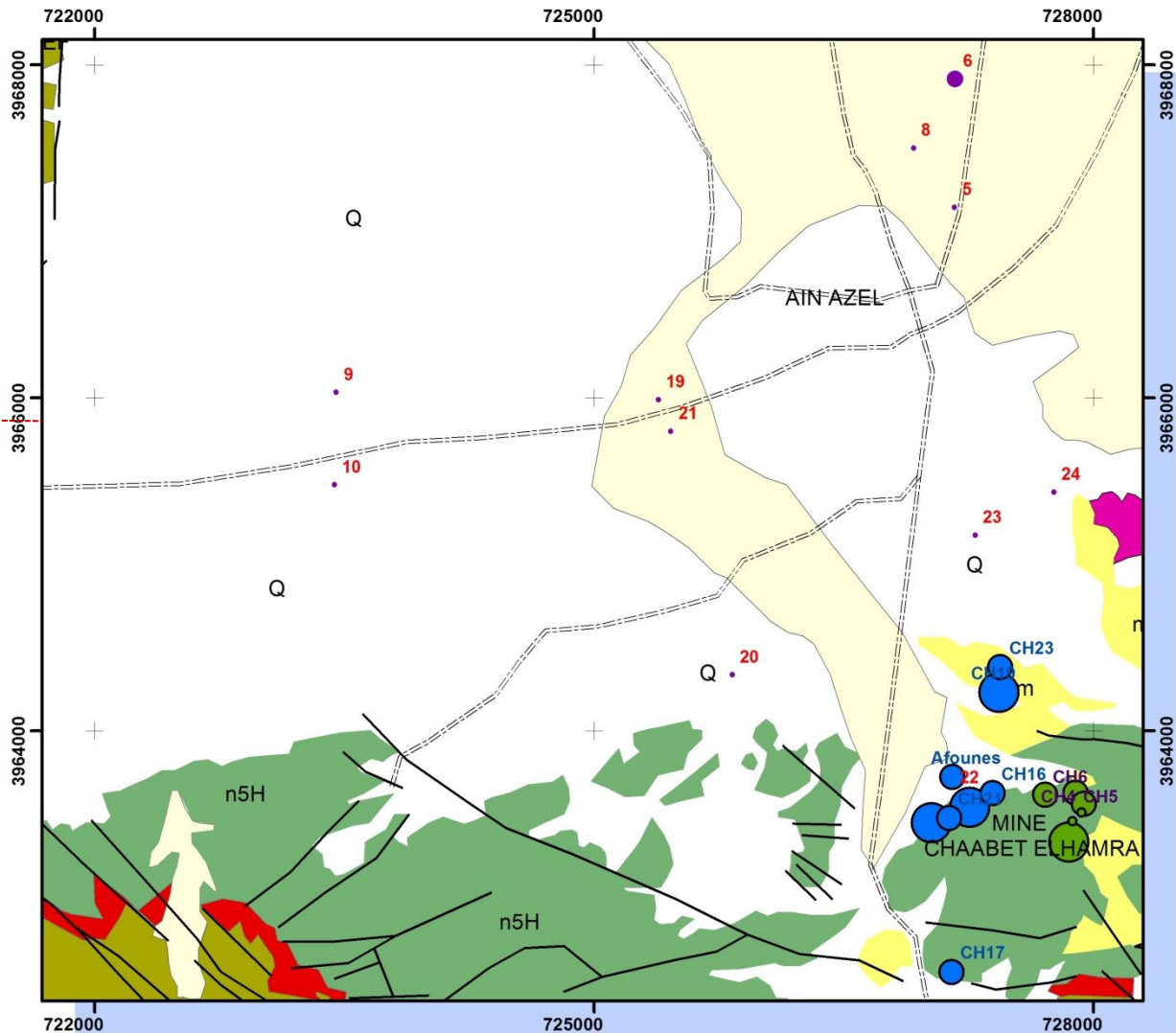
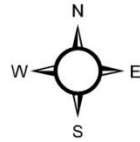
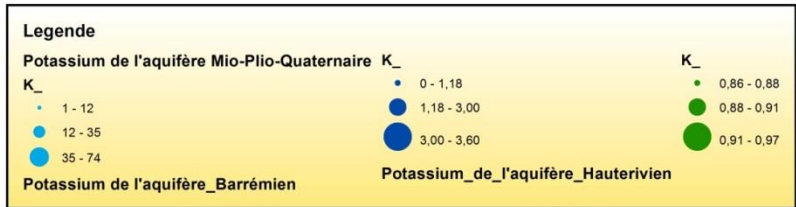
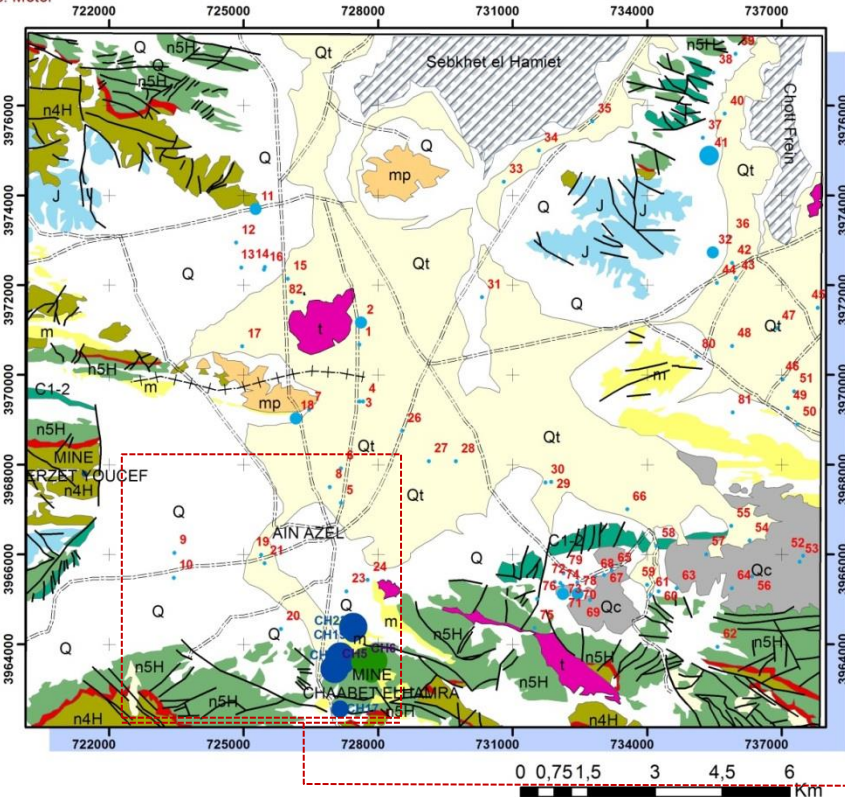


Figure A3.5 Variabilité spatiale du Sodium
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



(a)



(b)

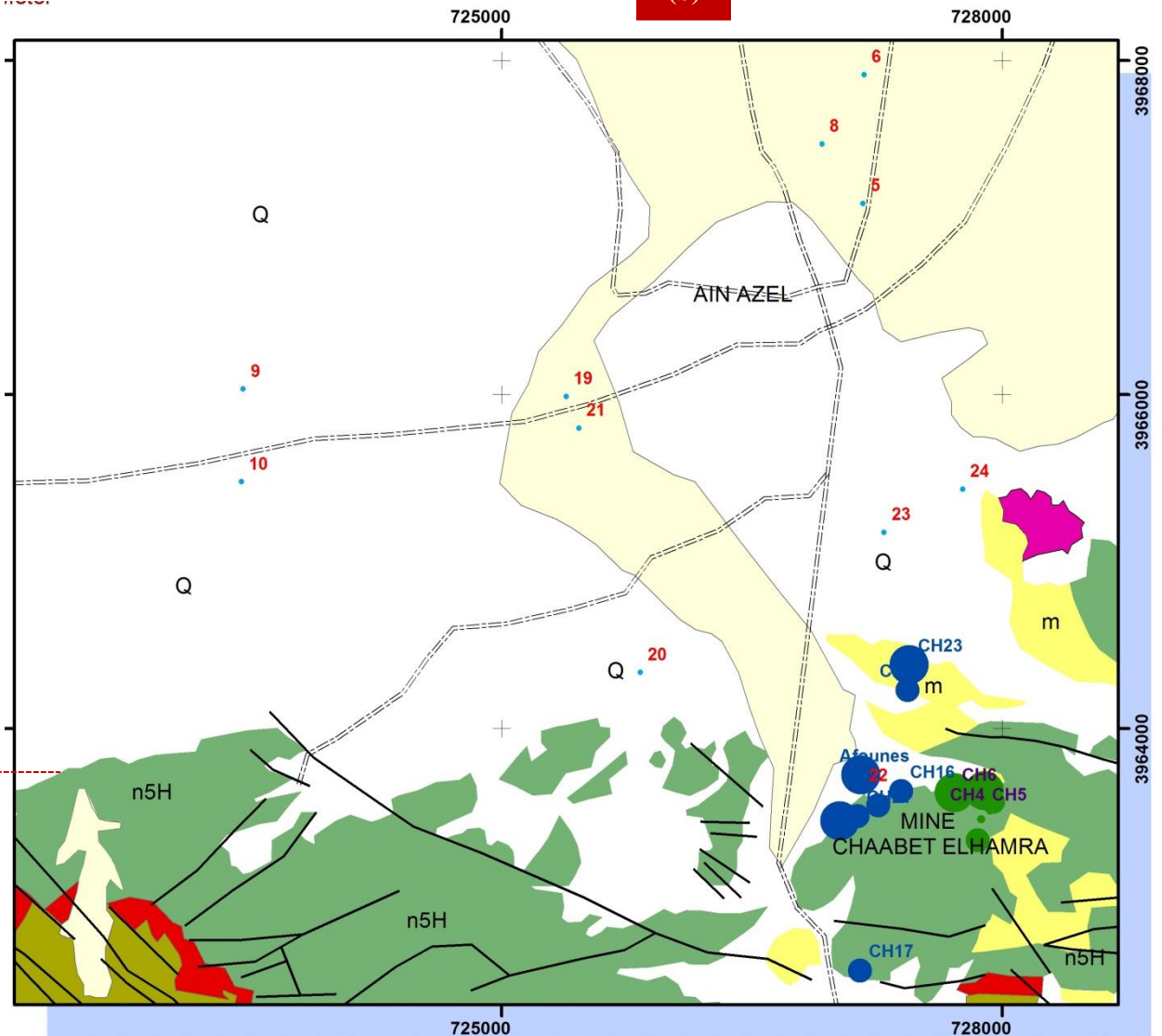


Figure A3.6 Variabilité spatiale du Potassium
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

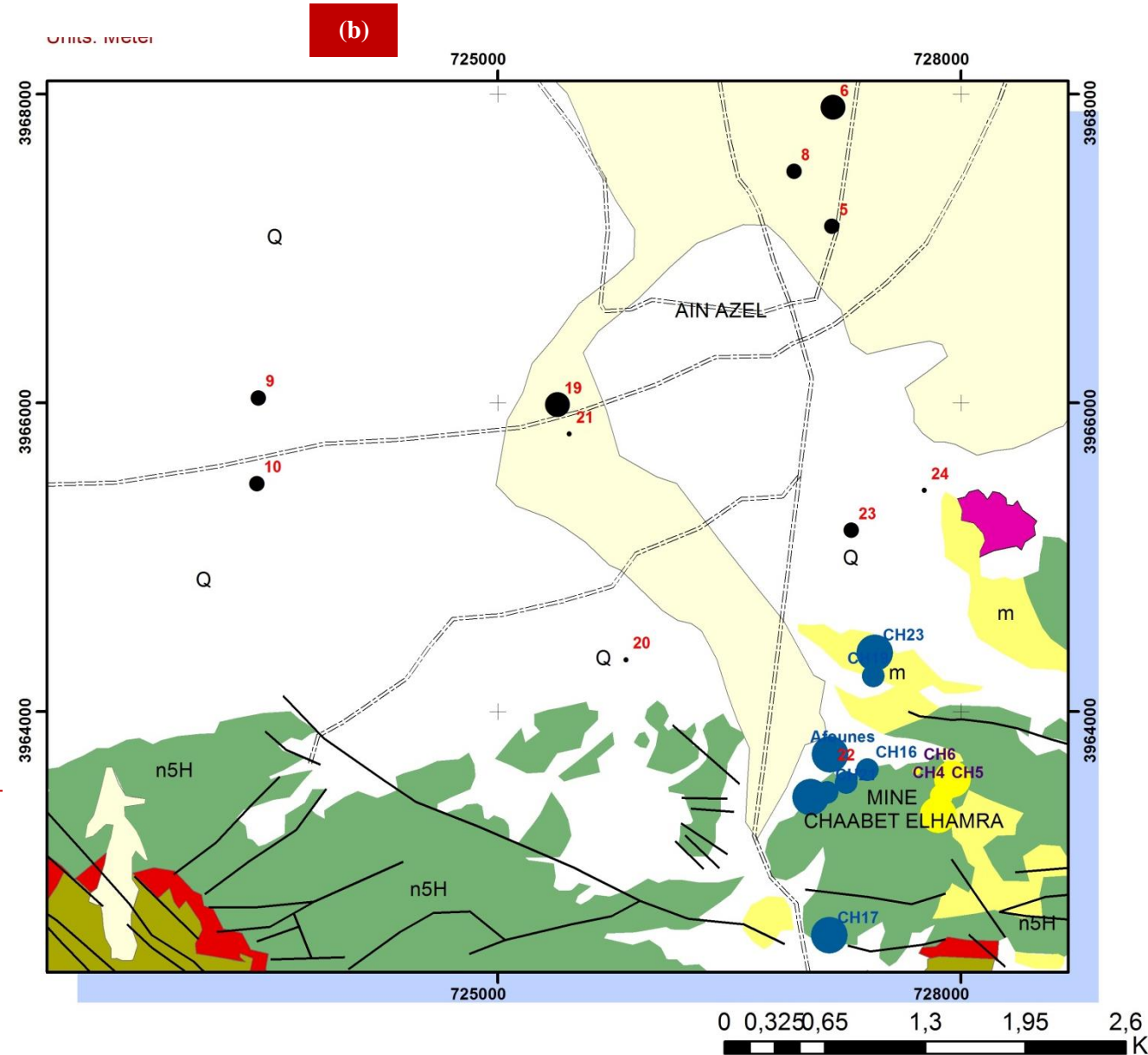
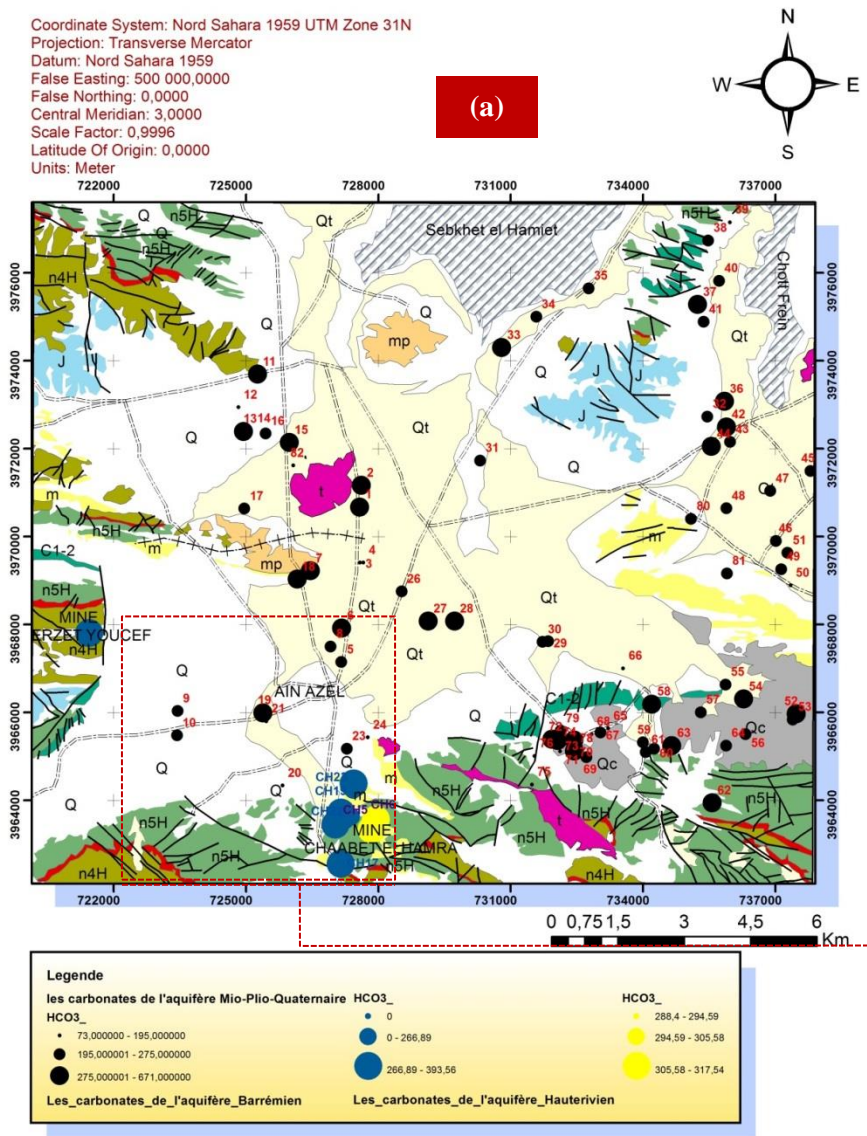


Figure A3.7 Variabilité spatiale du Bicarbonates
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

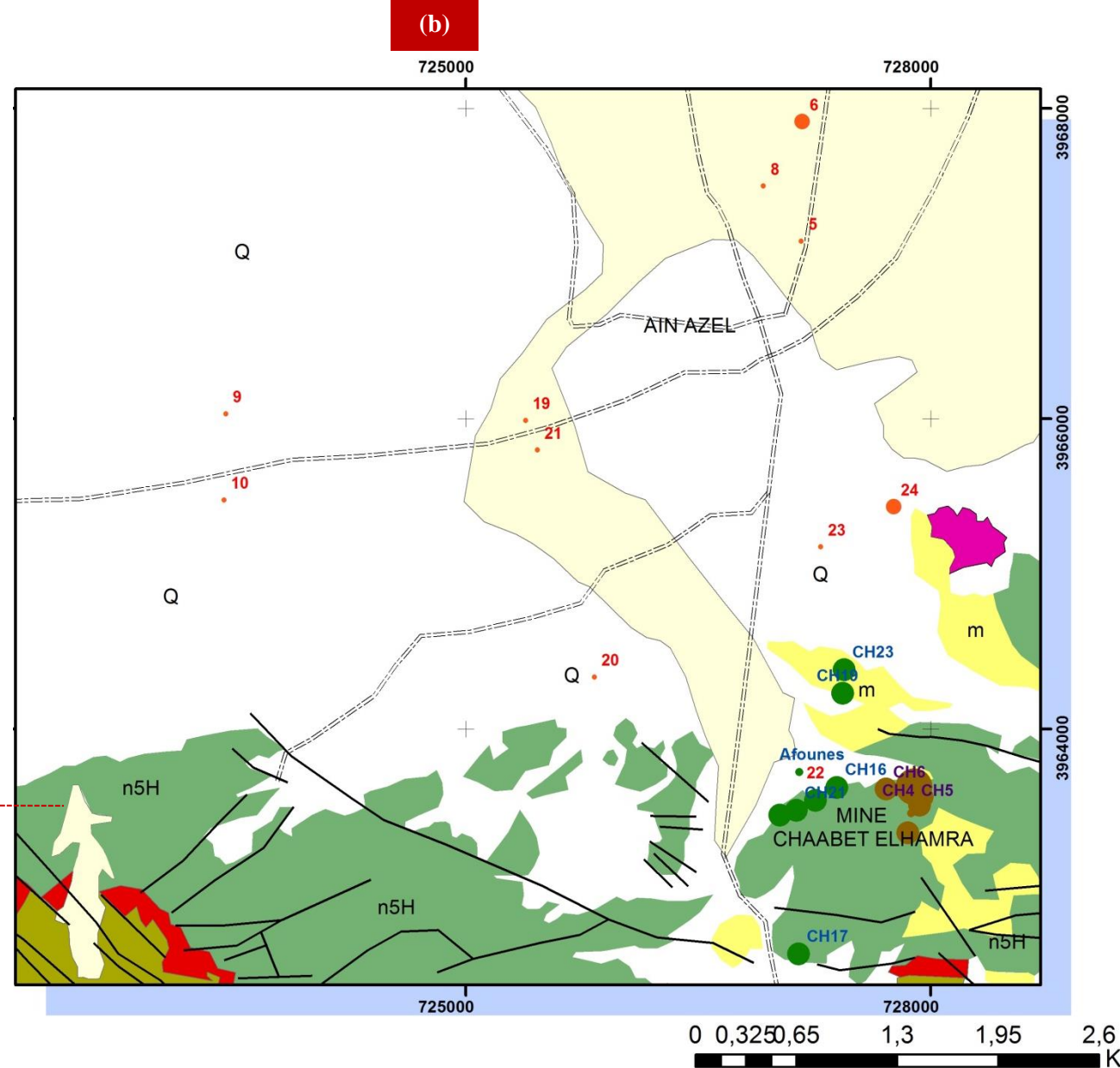
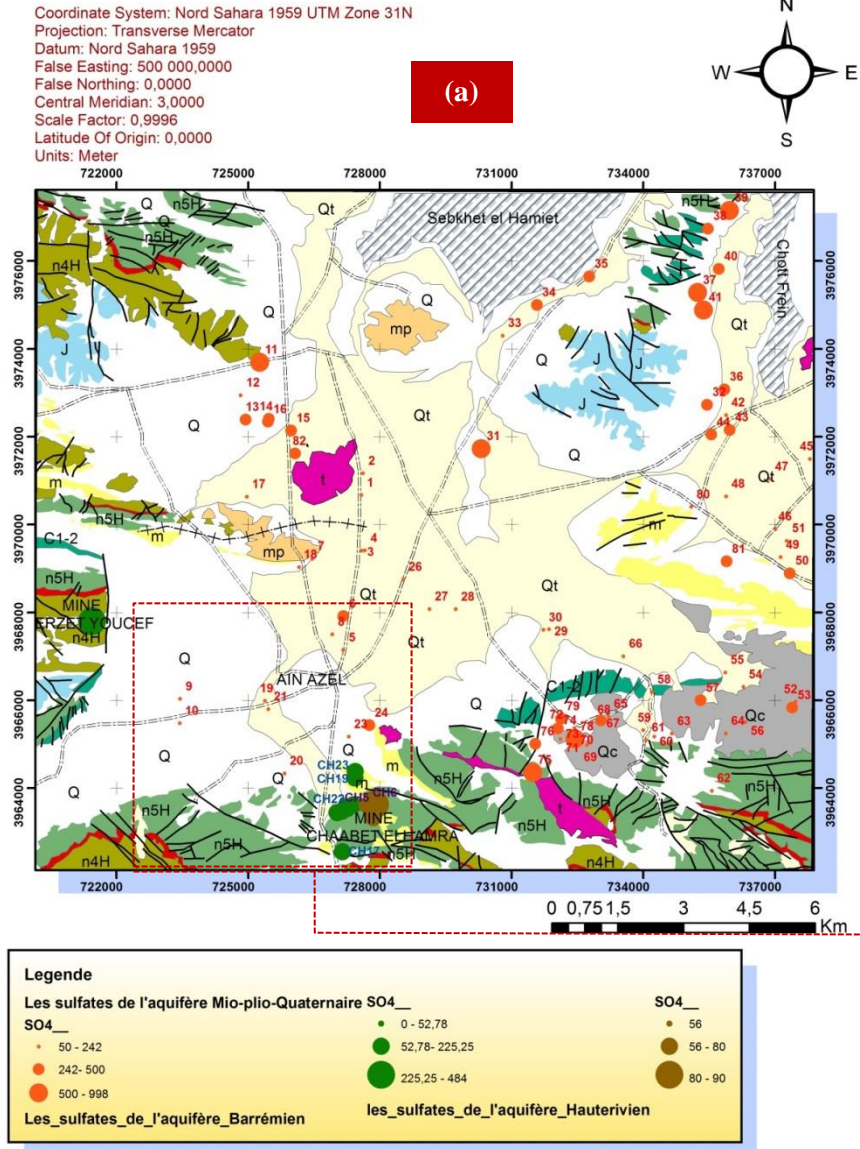


Figure A3.8 Variabilité spatiale des Sulfates
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

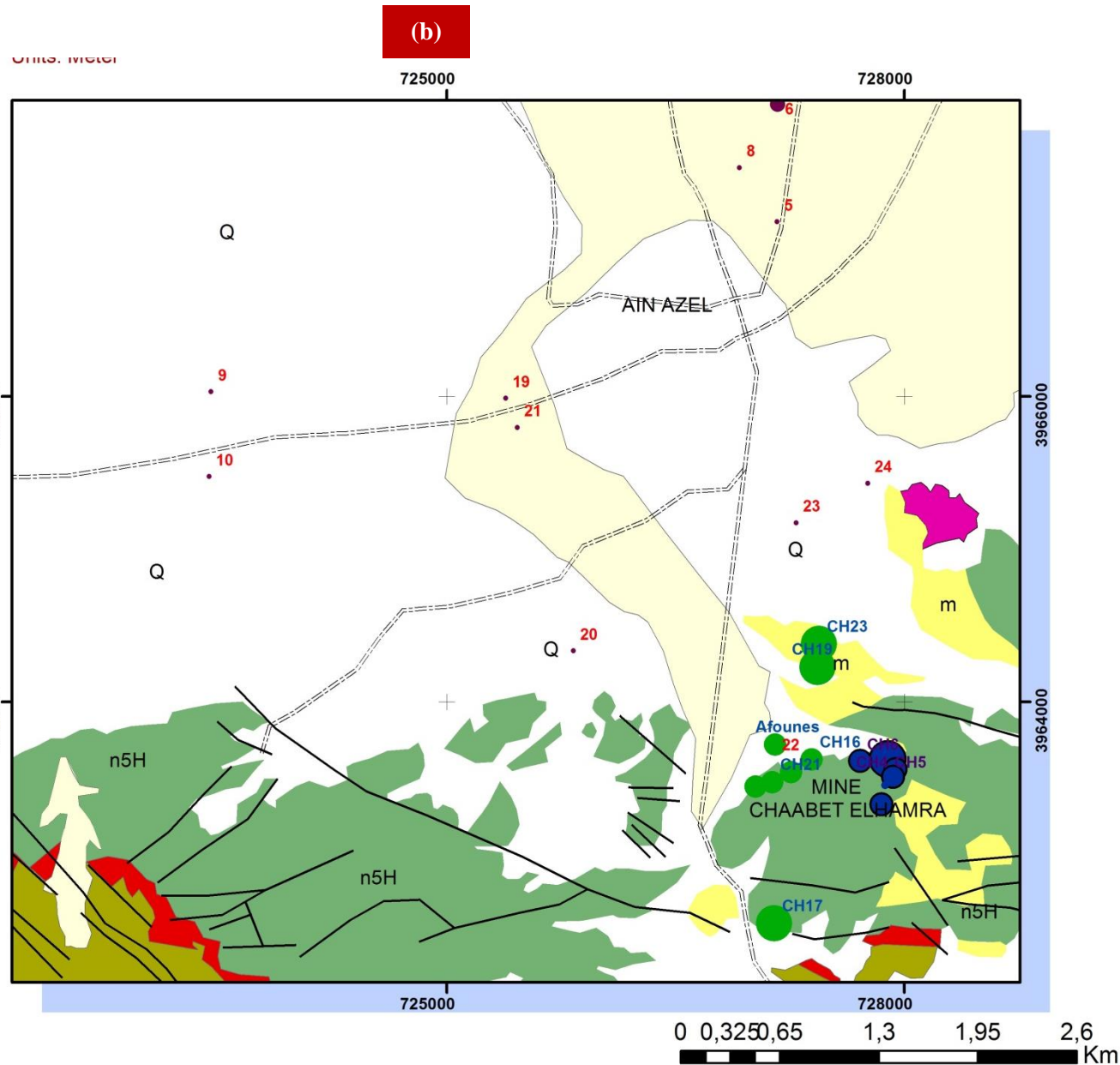
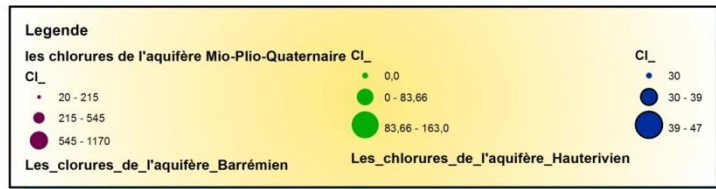
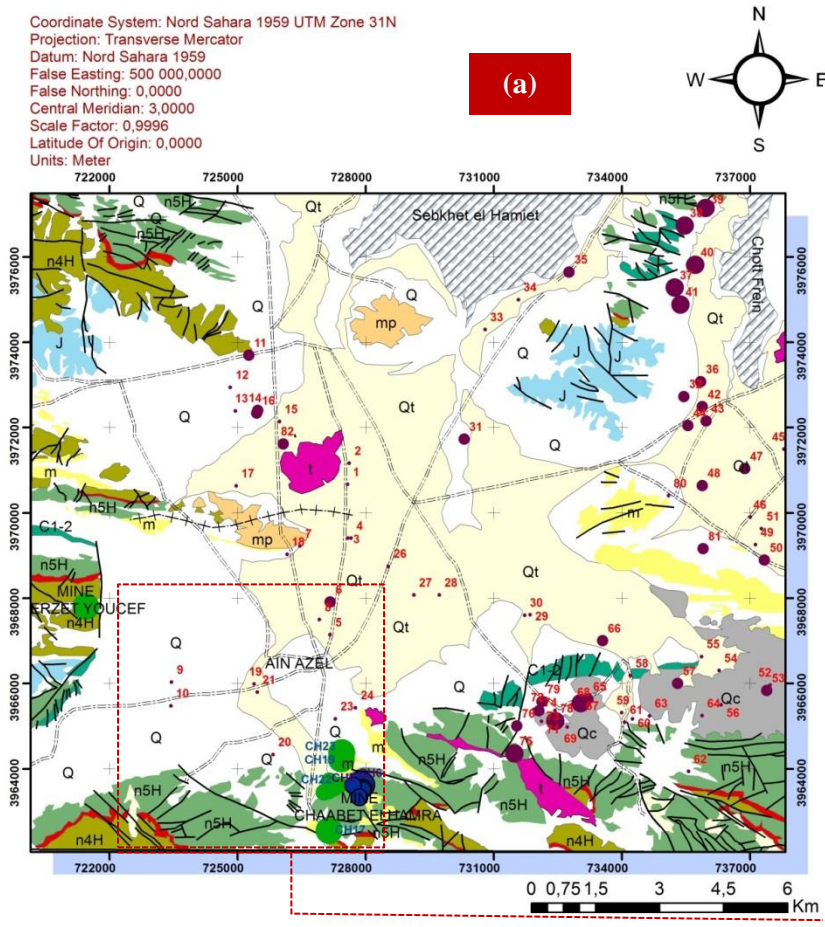


Figure A3.9 Variabilité spatiale des Chlorures
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

Coordinate System: Nord Sahara 1959 UTM Zone 31N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: Nord Sahara 1959
 False Easting: 500 000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: 3,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

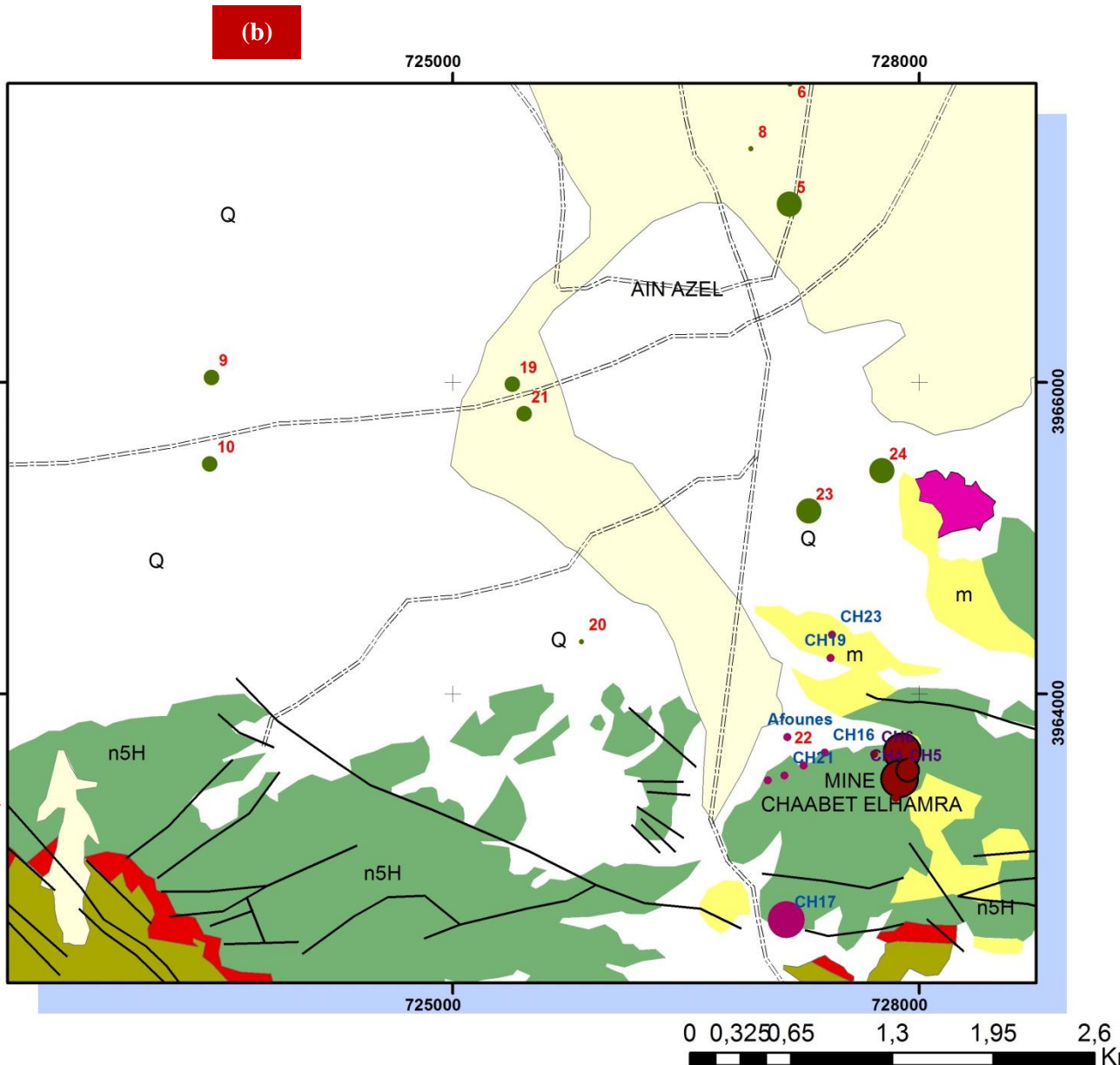
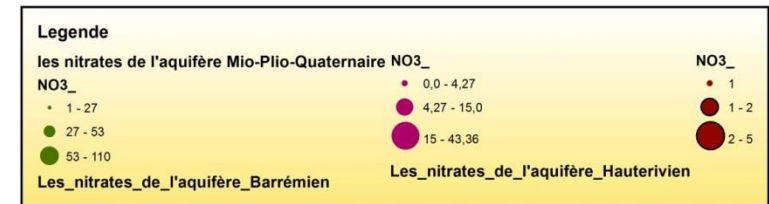
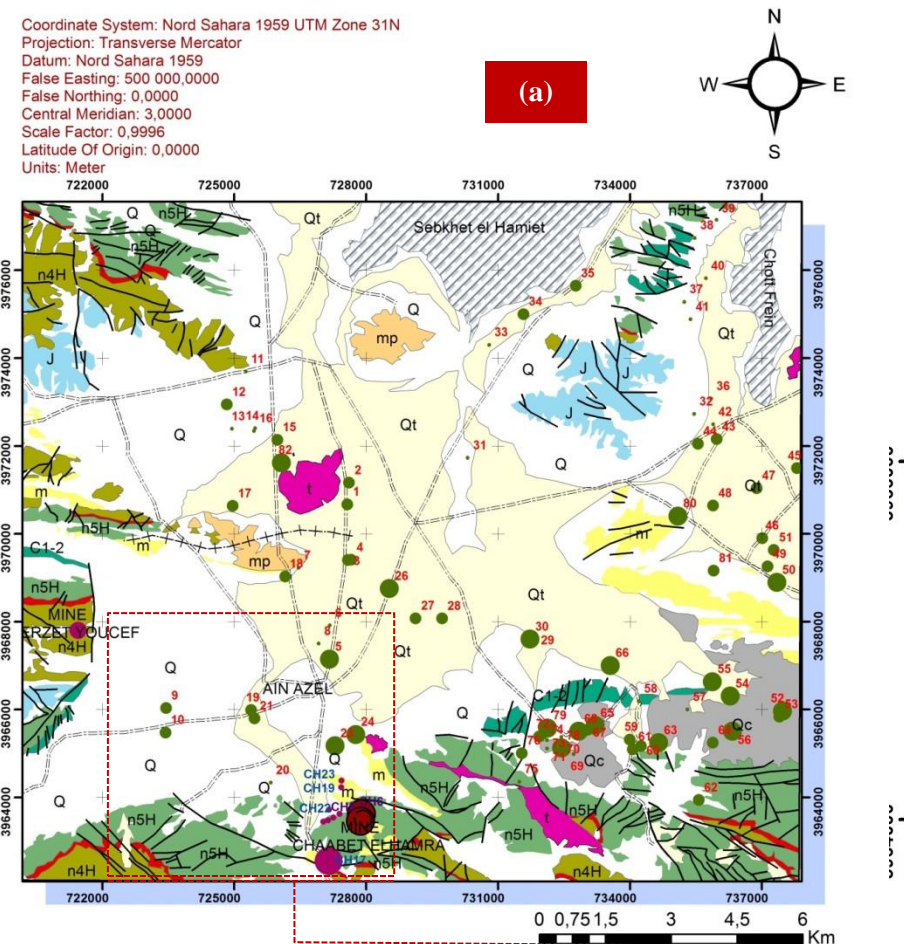


Figure A3.10 Variabilité spatiale des Nitrates
 (a) : Tous les points prélevés
 (b) : Zoom-avant des forages du Barrémien et Hauterivien

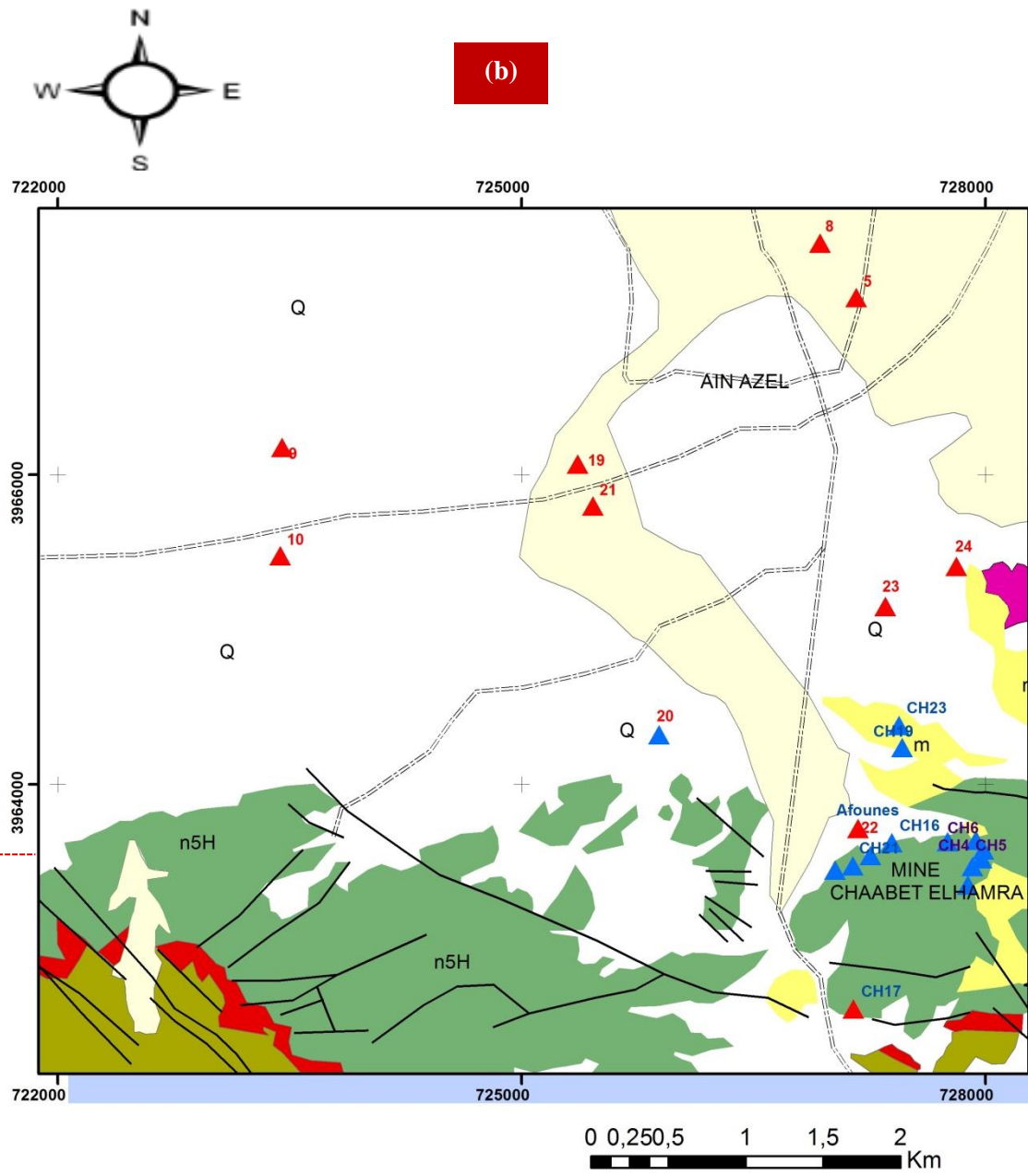
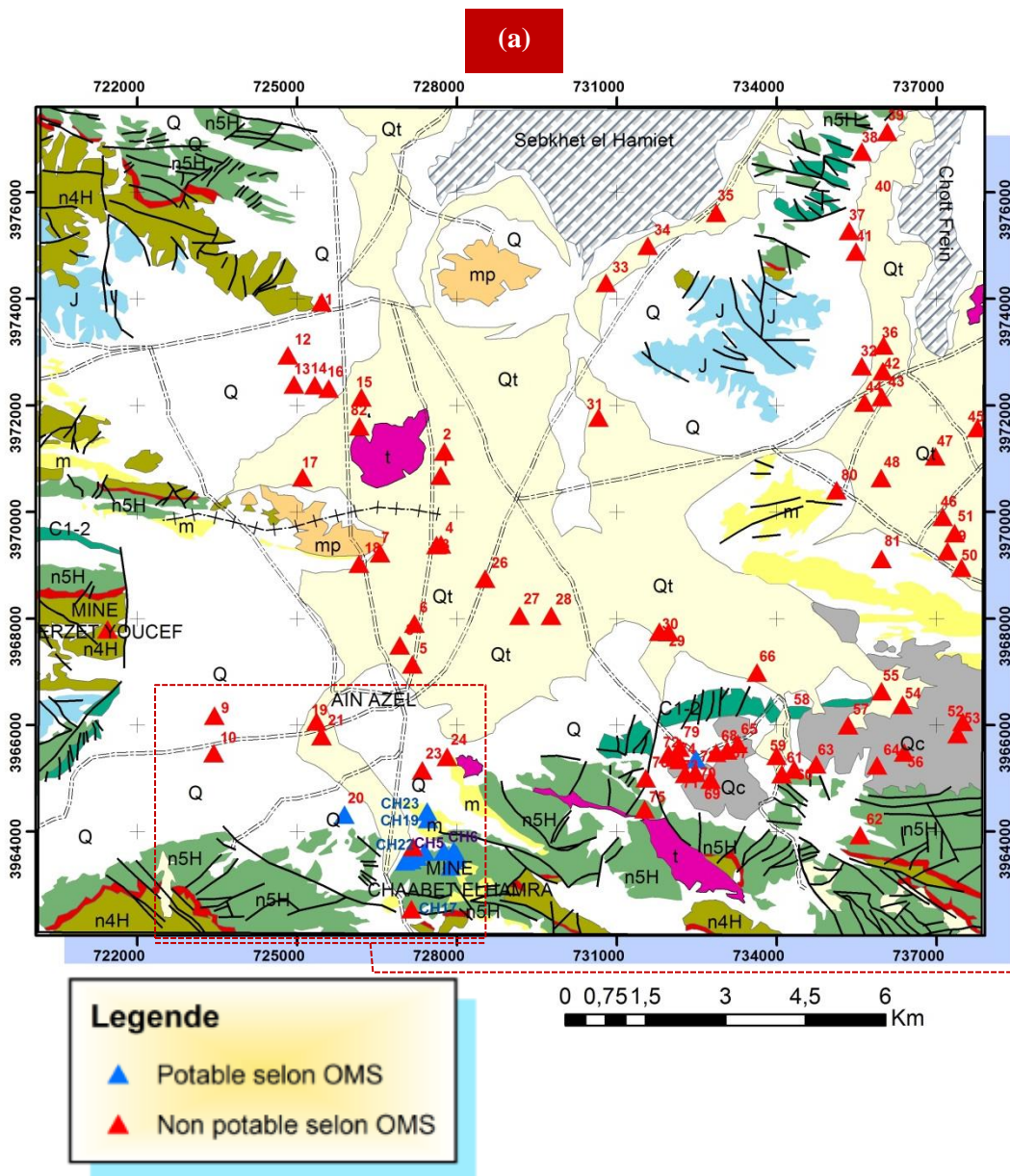


Figure A3.11 Potabilité des eaux selon OMS, 2008 (a): vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra.

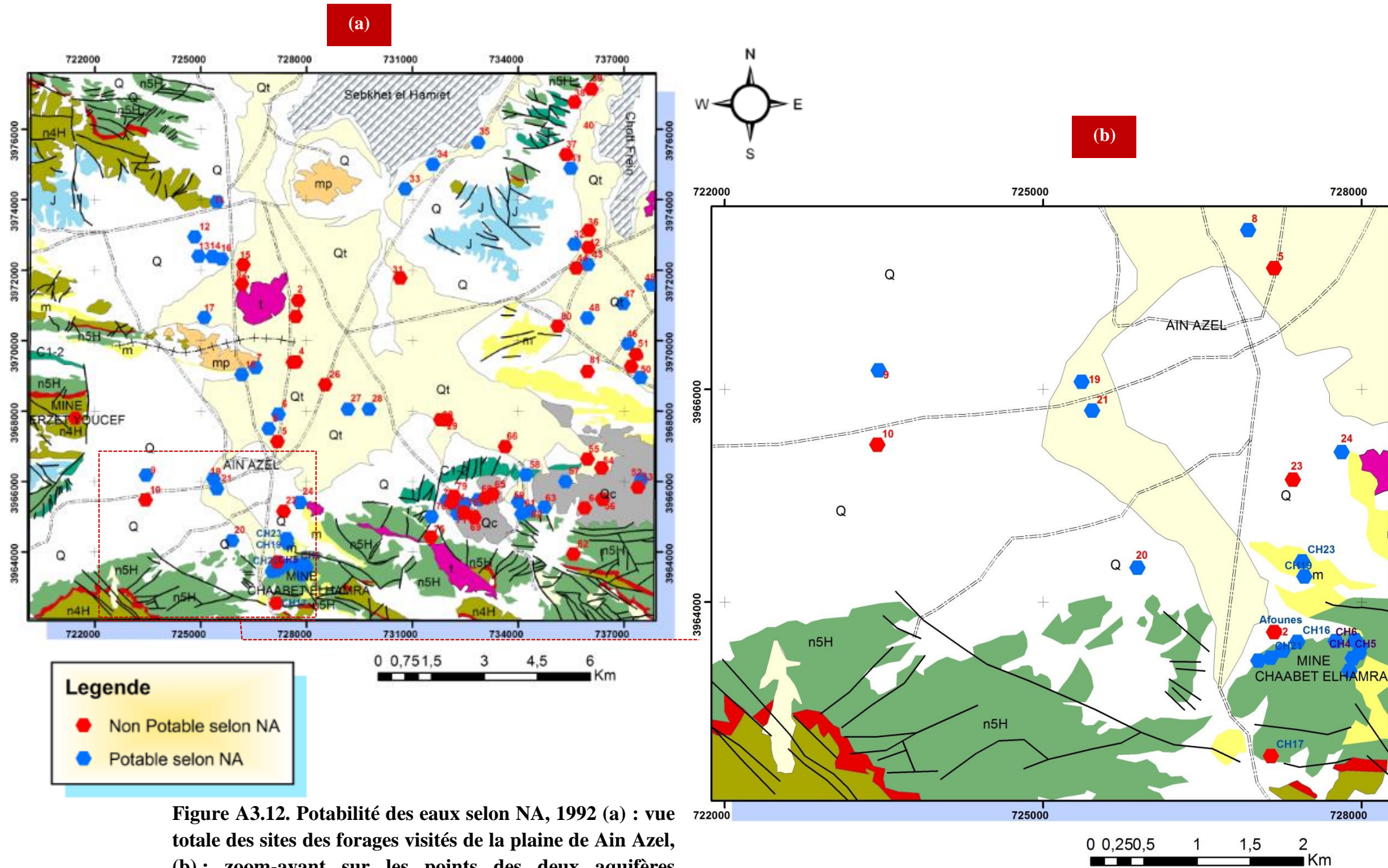


Figure A3.12. Potabilité des eaux selon NA, 1992 (a) : vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra.

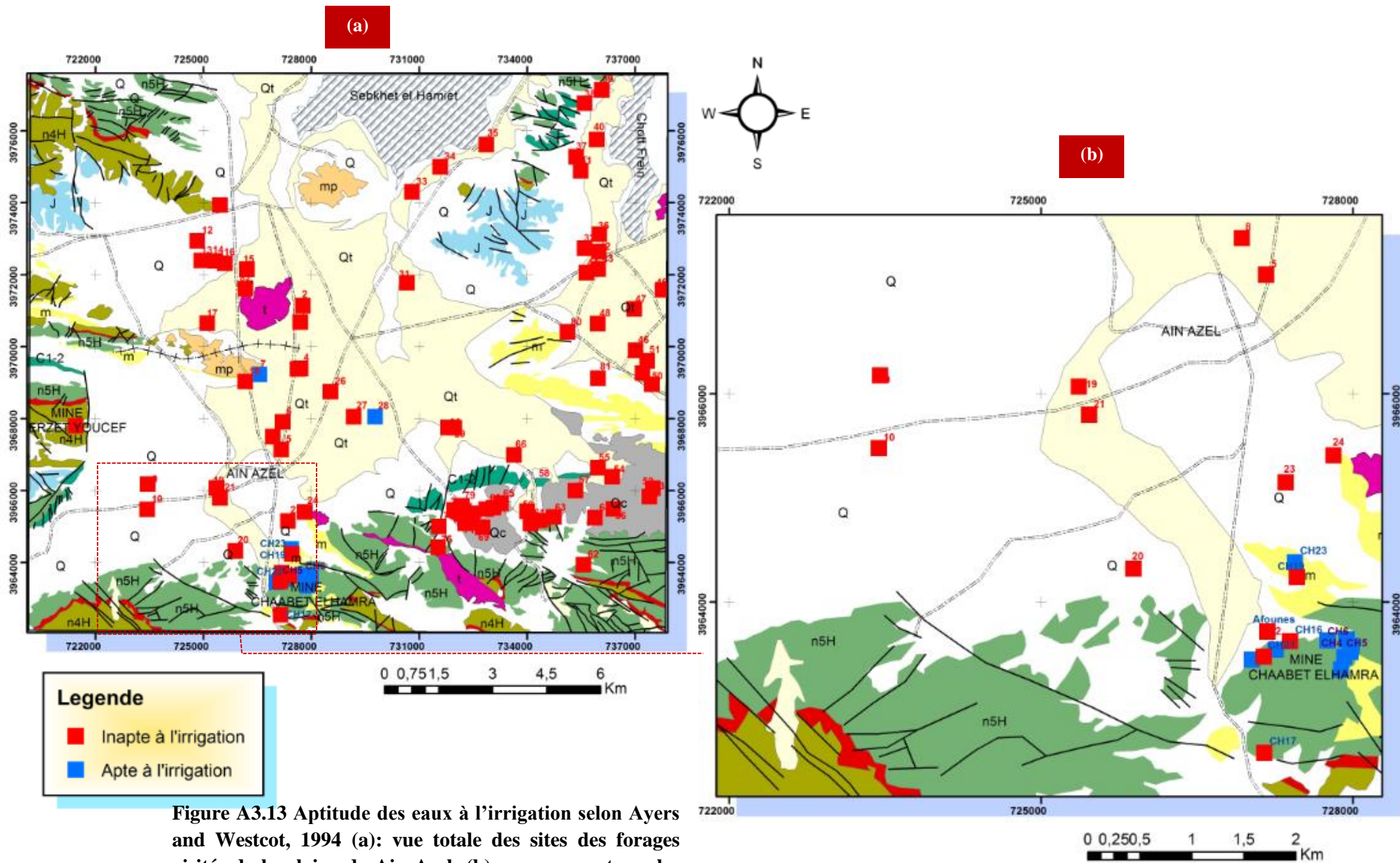


Figure A3.13 Aptitude des eaux à l'irrigation selon Ayers and Westcot, 1994 (a): vue totale des sites des forages visités de la plaine de Ain Azel, (b) : zoom-avant sur les points des deux aquifères Barrémien et Hauterivien du gisement de Chaabet el Hamra.

الملخص:

تعرف ولاية سطيف في الفترة الأخيرة موجة جفاف حادة وشدا كبيرا في كمية تساقط الأمطار و الثلوج، وبدرجة أكبر المناطق الجنوبية منها، وبالخصوص منطقة عين أزال التي تتميز بمناخها شبه جاف، مما أدى الى تراجع هيب في مستوى المياه الجوفية المسجل في الآبار القليلة العمق، و التي كانت هي الملبأ الوحيد لسكان المنطقة بغية التزود بالمياه الصالحة للشرب وكذا سقي الأراضي الزراعية، ولا سيما ان المنطقة فلاحية. و بما ان المنطقة تزخر بعدة منابع للرياح و الزنك كالشعبة الحمراء وخرزة يوسف، واللذان يدورهما يحويان كميات كبيرة من المياه الجوفية و التي شطبت مانقا كبيرا في عملية الاستغلال المنجمي، فقد تم حفر عدة آبار ارتوازية بغية خفض منسوب المياه لمواصلة اشغال الاستغلال المنجمية، وكذا تزويد المنطقة بالمياه الصالحة للشرب و سقي الأراضي الزراعية.

وبهدف دراسة نوعية هذه المياه ومدى صلاحيتها للشرب والسقي بما انما في منطقة منجمية، فقد أجريت عدة حملات معاينة (2012- 2018) اين تمع معاينة كل من طبقة المياه الجوفية الصوتيرفيانية بالشعبة الحمراء، والبارميانية في كل من الشعبة الحمراء و خرزة يوسف، وكذا الميو بليو كواترنارية بمنطقة عين أزال من خلال اجراء جملة من التحليل الفيزيائية (T°, pH, CE, RS)، الكيميائية (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) وكذا المعادن الثقيلة (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb)، اين استعملت نتائجها في استنباط عدة معايير: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d, RC, HQ, ADD.

وكتيية اساسية لهذا العمل فان المياه الجوفية لذيين الطبقتين المانيتين العميقتين الموجودتين في تربياب جيولوجية من عمر الحقبة الطباشيرية السفلية (هوتيرفيان وبارميان)، و كذا المسطح المائي العلوي الميو بليو كواترناري، تعرف درجة من التلوث تمنعها من ان تكون صالحة للشرب او السقي.

الطلمار المتألمة: هوتيرفيان، بارميان، طبقة مياه جوفية، نوعية، سطيف، عين أزال

Résumé :

La wilaya de Sétif a récemment connu une grave sécheresse et une grande rareté des précipitations et de la neige, et dans une plus grande mesure dans les zones méridionales, et en particulier la région de Ain- Azel, qui se caractérise par son climat semi-aride, ce qui a entraîné un terrible rabattement du niveau des eaux souterraines enregistré dans les puits de faible profondeur, qui étaient le seul refuge pour les habitants de la région afin de fournir de l'eau potable, ainsi que l'irrigation des terres fertiles, d'autant plus que la zone est agricole.

Étant donné que la zone regorge de plusieurs mines de plomb et de zinc, telles que Chaabet –el-Hamra et Kherzet- Youcef, qui contiennent à leur tour de grandes quantités d'eau souterraine, qui ont été un obstacle majeur dans le processus d'exploitation minière, plusieurs forages ont été forés afin de rabattre le niveau piézométrique pour poursuivre l'exploitation minière, ainsi que pour fournir à la région de l'eau potable et d'irrigation.

Afin d'étudier la qualité de ces eaux et leur aptitude à la consommation, et à l'irrigation puisqu'elles se trouvent dans une zone minière, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été menées (2012-2018), pour les aquifères Hauterivien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra, Barrémien dans le gisement de Chaabet-el-Hamra et Kherzet-Youcef, ainsi que le Mio-Plio-Quaternaire dans la plaine de Ain- Azel, afin de réaliser une série d'analyses : physiques (T°, pH, CE, RS), chimiques (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) ainsi que des métaux lourds (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), où leurs résultats ont été utilisés dans l'estimation de plusieurs indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d, ADD, HQ et RC.

Et comme résultat- clé de ce travail, les eaux souterraines de ces deux aquifères profonds, Hauterivien et Barrémien, et la nappe d'eau superficielle du Mio-Plio-Quaternaire, connaissent un degré de pollution qui l'empêche d'être potable ou à utiliser pour l'irrigation.

Mots clés : Hauterivien, Barrémien, Aquifère, Qualité, Sétif, Ain- Azel.

Abstract:

The wilaya of Setif has recently experienced a severe drought and a great scarcity of precipitation and snow, and to a greater extent the southern areas, and in particular the region of Ain-Azel, which is characterized by its semi-arid climate, this has led to a terrible drop in the level of groundwater recorded in the shallow wells, which were the only refuge for the inhabitants of the region to provide drinking water as well as irrigation of fertile land, especially since the area is agricultural.

Since the area is full of several lead and zinc mines, such as Chaabet –el-Hamra and Kherzet-Youcef, which in turn contain large amounts of groundwater, which have been a major obstacle in the mining process, several wells were drilled to lower the piezometric level to continue mining, as well as to provide the region with drinking water and irrigation.

In order to study the quality of these waters and their suitability for consumption and irrigation since they are located in a mining area, several sampling campaigns were conducted (2012-2018) for the Hauterivian aquifers in the Chaabet-el-Hamra deposit, Barremian in the Chaabet-el-Hamra and Kherzet-Youcef deposit, as well as the Mio-Plio-Quaternary in the Ain-Azel plain, in order to carry out a series of analyses: physical (T°, pH, EC, TDS), chemical (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻) as well as heavy metals (Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb), where their results were used in the estimation of several indices: SSP, RSC, MH, KR, IP, SAR, HPI, HEI, C_d, ADD, HQ and RC.

As a key result of this work, the groundwater of these two deep aquifers, Hauterivian and Barremian, and the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary, experience a degree of pollution that prevents it from being drinkable or to be used for irrigation.

Key words: Hauterivian, Barremian, Aquifer, Quality, Setif, Ain- Azel.