



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Popular and democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
The ministry of higher Education and Scientific Research
Abbes Laghrou University, Khenchela
Faculty of Nature Science and life



N°d'ordre :
N° Série :

THESE

Présentée en vue de l'obtention de Diplôme de
DOCTORAT LMD en Ecologie et Environnement
Option : Eau, Environnement et Energie Renouvelable
Par

SEKKIOU SALAH EDDINE

Intitulé

Caractérisation physico-chimiques des eaux du massif de Chelia-Aurès- Khenchela

Soutenue le 08 décembre 2020

Devant le jury composé :

Président **KHABTAN Abdelhamid MCA Université Laghrou Abbes Khenchela**

Examineurs

HAMLI Sofia

MCA Université Laghrou Abbes Khenchela

KADI Kenza

MCA Université Laghrou Abbes Khenchela

GHRIEB Lasaad

MCA Université de Guelma

Rapporteur **HOUHA Belgacem**

Pr **Université Laghrou Abbes Khenchela**

2020

Dédicace

✧ **Je dédie ce travail à ...** ✧

Toutes les lettres ne seraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne seraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que

AU NOM DU BON Allah, le clément par essence et par excellence.

A MON TRÈS CHER PÈRE

A MA TRÈS CHERE MÈRE

Aucun mot, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, ma considération, ma reconnaissance et l'amour éternel pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être.

Je ne pourrais jamais exprimer l'amour que j'ai pour vous, ni la gratitude et la reconnaissance envers les innombrables et immenses sacrifices que vous avez déployés pour mon éducation.

Vous m'avez toujours guidé pour atteindre mes objectifs. Votre soutien, votre amour, votre générosité exemplaire et votre présence constante ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Vous n'avez cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, vous avez toujours été présents à mes côtés pour me consoler quand il fallait, jamais je ne l'oublierais.

Puisse Dieu, le tout puissant vous préserve du mal, vous comble de santé, de bonheur et vous procure une longue vie afin que je vous comble à mon tour.

Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance et de mon amour infini.

Que mon Dieu vous protège

A Mon FRÈRE issem

Mes sœurs

Et Ma fiancé rania

*J'implore Dieu qu'ils t'apportent santé et bonheur et t'aident à réaliser tous vos souhaits
A MES AMIS noureddine, abdelhak, oussama, mehroud, nabil, djamel et hicham...Je ne
peux tous les citer. Pour leur gentillesse et pour la convivialité des moments partagés.*

✧ salah ✧

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** le tout puissant qui m'a donné la force et la volonté d'achever cette réalisation et nous lui rendons grâce, Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Je souhaite remercier en premier lieu mon encadreur, **Pr. HOUHA Belgacem**, d'avoir bien voulu encadrer cette thèse. Je lui suis également reconnaissante pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

J'adresse mes chaleureux remerciements à mon chère collègue, **Docteur Belkoum Noureddine**, pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui.

Je tiens ensuite à remercier Monsieur **Docteur KHABTAN Abdelhamid** qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Je n'oublierai pas non plus sa disponibilité, l'intérêt qu'il a manifesté à suivre cette étude et ses précieux conseils scientifiques.

Mes remerciements vont également au **Docteur HAMLIA Sofia**, de l'université de Khenchela qui a accepté de faire part du jury de ma soutenance.

C'est avec ma profonde gratitude, que, je remercie **Docteur KADI Kenza**, de l'université de Khenchela, d'avoir examiné ma thèse.

Mes vifs remerciements iront aussi au **Docteur GHRIEB Lasaad**, de l'université de Guelma, qui a évalué mon travail.

Un grand merci à **M. BAKHA Abdelhani**, directeur de laboratoire LACLAP Ain mlila, Algérie, qui m'a autorisé à faire la partie expérimentale de cette recherche. Il m'a beaucoup appris, j'ai apprécié son enthousiasme et sa sympathie, et pour avoir accepté d'examiner mon travail

J'associe à ces remerciements **Pr. HOUHA Belgacem**, Directeur de l'institut de SNV Khenchela, pour les conseils et orientations qui me sont d'une aide précieuse.

Je voudrais remercier Tous les professeurs, maîtres de conférences et maîtres assistant du l'institué de SNV, Pour les conseils et orientations qui me sont d'une aide précieuse.

Enfin, je remercie toutes les personnes, qui de près ou de loin, m'ont aidé à la réalisation de ce travail.

Résumé :

La qualité des eaux de la région du Taghrist, située au Nord- Est de l'Algérie, versant Nord du massif des Aurès a connu ces dernières années une grave détérioration due aux rejets non contrôlés des eaux usées urbaines, l'utilisation intensive d'engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que la surexploitation. Cette étude vise à analyser le mode de fonctionnement de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire, à déterminer ses caractéristiques actuelles et à comprendre les processus de minéralisation impliqués dans sa qualité chimique.

Des analyses physico-chimiques ont été effectuées sur 34 échantillons d'eau de l'aquifère superficiel Plio-Quaternaire. Le faciès chimique dominant est de type bicarbonaté calcique, La conductivité électrique de l'eau présente une valeur moyenne de $974,75\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. A signaler que le forage P4 Présente une conductivité électrique d'une valeur de $3948\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

L'analyse descriptive montre que la salinité des eaux est très variable d'un endroit à l'autre et augmente dans le sens d'écoulement des eaux, influencée par l'interaction eau-roche, dissolution et précipitation minérale, échange de bases et par l'activité anthropique.

Une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux, a été dressée par la méthode de GOD, La carte établie fait apparaître trois zones de degrés de vulnérabilité différents, Une vulnérabilité faible (29 %) occupe le centre de la zone en bas des montagnes de Dj. Chelia et Dj. Dalaa et une vulnérabilité forte à très forte s'étend du nord-est au sud-ouest de la plaine et représente 71 % de la région.

Mots clés : Eaux souterraine, Salinité, Plio-Quaternaire, Echange de bases, Vulnérabilité, Bassin de Tagharist, Algérie.

Abstract:

Water quality in the Taghrist region, located in northeastern Algeria, on the northern slopes of the Aurès massif, has suffered a serious deterioration in recent years due to uncontrolled discharge of urban wastewater, the intensive use of chemical fertilizers in agriculture and overexploitation. This study aims at analyzing the functioning of the Mio-Plio-Quaternary aquifer, determining its current characteristics and understanding the mineralization processes involved in its chemical quality.

Physico-chemical analyses were carried out on 34 water samples from the Mio-Plio-Quaternary surface aquifer. The dominant chemical facies is of the bicarbonate calcium type. The electrical conductivity of the water has an average value of $974.75\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. It should be noted that borehole P4 has an electrical conductivity of $3948\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

The descriptive analysis shows that the salinity of the water is highly variable from one place to another and increases in the direction of water flow, influenced by water-rock interaction, mineral dissolution and precipitation, base exchange and anthropic activity.

A vulnerability map to water pollution has been drawn up by the GOD method, The map shows three zones of different degrees of vulnerability, A low vulnerability (29%) occupies the center of the area at the bottom of the Dj mountains. Chelia and Dj. Dalaa and a high to very high vulnerability extends from the northeast to the southwest of the plain and represents 71% of the region.

Keywords: Groundwater, Salinity, Plio-Quaternary, Base exchange, Vulnerability, Tagharist Basin, Algeria.

الملخص :

تشهد منطقة تغريست الواقعة في الشمال الشرقي من الجزائر ، على المنحدر الشمالي لجبال الاوراس ، تدهورًا خطيرًا في جودة المياه خاصة هذه السنوات الأخيرة بسبب التصريف الغير منضبط للمياه الحضرية ، والاستخدام المكثف للأسمدة الكيماوية في الزراعة وكذلك الاستغلال المفرط لهذا الاخير. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل طريقة عمل خزان المياه الجوفية لتحديد خصائصه الحالية وفهم عمليات التمعن المرتبطة بجودته الكيماوية. من أجل تقييم الجودة الفيزيائية والكيماوية للمياه الجوفية في حوض تغريست وتحديد آليات تمعدن المياه ، أجريت تحليلات فيزيائية وكيماوية على 34 عينة مياه، السطوح الكيماوية المهيمنة هي من نوع بيكربونات الكالسيوم ، والناقلية الكهربائية للمياه لها قيمة متوسطة تبلغ (S.cm⁻¹974.75) . تجدر الإشارة إلى أن البئر (P4) يظهر ناقلية كهربائية تعد الاكبر (S.cm⁻¹.3948).

يظهر التحليل الوصفي أن ملوحة المياه متغيرة للغاية من مكان إلى آخر وتزداد في اتجاه تدفق المياه ، متأثرة بتفاعل الصخور مع المياه ، انحلال وترسب المعادن ، تبادل القواعد و عن طريق النشاط البشري. خارطة تعرض المياه للتلوث تم إعدادها بطريقة GOD تُظهر خارطة ثلاث مناطق ذات درجات حساسية مختلفة منطقة ذات حساسية ضعيفة (29%) وتحتل مركز المنطقة في أسفل جبال شيليا و جبال الضلعة. ومنطقة ذات حساسية قوية إلى اقوى تمتد من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي من السهل وتمثل 71% من المنطقة.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية ، الملوحة ، تبادل القواعد ، حساسية المياه لتلوث ، حوض تغريست ، الجزائر.

Tableau des Matières

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Abstract	
ملخص	

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre 01 : Présentation du secteur et contexte géologique

✧ Je dédie ce travail à ... ✍	2
1 Description du bassin versant.....	5
1.1 Situation du bassin versant	5
1.2 Relief et caractéristiques hydrographiques.....	7
1.3 Occupation du sol.....	11
1.3.1 Description de la végétation	11
2 Introduction	13
2.1 Géomorphologie.....	13
2.2 Géologie	14
2.2.1 Géologie Régionale	14
2.3 Stratigraphie	14
2.3.1 Les formations superficielles.....	15
2.3.1.1 Les alluvions actuelles du lit mineur :	15
2.3.1.2 Les terrasses alluviales récentes :	15
2.3.1.3 Les terrasses alluviales anciennes :	15
2.3.1.4 Les colluvions :	15
2.3.1.5 Les colluvions grossières :	16
2.3.2 Les formations anciennes	16
2.3.2.1 Le Tortonien	17
2.3.2.2 Le Campanien.....	17
2.3.2.3 Le Santonien.....	18
2.3.2.4 Le Coniacien.....	18
2.3.2.5 Le Turonien	18
2.3.2.6 Le turonien basal	19
2.3.2.7 Le Cénomaniens supérieur.....	19
2.4 Piézométrie.....	22
1 Climatologie :	25
2 Etude des paramètres climatiques :	25
2.1 Les précipitations :	25

2.1.1	Evolution des moyennes mensuelles de la précipitation	26
2.1.2	Evolution des moyennes annuelles de la précipitation	26
2.2	Les températures :	27
3	Synthèse climatique.....	28
3.1	Diagramme ombro-thermique d'Emberger	28
4	Déterminations de l'étage bioclimatique :	29
4.1	L'indice climatique de MARTONNE 1923 :	29
4.2	Climagramme d'Emberger :	30
5	Bilan hydrique	30
5.1	Evapotranspiration Potentielle (ETP).....	31
5.1.1	Définition :	31
5.1.2	Estimation de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P) :	31
5.1.2.1	Formule de Thornthwaite :	31
5.1.2.2	la formule de Serra :	32
5.2	Evapotranspiration Réelle (ETR)	32
5.2.1	Estimation de l'évapotranspiration Réelle (ETR) :	32
5.2.1.1	Formule de Turc :	32
5.2.1.2	Formule de Coutagne :	32
5.3	Calcul des réserves facilement utilisables (RFU) :	32
1	Échantillonnages et prélèvements	37
1.1	Prélèvements	37
1.2	Mesures in situ :	38
1.2.1	La température de l'eau :	38
1.2.2	Le potentiel hydrogène de l'eau (pH) :	39
1.2.3	La conductivité :	40
1.2.4	TDS (Total Disolved solids):.....	41
2	Analyses des éléments chimiques :	42
2.1	Les elements majeurs	42
2.1.1	Calcium (Ca^{+2}) :	42
2.1.2	Magnésium (Mg^{+2}) :	43
2.1.3	Chlorure (Cl^-) et sodium (Na^+) :	44
2.1.4	Potassium (K^+) :	45
2.1.5	Sulfates (SO_4^{2-}) :	45
2.1.6	Bicarbonates (HCO_3^-) :	46
3	Représentation graphique des résultats :	47
3.1	Diagramme de Piper :	47
3.2	Diagramme de Schoeller-Berkaloff :	48
4	Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure.....	50
5	Identification de l'origine des éléments chimiques	52

6	L'indice d'échange de base au sein des aquifères (i.e.b.) :.....	53
7	Indice de saturation :	55
8	Etude statistique	56
	Chapitre IV	60
1	Aptitude des eaux a l'irrigation :	61
1.1	Méthode de traitement des données :	62
1.1.1	Résidu Sec (RS) et Pression Osmotique (π) :.....	62
1.1.2	Taux d'absorption du sodium (SAR) :	62
1.1.3	Pourcentage de sodium (%Na) :	63
1.1.4	Pourcentage d'échange de sodium (ESP) :.....	63
1.1.5	Salinité potentielle :.....	63
1.1.6	Ratio ou coefficient de Kelly (RK) :	63
1.2	Résultats et discussion :.....	64
1.2.1	Résultats des mesures physico-chimiques des eaux :.....	64
1.2.2	Etude de la qualité de l'eau pour l'irrigation :.....	64
1.2.2.1	Résidu Sec (RS) et pression osmotique (π) :.....	66
1.2.2.2	Taux d'Absorption du Sodium (SAR) :.....	66
1.2.2.3	Pourcentage de sodium (%Na):.....	68
1.2.2.4	Pourcentage d'échange de sodium (ESP) :.....	69
1.2.2.5	Salinité Potentielle (SP) :.....	69
1.2.2.6	Ratio de Kelly (RK):	69
	Conclusion.....	70
2	Vulnérabilité des eaux souterraines :.....	71
2.1	Concept de vulnérabilité :.....	71
2.2	Les types de vulnérabilité :.....	72
2.2.1	La vulnérabilité intrinsèque:.....	72
2.2.2	La vulnérabilité spécifique:	72
2.3	Les critères de vulnérabilité :	72
2.3.1	Critères relatifs au sol :.....	72
2.3.2	Critères relatifs à la zone non saturée :.....	72
2.3.3	Critères relatifs à la zone saturée :.....	73
2.3.4	Critères communs à la zone non saturé et à la zone saturée :.....	73
2.4	Cartographie de la vulnérabilité:	74
2.4.1	Méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines:.....	74
2.4.2	Les différentes méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution: 75	
2.4.2.1	La méthode DRASTIC:.....	75
2.4.2.2	La méthode EPIK :	Erreur ! Signet non défini.
2.4.2.3	La méthode RISKE :	Erreur ! Signet non défini.
2.4.2.4	La méthode DISCO :	Erreur ! Signet non défini.

2.4.2.5	La méthode GOD :	Erreur ! Signet non défini.
2.4.2.6	La méthode SINTACS :	80
2.4.2.7	L'approche européenne (O.C.P.K.) :	80
2.5	Etude de la vulnérabilité du bassin de Tagharist :	81
2.5.1	Carte de vulnérabilité GOD	83
3	Cycle de l'azote :	85
3.1	Les nitrates (NO_3^-) :	86
3.2	Ammonium.....	87
4	Présentation des métaux lourds analysés :	90
4.1	Cuivre :	90
4.2	Plomb :	90
4.3	Zinc :	91
4.4	Cadmium :	91
5	Effets sanitaires liés à quelques paramètres chimiques indésirables de l'eau :	92
	Conclusion générale	93
	Références bibliographiques	96
	Annexe.....	105
	1. Introduction	107
	2. Materials and methods.....	108
	3. Results and discussion	109
2	113
	4. Conclusion	115
	References	115

Liste des figures :

Figure 1:situation géographique de sous bassin versant de Tagharist	6
Figure 2: Délimitation du bassin versant de Tagharist partir du modèle numérique de terrain SRTM avec le réseaux hydrographiques et les ordres des oudes (DHWK, 2006).	9
Figure 3: carte des pentes du BV de Tagharist	10
Figure 4:carte d'occupation de sol du BV de Tagharist.	12
Figure 5: carte géologique du BV de Tagharist.	20
Figure 6: délimitation de sous bassin versant de Tagharist sur la carte géologique de W.khenchela.	20
Figure 7: Carte géologique de la cuvette de l'oued Tagharist.	21
Figure 8: Profile géologique AA' de l'oued Tagharist.	21
Figure 9: Carte piézométrique d'après (Houha, 2007).	22
Figure 10: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2016).	26
Figure 11: Précipitations annuelles de Yabous (1990/2012).	27
Figure 12:Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2016).	28
Figure 13: Le diagramme ombro-thermique (1994/2016).	29
Figure 14 : Climagramme de L. EMBERGER	30
Figure 15 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite pour l'année 1994/2016.	33
Figure 16 : Carte d'inventaire des points de prélèvements.	37
Figure 17 : Multi-paramètre de type CONSORT C931 plus flacon en polyéthylènes.	38
Figure 18: Carte de répartition des Ph des eaux de la zone d'étude.	40
Figure 19: Carte de répartition des conductivités (c25°C).	41
Figure 20: Carte de répartition des TDS des eaux de la zone d'étude.	42
Figure 21: Carte de répartition de calcium dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).	43
Figure 22: Carte de répartition de magnésium dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).	44
Figure 23: Carte de répartition de chlorure et sodium dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).	45
Figure 24: Carte de répartition de sulfate dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).	46
Figure 25: Carte de répartition de bicarbonate dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).	47
Figure 26: Diagramme de Piper pour l'ensemble des eaux du bassin de l'oued Tagharist.	48
Figure 27: Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux souterraines du bassin de l'oued Tagharist.	50
Figure 28: Relation entre Ca^{2+} , Na^{+} , So_4^{2-} , K^{+} et le Cl^{-} des eaux souterraines et l'eau-douce eau-salée .	52
Figure 29: Corrélation entre Na^{+}/Cl^{-} , Ca^{2+}/So_4^{2-} , Ca^{2+}/Hco_3^{-} et $(Ca^{2+} +Mg^{2+})/ Hco_3^{-}$.	53
Figure 30: Relation entre le rapport $Ca^{2+}/(Hco_3^{-} + So_4^{2-})$ et le rapport Na^{+}/Cl^{-} .	54
Figure 31: Indice de saturation des eaux échantillonnées.	56
Figure 32: Projection des variables dans l'espace factoriel F1-F2.	58
Figure 33: Projection des unités statistiques dans l'espace factoriel F1-F2.	58
Figure 34 : Représentation sur le diagramme de RICHARDS (Riverside) des eaux de la nappe de Tagharist prélevées en juin 2016.	67
Figure 35: Diagramme de Wilcox pour la classification des eaux souterraines de la plaine de Tagharist.	68
Figure 36: Infiltration des polluants dans la zone non saturée et la zone saturée.	71
Figure 37 : Estimation de la vulnérabilité d'un aquifère par la méthode de GOD (d'après Foster, 1987).	79
Figure 38 : Carte de la profondeur de niveau piézométrique de la nappe.	83
Figure 39 : Carte de la lithologie de l'aquifère.	83
Figure 40 : Carte représentant le type de nappe aquifère.	83
Figure 41 : Répartition spatiale du degré de vulnérabilité en (%).	84
Figure 42 : Carte de la vulnérabilité de la nappe de	84
Figure 43 : principaux processus de la dynamique de l'azote dans les sols cultivés (d'après Nicolardot et al., 1996).	86
Figure 44 : Carte de concentration des nitrates No_3^{-} .	88
Figure 45 : Carte de concentration des nitrates NH_4 .	89
Figure 46 : Carte de concentration des Plomb PB.	91

Liste des tableaux :

Tableau 1: Les caractéristiques du bassin versant de O.Tagharist	8
Tableau 2: La superficie occupée par l'agriculture à Yabous pour l'année 2012/2013 ... Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 3: Les caractéristiques des cinq stations hydrométriques.....	24
Tableau 4: Les données de la station météorologique.....	25
Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2012).	26
Tableau 6: Températures moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2012).	27
Tableau 7: Indice d'aridité de Martonne.....	29
Tableau 8: Bilan hydrique à la station de Yabous (1994/2012).	33
Tableau 9: Méthodes et laboratoires d'analyse des éléments chimiques.	42
Tableau 10: Matrice de corrélation.....	57
Tableau 11: Valeurs propres ET pourcentages exprimés par les axes principaux.....	57

Liste des Abréviations :

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques.

DHWK : Direction hydraulique de la wilaya de Khenchela.

OMS : Organisation mondiale de la santé.

ACP : Analyse en Composantes Principales.

IS : Indice de saturation.

MO : Matière Organique.

R .sec : Résidu Sec.

SAR : Sodium Absorption Ratio.

EC : Conductivité électrique.

Ph : Potentiel d'hydrogène.

T : Température.

TDS : Total des solides dissous.

Introduction générale

Introduction générale :

Menacée par une consommation en nette augmentation et une pollution accrue, la situation mondiale des ressources en eau est devenue critique. Plus d'un milliard de personnes dans le monde n'a pas accès à l'eau potable et près de deux milliards et demi, soit le tiers de la population mondiale, seront confrontés à une pénurie d'eau d'ici 2025 (4th World Water Forum, 2006).

Une gestion efficace des ressources en eau doit intégrer toutes les composantes du cycle hydrologique. L'une de ces composantes, les eaux souterraines, a longtemps été négligée dans cette gestion alors qu'elle représente 95% de l'eau douce de la planète.

Ressource cachée, l'amenuisement et la dégradation de sa qualité ne sont pas facilement perçus. Les eaux souterraines viennent généralement en complément des eaux de surface facilement accessibles. Les études relatives aux conséquences du réchauffement climatique laissent entrevoir une incertitude croissante sur la disponibilité des ressources en eau de surface d'où un intérêt croissant pour les eaux souterraines.

L'hydrogéologie des zones arides et semi-aride de l'Algérie, est un thème complexe. La sécheresse chronique et le bilan climatique toujours négatif ne permettent pas de justifier l'existence de la recharge de nappe. Or cette recharge, même si elle est limitée, existe souvent dans ces régions arides où l'irrégularité du climat peut provoquer certaines années quelques événements pluvieux exceptionnels.

Le bassin de l'oued Tagharist, constitue le seul réservoir en eau d'une région montagnarde caractérisé par un relief escarpé. L'arboriculture (pommier et abricotier) connaît une croissance effrénée en matière de développement de l'agriculture avec la naissance d'une nouvelle industrie de conditionnement des fruits qui a suscité une sédentarisation de la population rurale accompagnée de rejets solides et liquides. Les nappes d'eau des hautes plaines, qui connaissent une pression dans l'exploitation des ressources, subissent une dégradation de leur qualité chimique occasionnée par des processus naturels que par l'activité anthropiques.

D'autres facteurs tel que le degré de vulnérabilité de l'aquifère lié à la nature du milieu physique (caractéristiques hydrogéologiques, nature de sol et du sous-sol....) et les pratiques culturelles (occupation du sol, irrigation, degré d'intensification, travaux de sol....) peuvent accentuer ou limiter le processus de pollution nitrique. Ainsi, il suffit que certaines conditions soient simultanément remplies pour que le problème de migration des nitrates vers les eaux de nappes soit amplifié (Robert et al, 1994 ; Demarets et al, 1995 ;Strebel et al, 1989).

A cette pollution diffuse d'origine agricole s'ajoutent :

- Les rejets non contrôlés et sans cesse croissants des eaux usées urbaines et d'effluents agro-industriels très riches en azote minéral et organique ;
- La nature du climat et la sécheresse qui, par les faibles apports d'eau, accentuent la détérioration de la qualité des ressources en eau.

Notre étude consiste à approfondir l'état actuel des connaissances et essayer de répondre à certaines questions :

- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux superficielles et souterraines de la plaine ?
- Quels sont les différents polluants chimiques existant dans l'eau ainsi que leurs origines ?
- Quels sont les mécanismes physico-chimiques intervenant dans l'évolution de ces polluants dans le temps et dans l'espace ?
- Et enfin, quel est le risque de la plaine vis à vis de la pollution ?

Pour répondre à ces questions, on doit faire plusieurs méthodes de travail, des mesures in situ (mesures des paramètres hydrodynamiques et physico-chimiques) et à des analyses au laboratoire (éléments chimiques). L'interprétation des données seront réalisés à l'aide de plusieurs logiciels d'informatique.

Cette étude s'articule autour de trois chapitres qui traitent respectivement :

1. Une étude hydrogéologique pour l'identification du système aquifère, sa géométrie, ses limites et son alimentation et de définir l'ensemble du système d'écoulement souterrain par la piézométrie.
2. L'hydroclimatologie consacrée à l'évaluation des composantes du bilan hydrique nécessaire à toute estimation des réserves en eau d'un bassin versant.
3. L'interprétation des analyses d'eau a pour but de déterminer le faciès chimique, l'origine des eaux souterraines, leur potabilité et leurs degrés de pollution, d'effectuer des comparaisons spatio-temporelles, de mettre en évidence les différents éléments pouvant jouer un rôle primordial dans leur répartition et par conséquent d'établir la genèse et l'origine des éléments chimiques.

Enfin, on essayera de proposer des solutions pour protéger ces aquifères, dont la responsabilité incombe à tous les citoyens, car l'eau est une ressource naturelle précieuse, elle doit être protégée contre la pollution et l'épuisement pour sa préservation aux les générations futures.

CHAPITRE I :
PRESENTATION DU SECTEUR ET CONTEXTE
GEOLOGIQUE

1 Description du bassin versant

1.1 Situation du bassin versant

L'oued tagharist est situé dans la wilaya de khenchela à environ 40 Km du chef-lieu de la wilaya.

Le bassin versant de l'oued Tagharist, qui fait partie du bassin des hauts plateaux constantinois, chevauche sur deux zones : les hautes plaines de yabous, ouled fadhel qui sont disséquées par un chevelu hydrographique très dense, et le massif montagneux des Aurès au sud.

Le bassin hydrographique est divisé en deux parties distinctes :

- Au nord : le djebel Tkhizrant (altitude 1540-1796m), avec un prolongement, vers l'Est du site par le djebel khaled (1421m) et de fersane (1500m) ;
- Au sud : le djebel Yabous (1700-1750m) longe tout le long du site ; coiffé par le djebel chelia (2328m) qui culmine.

Le bassin est couvert en majorité par la commune de Yabous (wilaya de khenchela) et par en petite partie par la commune de FougToub (wilaya de batna). Il est limité par les coordonnées Lambert :

X = 864 000 au nord ; Y = 241 500 à l'Est

X = 851 750 au sud ; Y = 231 000 à l'ouest

La carte 1 en annexe A présente le contexte du bassin.

La commune de Yabous est limitée par les communes limitrophes suivantes :

- Au Nord : Commune de Ouledfadel ;
- Au Sud : Commune de Bouhmama et Inoughissene ;
- A l'Est : Commune de Taouziant et Chelia ;
- A l'Ouest : Commune de Foug El Toub et Ichemoul.

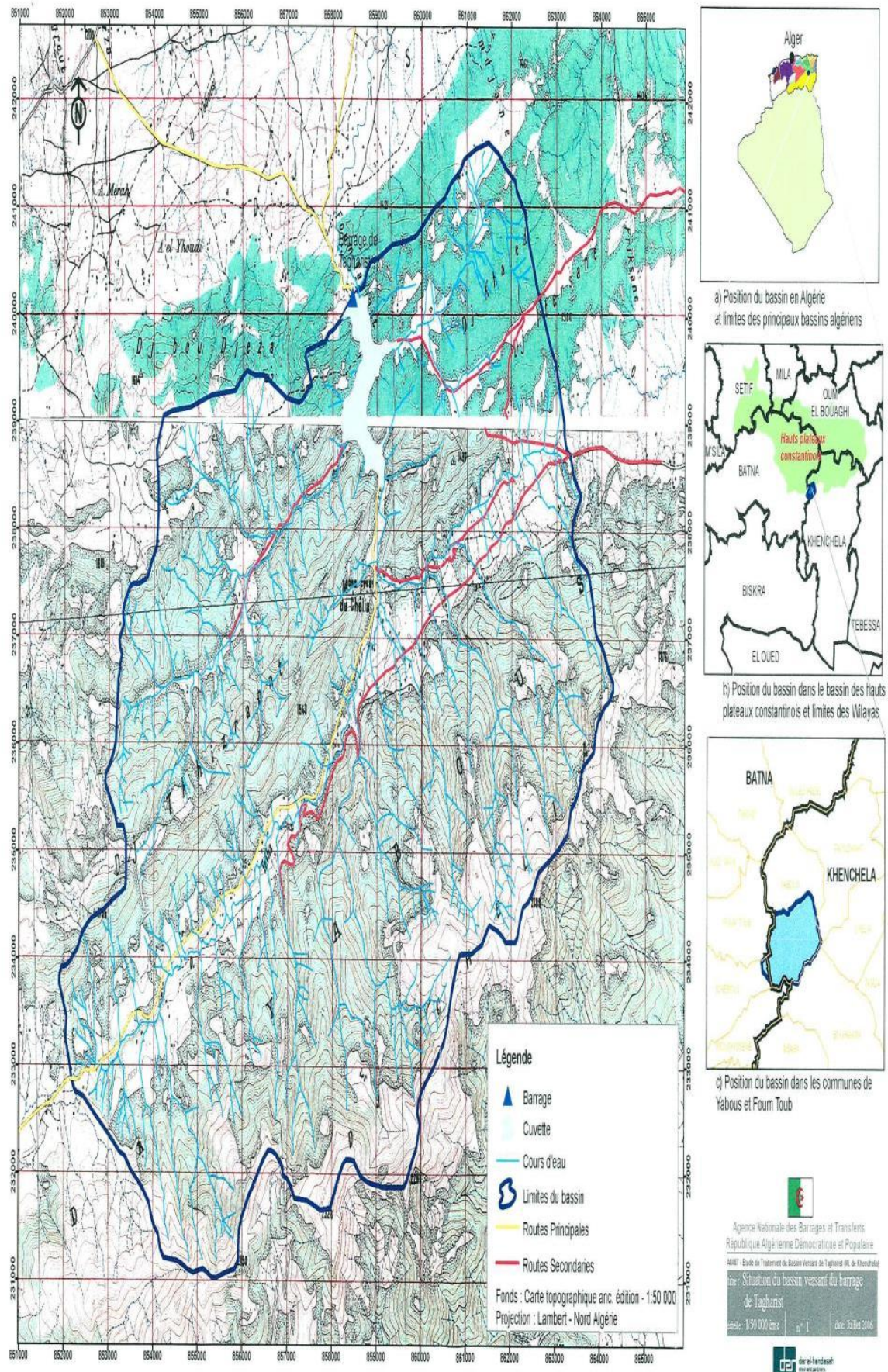


Figure 1: situation géographique de sous bassin versant de Tagharist (DHWK, 2006).

1.2 Relief et caractéristiques hydrographiques

Le bassin versant de Tagharist couvre une superficie de 77Km² dans la commune de Yabous. Sur le plan physique, le territoire de la commune de Yabous est constitué :

- Par un relief montagneux au Sud totalisant une superficie de 9677 ha soit 62,2 % de la superficie totale.
- Par des plaines au Nord avec 5025 ha, soit 32 % de la superficie totale.
- Un réseau hydrographique constitué essentiellement par des Oueds au régime torrentiels dont le principal est l'oued Talha.

Le bassin versant de tagharist est entièrement contenu dans le sud de Yabous dans la partie montagneuse. Il est ainsi caractérisé par un relief montagneux assez varié divisé en trois parties distinctes :

- Le relief montagneux, caractéristique des Aurès où culmine à 2308m (Ras Keltoum), le plus haut sommet de l'est de l'Algérie, est la barrière montagneuse qui prolongeant les hauts plateaux de l'Atlas, marquante brutalement sur la face Sud, est accidenté, avec de fortes et très fortes pentes disséquées par l'érosion à différents stades ; en bas de pentes le long des oueds on trouve quelques petites surfaces de terre, soumises à une érosion intense.
- La zone en dehors de quelques piedmonts et plateaux est très accidentée avec des pentes très élevées et caillouteuse en surface.
- La partie centrale, le long des oueds principaux, laisse apparaître une plaine agricole.

La superficie du sous BV de tagharist est de 77 km². Les altitudes extrêmes minimales et maximales du bassin versant (BV) sont respectivement de 1191 m et 2311 m, avec une moyenne de 1564 m.

La carte des pentes obtenue à partir du SIG, est illustrée par la figure 2. La pente moyenne du BV est égale à $I_{BV} = 26,07 \%$, avec un minimum et un maximum de 0,47% et 89,1%, respectivement, et un écart type de 13,7%.

L'altitude moyenne du bassin versant, calculée par l'expression $H_{moy} = \frac{\sum H_i S_i}{S_{BV}}$ à partir de la courbe hypsométrique est de 1580 m. le périmètre et la longueur du thalweg le plus long, mesurés à l'aide du SIG, égalent à 50,3 km et 13,5 km, respectivement. Sa pente moyenne exprimée en % est évaluée à 21,9%, avec un minimum et un maximum de 2,8 % et 55%, respectivement, et un écart type de 11%. La distance depuis l'exutoire du bassin jusqu'à la

projection du centre du bassin versant sur le thalweg le plus long est de 4,7 km (DHWK, 2006).

La largeur moyenne (l_{moy}) du BV est calculée la relation suivante : $l_{moy} = S/L$;(km) S: est la superficie du BV en km^2 . Et L: la longueur du thalweg le plus long en km. L'application numérique donne $l_{moy} = 5,70$ km (DHWK, 2006).

Le réseau hydrographique du bassin versant est illustré par la figure 2. La densité de drainage (D_d) représentant les longueurs des cours d'eau de tous les ordres divisés par la superficie du bassin versant est de $1,4$ km/ km^2 (DHWK, 2006).

Le coefficient d'allongement est obtenu à partir de la relation : $C_a = L^2/S$, d'où $C_a = 2,37$.

L'indice de compacité est calculé suivant la relation : $K_c = 0,28P/\sqrt{S}$, d'où $K_c = 1,61$.

Le temps de concentration calculé par la moyenne des deux formules de Bransby William et de Kirpich est de 100 minutes (DHWK, 2006).

Caractéristiques du bassin versant :

Tableau 1: Les caractéristiques du bassin versant de O.Tagharist

Bassin principal	hauts plateaux constantinois
Oued	Tagharist
Surface	$S = 77$ Km ²
Périmètre	$P = 50$ m
Altitude maximale	HM =2311 m
Altitude minimale	Hm = 1191 m
Altitude moyenne	H = 1564 m
Longueur du thalweg principal	L = 13,5 Km
Largeur moyenne du BV	$l_{moy} = S/L = 5,7$ Km
Indice de pente	I (BV) = 26 %
Pente maximal	I = 89 %
Pente minimal	I = 0,5 %
Indice de compacité	$K_c = 1,61$
Temps de concentration	1h40 min
Densité de drainage	$D_d = 1,4$ Km/Km ²

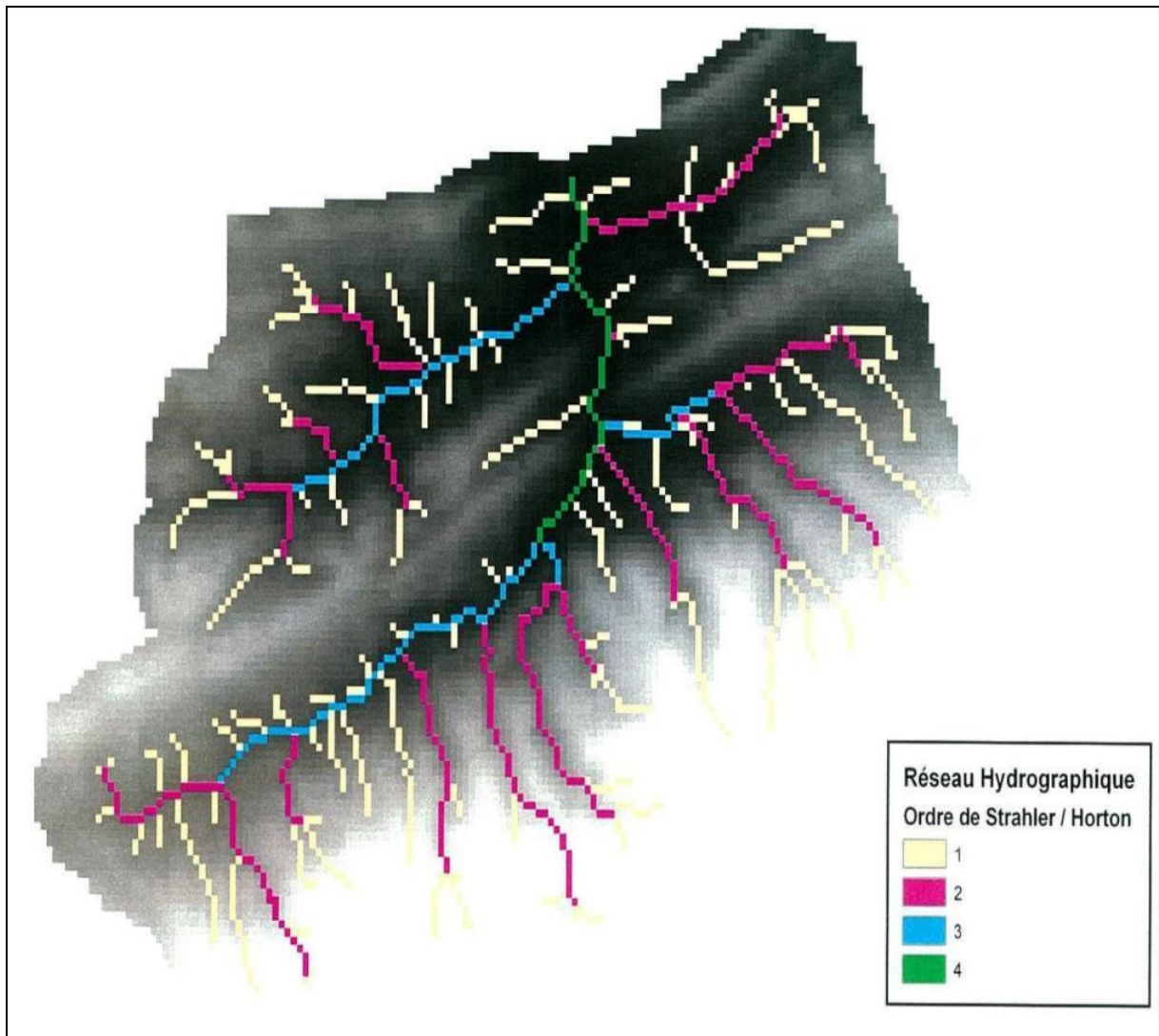


Figure 2: Délimitation du bassin versant de Tagharist partir du modèle numérique de terrain SRTM avec le réseaux hydrographiques et les ordres des oudes (DHWK, 2006).

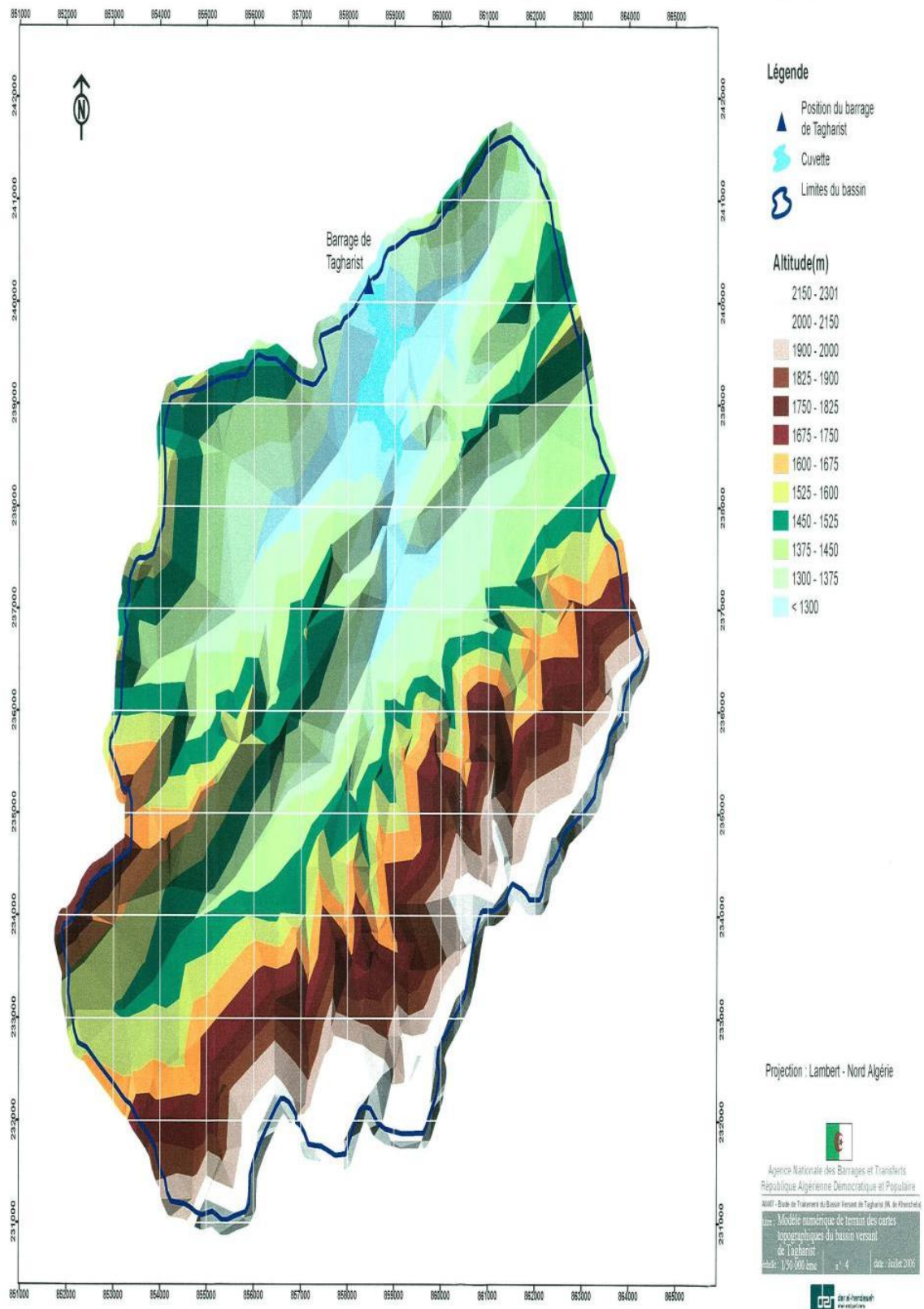


Figure 3: carte des pentes du BV de Tagharist (DHWK, 2006).

1.3 Occupation du sol

1.3.1 Description de la végétation

La couverture végétale du bassin versant de Tagharist est importante (plus de 80%) et elle est essentiellement forestière, surtout dans les zones élevées, en dehors de quelques zones de cultures dans les bas-fonds. En effet, l'espace forestier de la commune de Yabous couvre une superficie de 9 308 ha et appartient aux forêts domaniales de Béni Oudjena.

En général, la végétation et le couvert forestier jouent un rôle important en matière de stabilisation des terres dans les périmètres de BV et de rétention des eaux de ruissèlement. Aussi elles constituent un support non négligeable dans le développement économique et social des régions montagneuses.

Les essences forestières d'implantation naturelle, observées dans le bassin versant de Tagharist, constitue des forêts denses prédominantes de pins d'Alep, des forêts de chênes verts, de cèdres sur les hautes altitudes (Chélia), de garrigues ou forêts dégradées constituées principalement de : genêt, ciste, bruyère et lentisque, Diss.

Tableau 2 : la superficie occupée par l'agriculture à yabous pour l'année 2012/2013

classe de l'occupation de sol	superficies (ha)
Maraichage	26,5
Arbre fruitière plantées	395
Cereals	2520

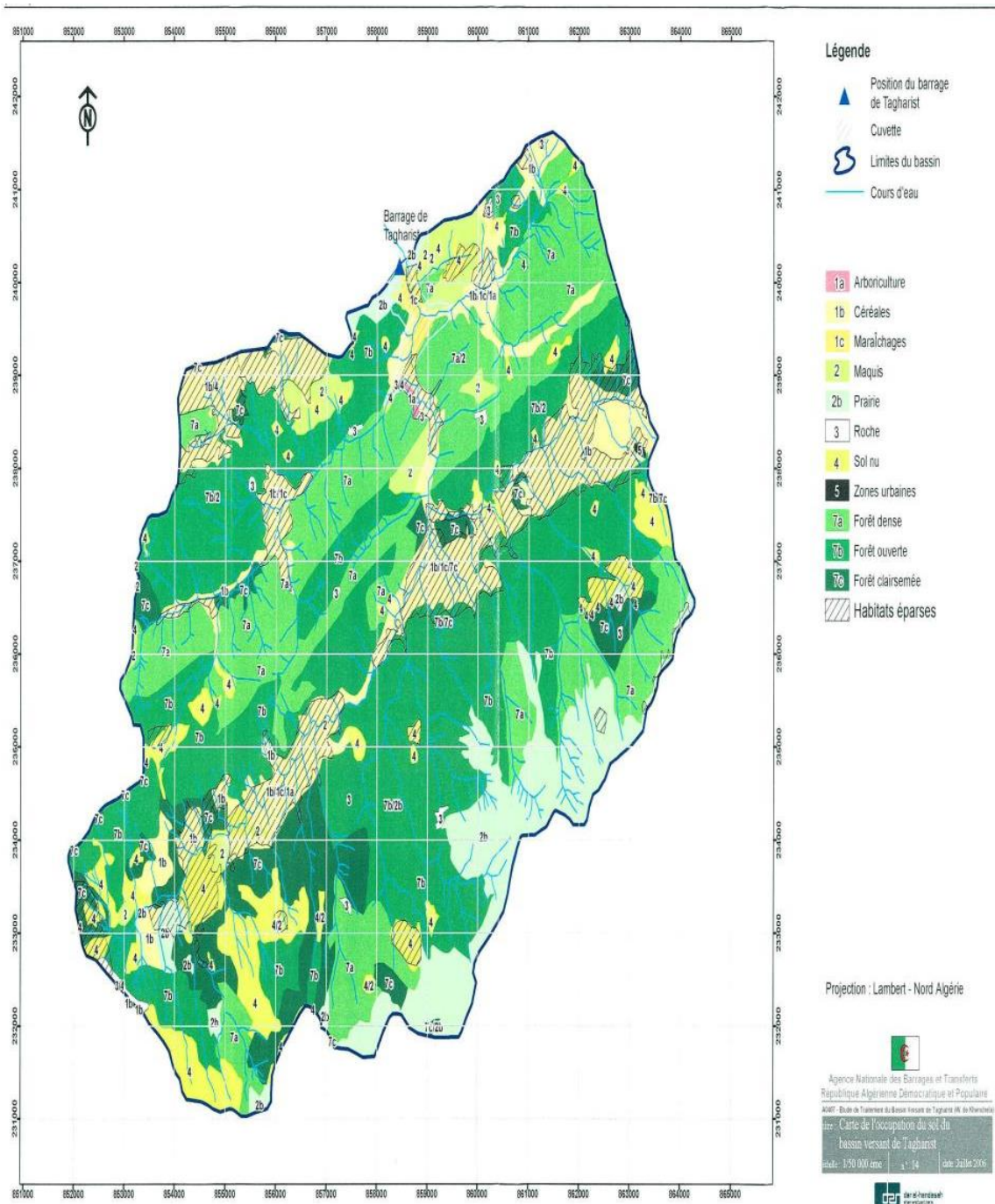


Figure 4:carte d'occupation de sol du BV de Tagharist (DHWK, 2006).

2 Introduction

Le site de l'oued Tagherist est localisé dans la wilaya de khenchela, au pied nord du Djebel chéla (photo 1) et en amont immédiat du village de yabous. Il comprend une digue d'environ 40 m de hauteur est projeté sur l'oued Tagherist dont la superficie du bassin versant est de 77 km².

2.1 Géomorphologie

Le bassin versant de l'oued Tagharist constitue une zone de transition orographique entre le massif élevé du chéla au sud (2 326 m), à relief escarpé, et le bassin de touffana, au nord, à relief plus adouci, de type collinaire (900 à 1 200 m). Cette morphologie prévaut sur plus de 100 km dans la direction Est-Ouest, entre Batna et khenchela, où le réseau hydrographique débouche dans le bassin néogène de Timgad, par des gorges très entaillées franchissant les formations atlasiques anciennes (FoumToub, FoumTagharist, Foum El Gueiss).

Le bassin versant de l'oued l'oued Tagharist présente un écoulement sensiblement sud-nord. Il traverse des structures géologiques assez orthogonales à sa direction d'écoulement et débouche dans la plaine de Yabous, en franchissant une série de barres gréseuses qui soulignent la limite entre la plaine et le domaine montagneux (photo 2). Dans ce contexte morpho-structural, la vallée est étroite et la prédominance des alluvions grossières dans le lit mineur, témoigne d'un écoulement torrentiel de ce cours d'eau. Le réseau hydrographique qui lui est associé est représenté essentiellement par deux thalwegs en rive droite. Au niveau des lieux-dit : Touchent et Aghlane, et un thalweg en rive gauche, au niveau de Diar el Gaïd, ces thalwegs, orientés NE-SO, contrairement au cours d'eau principal, conformes à la direction des couches et creusés dans les formations les plus faciles à l'érosion (marnes et pélites crétacées).

La vallée de l'oued Tagharist et ses affluents sont délimités par des reliefs suffisamment boisés, de pentes moyennes de 20 à 40°, à l'exception de quelques barres rocheuses qui forment des arêtes bien visibles sur le terrain. La dénivelée entre la vallée et les sommets de la cuvette ne dépasse pas 150 m et le raccordement topographique se fait progressivement par une accumulation de colluvions à dominante argileuse.

La végétation est de type maquis, parsemée de quelques bois de chênes. Une petite agriculture vivrière est développée sur les terrasses alluviales étroites de l'oued Tagharist et ses glacis latéraux.

2.2 Géologie

2.2.1 Géologie Régionale

La structure géologique du nord de l'Algérie comprend les trois structures géomorphologiques suivantes :

- L'Atlas Tellien
- Le Haut plateau entre l'Atlas tellien et l'Atlas Sahrien
- L'Atlas Saharien

L'Atlas Tellien consiste en une succession de chaînes de montagne et de vallées parallèles au littoral avec des plateformes juxtaposées (bassins alluvionnaires) et un relief topographique haut avec un niveau maximal d'environ 2 000 m.

Le haut plateau entre l'Atlas tellien et l'Atlas Saharien est une région de plaines élevées (à environ 1 000 m) ayant une topographie relativement plate.

L'Atlas Saharien est une chaîne de montagnes très plissées.

La zone autour du site de bassin est située entre l'extrémité sud du bassin constantinois (Etendue sud du Haut plateau) et l'Etendue Nord de l'Atlas Saharien (Figure 1).

Donc, comme mentionné ci-dessus et indiqué sur le Figures 1, Le bassin de l'oued est situé près de la frontière des deux structures géologiques principales suivant, nommément :

- L'Atlas saharien des aurès, au Sud, représenté par les formations rocheuses des périodes Jurassique-Crétacée, Il est caractérisé par de grand plis d'échelle pluri-kilométrique, orientés NE-SO, à matériel essentiellement crétacé.
- Le bassin néogène de Timgad, qui forme la partie Sud du bassin inter-montagneux de Constantine. Il est constitué de matériel miocène (dépôts Néogènes et Quaternaires), et de structure plissée d'échelle plus modeste (kilométrique).

Ces deux ensembles sont affectés par une tectonique plicative récente (mio-pliocène) à l'origine des plis NE-SO et par des failles sub-méridiennes à composante essentiellement décrochant. Le réseau hydrographique descendant de cette partie orientale des Aurès est étroitement contrôlé par ces accidents, tel que celui de l'oued de Tagharist que nous verrons plus en détail dans ce qui suit.

2.3 Stratigraphie

La série stratigraphique du site de l'oued Tagharist et de sa cuvette est rendue relativement aisée à identifier, par suite d'une structure d'ensemble monoclinale assez redressée et d'une végétation clairsemée. Cette série est représentée par des formations superficielles récentes,

quaternaires, et des formations plus anciennes d'âge miocène supérieur et crétacé.

2.3.1 Les formations superficielles

2.3.1.1 Les alluvions actuelles du lit mineur :

Elles sont représentées par des blocs roulés de 10 à 20 cm de diamètre, des galets et graviers et du sable grossier en faible proportion. Ces alluvions sont de nature calcaire prédominante et gréseuse. Au droit des variantes de digue, leur épaisseur est de 3 à 4 m. Elles conservent la même épaisseur plus en amont. Au lieu-dit Diar El Gaïd, d'après les coupes de puits réalisés lors de l'étude de faisabilité (DHWK, 2006).

2.3.1.2 Les terrasses alluviales récentes :

Elles sont limoneuses en surface et deviennent plus grossières à partir de 0.5 m de profondeur. Leur épaisseur moyenne d'après les coupes des puits PE3 à PE8, de l'étude de faisabilité (DHWK, 2006) est de l'ordre de 2 à 3 m. elles sont très étroites, parfois inexistantes, et ne dépasse pas la largeur de 100 m de part et d'autre de l'oued Tagharist.

2.3.1.3 Les terrasses alluviales anciennes :

A l'affleurement, la présence de terrasses alluviales anciennes n'est témoignée que par un lambeau accroché en rive gauche de l'oued Tagharist à une altitude de 5 m environ au-dessus de la cote du lit mineur (zkakat). Cette terrasse de 2 à 3 m d'épaisseur, est formée par des alluvions grossières (galets et bloc calcaires et gréseux) dans une matrice limoneuse en faible proportion. L'examen des coupes des puits réalisés. Lors de l'étude de faisabilité, dans la recherche des zones d'emprunt (DHWK, 2006), révèle l'existence de ces terrasses anciennes. En effet, sous les colluvions argileuses de Diar el Gaïd, ont traversé des alluvions grossières de 2 à 3 m d'épaisseur, à des altitudes suffisamment élevées pour ne plus les confondre avec les terrasses alluviales récentes qui elles, jalonnent l'oued Tagharist.

2.3.1.4 Les colluvions :

Elles sont distribuées sur les surfaces de faible déclivité (5 à 15% de pente) et jalonnent les berges du réseau hydrographique principal (l'oued Tagharist et ses affluents). Malgré leur hétérogénéité et leur variation d'épaisseur, on peut distinguer des colluvions fines, argilo-limoneuses, et des colluvions grossières à blocs et galets enrobés dans une matrice argileuse.

Les colluvions fines, de couleur brune, sont localisées pour l'essentiel :

- En aval du barrage, à l'entrée sud village de yabous,

- Dans la cuvette, au lieu-dit Diar el Gaid. C'est dans ces colluvions qu'ont été définies les 4 zones d'emprunt de matériaux fins, lors de l'étude de faisabilité. Les nombreux puits creusés (30) dans ces colluvions révèlent une épaisseur moyenne de 3 à 6 m d'argile renfermant souvent une proportion non négligeable de galets et graviers.

2.3.1.5 Les colluvions grossières :

Elles sont particulièrement développées à proximité des 3 variantes de digue, de part et d'autre de l'oued Tagharist (bouhazra), et à l'extrémité sud de la retenue (cantina, ras el hanchir, aghhlane).

A proximité des variantes de digue, le versant rive gauche, de faible déclivité, est tapissé par des colluvions argileuses à gros blocs gréseux (1 à 10 m³). Les sondages anciens et récents (coupes géologiques BB', cc 'et DD') (DHWK, 2006) montrent que cette formation, d'épaisseur variable, peut atteindre 8 à 10 m. les blocs proviennent de l'érosion des barres tortoniennes situées plus en amont des colluvions tandis que la matrice argileuse provient de l'altération locale des marnes du Campanien. Le versant rive droite est assez distinct de son opposé. Il montre une bande d'argile plastique à galets, de 5 à 10 m d'épaisseur, entraîne dans un mouvement de fluage (coupe géologique cc') (DHWK, 2006) et un épais manteau de colluvion à galets et blocs de taille décimétrique à demi-métrique (coupe géologique cc', lieu-dit bouhazra) (DHWK, 2006).

A l'extrémité sud de la retenue, une vaste zone d'épandage s'est développée au pied du massif du Chélia. Cette morphologie a favorisé une accumulation de débris rocheux, anguleux, à dominante calcaire, enrobés dans une matrice plus fine. L'épaisseur de ces colluvions reste indéterminée, elle peut cependant atteindre une dizaine de mètres dans leur partie centrale.

2.3.2 Les formations anciennes

A partir de la première barre rocheuse qui domine au sud, le village de Yabous et en remontant le débouché (Foum) de l'oued Tagharist vers l'intérieur de la cuvette, une succession de reliefs découpés par quelques arêtes rocheuses vives, montrent une série stratigraphique représentée par le Miocène supérieur (Tortonien) et Crétacé supérieur (Cénomanien à Sénonien).

La similitude des faciès du Crétacé supérieur ne permet pas de délimiter précisément ses

différents sous-étages sur le terrain, tels qu'établis sur la carte géologique au 1/50 000 de touffana (DHWK, 2006). Les limites que nous avons adoptées pour le lever géologique de la cuvette, au 1/5 000, sont basées essentiellement sur les grandes variations lithologiques, ponctuées par des barres calcaires aisément cartographiables.

2.3.2.1 Le Tortonien

Il est représenté par une alternance de bancs gréseux massifs dont on peut dénombrer 5 barres, et d'argiles grises, qui forment le premier relief au sud de Yabous. Les barres gréseuses, qui peuvent atteindre 10 m d'épaisseur vers le sommet de la série, sont blanchâtres, grossiers et localement conglomératiques (dragées de quartz pilulaire). Les argiles sont souvent silteuses et renferment elles-mêmes des bancs gréseux d'échelle métrique. Elles forment des combes recouvertes par des éboulis. Le passage des argiles aux grès est souligné par une transition d'argiles sableuses verdâtres puis de bancs décimétrique gréseux.

Au-dessus de la première barre gréseuse de la série, est intercalé un banc de calcaire métrique dur, organogène (débris d'huitres) que l'on observe bien au cimetière de Bouhazra. Ce banc calcaire, concordant dans la série de base argilo-gréseuse, correspond au faciès carbonaté fossilifère du langhien-serravalien (S. Guellal, 1973).

La série tortonienne atteint 400 m d'épaisseur. Sa base est située en aval immédiat des 3 variantes de digue du barrage. Elle est discordante sur les formations crétacées.

La lacune stratigraphique de tout le Paléogène jusqu'au Miocène inférieur s'observe sur toute la bordure nord-orientale des Aurès.

Plus en aval du site, dans la plaine de Yabous, se développent des argiles rouges du tortonien supérieur, occupant de grandes étendues.

2.3.2.2 Le Campanien

Il est représenté par une série épaisse de marnes grises, assez homogènes. La stratification est soulignée par des bancs fins marno-calcaires, de couleur plus claire. Elles sont très pauvres en macro-fossiles, contrairement aux séries marneuses plus anciennes. Ces marnes sont assez ravinées en surface par suite de leur décompression et altération. Elles forment par ailleurs l'horizon de fondation des 3 variantes de digues, dans la mesure où elles sont épaisses. Les nombreux sondages qui ont été réalisés dans cette formation montrent qu'elles deviennent de plus en plus denses en profondeur (DHWK, 2006), de couleur plus sombre, et admettent quelques rares passées franchement calcaires. L'observation des carottes de sondages récents montre que ces marnes sont finement diaclasées et fracturées par endroits. Les fractures d'ouverture demi-centimétrique sont souvent recristallisées en calcite blanche elles sont par

contre très sensibles à la décompression et débitent alors, quelle que soit leur consistance, en fragments centimétrique anguleux. L'épaisseur de cette formation est de 500 m environ.

2.3.2.3 Le Santonien

Les marnes campaniennes passent progressivement à des marnes plus claires, à cassure terreuse et fossilifères (fragments d'Inocéram, Echinodermes, huîtres, Strombes). Celles-ci renferment des bancs marno-calcaires noduleux, d'épaisseur décimétrique, fossilifères. Elles sont ravinées et recouvertes par une mince pellicule d'éboulis (nodules marno-calcaires) en surface. La végétation arborée qui recouvre cette formation la protège efficacement contre l'érosion.

Son épaisseur est de 150 à 200 m.

La limite stratigraphique présumée entre le Santonien et le Coniacien correspond à un banc de calcaire dolomitique, fossilifère de 2 m, bien visible de part et d'autre de l'oued Tagharist, au lieu-dit Diar el Gaïd.

2.3.2.4 Le Coniacien

Au-dessous du banc calcaire-dolomitique que nous avons attribué au Santonien, se développe une sédimentation à dominante marno-calcaire et pélitique, en bancs centimétrique à décimétrique, très fossilifères (huîtres). Le sommet de la formation renferme des niveaux calcaires noduleux, comparables à ceux du Santonien, tandis que sa base est caractérisée par la présence de bancs fins et durs de couleur sombre. Cette formation est largement visible au fond du thalweg qui remonte, en rive droite de l'oued Tagharist, vers le village de touchent. Dans son ensemble, elle est plus robuste que la formation précédente et donc plus résistante à l'érosion. Son épaisseur est de 300 à 350 m.

2.3.2.5 Le Turonien

On, a distingué sur le plan lithologique et cartographique deux formations turoniennes et on a adopté comme limite supérieure les trois bancs calcaires métriques à minces joints marneux, qui affleurent sur toute la largeur de l'oued Tagharist, à Diar EL Gaïd, en formation des seuils naturels de déversement des eaux de crues (photo 10). Ces bancs calcaires, qui appartiennent à la formation supérieure, sont de couleur blanchâtre, fins, et renferment des débris de fossiles. Puis, succède une alternance de mares grises épaisses renfermant des bancs calcaires demi-métriques qui apparaissent bien en rive droite de l'oued Tagharist, entre les combes marneuses. Son épaisseur est de 500 à 600 m.

La formation inférieure est assez comparable au supérieur mais plus carbonatée. Elle débute

par une arête topographique bien visible sur les deux versants de l'oued Tagharist, à la hauteur de Zkakat. Elle se poursuit à Tibelrdjine par une alternance de marnes verdâtres fossilifères (Huîtres) renfermant, en plus grand nombre, des bancs calcaires à patine jaunâtre. Son épaisseur est de 400 à 500 m.

2.3.2.6 Le turonien basal

La formation turonienne se poursuit vers la base, par une alternance de bancs calcaires d'épaisseur métrique et de marnes pélitiques verdâtres. Les bancs calcaires, fortement redressés et bien dégagés en rive droite de l'oued Tagharist, sont fins, de couleur grise à la cassure et à patine ocre. Ils renferment des débris de fossiles. Les marnes sont à cassure terreuse et renferment de grosses huîtres. Cette formation d'âge probable turonien inférieur, a une épaisseur de 300 à 400 m.

2.3.2.7 Le Cénomaniens supérieur

Il est représenté par des marnes grises à verdâtres, épaisseur, renfermant des bancs marno-calcaires d'épaisseur demi-métrique et des lumachelles Huîtres. Le sommet de cette formation est très fossilifère avec une nette prédominance de petites huîtres. Cette formation occupe la partie amont de la cuvette du barrage et est recouverte en grande partie par les colluvions grossières des bas piedmonts du Chélia (Cantina, Ras el Hanchir). Son épaisseur est supérieure à 600 m. elle repose sur une série de consistances plus rocheuse, de même âge, qui affleure vers l'extrémité sud-ouest de la cuvette (Cantina). Il s'agit de bancs calcaires durs et massifs, d'épaisseur plurimétrique, alternant avec des passées plus tendres, marneuses. Cette série qui affleure largement plus au sud de la cuvette, forme les premiers contreforts du massif du chélia.

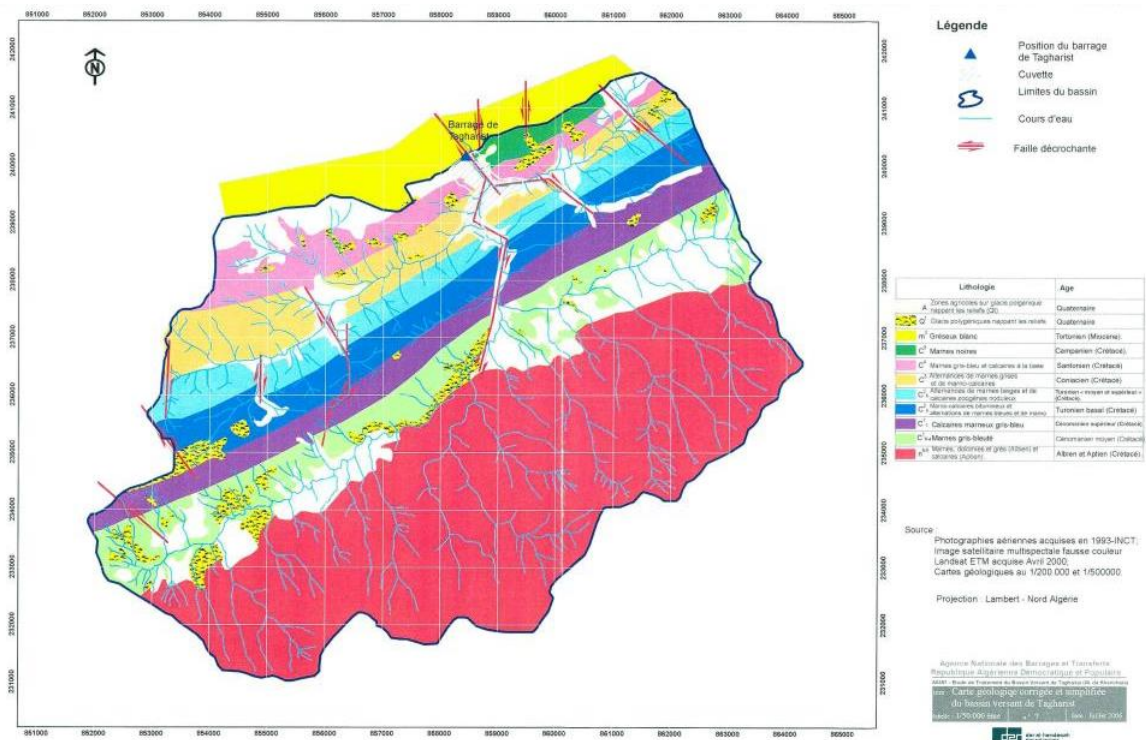


Figure 5: carte géologique du BV de Tagharist (DHWK, 2006).

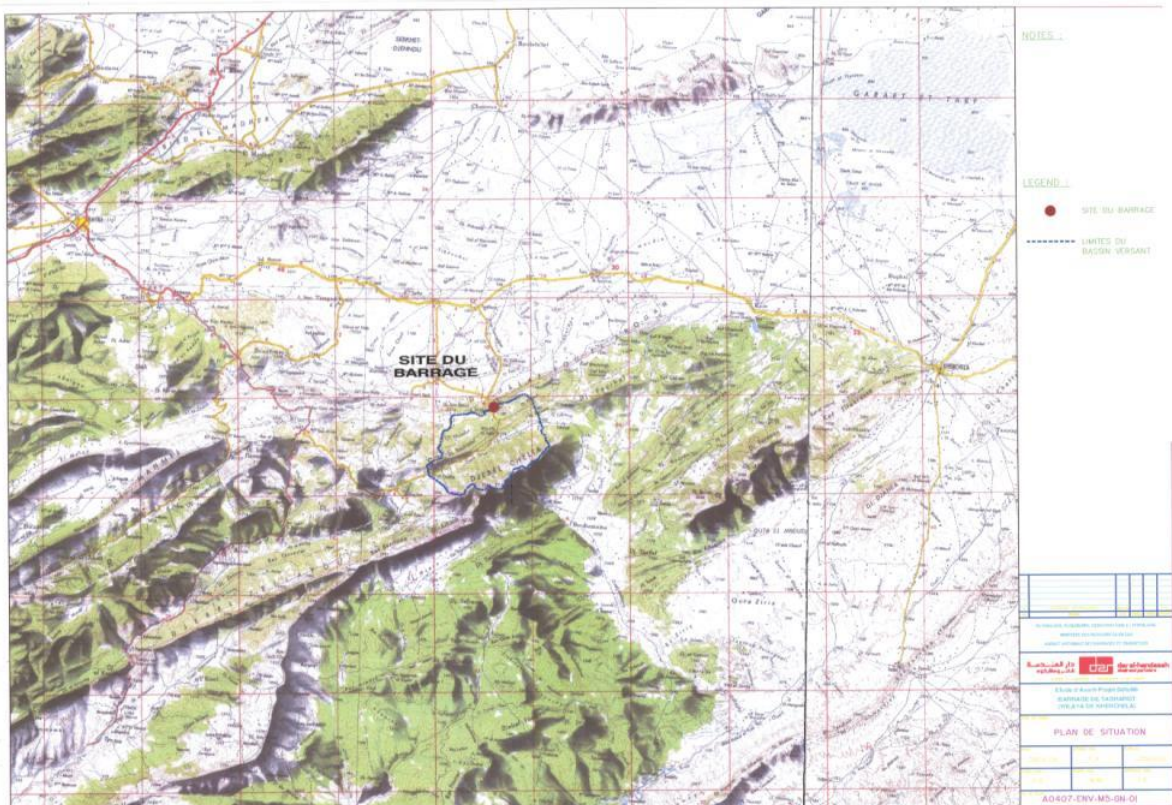


Figure 6: délimitation de sous bassin versant de Tagharist sur la carte géologique de W.khenchela (DHWK, 2006).

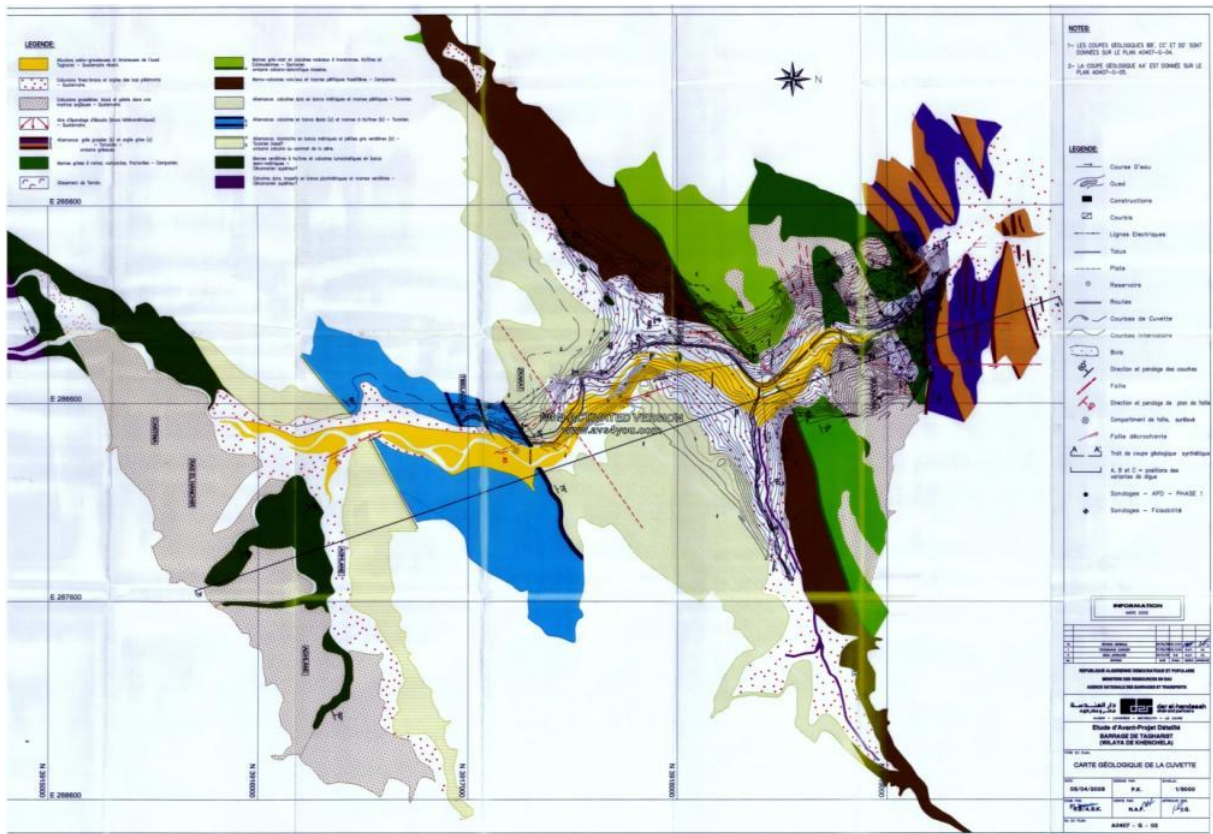


Figure 7: Carte géologique de la cuvette de l'oued Tagharist (DHWK, 2006).

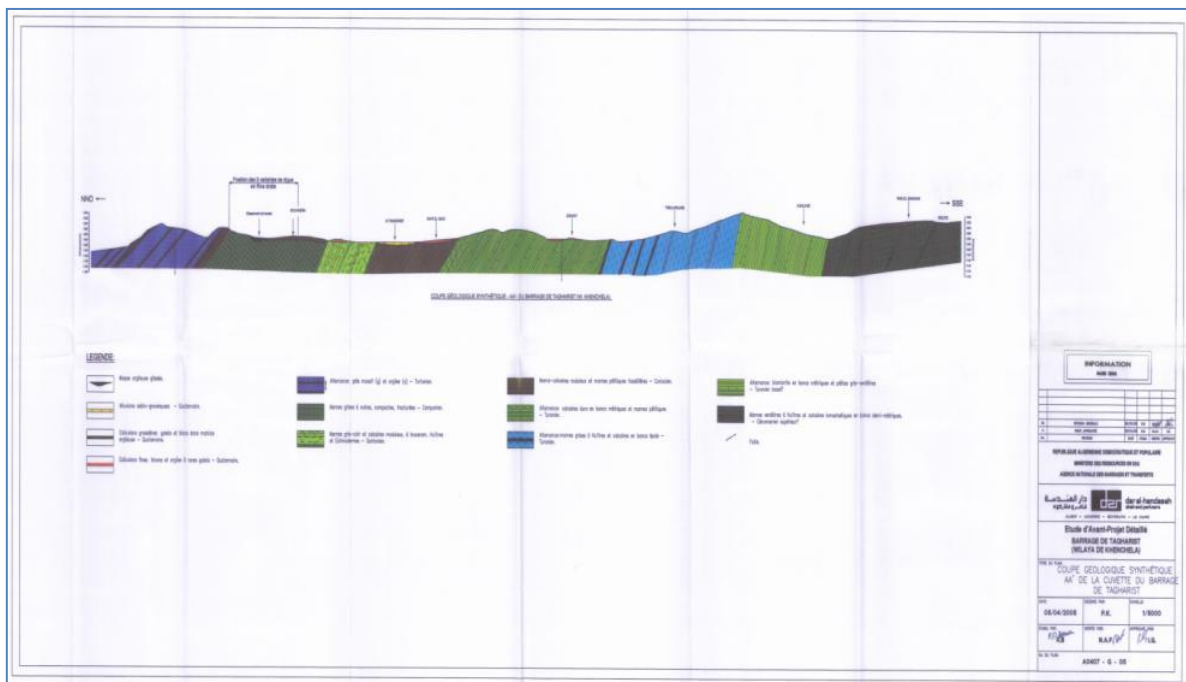


Figure 8: Profile géologique AA' de l'oued Tagharist (DHWK, 2006).

2.4 Piézométrie

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique (Houha, 2007) permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant une direction du Sud-Ouest vers le Nord-Est (fig.9). L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours des Oueds Chemora et Boulefraï qui drainent les eaux de surface. Les affleurements carbonatés et gréseux, au Sud et SW du bassin, contribuent indirectement à la recharge de la nappe par un déversement latéral et souterrain des eaux qui dévalaient les massifs bordiers. L'alimentation par le Djebel Fedjoudj au Nord-Est est considérablement plus réduite à cause du pendage des couches géologiques (Houha, 2007).

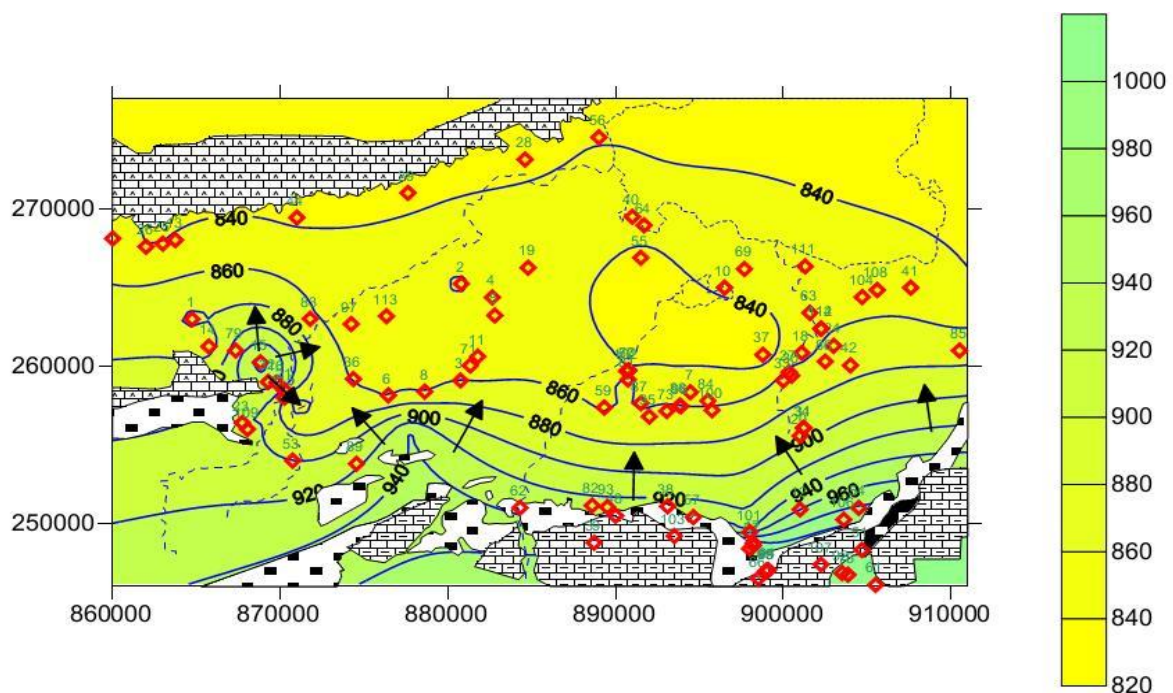


Figure 9: Carte piézométrique d'après (Houha, 2007).

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUE CLIMATOLOGIQUE

Introduction

Le cycle souterrain de l'eau et le climat sont étroitement liés. L'évolution du climat à une influence déterminante sur la variation de l'ensemble des réserves et les fluctuations des nappes d'eau souterraines qui s'alimentent par infiltration directe et se décharge par évaporation au cours de la saison en pays aride et semi-aride. Le climat intervient par sa composition hydrique (pluviométrie), qui régit fortement le régime des eaux souterraines et superficielles.

Le climat algérien est un climat de transition. Il varie du type méditerranéen dans le Nord au type désertique dans le Sahara. Du fait de son appartenance géographique et bioclimatologique à la zone aride et semi-aride (Djebaili, 1984), l'Algérie du Nord est soumise à des conditions hydroclimatique défavorables, caractérisées par des précipitations irrégulières avec des variations interannuelles importantes et une forte irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements.

L'Algérie est subdivisé, du Nord au Sud, en cinq zones :

- La zone littorale.
- L'Atlas tellien.
- Les hautes plaines steppiques (qui comprennent notre terrain).
- L'Atlas Saharien.
- Le Sahara.

Cette zonation hydroclimatique est régie principalement par le degré d'influence des courants froids issus du front polaire, qui s'atténuent en allant du Nord au Sud. Seule la région du Sahara reçoit aussi en été les perturbations issues de la mousson Soudanaise.

Une étude globale de synthèse menée par les nations unies (1987) à aboutir aux résultats portés dans le tableau suivant :

Tableau 2: Les caractéristiques des cinq stations hydrométriques.

Zones climatiques	Température(C°)	Précipitations (mm)		
		RégionOuest	Région Centre	RégionEst
Littoral	18	400	700	900
Atlas tellien	19 à 20	600	700 à 1000	800 à 1400
Hautesplaines	19 à 21	250	250	400
Atlas Saharien	21	150	200	300 à 400
Sahara	22	20 à 50	20 à 50	20 à 50

Le climat des hautes plaines steppiques est marqué par un conflit entre les influences de la méditerranée, caractérisé par des hivers doux et une longue période estivale chaude, tempérée

par des brises de mer, et celles du Sahara, avec un vent chaud et sec le sirocco soufflant au Nord du Sahara durant la saison estivale, amène des orages de poussière et sable vers les régions côtières.

Dans les deux cas une dépression nordique vient au contact de l'air chaud venant du Sud (Sahara) ; les masses d'air deviennent alors instable et engendrent des orages au printemps et en automne.

Les pluies sont généralement insuffisantes, irrégulières et inégalement réparties dans l'espace et dans le temps. Elles sont nulles en été et maximales au printemps.

L'étude des données climatiques permettent l'analyse des facteurs du climat de cette zone que nous renseignera sur :

- Le type de climat ;
- le comportement hydrologique du bassin versant ;
- le calcul du bilan hydrologique en fonction des paramètres climatiques.

1 Climatologie :

Le bassin de Tagharist est équipé de station pluviométrique de Yabous. L'exploitation des données climatiques enregistrées dans la station de mesure permettront de caractériser les conditions climatiques de la zone d'étude. Des relevés climatiques sur différentes périodes d'observations sont enregistrés au niveau de stations cité plus haut. Il s'agit des données de l'ANRH. On a une série d'observation des précipitations s'étalant sur 22 ans de 1994 à 2016 pour la station de Yabous. La station est située selon les coordonnées suivantes :

Tableau 3: Les données de la station météorologique.

Station	Attitude	Longitude	Altitude (m)	Période d'observation
Yabous	35°26'37''	06°39'42	1200	1994/2016

2 Etude des paramètres climatiques :

2.1 Les précipitations :

Les précipitations constituent une composante essentielle du cycle d'eau. Elles permettent le renouvellement total ou partiel des nappes par le biais des infiltrations et elles conditionnent l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eaux. En général, quatre aspects sont discutés ; Il s'agit du coefficient pluviométrique et des répartitions saisonnières, mensuelles et annuelles.

Le calcul de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré

sur un grand nombre d'années ou dite précipitation moyenne mensuelle donne un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations.

2.1.1 Evolution des moyennes mensuelles de la précipitation

Les moyennes des précipitations pour la station sont résumées dans les tableaux suivant :

Tableau 4: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2016).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août
P (mm)	45,03	29,88	32,82	34,27	36,69	29,96	36,16	35,09	43,73	21,62	20,22	26,43

La représentation en histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station de la station de Yabous montre une hétérogénéité importante des précipitations d'un mois à un autre, avec une valeur maximale qui atteint 45.03mm au mois de Mai et un minimum de l'ordre de 20.22mm au mois de Juillet.

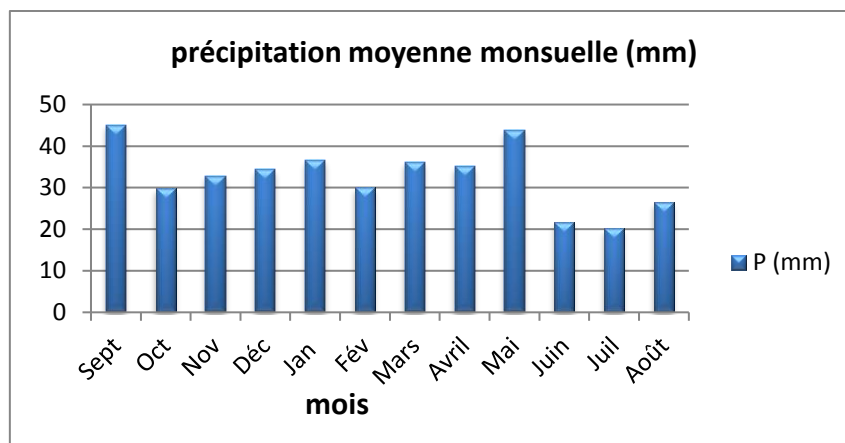


Figure 10: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2016).

2.1.2 Evolution des moyennes annuelles de la précipitation

L'analyse faite sur les données de la station de Yabous montre que, l'année la plus pluvieuse étant **2010**, avec une précipitation annuelle de **600 mm**. L'année **1996** étant la plus sèche avec une précipitation annuelle de **138,8mm** (Figure 11).

Le mois de Mai est le plus arrosé avec une moyenne de **42,087mm**. Juin étant le mois le plus sec avec une moyenne de **18,62mm**.

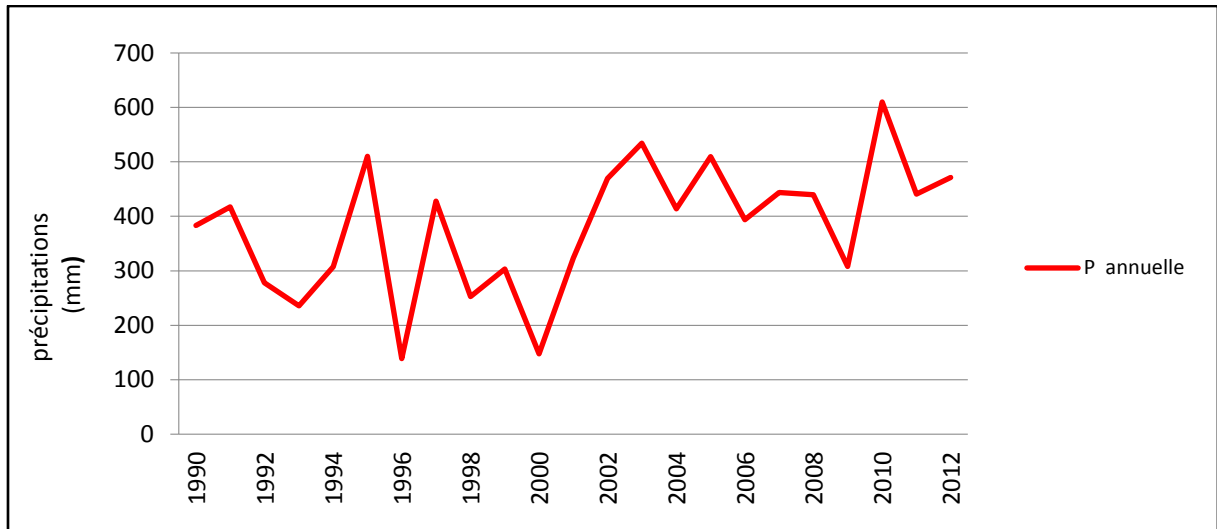


Figure 11: Précipitations annuelles de Yabous (1994/2016).

2.2 Les températures :

La température est un facteur très important dans l'évolution du déficit d'écoulement qui entre dans l'estimation hydrologique, ce paramètre est indispensable à la climatologie, vu son pouvoir évaporateur qu'il exerce sur les surfaces mouillées, et qu'il est à l'origine du bon fonctionnement du cycle de l'eau.

L'analyse des températures est basée sur des observations effectuées au niveau de station de Yabous (Tab. 6) :

Tableau 5: Températures moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2016).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août
T (°C)	21,3	17,0	11,2	7,5	6,6	7,1	10,3	13,3	18,4	23,5	26,9	26,3

D'après ce tableau, on peut distinguer :

Une diminution de la température à partir du mois de Septembre pour atteindre sa valeur minimale au mois de Janvier, c'est le mois le plus froid.

Une élévation de la température où la température croit progressivement du mois de Février pour arriver à une valeur maximale au mois de Juillet, c'est le mois le plus chaud.

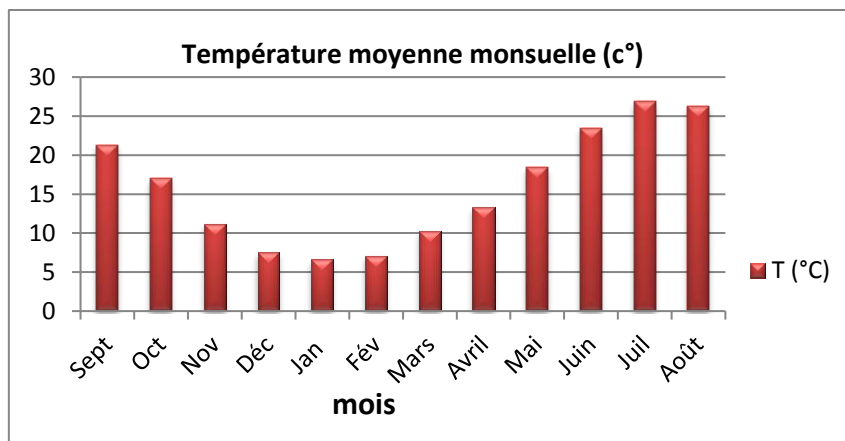


Figure 12: Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station de Yabous (1994/2016).

3 Synthèse climatique

Le climat d'une station donnée résulte de l'interaction de nombreux facteurs. De nombreux indices et formules ont été élaborés pour le caractériser, mais quelle que soit la méthode adoptée, les températures et les précipitations constituent les éléments essentiels dans toute étude synthétique.

La combinaison de deux principaux facteurs climatiques : la température et les précipitations permettent de déterminer les périodes sèches et humides ainsi que la localisation de l'étage bioclimatique bien définie d'une région donnée.

3.1 Diagramme ombro-thermique d'Emberger

L'analyse des températures et des précipitations permet de mettre en évidence par le biais de la courbe ombro-thermique.

Pour GAUSSEN et BAGNOULS 1956, le mois est considéré sec quand le total des précipitations en (mm) est inférieur, ou égal au double de la température moyenne ($2T \geq P$).

On établit un diagramme pluviométrique dans lequel les températures sont portées en échelle double de précipitations.

D'après ce diagramme, on peut déterminer deux périodes bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étend du début du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre.
- Une saison humide et froide qui s'étale du mois d'Octobre jusqu'au mois de Juin.

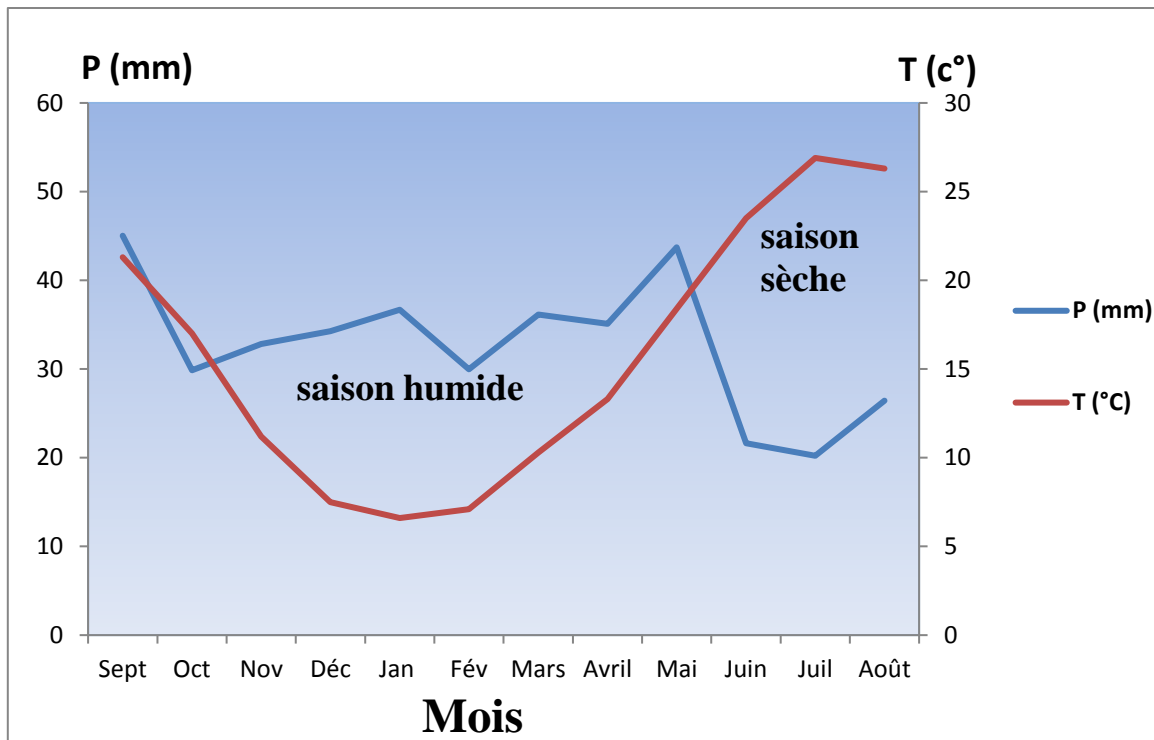


Figure 13: Le diagramme ombro-thermique (1994/2016).

4 Déterminations de l'étage bioclimatique :

4.1 L'indice climatique de MARTONNE 1923 :

L'indice d'aridité de Martonne (1923) se base sur le régime des précipitations et des températures pour caractériser le climat d'une région :

$$A = P/T + 10 \quad (\text{Anbazhagan et al, 2005})$$

Où :

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

T : Température moyenne annuelle en °C.

Ainsi, suivant la valeur de A, il définit des climats distincts :

$20 < A < 30$ Climat tempéré.

$10 < A < 20$ Climat semi-aride.

$7.5 < A < 10$ Climats teppique.

$A < 10$ Climat hyperaride.

Les résultats d'une telle application sont soignés dans les tableaux 7.

Tableau 6: Indice d'aridité de Martonne.

Station	P(mm)	T(c°)	A
Yabous	391,9	15,8	15,18

D'après la valeur de l'indice climatique on voit que la région se caractérise par un régime thermique semi-aride.

4.2 Climagramme d'Emberger :

Afin de déterminer l'étage bioclimatique de la région de Yabous nous avons calculé le quotient pluviométrique d'Emberger (**Q**) avec des données climatiques calculées durant la période 1994 - 2012. Le quotient pluvio-thermique d'Emberger est déterminé selon la formule suivante (**Stewart, 1968**) :

$$Q = 3.43 \frac{P}{(M - m)}$$

Q : quotient pluviométrique

P : pluviométrie annuelle (mm)

M : moyenne maximale du mois le plus chaud (°C)

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

D'après les données climatiques de notre région nous avons :

La pluviométrie annuelle **P** = 391,9mm.

La moyenne maximale du mois le plus chaud **M** = 26,9 ° C.

La moyenne minimale du mois le plus froid **m** = 6,6° C.

L'application numérique donne le résultat suivant : Q= 66.21

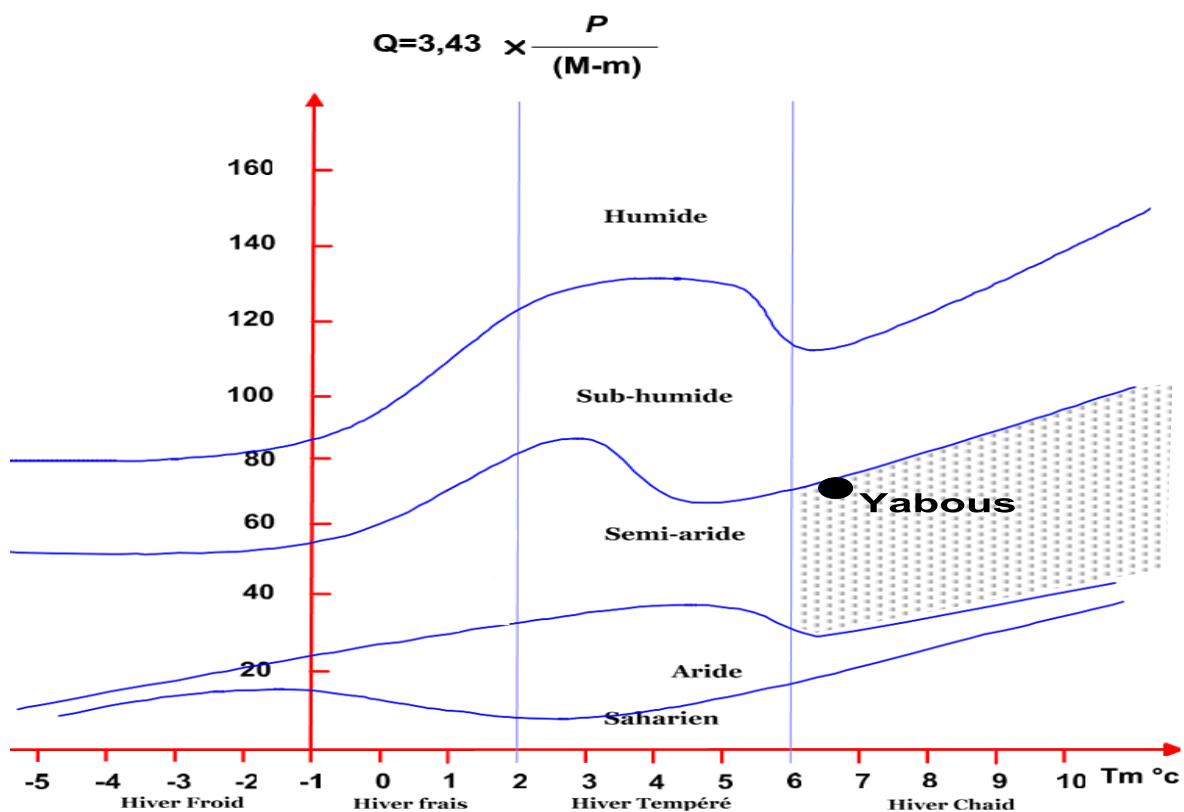


Figure 14 : Climagramme de L. EMBERGER

5 Bilan hydrique

Le bilan hydrique est un moyen de contrôle de la cohérence des données évaluées de manière indépendante. Le bilan hydrique exprime donc le processus que peut suivre une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation avant de retourner à l'atmosphère. Il permet le calcul de la répartition des précipitations reçues par la surface, selon deux phénomènes (Ababsa, 2006 ; Castany, 1968 ; Chorfi et Moheidine, 2005) :

E = l'évaporation ; **R** = le ruissellement ; **RFU** = la quantité d'eau stockée dans le sol (réserve facilement utilisable)

5.1 Evapotranspiration Potentielle (ETP)

5.1.1 Définition :

L'évapotranspiration peut être considérée comme étant la somme des deux termes que sont la transpiration végétale et l'évaporation du sol. L'intensité de l'évapotranspiration est fonction de la radiation solaire, de la température, de l'humidité relative de l'air, de l'humidité du sol, du vent, de la couverture végétale, et enfin des travaux du sol. Elle est le terme le plus important après les précipitations (P). Elle est la somme des quantités d'eau évaporées à partir de la surface du sol et utilisées par les plantes. Elle est difficile à évaluer à cause de sa pluri dépendance aux facteurs tant biologiques que physiques. Elle correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques (cas des nappes phréatiques peu profondes).

5.1.2 Estimation de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P) :

Nous utilisons deux formules pour l'estimation de l'ETP, qui sont :

5.1.2.1 Formule de Thornthwaite :

Cette formule est basée sur l'analyse mensuelle des diverses composantes du bilan hydrique : on calcule pour chaque mois la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration, compte tenu de l'humidité du sol. La formule de Thornthwaite, établie en 1948, ne tient compte que de la température :

$$ETP = 16 (10 T/I)^a \cdot k \text{ (Bize et al, 1972)}$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm)

$$i = (T/5)^{1.514} \Leftrightarrow I = \sum i \text{ (Bouchagour, 2003)}$$

T = température moyenne mensuelle en °C

$$a = [16 I/100] + 0.5 \text{ (Boukous et Bouragaa, 1997)}$$

K : coefficient de correction dépendent de la latitude du bassin versant et donc de l'insolation.

a : indice liée à la température.

- I : indice thermique annuel obtenu à partir de la somme des valeurs mensuelles de température.

5.1.2.2 la formule de Serra :

$$ETP = (1,6.10T/ I)^a(\text{Bel, 1990})$$

$$\text{Avec : } I = \sum i \text{ avec } i = 0.002 T^3$$

$$a = 1.6 (I/100) + 0.5 \quad (\text{Bernard, 1996})$$

5.2 Evapotranspiration Réelle (ETR)

C'est une fraction de l'ETP qui dépend beaucoup plus de l'état des réserves en eau du sol, et donne des informations sur la quantité d'eau évaporée réellement.

5.2.1 Estimation de l'évapotranspiration Réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle annuelle moyenne est calculée par l'application des équations empiriques telles que celles de Turc et de Coutagne :

5.2.1.1 Formule de Turc :

$$ETR = P/[0.9+P^2/L^2]^{0.5}(\text{Boutaleb et Lhoussaine, 2006})$$

Avec : P : les précipitations annuelles moyennes en mm

L = 300 + 25 T + 0.05 T³ où T est la température annuelle moyenne en ° C

5.2.1.2 Formule de Coutagne :

$$ETR = P - \lambda P^2(\text{Brassington, 1988})$$

Cette formule n'est valable que lorsque la précipitation de la région d'étude est comprise entre : $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$ avec $\lambda = 1/0.8 + 0.4 T$, avec T la température moyenne annuelle exprimée en °C.

5.3 Calcul des réserves facilement utilisables (RFU) :

Selon G. Gastany lorsque les quantités d'eau prévenant des pluies dépassent celles perdues par l'évapotranspiration, le surplus est stocké et constitue ce qu'on appelle réserve facilement utilisable (RFU). $RFU = (P - ETP) + RFU$ (mois précédent).

Tableau 7: Bilan hydrique à la station de Yabous (1994/2016).

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aoû	Total
T(c°)	21,30	17,00	11,20	7,50	6,60	7,10	10,30	13,30	18,40	23,50	26,90	26,30	
P (mm)	45,03	29,88	32,82	34,27	36,69	29,96	36,16	35,09	43,73	21,62	20,22	26,43	391,90
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	
ETP (mm)	102,12	67,80	31,48	16,51	14,03	15,35	33,11	52,56	95,62	140,87	176,53	159,47	905,45
P-ETP	-57,09	-37,92	1,34	17,76	22,66	14,61	3,05	-17,47	-51,89	-119,25	-156,31	-133,04	-513,55
RFU (mm)	0,00	0,00	1,34	19,10	25,00	25,00	25,00	7,53	0,00	0,00	0,00	0,00	102,97
ETR (mm)	45,03	29,88	31,48	16,51	14,03	15,35	33,11	35,09	43,73	21,62	20,22	26,43	332,48
EX (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	16,76	14,61	3,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,42
DA (mm)	57,09	37,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,47	51,89	119,25	156,31	133,04	572,97

Afin d'éclairer les résultats obtenus, une représentation graphique des données a été faite en Figure 14.

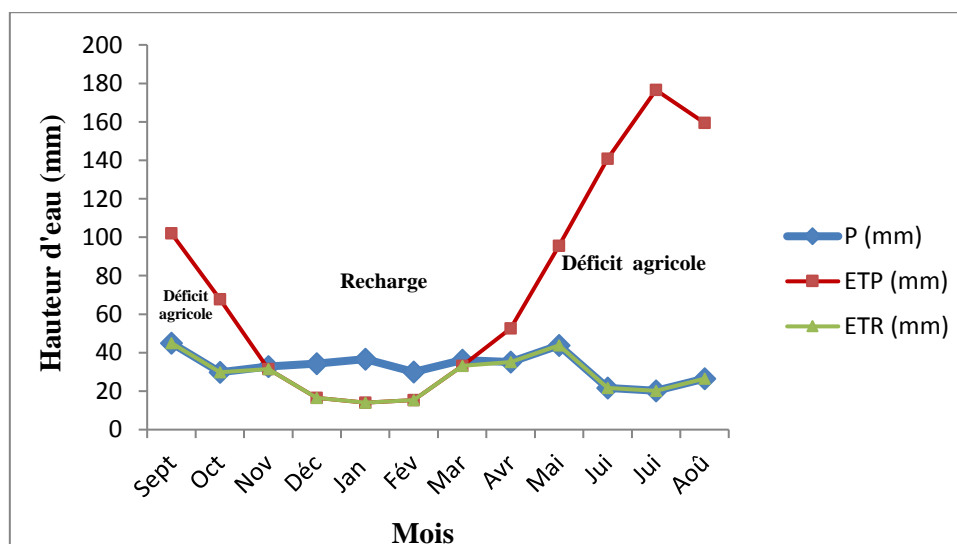


Figure 15 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite pour l'année 1994/2016.

Ce graphe montre que l'évapotranspiration maximum a été observée pendant les mois de Juillet et d'août pour des valeurs de 176,53 et 159,47 mm, ce qui produit un déficit agricole et

nécessite une irrigation pour les zones cultures. Par contre, pendant les mois de janvier, février et mars on observe une recharge de la nappe avec une valeur de 20 à 40 mm. mois⁻¹. Lorsque la recharge dépasse la RFU, le surplus d'eau va partir soit sous forme d'infiltration vers la nappe, soit sous forme du ruissellement.

Le ruissellement est donné par la formule empirique de Tixeront Berkaloff :

$$R = \frac{P^3}{3 \cdot ETP^2} \text{ Si } P < 600 \text{ mm.}$$

Cette formule a donné une valeur de 24 mm.an⁻¹ ce qui représente 6% de la précipitation. Par contre, le reste de la hauteur des pluies, va partir sous forme d'infiltration ;

$$I = P - (R + ETR)$$

Qui correspond à 35 mm.an⁻¹ (9% des précipitations).

Cette étude nous montre que les pluies, n'assurent pas le stockage permanent de l'eau dans la réserve d'eau facilement utilisable (RFU), ce qui produit un besoin des sols agricoles à l'irrigation surtout pendant la période d'été.

Conclusion :

La zone d'étude appartient au grand bassin versant des Hauts plateaux constantinois, la station météorologique la plus représentative de la région est celle de Yabous.

Le climat de la région est caractérisé par un climat semi-aride de type continental, avec un été très chaud et sec et un hiver très froid et humide.

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 391.90mm, ceci dit que la région d'étude est parmi les régions moyennement arrosées en Algérie.

L'appréciation du bilan d'eau par la méthode de THORNTHWAITE a montré que l'ETP atteint son maximum au mois de Juillet (176,53mm) et son minimum au mois de Janvier (14,03mm), l'excédent à partir du mois de Janvier et s'étale jusqu'au mois de Mars avec un maximum au mois de Janvier (16.76mm), l'épuisement du stock commence au mois d'Avril et se termine au mois Octobre avec un déficit agricole maximum de (156,31mm) au mois de Juillet.

Le ruissellement est de l'ordre de 24 mm par contre lame d'eau infiltrée est de 35 mm.

Les températures moyennes mensuelles varient entre 6.60°C et 26,90°C, avec une moyenne annuelle de 15. 78°C. Le mois de Juillet étant le plus chaud que le mois de Janvier est le plus froide.

CHAPITRE III
GEOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

Introduction

Le chimisme des eaux souterraines dépend essentiellement de la composition des milieux traversés et du temps de séjour dans chacun d'eux, l'étude chimique permet de connaître :

- L'origine des eaux souterraines, ainsi que leur potabilité et leurs degrés de pollution.
- Connaître les critères physico-chimiques de la qualité des eaux superficiels pour l'irrigation ainsi que d'établir la relation géologie- chimie.

L'interprétation des analyses a pour but de déterminer le faciès chimique, d'effectuer des comparaisons spatio-temporelles et de mettre en évidence les différents éléments pouvant jouer un rôle primordial dans leur répartition et par conséquent d'établir la genèse et l'origine des éléments chimiques.

L'échantillonnage a été effectué sur 34 points d'eau dans la région d'étude. Ces derniers sont prélevés durant la période juin 2016 et ont été analysés au laboratoire d'Analyse Environnementales et d'Essais Chimiques sur les Matériaux (Ain M'Lila) et le Laboratoire de l'université Abbes Laghrour Khenchela.

Parmi les paramètres physico-chimiques étudiés on a :

- Les paramètres physiques (Températures, pH, conductivité).
- Les paramètres chimiques : éléments majeurs

Les cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ .

Les anions : HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- et les métaux lourds (Zn, Cu, Cd, Pb),

La fiabilité des analyses chimiques a été contrôlée à l'aide de la balance ionique (bi) exprimée par la formule de G. Castany, 1962 est représentée de la manière suivante :

$$bi = \left[\frac{\text{Somme anions} - \text{Somme cations}}{\text{Somme anions} + \text{Somme cations}} \right] \times 100\%$$

Les analyses pour lesquelles le bi est supérieur à 6% ne seront pas une priorité pour nos interprétations.

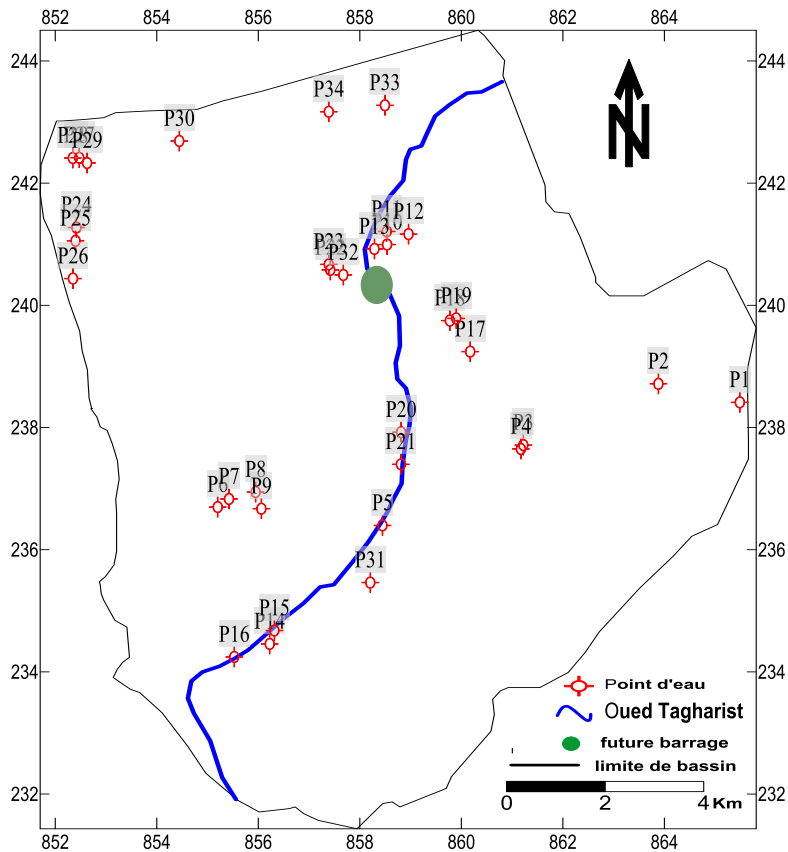


Figure 16 : Carte d'inventaire des points de prélèvements.

1 Échantillonnages et prélèvements

Le prélèvement d'un échantillon d'eau destinées à des analyses hydro-chimiques (éléments majeurs et quelques traces) est une démarche délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; du fait qu'il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.).

1.1 Prélèvements

Les échantillons d'eau destinés aux analyses physico-chimiques sont prélevés dans des flacons en polyéthylènes (Figure 16) de 500 ml et des tubes en polyéthylène de 50 ml stériles et bien rincés avec de l'eau à échantillonnée. Comme règle générale, le matériel du terrain consiste en une série de bouteilles d'échantillonnage, une glacière, un échantillonneur et des instruments de mesure, tels qu'un multi paramètre.



Figure 17 : Multi-paramètre de type CONSORT C931 plus flacon en polyéthylènes.

Cette campagne d'échantillonnage a été réalisée au cours du mois de Juin 2016 en parallèle avec la relève piézométrique durant la période de hautes eaux dans le but de mieux suivre l'évolution de la qualité chimique des eaux.

Les mesures et le prélèvement ont été effectués sur les ouvrages en fonctionnement après au moins 30 minutes de pompage (forages) ou de puisage (puits) pour évacuer l'eau de tuyau (forage) et des débris (puits) afin d'avoir une eau représentative de la nappe. Ces prélèvements sont effectués dans des flacons polyéthylène de 200 ml pour le dosage des ions (anions et cations).

Ces échantillons sont hermétiquement fermés et gardés à l'abri de la lumière, et mis au frais au laboratoire d'Analyse Environnementales et d'Essais Chimiques sur les Matériaux (Ain M'Lila)

1.2 Mesures in situ :

Quatre paramètres physico-chimiques (T, pH, conductivité, TDS) sont mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un appareil multi paramètres (CONSORT C931).

1.2.1 La température de l'eau :

C'est un paramètre important pour l'étude des eaux souterraines, car elle permet de distinguer les eaux qui circulent près de la surface et les eaux profondes. Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne, et de l'évaporation des eaux. Notons qu'elle est influencée par la période de prélèvement (matin et soir) et la profondeur de l'aquifère, ainsi que par les variations climatiques saisonnières.

Les résultats des mesures de la température des eaux souterraines de la région d'étude montrent une valeur maximale de 21°C au forage F19 et une température minimale de 10.6°C à la source S13, avec une moyenne autour de 14.8°C.

L'examen de la carte d'évolution des températures des eaux (figure 17), mis en évidence 2 zones d'eau à faible et moyenne température :

Les eaux à faible températures (< 16°C) prélevées dans les sources situées sur le versant Nord du massif des Aurès à des altitudes élevées (1200 à 2300 m). La température de ces eaux est en équilibre avec la température annuelle moyenne de l'air.

En revanche les eaux situées au nord de la zone d'étude présentent des températures varie entre 16 et 21°C, ce qui peut s'expliquer par l'effet des formations superficielles qui contiennent des proportions importantes d'argile qui couvrent l'aquifère et l'isolent de l'influence extérieure (Seghir et Khérici, 2006 ; Seghir et Khérici, 2008 ; Seghir, 2008).

1.2.2 Le potentiel hydrogène de l'eau (Ph) :

La molécule d'eau est légèrement ionisée en ions H⁺ et OH⁻. Le pH d'une solution est l'inverse du logarithme de la concentration en ions H₃O⁺. Il varie en fonction de la température et de la force ionique. C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques dans les diagrammes Eh-pH:

$$\mathbf{Ph} = \log (1/ [\text{H}_3\text{O}^+]) = 1 \log (1/ [\text{H}^+])$$

Le pH mesuré dans la région d'étude au niveau des points de prélèvements (Figure 18) varie entre 7.29 la source 11 et 8,68 pour le forage 34. La moyenne est de l'ordre de 7,69. En général, les eaux sont neutres à alcalines. Ceci est lié à la nature des roches présentes dans la région et qui sont essentiellement constituées de roches sédimentaires à composante carbonatée importante.

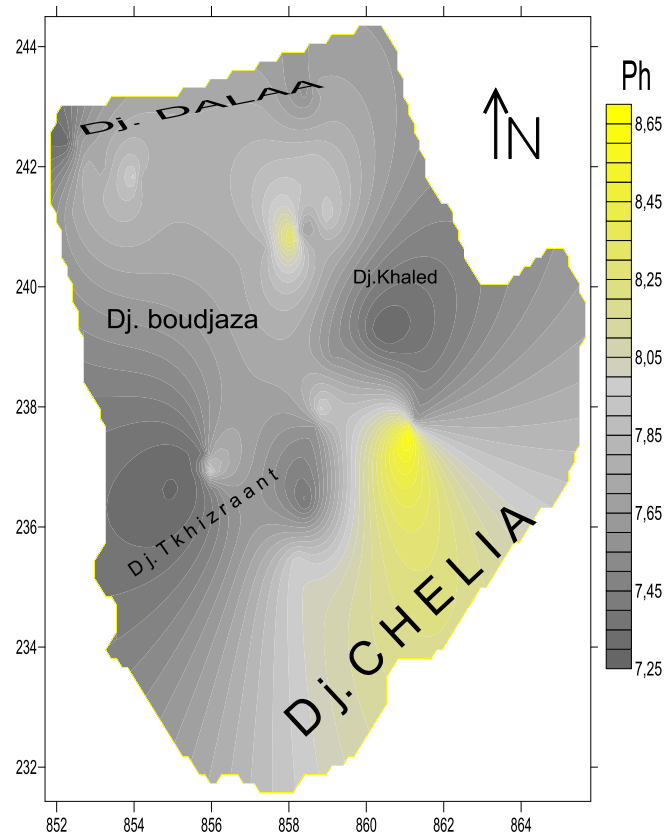


Figure 18: Carte de répartition des Ph des eaux de la zone d'étude.

1.2.3 La conductivité :

La conductivité électrique est un moyen important d'investigation en hydrogéologie. La variation de la conductivité est liée étroitement aux modifications de la minéralisation des eaux souterraines et à la température de milieu.

Les valeurs de la conductivité des eaux de la région d'étude varient entre 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (P22) et 3948 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (F4).

L'examen de la carte de la conductivité (figure19), montre que les teneurs en sels croissent dans le sens de l'écoulement, les faibles teneurs sont mesurées en amont du bassin ; dans les émergences calcaires. En revanche les valeurs extrêmes est enregistrée au Forage F4, avec une valeur de 3948 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, dues aux apports pluvieux qui lessive, et à l'effet de la dissolution des évaporites et des alluvions au niveau de Dj.Dalaa.

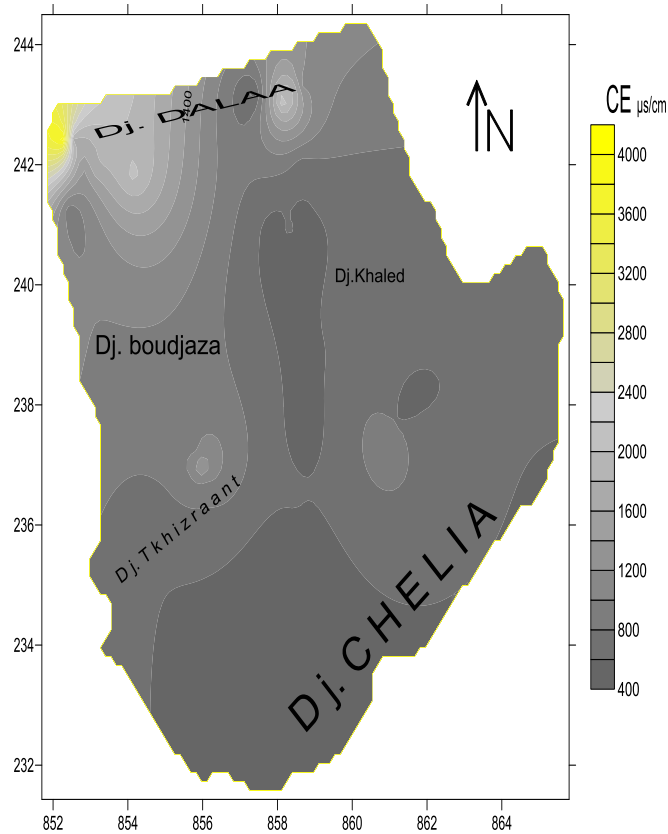


Figure 19: Carte de répartition des conductivités (c25°C).

1.2.4 TDS (Total Dissolved solids):

Signifie total des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé des sels inorganiques et de quelques matières organiques ; déterminée surtout par la nature chimique et minéralogique des sédiments qu'elles traversent (Rodier, 2009).

Les valeurs de TDS des eaux de la région d'étude (Figure 20) varient entre 198 mg/l (P22) et 2022 mg/l (F4) avec un moyenne de 526mg/l Les eaux sont caractérisées par des teneurs généralement faibles par rapport aux normes (Seghir et Khérici, 2006 ;Seghir et Khérici, 2008 ; Seghir, 2008).

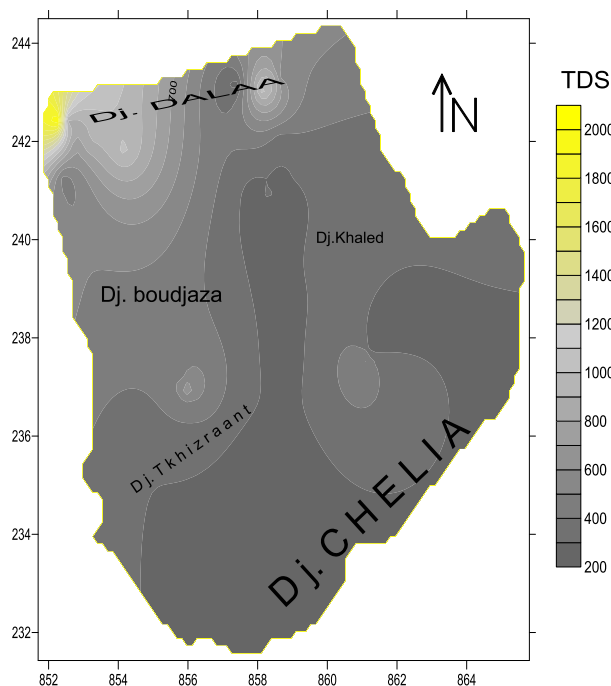


Figure 20: Carte de répartition des TDS des eaux de la zone d'étude.

2 Analyses des éléments chimiques :

Les analyses des paramètres chimiques des échantillons sont effectuées au niveau du **Laboratoire d'Analyse Environnementale et d'Essais Chimiques sur les Matériaux (Ain M'Lila)**.

Les éléments chimiques majeurs concernés par cette étude analytique sont :

* **Cations:** Na^+ , K^+ , Ca^+ , Mg^{++}

* **Anions:** Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^-

Afin d'obtenir des résultats fiables pour la détermination de la quantité des éléments minéraux majeurs ou mineurs constituant les eaux à étudier, des méthodes conventionnelles sont utilisées dans le tableau suivant :

Tableau 8: Méthodes et laboratoires d'analyse des éléments chimiques.

Elément chimique	Méthode d'analyse
SO_4^{--} , NO_3^- , NO_2^- et Cl^-	La spectrophotométrie à UV, visibles.
Na^+ et K^+	La spectrophotométrie à flamme.
Ca^+ , Mg^{++} , HCO_3^-	La méthode titrimétrique.

2.1 Les éléments majeurs

2.1.1 Calcium (Ca^{+2}) :

La présence d'ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles, à savoir

la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) et la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4), selon les réactions suivantes :

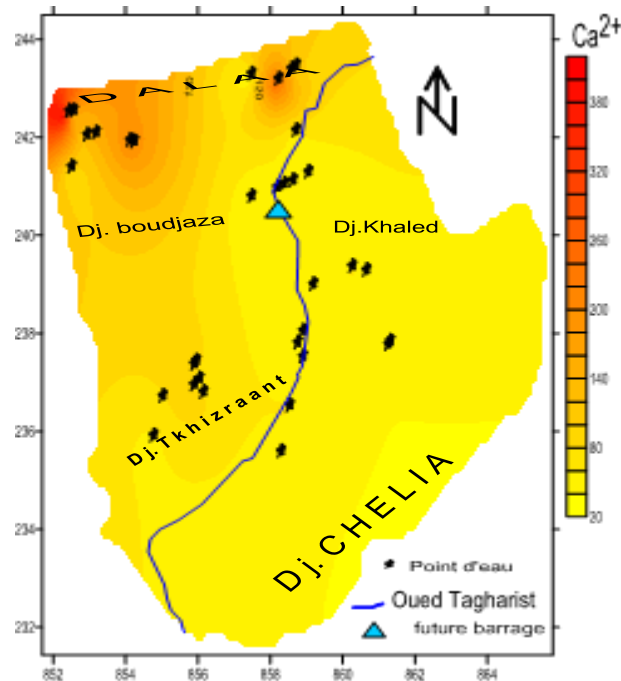
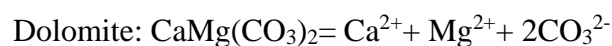


Figure 21: Carte de répartition de calcium dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).

Les concentrations des ions de calcium (Figure 21) augmentent dans le sens d'écoulement et oscillent entre 39,66 (P22) et 396,66mg/l (F4), les valeurs sont relativement faibles, car les eaux souterraines ne sont pas trop minéralisées et proviennent de la dissolution des formations carbonatées de bordures. Les fortes teneurs apparaissent au Nord-est de la zone d'étude, on pense qu'elles résultent de la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) et les dépôts évaporitiques provenant de Djebel Dalaa.

2.1.2 Magnésium (Mg^{+2}) :

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite), selon les réactions :



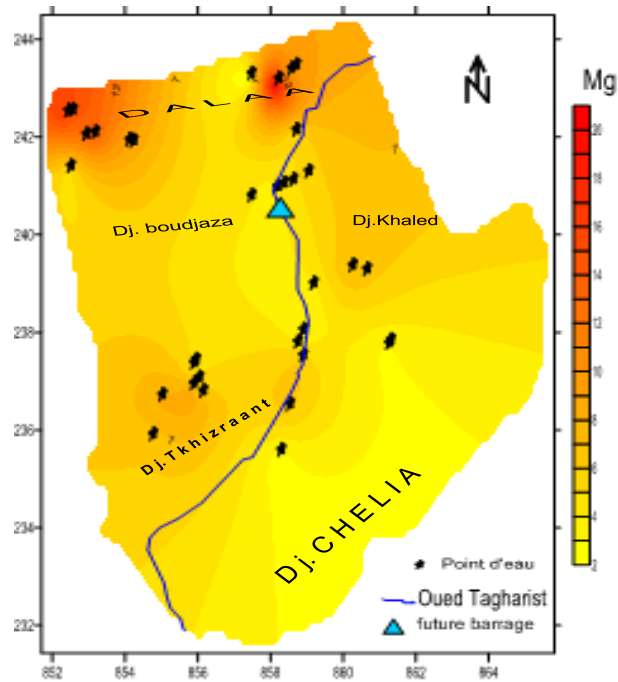


Figure 22: Carte de répartition de magnésium dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).

Les valeurs de magnésium dosées au niveau des puits varient entre 2,11 (P12) et 21,26mg/l (P20). Ces différences de teneurs pourraient avoir leur explication dans un processus similaire à celles des ions Ca^{2+} décrit ci-haut. En somme, le magnésium se comporte de la même manière que le calcium dans l'aquifère.

2.1.3 Chlorure (Cl^-) et sodium (Na^+) :

L'origine de ces deux éléments est liée principalement à la dissolution des formations salifères. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



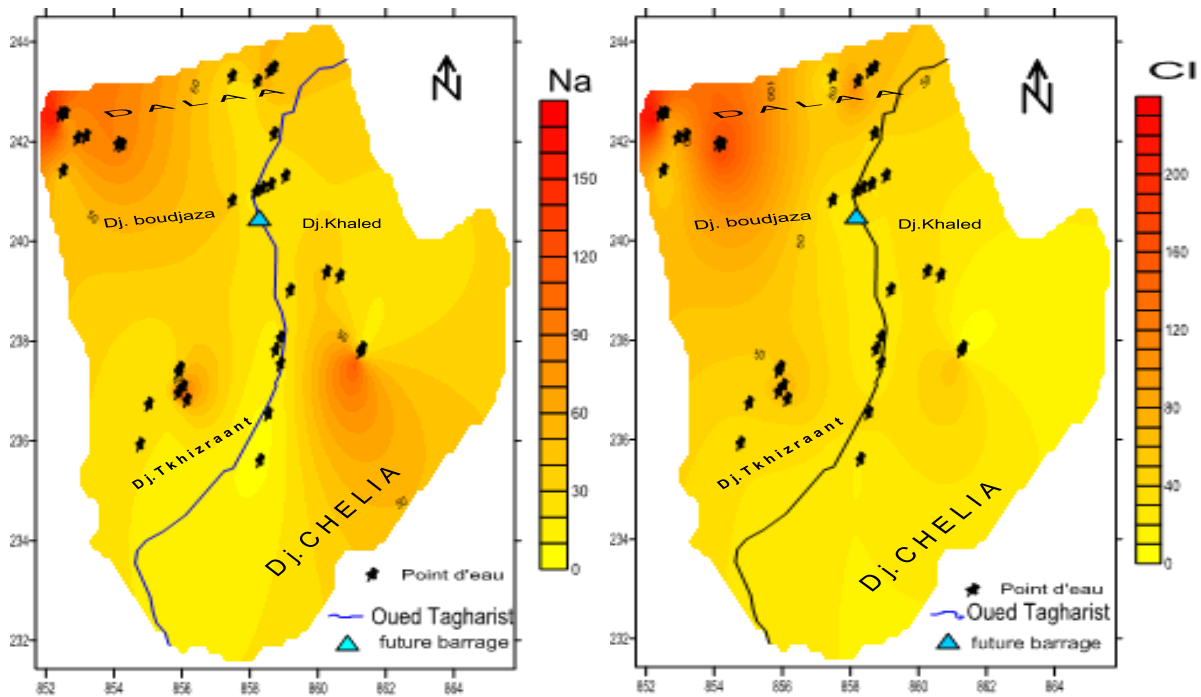


Figure 23: Carte de répartition de chlorure et sodium dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).

Les concentrations de (Na^+Cl^-) varient entre 5,2 mg/l (F4) et 165,7 mg/l(F14) pour le sodium et de 2,55 mg/l(P33) à 233,45(F4) mg/l pour les chlorures, L'observation de la carte (figure 23) montre que les concentrations sont importantes au Nord-ouest de la zone d'étude, Les formations évaporitiques du Trias de Djebel Dalaa constituent l'origine du sodium.

On signale que les faibles concentrations se localisent au centre et en amont de la nappe, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées. Les argiles du Crétacé, qui se trouve dans la nappe, peuvent donner du sodium par le phénomène d'échange de base et ce en fixant un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^+ (Houha, 2007).

Les teneurs en chlorures sont corrélées à celles du sodium ($r = 0,6$), ce qui confirme la même origine qui est dû à la dissolution rapide des formations évaporitiques riches en halite.

2.1.4 Potassium (K^+) :

Le potassium provient généralement de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK).

Leur concentration oscille entre 1,1 (F19) et 11,5 mg/l (F4), On peut constater que cet élément participe moins à la minéralisation des eaux (Seghir et Khérici, 2006 ;Seghir et Khérici, 2008 ; Seghir, 2008).

2.1.5 Sulfates (SO_4^{2-}) :

La présence d'ions sulfatés dans l'eau est liée d'une part à la dissolution des formations gypseuses selon la relation :



Et d'autre part à l'utilisation des engrais chimiques ainsi que la présence des eaux usées.

L'analyse de la carte des teneurs en sulfates (Figure 24) révèle que les valeurs varient de 30,08 mg/l (P22) à 366,84 mg/l (F4).

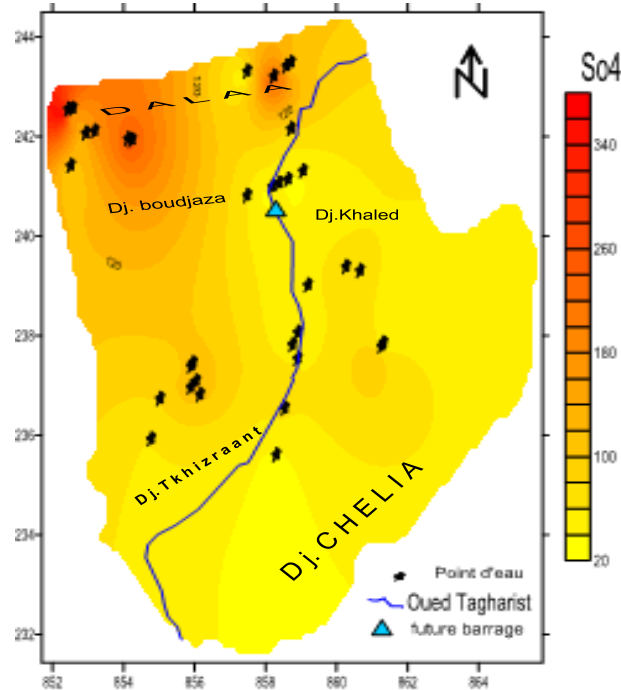


Figure 24: Carte de répartition de sulfate dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).

Les fortes concentrations sont enregistrées au centre et en aval de la zone d'étude. Elles sont liées très probablement à la dissolution des formations triasiques existantes au pied Djebel Dalaa, Sekoum et Dj. Tekhizranaat (lentilles gypseuses).

Une deuxième origine serait attachée à l'activité anthropique liée à l'agriculture utilisant dans la région des produits chimiques riches en sulfates.

Les plus faibles concentrations sont constatées en amont de la nappe, le long des bordures calcaires où se localise le faciès bicarbonaté-calcaire, car les eaux souterraines sont faiblement minéralisées.

2.1.6 Bicarbonates (HCO_3^-) :

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaires) par des eaux chargées en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution conduit à la relation suivante :



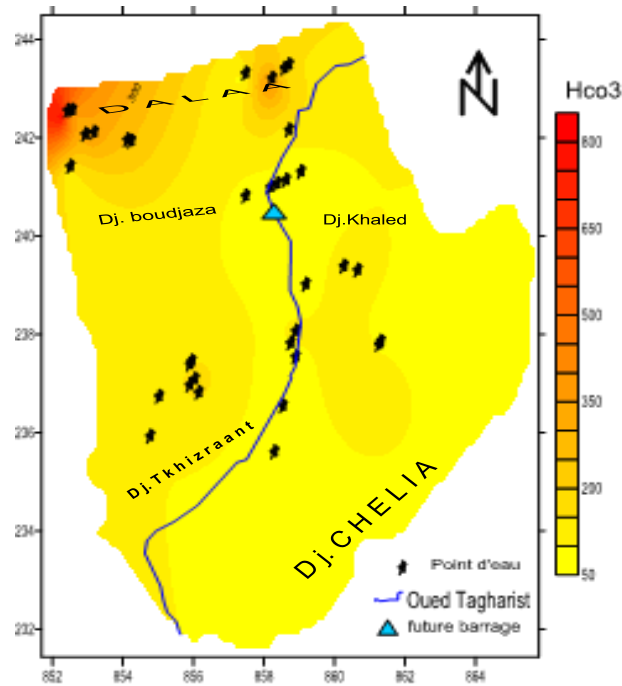


Figure 25: Carte de répartition de bicarbonate dans les eaux de la zone d'étude (mg/l).

Pour les bicarbonates, les teneurs varient entre 69,32 mg/l et 796,32 mg/l avec une moyenne de 170,62mg/l. Les valeurs les plus élevées sont localisées au niveau des bordures, surtout dans la zone orientale de Djebel Dalaa et Djebel sekoum (Figure 25), ce qui est dû à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit à la dissolution des formations gypseuses $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$.

3 Représentation graphique des résultats :

3.1 Diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper en figure 26 a été construit avec le programme Piper issu du logiciel DIAGRAMME (Simler, 2004), ceci afin de déterminer les faciès chimiques. En effet, ce diagramme permet de représenter sur un même graphique des nombreuses analyses autorisant des regroupements des faciès chimiques.

La représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de Piper (Figure 26) montre que ces eaux souterraines sont caractérisées généralement par des faciès chimiques où dominent les bicarbonates, les sulfate, le calcium et le sodium Dans le détail, ces eaux se répartissent entre les pôles suivants :

- Le faciès bicarbonaté calcique (94 % des puits) tire son origine des formations carbonatées bordant la nappe.
- Le faciès bicarbonaté sodique (6% des puits).

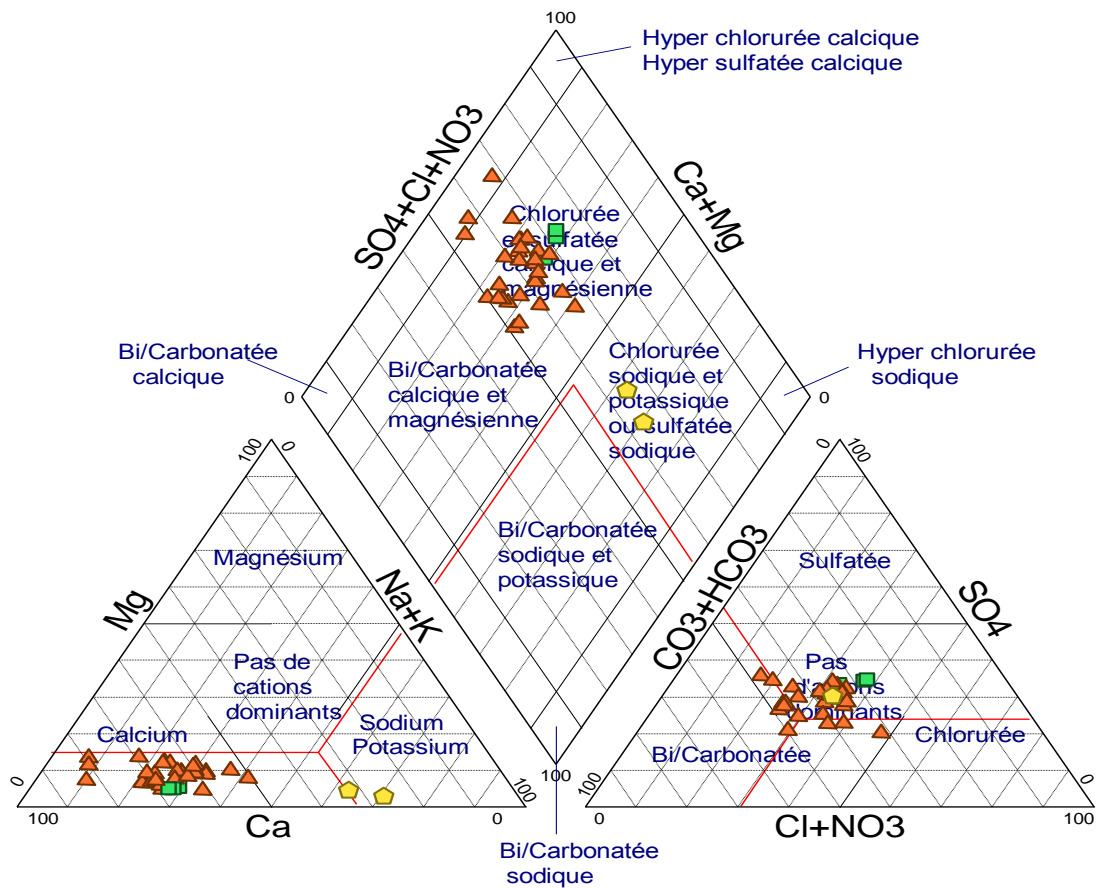


Figure 26: Diagramme de Piper pour l'ensemble des eaux du bassin de l'oued Tagharist.

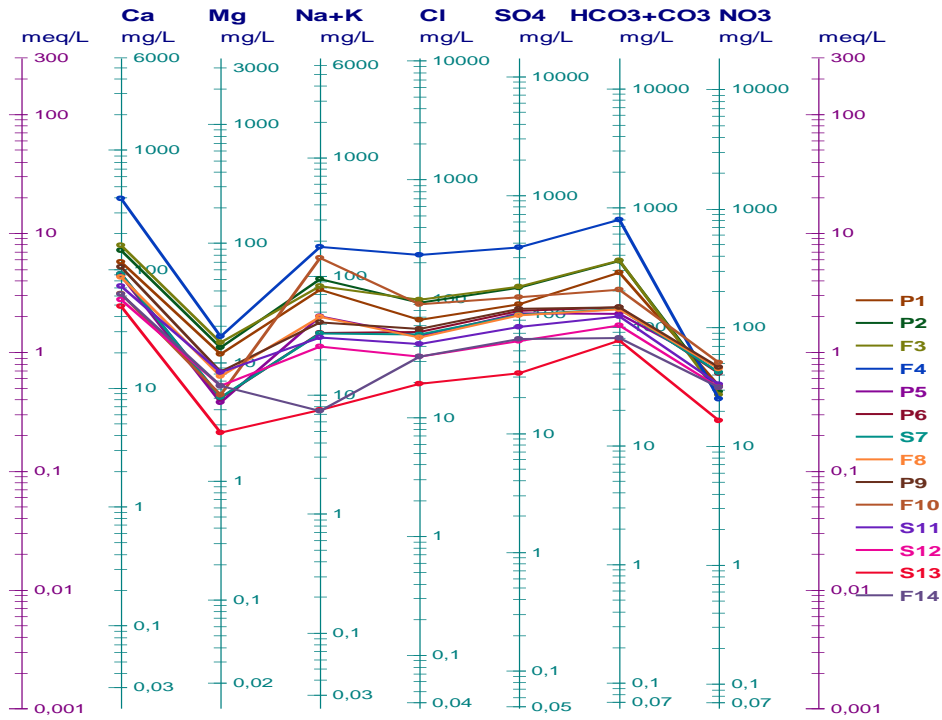
3.2 Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Ce diagramme comporte une échelle logarithmique sur laquelle on porte les teneurs des principaux ions en (mg/l) sur l'axe des abscisses. On porte de gauche à droite, à intervalle régulier (Ca^{+2} , Mg^{+2} , $\text{Na}^{+2}\text{K}^{+}$, Cl^{-} , SO_4^{-} , HCO_3^{-}), les points reportés sont ensuite reliés par une ligne brisée qui facilite la comparaison des résultats de l'analyse de l'eau d'un ensemble d'échantillons (Figure 27).

D'une manière générale, l'allure des courbes brisée montre les faciès suivants : Bicarbonaté calcique pour la majorité des puits. Un faciès Bicarbonaté sodique pour F10, F34.

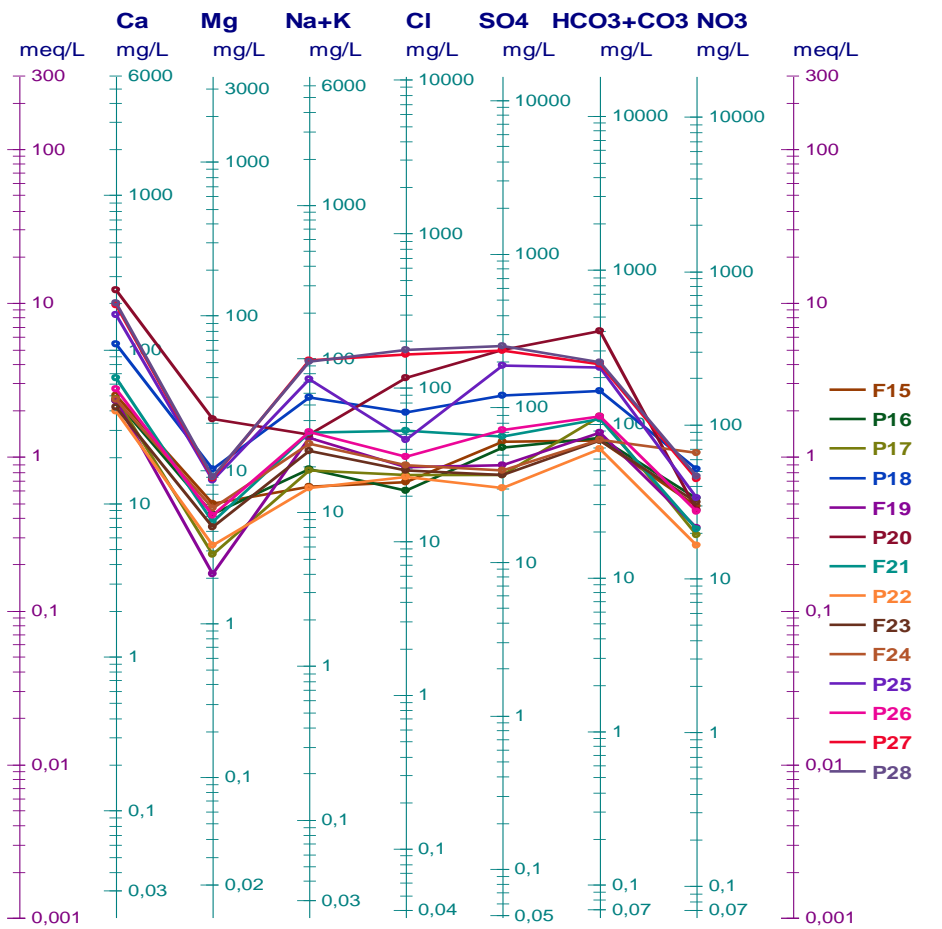
Lieu

Scheller
Berkaloff



Lieu

Scheller
Berkaloff



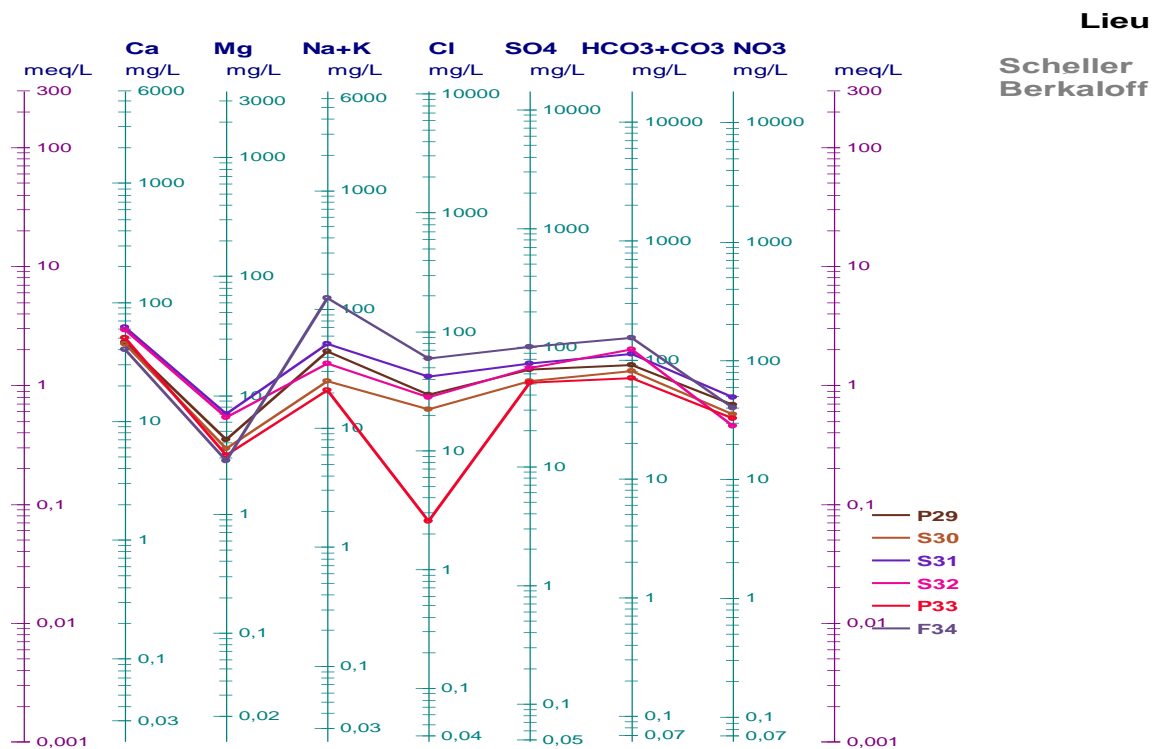


Figure 27: Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux souterraines du bassin de l'oued Tagharist.

4 Relations des éléments majeurs en fonction de chlorure

Pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, nous avons représenté les éléments majeurs en fonction des chlorures (Figure 28). Ce dernier est un élément conservé, ne participe pas aux interactions eau roche, caractérise l'origine de la salinité des eaux et constitue un traceur de mélange (Fidelibus et Tulipano, 1996).

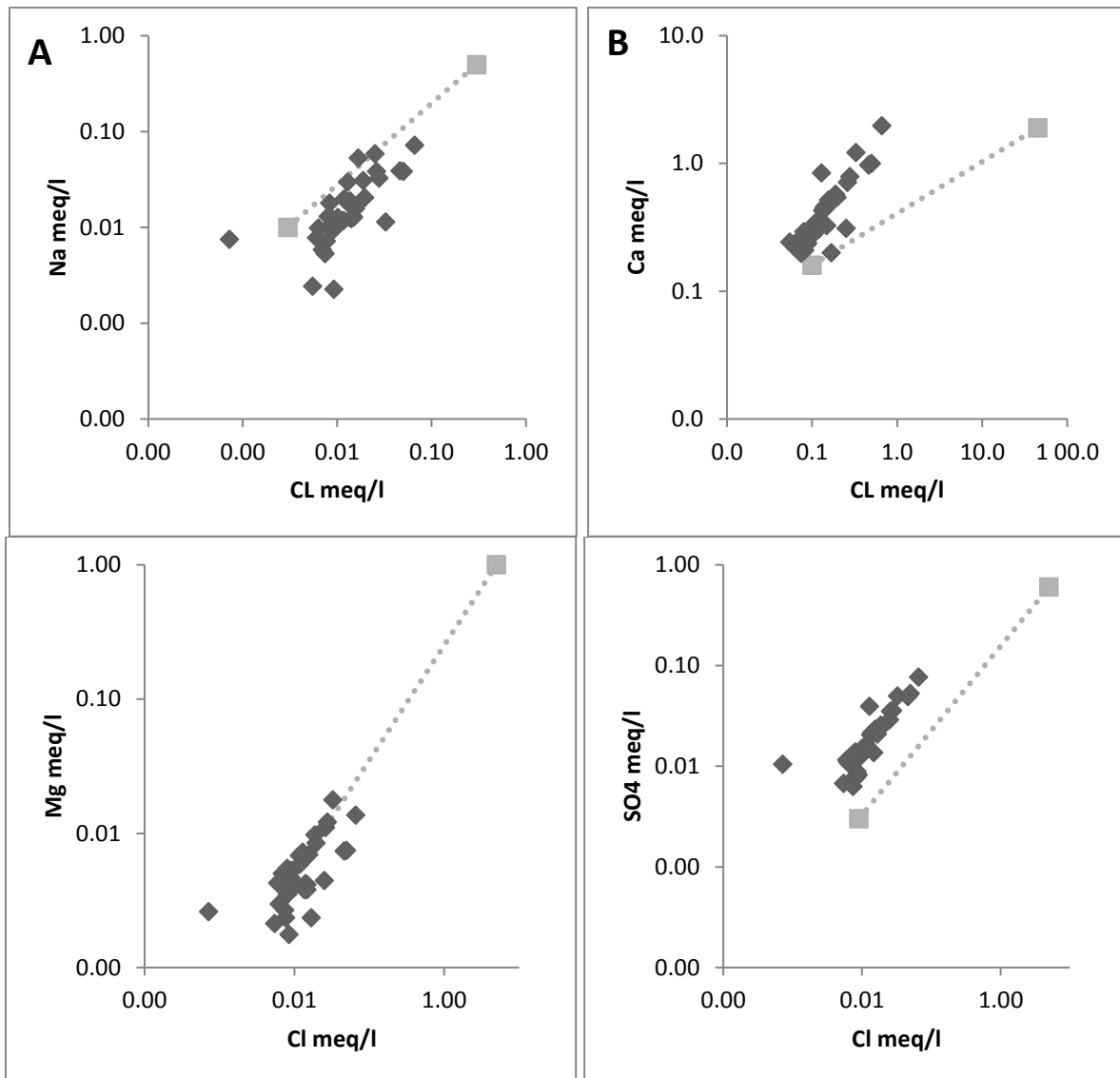
Le graphe Cl^- contre Na^+ montre que tous les points se trouvent en dessous de la droite de mélange. Etant donné que la teneur en Na^+ devrait équilibrer la teneur en Cl^- , le déficit en Na^+ est expliqué par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère et se traduisant par une adsorption de Na^+ et une libération de Ca^{2+} (Capaccioni et al, 2005 ; Djoudi et Houha, 2017). La relation entre le Ca^{2+} et le Cl^- illustre bien ceci en montrant que les points sont souvent au-dessus de la droite de mélange eau douce-eau salée.

La relation entre Mg^{2+} et Cl^- montre un léger enrichissement en Mg^{2+} par rapport à la droite de mélange. Cet enrichissement peut être dû à la dissolution de la dolomite.

La relation entre SO_4^{2-} et Cl^- montre que la quasi-totalité des points se trouvent au-dessus de la droite de mélange eau douce-eau salée. Cet enrichissement peut être expliqué par la dissolution de roches évaporitiques dans les aquifères associées à une contamination d'origine agricole. Dans cette zone l'infiltration des eaux d'irrigation et pluviométrique chargées en sels et fertilisants (sulfates constitue l'un des principaux composants des fertilisants utilisés dans

la région) se trouve facilitée par la faible profondeur de la nappe et la bonne perméabilité du sol.

La relation entre le K^+ et le Cl^- indique que la majorité des points se trouve au-dessous de la droite de mélange à l'exception de quelques points qui se rapprochent de cette droite montrant que l'origine la plus probable du K^+ est la pollution sous l'effet des engrais NPK et/ou à l'argile rouge, très abondante dans la région.



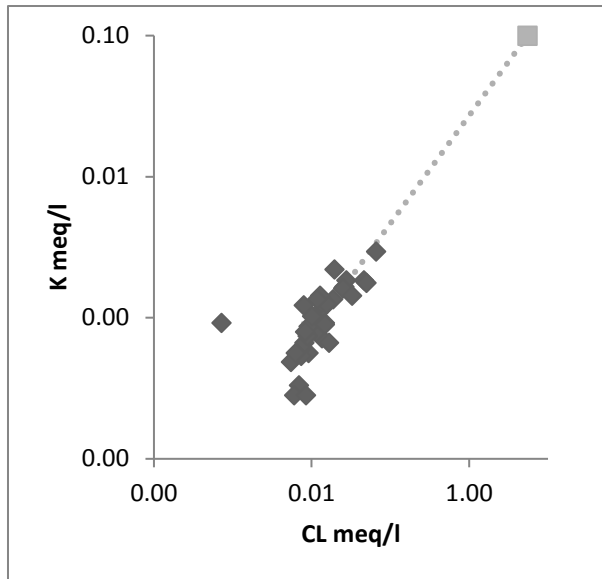


Figure 28: Relation entre Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ et le Cl^- des eaux souterraines et l'eau-douce eau-salée .

5 Identification de l'origine des éléments chimiques

Les processus chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude ont été abordés à l'aide de quelques diagrammes binaires des principaux éléments majeurs. Les premiers diagrammes ont concerné la variation des éléments carbonatés ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- et Ca^{2+} vs HCO_3^-). Ces diagrammes montrent que les points qui représentent les différentes analyses chimiques des eaux échantillonnées, se trouvent positionnés près de la droite de la calcite et près de celle de la dolomite (figure 29). Ceci suggère que l'origine de ces éléments est carbonatée (Hamad et al, 2018). Un second groupe de diagrammes a été établi à l'aide des éléments évaporitiques (Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^-). Le diagramme (Ca^{2+} vs SO_4^{2-}) montre que les points s'alignent autour de la droite de pente "1" influencé par la dissolution du gypse et/ou de l'anhydrite. Le diagramme Na^+ vs Cl^- montre que les points sont situés sur la droite de pente "1", indiquant que l'origine de ces éléments est la dissolution de l'halite (NaCl).

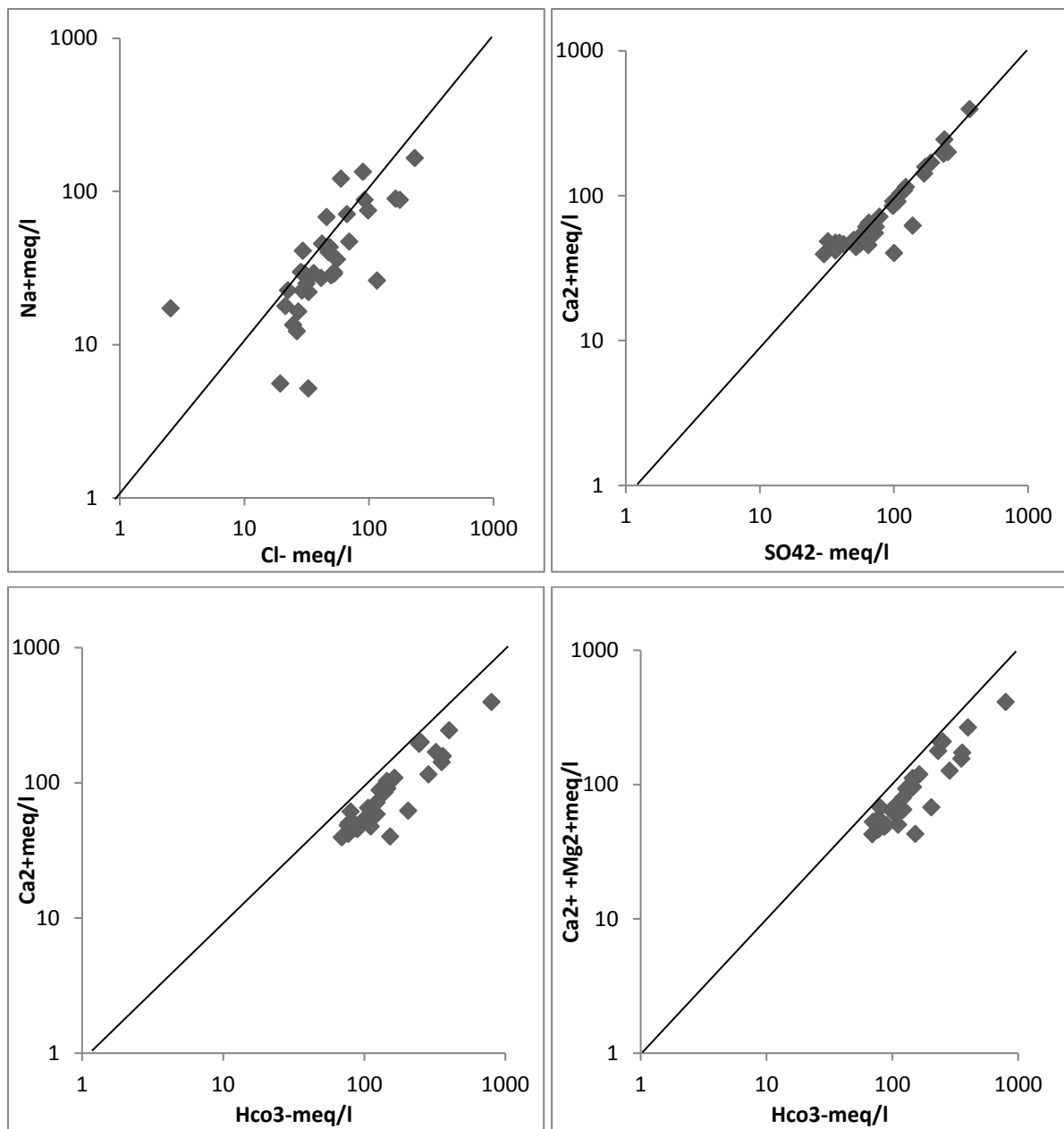


Figure 29: Corrélation entre Na^+/Cl^- , $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ et $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$.

6 L'indice d'échange de base au sein des aquifères (i.e.b.) :

L'indice d'échange (i.e.b.) exprime les échanges cationiques qui peuvent avoir lieu dans un aquifère (Schoeller, 1962 ; 1969). En effet, la surface de la fraction fine de la matrice d'une nappe peut absorber des cations qui peuvent être substitués à d'autres en solution dans l'eau souterraine. Les cations mis en jeu sont : le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium. Le sens des échanges cationique tend à établir l'équilibre entre l'eau et la fraction fine.

L'indice d'échange de base est donné par la formule :

$$i.e.b = \frac{[Cl] - [Na+K]}{[cL]} \quad (\text{les concentrations sont en méq/l})$$

Selon le signe de l'i.e.b., on peut distinguer (d'après Schoeller, 192 ; 1969):

- Si l'i.e.b. < 0 : le calcium de l'eau, est échangé contre le sodium (ou le potassium) du terrain.
- Si l'i.e.b. > 0 : il y a fixation du sodium (ou de potassium) et solubilisation du calcium.

Dans le cas de la nappe de Tagharist, l'indice d'échange de bases est dans la plupart des cas négatif, ce qui indique que les eaux ont échangé des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} contre les ions Na^+ et K^+ des roches encaissantes traversées (Bouziane et Labadi, 2009).

De même, l'analyse du diagramme $Ca^{2+}/(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ versus Na^+/Cl^- (Fig. 30) révèle qu'environ 70% des eaux ont subi le processus d'échange de bases, 30% des eaux présentent un déficit en Ca^{2+} et en Na^+ .

L'excès de Na^+ qui s'accompagne par le déficit en Ca^{2+} témoigne de la responsabilité de l'échange de bases dans l'augmentation des teneurs en Na^+ (Ghebouli et Elhocine, 2008)

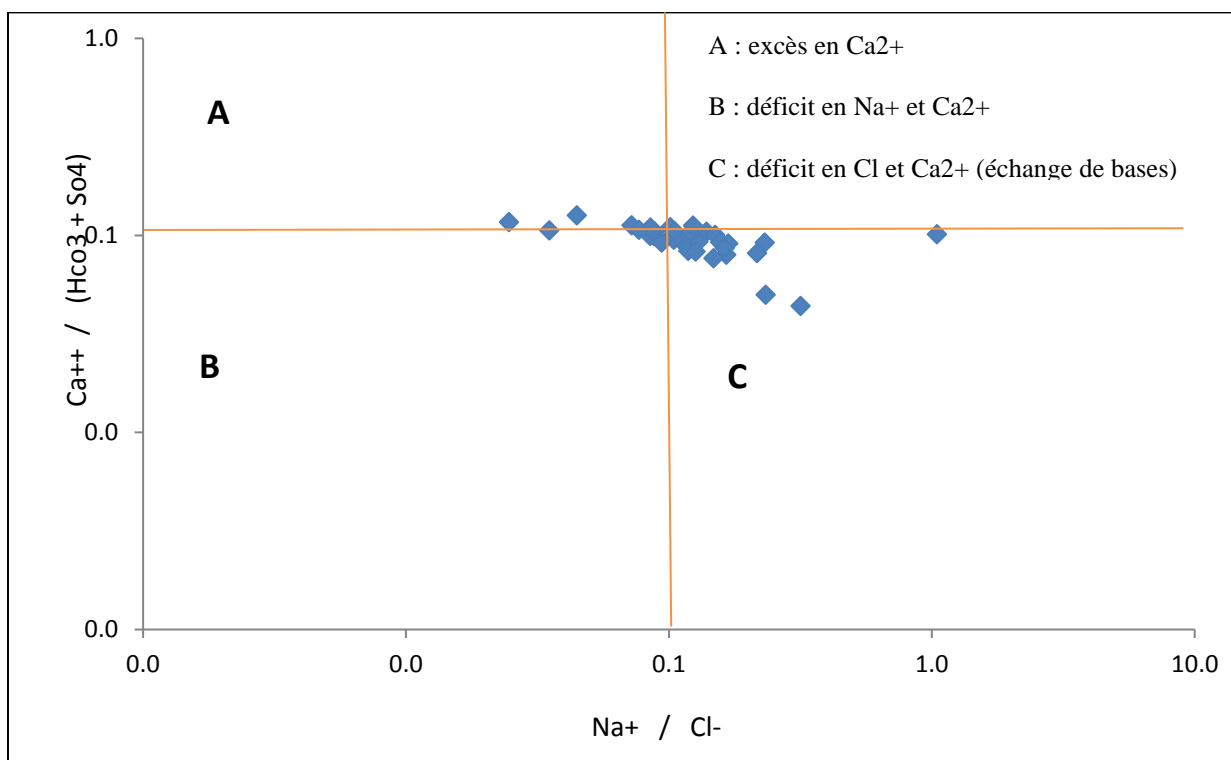


Figure 30: Relation entre le rapport $Ca^{2+}/(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ et le rapport Na^+/Cl^- .

7 Indice de saturation :

L'équilibre eau minéral est souvent exprimé par l'indice de saturation (Is) déterminé par la formule (Plummer et al, 1984):

$$Is = \text{Log} (PAI/Ks)$$

Avec,

PAI : le produit d'activité ionique des ions concernés,

Ks : la constante d'équilibre.

Quand $Is = 0$, l'eau est alors en équilibre avec le minéral. En revanche, l'eau est sous-saturée ou sursaturée vis-à-vis du minéral dans le cas où Is serait inférieur ou supérieur à zéro. Toutefois, dans la pratique, il faut tenir compte des erreurs de précision dans la mesure des teneurs en éléments majeurs. Par conséquent, il est recommandé de considérer que le domaine de saturation est obtenu pour des valeurs comprises entre -1 et 1 (Plummer et al, 1984).

La connaissance de la saturation des eaux vis-à-vis de certains minéraux apporte des éléments nouveaux à la compréhension des phénomènes d'équilibre dans les eaux. D'autre part, elle permet de dire sous quelles formes chimiques sont transportés certains éléments dans les solutions.

L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever, 1997). L'utilisation du programme géochimique de PHREEQC (Plummer et al, 1984), nous a permis de calculer l'indice de saturation (IS) de l'anhydrite, de l'aragonite, de la calcite, de la dolomite, du gypse et de l'halite.

Généralement, les eaux souterraines de la région d'étude sont sous-saturées vis-à-vis du gypse, l'halite, l'anhydrite ; cela laisse supposer une éventuelle dissolution de ces minéraux. Par contre les formations carbonatées calciques (calcite et l'aragonite) tendent à l'équilibre (Figure 31).

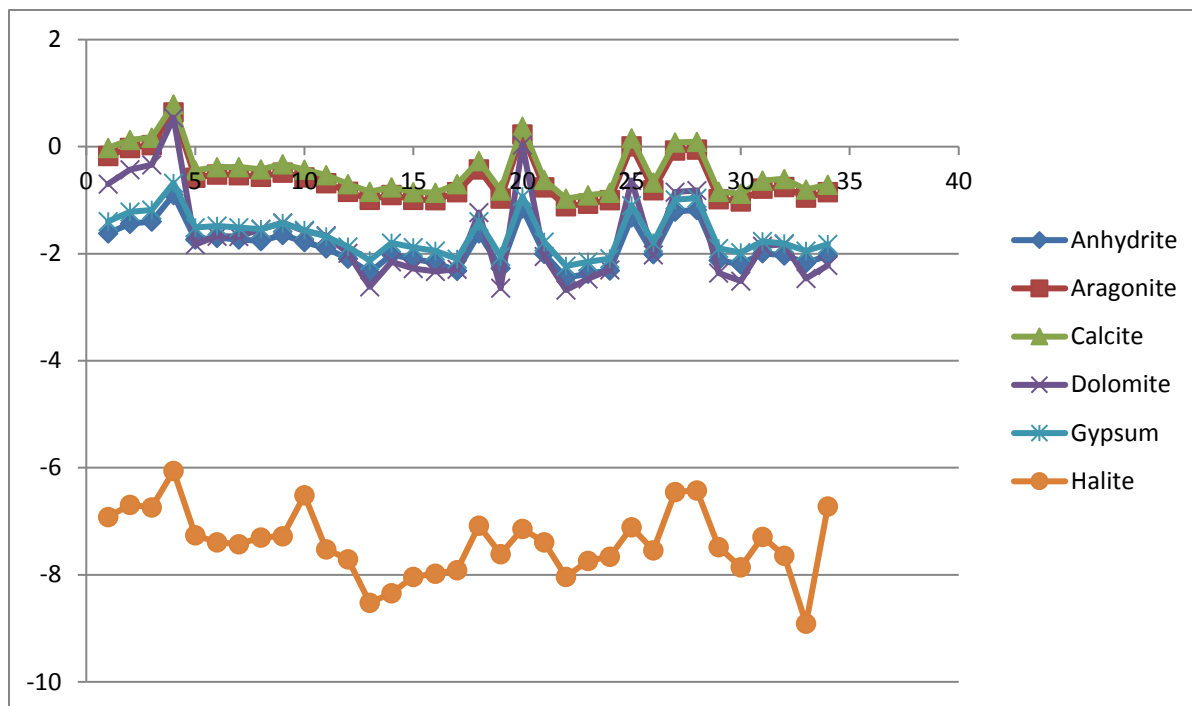


Figure 31: Indice de saturation des eaux échantillonnées.

8 Etude statistique

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique de données multidimensionnelles. Cette méthode a été utilisée en France par (Bakalowicz, 1979 ;Blavoux et Mudry, 1986 ;Mudry, 1987 ; Razack et Dazy, 1990) pour le traitement des données hydrochimiques des aquifères karstiques sur des variables centrées et réduites. De même, (Faillat, 1986 ;Onugba, 1990 ;Mbonu, 1991 ; Tayeb, 1993) l'ont utilisé dans le cadre des études du comportement hydrochimique des aquifères d'altérites fissurés ou sédimentaires en Afrique tropicale. En effet, cette méthode permet de rechercher les relations entre les variables chimiques et de regrouper celles qui présentent un comportement semblable afin d'avoir une idée sur l'évolution du chimisme des eaux souterraines.

Le but de cette analyse statistique (ACP) est de faire dégager les associations qui peuvent éventuellement exister et de ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport aux autres. Cela peut permettre de donner une idée préalable sur les éléments et les sites de pollution.

Dans cette étude, une analyse en composantes principales a été effectuée sur une campagne d'échantillonnage de Juin 2016 représentant l'analyse des eaux souterraines.

L'étude hydrochimique et statistique des eaux souterraines de la nappe superficielle a été effectuée sur 34 échantillons.

Les résultats obtenus sont reportés dans les Tableaux 10 et 11. Cette analyse a permis

d'extraire deux principaux facteurs dont la somme des variances exprimées est de 80,11% (Tableau 11), L'analyse sur le plan factoriel F1-F2 (Figure 32) a mis en évidence les tendances générales. En effet, le facteur F1 a une variance exprimée de 65,08%, le plus important est déterminé par TDS, CE, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻ et Cl⁻. En conséquence, le facteur F1 exprime le phénomène de la minéralisation.

Le facteur F2 représente 15,03% de la variance et il est caractérisé par NO₃⁻ et NO₂⁻. Le facteur F2 exprime donc une pollution organique d'origine anthropique.

Tableau 9: Matrice de corrélation.

Variables	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	NO2	Ph	TDS
CE	1,00											
Ca	0,97	1,00										
Mg	0,79	0,81	1,00									
Na	0,79	0,63	0,42	1,00								
K	0,87	0,81	0,72	0,72	1,00							
HCO3	0,96	0,94	0,81	0,74	0,81	1,00						
Cl	0,94	0,90	0,68	0,77	0,82	0,86	1,00					
SO4	0,98	0,96	0,78	0,76	0,85	0,90	0,95	1,00				
NO3	0,05	-0,03	0,00	0,22	0,23	-0,10	0,11	0,10	1,00			
NO2	0,10	-0,05	-0,12	0,43	0,30	-0,01	0,17	0,11	0,48	1,00		
pH	-0,14	-0,24	-0,31	0,19	-0,22	-0,16	-0,03	-0,14	-0,04	0,18	1,00	
TDS	1,00	0,97	0,79	0,79	0,86	0,97	0,94	0,98	0,04	0,09	-0,13	1,00

Tableau 10: Valeurs propres ET pourcentages exprimés par les axes principaux.

	F1	F2
Valeurpropre	7,810	1,804
Variabilité (%)	65,081	15,031
% cumulé	65,081	80,112

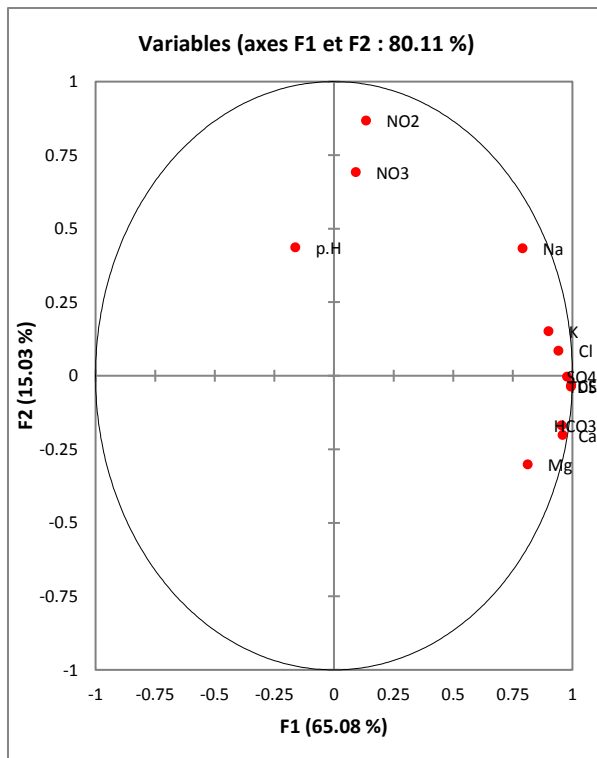


Figure 32: Projection des variables dans l'espace factoriel F1-F2.

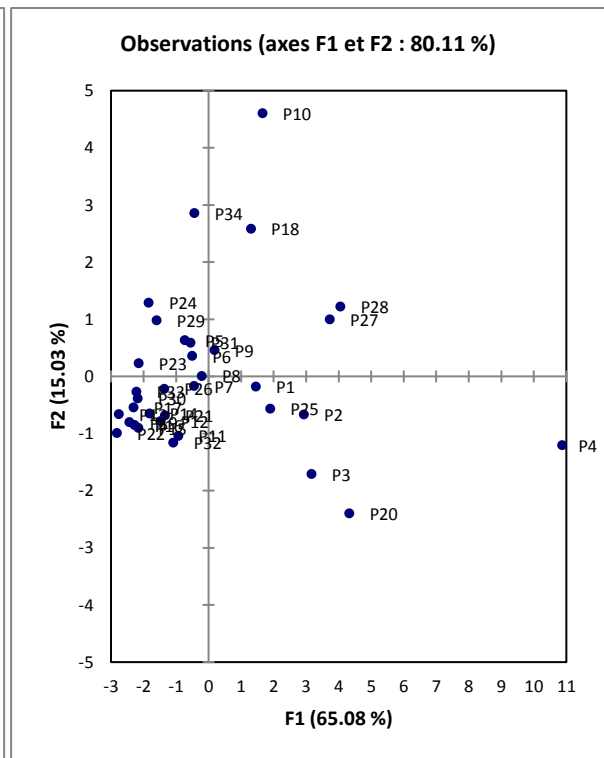


Figure 33: Projection des unités statistiques dans l'espace factoriel F1-F2.

L'espace des individus (Figure 28) traduit fidèlement La localisation du puits 4 à l'extrémité positive de l'axe F1 qu'il révèle une forte minéralisation de ses eaux.

Sur l'axe F2, qui est un axe de pollution, les puits 10, 18 et 34 présente une valeur élevée en nitrate, de l'ordre de 50.51 mg/l, 51.27 mg/l, 40.08mg/l qui sont en opposition au puits 20 qui en présente une faible valeur 27.95 mg/l.

Conclusion :

La qualité chimique d'une eau est fonction du chemin qu'elle a suivi depuis la surface du sol jusqu'au système aquifère. Elle subit d'abord une modification en surface sous l'effet de l'évaporation et ensuite évolue au niveau de la zone non saturée et enfin dans la nappe où elle est en contact plus ou moins long avec la roche-réservoir pour l'acquisition de sa minéralisation.

Les résultats de ce travail, conduisent à l'élaboration de modèles conceptuels sur les mécanismes d'acquisitions de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin de Tagharist.

L'étude des rapports caractéristiques a permis de mettre en évidence que la salinité des eaux est très variable d'un endroit à l'autre et augmente dans le sens d'écoulement des eaux, influencée par l'interaction eau-roche, dissolution et précipitation minérale, échange de bases et par l'activité anthropique.

Les faciès chimiques rencontrés sont de type bicarbonaté sodique pour certains forages (6%), et de type bicarbonaté calcique pour la plupart.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seul les minéraux carbonatés tendent à précipiter, notamment sous la forme de calcite et aragonite.

Par contre les minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite et halite) tendent à la dissolution.

L'analyse statistique a pu montrer que les eaux souterraines se trouvant en amont de la nappe sont faiblement minéralisées et celles qui se trouvent en aval sont fortement minéralisées.

Chapitre IV

Etude des éléments de la pollution et de la vulnérabilité

1 Aptitude des eaux a l'irrigation :

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt de l'importance pour plusieurs activités humaines. Elle peut être rare à certains endroits, comme les zones arides et semi-arides ou relativement en abondance dans les zones forestières. L'agriculture, de façon générale est une grande consommatrice d'eau et surtout lorsqu'elle est pratiquée en saison sèche et vient souvent à manquer. Pour pallier cet inconvénient, le meilleur moyen que les hommes aient trouvé jusqu'ici a été une technique de maîtrise de l'eau, à l'aide de procédés divers. C'est ce complément d'eau que l'on appelle irrigation (Bouaroudj, 2012). La qualité des eaux d'irrigation varie en fonction des activités anthropiques des sols et de son usage. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource (Gouaidia, 2008). Ces ressources, suivant les régions dont elles proviennent, et leur contact éventuel avec des sources de pollution ont des caractéristiques très diversifiées. Plusieurs études ont été traitées la qualité des eaux souterraines et de surface à utiliser en agriculture, Douaoui et Hartani, (2007); Bouhlassa et *al.*, (2008); Rouabhia et Djabri, (2010) ont montré que les pratiques d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20% des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité. Ben Abbou et *al.*, (2014) ont indiqué que la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux utilisées pour l'irrigation des cultures dans la ville de Taza au Maroc ne répond pas toujours aux critères d'utilisation de ces eaux dans l'irrigation.

Dans la zone d'étude, L'arboriculture (pommier et abricotier) connaît une croissance effrénée en matière de développement de l'agriculture avec la naissance d'une nouvelle industrie de conditionnement des fruits qui a suscité une sédentarisation de la population rurale. Cette activité est consommatrice d'eaux et se fait en saison sèche. Dans cette saison, la plupart des paysans recours aux eaux souterraines qu'ils captent à l'aide des puits. Ces paysans s'intéressent à l'utilisation de ces eaux pour l'amélioration de leur rendement sans toutefois connaître leurs effets sur leurs cultures. Cette étude a pour objectif d'étudier les risques d'alcalinisation et de salinisation des sols de la plaine de Tagharist à partir des eaux d'irrigation. Les critères comme le Résidu Sec (RS), la pression osmotique (π), le taux d'absorption du sodium (SAR); le pourcentage d'échange de sodium (ESP), la salinité potentielle (SP) et le diagramme de Wilcox ont été utilisés pour décrire le pouvoir d'alcalinisation des eaux.

1.1 Méthode de traitement des données :

Il existe plusieurs critères de contrôle de qualité des eaux destinée à une activité agricole. Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé les 6 paramètres de qualité dont le Résidu Sec (RS), la pression osmotique (π), le taux d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage d'échange de sodium (ESP) et la salinité potentielle (SP). A côté de ces critères, nous avons utilisé le diagramme de Wilcox. Ces méthodes décrivent le pouvoir alcalinisant des eaux. Elles sont utilisées en combinaison afin d'évaluer le risque potentiel de salinisation des sols. Pour contrôler les effets négatifs des eaux d'irrigation sur les sols et les plantes.

1.1.1 Résidu Sec (RS) et Pression Osmotique (π) :

L'effet primordial de la salinité totale est de réduire la croissance des cultures et leur production (N'diaye et *al.*, 2010 ; Rouabhia et Djabri, 2010). Elle est généralement exprimée par la minéralisation globale ou par la conductivité électrique (CE). Cette dernière est liée au résidu sec (RS) et à la pression osmotique (π) par les équations 1 et 2 utilisées par Rouabhia et Djabri (2010).

$$\text{RS (mg/L)} = 0,7 * \text{CE } (\mu\text{S/cm})$$

$$\pi \text{ (atm)} = 0,00036 * \text{CE}$$

1.1.2 Taux d'absorption du sodium (SAR) :

Le risque d'alcalinité est généralement exprimé par le taux d'adsorption du sodium (SAR). Cet paramètre quantifie la proportion des ions sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) dans un échantillon d'eau. Il faut signaler que le Na^+ joue un rôle négatif dans le sol, parce qu'il réagit avec le sol en diminuant sa perméabilité et donc en freinant la circulation des eaux. Sa présence dans le sol augmente le volume des particules argileuses, entraînant ainsi une obstruction des pores entre les particules. Quand un sol est riche en Na^+ et que son anion dominant est CO_3^{2-} , le sol est dit sol alcalin. Si un sol est riche en Na^+ et SO_4^{2-} , ou en Cl^- , on parle de sol salé. Cependant, dans les deux cas, les végétaux supporteront moins un tel sol. Le calcul du SAR permet d'apprécier la dégradation éventuelle de la structure du sol et l'altération de ses qualités physiques. Le taux d'adsorption du sodium (SAR) a été calculé à partir de l'équation 3 proposée par Richard (1954) :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}}$$

Dans cette formule du SAR, les concentrations en Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimées en méq/L.

1.1.3 Pourcentage de sodium (%Na) :

Il est basé sur la concentration totale des sels dissous et le pourcentage de sodium par rapport aux autres sels dans l'eau (Wilcox, 1955). Wilcox préconise aussi de tenir compte de la conductivité, c'est-à-dire de la salinité de l'eau, du danger d'alcalinisation des sols et des concentrations des éléments nocifs pour les plantes, notamment le bore. En effet, les teneurs très élevées en sels, sodium et bore sont nuisibles aux plantes. Pour cette raison, Wilcox propose 5 classes d'eau pour l'agriculture en fonction des 3 éléments que sont: la conductivité, le %Na⁺ et le bore. Le pourcentage de sodium est calculé par la formule suivante :

$$Na(\%) = 100 * \frac{Na + K}{Ca + Mg + Na + K}$$

Dans cette formule, les concentrations de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺ sont exprimées en méq/L.

1.1.4 Pourcentage d'échange de sodium (ESP) :

La concentration du sodium dans les eaux d'irrigation a une influence sur la perméabilité et l'infiltration des sols. La présence de Na⁺ a des effets néfastes sur la structure des sols par défloculation de l'argile. Le pourcentage d'échange de sodium (ESP) est calculé par l'équation 5 (Rouabhia et Djabri, 2010).

$$ESP = 100 * \frac{[b(SAR) - a]}{1 + [b(SAR) - a]}$$

Où a = 0,0126 et b = 0,01475.

1.1.5 Salinité potentielle :

La salinité potentielle de Donneen est calculée par la formule suivante :

$$SP = Cl^- + (So_4^{2-})$$

Dans ces formules les teneurs des différents ions sont exprimées en méq/L.

1.1.6 Ratio ou coefficient de Kelly (RK) :

Le coefficient de Kelly est donné par l'expression suivante :

$$RK = Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ sont exprimées en méq/L (Kelly, 1957 and 1963). La qualité de l'eau est bonne pour l'irrigation, lorsque le ratio de Kelly est inférieur à 1.

1.2 Résultats et discussion :

1.2.1 Résultats des mesures physico-chimiques des eaux :

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques sur les eaux souterraines du bassin de Tagharist sont consignés dans le Tableau 12. Si l'on considère les valeurs moyennes exprimées en méq/L, l'ordre d'abondance à retenir pour les anions et les cations est respectivement le suivant : $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ et $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Cela signifie que dans les eaux étudiées le Ca^{2+} et le HCO_3^- sont les ions les plus importants. Les eaux appartiennent au faciès bicarbonaté calcique. Les conductivités mesurées varient de 400 à 3948 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1062,21 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans l'ensemble, les eaux souterraines de la région sont douces et faiblement minéralisées.

Tableau 11 : Résumé des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

Paramètres		juin-16			
	Unités	Min	Max	Moy	EC
T	°C	10,6	21	14,81	1,98
Ph		7,3	8,7	7,69	0,31
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	400	3948	1062,21	721,96
TDS	meq/l	198	2022	526	370,35
Ca	meq/l	1,98	19,83	4,75	3,75
Mg	meq/l	0,18	1,77	0,59	0,36
Na	meq/l	0,23	7,2	2,01	1,66
K	meq/l	0,03	0,29	0,11	0,06
Cl	meq/l	0,07	6,58	1,65	1,39
Hco3	meq/l	1,14	13,05	2,85	2,36
So4	meq/l	0,63	7,64	2,2	1,59
No3	meq/l	0,26	1,07	0,57	0,18

Ec : Ecart-type ; CE : Conductivité électrique ; TDS : matières totales dissoutes

1.2.2 Etude de la qualité de l'eau pour l'irrigation :

Les résultats des différents paramètres de qualité de l'eau pour l'usage agricole dans la zone d'étude sont consignés dans les Tableaux 2.

Tableau 12 : Résultats des différents paramètres de qualité de l'eau pour l'usage agricole en juin 2016.

	RS (mg/l)	π (atm)	SAR (meq/l)	%Na	ESP	SP (meq/l)	KR (meq/l)
P1	948,5	0,4878	0,60	32,41	-0,38	3,47	1,51
P2	1239	0,6372	0,67	32,73	-0,28	4,47	1,64
F3	1267,7	0,65196	0,54	27,50	-0,46	4,66	1,63
F4	2763,6	1,42128	0,78	26,13	-0,11	9,34	1,73
P5	627,2	0,32256	0,43	29,00	-0,63	2,82	0,81
P6	688,1	0,35388	0,29	21,80	-0,84	2,97	0,70
S7	676,9	0,34812	0,28	21,26	-0,86	2,84	0,69
F8	646,1	0,33228	0,40	27,70	-0,68	2,76	1,05
P9	748,3	0,38484	0,32	22,44	-0,79	3,08	1,00
F10	1008,7	0,51876	1,56	62,88	1,04	4,21	2,33
S11	550,9	0,28332	0,29	22,87	-0,84	2,44	1,01
S12	442,4	0,22752	0,26	24,13	-0,88	2,03	0,87
S13	303,1	0,15588	0,07	9,95	-1,16	1,37	0,31
F14	433,3	0,22284	0,06	7,30	-1,18	2,06	0,60
F15	380,1	0,19548	0,17	17,07	-1,02	1,81	0,74
P16	376,6	0,19368	0,23	22,72	-0,92	1,67	0,76
P17	386,4	0,19872	0,22	22,97	-0,94	1,64	0,54
P18	821,1	0,42228	0,41	26,54	-0,66	3,53	1,22
F19	380,8	0,19584	0,40	34,33	-0,67	1,79	0,73
P20	1521,8	0,78264	0,15	8,42	-1,05	5,49	1,87
F21	492,8	0,25344	0,33	27,18	-0,78	2,64	0,77
P22	280	0,144	0,18	20,74	-1,01	1,53	0,54
F23	345,8	0,17784	0,31	29,92	-0,81	1,69	0,82
F24	413,7	0,21276	0,32	29,16	-0,79	1,79	0,93
P25	1183,7	0,60876	0,49	25,33	-0,54	3,27	1,07
P26	501,2	0,25776	0,36	30,18	-0,74	2,24	0,89
P27	1388,1	0,71388	0,60	28,07	-0,37	6,82	1,14
P28	1444,1	0,74268	0,59	27,18	-0,40	7,28	1,13
P29	450,8	0,23184	0,55	41,49	-0,45	1,98	1,14
S30	392,7	0,20196	0,31	29,33	-0,81	1,67	0,74
S31	572,6	0,29448	0,52	36,82	-0,50	2,42	1,24
S32	512,4	0,26352	0,35	29,04	-0,75	1,97	0,99
P33	378,7	0,19476	0,23	23,54	-0,93	1,09	0,56
F34	713,3	0,36684	1,77	70,49	1,36	3,12	2,87

1.2.2.1 Résidu Sec (RS) et pression osmotique (π) :

La pression osmotique et le Résidu Sec varient en fonction de la conductivité électrique. Les classes sont les mêmes que celles de la conductivité électrique des eaux à usage agricole (tableau 14). Le RS des eaux souterraines varie de 280 à 2763,60 meq/L, avec une moyenne de 743,54. La pression osmotique quant à elle est comprise entre 0,14 et 1,42 atm avec une moyenne de 0,38 atm, 47% des eaux souterraines échantillonnées sont caractérisées par une salinité moyenne et 50% ont une salinité forte et 3% ont une faible salinité très forte.

Tableau 13 : Qualité de l'eau en agriculture en fonction du RS et π .

	classe	RS (mg/l)	π (atm)	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
juin-16	C1	< 175	< 0,09	eau à faible salinité	0%
	C2	175 < RS < 525	0,09 < π < 0,27	eau à salinité moyenne	47%
	C3	525 < RS < 1575	0,27 < π < 0,81	eau à salinité forte	50%
	c4	RS >1500	π > 0,81	eau à salinité très forte	3%

1.2.2.2 Taux d'Absorption du Sodium (SAR) :

Le SAR des eaux souterraines varie de 0,06 à 1,77 méq/L, avec une moyenne de 0,44 méq/L. Les valeurs du SAR calculées permettent d'isoler une seule classe d'eau : eau d'excellente qualité, à faible danger d'alcalinisation (tableau 15).

Tableau 14 : Qualité de l'eau en agriculture en fonction du SAR.

	classe	Valeur de S1	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
juin-16	S1	< 10	Eau d'excellente qualité, à faible danger d'alcalinisation	100%

Les valeurs de la conductivité donnent lieu à deux (2) classes : eau à salinité moyenne, eau à salinité forte et eau à très forte salinité (tableau 16). 48% des eaux souterraines échantillonnées sont caractérisées par une salinité moyenne, 52% ont une salinité forte. En tenant compte de l'évolution de la conductivité par rapport au SAR, les eaux échantillonnées appartiennent à deux classes : C2S1, C3S1 (tableau 16 et figure 34)

- La classe C2S1 caractérise des eaux d'assez bonne qualité, pouvant être utilisées sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes aux sels. On la rencontre tout en amont de la plaine.
- Les classes C3S1 (de 52 % des puits) désignent des eaux médiocres, utilisables seulement pour l'irrigation de cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou

de bonne perméabilité, avec une salinité qui doit être contrôlée. La classe C3S1 caractérise les puits situés au nord de la plaine de Tagharist.

Tableau 15 : Qualité des eaux pour l'irrigation à partir de l'évolution de conductivité par rapport au SAR.

	Classe	Conductivité	Qualité de l'eau	Pourcentage des eaux
	C2	$250 < C < 750 \mu\text{s/cm}$	eau à salinité moyenne	48%
	C3	$750 < C < 2250 \mu\text{s/cm}$	eau à salinité forte	52%
Caractéristiques				
juin-16	C2S1			48%
	C3S1			52%
C2S1	Eau utilisable pour l'irrigation de la plupart des espèces cultivées, mais veiller au lessivage, difficile dans les sols peu perméables, et au drainage.			
C3S1	Pouvant provoquer une salinisation rapide des sols limitant le rendement de plantes sensibles au sel (agrumes, haricots) et pouvant même limiter, par action au moment de la germination, la croissance d'espèces plus résistantes comme le coton, la betterave, la luzerne.			

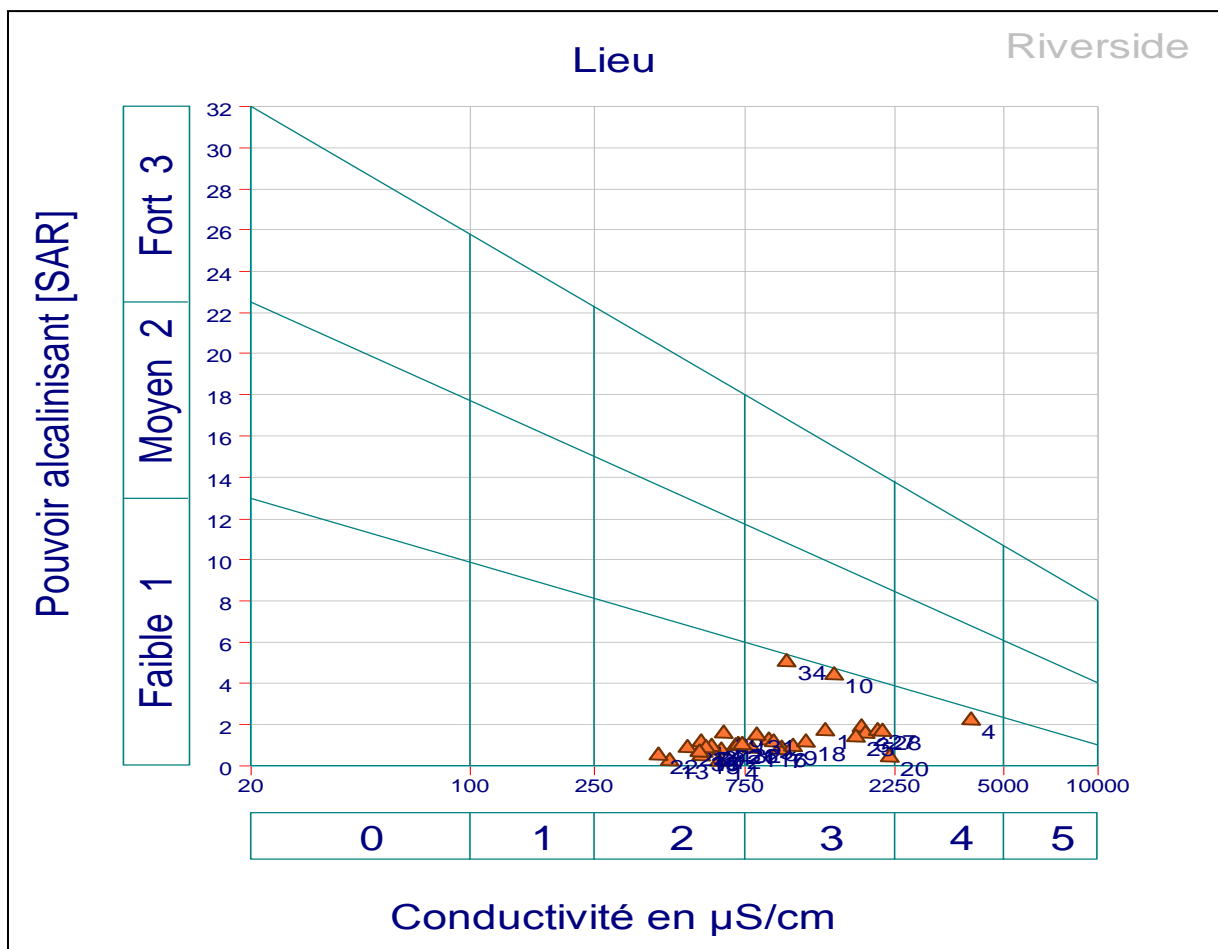


Figure 34 : Représentation sur le diagramme de RICHARDS (Riverside) des eaux de la nappe de Tagharist prélevées en juin 2016.

1.2.2.3 Pourcentage de sodium (%Na):

Dans notre étude le bore n'ayant pas été dosé, nous nous intéressons qu'à la conductivité et %Na⁺ (Tableau 7). Le pourcentage de sodium des eaux échantillonnées varie de 7,30% à 70,49%, avec une moyenne de 28,50%. Le diagramme de Wilcox relatif au pourcentage de sodium et à la conductivité montre que la majorité (90%) des eaux souterraines échantillonnées tombe dans la classe des eaux d'excellentes à bonne qualités pour l'agriculture (figures 34). Sauf 10% des eaux présentent des mauvaises qualités, ça concerne les eaux F10, P29 et F34. Ces eaux pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

Tableau 16 : Qualité des eaux pour l'irrigation à partir de l'évolution du %Na⁺.

	classe	%Na	Qualité de l'eau	Pourcentage
juin-18	C1	< 20	eau de qualité excellente pour l'agriculture	14%
	C2	20 < %Na < 40	eau de bonne qualité pour l'agriculture	76%
	C3	40 < %Na < 60	eau de qualité acceptable pour l'agriculture	2%
	C4	60 < %Na < 80	eau de qualité médiocre pour l'agriculture	8%

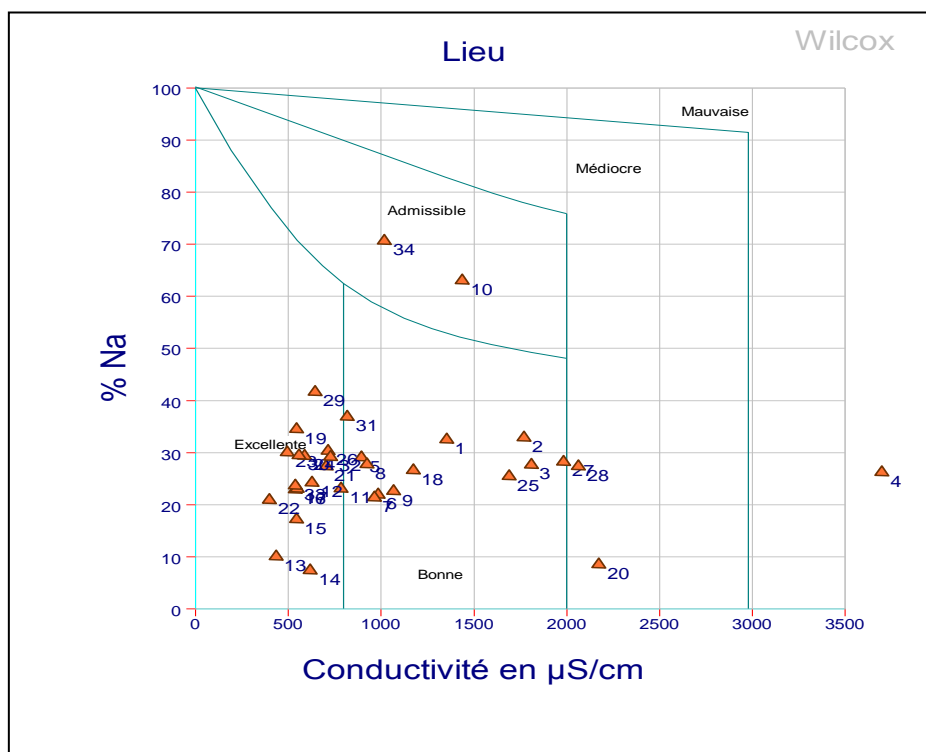


Figure 35: Diagramme de Wilcox pour la classification des eaux souterraines de la plaine de Tagharist.

1.2.2.4 Pourcentage d'échange de sodium (ESP) :

Les valeurs d'ESP des eaux échantillonnées dans la plaine de Tagharist varient de -1,18 à 1,36% (tableaux 13). Près de 94% des valeurs d'ESP sont négatives et montrent une très faible teneur du sodium dans les eaux étudiées. Par conséquent, ces échantillons d'eaux sont excellents pour l'irrigation des plantes sans risque d'alcalinisation ($\text{pH} < 8,5$) et de sodicité des sols.

1.2.2.5 Salinité Potentielle (SP) :

Les valeurs de SP de la zone d'étude varient de 1,09 à 9,34 méq/L avec une moyenne de 6,17 méq/L, 88% des valeurs de SP des eaux souterraines sont inférieures à 5. Ces eaux sont de bonnes à excellentes qualités pour l'agriculture (tableau 18). Et seul 12% des eaux qui présentent des valeurs de SP supérieur à 5 appartiennent aux classes médiocre et mauvaise.

Tableau 17 : Classification des eaux souterraines basée sur la salinité potentielle ou effective.

	classe	SP	Pourcentage
juin-18	Bonne à excellente	< 5	88%
	médiocre à mauvaise	5 < SP < 10	12%

1.2.2.6 Ratio de Kelly (RK):

Les valeurs de RK des eaux varient de 0,31 à 2,87 méq/ avec une moyenne de 3,94 méq/L (tableaux 13). 53% des valeurs de RK obtenues sont inférieures à 1. Ces eaux sont à la classe des eaux de bonnes qualités pour l'irrigation (Tableau 19), et 47% des eaux supérieur à 1 par conséquent ces eaux souterraines appartiennent au médiocre pour l'irrigation.

Tableau 18 : Classification des eaux souterraines basée sur RK.

	RK	Qualité de l'eau	pourcentage des eaux%
juin-16	< 1	l'eau est bonne pour l'irrigation	53%
	> 1	l'eau est médiocre pour l'irrigation	47%

Conclusion

Dans ce travail, nous avons évalué la qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation dans la plaine de Tagharist. Cette question revêt une grande importance du fait des problèmes que connaît la région, en raison de la sécheresse, de la non-disponibilité d'eaux superficielles et de la forte demande résultant des activités agricoles.

L'évaluation de la qualité des eaux par des méthodes classiques a révélé une salinité moyenne à élevée, notamment au nord de la plaine. Elle reste toutefois modérée pour la plupart des puits situés dans la partie amont de la nappe phréatique, qui peuvent donc être utilisés pour l'irrigation.

Deux facteurs peuvent être tenus pour responsables de la salinité :

- La nature de certaines roches, en particulier des marnes gypsifères et des évaporites.
- Les conditions climatiques, caractérisées par une période hivernale pluvieuse (favorable à la dissolution des roches) et par une période estivale sèche et chaude (ce qui induit une forte évapotranspiration et par conséquent une augmentation de la concentration des éléments dissous).

Selon la valeur moyenne du SAR (qui reste inférieure à 5 méq/l), les eaux souterraines présentent un faible danger d'alcalinisation et pourraient donc être utilisées en irrigation. Le SAR et le % Na ont des distributions spatiales semblables.

Quatre types d'eau ont été reconnus par les méthodes de RICHARDS et de WILCOX. L'utilisation de certaines d'entre elles pourrait avoir un effet négatif sur l'évolution des sols, notamment au nord de la plaine.

2 Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :

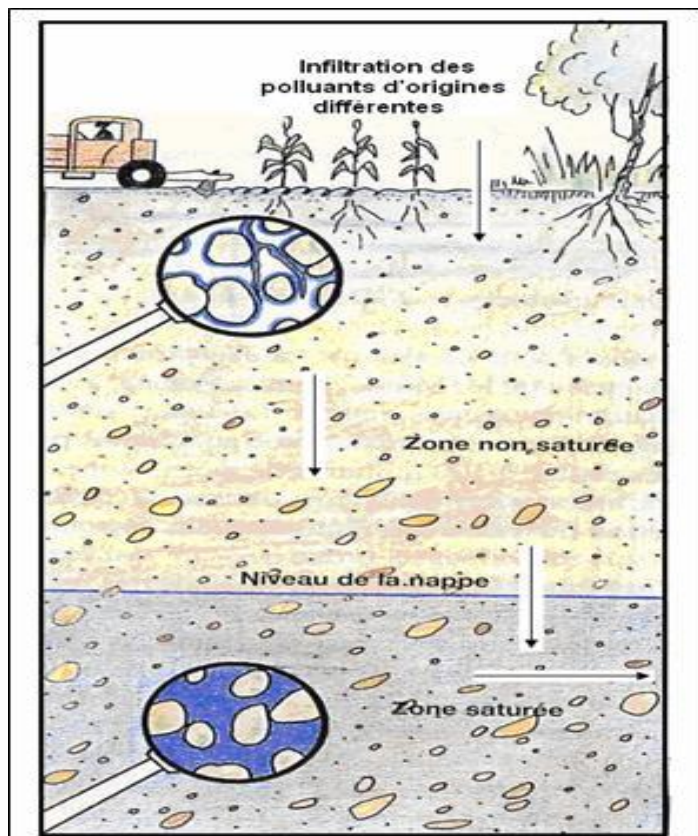
2.1 Concept de vulnérabilité :

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60. Il est défini et utilisé de manière très diverse (Gogu et Dassargues 1998 ; Lallemand Barres, 1994 ; Lallemand barres et Roux 1989). Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface (Amharref M., Bernoussi A., 2007).

Ainsi, elle matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution. Cette pollution peut être engendrée par une source ponctuelle (ex. décharge, cimetière, rejet d'eau usée brute domestique ou industrielle, etc.), ou diffuse (engrais chimiques, pesticides, herbicides) (El warititi M. et al, 2007).

Alors, la vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables : les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique. Pour atteindre une nappe libre en milieux poreux, les polluants transportés par les eaux d'infiltration doivent franchir de nombreux obstacles : le sol, la zone non saturée, la zone saturée (El warititi M. et al, 2007). A ces trois milieux peut se rajouter l'infiltration qui rentre en compte dans la migration des polluants (Cazaux M., 2007).

Figure 36: Infiltration des polluants dans la zone non saturée et la zone saturée.



On voit que la protection de la nappe sera d'autant meilleure que le sol et la zone non saturée sont épais, que leur granulométrie est fine, et que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible.

2.2 Les types de vulnérabilité :

Le concept de vulnérabilité englobe deux notions différentes ou deux types de vulnérabilité intrinsèque et spécifique.

2.2.1 La vulnérabilité intrinsèque :

C'est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines (B.R.G.M., 2008).

2.2.2 La vulnérabilité spécifique :

C'est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (B.R.G.M., 2008).

La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis (B.R.G.M., 2008).

2.3 Les critères de vulnérabilité :

Plusieurs facteurs agissent sur la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine, ces facteurs sont présents dans le sol, la zone non saturée et la zone saturée.

2.3.1 Critères relatifs au sol :

- *la topographie* : c'est un critère qui contribue dans la détermination de la pente des terrains et l'évaluation de la vitesse d'écoulement des eaux superficielles (Cazaux M., 2007)

- *la couverture pédologique* : la nature, l'épaisseur, la texture la teneur en argile et en matière organique influent sur le transfert des polluants dans la nappe d'eau souterraine. Le facteur principal est la lithologie (Castany G0., 1980 : Cazaux M., 2007)

2.3.2 Critères relatifs à la zone non saturée :

- *l'épaisseur de la Z.N.S* : c'est l'horizon entre la surface topographique et la nappe d'eau souterraine. Elle conditionne de temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant) et donc son éventuelle dégradation en cours de transfert (Allier D. et al, 2008, Cazaux M., 2007).

Pour un aquifère libre, l'épaisseur de la zone non saturé (ZNS) est la distance entre la surface du sol et le niveau d la nappe. Pour un aquifère captif, elle est égale à la distance entre la surface et le toit de l'aquifère.

- **L'amplitude de battement de la nappe** : dans la mesure où elle est significative, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol+ ZNS). De ce fait elle peut devenir un critère de vulnérabilité (Allier D. et al, 2008).
- **La perméabilité verticale de la Z.N.S** : plus la perméabilité verticale est importante plus le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe est important (Allier D. et al, 2008).
- **La structure de la Z.N.S** : la variation de faciès, la nature, la texture, la teneur en argile et en matière organique de la Z.N.S peut réduire la contamination des eaux souterraine par la pollution (Cazaux M., 2007).

2.3.3 Critères relatifs à la zone saturée :

- **le type de la nappe** : une nappe libre est plus vulnérable à la pollution qu'une nappe captive naturellement protégée par un toit imperméable ou peu perméable.
 - **les paramètres hydrodynamiques** (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, gradient hydraulique) déterminent le temps de résidence d'un contaminant et leur vitesse de migration dans la nappe.
- **la piézométrie** : conditionne l'évolution des processus hydrodynamiques. C'est une relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation) conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines. Ce phénomène peut s'inverser (Allier D. et al, 2008).
- **la direction et le sens d'écoulement** : déterminent le trajet d'un polluant dans la nappe d'eau souterraine.
- **le type de système hydrogéologique (transmissif)** : il joue sur les temps de transfert et temps de séjour dans la nappe. A partir de la réactivité aux impulsions pluviométriques du système, la vulnérabilité du système peut être évaluée (Cazaux M., 2007 ; Allier. et al, 2008) .
- **les relations nappe-cours d'eau** : l'alimentation des nappes d'eau souterraine par les cours d'eau superficiels ou par le drainage en sens contraire donne une idée sur la possibilité de contamination à la pollution.
 - **l'épaisseur de l'aquifère** : détermine la réserve d'eau dans l'aquifère. Plus la réserve est importante plus la dilution du polluant est assurée (Cazaux M., 2007).

2.3.4 Critères communs à la zone non saturée et à la zone saturée :

- **la fracturation** : la fracturation augmente la vitesse d'infiltration des polluants (Cazaux M., 2007).
- **la recharge** : conditions d'alimentation et d'écoulement, facteur du renouvellement de la

réserve totale moyenne. Aussi, c'est le volume d'eau atteignant la nappe d'eau souterraine et dépend de la pluie efficace s'infiltrant dans le sol puis dans la zone non saturée. De plus, la quantité d'eau en réserve détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe (Castany G., 1980 ; Cazaux M., 2007 ; Allier D. et al, 2008).

2.4 Cartographie de la vulnérabilité:

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines permet d'identifier les zones à haut risque de contamination, indépendamment du type de polluant. Elle devrait en principe conditionner les plans d'occupation des sols ou, du moins, permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protection devraient être adoptées (Menani M.R., 2001).

Autrement, les cartes de vulnérabilité ont pour but de représenter les différents niveaux de vulnérabilité des eaux souterraines sur un rapport cartographique à différentes échelles selon les objectifs demandés à la précision des différents paramètres.

Les cartes de vulnérabilité doivent répondre à deux préoccupations principales :

- la prévention par la localisation des zones sensibles dans lesquelles une pollution peut affecter gravement l'eau souterraine, la définition de la pénétration et de la propagation des polluants dans l'aquifère et la situation des foyers de contamination actifs ou potentiels.
- La protection par mise en place d'aménagements spéciaux (étanchéité des stockages et des canalisations de surface et souterraines, collecte des effluents, etc.), de périmètres de protection des eaux souterraines captées et des réseaux de surveillance de la qualité des eaux souterraines (Castany G., 1980).

Les cartes de vulnérabilité des aquifères sont des outils standard pour protéger les eaux souterraines contre toute éventuelle source de pollution. Elles sont précieuses pour toute décision future (Smida H. et al, 2009).

2.4.1 Méthodes de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines :

Plusieurs méthodes de cartographie de la vulnérabilité ont été développées et appliquées. De nombreuses méthodes de cartographie de la vulnérabilité ont été décrites et évaluées (Bensaoula F. Bensalah M., 2007), allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues.,1998).

Ces méthodes de vulnérabilité peuvent être classées en trois grandes catégories :

a. Les méthodes de cartographies à index

Basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple) (Derni S., 2011).

b. Les modèles de simulation

Ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen., 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe.

c. Les méthodes statistiques

Elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe (Derni S., 2011).

2.4.2 Les différentes méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité à la pollution :

Différentes méthodes de vulnérabilité développées et normalisées sont présentées. Toutes ces méthodes sont basées sur des systèmes paramétriques : le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité (Mimoun D. et Graillot D., 2010).

Nous proposons dans notre étude bibliographique les différentes méthodes les plus utilisées pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à la pollution par la pondération et l'indexation des paramètres qui sont basées sur la combinaison des cartes de divers critères.

2.4.2.1 La méthode DRASTIC:

La méthode la plus utilisée actuellement dans le monde est la méthode DRASTIC. C'est une méthode qui a été élaborée par L. Aller et al en 1987 et fait partie du groupe des méthodes d'évaluation (de la vulnérabilité des aquifères) pondérées, basées sur l'attribution d'une notation aux différents paramètres utilisés (variant généralement entre 1 et 10). Une pondération est également attribuée selon l'importance relative de chacun des paramètres

utilisés (El warititi M. et al, 2007).

La méthode DRASTIC est basée sur l'estimation de 7 paramètres relatifs à la recharge, au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère.

[D] : *Profondeur* de la surface de la nappe (ou *Depth*);

[R] : *Recharge* nette;

[A] : *Nature lithologique de l'Aquifère*;

[S] : *Sol* (granulométrie et faciès);

[T] : *Topographie des terrains*;

[I] : *Impact de la zone non saturée* (lithologie et épaisseur);

[C] : *Conductivité hydraulique (perméabilité) de la zone saturée* (Sinan M. et al, 2003).

Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (Id) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité (1 à 10) d'un secteur donné, de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (Id) calculé est élevé. L'Id a été calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants selon la relation suivante:

$$ID = Dc * Dp + Rc * Rp + Ac * Ap + Sc * Sp + Tc * Tp + Ic + Ip + Cc * Cp$$

Avec :

"P" étant le poids du paramètre c'est un facteur de pondération allant de 1 à 5

"C" la cote associée (Sinan M. et al., 2003)

D, R, A, S, T, I, C: représentent les paramètres DRASTIC, "p" étant le poids du paramètre et "c" la cote associé.

L'établissement de la carte de vulnérabilité d'une nappe à la pollution consiste à reporter dans l'espace les valeurs de l'indice DRASTIC (Id) et leur regroupement dans cinq classes différentes.

2.4.2.2 La méthode EPIK :

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensus-stricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle est basée sur quatre critères : Epikarst ; Protective Cover (couverture protectrice : sol) ; Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ; Karst network development (développement du réseau karstique).

La méthode EPIK est une méthode multicritère à indices qui prend en compte quatre critères principaux :

- **L'épikarst "E"** : Son degré de développement conditionne une infiltration plus ou moins rapide de l'eau dans le toit du substratum calcaire.

- **La couverture protectrice "P"** : Son épaisseur est un facteur déterminant sur le temps de transit de l'eau depuis la surface du sol, jusqu'au toit de la formation calcaire.
- **Les conditions d'infiltration "I"** : Elles caractérisent une infiltration diffuse et lente ou concentrée.
- **Le développement du réseau karstique "K"** : Il détermine la rapidité des écoulements au sein de l'aquifère karstique (Pinaud M., 1999 in Fellah H.S, 2012).

2.4.2.3 La méthode RISKE :

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst (Petelet-G et al., 2000).

Elle a basé sur cinq critères caractéristiques du fonctionnement et de la structure des aquifères karstiques qui sont :

- **R** : pour la roche aquifère : (lithologie et fracturation) la nature des formations géologiques peut influencer sur la circulation de l'eau, et donc des polluants potentiels, à l'intérieur de l'aquifère.
- **I** : pour les conditions d'infiltration : (infiltration diffuse / infiltration Ponctuelle) Les deux paramètres primordiaux retenus sont la pente qui va plus ou moins favoriser le ruissellement au détriment de l'infiltration et les pertes qui vont permettre une infiltration directe et très rapide de l'eau jusqu'à l'aquifère.
- **S** : pour le sol et la couverture protectrice (la teneur en cailloux, la texture et l'épaisseur) Les formations pédologiques forment une couverture protectrice au-dessus des roches aquifères. Il est donc important d'évaluer le pouvoir protecteur et/ou régulateur de ces horizons vis-à-vis de polluants potentiels.
- **K** : pour le degré de développement de la karstification : La karstification du milieu est l'un des paramètres les plus importants qui conditionnent la vulnérabilité. Ce critère permet de caractériser la vulnérabilité du milieu souterrain. Le développement du réseau karstique est donc à évaluer à partir de différentes méthodes, telles que l'analyse des hydrogrammes de crues (estimation du degré de karstification).
- **E** : pour l'Epikarst (Dörfliger N. et al, 2005).

2.4.2.4 La méthode DISCO :

La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quel conque du

bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage : le paramètre "discontinuités" ; le paramètre "couverture protectrice" ; le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

Le report sur cartes, la combinaison et la pondération de ces paramètres permettent de déterminer un facteur de protection final F pour chaque partie du bassin d'alimentation. Les zones de protection des eaux souterraines sont alors déterminées en attribuant une valeur du facteur de protection à chacune des zones S1, S2 et S3 en délimitant les zones S (Vernoux J.F., 2007).

Le facteur de protection final F de vulnérabilité est évalué selon la formule suivante :

$$\text{Vulnérabilité} = 0,5D + 0,3R + 0,2S$$

Avec : **D** : Discontinuités ; **P** : couche protectrice ; **R** : ruissellement (Pochon A. et Zwahlen F., 2003 in Fellah H.S., 2012).

2.4.2.5 La méthode GOD :

Ce système a été développé par Foster en 1987. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères : Type de nappe (Groundwater occurrence) ; Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ; Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

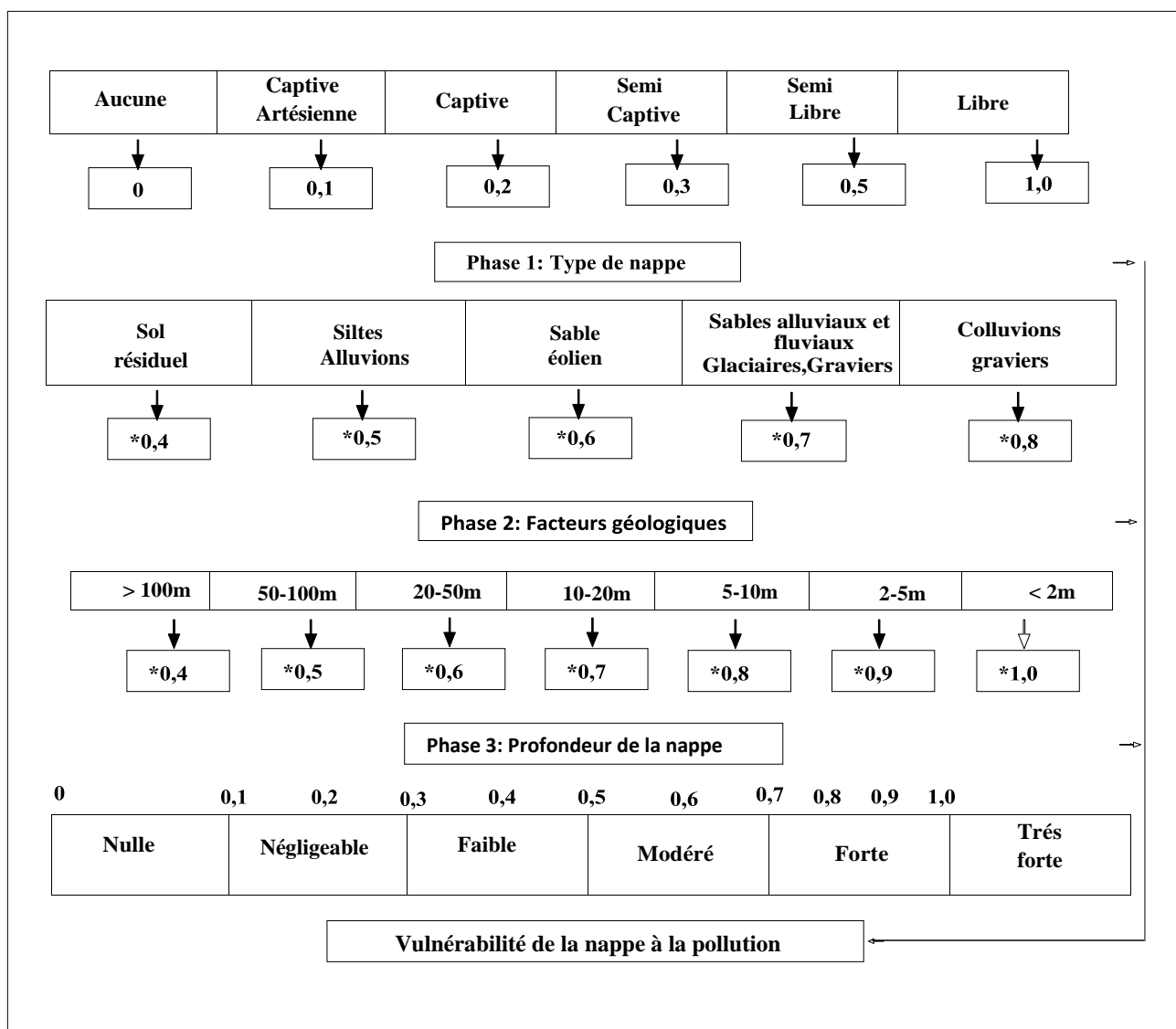


Figure 37 : Estimation de la vulnérabilité d'un aquifère par la méthode de GOD (d'après Foster, 1987).

2.4.2.6 *La méthode SINTACS :*

La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie (Petelet et al., 2000).

Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- **S:** Soggiacenza (profondeur de la nappe) ;
- **I:** Infiltrazione (infiltration) ;
- **N:** Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ;
- **T:** Tipologia della Copertura (sol) ;
- **A:** Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère) ;
- **C:** Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- **S:** Acclività della Superficie Topographica (pente moyenne de la surface topographique).

2.4.2.7 *L'approche européenne (O.C.P.K.) :*

L'approche européenne pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque proposée par COST 620, DALY et al. 2001, est un modèle très flexible qui peut être adapté à différents milieux aquifères (Zwahlen F., 2004 in Bensaoula F., 2006).

L'approche COST 620 est basée sur une démarche itérative afin d'évaluer le risque de contamination d'un aquifère en tenant compte des caractéristique particulières d'un milieu karstique.

L'objectif de COST 620 était de développer de nouveaux outils qui puissent assister les décisions en termes d'aménagement des zones karstiques européennes et protéger sur le long terme ces ressources face aux dangers de pollutions potentielles générées par les activités anthropiques (Pranville J. et al., 2007 in Fellah HS., 2012). Elle définit des concepts et des principes qui sont considérés comme universels et applicables à toute la gamme de karst en Europe (Sineich et al, 2005 in Bensaoula F., 2006).

L'approche européenne utilise quatre critères pour déterminer la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère karstique. Dans ce modèle conceptuel quatre facteurs, O, C, P et K sont mis en jeu:

- **(overlyinglayers)** correspondent à la couche couvertures de sol pouvant être définies comme protectrices ou vulnérables vis-à-vis de l'infiltration.

- **C (concentration of flow)** ou concentration de l'écoulement. Ce facteur représente le degré de concentration des précipitations vers les endroits qui permettent une infiltration rapide. Si cette infiltration est diffuse ce facteur n'est pas déterminant. Le degré de concentration dépend des paramètres qui contrôlent le ruissellement tel que la pente, les propriétés de surface (telle que la perméabilité), la végétation, la présence d'éléments qui concentrent l'écoulement (telles que les pertes et les zone à forte perméabilité).
- **K (Karst network development)** rend compte du degré de développement du système karstique, notamment de son réseau de drainage de la zone saturée.
- **P (Precipitation régime)**, qui fait intervenir un facteur externe au système. Il considère le régime des précipitations (quantité annuelle, intensité, fréquence et durée). Ce facteur influe sur l'infiltration et la recharge de l'aquifère et par conséquent le transport du polluant et sa dilution au sein de l'aquifère.

2.5 Etude de la vulnérabilité du bassin de Tagharist :

La méthode de définition de la vulnérabilité proposée pour la nappe du bassin de Tagharist est la méthode GOD. Nous optons pour cette méthode en raison de sa simplicité et son adaptabilité aux conditions locales de notre bassin. Les résultats pour les indices de la méthode GOD sont présentés dans le tableau (Tab. 20).

Tableau 19 : Indice des paramètres calculés selon GOD.

Nom	Type de l'aquifère	Indice de nappe	Facteurs géologiques	Indice de profondeur	GOD
P1	libre	1	0,7	0,8	0,56
P2	libre	1	0,7	0,8	0,56
F3	semi libre	0,5	0,7	0,6	0,21
F4	semi libre	1,5	0,7	0,6	0,63
P5	libre	1	0,7	0,8	0,56
P6	libre	1	0,8	0,8	0,64
S7	libre	1	0,8	0,9	0,72
F8	semi libre	0,5	0,8	0,6	0,24
P9	libre	1	0,8	0,8	0,64
F10	semi libre	0,5	0,8	0,6	0,24
S11	libre	1	0,7	0,9	0,63
S12	libre	1	0,8	0,9	0,72
S13	libre	1	0,8	0,9	0,72
F14	semi libre	0,5	0,7	0,6	0,21
F15	semi libre	0,5	0,7	0,6	0,21

P16	libre	1	0,7	0,8	0,56
P17	libre	1	0,7	0,8	0,56
P18	libre	1	0,7	0,8	0,56
F19	semi libre	0,5	0,7	0,6	0,21
P20	libre	1	0,7	0,8	0,56
F21	semi libre	0,5	0,7	0,6	0,21
P22	libre	1	0,7	0,8	0,56
F23	semi libre	0,5	0,7	0,6	0,21
F24	semi libre	0,5	0,7	0,6	0,21
P25	libre	1	0,7	0,8	0,56
P26	libre	1	0,7	0,8	0,56
P27	libre	1	0,7	0,8	0,56
P28	libre	1	0,7	0,8	0,56
P29	libre	1	0,7	0,8	0,56
S30	libre	1	0,7	0,9	0,63
S31	libre	1	0,8	0,9	0,72
S32	libre	1	0,8	0,9	0,72
P33	libre	1	0,8	0,8	0,64
F34	semi libre	0,5	0,8	0,6	0,24

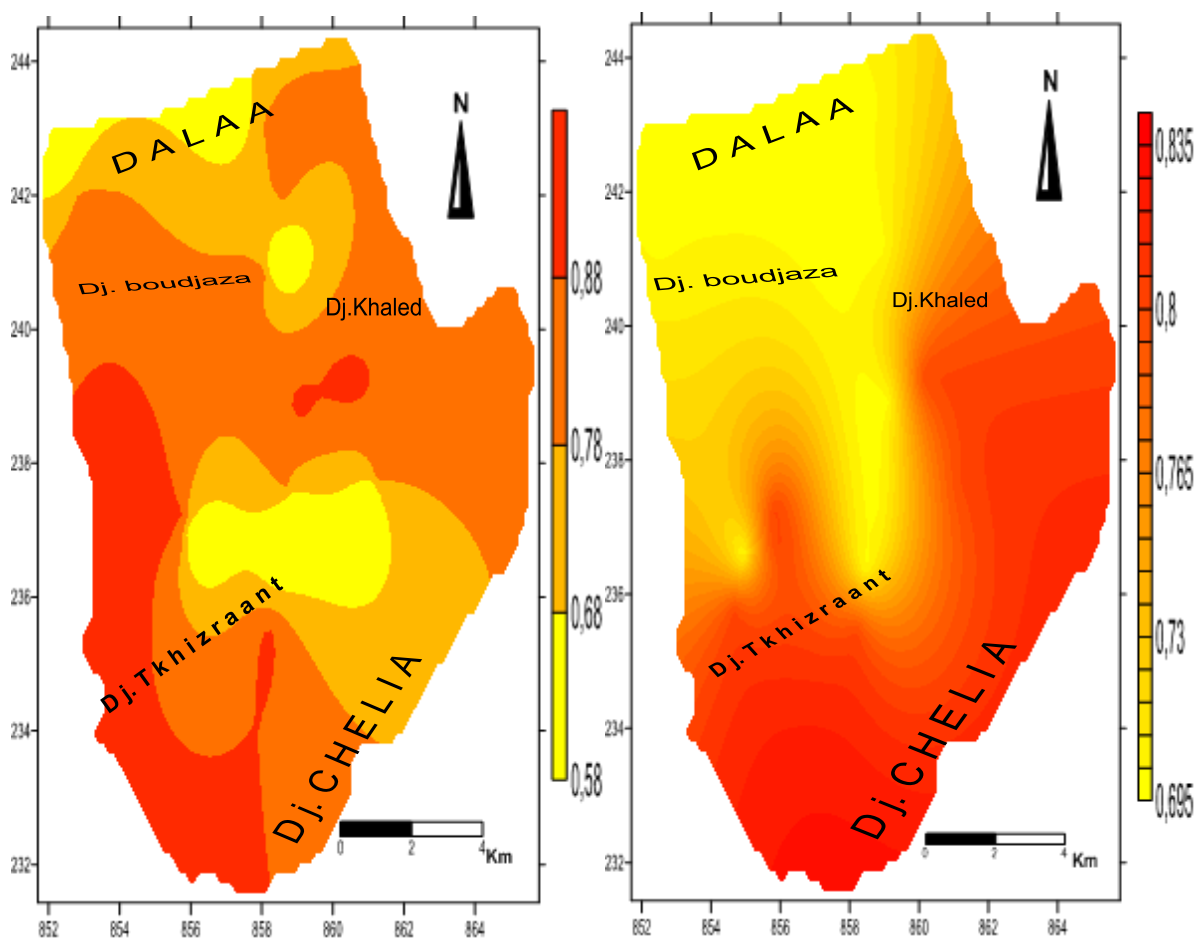


Figure 38 : Carte de la profondeur de niveau piézométrique de la nappe.

Figure 39 : Carte de la lithologie de l'aquifère.

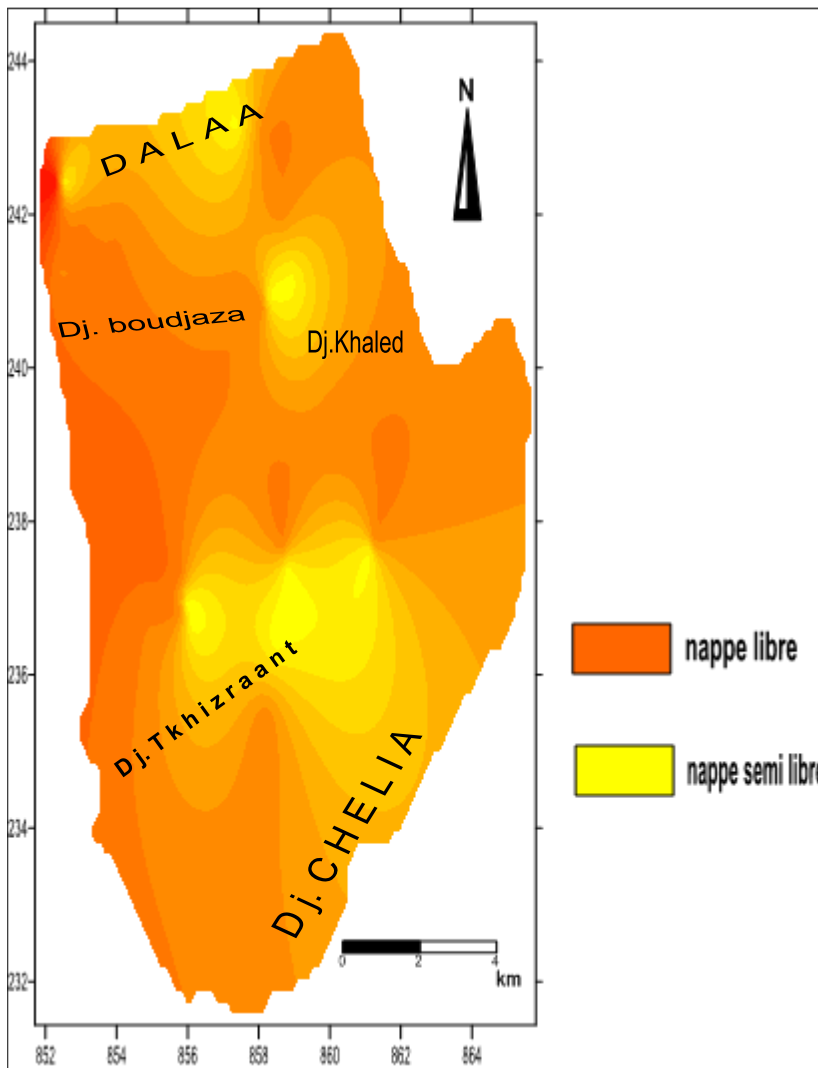
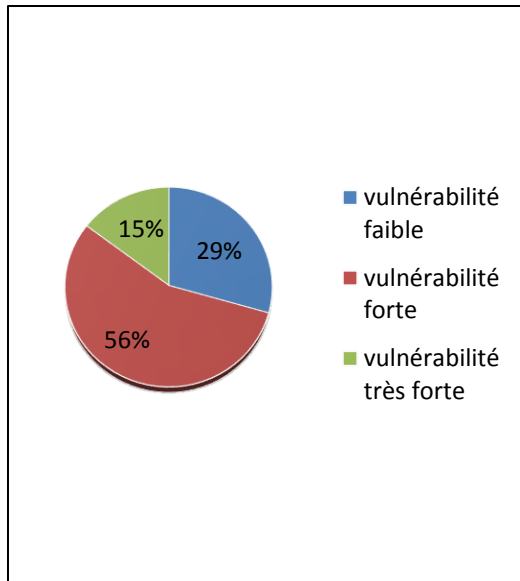


Figure 40 : Carte représentant le type de nappe aquifère.

2.5.1 Carte de vulnérabilité GOD

Les nappes libres sont les plus vulnérables, les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et dans la zone non saturée. L'examen de la carte de vulnérabilité (Fig. 42) montre que la nappe libre de Tagharist a une vulnérabilité faible à très forte, Compris entre 0,2 et 0,7. Ces derniers répartissent dans la zone comme suit :

- Vulnérabilité faible qui représente 29 % de la zone, elle occupe le centre de la zone en bas des montagnes de Dj. Chelia et Dj. Dalaa Ceci correspond à la nature lithologique de la nappe semi libre.
- Vulnérabilité forte à très forte s'étend du nord-est au sud-ouest de la plaine et représente 71 % de la région. Cela est expliqué par la nature libre de la nappe et la faible profondeur.



Les zones urbaines et les zones

Figure 20 : Répartition spatiale du degré de vulnérabilité en %.

degré de vulnérabilité en (%).

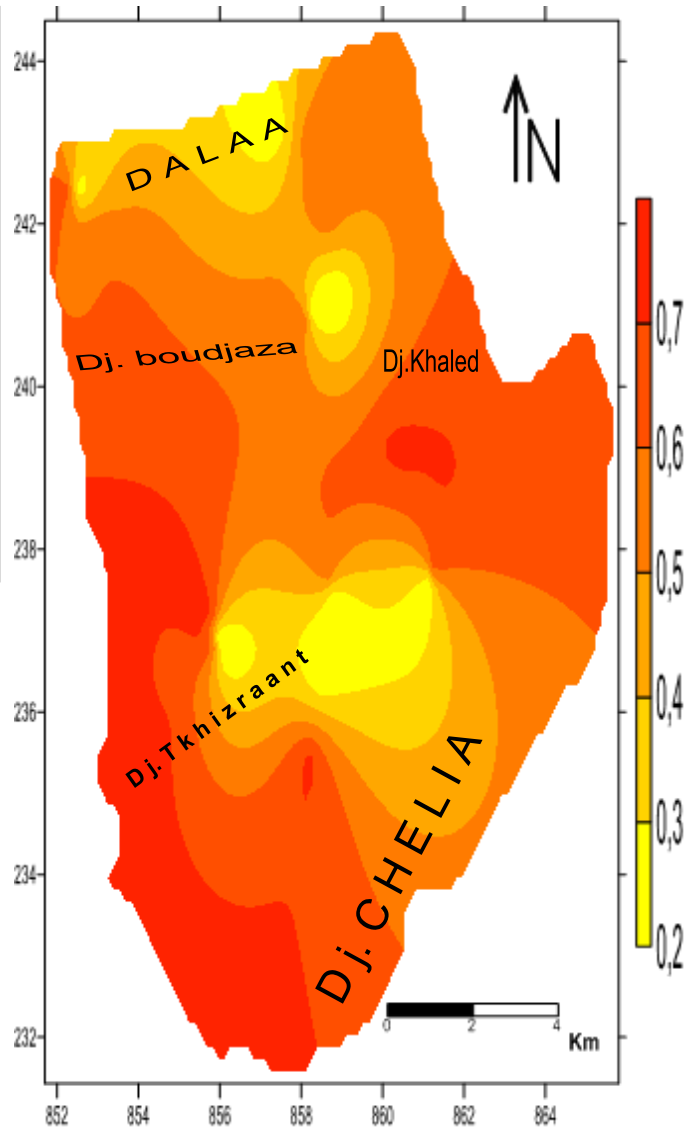


Figure 42 : Carte de la vulnérabilité de la nappe de Tagharist selon la méthode GOD.

3 Cycle de l'azote :

L'azote circule selon un cycle biogéochimique au cours duquel il passe sous des formes organiques et minérales. Le principal réservoir d'azote est l'atmosphère qui effectue des échanges avec le sol, les hydrosystèmes et la biosphère. Le cycle de l'azote est en étroite relation avec les cycles biologiques, le cycle hydrique, et le cycle carboné.

Dans le sol l'azote est présent sous plusieurs formes : l'azote organique qui constitue la principale forme de stockage dans un sol agricole, l'azote minéral qui en dehors de périodes d'apport d'engrais ne représente généralement que quelques dizaines de kilogramme par hectare, et l'azote gazeux (Nicolardot et al., 1996). Dans le système sol-plante-atmosphère le cycle de l'azote est constitué d'un grand nombre de transformations. Il s'agit de processus biologiques et dans une moindre mesure de processus physico-chimiques qui agissent parfois de façons concurrentes et dont l'intensité dépend à la fois des conditions du milieu, des apports de matière organique, et des pratiques agricoles (Nicolardot et al., 1996). Le cycle de l'azote est composé de 5 processus : la minéralisation, la nitrification, la volatilisation, et l'immobilisation (Figure 43).

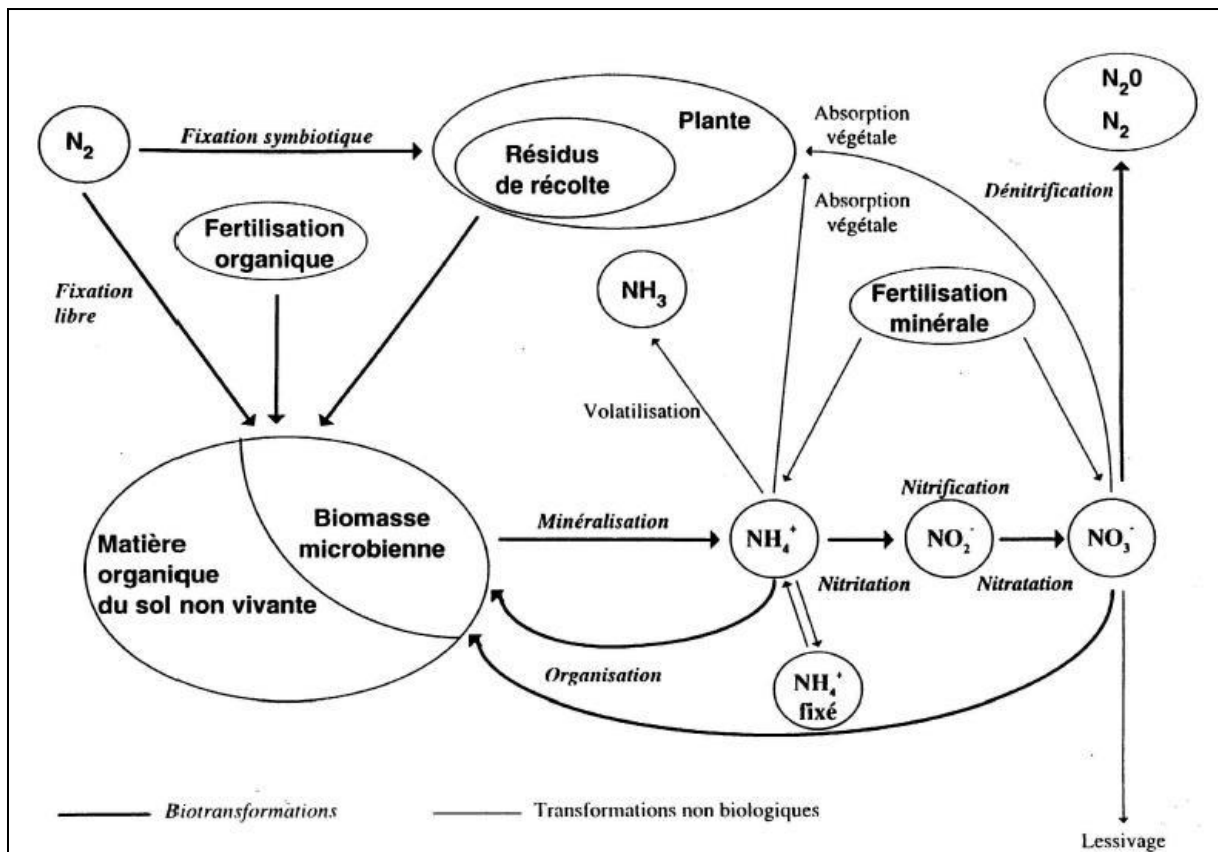


Figure 43 : principaux processus de la dynamique de l'azote dans les sols cultivés (d'après Nicolardot et al., 1996).

Dans les sols bien oxygénés, mais aussi en milieu aquatique oxygéné, des bactéries transforment l'ammoniac en nitrite NO_2^- , puis en nitrate NO_3^- , au cours du processus de nitrification. On peut décomposer cette transformation en nitritation et nitratisation. L'ion nitrate a ensuite trois devenir possibles : il peut soit être absorbé par les plantes, soit être transformé en N_2O ou N_2 par dénitrification, soit être lixivié vers les eaux souterraines.

3.1 Les nitrates (NO_3^-) :

Les variations spatiales des teneurs en nitrates (figure 44) sont d'environ 16 mg/l à plus de 66 mg/l pour les eaux souterraines, On note que les sources faisant face aux terrains agricoles (F10, P18 et F24). Les points d'eaux échantillonnées en amont de la plaine (S13, F14, F15, P16 et P17) montrent des teneurs relativement plus faibles.

L'évolution spatiale des nitrates augmente suivant le sens d'écoulement des eaux souterrains du nord-est vers le sud où se localisent les cultures maraîchères, arboriculture et l'élevage intensif sur des parcelles d'extension limitée, ou les paysans utilisent des engrais chimiques.

La carte des nitrates déjà établie (fig.44) montrée que parmi les puits investigués, ont une teneur en nitrate supérieure aux normes recommandées par l'OMS. La bonne corrélation

linéaire (fig.29) établie entre les teneurs en nitrates et les chlorures des eaux des puits implique une même source de contamination dont l'origine est organique anthropique.

3.2 Ammonium

Il résulte de la décomposition de la matière organique sous forme de radicaux NH_2 qui conduit à la formation de NH_4 . Nombre guide : 0,05 mg/l, concentration maximale : 0,5 mg/l. Si la concentration est supérieure à 0,05 mg/l il faut suspecter une pollution d'origine industrielle ou humaine.

Les résultats de l'analyse chimique des eaux prélevées révèlent la présence d'indice de pollution en ammoniacale. Les concentrations oscillent entre 0,007 et 0,112 mg/l (figure 45). en effet, 14 % des eaux de puits prélevées présentent un taux d'ammoniacale supérieur au 0,05 mg/l. la répartition de ces teneurs apparait au Nord-est suivi le sens d'écoulement.

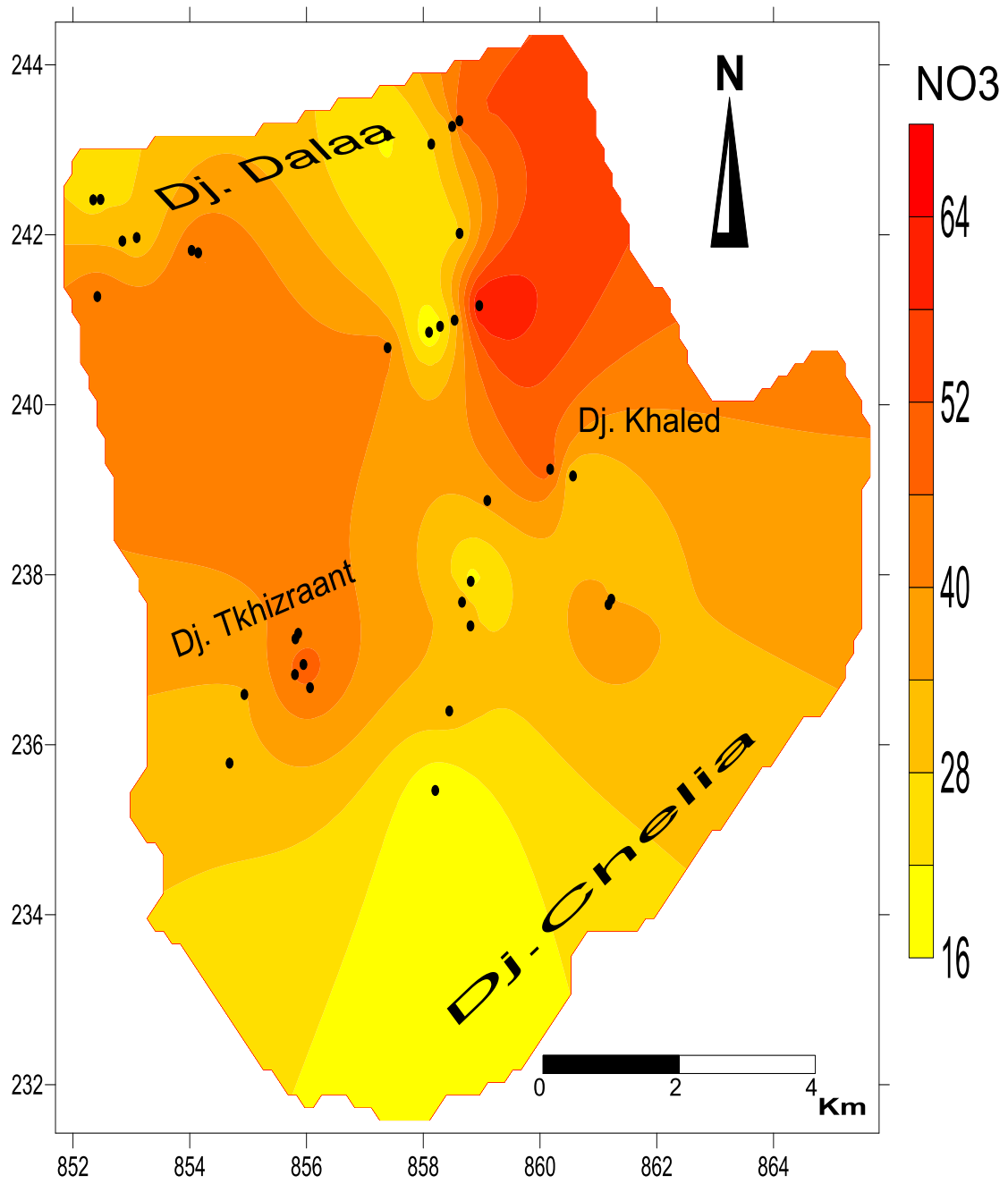


Figure 44 : Carte de concentration des nitrates No₃⁻.

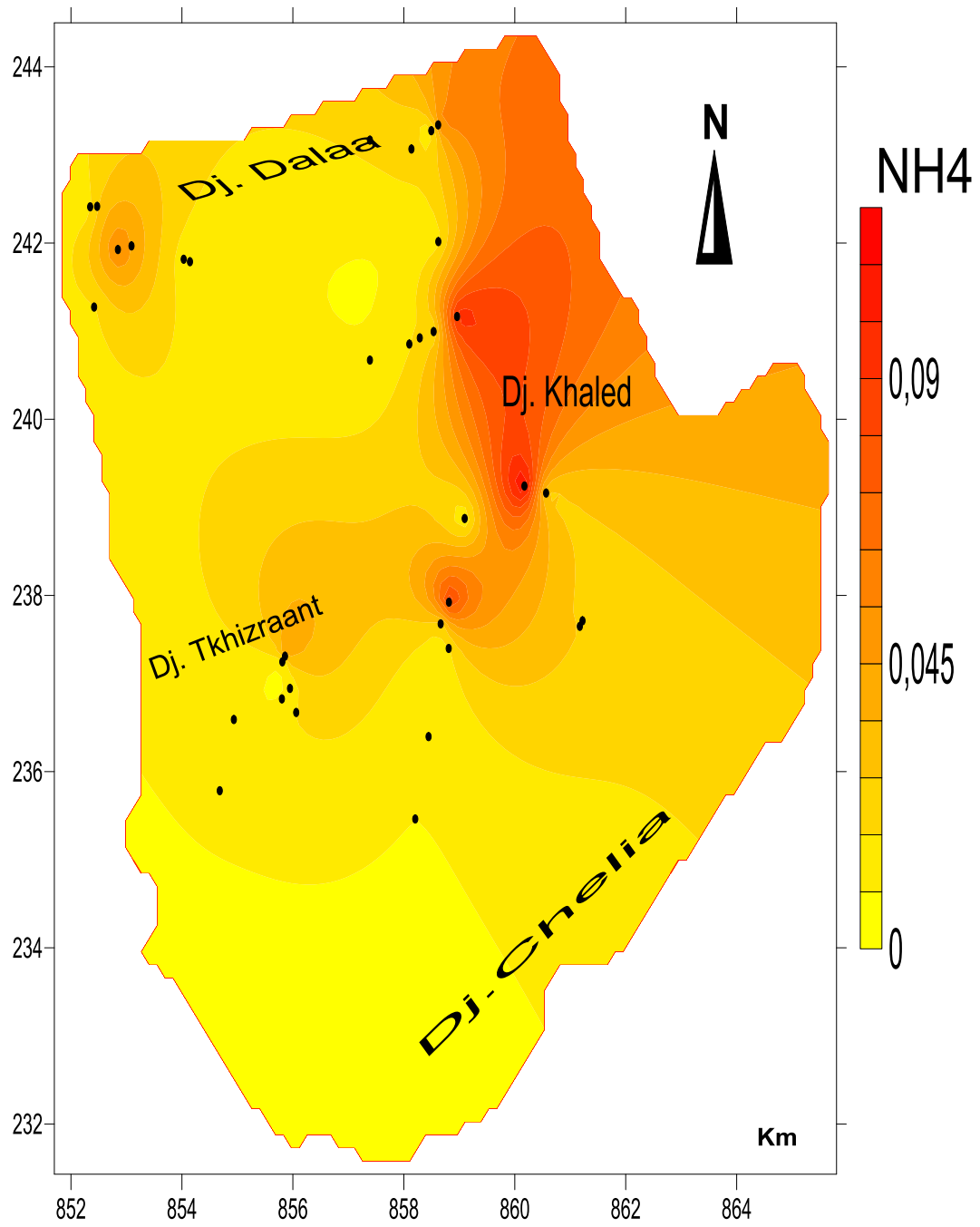


Figure 45 : Carte de concentration d'Ammonium.

4 Présentation des métaux lourds analysés :

4.1 Cuivre :

C'est un élément essentiel pour les organismes et toxique à fortes concentrations.

Il est très utilisé dans divers domaines (électricité, métallurgie, textile, photographie, agriculture, fongicides, tanneries, tuyauterie). Il est utilisé d'une manière extensive en agriculture sous forme de fertilisants. Dans la nature, le cuivre se trouve, soit à l'état métallique dans le cuivre natif (Cu), soit à l'état d'ion monovalent (Cu^+) dans la cuprite, la chalcopryrite et la bornite par exemple, soit à l'état bivalent (Cu^{2+}) dans la malachite et l'azurite. Les conditions de formation de roches magmatiques et sédimentaires favorisent le couple cuivre-soufre plutôt que les couples cuivre-oxygène et cuivre-silice (Mosser, 1980). L'altération des minéraux primaires libère cet élément qui co-précipite avec les oxydes, les argiles, les carbonates, les sulfures ainsi que la matière organique.

C'est un élément sulfophile : dans les eaux marines, il est peu stable dans les composés chlorurés par rapport à Zn et Pb ($\text{Cu}^{2+} < \text{Zn}^{2+} < \text{Pb}^{2+}$) (Helgeson, 1969) et se lie préférentiellement aux sulfures (Gill, 1992).

L'étude de la teneur en cuivre dans les différentes eaux montre des variations importantes de concentration, Les teneurs sont comprises entre 8,85 et 31,21 mg/l avec une moyenne de 15,04. Les concentrations sont toujours dans les normes recommandées par l'OMS ($2 \cdot 10^3$).

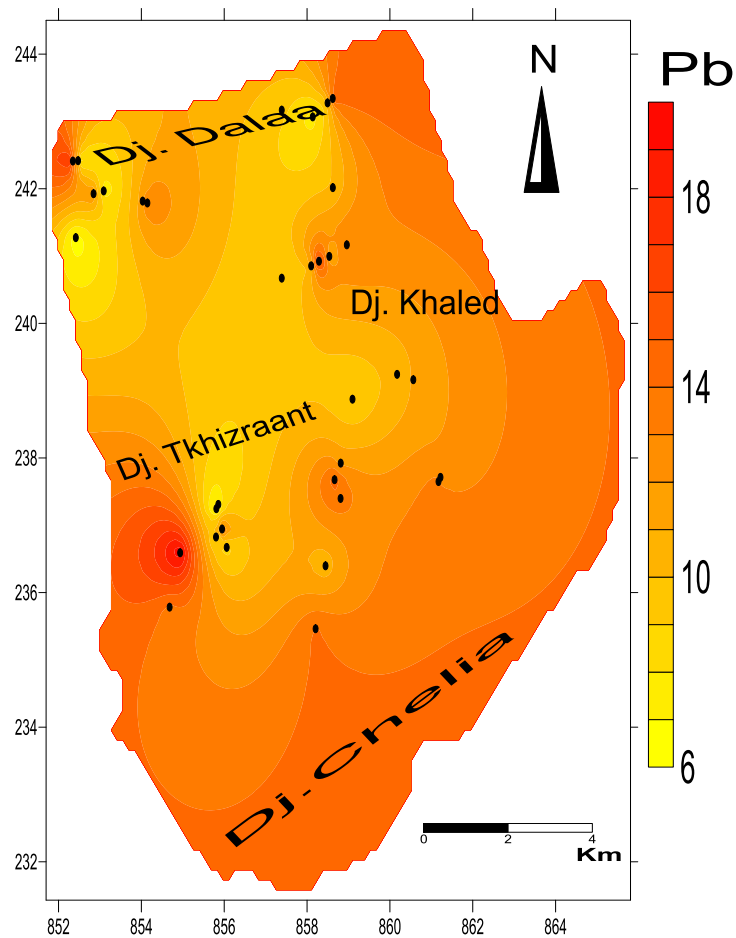
4.2 Plomb :

La forme la plus fréquente dans les milieux naturels est Pb^{2+} ; ses caractéristiques physico-chimiques le rapprochent des alcalino-terreux (Ca^{2+} , Ba^{2+}) et de K ; il peut ainsi remplacer K dans les feldspaths potassiques. Parmi les métaux lourds, il a le plus grand rayon ionique (1.75 Å). Il n'est pas essentiel pour les organismes et sa présence à des taux élevés est toxique. Le plomb est connu pour entraver la fabrication de l'hémoglobine et modifier la composition du sang. Il agit également sur le système nerveux central et provoque le saturnisme.

Il provient essentiellement du carburant, des batteries et de la peinture. A l'état naturel il se trouve dans la galène. Cet élément peut être associé aux sulfates et aux carbonates mais aussi aux argiles et à la matière organique suivant le pH. Cet élément a beaucoup d'affinités avec Cd et Zn. Lors de l'altération de minéraux primaires, le Pb peut être fixé par des argiles comme la kaolinite (Mosser, 1980).

L'analyse de la carte de teneurs en Plomb (Fig. 42) montre des variations très importantes de concentration de ce dernier. Les teneurs sont comprises entre 6,31 et 19,31 $\mu\text{g/L}$ avec une moyenne de 11,34 $\mu\text{g/L}$. Ce qui met en évidence que les teneurs dépassent les normes fixées

par l'OMS 10 µg/L dans la 65% des échantillons.



4.3 Zinc :

Il est essentiel pour tous les organismes et est caractérisé par sa faible toxicité par rapport aux autres éléments. Il est très répandu (zones minières), et utilisé dans différents domaines (métallurgie, imprimerie, caoutchouc, peinture, alliage, batterie, agriculture et bâtiment). Il se trouve associé aux argiles, à la matière organique et aux oxydes (coprécipitation avec Fe et Mn) suivant le pH du milieu. Le Zn a beaucoup d'affinités avec Cd et Pb. et avec les oxydes de fer et de manganèse.

Les concentrations de zinc dans les eaux souterraines échantillonnées oscillent entre 5,23 et 28,81 µg/l avec une moyenne de 14,4µg/l. généralement sont faibles et ne dépassent pas les normes OMS (3×10^3).

4.4 Cadmium :

Dans la nature, il est généralement associé au zinc. C'est un élément chalcophile, il est utilisé aussi pour le revêtement électrolytique des métaux, dans certains alliages, pour la fabrication d'accumulateurs, de peintures et de matières, et dans l'industrie nucléaire. Les

eaux ne contiennent en général que quelques microgrammes de cadmium par litre (la limite étant de 50 (g/l). Il est très nocif et ses composés à fortes doses peuvent provoquer des cancers.

Toutes les eaux prélevées dans la zone d'étude présentent des teneurs inférieures à la norme OMS (3µg/l).

5 Effets sanitaires liés à quelques paramètres chimiques indésirables de l'eau :

✓ *Nitrates, Nitrites*

-Méthémoglobinémie résultant de la réduction des nitrates en nitrites par les microorganismes empêchant l'hémoglobine de transporter de l'oxygène (Association Santé Environnement France, 2010)

-Effet cancérigène résultant des nitrosamines (composés formés à partir de la combinaison des nitrites avec certaines amines ou amides (Botta et Bellon, 2004)

✓ *Plomb*

Saturnisme se traduisant par des troubles cliniques, des anomalies biologiques et des altérations histopathologiques variées (Degbey et al., 2010) ; atteintes cognitives et neurocomportementales (St- Laurent et al., 2013) ; augmentation de la sensibilité aux effets toxiques du plomb chez les jeunes enfants liée à la perméabilité de la barrière hématoencéphalique ; l'anorexie, vomissements, irritabilité, troubles de comportement ; chez la femme enceinte, nuisance au développement du système nerveux central du fœtus ; chez l'adulte : douleurs abdominales (colique) et constipation ; intoxication sévère : convulsions, coma, mort (INSPQ, 2003).

✓ *Cadmium*

Troubles rénaux, d'altérations osseuses et d'hypertension artérielle ; « Itai Itai » caractérisé par une décalcification osseuse, une protéinurie et une glucosurie (Rodier et al., 2009).

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit de thèse porte sur le système aquifère de bassin de Tagharist. Il a pour objectif d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement du système aquifère sollicité et de mettre en place un outil de gestion qualitative et quantitative des ressources en eau qui soit représentatif du système.

La synthèse des données géologiques existantes et la mise en évidence de l'hétérogénéité litho-stratigraphique par l'étude sédimentologique et granulométrique réalisée dans certains puits ont une fois de plus confirmé la complexité hydrogéologique de la zone d'étude; les formations les plus importantes sont le Crétacé et le Trias essentiellement argileuses et salifères, qui jouent un rôle primordial dans la salinité des eaux.

Sur le plan hydrogéologique, la région dispose de deux types d'aquifères : les aquifères multicouche du bassin sédimentaire constitués des aquifères du Plio-Quaternaire, et les aquifères des formations carbonatées fissurées du Crétacé.

La piézométrie de la nappe superficielle montre un écoulement général selon une direction Sud-Ouest - Nord-Est, avec un axe de drainage qui coïncide sensiblement avec le parcours des Boulefrais.

Le calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite, montre qu'à partir d'une précipitation de 391,90 mm, seulement 9% s'infiltrent vers la nappe, le reste partant sous forme d'évaporation (85%) et de ruissellement (9%).

Les études hydrochimiques ont permis de comprendre la relation eau-roche par : La présence de deux faciès chimiques marquant ainsi l'hétérogénéité de la lithologie. En effet, on peut citer le faciès bicarbonaté caractérisant la majorité des eaux provenant des bordures du Chelia ; les faciès calcique et sodique résultant d'une part, du phénomène évaporatoire, et d'autre part, de la dissolution des formations évaporitiques bordant la nappe.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que les eaux souterraines de la région d'étude sont sous-saturées vis-à-vis du gypse, l'halite, l'anhydrite ; cela laisse supposer une éventuelle dissolution de ces minéraux. Par contre Les formation carbonatée calciques (calcite et l'aragonite) tendent à l'équilibre.

La minéralisation des eaux des aquifères de bassin de Tagharist, est acquise essentiellement par la dissolution des formations évaporitiques, par les phénomènes d'échange de base et par le processus de mélange.

L'analyse statistique a pu montrer que la minéralisation des eaux souterraines de bassin de Tagharist est assurée par la participation de deux facteurs ; le facteur F1 exprimée de 65,08%, le plus important est déterminé par TDS, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- . En conséquence, le facteur F1 exprime le phénomène de la minéralisation, et Le facteur

F2 représente 15,03% de la variance et il est caractérisé par NO_3^- et NO_2^- . Le facteur F2 exprime donc une pollution organique d'origine anthropique.

L'examen de la carte de vulnérabilité montre que la nappe libre de Tagharist a une vulnérabilité faible (29 % occupe le centre de la zone) à très forte (71 % du nord-est au sud-ouest).

Références bibliographiques

- **Ababsa Z.2006.** Contribution à l'étude de la qualité chimique des eaux souterraines du sous système aquifère Ain chabro-Hammamet : Analyse et traitement statistique. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 105P.
- **Aller. L., Bennett. T., Lehr. JH., Petty. RH., Hackett. G. (1987).** DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. USEPA Report 600/2- 87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma.
- **Allier D., vittecoq B., Mardhel V. : 2008,** Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraine de la Martinique, Document public, Rapport final, BRGM/RP-56283-FR.
- **AnbazhaganS. RamasamyS.M., Das Gupta S.(2005),** Remote sensing and GIS for artificial recharge study ,runoff estimation and planning in Ayyarbasin,TamilNadu,India. EnvironGeol(2005)48:158-170.
- Association Santé Environnement France, 2010. Pollution de l'eau : **Origines et impacts, 5p.**
- **Bakalowicz, M., 1979.** Contribution à l'étude de la géochimie à la connaissance de l'aquifère Karstique et de la Karstification. Thèse, Université de Paris Sud, Orsay, 275p.
- **Bakalowicz, M. Dörfliger, N. (2005)** – Ressources en eau du karst : un enjeu pour le bassin méditerranéen. Géosciences n° 2 : 26-31.
- **Bel F.1990.** La production d'eau potable par réalimentation de nappe : un procédé original utilisé en Haute-Garonne. ADOUR-GARONNE/N°46/1990. P15-18.
- **Belkoun N (2017).** l'apport de l'hydrochimie et des isotopes de la molécule d'eau dans l'étude de l'impact des eaux de barrage sur la qualité des eaux souterraines dans les bassins endoreiques. Cas du bassin de chemora. algerie-orientale.Thèsede doctorat,Univ. Khenchela. 18p.
- **Bernard Legube.1996.** Le traitement des eaux de surface pour la production d'eau potable. Guide technique de l'Agence de l'eau loire-Bretagne, ,198P
- **BEN ABOU M., FADIL1 F. et EL HAJI M. (2014).** Évaluation de la qualité des cours d'eau de la ville de Taza utilisés dans l'irrigation des cultures maraîchères (Maroc). Journal of Applied Biosciences n°77, pp. 6462-6473.
- **Bensaoula F. et Bensalah M. : 2007;** Cartographie de la vulnérabilité des eaux karstiques de la région de Tlemcen (Algérie), Adaptation et application de l'approche européenne, Bulletin d'hydrogéologie no 22 (2007): 59-76, Centre d'hydrogéologie,

université de Neuchâtel, éditions Peter Lang.

- **Bensaoula F.** : 2006, Karstification, hydrogéologie et vulnérabilité des eaux karstiques, mise au point d'outils pour leur protection (Application aux monts de Tlemcen-Ouest Oranais), Thèse de doctorat d'état en géologie appliquée, Université Tlemcen.
- **Bize J. ; Bourguet L. ; Lemoine J. 1972.** L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Éditions Masson, 199 P.
- **Blavoux, B. et Mudry, J., 1986.** Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique : le rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures. Bull. Soc. Géol. Fce, t.11, n°4, p.667-674.
- **Bouchagoura L. 2003.** Mise en évidence des diverses pollutions dans la nappe alluviale de Tebessa.Th.Magister. Unive. D'Annaba.78P.
- **Boukous Z., Bouragaa N.** Stratégie de la gestion des eaux dans le sous –bassin versant de oued chabro (mémoire de fin d'étude CU Tébessa 1997) ,59P
- **Boutaleb Saïd 1 & Lhoussaine Bouchaou 2. 2006.** Etude de faisabilité de la recharge artificielle des formations calcaires en zone semi-aride. Cas de l'oued Tagmoute, (Anti- Atlas occidental, Maroc). Actes du 8e colloque d'hydrogéologie en pays calcaire, 2006, Neuchâtel, Suisse - ISBN 2-84867-143-2 © Presses universitaires de Franche-Comté, Université de Franche-Comté, 2006, Édition en ligne, N. Goldscheider, J. Mudry, L. Savoy& F. Zwahlen, éditeurs – 268 pages
- **BOUAROUJ S. (2012).** Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation. Magistère en Écologie, Université Mentouri Constantine, Algérie, 75 p.
- **Botta A, Bellon L. 2004.** Pollution chimique de l'eau et santé humaine. Service de médecine et santé au travail. Laboratoire de biogénotoxicologie et mutagenèse environnementale (EA 1784, IFR PMSE 112), p. 23.
- **Bouziane, M.T. et Labadi, A., 2009.** Les Eaux Profondes de la Région de Biskra (Algérie). European Journal of Scientific Research, Vol.25 No.4 (2009), pp.526-537.
- **BOUHLASSA S., ALECHCHEIKH C. et KABIRI L. (2008).** Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin versant de Rheris (Errachidia, Maroc). Sécheresse, vol. 19, n° 1, pp. 67 75.
- **Brassington R.1988.**Field Hydrogeology. Geological Society of London Professional Handbook,175P.

- **Capaccioni B., Didero M., Paletta C., and Idero L. 2005.** Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to hydrochemical characteristics of groundwaters. *J. Hydrol.*, 307: 1-16.
- **Castany G. (1968)** : Principe et méthode hydrogéologique (DUNOD, Edit, Paris ; 236 Pages)
- **Castany G. : 1980** ; principe et méthode de l'hydrogéologie, édition Dunod.
- **Cazaux M. :2007**, les eaux souterraines en Gironde. Cartographie de vulnérabilité aux pollutions des nappes éocènes dans le secteur du Blayais, Mémoire de stage. Rapport SMEGREG. 54p., 23 fig.
- **Chorfi W., Moheidine S., 2005.** Contribution à l'étude hydrogéologique et bactériologique de la nappe aquifère Tébessa-Hammamet, NW de la W.Tébessa. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 97P
- **Dégbey C, Makoutodé M, Ouendo EM, De Brouwer C. 2010.** Pollution physicochimique et microbiologique de l'eau des puits dans la Commune d'Abomey-Calavi au Bénin en 2009. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4(6): 2257-2271.
- **Demarets X., Marcoen J.M., Agneessens R., Biston R., Limbourg p., 1995.** Flux de nitrates dans une zone à nappes superficielles en wallonie (Belgique). *Cahier Agricultures*, 4, 430-433.
- **Derni S. : 2011**, Réflexion sur les critères de choix d'une méthodologie pour la cartographie de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Cas de bassin versant de la Tafna, Magister en Mobilisation et protection des ressources en eau, Université Tlemcen.
- **Direction hydraulique de la wilaya de Khenchela**, Etude d'avant projet détaillé du barrage de Tagharist mission 3. Mars 2006.
- **Drever, J. F.** "The geochemistry of natural waters". 3rd ed. New York – Prentice-Hall INC; 379 pp (1997).
- **Djebaili, S., (1984)** : Steppe algérienne, phytosociologie et écologie. OPU, Alger 159.
- **Djoudi S., Houha B.,** The hydrochemical characterization of the upper plains aquifers: case of the plain of F'kirinaAin-Beïda, Northeastern Algeria, *Desal. Wat.Treat.*, 92 (2017) 90–97.
- **Doerfliger N (1996)** Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multi-at-tribute vulnerability mapping (EPIK method). (Phd thesis), Faculty of Sciences, neuchatel University.

- **Doerfliger N, Zwahlen F, Meylan B, Tripet J-P, Wild-berger A (1997)** Vulnérabilité des captages en milieu karstique. Nouvelle méthode de délimitation des zones de protection-méthode multicritère EPIK. Gas wasserfaches (SVGW) und des Verbandes Schweizer Abwasser und Gewässerschutz-fachleute (usa) 5 :295-302.
- **DOUAOUI A. et HARTANI T. (2007).** Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. Tunis.
- **El Tayeb El Sadig, M., 1993.** Les systèmes aquifères de la région de Géneina-Adré (confins soudano-tchadiens). Thèse Univ. Avignon, 249p.
- **El wartiti M., Malaki A. et El mahmouhi N. : 2007 ;** Hydrochimie et Vulnérabilité des aquifères souterrains, chapitre IV.
- **Faillat, J.P., 1986.** Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat d'Etat. USTL, Montpellier, 536p.
- **Fellah H.S.:2012,** la cartographie de vulnérabilité et du risque de pollution des eaux souterraines dans le groupement urbain de Tlemcen.
- **Fidelibus M.D. et Tulipano L.** « Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy) ». Proceedings 14th Salt Water Intrusion Meeting. Rapporterochmeddelanden nr 87. pp.: 230-241(1996).
- **Gill (1992).** Chemical Fundamentals of Geology. London, UK.
- **Ghebouli, M.S. et Bencheikh Elhocine, M., 2008.** Origine de la salinité des eaux souterraines- cas des hautes plaines sétifiennes (Nord-Est algérien). Sciences & technologie A-N°28. Decembre (2008), pp.37-46.
- **GOUAIDIA L. (2008).** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana, Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat en sciences, Université d'Annaba, Algérie, 129 p.
- **GOGU R. et A. DASSARGUES (1998).** A short review on groundwater vulnerability assessment. Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. *Workshop, 18-20 mai, Université de Neuchâtel, Suisse*, pp. 1-19
- **Hamad A., Baali B., Hadji R., Zerrouki H., Besser H., Mokadem N., Legrioui R., Hamed Y.,** Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundary basin), Euro- Mediterr. J. Environ. Integr., 3 (2018) 7.

- **Helgeson H.C. (1969)** - Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. American Journal of Sciences, 267, p. 729-804.
- **Houha B (2007)**. Etude du fonctionnement hydrogéochimique et salin d'un bassin semi-aride. remila-khenchela. Doctoratethesis, university of Annaba, Algeria
- **Houha B (2015)** Using contribution of stable isotopes (18O and 2H) in the estimation of recharging altitudes of thermal sources in Aures massif. Algeria .Dissertation, university of Constantine.
- **INSPQ (Institut National de la Santé Publique du Québec)**. 2003. Fiche sur le plomb du Groupe scientifique sur l'eau. Institut national de santé publique du Québec, p. 14.
- **KELLY W.P. (1957)**. Adsorbed Sodium, cation exchange capacity and percentage sodium adsorption in alkali soils, sci., vol. 84, pp. 473-477.
- **KELLY W.P. (1963)**. Use of saline irrigation water, soil science, 95 (4), pp. 355-391.
- **Mbonu, M., 1991**. Hydrogéologie, hydrochimie et géochimie isotopique des aquifères de socles du plateau de Jos et des plaines environnantes (Nigéria). Thèse Univ. Avignon,171p.
- **Menani M. : 2001** ; Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode Drastic.
- **Mimoun D., Graillet D. : 2010**, Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères alluviaux de montagne par utilisation conjointe d'un modèle d'écoulement souterrain et d'un modèle de suivi de particules. Application au Massif Central (France), Centre SITE, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne 158, cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, Colloque Eau, Déchets et Développement Durable, Alexandrie, Egypte.
- **Mosser Ch. (1980)** Etude géochimique de quelques éléments traces dans les argiles des altérations et des sédiments. Thèse de Doctorat, Strasbourg, ULP, 222 pp.
- **Mudry, J., 1987**. Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Annales scientifiques Univ. de Besançon, Thèse de doctorat d'état, Univ. FrancheComté. 311p.
- **N'DIAYE D. A., KANKOU O. A. S. O. M. et LO B. (2010)**. Etude de la salinité des eaux usées utilisées dans l'irrigation dans le périmètre maraîcher de Sebkh, Nouakchott. International Journal of Biological and Chemical Sciences 4(6), pp 2060-2067.
- **Nicolardot B., Mary B., Houot S., Sethecou S., 1996**.La dynamique de l'azote dans

les sols cultivés, la maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. INRA Ed., p 87-103.

- **Onugba, A., 1990.** Contribution à la connaissance des systèmes aquifères de la haute Bénoué (Nigéria). Thèse Univ. Avignon, 203p.
- **Petelet-Giraud E., Goerfliger N. et Crochet P., 2000.** RISKE : Méthode d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques- Outil de gestion adressé aux décideurs de l'aménagement du territoire, Rapport ANTEA, 102 p.
- **Plummer, L.N., Jones, B.F and Trusedall, A.H.** WATEQ-A fortran IV version of WATEQ, A computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters 1976 Revised 1978,1984 Washington D.C .U.S Geol-Surv.-Water Res ,76 : 61(1984).
- **Pranville J., Plagnes V., Rejiba F.,Tremoulet J., 2007 : Cartographie** de la vulnérabilité des eaux souterraines de la partie sud du Causse de Gramat. Rapport UPMC-Paris 6 et PnrCQ, 118 p (consultable sur le site de l'AEAG).
- **Razack M. and Dazy J., 1990.** Hydrochemical characterization of groundwater mixing in sedimentary and metamorphic reservoirs with combined used of Piper's principle and factor analysis. J. Hydrol., 114, 371-393.
- **RICHARDS, L. A., (1954).** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Hand book, N° 60, USDA, Washington D.C. 160 p.
- **Robert et al, (1994),**The impact of climate change on agriculture A RicardianAnalysis,"American Economic Review Vol 84, No4, pp753-771.
- **Rodier J, Legube B, Merlet N. 2009.***L'Analyse de l'Eau*, éd DUNOD: 749- 775.
- **Rodier, J. (2009) :** l'analyse de l'eau, 9ème édition, Dunod ; 1526 p.
- **ROUABHIA A.E.K. et DJABRI L. (2010).** L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El Ma Labiod. Larhyss Journal, n° 8, p. 55 67.
- **Schnebelen N., P. J. P., Le Nindre Y. et Baudry D (2002).** Gestion des eaux souterraines en Aquitaine – Année 5. Opération sectorielle – Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Nouvelles connaissances hydrogéologiques – Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions. R. BRGM/RP51178-FR: 75 p.
- **Schoeller., H. (1962)** - Les eaux souterraines. Masson et Cie, Editeurs, Paris, 642p.
- **Schoeller., H. (1969)** - Géochimie des eaux souterraines. Ed. Eyrolles.
- **Seghir K.; Khérici N.2006.** Perspectives de développement de la réalimentation artificielle des nappes souterraines dans les régions semi-arides : cas de la nappe alluviale Ain-Chabro _ Tébessa (Est Algérien) crestra, Biskra, Algérie
- **Seghir K.; Khérici N.2006.** Proposition d'alimentation artificielle du système

aquifère Tébessa-Ain chabro par l'oued Bouakous-Hammamet. 1er Séminaire International sur les Sciences de la Terre au Service du Développement Durable, le 26 et 27,28 Novembre 2006, au Centre Universitaire de Tébessa.

- **Seghir K.; Khérici N.2008.** Impact de la sécheresse sur les ressources hydriques dans une région semi-aride. Caractérisation hydrogéologique, hydrochimique, bactériologique: Cas de la nappe alluviale Ain chabro-Hammamet (Nord Est Algérien). Réunion des Sciences de la Terre, du 21-24 Avril 2008, Nancy, France.
- **Seghir, K. 2008.** La réalimentation artificielle des nappes phréatiques dans le Nord-Est Algérien. Visions croisées, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, Mai 2008, P8, 9.
- **Simler, R., 2004.** Diagrammes. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon, Logiciel d'hydrochimie multilangage en distribution libre.
- **Sinan M., Maslouhi R., et Razack M.: 2003** ; Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc ; 2nd FIG Regional Conference Marrakech. souterraines. Presses de l'Université du Québec/AUPELF.
- **Smida H., Maiza N., Zairi, M., Ben Dhia, H. (2009):** Gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux dans la région de Sidi Bouzid (Tunisie centrale) à l'aide d'un SIG : Etude de la recharge induite des nappes et leur vulnérabilité à la pollution.
- **Stewart, Ph. (1968)** : Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique : quelques réflexions. Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, Alger, 59(1-4).
- **Strebel, K., Klimkait, T., Maldarelli, F., and Martin, M.A. (1989).** Molecular and biochemical analyses of human immunodeficiency verustupe 1 upuprotein.j. Virol.63, 3784-3791.
- **St-Laurent J, Levallois P, Gauvin D, Courteau M. 2013.** Sources résidentielles de plomb et niveaux de plombémie chez de jeunes enfants habitant d'anciens arrondissements de Montréal, Québec, 77p.
- **Vernoux J.F., Wulleumier A., Dorfliger N. (2007).** Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR, 75 pages, 14 illustrations.
- **WILCOX LV., (1955).** Classification and use of irrigation waters. U.S. Department of Agriculture, Circular 696, Washington, DC, 16 p.

- **Zwahlen F. (Ed) : 2004**, COST Action 620 Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers, Final report, European commission, EUR 20912: 297 p, Université Neuchâtel.

Annexe

Code station : 070604

Nom station : YABOUS

X : 858 ,45

Y : 239,65

Z : 1200

Tableau : pluviométries (1990 à 2012)

	sept	oct	nov	dec	janv	fev	Mars	avril	mai	juin	juil	aout	P annuel
1990	9,9	11,4	66,8	40	5,8	19,3	91,8	55,1	29,9	5,8	33,3	14,3	383,4
1991	16,2	45,5	32	17,2	64,9	23,1	56,7	33	84,7	5,9	23,3	14,6	417,1
1992	45,2	11,9	49,3	52,5	10,5	22,6	48	7,2	20,8	4,4	0	5,4	277,8
1993	15,2	1,8	10,1	31,4	45,9	8,8	48,1	24,6	1,8	1,5	8,6	38,1	235,9
1994	42,4	38,7	5,7	15,8	62,5	1,5	69,9	15	2,8	18,7	23,6	10,8	307,4
1995	42,6	38,3	9,8	19,4	71	154,1	75	48,7	5,5	24	16,7	5	510,1
1996	23,7	0	2,5	13,7	18,2	3,9	8,6	25,5	11,4	2,4	0	28,9	138,8
1997	47,4	56,3	77,7	61,6	6,8	36,8	48,5	17,5	47,7	24,4	0,5	2,6	427,8
1998	15,5	26,6	40,1	25,6	78,5	24,6	11,3	2,8	18,3	9,4	0	0,2	252,9
1999	16,4	6,5	80,3	95,9	12,2	4,4	10	2,5	46,6	23,5	0	5	303,3
2000	31,5	11,3	6,4	5,2	36,7	0	3,2	5,8	29,4	0	2,6	15,5	147,6
2001	69,6	30,8	18,7	13,4	14,1	22,7	34,1	14	31,6	21	12	41,1	323,1
2002	10,4	15,3	88,3	29,6	83,3	45,9	29,1	91,3	16,7	56,7	2,8	0	469,4
2003	86	47,1	22,4	29,7	16,2	8,5	42,8	42	138,3	51	13,1	37,4	534,5
2004	30,4	5,1	87,7	103,3	15,7	26	15,6	39,6	7,6	55,2	25,9	1,6	413,7
2005	35,3	12,7	36,9	48,1	67,9	40,3	4,6	45	117,9	47,6	37,4	16,1	509,8
2006	41,5	21,6	22,3	65	6,2	26,3	72,2	63,6	27,6	3,3	0,6	43,7	393,9
2007	96,6	27,2	8,6	46,3	2,8	3,9	12,4	10	89,8	5,6	77,8	62,5	443,5
2008	66,4	41,3	9,1	29	85,9	12,9	55,8	78,5	27,2	1,8	10	21,9	439,8
2009	65,3	9,9	3,6	12	42,9	24,7	19,9	23,8	32,3	30,5	34	9,1	308
2010	42,5	26,6	55,9	9,1	18,3	71,3	111,6	52,1	127,2	22,5	24,7	48,2	610
2011	36,9	130,7	19,7	19,5	17,1	43,1	41,2	47,5	17,7	5,1	25,1	37,4	441
2012	55,2	21,8	27,9	8,9	40,8	18,3	21,3	41,5	35,2	8	77,3	115,2	471,4
P moyennesmensuelles	40,96	27,76	33,99	34,44	35,83	27,96	40,51	34,2	42,087	18,62	19,5	24,98	



Groundwaters hydro-geochemical characterization of the Tagharist basin (northern region of Khenchela, south-eastern Algeria)

Sekkiou Salah Eddine^{a,*}, Houha Belgacem^b

^aDepartment of Ecology and Environment, Biotechnological Laboratory of Water, Environment and Health, Abbes Laghrour University, BP 40000 Khenchela, Algeria, Tel. +213 0670230911; email: salaseovic907@gmail.com

^bBiotechnological Laboratory of Water, Environment and Health, Abbes Laghrour University, BP 40000 Khenchela, Algeria, Tel. +213 0665627684; email: bhouha@yahoo.fr

Received 12 December 2017; Accepted 15 November 2018

abstract

In order to evaluate the physicochemical quality of groundwater in the Tagharist Wadi basin, which is part of the semi-arid regions of south-eastern Algeria, and to identify the mechanisms resulting in the mineralization of groundwater, physicochemical analyses have been carried out on 34 water samples of Plio-Quaternary aquifer. The study area is a mountainous zone consisted of a certain number of secondary ranges, which form the relief of the Aures massif. The stratigraphic series belong to secondary, with, at the top, Miocene sandstones of limited extension in depth, which rest in discordance on the limestones and marl-limestones of Cretaceous; this set is covered by Quaternary consisted of a low proportion of red clay, pebbles, gravels, and coarse sand; these alluvia are of calcareous, predominant, and sandy nature. The result obtained showed that the bicarbonate-calcium facies dominates (94% of wells), and it originates from carbonate formations going along the water table; the rest (6% of wells) are of sodium-bicarbonate facies. Electrical conductivity of water has an average value of $974.75 \mu\text{S}/\text{cm}$. It is noted that the borehole P4 shows a high electrical conductivity, probably due to irrigation return flow, the salinity of which would be accentuated by evaporation and dissolution of some evaporitic inclusions. Saturation index shows that groundwater of the study area is undersaturated with respect to gypsum, halite, and anhydrite. In contrast, carbonate-calcium formations (calcite and aragonite) tend to be balanced. The descriptive analysis shows that water salinity is very variable from place to place and increases in the water flow direction, impacted by water-rock interaction, mineral dissolution and precipitation, base exchange, and anthropogenic activity.

Keywords: Groundwater; Plio-Quaternary; Salinity; Base exchange; Tagharist basin; Algeria

1. Introduction

The water chemical composition of the wells and the springs is mainly acquired during its crossing of the soil and its residence in the reservoir. Water in contact with the host rock acquires a mineral load typical of the crossed rocks. The elements existing in solution therein are informative of the crossed aquifer nature.

The Tagharist Wadi constitutes the only water reservoir of the mountainous area, characterized by a steep relief. Arboriculture (apple and apricot trees) has a high level growth in terms of farming development, with the emergence of new fruits packaging industry, which has contributed to the stabilization of rural populations, accompanied by solid and liquid discharge. The water tables of the upper plains, being subject to pressure due to the exploitation of

* Corresponding author.

their water, undergo a degradation of their chemical quality, caused by natural processes, as well as by anthropogenic activity. Our objective is to contribute to the understanding of the mineralization process of groundwater in these areas, using tools such as major and minor elements.

We have used the statistical and chemical tools approach to better discriminate the processes responsible for the mineralization acquisition of the Tagharist Wadi valley water. It is then important to rank the processes resulting in the modification of the water chemical composition and that induced their degradation.

2. Materials and methods

Study area

The Tagharist Wadi basin is part of the semi-arid areas of south-eastern Algeria, located about 40 km from the chief town of the Khenchela province between 35°40' and 35°50' of northern latitude, and between 6°50' and 6°60' of eastern longitude. The basin is limited to the south by Djebel Chelia, and to the north by the Remil plain (Fig. 1).

The climate of the study area is semi-arid, with an annual mean rainfall of 392 mm, and a mean annual temperature of 15.8°C.

The study area is a mountainous zone consisted of a certain number of secondary ranges, which form the relief of the Aures massif. The stratigraphic series belong to secondary, with, at the top, Miocene sandstones of limited extension in depth, which rest in discordance on the limestones and marl-limestones of Cretaceous; this set is covered by Quaternary consisted of a low proportion of red clay, pebbles, gravels, and coarse sand; these all via are of calcareous, predominant, and sandy nature. Triassic blunting is visible in Djebel Aidel and Djebel El-Krouma in the Khenchela area [1]. The ancient formations start at the top with Miocene sandstones which rest in discordance on the Cretaceous

formations; this is an alternation of sandstones bank and grey clay having a thickness of 400 m that dips in depth, but it is of limited extension. Cretaceous is represented by dickseries of grey marl, which are homogeneous enough and finely jointed and fractured in places. The stratification is underlined by marl-limestone fine banks of a very light color. A large calcareous dolomitic strip, attributed to Santonian develops. Turonian presents itself as an alternation of thick grey marls, encompassing calcareous banks having a thickness of 500–600m. Basal Turonian is consisted of marlshaving a thickness of 300–400m. Lower Cretaceous, represented by Albo-Aptian, is a succession of marls and limestone having a thickness of 600m.

The geological profile of the crossed terrains (Fig. 2), following an NW-SE path, indicates a succession of terrains of different natures, dipping about 45° downstream. The limestone outcrops and Miocene sandstone are the most visible and dominant, topped by a sediment cover of Quaternary.

Hydrologically, the area has two types of aquifer: multi-layer aquifers of sedimentary basin consisted of Plio-Quaternary aquifers, and aquifers of carbonate fissured formations of Cretaceous.

Sampling and analysis

In order to study the quality of groundwater of the Tagharist Wadi basin, the origin of salinity and its spatial evolution, we have conducted a study of water chemistry.

A complete analysis of chemical major elements and a couple of trace elements have been carried out on 34 samples of water collected in June 2016. Electrical conductivity, water temperature, and pH have been measured in the field by means of multi-parameter of type « CONSORT C931 », Chemical elements have been analyzed at the laboratory of environmental analyses and chemical trials on materials, cations by flame atomic absorption, anions, and trace elements have been dosed by titrimetry and spectrophotometry

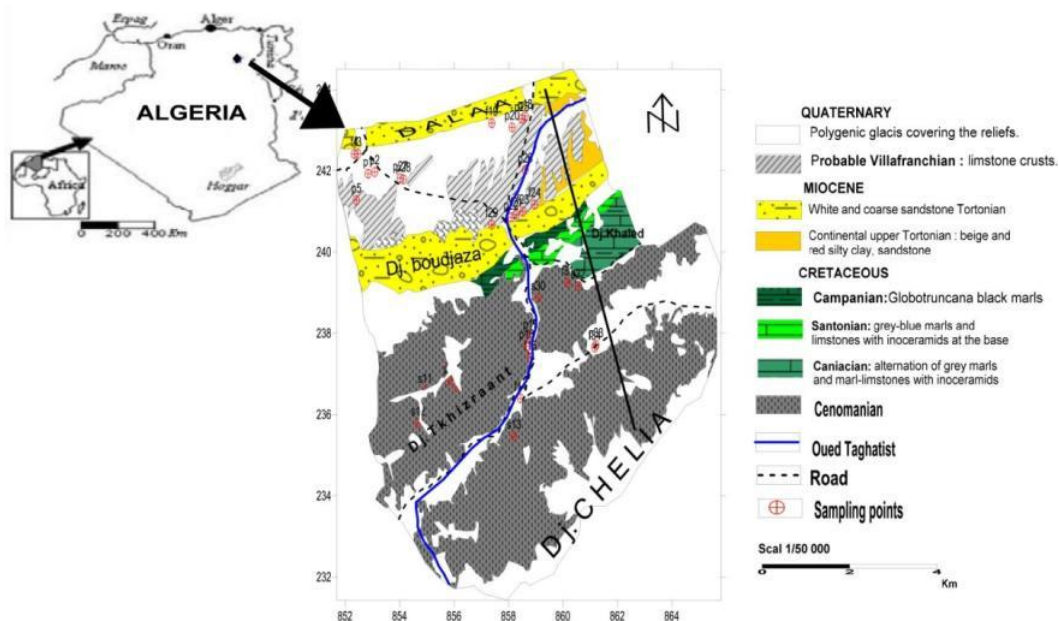


Fig. 1. Geological map of the study area (according to geological map of Touffana).

HACH-(DR2000) in LACILAP Laboratory (Ain M'lila, Algeria, May 2016). The results processing has been carried out using the software diagrams of the University of Avignon (France).

3. Results and discussion

Chemical facies

Chemical analyses (Table 1) show that groundwater is low to moderately mineralized, with electrical conductivity values oscillating between 400 and 2,174 $\mu\text{S}/\text{cm}$, except for borehole 4 which displays a value of 3,948 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The representation of major elements concentrations on Piper diagram (Houha, 2007) (Fig. 3) shows that this groundwater is generally

characterized by a chemical facies where bicarbonates, sulfates, calcium, and sodium are dominant. In detail, this water is distributed between the following poles:

- bicarbonate-calcium facies (94% of wells) originates from carbonate formations going along the water table
- bicarbonate-sodium facies (6% of wells)

The observation of the piezometric map morphology [1] allows seeing that the groundwater flow occurs generally following a south-west direction toward the north-east (Fig. 4). The drainage axis of groundwater coincides sensitively with the course of the Boulefrais Wadi, which drains surface water.

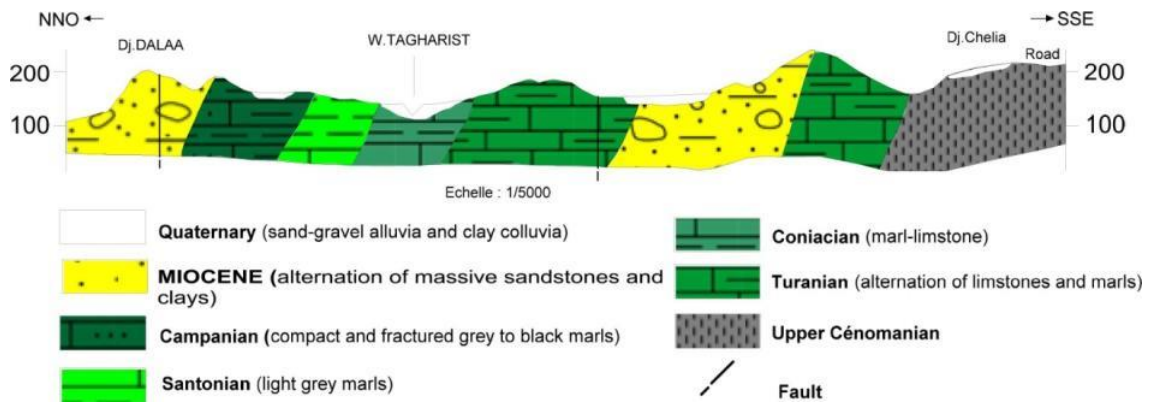


Fig. 2. The geological profile of the crossed terrains (ANB March 2006).

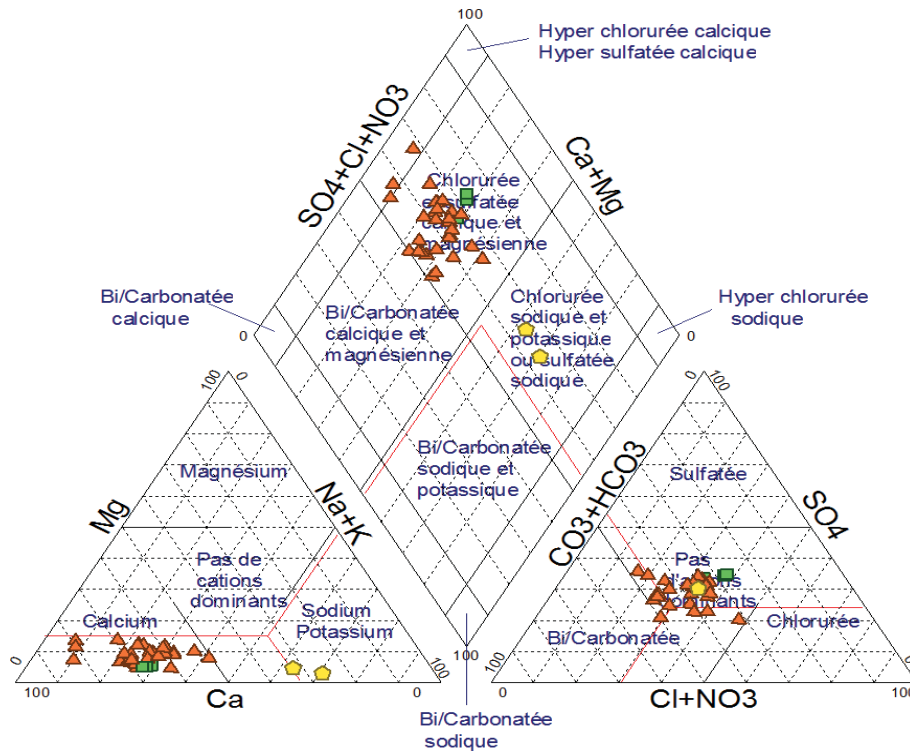


Fig. 3. Piper diagram for all water of the Tagharist Wadi basin.

Table 1
Results of groundwaters physicochemical analyses of the TagharistWadi basin (June 2016)

Point	CE ($\mu\text{S/cm}$)	pH	TDS (mg/L)	Ca(mg /L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	Saturation index					
													Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Halite
P1	1,355	7.82	710	115.3	11.65	71.2	5.3	285.2	66.54	122.4	32.36	0.012	-1.62	-0.17	-0.02	-0.7	-1.4	-6.92
P2	1,770	7.70	893	142.5	13.25	88.3	6.5	354.3	92.33	167.8	28.55	0.01	-1.44	-0.02	0.13	-0.43	-1.22	-6.69
P3	1,811	7.6	912	158.3	14.55	75.4	7.2	360.0	98.31	171.3	26.88	0.003	-1.4	0.03	0.17	-0.34	-1.18	-6.74
P4	3,948	7.31	2,022	396.6	16.37	165.7	11.5	796.3	233.4	366.8	25.12	0.012	-0.9	0.64	0.79	0.54	-0.68	-6.06
P5	896	7.70	463	88.54	4.55	43.5	2.8	128.5	48.34	102.2	45.67	0.013	-1.73	-0.58	-0.44	-1.83	-1.51	-7.26
P6	983	7.57	474	91.27	4.98	29.8	3.6	145.7	52.47	106.5	41.13	0.015	-1.7	-0.52	-0.38	-1.67	-1.48	-7.39
P7	967	7.37	462	91.77	5.05	28.4	4.6	141.4	49.66	99.03	42.12	0.011	-1.73	-0.53	-0.38	-1.68	-1.51	-7.43
P8	923	7.51	468	85.44	7.64	40.3	5	139.9	47.38	98.13	44.88	0.01	-1.76	-0.56	-0.42	-1.54	-1.54	-7.3
P9	1,069	7.43	511	103.6	8.32	36.2	4.9	145.2	55.27	111.5	46.39	0.016	-1.65	-0.48	-0.33	-1.42	-1.43	-7.28
P10	1,441	8.00	692	62.32	5.33	135	6.3	204.6	89.32	138.3	50.51	0.039	-1.78	-0.57	-0.43	-1.58	-1.56	-6.51
P11	787	7.29	385	71.77	8.18	27.3	3.1	122.2	41.27	78.25	33.45	0.009	-1.9	-0.68	-0.53	-1.66	-1.68	-7.52
P12	632	7.34	312	55.39	6.31	22.1	3.4	102.3	32.65	58.95	31.12	0.011	-2.09	-0.84	-0.7	-1.99	-1.87	-7.71
P13	433	7.98	203	48.65	2.55	5.6	1.9	76.31	19.37	32.27	16.37	0.012	-2.35	-0.99	-0.84	-2.62	-2.13	-8.52
P14	619	7.37	281	61.24	6.32	5.2	2.2	80.21	32.54	62.36	31.24	0.014	-2.02	-0.9	-0.76	-2.15	-1.8	-8.34
P15	543	7.61	262	50.22	6.02	13.5	1.3	77.32	24.56	60.24	29.35	0.009	-2.1	-0.99	-0.85	-2.28	-1.88	-8.04
P16	538	7.58	261	46.34	5.12	17.9	1.1	81.29	21.33	55.36	33.4	0.007	-2.17	-1	-0.86	-2.33	-1.95	-7.98
P17	552	7.98	269	47.56	2.81	16.5	2.4	111.1	27.11	36.54	19.32	0.011	-2.32	-0.85	-0.7	-2.29	-2.1	-7.91
P18	1,173	7.70	576	108.9	10.13	47.2	8.6	163.5	69.32	119.2	51.27	0.031	-1.62	-0.42	-0.27	-1.23	-1.4	-7.08
P19	544	7.73	260	46.36	2.11	29.34	1.1	86.66	30.21	42.32	21.27	0.009	-2.27	-0.97	-0.82	-2.64	-2.05	-7.61
P20	2,174	7.64	1,079	244.7	21.26	26.3	5.6	399.5	115.8	238.2	27.95	0.006	-1.15	0.23	0.37	0.03	-0.93	-7.14
P21	704	7.71	347	65.23	4.56	29.2	3.5	106.3	52.44	65.21	21.22	0.011	-2	-0.76	-0.62	-2.05	-1.78	-7.39
P22	400	8.41	198	39.66	3.2	12.3	2.1	69.32	26.35	30.08	16.35	0.003	-2.45	-1.11	-0.97	-2.68	-2.23	-8.04
P23	494	7.69	245	42.02	4.28	22.6	2.6	77.07	28.92	36.55	31.47	0.016	-2.37	-1.06	-0.91	-2.47	-2.15	-7.74
P24	591	7.94	296	47.47	5.63	25.2	2.9	79.03	31.52	39.21	66.31	0.008	-2.31	-1	-0.86	-2.3	-2.09	-7.66
P25	1,691	7.55	849	169.3	8.66	68.4	5.6	231.4	45.67	188.9	33.54	0.01	-1.32	0.01	0.16	-0.63	-1.1	-7.11
P26	716	7.89	340	55.39	5.1	29.4	4	112.0	35.96	71.99	27.39	0.011	-2.01	-0.81	-0.67	-2.02	-1.79	-7.54
P27	1,983	7.98	987	195.2	8.85	90	7.2	244.7	163.4	234.7	44.21	0.013	-1.21	-0.07	0.08	-0.85	-0.99	-6.45
P28	2,063	7.772	1,031	200.3	8.92	88.3	6.9	251.5	177.0	252.0	46.38	0.017	-1.18	-0.05	0.09	-0.82	-0.96	-6.42
P29	644	7.786	319	45.68	4.25	41.2	3.1	89.73	29.37	64.33	42.31	0.016	-2.12	-0.98	-0.84	-2.36	-1.9	-7.48
P30	561	7.586	263	44.35	3.56	22.7	2.2	80.27	22.35	52.23	35.36	0.009	-2.2	-1.02	-0.88	-2.51	-1.98	-7.86
P31	818	7.34	396	61.25	7.05	45.8	5.3	112.3	42.01	73.11	49.37	0.014	-1.99	-0.78	-0.63	-1.86	-1.77	-7.29
P32	732	7.308	345	58.63	6.55	29.9	4.8	122.3	28.34	66.37	28.14	0.008	-2.03	-0.75	-0.6	-1.82	-1.81	-7.64
P33	541	7.617	254	49.66	3.12	17.3	3.6	70.33	2.55	50.24	32.58	0.011	-2.17	-0.95	-0.8	-2.46	-1.95	-8.91
P34	1,019	8.695	519	40.21	2.81	121.8	2.6	152.63	59.36	100.0	40.08	0.019	-2.04	-0.85	-0.71	-2.22	-1.82	-6.72

CE — Electrical conductivity; TDS — total dissolved solids.

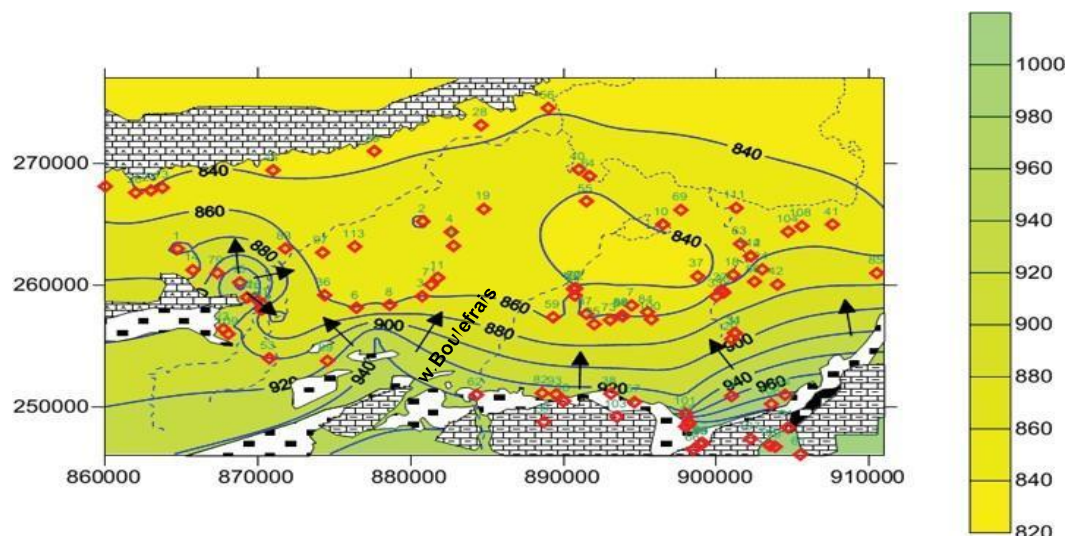


Fig. 4. Piezometric map according to Houha et al. [1].

Mineralization origin

To better understand the mineralization process of groundwater, we have represented major elements in function of chlorides (Fig. 5); this latter is a conserved element, not involved in water–rock interaction; characterizes the salinity origin of waters and constitutes a mixing tracer [3].

Graph Cl^- vs. Na^+ shows that all the points lie below the mixing line, given that Na^+ content should balance Cl^- ; Na^+ deficit is explained by the phenomenon of ionic base exchange between water and the aquifer, and is reflected by Na^+ adsorption and Ca^{2+} release [4,5].

The relationship between Ca^{2+} and Cl^- illustrates this by showing that the points are often above the mixing line freshwater–saltwater.

The relationship between Mg^{2+} and Cl^- shows a slight enrichment in Mg^{2+} with respect to the mixing line; this enrichment may be due to dolomite dissolution.

The relationship between SO_4^{2-} and Cl^- shows that the quasi-totality of the points lie below the mixing line freshwater–saltwater; this enrichment may be explained by evaporitic rock dissolution in aquifers, associated with contamination originating from agriculture [6,7]. In this area, the infiltration of irrigation water and rainwater loaded with soils and fertilizers is facilitated by the shallow depth of the water table and the good permeability of the soil.

The relationship between K^+ and Cl^- points out that the majority of the points lie below the mixing line, except for some points that get near the line, showing that the most likely origin of K^+ is pollution under the effect of NPK fertilizers and/or red clay, very abundant in the area.

3.3. Saturation index

Saturation index (SI) expresses the chemical balance degree between water and the mineral in the aquifer matrix, considered as a measure of dissolution and/or precipitation process concerning water–rock interaction [8]. The use of PHREEQC [9] has allowed us to calculate SI of anhydrite, aragonite, calcite, dolomite, gypsum, and halite. Generally

water–rock balance is reached when $\text{SI} = 0$, if $\text{SI} > 0$, water is supersaturated, precipitation of minerals is necessary to reach the balance. Conversely, if $\text{SI} < 0$, water is under saturated, the dissolution of minerals is necessary to reach the balance [10], so these minerals control the chemistry of this water. On the whole, groundwater of the study area is under-saturated with respect to gypsum, halite, and anhydrite; this suggests a probable dissolution of these minerals. In contrast, carbonate–calcium formations (calcite and aragonite) tend to be balanced (Fig. 6).

3.4. Identification of chemical elements origin

Groundwaters chemical process of the Tagharist Wadi basin has been studied by means of some binary diagrams of the main major elements. The first diagram has been concerned about variation of carbonate elements ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs. HCO_3^- and Ca^{2+} vs. HCO_3^-). These diagrams show that the points representing the different chemical analyses of sampled water are located near the line of calcite and near that of dolomite (Fig. 7); this suggests that these elements have a carbonate origin [11]. A second group of diagrams has been established by means of evaporite elements (Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ , and Cl^-). Diagram Ca^{2+} vs. SO_4^{2-} shows that the points are aligned around the slope line “1”, influenced by gypsum and/or anhydrite dissolution. Diagram Na^+ vs. Cl^- shows that the points lie on the slope line “1”, indicating that halite dissolution ($\text{Na}-\text{Cl}$) was the origin of these elements.

3.4.1. Nitrate

Fig. 8 shows an abundance of nitrates in several water samples, which makes water unsuitable for human consumption. Indeed, 11% of the analyzed samples showed higher values than the standards permitted by the WHO (50 mg/L) with a maximum of 66.31 mg/L. On the other hand, nitrites content remains below the admissible limits. The nitrate content increases from upstream to downstream and in the same direction of groundwater flow. This increase is mainly due to the accumulation of solute toward

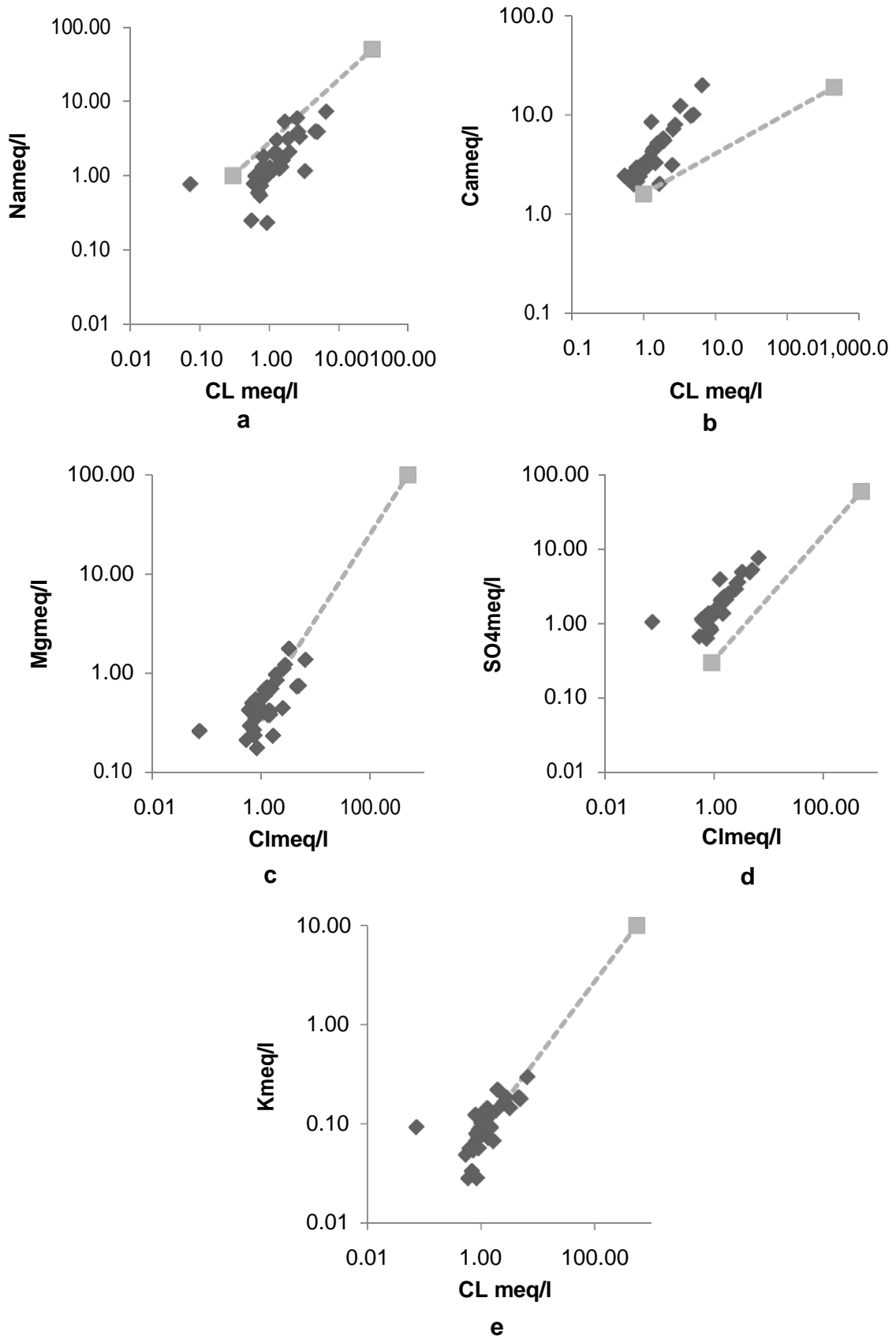


Fig. 5. Relationship between Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ , and Cl^- of groundwater and freshwater–saltwater.

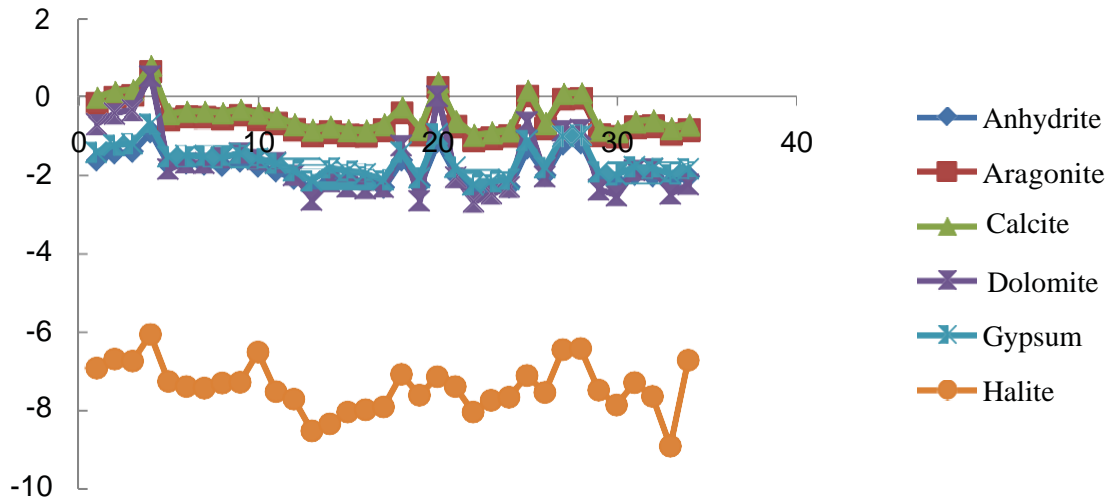


Fig. 6. Saturation index of sampled water.

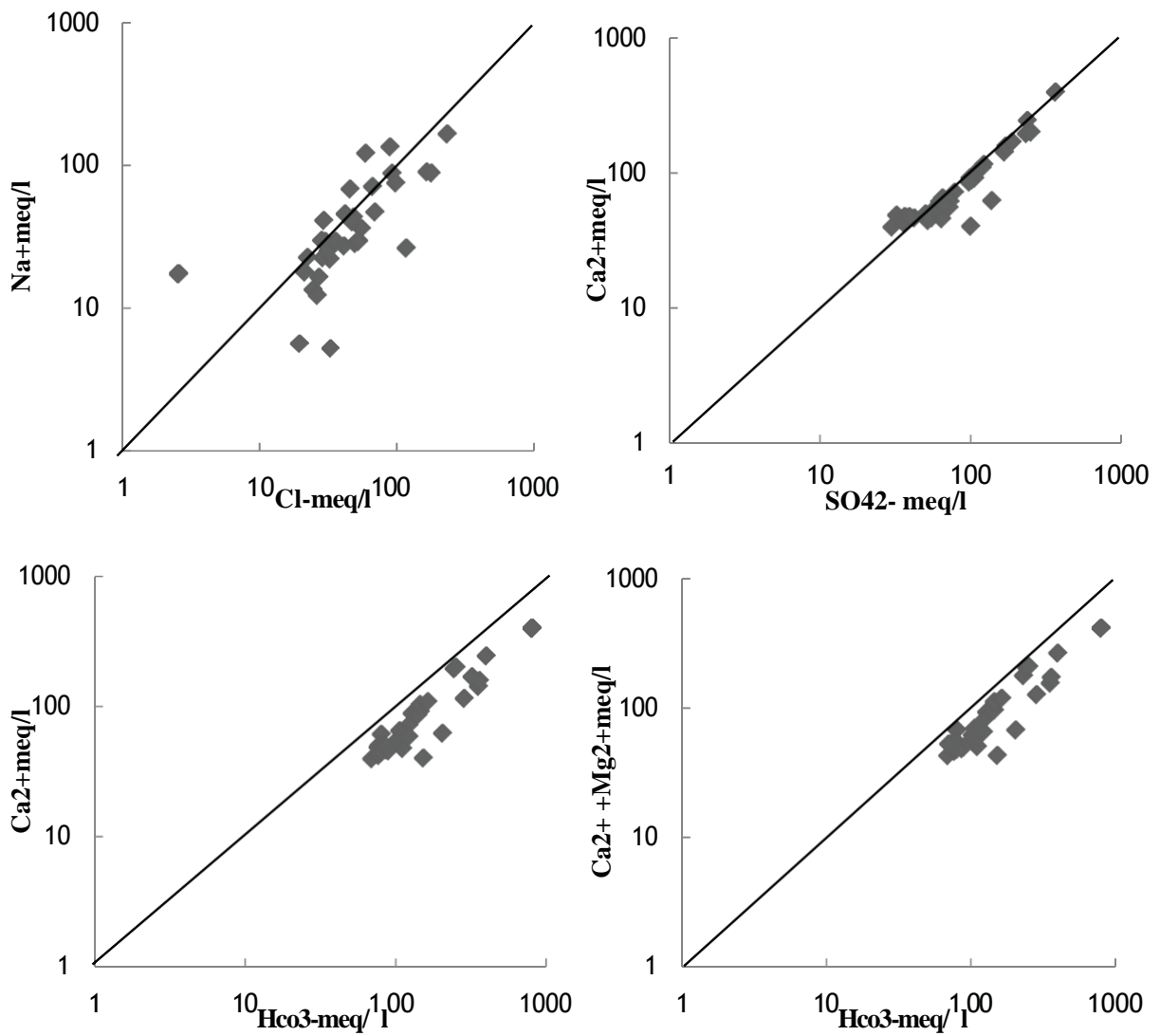


Fig. 7. Relationship between Na⁺/Cl⁻, Ca²⁺/SO₄²⁻, Ca²⁺/HCO₃⁻, and (Ca²⁺+Mg²⁺)/HCO₃⁻.

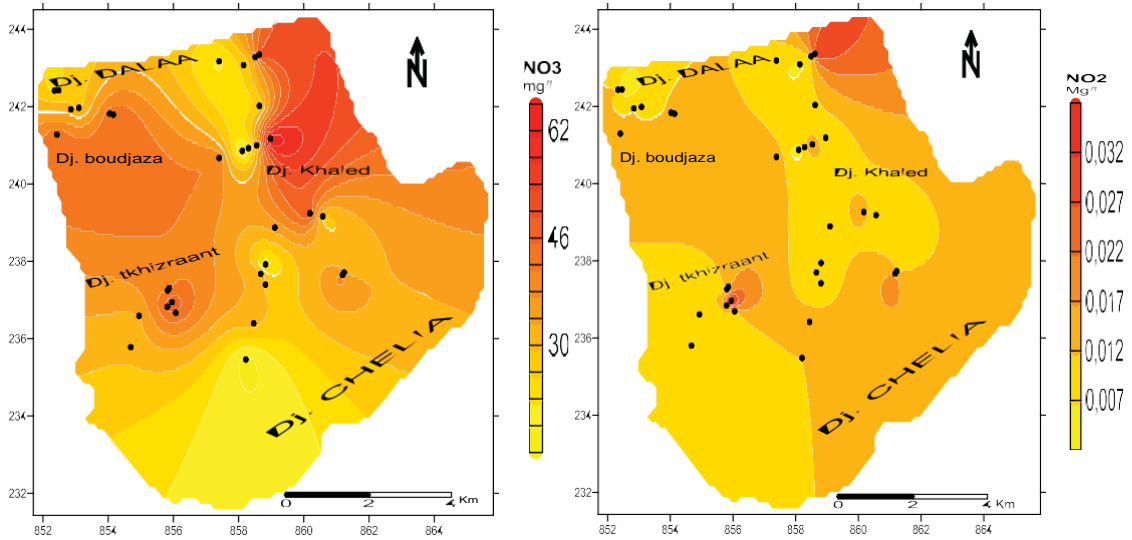


Fig. 8. Distribution of NO_3^- and NO_2^- concentrations.

the aquifer outlet. The high nitrate levels are preferentially observed in the zones at shallow water depth (<10 m) and within organic matter and nitrate-rich soils, which confirms

causes leaching of nitrogen released from fertilizers and a rapid mineralization of organic soil horizons [12]. Nitrates are highly soluble in water and are transported by runoff or irrigation water, gradually penetrating into groundwater

Statistical multivariate analyses

The principal components analysis (PCA) was applied to discriminate the factors which mostly influence the variability and the hydrochemical classes [13,14] and then to organize them according to their order of importance.

Geochemical analyses

A statistical study by PCA has been carried out on a table of 12 variables and 34 observations. The principle of this processing has been described with more detail in the past [15,16]. The obtained results have been reported in Table 2; these analyses have allowed to draw two major factors having an expressed variance sum of 80.11% (Table 2). The analysis on factorial design F1–F2 (Figs. 9 and 10) has highlighted the general trends. In fact, factor F1 has an expressed variance of 65.08%, the most important is determined by total dissolved solids (TDS), EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO^- , SO_4^{2-} , and Cl^- . Consequently, factor F1 expresses the phenomenon of mineralization; factor F2 represents 15.03% of variance, and is characterized by NO_3^- and NO_2^- , so factor F2 expresses an organic pollution resulting from anthropogenic activity [17–22].

The space of individuals exactly reflects the localization of well 4 at the positive extremity of axis F1 that reveals a strong mineralization of its waters. On axis F2, which is a pollution axis, wells 10, 18, and 34 exhibit a high nitrate value of the order 50.51, 51.27, and 40.08 mg/L, that are opposed to well 20, that exhibits a low value of it 27.95 mg/L.

Table 2

Eigenvalues and percentage expressed by the main axes

the agricultural origin of pollution. Intensive agriculture

Eigenvalues	7.81	1.80
Variability (%)	65.08	15.03
Cumulative (%)	65.08	80.11

servicing to supply drinking water.

Variables (axes F1 et F2 : 80.11%)

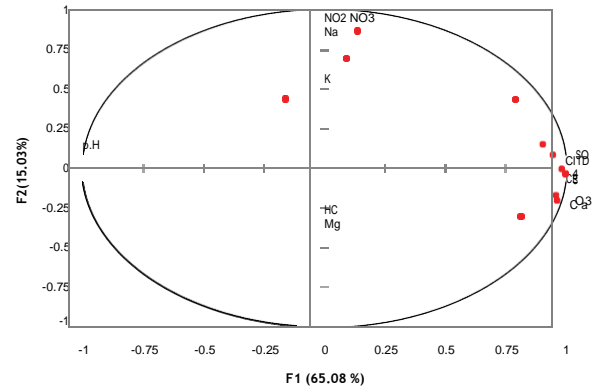


Fig. 9. Variables projection in the factorial space F1–F2.

Observations (axes F1 et F2 : 80.11%)

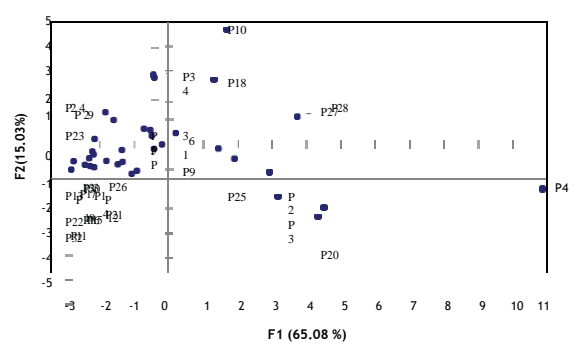


Fig. 10. Statistical projection units in the factorial space F1–F2.

4. Conclusion

Hydrochemical data of well waters collected from the TagharistWadibasin have been used to determine the chemical process causing this mineralization. The hydrochemical study has shown that water is low to moderately mineralized. Piper diagram shows two chemical facies: bicarbonate-calcium facies (94%) and bicarbonate-sodium facies(6%).

The use of minor and major elements has allowed for the understanding of the water mineralization process. Thus, this mineralization would derive from dissolution–precipitation of the aquifer rock, evaporites, base exchange, and anthropogenic activity.

Eventually, in order to preserve the water resources from degradation, we recommend to the farmers of this region to adopt best management practices: better control of irrigation through water-saving techniques, better reasoning of mineral fertilization, as well as the frequent addition of organic amendments to the soils.

References

- [1] B. Houha, Etude de fonctionnement hydrogéochimique, salin et isotopique des eaux de Khenchela. Thèse de doctorat, Université d'Avignon, France, 2007, pp. 140.
- [2] A.M. Piper, A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses, *Trans. Am. Geophys. Union*, 25 (1994) 914–923.
- [3] M.D. Fidelibus, L. Tulipano, Regional Flow of Intruding Sea Water in the Carbonate Aquifers of Apulia (Southern Italy), *Proc. 14th Salt Water Intrusion Meeting, Vol. 87, Rapporter och meddelanden*, 1996, pp. 230–241.
- [4] B. Capaccioni, M. Didero, C. Paletta, L. Idero, Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to hydrochemical characteristics of groundwaters, *J. Hydrol.*, 307 (2005) 1–16.
- [5] S. Djoudi, B. Houha, The hydrochemical characterization of the upper plains aquifers: case of the plain of F^okirina Ain-Beïda, Northeastern Algeria, *Desal. Wat. Treat.*, 92 (2017) 90–97.
- [6] Y. Hamed, R. Ahmadi, A. Demdoug, S. Bouri, I. Gargouri, H. Ben Dhia, S. Al-Gamal, R. Laouar, A. Choura, Use of geochemical, isotopic, and tracer data to develop model of groundwater flow: a case study of Gafsamining basin-Southern Tunisia, *J. Afr. Earth Sci.*, 418 (2014) 436.
- [7] F. Touhari, M. Meddi, M. Mehaiguen, M. Razack, Hydrogeochemical assessment of the upper chelif groundwater (North West Algeria), *Environ. Earth Sci.*, 3043 (2015) 3061.
- [8] J.F. Drever, *The Geochemistry of Natural Waters*, 3rd ed., Prentice-Hall Inc., New York, 1997, 379 pp.
- [9] L.N. Plummer, B.F. Jones, A.H. Truesdall, WATEQF; A FORTRAN IV version of WATEQ: A computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters, Geological Survey, Water Resources Division, Washington D.C., USA, 76 (1984) 61.
- [10] S.M. Yidanaa, D. Ophoria, B. Banoeng-Yakubob, A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data – the Ankobra Basin, Ghana, *J. Environ. Manage.*, 88 (2008) 697–707.
- [11] A. Hamad, B. Baali, R. Hadji, H. Zerrouki, H. Besser, N. Mokadem, R. Legrioui, Y. Hamed, Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundary basin), *Euro-Mediterr. J. Environ. Integr.*, 3 (2018) 7.
- [12] A. Fernández-Cirelli, J.L. Arumí, D. Rivera, P.W. Boochs, Environmental effects of irrigation in arid and semi-arid regions, *Chil. J. Agric. Res.*, 69 (2009) 27–40.
- [13] V.P. Evangelou, J. Lumbanraja, Ammonium-potassium-calcium exchange on vermiculite and hydroxyl-aluminium vermiculite, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66 (2002) 445–455.
- [14] A. Melloul, M. Collin, The principal component statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification: application to the coastal plain aquifer of Israel, *J. Hydrol.*, 140 (1992) 49–73.
- [15] T. Foucart, *Analyse Factorielle*, Programmation sur micro-ordinateur, Masson, Ed., France, 1982.
- [16] A. Mangin, Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Concepts méthodologiques adoptés, *Systèmes karstiques étudiés, Ann. Spéléol.*, 29 (1974) 495–601.
- [17] Y. Hamed, S. Awad, A. Ben Sâad, Nitrate contamination in groundwater in the Sidi Aïch-Gafsa Oasis region, Southern Tunisia, *J. Environ. Earth Sci.*, 70 (2013) 2335–2348.
- [18] Y. Hamed, R. Ahmadi, A. Demdoug, I. Gargouri, R. Hadji, S. Bouri, H. Ben Dhia, S. Al-Gamal, R. Laouar, A. Choura, Use of geochemical, isotopic, and tracer data to develop model of groundwater flow: a case study of Gafsamining basin-Southern Tunisia, *J. Afr. Earth Sci.*, 100 (2014) 418–436.
- [19] Y. Ayadi, N. Mokaddem, B. Redhaounia, Y. Hamed, The Impact of Climate Change on Future Nitrate Concentration in Groundwater of Bled Abida Basin El Kef Region (NWT Tunisia), *Colloque International sur l'hydrogéologie et la géothermie*, le 11–12 November, Guelma, Algérie, 2014.
- [20] Y. Ayadi, B. Redhaounia, Y. Hamed, Groundwater Contamination in the Aquifer System of El Houdh-Bled Abida Basin (North western Tunisia), *International Symposium on Water Pollution and Environmental Impacts in the Mediterranean Basin*, le 23–27 November, Sousse, Tunisie, 2014.
- [21] N. Mokadem, H. Younes, M. Hfaïd, H. Ben Dhia, Hydrogeochemical and isotope evidence of groundwater evolution in El Guettar Oasis area, Southwest Tunisia, Carbonates Evaporites, 30 (2015) 417–437.
- [22] N. Mokadem, A. Demdoug, Y. Hamed, S. Bouri, R. Hadji, A. Boyce, R. Laouar, A. Saad, Hydrogeochemical and stable isotope data of groundwater of a multi-aquifer system: Northern Gafsa basin (Central Tunisia), *J. Afr. Earth Sci.*, 114 (2016) 174–191.