

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD – TLEMCEN

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour L'obtention du Diplôme de

Master en Géologie

Option : Hydrogéologie.

THEME

Contribution à l'étude des eaux souterraines au Sahara, exemple des eaux de la région de Kenadsa.

Présente par ,

BRAHMI Hayat

Devant le jury :

Mr. BOUANANI A.

Université de TLEMCEN Président

Mr. TABET HELAL M. A.

Université de TLEMCEN Encadreur

Mr. BAGHLI A.

Université de TLEMCEN Co-encadreur

M^{me} BABA HAMED K.

Université de TLEMCEN Examinatrice

M^{me} HEBIB F.

Université de TLEMCEN Examinatrice

Soutenu le : 14/06 /2015

Année Universitaire : 2014/201 5

Dédicace

Un mémoire n'est pas le fruit du seul travail de son auteur, mais le résultat de plusieurs et profondes collaborations.

Tout d'abord, Grace à Dieu tout Puissant et en signe de reconnaissance pour ma réussite et la volonté pour mener à bien ce modeste travail.

Je dédie :

De ma profonde gratitude, à la plus belle créature que Dieu a créée sur terre, cette source de tendresse, de patience et de générosité, Ma mère.

Mère, je t'exprime mon profond respect et j'espère que j'ai été à la hauteur. Ma joie est que tu sois fière de moi.

A mon père pour l'éducation qu'il m'a prodiguée par tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'il a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'il m'a enseigné depuis mon enfance.

A mes très chers frères Abdelghani, El hadj, Abdelhafid, et mon petit cher Mohamed Abdelkhalek

A ma chère sœur : Nabila

A mes très chères amies : Ahlam, Zohra

A toute la famille Brahmi et Malki

*A tous mes collègues de la promotion de 2^{ème} année
Master hydrogéologie : 2014/2015.*

A mes amies de la cité universitaire « Mansourah 03 »

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment, ma famille, mes amis et à tous ceux qui ont l'amour d'apprendre.

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.

Hayat

Remerciements

*Avant tout, un très grand merci à **ALLAH** qui est toujours présent avec moi.*

Au terme de ce travail, il m'est très agréable de remercier tous ceux qui m'ont aidé et contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

*Tout d'abord, je tiens à remercier mon encadreur M. **TABET HELAL M. A.** et mon co-encadreur **M. BAGHLI A.** qui m'ont fait confiance, et qui ont bien voulu superviser ce travail.*

Je les remercie de m'avoir fait bénéficiaire de leurs connaissances, de leurs orientations et de leurs critiques qui m'ont beaucoup aidé à l'amélioration de ce mémoire.

*Mes vifs remerciements à **M. BOUANANI A.** pour m'avoir honorée en présidant ce jury.*

*Ma profonde gratitude et mes remerciements à **Mme BABA-HAMED K.**,
pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Je remercie également **Mme HEBIB F.** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Ma vive gratitude et remerciements s'adressent à **M. MEKKAOUI**, enseignant-chercheur à l'université de Béchar, qui m'a largement aidée au cours de la réalisation de ce travail, et pour son soutien inestimable.*

*Je remercie toute l'équipe de l'ANRH de Béchar particulièrement **M^{lle} ALOUI, M. MERZOUGUI et M. RABEHI***

*Je remercie M. **BELKENDIL** pour les conseils et encouragements qu'il m'a prodigués.*

Mes remerciements sont adressés aussi à l'équipe de la Station Météorologique de Béchar.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, en particulier à ceux de la filière hydrogéologie.

Je tiens à remercier tous mes collègues qui m'ont aidée et encouragée pour la réalisation de ce mémoire.

Bien sûr, sans oublier le laboratoire N°25 où j'ai réalisé les analyses et élaboré ce travail.

*Merci à ma famille qui m'a accompagnée dans cette aventure,
en particulier à ma mère toujours patiente et attentive.*

Abréviation :

ACP : analyse en composantes principales

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques.

CE : Conductivité Electrique.

CMA : Concentration Maximal Admissible

ETP : Evapotranspiration Potentiel.

ETR : Evapotranspiration Réelle.

IS : Indice de saturation

MNT : Modèle Numérique du Terrain.

OMS : Organisation mondiale de la santé

ONM : Office national de météorologie.

pH : potentiel hydrogène

PI : indice de perméabilité.

SAR : Sodium Adsorption Ratio. .

UTM : Universel Transverse Mercator.

μS : micro-siemens.

Liste Des Tableaux	Pages
Chapitre I : Présentation générale de la région de Kenadsa.	
Tableau I.1. Caractéristique de la station climatique.	8
Tableau I.2. Pluviométrie annuelles à la station de Béchar série (2003/2014).	9
Tableau I.3. Précipitation mensuelle moyenne à la station de Béchar (2003-2014).	10
Tableau I.4. Températures moyennes mensuelles et annuelles (min, max, moy).	10
Tableau I.5. Vitesse moyenne mensuelle du vent	11
Tableau I.6. Les humidités relatives moyennes mensuelles de Kenadsa (2003-2014).	12
Tableau I.7. Les moyennes mensuelles de l'évaporation.	13
Tableau I.8. Relation température –précipitation.	17
Tableau I.9. Les résultats de calcul de l'ETP mensuelle par cette formule.	17
Tableau I.10. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite. (2003-2014).	18
Tableau I.11. Les différentes composantes du bilan hydrologique de la station de Béchar.	21
Chapitre III : Hydrogéologie	
Tableau.III.1. La superposition des couches du carbonifère d'après Paul Deleau.	37
Tableau III .2. Ouvrage de captage (DPAT.2007 modifie).	39
Tableau III.3. Résultats de la piézométrie au niveau du terrain d'étude.	40
Tableau.III.4. Les résultats de calcul des gradients hydrauliques.	44
Chapitre IV : Contexte Hydrochimique	
Tableau IV.1. Présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des points d'eau prélevés (mai 2015).	47
Tableau IV.2. Relation entre la minéralisation et la conductivité (Rodier, 1996).	50
Tableau IV.3. Le calcul de la minéralisation à partir de la conductivité (RODIER, 1996).	52
Tableau IV.4. Les résultats de minéralisation.	52
Tableau. IV.5. Classification des eaux souterraines selon la dureté totale.	53
Tableau. IV.6. Calcul de la balance ionique des eaux du secteur d'étude.	54

Tableau IV.7. Calcul des rapports caractéristiques.	61
Tableau IV.8. Résultats des analyses chimiques en r (meq/l).	63
Tableau IV.9. Faciès caractéristiques des échantillons prélevés.	63
Tableau IV.10. Indices de saturation des eaux souterraines de la zone étudiée	69
Tableau IV.11. Valeurs des indices d'échange de base des eaux du secteur d'étude.	70
Tableau.IV.12. Les paramètres statistiques de la série.	71
Tableau.IV.13. Matrice de corrélation des éléments chimiques.	72
Tableau.IV.14. Les Normes Algériennes de potabilité.	75
Tableau.IV.15. Classification des eaux selon les normes Algériens de potabilité.	75
Tableau.IV.16. L'indice de perméabilité des eaux étudiée.	77
Tableau IV.17. La Concentration des chlorures des eaux étudiée.	77
Tableau IV.18. La Concentration des nitrates des eaux étudiées.	78
Tableau IV.19. le Magnésium de Hazard des eaux étudiées.	79
Tableau IV.20. Le Kelly's Ratio des eaux étudiée.	79
Tableau IV.21. Le pourcentage de sodium des eaux étudiées.	80
Tableau IV.22. Le sodium adsorption ratio(SAR) des eaux étudiée.	81
Tableau IV.23. Résultats de calcul des indices d'irrigation.	82

Liste des figures	Pages
Chapitre I : présentation générale de la région de Kenadsa	
Figure I.1. Carte de la situation de la région Béchar.	03
Figure I.2. Situation géographique de la ville de Bechar (SW Algérie).	04
Figure I.3. Situation du village de Kenadsa (LandSAT 2013).	05
Figure I.4. Limite géographique du village de Kenadsa (LandSAT 2013).	06
Figure I.5. Situation administrative de Kenadsa.	06
Figure I.6. Unités géomorphologiques à l'aide du global Mapper.	06
Figure I.7. Image Satellitaire en 3D de la région de Kenadsa.	07
Figure I.8. Carte Pluviométrique de Sahara Nord – Occidental.	09
Figure I.9. Variations des précipitations annuelles en (mm).	09
Figure I.10. Variation des précipitations moyennes mensuelles.	10
Figure I.11. Courbe des Températures moyennes mensuelles.	11
Figure I.12. Rose des vents (Bechar 2003-2014).	12
Figure I.13. Courbe des humidités relatives moyennes mensuelles en % De Kenadsa (2003-2014).	12
Figure I.14. Variation mensuelle de l'évaporation période.	13
Figure I.15. Diagramme d'indice d'aridité (De Martonne, 1925).	14
Figure I.16. Position de la région de Kenadsa dans le diagramme d'Emberger.	15
Figure I.17. Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls.	16
Figure I.18. Abaque de Wundt pour le calcul de l'ETR (modifié par Coutagne).	19
Figure I.19. Abaque de Verdeil (calcul de l'ETR).	20
Chapitre II : Cadre géologique	
Figure II.1. Carte structurale de l'Algérie.	22
Figure II.2. Carte géologique provisoire de Béchar (Deleau, 1952).	25
Figure II.3. la carte géologique de site d'étude.	26
Figure II.4. Log stratigraphique du Westphalien.	27
Figure II.5. Veines de charbon de bassin de Kenadsa.	28
Figure II.6. Vue panoramique de la 1 ^{ère} Barga de Kenadsa	29
Figure II.7. Coupe du Crétacé de Kenadsa.	31

Chapitre III : Hydrogéologie	
Figure III.1. Système aquifère dans la région d'étude.	32
Figure III.2. Esquisse géologique et eaux souterraines dans la région de échar	35
Figure III.3. Carte piézométrique régionale.	36
Figure III.4. points d'eau.	39
Figure III.5. Carte d'inventaire des points d'eau.	42
Figure III.6. Carte piézométrique de la zone d'étude.	43
Chapitre IV : Contexte hydrochimiques	
Figure IV.1. Histogramme de variation de la conductivité électrique $\mu\text{s}/\text{cm}$.	50
Figure IV.2. Carte en courbe isoteneur de conductivité $\mu\text{s}/\text{cm}$.	51
Figure IV.3. Carte en courbe isoteneur de Ca^{2+} (campagne mai 2015).	55
Figure IV.4. Carte en courbe isoteneur de Mg^{2+} (campagne mai 2015).	56
Figure IV.5. Carte en courbe isoteneur de $(\text{Na}+\text{K})$ [mg/l].	57
Figure IV.6. Carte en courbe isoteneur de Cl^- [mg/l].	58
Figure IV.7. Carte en courbe isoteneur de SO_4^{2-} [mg/l].	59
Figure IV.8. Carte en courbe isoteneur de HCO_3^- [mg/l].	60
Figure IV.9. Carte en courbe isoteneur de NO_3^- [mg/l].	61
Figure IV.10. Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff.	65
Figure IV.11. Représentation graphiques des résultats sur le diagramme de Piper	66
Figure IV.12. Représentation graphiques des résultats sur le diagramme de Stiff.	67
Figure IV.13. Corrélation entre $\text{Cl}-\text{Na}$.	73
Figure IV.14. Corrélation entre $\text{Ca}-\text{SO}_4$.	74
Figure IV.15. Corrélation entre $\text{Cl}-\text{Ca}$.	74

Avant Propos

Dédicace

Remerciements

Abréviation

Liste des tableaux

Liste des figures

Table des matières

Résumé

Table Des Matières	Page
INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DE LA REGION DE KENADSA	
I.1. Cadre géographique et morphologique	03
1.1. Situation générale	03
1.2. Situation géographique	03
1.3. Situation de la région de Kenadsa	04
1.4. Situation administrative	05
1.5. La géomorphologie	06
1.6. Aperçu historique du village	07
1.7. Population et activité	07
I.2. Contexte climatologique	08
I.2.1. Introduction	08
I.2.2. Paramètres météorologiques déterminants	08
2.2.1. Pluviométrie	08
2.2.2. La température	10
2.2.3. Le vent	08
2.2.4. Humidité relative	12
2.2.5. Evapotranspiration	13
I.2.3. Etude des indices climatiques	13
2.3.1. Indice d'aridité de DE MARTONNE	13
2.3.2. Indice d'Emberger	14
2.3.4. Indice de Moral	15
2.3.5. Indice de Stewart	15
I.2.4. Le régime thermique	16
2.4.1. Méthode Ombrothermique	16
2.4.2. Méthode d'Euverte	16
I.2.5. Evapotranspiration potentielle (ETP)	17

2.5.1. Calcul de l'ETP par la méthode de THORNTHWAITE	17
2.5.1.1. Estimation de l'E.T.P selon Thornthwaite	17
2.5.1.2. Bilan hydrologique de Thornthwaite	18
I.2.6. L'évapotranspiration réelle (ETR) ou le déficit découlement(D)	18
2.6.1. Formule de L. TURC (1954)	18
2.6.2. Formule de M. COUTAGNE	19
2.6.3. Abaque de WUNDT	19
2.6.4. Abaque de Verdeil	20
I.2.7. Estimation des paramètres du bilan hydrologique	20
2.7.1. Calcul de ruissellement de surface « R »	20
2.7.2. Calcul de l'infiltration I	21
I.3. Conclusion	21
CAPITRE II : CADRE GEOLOGIE	
II.1 Introduction	22
II.2. Cadre géologique régional	22
II.2.1. Le Précambrien	23
II.2.2. Le Paléozoïque	23
2.2.1. Le Cambro-Ordovicien	23
2.2.2. Le Silurien	23
2.2.3. Le Dévonien	23
2.2.4. Le Carbonifère	23
II.2.3 Le Mésozoïque	24
2.3.1 Le Trias	24
2.3.2 Le Jurassique	24
2.3.3 Le Crétacé	24
II.2.4 Le Tertiaire	25
II.2.5 Le Quaternaire	25
II.3. Contexte géologique du site d'étude	25
II.3.1. La Lithostratigraphie	26
3.1.1 Primaire	27
3.1.2 Secondaire ou Mésozoïque	27
II.3.2. La Tectonique	30
3.2.1. Tectonique plicative	30
3.2.2 .Tectonique cassante	30
II.4 Conclusion	31
CHAPITRE III : HYDROGEOLOGIE	
III.1. Introduction	32
III.2. Hydrogéologie régionale	32
2.1. L'aquifère des calcaires du Carbonifère	32
2.2. Aquifère des grès du Carbonifère	33
2.3. Aquifère des calcaires du Turonien	33

2.4. Aquifère des calcaires lacustres de l'Eocène supérieur	34
2.5. Aquifère des formations du Quaternaire	34
2.6. Nappe du Jurassique de Mougheul	34
III.3. La piézométrie régionale	35
III.4. Hydrogéologie	37
4.1. La nappe des grès carbonifères	37
4.1.1. Lithologie des grès carbonifères	37
4.1.2. Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe	38
4.1.3. Potentialité des nappes	38
4.2. Paramètres hydrodynamiques	38
4.3. Types de captage	39
III.5. Base de données	39
5.1. Elaboration de la carte piézométrique	40
5.2. La carte piézométrique de Kenadsa	40
5.3. Interprétation de la carte piézométrique	41
5.4. Calcul du gradient Hydraulique	44
III.6. Conclusion	45
CHAPITRE IV : CONTEXTE HYDROCHIMIE	
IV.1 Introduction	46
IV.2 Paramètres organoleptiques	48
2.1 La couleur	48
2.2. L'odeur	48
2.3. Le goût	48
2.4. La turbidité	48
IV.3 Etude des paramètres physiques	49
3-1 le pH	49
3-2 La Température	49
3-3 La conductivité	51
3.4 La minéralisation	52
3-5 L'alcalinité	52
3-6 La dureté totale	53
IV.4. Etude des paramètres chimique majeurs	54
4.1. Etude des principaux cations et anions	54
A. Les Cations	54
B. Les Anions	57
4.2. Etude des Rapports Caractéristiques	61
4.2.1. Rapport caractéristique : rSO_4^{2-}/rCl^-	62
4.2.2. Rapport caractéristique : rNa^{2+}/rCl^-	62
4.2.3. Rapport caractéristique : rMg^{2+}/rCa^{2+}	62
4.3 Faciès hydrochimiques	63
4.4. Représentation graphique	64
4.4.1. Le diagramme de Schöeller-Berkaloff	64
4.4.2. Diagramme de Piper	66
4.4.3. Diagramme de Stiff	67
4.5. Indice de Saturation	68
4.6. Indice Chloro-Alcalin (ex i.e.b : indice d'échange de bases)	70

IV.5.Traitement statistique des données hydrochimiques	71
5.1. Statistique élémentaire	71
5.2. Matrice de corrélations	71
IV.6. Les Corrélations Caractéristiques	72
6.1. Le couple Na-Cl	72
6.2. Le couple Ca-SO ₄	73
6.3. Le couple Ca-Cl	74
IV.7. Potabilité des eaux étudiées	74
IV.8. Aptitude des eaux à l'irrigation	76
8.1. Calcul des indices de l'eau en vue de leur utilisation agricole	76
8.1. 1. Indice de perméabilité	76
8.1.2. Les Chlorures	77
8.1.3. Nitrates	78
8.1.4. Magnésium Hazard Absorption	78
8.1.5. Kelly's ratio	79
8.1.6. Pourcentage de sodium	80
8.1.7. Sodium Adsorption Ratio « SAR »	81
8.2. Synthèse des résultats de calcul des indices d'irrigation	82
IV.9. Conclusion	83
CONCLUSION GENERALE	84
REFERENCES BIBLIOGRQPHIE	
ANNEXE	

Résumé

La région de Kenadsa, notre zone d'étude, est une oasis paisible dans le Sud-Ouest algérien, elle occupe une superficie de 5040 km² et englobe une population de 14.663 habitants.

Elle est caractérisée par la présence dans son sous-sol d'une importante nappe d'eau qui se trouve dans le Westphalien (système aquifère multicouche à perméabilité élevée). Son eau est sollicitée uniquement pour les usages agricoles et industriels.

Le climat de la région est un climat saharien. Il est caractérisé par une température moyenne élevée (22°C), un faible taux de précipitations (102mm), d'une évaporation importante (268mm), d'un rayonnement solaire excessif et d'un vent souvent présent.

L'étude hydrochimique des différents paramètres, de leurs répartitions spatiales et des principaux faciès et sous-faciès chimiques, nous a renseignés sur l'origine et l'évolution des minéralisations des eaux.

L'état de la qualité des eaux a été apprécié à travers l'étude des paramètres indicateurs de pollution des eaux prélevées.

Mot-clé : Kenadsa – Westphalien – Oasis – Zone Aride – Grès Carbonifères – Pollution.

Abstract

The Kenadsa region, our study area, is a peaceful oasis in South-West Algeria, in a 5040 square kilometers area and 14,663 inhabitants.

It is characterized by the presence within its basement of a large body of water that is in the Westphalia (a very high permeability multilayered aquifer). Its water is used mainly for agricultural and industrial purposes.

The climate of the region is a Saharan climate. It is characterized by a high average temperature (22 °C), low precipitation rate (102mm), a significant evaporation (268mm), excessive sunlight and an often-present wind.

The different parameters hydrochemical study, their spatial distribution and the main chemical facies and sub-facies, allowed us to understand the origin and evolution of water mineralization.

The state of the water quality has been appreciated through the study of parameters indicative of pollution in the water samples.

Keywords: Kenadsa - Westphalian - Oasis - Arid Zone - Carboniferous Sandstone - Pollution.

ملخص

منطقة القنادسة ، منطقة الدراسة لدينا، هي واحة هادئة في الجنوب الغربي الجزائري، تتربع على مساحة 5040 كيلو متر مربع ويبلغ عدد سكانها 14663 نسمة.

ويتميز هذا الوجود في الطابق السفلي لمجموعة كبيرة من المياه التي هي في وستفاليان (نظام متعدد الطبقات) تستند هذه المياه للاستخدامات الزراعية والصناعية.

مناخ المنطقة هو المناخ الصحراوي. ويتميز هذا بمتوسط ارتفاع في درجة الحرارة (22 درجة مئوية)، وانخفاض معدل تساقط الأمطار (102 ميليمتر) وأشعة الشمس المفرطة و الرياح الحاضرة في كثير من الاحيان و تبخر كبير (268 ميليمتر).

الدراسة الكيمائية للمعايير المختلفة، والتوزيع المكاني للوحنة الرئيسية والوحنة الفرعية الكيمائية، والاستفسار عن أصل وتطور تمعدن الماء.

وقد تم تقدير حالة نوعية المياه من خلال دراسة المعايير الإرشادية لتلوث المياه المسحوبة.

كلمات البحث: القنادسة - وستفاليان - الواحة - المنطقة الجافة - الحجر الرملي الكربوني - التلوث

Introduction générale

Les ressources en eau, qu'elles soient superficielles ou souterraines, ont un impact direct sur le développement socio-économique d'une région. Ainsi, il est indispensable avant toute tentative de mobilisation de bien étudier leur contexte hydrogéologique.

La pénurie d'eau concerne une personne sur trois sur tous les continents. La situation s'aggrave sous les effets de la croissance démographique, de l'urbanisation et avec l'utilisation accrue des ressources à des fins domestiques, industrielles et agricoles.

L'eau manque parfois même dans les zones où les précipitations sont abondantes. La façon dont on la conserve, l'utilise et dont elle est distribuée au sein des communautés ainsi que sa qualité peuvent déterminer si la ressource est suffisante pour répondre aux besoins des ménages, des exploitations agricoles, de l'industrie et de l'environnement.

Il apparaît que les problèmes liés à la gestion de l'eau deviennent une préoccupation majeure. Les besoins ne cessent d'augmenter alors que les ressources sont limitées. Ainsi, de nombreuses régions connaissent, dès à présent, des pénuries quantitatives et qualitatives

Le Sahara est connu par la rareté des eaux superficielles est caractérisé par un climat aride et sec. Dans cette dernière, les évolutions culturelles et l'explosion démographique du 20ème siècle ont cependant engendré de graves conséquences sur le fonctionnement et l'équilibre de cet environnement fragile. Si rien n'est entrepris, la ressource en eau et le milieu naturel risquent de se dégrader, ce qui affectera le développement des êtres humains, de la faune et de la flore.

A l'origine des pénuries, on trouve les aléas climatiques, mais également des lacunes dans la gestion des risques et d'exploitation des ressources. Afin d'y remédier, il faut prendre les mesures nécessaires et suffisantes en considérant l'ensemble du système « eau » et ses relations avec les éléments tiers, tels que la disponibilité et la gestion, comme un patrimoine global à sauvegarder pour les générations futures.

La demande en eau dans tels endroits pour les activités humaines, agricoles et industrielles accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, telle que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution. Il est donc essentiel de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité.

Notre zone d'étude connaît divers problèmes d'eau dus à des lacunes de gestion et la méconnaissance des ressources souterraines exploitées.

Pour mieux connaître les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la région de **Kenadsa**, nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne la localisation de la région d'étude et la détermination du bilan hydrologique global selon les données climatiques.

Dans le deuxième chapitre (géologique), nous :

- faisons ressortir les formations susceptibles de constituer des niveaux aquifères ;

INTRODUCTION GENERALE

- définissons leurs étendues et leurs géométries.

Dans le troisième chapitre (étude hydrogéologique) nous présentons une étude piézométrique (avec réalisation d'une carte piézométrique) pour déterminer la circulation des eaux et nous allons tenter d'évaluer l'alimentation en eau de la zone d'étude.

Quatrième chapitre : étude physico-chimique des eaux ; cette partie a pour but de préciser la qualité des eaux et de déterminer les faciès chimiques.

Enfin notre étude s'achèvera par une conclusion générale, où l'ensemble des résultats sera donné.

I.1. Cadre géographique et morphologique

1.1. Situation générale

La région de Béchar se situe dans la partie Nord-Occidentale du Sahara algérien, d'une superficie de 164881 Km², soit environ 6.83 % de la superficie globale du pays. Elle est à environ 1150 km au Sud-ouest de la capitale, 693 Km de la wilaya d'Oran, 852 km de celle de Tindouf et à environ 80 km de l'ouest de la frontière algéro-marocaine.

La wilaya de Béchar compte une population de 279851 habitants en 2009 avec une densité de 1.70 hab/Km² (**D. P. A. T.**). L'immensité du territoire et l'éparpillement des populations sont la cause de la distension entre les localités.

La wilaya de Béchar se situe au Sud-ouest du territoire national. Elle est limitée :

- au Nord par les Wilayat de Naâma et d'El Bayadh.
- et au Sud par les Wilayat de Tindouf et d'Adrar.
- à l'Est par la Wilaya d'Adrar.
- à l'Ouest par le Royaume du Maroc.

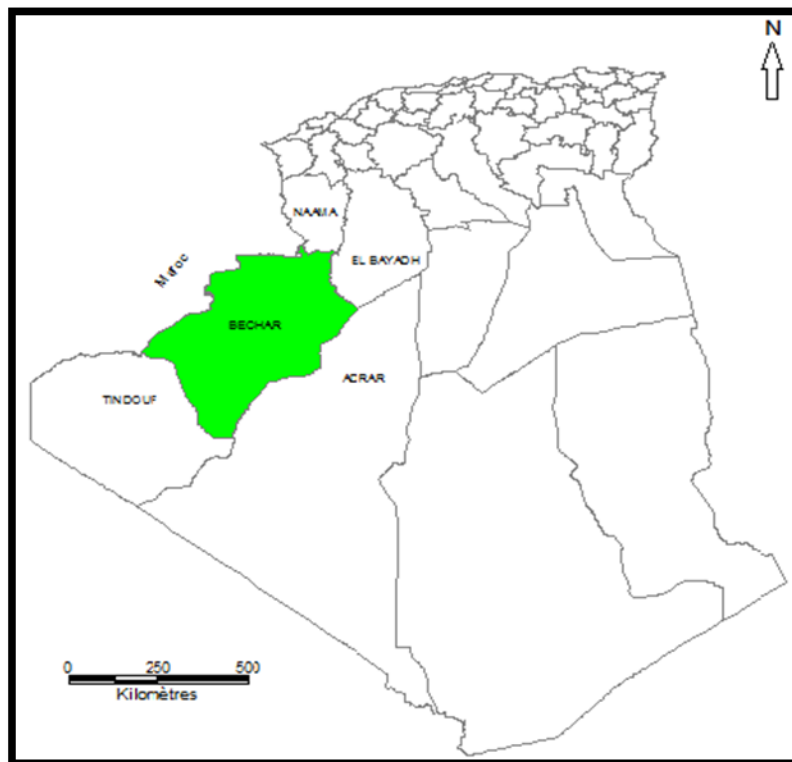


Figure I.1. Carte de la situation de la région de Béchar.

1.2 Situation géographique

La ville de Béchar se situe au pied du revers méridional de l'Atlas saharien. Elle est limitée Au Nord par les massifs septentrionaux (Djebel Antar, 1960m et Djebel Horriet, 1461m) et la hamada d'Oum Sbaâ, au Sud par Chabket Mennouna, à l'Est par Djebel Béchar (1500m) et à l'Ouest par la région de Kenadsa.

La commune de Béchar s'étend sur une superficie de 5050 km² (URBAT, 1999). L'oued Béchar naît dans les versants des Djebel Antar et Horriet et va s'ensabler après 150 Km de parcours à Dhaïet

Tiour, sans atteindre l'Oued Guir. (Idrotechnica, 1979).

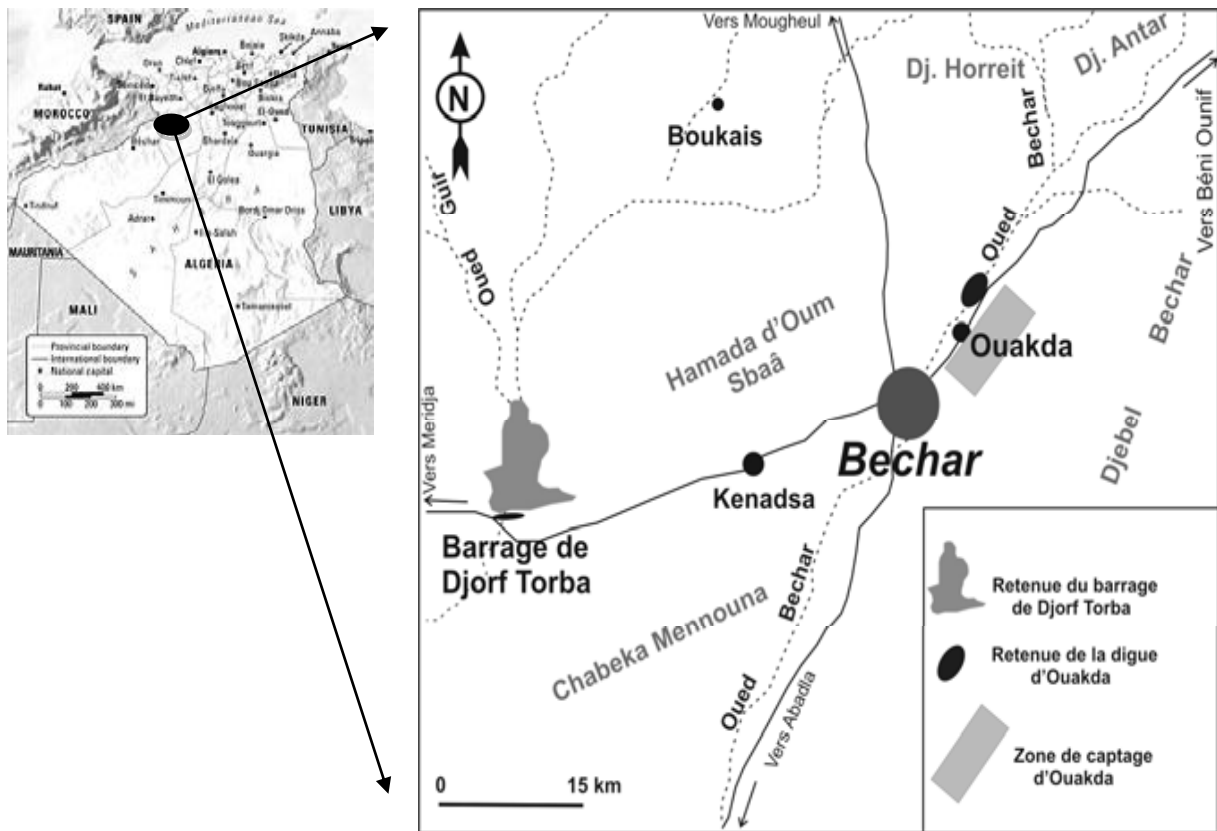


Figure I.2. Situation géographique de la ville de Béchar (SW Algérie)

- la région de Béchar est formée de cinq (5) principaux reliefs (**figure I.3. et I.4.**) :
 - Les montagnes : elles sont dénudées et parfois élevées.
Citons : Le Djebel Antar (1953 m), le Djebel Grouz (1835m) et le Djebel Béchar (1206 m).
 - Les Oueds : six principaux oueds sillonnent la wilaya. Du Nord au Sud on rencontre : l'Oued Namous, l'Oued Zouzfana, l'Oued Béchar, l'Oued Guir, l'Oued Saoura et l'Oued Daoura.
 - Les vallées : ce sont des dépressions façonnées par les cours d'eau importants. Les principales sont celles de la Zouzfana, du Guir et de la Saoura.
 - Les Regs (Hamada) : ce sont de vastes étendues rocailleuses. Les plus importantes sont celles du Guir et Daoura.
 - Les Ergs : ils représentent des massifs dunaires pouvant atteindre jusqu'à 300 m de hauteur. Ils portent le nom de Grand Erg Occidental et d'Erg Iguidi.

1.3. Situation de la région de Kenadsa

Kenadsa est une oasis paisible dans le Sud-Ouest algérien (Figure I.1.), avec la découverte et l'exploitation du charbon (de 1917 à 1956), elle a subi la greffe de modèles occidentaux pour son développement. Ceci a oblitéré de son espace la dimension oasienne et l'a transformée en un village minier par excellence.

CHPITRE I - PRESENTATION GENERALE DE LA REGION DE KENADSA

La région d'étude, en occurrence village de Kenadsa se situe à l'ouest du chef-lieu de la wilaya, à une vingtaine de km (Figure I.2.). Cette région est délimitée arbitrairement entre les longitudes $2^{\circ}22'24''$ et $2^{\circ}28'36''$ W et les latitudes $31^{\circ}31'33''$ et $31^{\circ}33'30''$ N. (Figure I.3.).

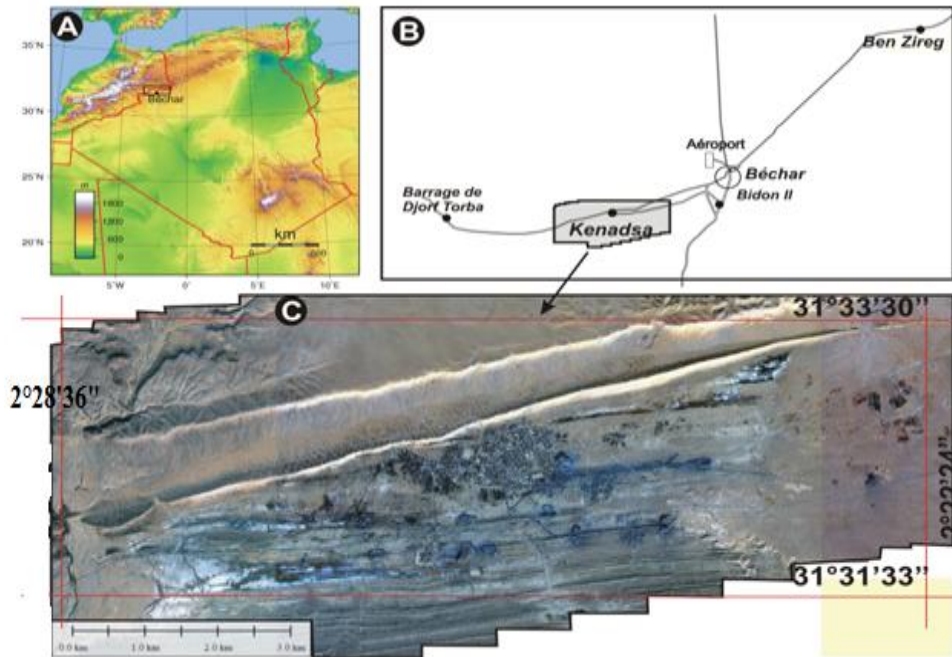


Figure I.3. Situation du village de Kenadsa (Land SAT 2013).

Ces limites géographiques approximatives sont consignées sur la Figure I.2.:

- Au Nord, la Barga de Sidi M'hammed Ben Bouziane
- Au Sud la Chabket Mennouna
- A l'Est, la zone des intermédiaires
- A l'Ouest, l'oued de Messour El Aatchane

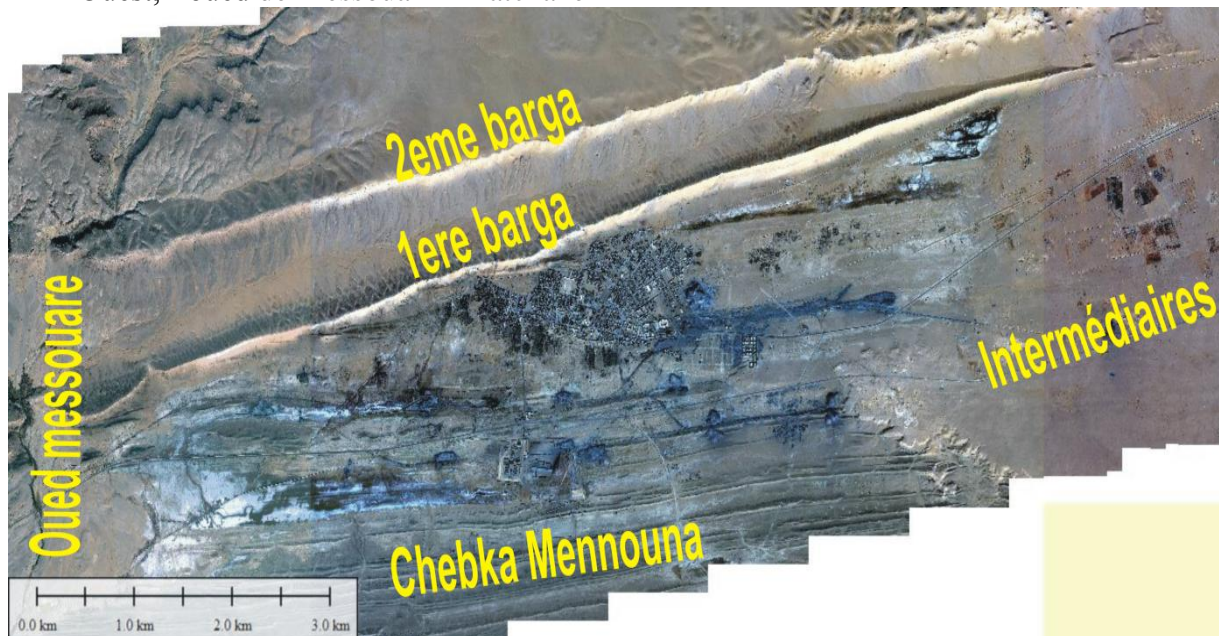


Figure I.4. Limite géographique du village Kenadsa (LandSAT 2013)

1.4. Situation administrative

De point de vue administratif, la région d'étude appartient à la commune de Kenadsa. Cette dernière fait partie des partages administratifs de la wilaya de Béchar.

Les communes limitrophes de Kenadsa sont illustrées dans la Figure I.3.

- au Nord : Commune de Boukais et Lahmar
- à l'Est : Commune de Béchar
- au Sud : Commune de Abadla
- à l'Ouest : Commune de Mridja à l'Ouest

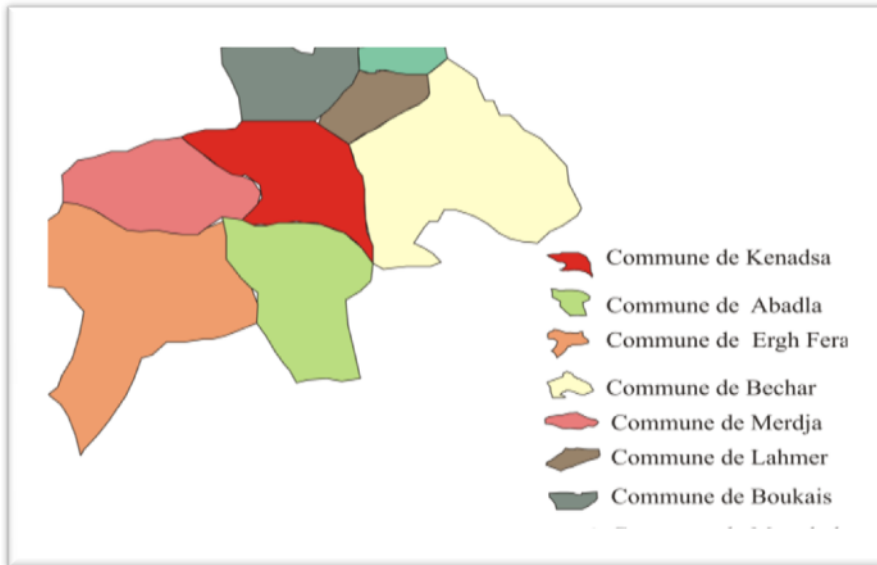


Figure I.5. Situation administrative de Kenadsa

1.5. La géomorphologie

La région de Kenadsa est de loin de former une seule unité morphologique, au contraire, elle comprend plusieurs unités morphologiques, ce qui reflète la nature de substrat et les formes structurales. Pour mieux apprécier ces unités morphologiques, on fait appel au modèle numérique de terrain MNT de la feuille 31°W003 et au logiciel Global Mapper dans sa version 11.

Effectivement, l'exploitation de ces données se traduit en cartes mettant en reliefs le paysage

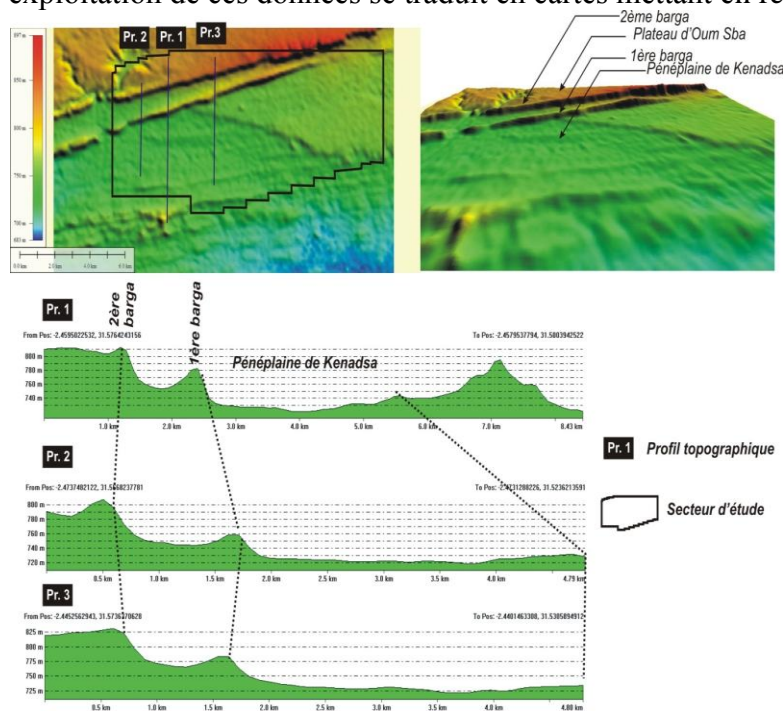


Figure I.6. Unités géomorphologiques (Global Mapper)

CHPITRE I - PRESENTATION GENERALE DE LA REGION DE KENADSA

Les cartes en 2D et en 3D exhibent fidèlement la morphologie de la région de Kenadsa.

Les trois profils topographiques donnent des appréciations altimétriques.

Au final, on distingue quatre unités géomorphologiques, comme illustré ci-dessous (figure I.7.)

1- Pénéplaine de Kenadsa d'altitude variant de 725m à 740m, le village est pratiquement construit au sein de cette pénégplaine.

2- La 1^{ère} Barga étroite bande de reliefs, allongée Est-West. Les altitudes de ces reliefs varient de 760m à 780m.

3- la 2^{ème} Barga d'altitude est similaire à la précédente, mais son revers Nord donne naissance à un plateau d'altitude 800m, dit plateau d'Oum Sbaâ. Cette Barga a une altitude qui varie autour de 800m.

4- la dépression entre les deux Bargas, étroite et allongée E-W, est aménagée entre les deux reliefs. Son altitude tourne au tour de 750m.

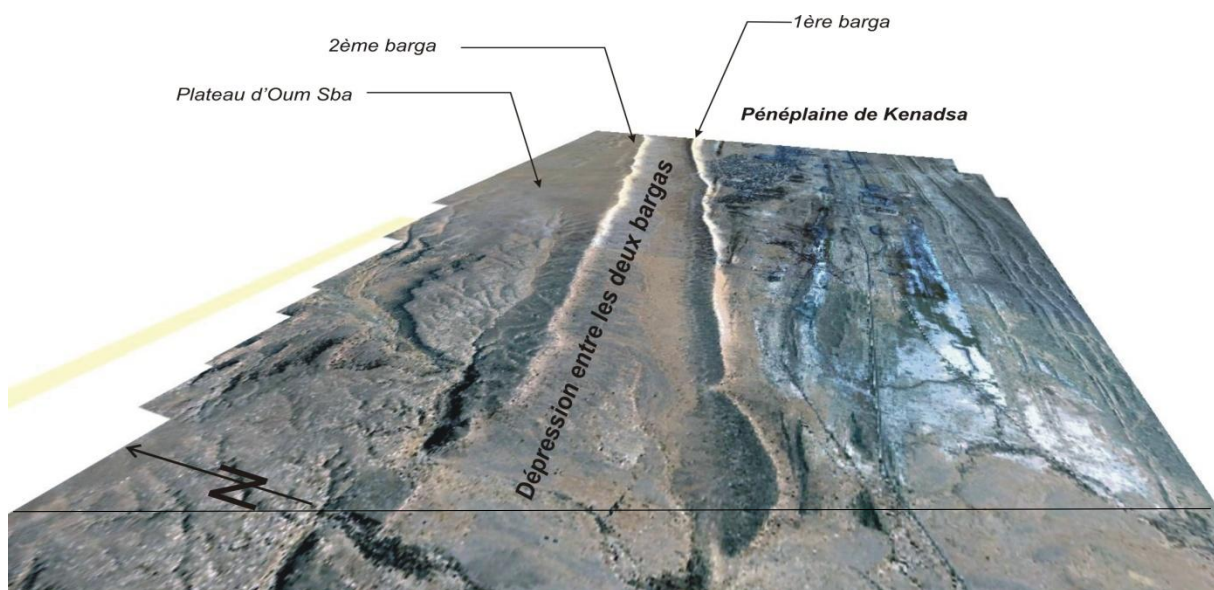


Figure I.7. Image Satellitaire en 3D de la région de Kenadsa.

1.6. Aperçu historique du village

Malgré la place privilégiée de Kenadsa, on a peu de travaux sur son historique. On trouve quelques précieuses indications historiques, d'autres informations sont aussi citées dans les travaux de Deleau (1962, 1960).

Par ce paragraphe nous n'avons pas l'ambition de retracer en détail l'historique du village de Kenadsa, néanmoins on s'arrête sur quelques étapes essentielles

- **Avant 1903** : Kenadsa était une oasis et tout gravitait autour de la Zaouïa

- **Période coloniale** : la découverte du charbon a transformé l'oasis en village minier. En 1945 c'était l'épanouissement du village de Kenadsa.

- **Après 1962**, on assiste au déclin de l'exploitation du charbon et Kenadsa devient un village dortoir.

1.7. Population et activité

La population de Kenadsa est estimée à 14663 hab au 01-01-2011 pour une superficie de 5040km², avec un taux de croissance 4,93% et une densité de 2.9 hab/km². Comme déjà évoqué, Kenadsa joue un rôle dortoir par conséquent les activités socio-économiques sont assez limitées, quelques personnes exercent la fonction d'agriculteur sur quelques 65000 Ha (DPAT, 2009).

I.2. Contexte climatologique :

I.2.1. Introduction :

Le Sahara algérien se caractérise par des variations climatiques importantes. L'aridité constitue l'élément central de la spécificité saharienne, elle se définit comme étant le résultat de la combinaison d'une faiblesse de précipitations et l'intensité des phénomènes d'évaporation liés aux fortes températures.

Le climat de la zone d'étude est donné d'après les informations recueillies à partir de la station météorologique de Béchar. L'analyse des différents paramètres climatologiques (P, T°C, ETP, vitesse du vent, etc.) précise le climat qui caractérise la région.

Tenant compte du manque de stations climatiques dans la région d'étude, il a été jugé utile de choisir la station la plus proche. En effet, la station de Béchar est la plus proche et elle se trouve presque sur la même latitude.

Tableau I.1. Caractéristiques de la station climatique.

Station	Latitudes	Longitudes	Altitudes en m	X (km)	Y (km)	Série	Paramètres relevés
Béchar	31°35'53N	02°13'32W	774	802,15	116	2003-2014	Pluviométrie Température

(ONM, Béchar)

I.2.2. Paramètres météorologiques déterminants

Pour cette étude, nous avons utilisé les données enregistrées à la station météorologique de Béchar (données recueillies par l'ANRH et l'ONM de Béchar). Les données climatiques sont :

- Les précipitations : pour l'étude de la pluviométrie nous n'avons disposé que des données de la station de Béchar (à 15km de Kenadsa) sur une période de 2003 à 2014.
- Les températures : nous utiliserons les données de la même station pour la même période.

2.2.1. Pluviométrie :

Nous engloberons, sous le terme de précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la terre. Ce paramètre météorologique constitue la composante fondamentale de l'hydroclimatologie et la connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour estimer les réserves en eau du sol et la recharge des nappes souterraines.

A- Variation spatiale

A.1. Répartitions annuelles des précipitations (figure I.8.)

La carte pluviométrique du Sahara Nord-Occidental (DUBIEF, 1963) montre une répartition géographique des précipitations caractérisée par une décroissance de la pluviométrie du Nord vers le Sud et de l'Est vers l'Ouest. La pluviométrie est influencée par l'altitude dans les zones de reliefs élevés.

La pluviométrie varie de 100 mm jusqu'à 20 mm dans l'Atlas saharien, pour notre région d'étude la pluviométrie s'étale entre 50 mm et atteint les 100 mm sur les hauts reliefs.

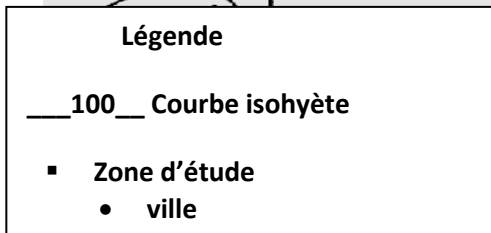
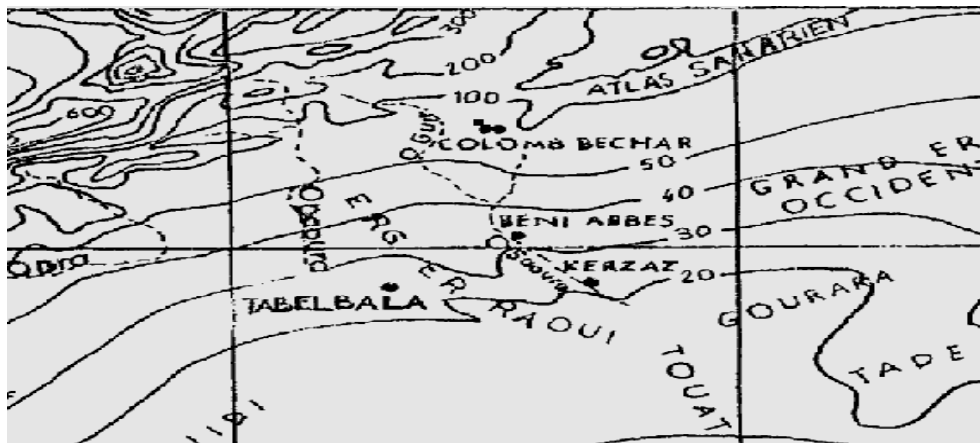


Figure I.8. Carte pluviométrique de Sahara Nord-Occidental. (Dubief, 1963)

B-Variations Temporelles

B.1. Variations Annuelles

Tableau I.2. Pluviométrie annuelles à la station de Béchar série (2003/2014).

Année	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008
pluie (mm)	33,6	65,1	85,2	65,6	130,6	105,8
Année	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014
Pluie (mm)	312,6	99,1	69,7	112,1	103,8	38,1

(ANRH - BECHAR)

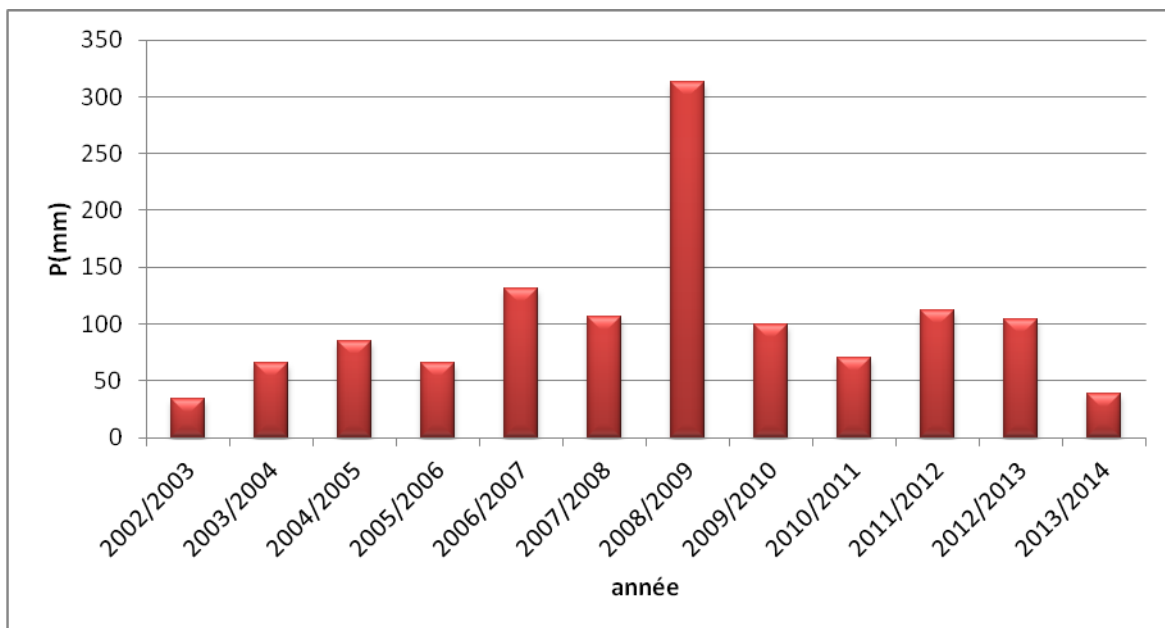


Figure I.9. Variations des précipitations annuelles en (mm).

Dans la Figure I.9. On remarque que l'année la plus pluvieuse est l'année (2008/2009) avec une valeur maximale de **312.6 mm** et une valeur minimale de **33.6 mm** pour l'année (2002/2003), ainsi que l'année (2006/2007) montre une valeur excédentaire avec (**130.6mm**)

B.2. Répartitions moyennes mensuelles des précipitations

Tableau I.3. Précipitation mensuelle moyenne à la station de Béchar (2003-2014).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Moy
Pluie (mm)	14,4	27,9	11,1	6,0	6,0	6,8	102
Mois	Mar	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy
Pluie (mm)	10,8	4,9	5,2	4,2	1,6	3,05	102

ANRH - BECHAR

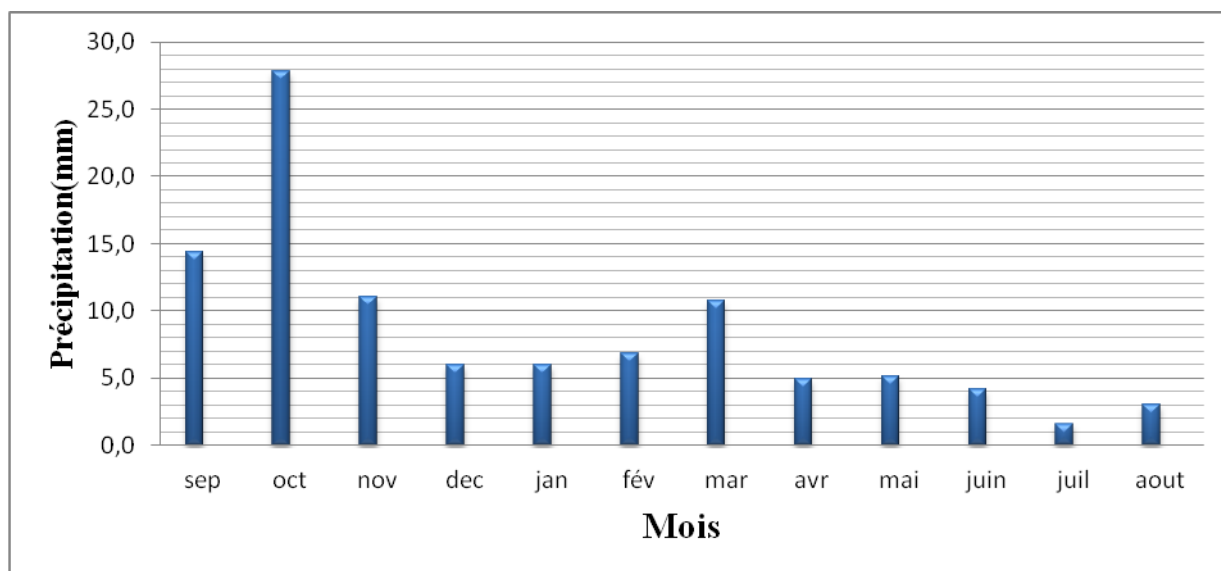


Figure I.10. Variation des précipitations moyennes mensuelles.

On voit bien que la valeur, des précipitations enregistrées, est au maximum (**27.9mm**) au mois d'octobre et au minimum (**1.6 mm**) au mois de juillet. Cette région d'étude est caractérisée par deux périodes bien distinctes. La période la plus longue est exprimée de Septembre à Mai, c'est-à-dire celle relativement pluvieuse, tandis que la période la plus courte (période sèche) c'est le reste de l'année.

2.2.2. La température

La température est un facteur fondamental, elle varie généralement en fonction de l'altitude. Ce facteur devient plus important quand il est en interaction avec d'autres facteurs climatiques.

Tableau I.4. Températures moyennes mensuelles et annuelles (min, max, moy).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Moy
T °C Min	25,1	18,9	12,3	8,8	7,4	8,9	15,6	18,7	22,2	29,5	34,2	32,9	19,5
T °C Max	30,8	24,5	16,6	13,2	11,6	14,6	19,4	23,5	28,6	33,6	35,8	34,7	23,9
T °C Moy	28,0	21,7	14,5	11,0	9,5	11,8	17,5	21,1	25,4	31,6	35,0	33,8	21,7

(ONM, Béchar)

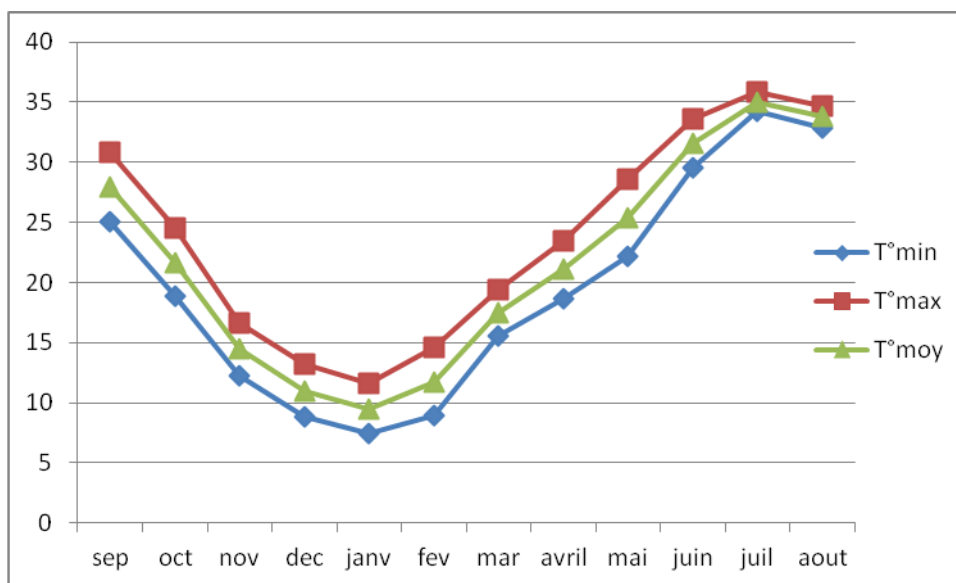


Figure I.11. Courbe des Températures moyennes mensuelles.

On remarque que :

- Les températures maximales présentent un minimum en janvier avec **11.6°C** et un maximum en juillet avec **35.8°C**.
- Les températures minimales présentent un minimum en janvier avec **7.4°C** et un maximum en juillet avec **34.2°C**.
- Les températures moyennes présentent un minimum en janvier avec **9.8°C** et un maximum en juillet avec **35.1°C**.
- les températures estivales sont très élevées, variant entre **34.2 et 35.8°C**. Le maximum se situe en Juillet. Pour la température hivernale, elle varie entre **7.4 et 11.6°C**. Le mois de Janvier est le mois le plus froid. C'est-à-dire que la région de Kenadsa a un hiver froid et court et un été chaud et long.

2.2.3. Le vent

Nous pouvons dire que le vent est un paramètre climatique irrégulier dans la région de Kenadsa. Il est déterminé par sa direction et sa vitesse. (tableau I.5.)

Tableau I.5. Vitesse moyenne mensuelle du vent

Classe en %	Direction							
	Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest
0 < V < 5 m/s	6	7	8	5	9	7	3	3
5 < V < 10 m/s	4	2	4	3	3	3	1	1
10 < V < 15 m/s	1	0	1	0	0	1	0	0
V > 15 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0
Fréquence (%)	11	9	13	8	12	11	4	4

(O.N.M.Béchar)

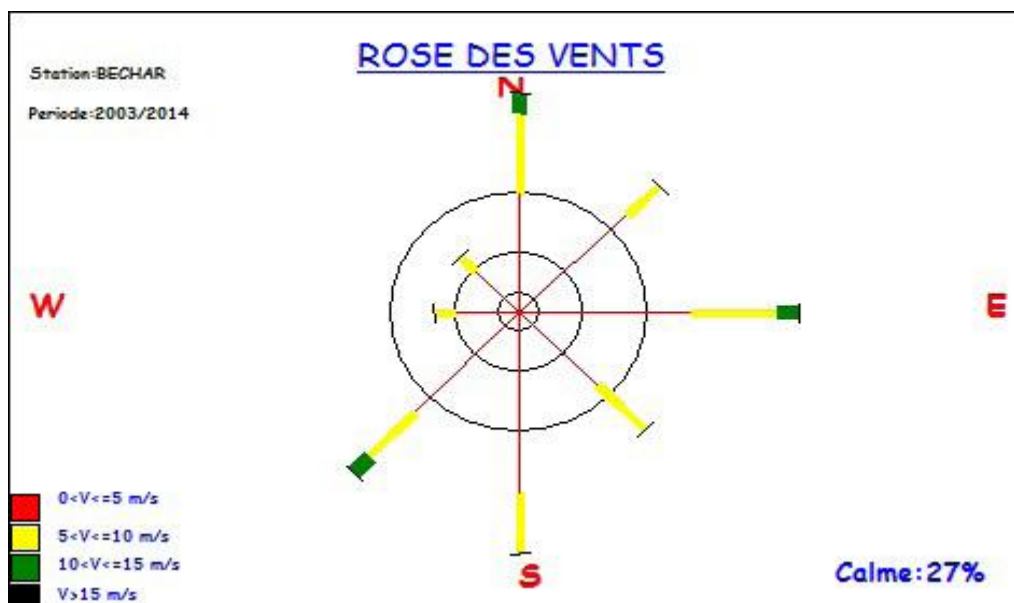


Figure I.12. Rose des vents.

La direction des vitesses des vents de la région d'étude montre que les vents de l'Est sont les plus dominants avec une fréquence équivalente à 13% (Figure I.10.). La fréquence de la direction Sud est de 12%.

2.2.4. Humidité relative

L'humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie), correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport changera si on change la température ou la pression ou les deux.

Tableau I.6. Les humidités relatives moyennes mensuelles de Kenadsa (2003-2014).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Janv.	Fév.	Mars	avril	mai	juin	Juil.	Aout	Moy.
H (%)	52,9	62,7	73	80,9	75,6	70,3	57,7	51,2	45,4	39,7	29,7	34,1	56.1

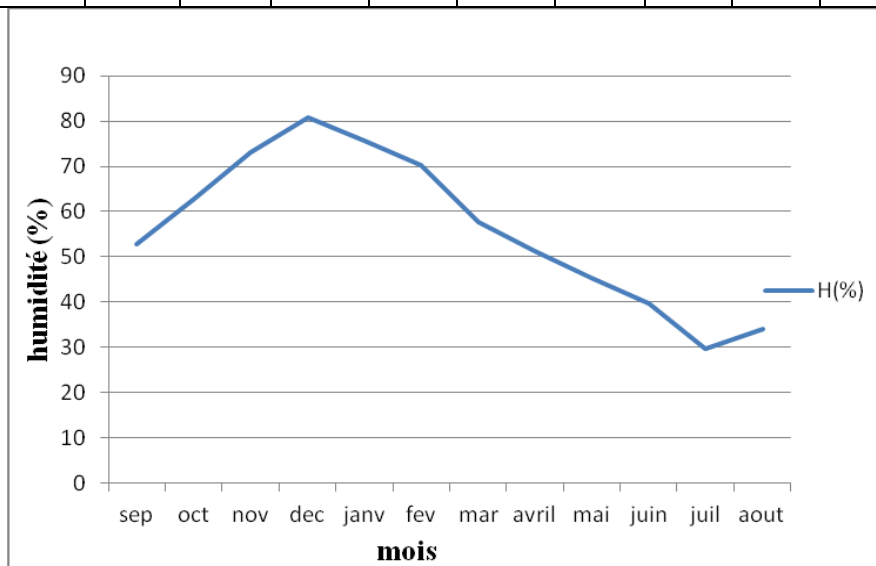


Figure I.13. Courbe des humidités relatives moyennes mensuelles en % de Kenadsa (2003-2014).

D'après la **figure I.13**. On remarque que l'humidité relative atteint sa valeur maximale au mois de décembre avec une moyenne de **80.9%**, et une valeur minimale de **29.7%** au mois de juillet, pour la région de Kenadsa on peut dire que la moyenne annuelle est de **56.1%**.

Juillet est le mois le plus sec par contre le mois de janvier et le mois de décembre sont les mois les plus humides.

2.2.5. Evapotranspiration

Ce terme est composé de :

- **L'évaporation** : désigne l'ensemble des phénomènes qui transforment l'eau en vapeur par un processus spécifiquement physique.
- **La transpiration** : est un phénomène biologique lié à la couverture végétale où les plantes qui puisent une partie de l'eau nécessaire à leur développement dans le sol.

En ce qui concerne l'évapotranspiration, c'est la somme de toutes les pertes par transformation de l'eau en vapeur.

Tableau I.7. Les moyennes mensuelles de l'évaporation.

Mois	Sep	Oct.	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy
Evap. (mm)	306,3	219,2	126,3	92,4	105,9	137	227,1	287	358,8	408,8	497,2	444,1	267.6

(ONM de Béchar)

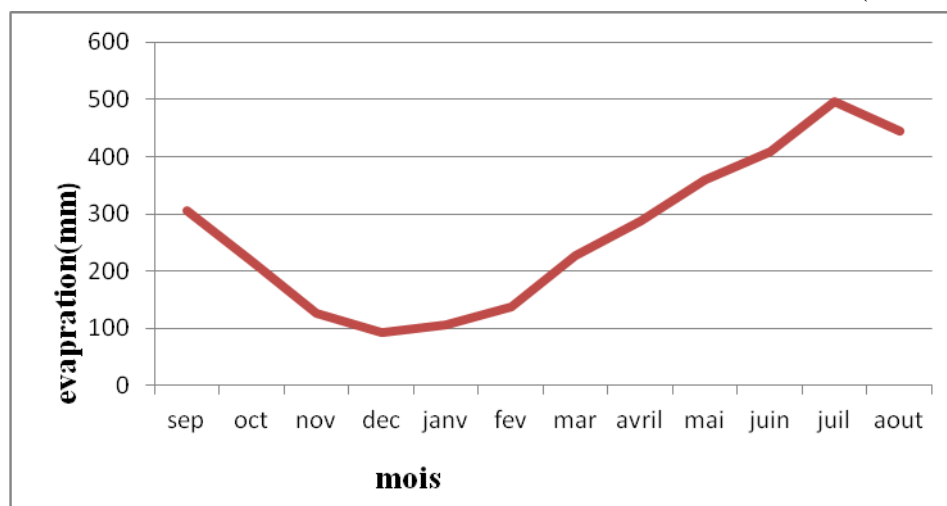


Figure I.14. Variation mensuelle de l'évaporation période

L'évaporation est très élevée à cause de la forte température ; elle atteint **92.4mm** au mois de janvier et **497.2 mm** au mois juin, la moyenne mensuelle de l'évaporation c'est **267,6 mm**.

I.2.3. Etude des indices climatiques

Les températures et les précipitations constituent les éléments majeurs qui régissent le climat d'une région. Pour déterminer le climat dominant de la zone d'étude, quelques indices et diagrammes ont été pris en considération.

2.3.1 Indice d'aridité de DE MARTONNE

En 1925, un indice d'aridité a été défini par le géographe De Martonne, en se basant sur les températures et les précipitations selon la relation suivante :

$$I = P / T + 10$$

Avec P les précipitations moyennes annuelles en mm et T : la température moyenne annuelle en °C

Pour la zone d'étude $P= 101.8\text{mm}$ et $T=21,9^{\circ}\text{C}$, l'indice d'aridité est donc :
 Selon De Martonne si :

$$I = 101.8 / 21.9 + 10 = 3.2$$

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

Selon les calculs de De Martonne, avec un indice de **3.2**, la région d'étude a un climat hyperaride car $I < 5$, (**Figure I.15**).

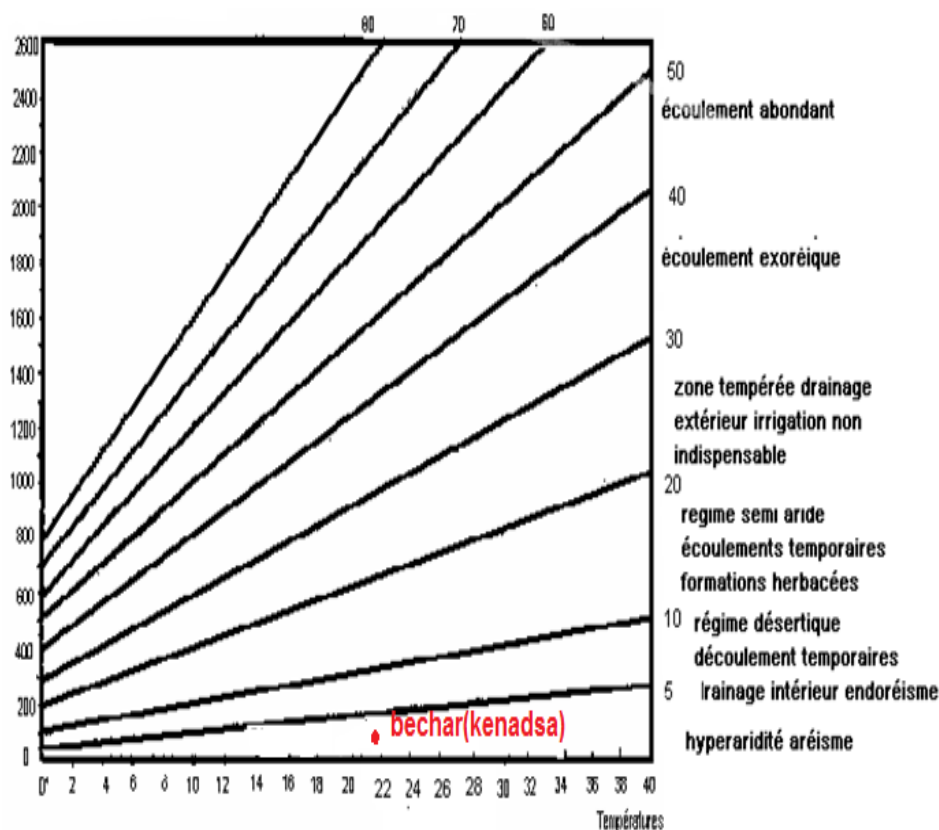


Figure I.15. Diagramme d'indice d'aridité (De Martonne, 1925).

2.3.2 Indice d'Emberger

Cet indice permet de déterminer l'étage bioclimatique de la zone étudiée, deux paramètres sont pris en considération :

- la pluviométrie moyenne annuelle (P) ;
- la température : la moyenne des maxima du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minima du mois le plus froid (m).

La formule d'Emberger est la suivante :

$$Q = 2000 P / (M^2 - m^2)$$

Q : Quotient pluviométrique d'Emberger.

$$Q=12.2$$

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

$$M = 35.8^{\circ}\text{C} + 273.15 = 308.95^{\circ}\text{K}$$

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

$$m = 7.4^{\circ}\text{C} + 273.15 = 280.55^{\circ}\text{K}$$

P : Précipitations moyennes annuelles en mm : P = 102 mm.

La température moyenne des minima de la saison froide est de 7.4°C. Après report des coordonnées (7.4, 12.2). Le point obtenu caractérise bien un climat saharien à hiver chaud (Figure I.12.).

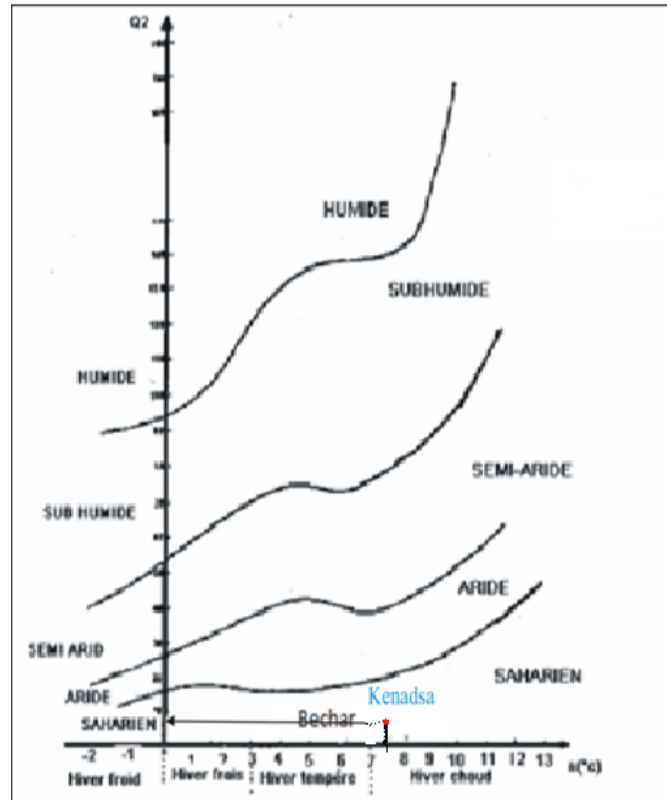


Figure I.16. Position de la région de Kenadsa dans le diagramme d'Emberger.

La station de Béchar est caractérisée par :

- Un climat Saharien (hyper- aride) défini bien par l'indice de De Martonne, ainsi que par le diagramme de L. Emberger.

2.3.4. Indice de Moral

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en °C. Cet indice donne si $I_M < 1$ un climat sec et si $I_M > 1$ on a climat humide.

$$IM = \frac{P}{(T2 - 10T + 200)}$$

Pour : P = 102 mm, T = 21.9 °C. Ce qui donne $I_M = 0.24 < 1$

On peut dire que le climat de **Béchar** est **sec**.

2.3.5. Indice de Stewart

Il est exprimé par le rapport : $Q = 3.43 P / (M + m)$

Où :

P : Moyenne des précipitations annuelles.

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud.

m : Moyenne des températures du mois le plus froid.

D'où :

$$Q = 0.59$$

Le coefficient égal à **0.59** calculé par la méthode de Stewart classe la région de Kenadsa dans l'étage bioclimatique aride à hiver saharien.

I.2.4. Le régime thermique

2.4.1. Méthode Ombrothermique

Pour limiter les périodes sèches et humides, Gaussen et Bagnouls utilisent les températures et les précipitations sur une échelle double. Ils ont défini l'année sèche par la comparaison entre le total des précipitations de cette année en mm et le double de sa température moyenne en °C.

Selon la définition de GAUSSEN et BAGNOULS, une période sèche est une période pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures au double de la température du même mois. $P \leq 2T$

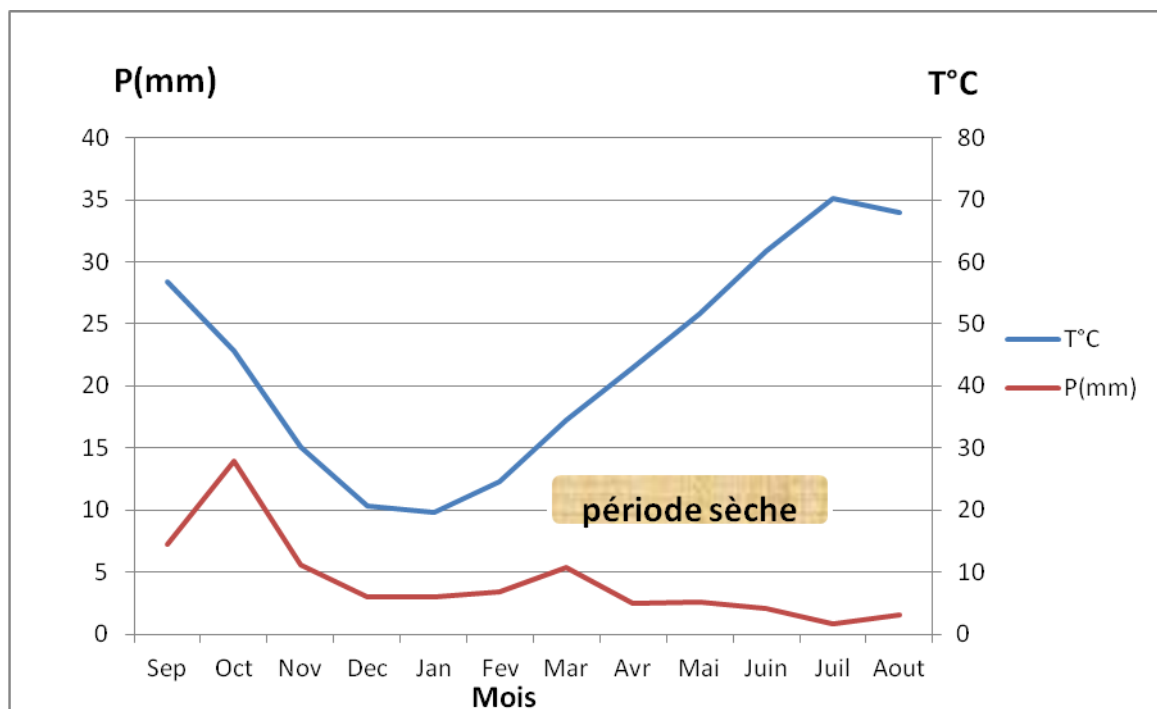


Figure I.17. Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls

Le diagramme de Gaussen et Bagnouls (**figure I.17.**) confirme, que la région d'étude est caractérisée par une période sèche durant toute l'année.

2.4.2. Méthode d'Euverte

A partir des températures et précipitations établies mensuellement, cette méthode renseigne sur l'évolution de l'humidité du sol qui est donnée par le rapport (P/T), qui permet de définir quatre types de régimes :

- Un régime très sec : $P/T < 1$
- Un régime sec : $1 < P/T < 2$
- Un régime subhumide : $2 < P/T < 3$
- Un régime humide : $P/T > 3$

Tableau I.8. Relation température –précipitation.

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
(T°C)	28,4	22,8	15,1	10,3	9,8	12,3	17,2	21,5	25,8	30,9	35,1	34
P (mm)	14,4	27,9	11,1	6,0	6,0	6,8	10,8	4,9	5,2	4,2	1,6	3,05
P/T	0,51	1,22	0,74	0,58	0,61	0,55	0,63	0,23	0,20	0,14	0,05	0,09
Régime	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec	Très sec

D'après les valeurs de P/T, on déduit que la sécheresse caractérise la région de Kenadsa.

I.2.5. Evapotranspiration potentielle (ETP)

2.5.1. Calcul de l'ETP par la méthode de THORNTHWAITE

L'agronome américain G.W. Thornthwaite proposa en 1948 une expression pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle en tenant compte seulement de la température mensuelle.

Le développement de cette expression donne la formule suivante : $ETP = 1.6 \times (10.T/I)^a \times K$

2.5.1.1. Estimation de l'E.T.P selon Thornthwaite

Les études faites par THORNTHWAITE ont abouti à l'établissement d'une formule qui tient compte de l'élément climatique majeur : la température.

$$ETP (mm) = 1.6 (10 T/ I) a$$

Où : ETP : évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau); T : température

moyenne mensuelle en °C, I : indice thermique annuel égal à $I = \sum_i^{12} i$, i : indice thermique

mensuel $i = (T/5)^{1.514}$, a : exposant climatique égal à, cet indice est simplifié par L. Sarra en 1954 : $a = I \times [1,6/100] + 0,5$

Les valeurs de ETP trouvées par cette formule devraient être corrigées selon un facteur de correction K :

$ETP_{corrigée} = ETP \cdot K$ où K est un facteur de correction qui dépend de la latitude et la durée d'ensoleillement ou coefficient d'ajustement mensuel.

Tableau I.9. Les résultats de calcul de l'ETP mensuelle par cette formule.

Mois	P	T	I	ETP (non corrigée) en mm	K	ETP (corrigée) mm
Sep.	14,4	28,4	8,60	148,8	1.03	153,2
Oct.	27,9	22,8	6,90	135,3	0.98	132,6
Nov.	11,1	15,1	4,57	118,8	0.89	105,7
Dec	6	10,3	3,12	109,5	0.88	96,3
Jan.	6	9,8	2,97	108,6	0.90	97,7
Fev.	6,8	12,3	3,72	113,3	0.87	98,5
Mars	10,8	17,2	5,21	123,1	1.03	126,7
Avr.	4,9	21,5	6,51	132,4	1.08	142,9
Mai	5,2	25,8	7,81	142,4	1.18	168,0
Juin	4,2	30,9	9,36	155,2	1.18	183,1
Juil.	1,6	35,1	10,63	166,7	1.20	200,0
Aout	3,05	34	10,30	163,6	1.14	186,5
Année	102	21,9	79,70	1617,3	/	1691,4

$$I = 79.70 \text{ et } a = 1.78$$

2.5.1.2. Bilan hydrologique de Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite consiste à dresser un **tableau. I.10** où sont représentés les éléments du bilan hydrologique. Ces paramètres sont les suivants :

P : précipitation moyenne et mensuelle (mm).

T : Température moyenne mensuelle (°C).

ETP : évapotranspiration potentielle corrigée (mm).

Ce principe de calcul est basé sur deux cas :

- Premier cas : Si $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

- Deuxième cas : Si $P < ETP$

- si $P_i + RFU_{i+1} > ETP \rightarrow ETR = ETP$.
- si $P_i + RFU_{i-1} < ETP \rightarrow ETR = P_i + RFU_{i-1}$

Pour calculer l'ETR deux cas sont considérés :

- Si les précipitations du mois sont supérieures à l'ETP ; l'ETR est égale à l'ETP et on a alors un excédant en eau ;

- Si les précipitations du mois sont inférieurs à l'ETP le sol restitue l'eau emmagasinée jusqu'à l'épuisement des réserves. Cette réserve se calcule par la formule de ALERTE, le stock épuisé, $ETR=P$. comme $ETR > P$.

Tableau I.10. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite. (2003-2014).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
P(mm)	14,4	27,9	11,1	6,0	6,0	6,8	10,8	4,9	5,2	4,2	1,6	3,05	102
ETP	153.2	132.6	105.7	96.3	97.7	98.5	126.7	142.9	168	183.1	200	186.5	1691.5
Variation de RFU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	/

Etant donné qu'on est dans une région désertique, il est inutile de continuer le calcul du bilan hydrologique. Pour ces régions les températures, l'évaporation sont élevées et les précipitation sont assez faible, d'où l'impossibilité d'avoir des réserves ou des écoulements de tous types.

I.2.6. L'évapotranspiration réelle (ETR) ou le déficit découlement(D)

Elle est la perte d'eau qui se manifeste dans les conditions réelles dans un site donné, en fonction de la demande climatique de l'air et de la disponibilité en eau dans le sol. Pour l'estimation de l'ETR, il existe plusieurs formules empiriques qui permettent d'obtenir les valeurs approximatives de ce paramètre. Parmi la gamme des formules, celle de Turc et de Coutagne.

C'est la quantité d'eau évaporée ou transpirée selon les influences climatiques réelles et de la disponibilité des réserves d'eau (surface libre -sol- végétation)

Pour l'estimation de L'ETR plusieurs formules et abaqes ont été établies , toutes basées sur les précipitations et les températures. Il s'agit de la formule de Turc, la formule de Coutagne, l'Abaque de Wundt et l'Abaque de Verdeil.

2.6.1. Formule de L. TURC (1954)

L. Turc est arrivé à établir une formule après des études faite sur 254 bassins versants. La formule de TURC est applicable à tous les climats, elle est en fonction des précipitations et de température moyenne annuelle.

$$ETR = P / (0.9 + (P^2 / L^2))^{1/2}$$

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

Avec : $L=1372,7$
 T : température moyenne annuelle de l'air en (°C) (T=21,9°C).
 P : précipitation moyenne annuelle en (mm) (P= 102 mm).
 *

2.6.2. Formule de M. COUTAGNE

$$\text{ETR} = De = P - \lambda P^2 \quad \text{où} \quad \lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

Avec :

De : le déficit d'écoulement en m/an.

P : précipitations moyennes annuelles en mètre (P= 0.10m).

T : température moyenne annuelle en °C (T=21,9°C).

λ : désigne un facteur dépendant de la température moyenne annuelle.

La formule de Coutagne n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante : $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$

Avec : $\lambda = 0.26$, $1/8\lambda = 0.48$, $1/2\lambda = 1.93$ Donc, la formule de Coutagne n'est pas applicable car la valeur de P n'est pas comprise entre $1/8\lambda$ et $1/2\lambda$, donc elle est inadapté à ce type du climat.

2.6.3. Abaque de WUNDT (figure I.18.)

L'abaque de Wundt modifié par Coutagne permet de déduire la valeur de L'ETR en prenant en considération la température moyenne annuelle (T° C) et la précipitation moyenne annuelle (P mm). p= 102 mm et T= 21.9

Après projection graphique L'ETR est de 133.3mm.

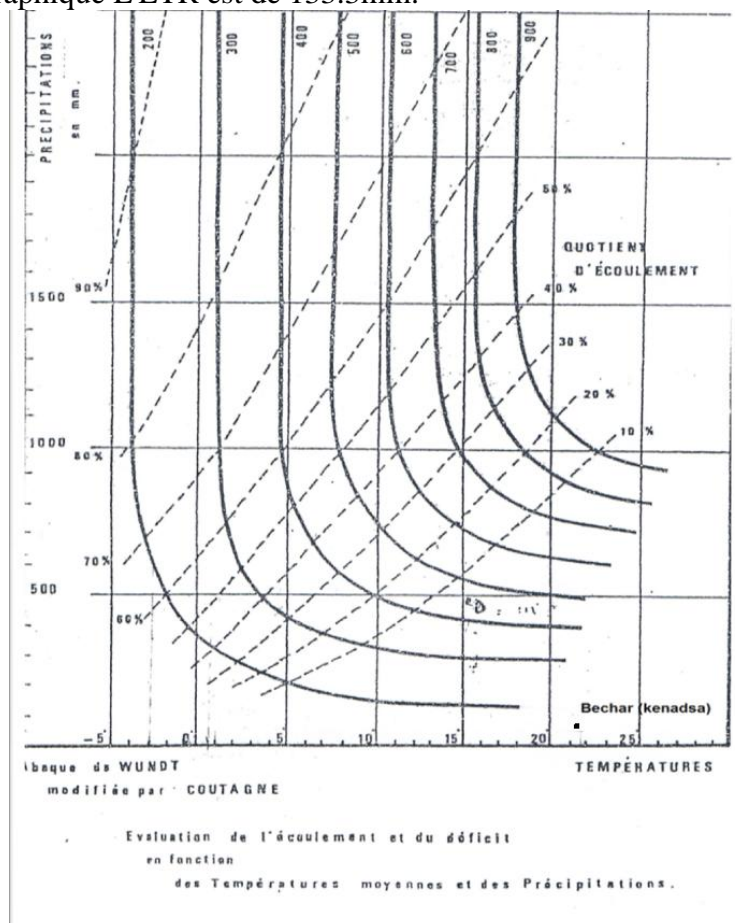


Figure I.18. Abaque de Wundt pour le calcul de l'ETR (modifié par Coutagne)

2.6.4. Abaque de Verdeil (figure I.19.)

Etabli en 1988 pour la région aride l'abaque bi-logarithmique de Verdeil, permet de calculer l'ETR en prenant en considération seulement les précipitations annuelles.

Pour la station de Béchar (Kenadsa) : p= 102 mm après projection graphique cela donne ETR =104 mm

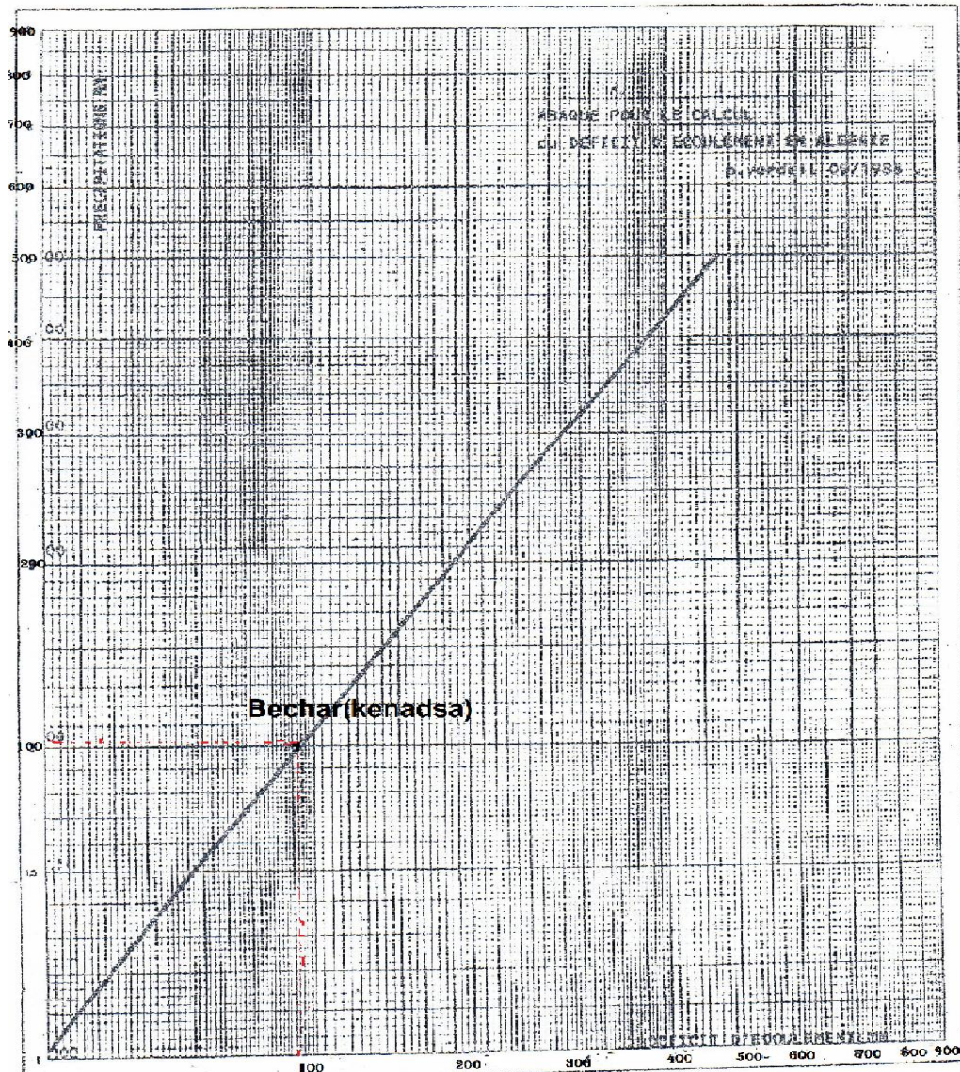


Figure I.19. Abaque de Verdeil (calcul de l'ETR)

I.2.7. Estimation des paramètres du bilan hydrologique

2.7.1. Calcul de ruissellement de surface "R"

C'est la quantité d'eau qui, au cours d'une précipitations, échappe à l'infiltration et à l'évapotranspiration,

Il est difficile de mesurer ce paramètre directement, mais on peut l'estimer avec la formule de Tixeront-Berkaloff.

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

R : ruissellement de surface en (mm)

P : précipitation moyenne annuelle en (mm)

ETP : évapotranspiration potentiel annuelle en(mm)

2.7.2. Calcul de l'infiltration I

C'est la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous-sol où elle alimente les eaux souterraines, eau de rétention, écoulement hypodermique écoulement souterraine et reconstitution des réserves aquifères.

$$P = ETR + R + I \Rightarrow I = P - ETR - R$$

Pour notre calcul en utilise l'ETR déterminé par Turc, et l'ETP déterminer par la méthode de Thornthwaite. Les résultants sont reportés dans le tableau I.11 :

Tableau I.11. Les différentes composantes du bilan hydrologique de la station de Béchar.

Paramètres (mm)	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Stations					
Béchar (2003-2014)	102	1691,4	107	$1.23.10^{-1}$	—

A partir du tableau I.11. On voit clairement que l'infiltration est nul pour les deux stations. Il se pose donc un problème d'alimentation des nappes souterraines surtout la nappe superficielle, mais pour les nappes profondes elles peuvent s'alimenter à partir de leurs affleurements par perméabilité de fissure (calcaires) .

I.3. Conclusion

De l'étude climatologique, on constate que la région de Kenadsa est caractérisée par un climat saharien,

Le climat de la région de Kenadsa est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par une forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région. Ce climat est de type hyperaride, il est caractérisé par un hiver chaud et une période de sécheresse prolongée dominée par des vents de direction Est-Sud. Nous avons tenté de calculer le bilan hydrologique sur la région tout en étant convaincus que la méthode utilisée n'est pas vraiment adaptée au contexte climatique du Sahara.

II.1 Introduction

L'existence des eaux souterraines est conditionnée par un critère géologique, qui comprend des conditions lithologiques et structurales, assurant un rôle décisif dans l'existence ou non de l'aquifère. Le second critère est d'ordre climatique ou paléo-climatique local ou régional, qui détermine les conditions de recharge des nappes souterraines (Castany G, 1980).

La géologie permet aussi de quantifier les réservoirs aquifères et de connaître leurs types de nappes, ainsi que leurs conditions aux limites selon la distribution des faciès géologiques.

De ce qui découle, tout raisonnement hydrogéologique doit s'asseoir sur une meilleure compréhension de la géologie du site en question. Dans ce chapitre on envisage de donner une étude assez détaillée de la géologie de la région d'étude par la Lithostratigraphie.

II.2. Cadre géologique régional

La région de Béchar est une portion de la vieille plate-forme saharienne, qui est vide, monotone, stable et cratonisée (Fabre, 1976). Cette région constitue un excellent laboratoire à ciel ouvert, d'une grande diversité géologique remarquable. Elle offre une large gamme de terrains, allant du Précambrien à l'Actuel sous des meilleures conditions d'affleurements (figure II.1.). Sur le plan événements géologiques, cette région s'inscrit également dans une zone de transition entre la plate-forme saharienne et le domaine atlasique.

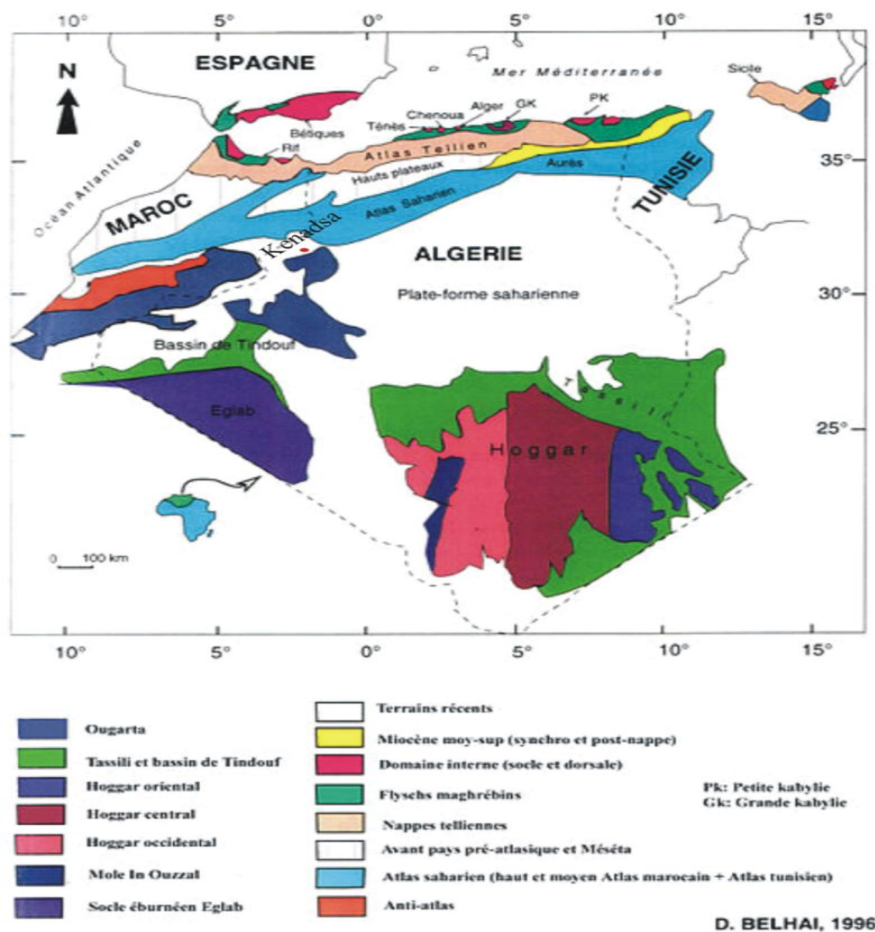


Figure II.1. Carte lithologique de l'Algérie

- Pour exposer le contexte géologique régional, nous nous référons à la carte géologique (**figure II.2.**) qui correspond à la région de Béchar, admettant des limites conventionnelles ; au Nord et à l'Ouest le royaume du Maroc, à l'Est la région de Mzarif, et la haute Zousfana et au Sud la région d'Abadla. Par sa position à cheval entre le domaine atlasique et le domaine saharien, et par l'importance économique qu'elle représentait (**Galmier, 1953 et Aït Ouali, 1991**).

Cette région comprend trois domaines structuraux distincts :

- ✳ Le Djebel Grouz et ses équivalents appartenant au domaine de l'Atlas Saharien.
- ✳ Le bassin crétacé de Béchar qui se prolonge dans le territoire marocain pour former le bassin crétacé de Béchar-Er-Rachidia, cette entité correspond à la zone de transition entre le domaine saharien et atlasique.
- ✳ Le bord septentrional de la plate forme saharienne qui comprend le massif de l'Antar et Horreït, le Djebel Béchar et Chabket Mennouna

II.2.1 Le Précambrien

Le principal affleurement est connu au niveau de Boukaïs, situé à environ **40km** au Nord de Béchar. Cet affleurement se présente comme un ancien massif apparaissant en boutonnière anticlinale, entouré au Nord, au Sud et à l'Ouest par des formations secondaires et à l'Est par une série assez complète du Paléozoïque.

Le massif lui-même est constitué de pélites et de grès surmontés par des coulées basaltiques et andésitiques et des tufs volcaniques (**Meindre, 1955**).

II.2.2 Le Paléozoïque

Il est bien répandu en affleurement, il comprend :

2.2.1. Le Cambro-Ordovicien

Il affleure largement dans le site de Talzaza (entre le village de Lahmar et celui de Boukaïs), dans El Menabha et aux environs de Mougheul. D'autres affleurements sont connus au niveau de Megsem el Aris et au coeur de l'anticlinal de Ben Zireg (**Menchikoff, 1936 et Pareyn, 1961**). Il s'agit d'une puissante formation de grès et de quartzites.

2.2.2. Le Silurien

Il se caractérise par des affleurements restreints, vu sa nature argileuse. Il apparaît au pied du revers méridional du Djebel Grouz, au niveau de Theniat Ghannama et au coeur de la structure de Ben Zireg. Il s'agit de schistes noirs (**Perrodon, 1951**).

2.2.3. Le Dévonien

Les formations du Dévonien sont plus amples en affleurement, ils sont identifiés au pied de la falaise de Koudiat El Haïdoura (Grouz), au niveau de Talzaza, au Maïder El Mehadjib, à Soltane El Betoum et à Ben Zireg. Il est argilo-carbonaté à la base, passant à des argiles en son milieu et vers son sommet, les calcaires prédominent (**Menchikoff, 1936 et Perrodon, 1951**).

2.2.4. Le Carbonifère

Les formations du Carbonifère sont les plus répandues en affleurement et les mieux étudiées (**Deleau, 1952 et Pareyn, 1961**). Elles constituent les principaux reliefs de la région (Djebel Antar, Djebel Horreït, Djebel Béchar et Chabket Mennouna) et constituent aussi le

soubassement de la ville de Béchar. La carte géologique provisoire que nous présentons dans ce travail ne montre pas les subdivisions du Carbonifère.

a. Le Tournaisien

Il n'a pas été identifié avec certitude, il semble qu'il ne soit pas déposé, tout au moins au Nord de l'Antar, du fait que le Viséen supérieur repose directement sur le Faménien terminal de Theniat El Haïdoura et à Soltane El Betoum (**Menchikoff, 1936**).

b. Le Viséen

Il est connu au niveau de la structure de Ben Zireg, au Djebel Béchar, et dans les massifs septentrionaux (Djebel Horreït et Djebel Antar), il est composé par des calcaires, et des schistes. Au Nord de Béchar, le Carbonifère est représenté par deux faciès, qui s'interpénètrent, ou se superposent : l'un schisteux, l'autre récifal (**Metchnikoff, 1936**). L'endroit le plus spectaculaire est entre la fosse de Ben Zireg, où se sont déposés les dépôts de flysch, dits le Wild flysch, qui passent latéralement à des constructions récifales dans le massif de l'Antar (**Pareyn, 1961**).

c. Le Namurien

Il affleure au pied du Djebel El Asfer ; généralement il est représenté par des alternances de calcaire, de marnes et de quelques niveaux de grès ; et dans la plaine de Guelb El Harkat et au Sud de Hassi Diab. Il est composé de marnes brunes entrecoupées de calcaires noirs et des phtanites, mais au niveau de Djebel Béchar et à Chabket Mennouna, le Namurien comprend des assises calcaro-dolomitiques.

d. Le Westphalien

On connaît le Westphalien entre Djebel Horreït et Kenadsa. Il est composé de marnes verdâtres et des grès à plantes à patine noire.

e. Le Stéphaniens

Il affleure dans la plaine d'Abadla, il s'agit d'une alternance de marnes, grès et des marnes rouges gypsifères.

II.2.3 Le Mésozoïque

Au Nord du Djebel Antar, le Mésozoïque constitue d'importants reliefs formant le Grouz méridional, quant au Sud, il forme des modestes reliefs, sous forme de cuestas (Ras Smar, Chabket Charef, Chabket Fendi, les Bezazil El Kelba et la Première Barga de Kenadsa).

2.3.1 Le Trias

Formant une semelle argilo-conglomératique le long du revers méridional du Djebel Grouz, et même au niveau de Chabket Fendi et Charef, l'endroit le plus célèbre est celui du conglomérat du Ksar Azoudj.

2.3.2 Le Jurassique

Il forme la principale masse du Djebel Grouz et les reliefs de Hassi Charef et Fendi (Chebka). Il est calcaro-dolomitique passant latéralement à des calcaires et argiles avec des bancs de gypse vers le Sud au niveau de Fendi-Charef, (**Mekkaoui, 2000**).

2.3.3 Le Crétacé

Les terrains du Crétacé affleurent généralement sous forme de cuesta (cuesta de Ras Smar, Bezazil El Kelba et la cuesta de Barrage Djorf Torba). Ces formations qui reposent tantôt en discordance angulaire sur le Carbonifère, tantôt, en concordance sur le Jurassique. Ce sont des terrains grés-argileuses à gypse, évoluant vers des marnes et des calcaires massifs

le Crétacé supérieur est représenté par des argiles à évaporite (sel et gypse). (Mebarki S, 2012).

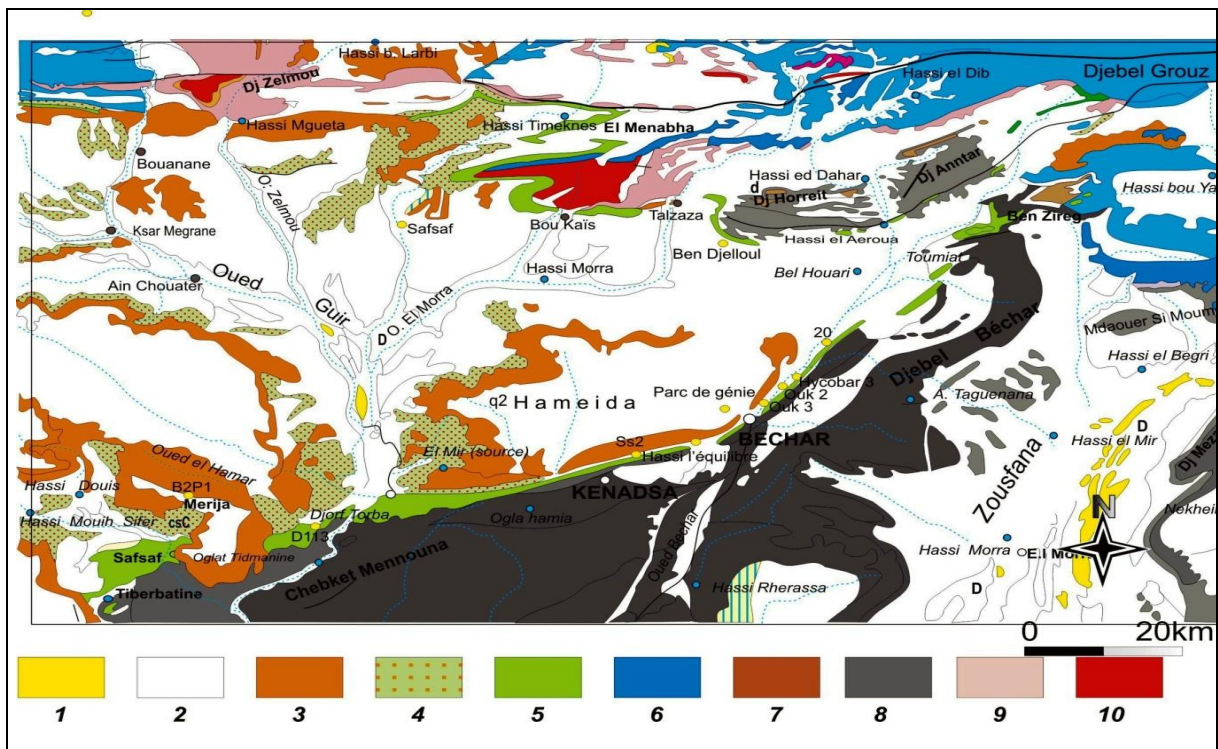
II.2.4 Le Tertiaire

Ces terrains sont tabulaires et discordants en ravinant la série sous-jacente (Crétacé). Ils constituent les corniches de la 2^{ème} Barga et le plateau d'Oum Es Sebaa, sur lequel se tiennent quelques buttes témoins (formation des Gour), dont celle d'Oum Es Sebaa est la plus célèbre. Le Tertiaire comprend des argiles conglomératiques, des grès et des calcaires lacustres.

II.2.5 Le Quaternaire

Les terrains quaternaires sont assez limités dans l'espace, ce sont principalement les alluvions des oueds, les évaporites des sebkhas et les dunes de sables.

La carte géologique (figure II.2.). Illustre la géologie de la région de Béchar conçue volontairement dans un esprit simpliste.



1 : Dunes de Sable, 2 : Reg et alluvions (hamada), 3 : Tertiaire, 4 : Sénonien (Crétacé Supérieur), 5 : Turonien-Cénomancien et Albien (Crétacé inférieur), 6 : Jurassique, 7 : Dévonien 8 : Carbonifère, 9 : Paléozoïque en différencié, 10 : Roches volcaniques du Pré Cambrien.

Figure II.2. Carte géologique provisoire de Béchar (Deleau, 1952).

II.3. Contexte géologique du site d'étude

Les travaux d'exploration sur le charbon ont généré une documentation très abondante sous forme de rapports inédits. Toutefois, les travaux édités restent toujours à désirer, néanmoins, les travaux de Deleau (1951, 1952 et 1960) sont la base de toutes les compilations géologiques.

La carte de (figure II.3.) illustre parfaitement la carte géologique de site d'étude

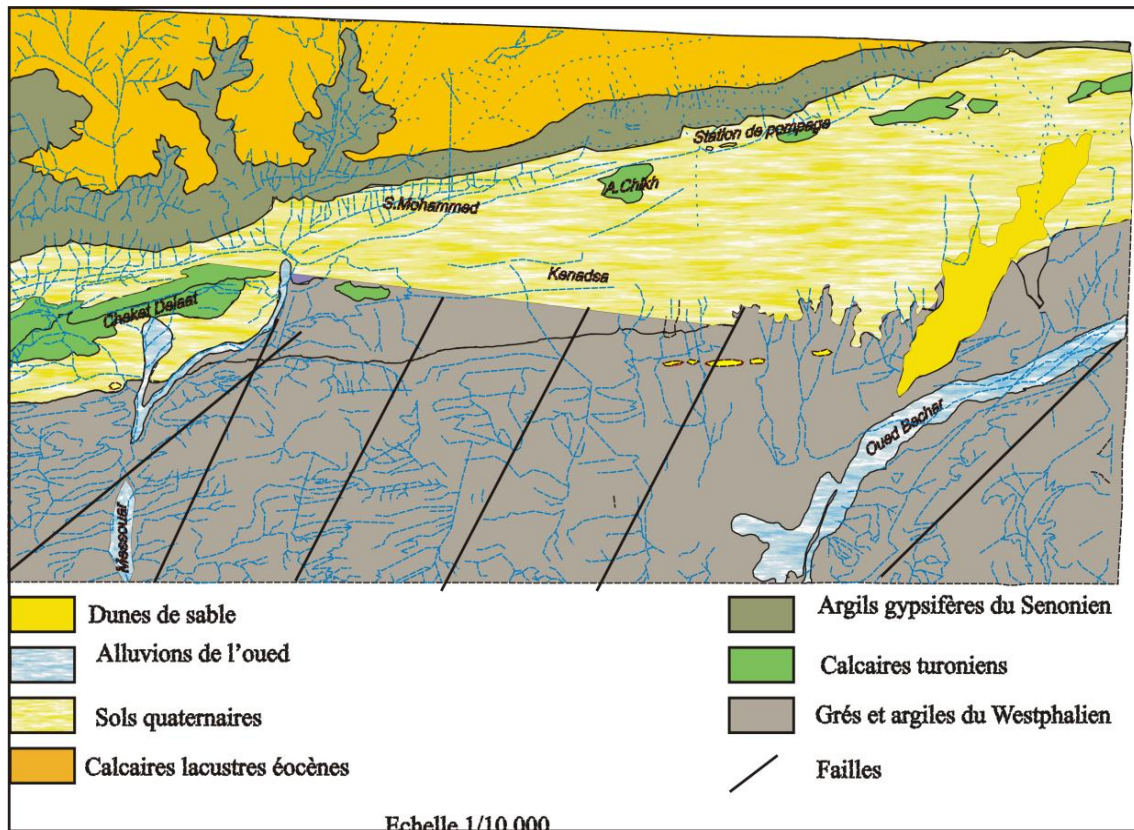


Figure II.3. La carte géologique de site d'étude.

3.1. La Lithostratigraphie

Aux limites du secteur de Kenadsa, on connaît des affleurements carbonifères qui constituent la pénéplaine de Kenadsa. Les formations secondaires, formant grossièrement la 1^{ère} Barga et la dépression aménagée entre les deux Braga. Le Tertiaire constitue la 2^{ème} Barga et le plateau d'Oum Sbaâ.

Le Quaternaire se limite aux alluvions des oueds, aux regs et aux Sebkhass. En détail, le Westphalien comprend (figure II.4.).

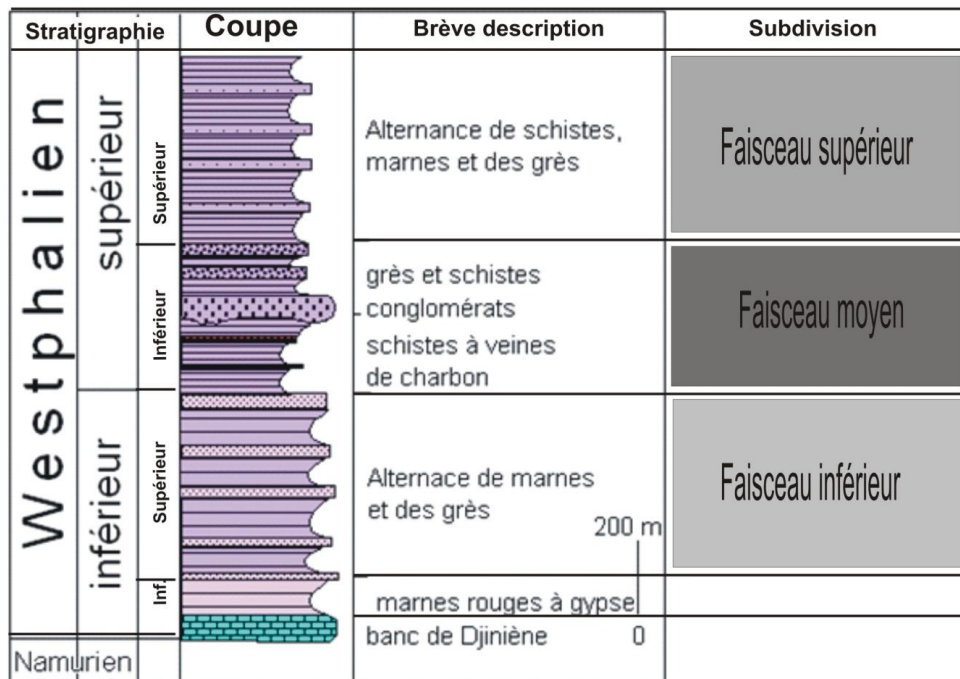


Figure II.4. Log stratigraphique du Westphalien(Deleau.1960)

3.1.1 Primaire

- **Le Westphalien** : dit aussi l' « huilier » ou le productif (**Deleau, 1960**), en raison de la présence des veines de charbon qui caractérise bien le Westphalien de Kenadsa. Cet étage est le plus répandu en affleurement,

Il comprend :

- **Le Westphalien inférieur** totalise une épaisseur de 450m, sa nature est silico- clastique. Il comprend deux membres :

- **Membre inférieur** : représente par des marnes rouges à gypse (100m)
- **Membre supérieur** : il s'agit d'une épaisse alternance de grès et des marnes de 350m d'épaisseur.

- **Le Westphalien supérieur**, cumulant 700m de puissance

Il se subdivise en :

- **Membre inférieur**, réellement ce membre est le plus productif du Charbon, en renfermant les cinq veines de Charbon (Bon Ouvrier, Slimane, Ardoin, Rouzaud et Four à chaud), (figure II.5)

Il s'agit de schistes à veines de charbon, clôturés par des niveaux repères à conglomérats,

Il se caractérise d'une puissance de 300 m.

- **Membre supérieur** représenté par une alternance rythmique de grès, schistes de grès. Son épaisseur est de 400m.

Pour des commodités de cartographie, on propose de rassembler les membres en faisceaux

3.1.2 Secondaire ou Mésozoïque

- **le Crétacé** constitue un trait caractéristique dans le paysage de Kenadsa, en constituant la Première Barga.

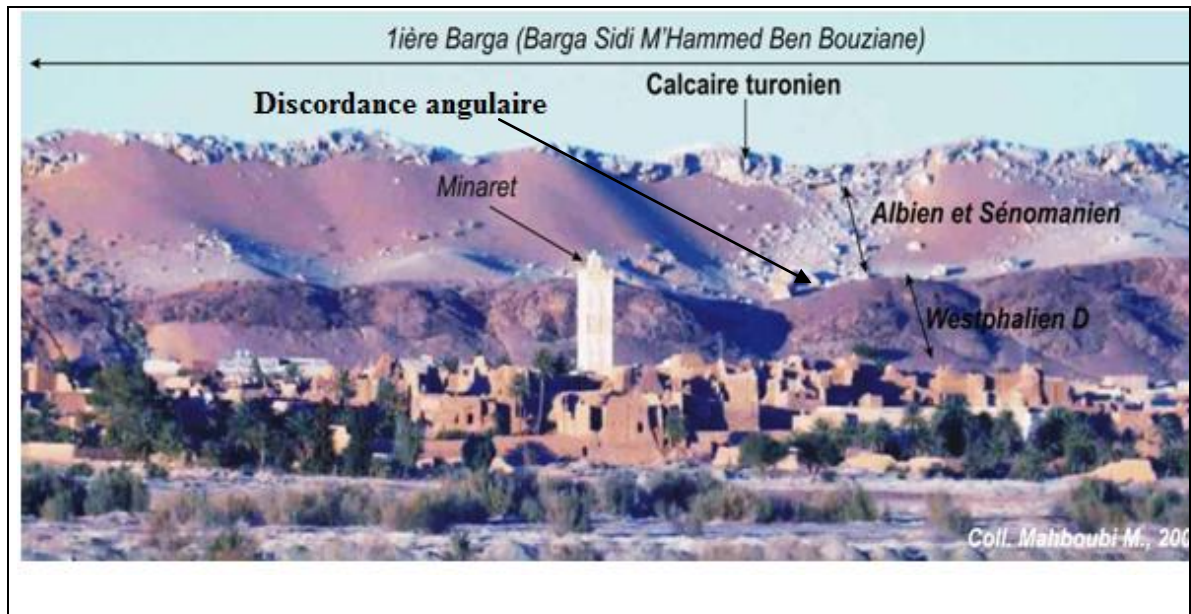


Figure II.5. : Vue panoramique de la 1^{ère} Barga de Kenadsa

Le Crétacé repose en discordance angulaire sur le Westphalien (faisceaux supérieur), comme en témoigne la figure II.6.

- **le Miocène** : localisé dans la Gara d'Oum Sbaâ et au Nord de la Barga, c'est un complexe grés-conglomératique à joints marneux rougeâtres.
- **l'Eocène** : il ravine les calcaires lacustres, composé de marnes rose sableuse et grès calcaires avec quelque éléments grossiers.
- **le Pliocène** : il est constitué par des galets primaires et des éléments calcaires plus ou moins anguleux qui correspondent à la 2^{ème} Barga, démantelée au Nord-est de la Gara Ziar et au Nord de Gara d'Oum Sbaâ.

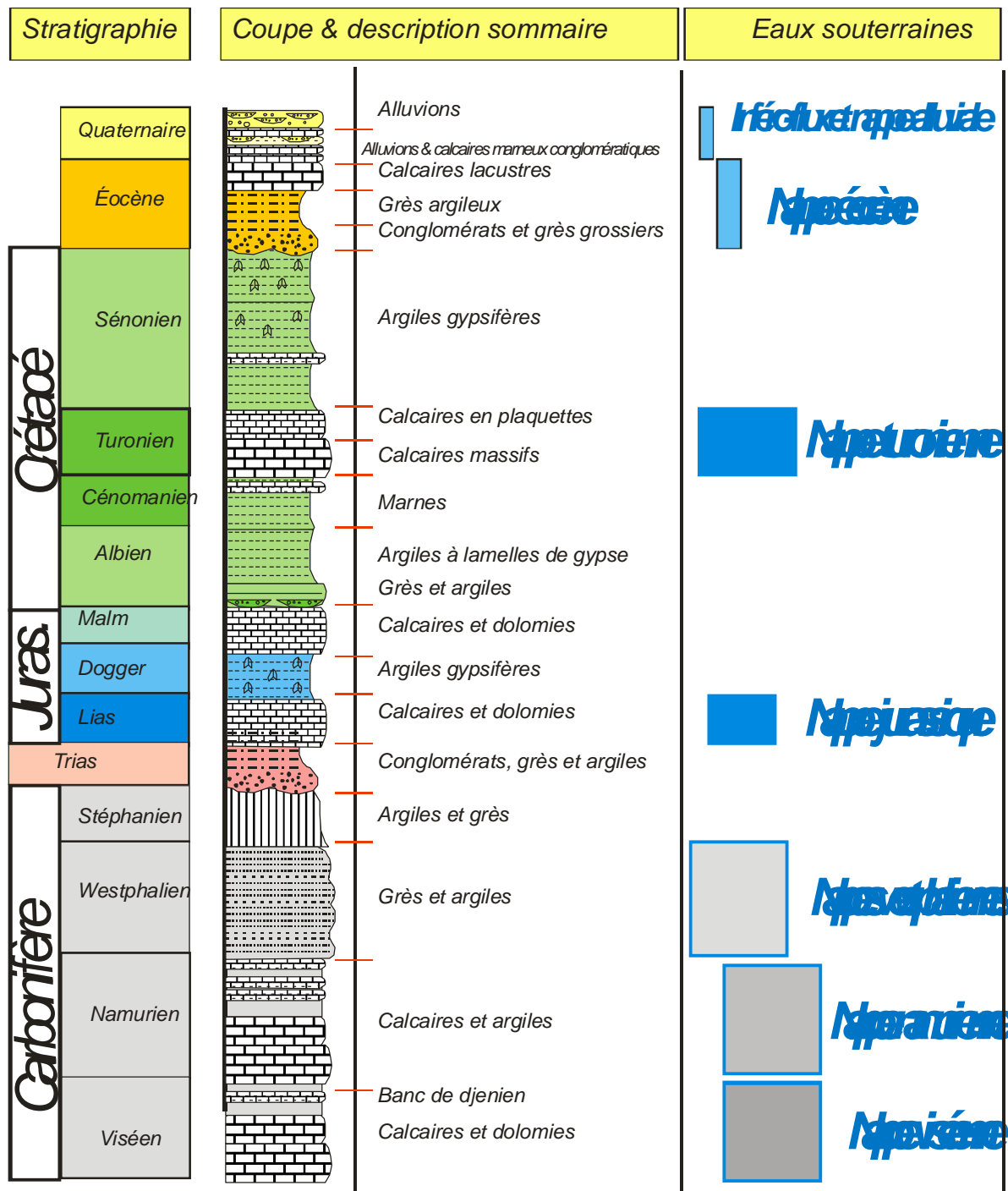


Figure II.6. Coupe du Crétacé de Kenadsa

Cet étage comprend les étages suivants :

- l'**Albien** : constitue le talus de la 1^{ère} Barga. Son épaisseur est de 20m, il comprend des lentilles micro-conglomératiques à dents de vertèbres
Elles sont suivies d'argiles rouges gypsifère et d'argiles versicolores.
- Le **Cénomanién** : d'épaisseur de 15m, il est constitué de marnes verdâtres et beiges. Il comprend dans sa partie supérieure deux bancs métriques fossilifères.
- Le **Turonien** : constitue la corniche de la 1^{ère} Barga. Ce sont des calcaires à rudistes, en bancs massifs, suivis de calcaires en plaquettes. Son épaisseur est de 45m.

- **Le Sénonien** : forme la dépression entre les deux Barga, il comprend une puissante formation d'argiles rouges entrecoupées de bancs métriques à décamétriques de bancs de gypse. Son épaisseur est de plus 800m.

- **Le Tertiaire** : il constitue la 2^{ème} Barga et le plateau d'Oum Sbaâ, il est tabulaire ou légèrement incliné (< 5°) vers le Nord.

II.3.2. La Tectonique

Les efforts tectoniques se traduisent dans les roches par des déformations plicatives et cassantes. Ces déformations agissent en fonction de la lithologie des roches. Les argiles et les schistes absorbent les contraintes tectoniques, en donnant généralement des disharmonies, par contre les grès sont des roches compétentes, elles se cassent sous l'effet tectonique. Sommairement on distingue :

Le Quaternaire	Pas de déformations
Le Tertiaire	Peu ou pas déformé
Discordance de ravinement	
Le Crétacé	Modérément déformé en monoclinal vers le Nord
Discordance angulaire	
Le Westphalien	Energiquement déformé

En détail, on distingue :

3.2.1. Tectonique plicative

- Le Westphalien de Kenadsa correspond au flanc Nord de Chabket Mennouna. Les couches Westphaliennes plongent vers le Nord d'un angle de 45°.

- Le Crétacé se rattache au synclinal des bassins crétacés. La 1^{ère} Barga a son équivalent à Boukaïs. Le Crétacé plonge vers le Nord d'un angle de 10°.

- Le Tertiaire est sub-tabulaire, il est peu ou pas déformé.

3.2.2 Tectonique cassante

L'empilement des strates du Westphalien comprend des roches tendres (marnes et argiles) et des roches compétentes (grès, calcaire en rares bancs).

Ce couple lithologique ne réagit pas de la même manière ; les roches compétentes se cassent et expriment un style cassant. En revanche, les formations marneuses et argileuses absorbent les contraintes et manifestent des fluages et des argiles désharmonie.

Les mesures aléatoires des fractures sont traduites en rosaces de vent, mettant en valeur trois familles de facteurs

- famille NE-SW et la plus abondante

- famille NW-SE

- famille NS plus au moins rare.

- le système NE-SW s'expriment en faille à composante dextre et affecte systématiquement le Westphalien et certaines se prolongent dans le Crétacé.

Les extraits de l'image satellite LandSAT illustrent parfaitement ces failles. Ces dernières sont abondantes au point où l'on peut dire que la structure de Mennouna est complètement hachée de failles et c'est pour cette raison qu'elle désigne Chebka ou un filet.

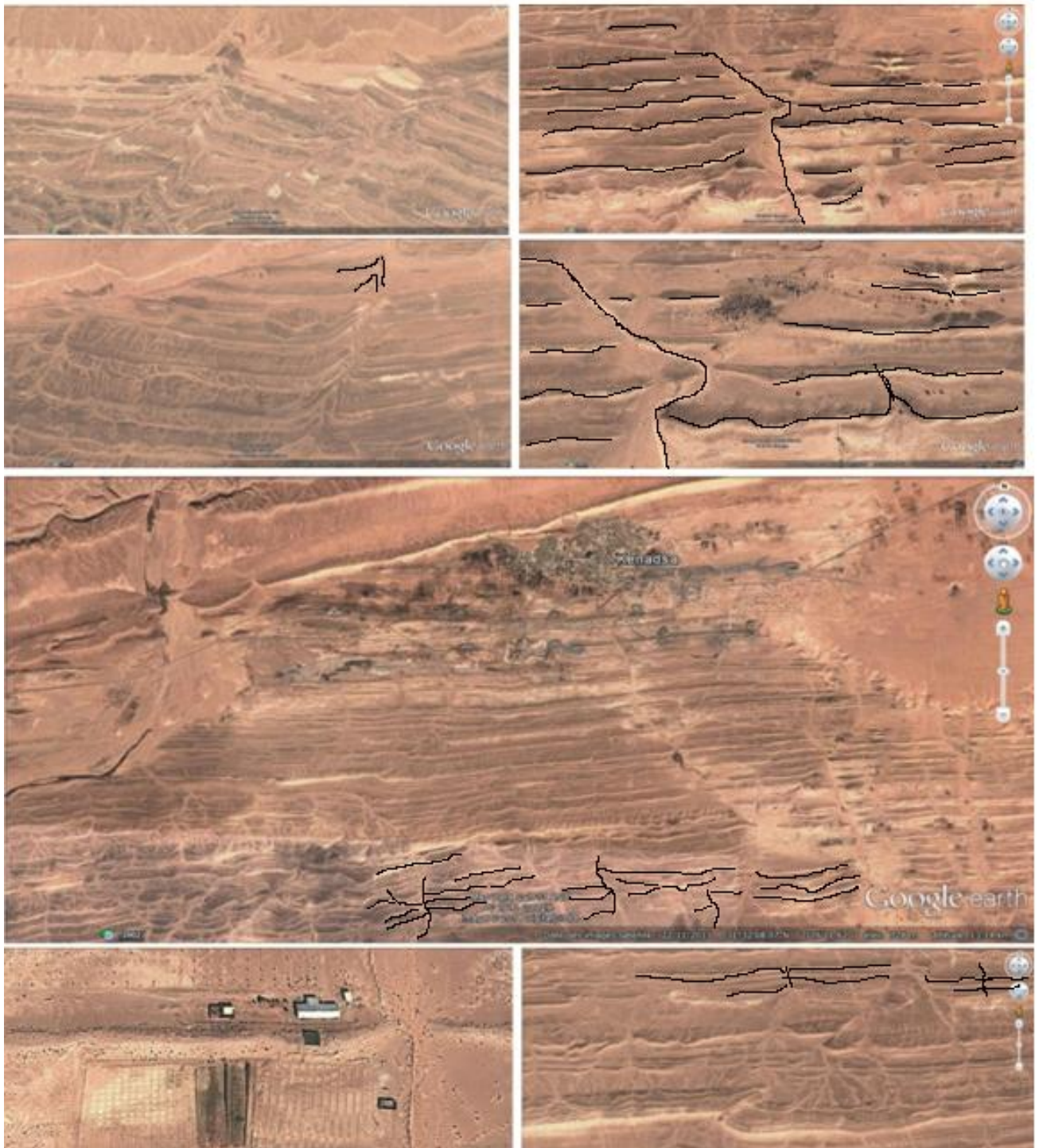


Figure II.7. : Style cassant dans la pénéplaine de Kenadsa(MEKKAOUI 2013)

II.4 Conclusion

Le Westphalien, qui constitue notre aquifère, est constitué d'une alternance rythmique de grès et des argiles, d'une épaisseur respectivement de 2 à 4m et de 1.5 à 3m. Cette disposition est très favorable pour réfugier des eaux souterraines, donnant la possibilité d'un système aquifère multi-couches.

III.1. Introduction

Ce chapitre expose le volet hydrogéologique, il traite l'hydrogéologie régionale et celle du site d'étude, en se basant sur les données qui résultent de notre campagne de terrain, puis on a élaboré la carte piézométrique du site de Kenadsa.

III.2. Hydrogéologie régionale

Le région de Kenadsa appartient à une large entité hydrogéologique. Cette région a fait l'objet de quelques études (Deleau 1951 et 1952 ; Idrotechnica, 1976 et Bourgeois, 1972). A la lumière de ces travaux, on retient ce qui suit (figure III.1)

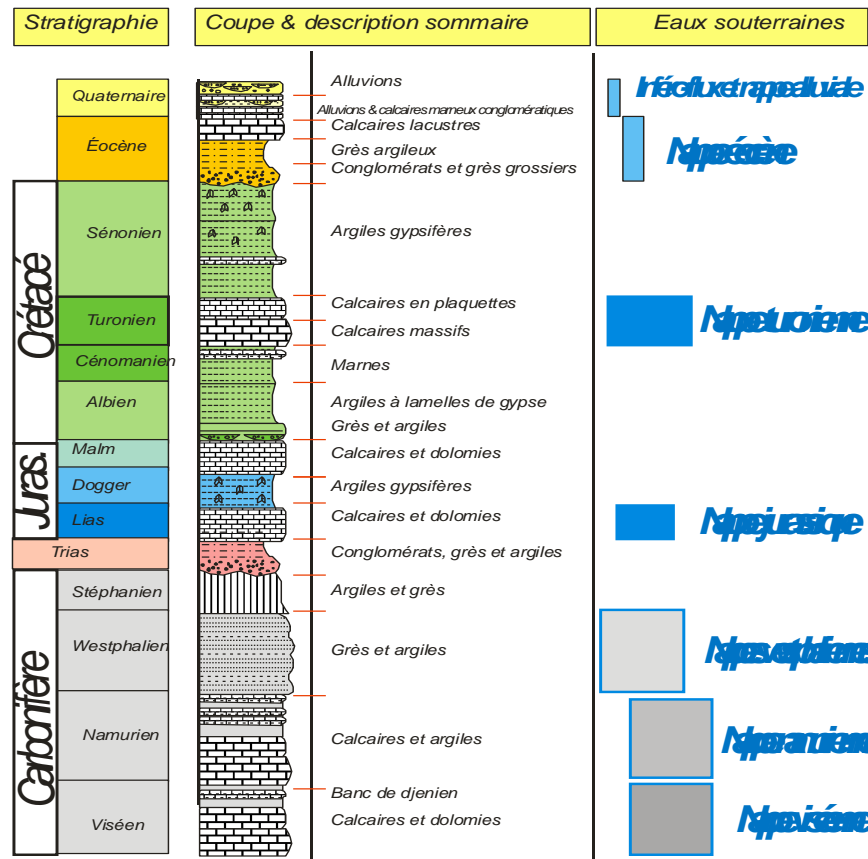


Figure III.1 Les systèmes aquifères dans la région d'étude (Deleau, 1952)

2.1. L'aquifère des calcaires du Carbonifère

Le Viséen et le Namurien inférieur représentent la partie sommitale d'une épaisse formation. Les forages exécutés par la SONAREM (Idrotechnica, 1976) ont permis de mettre en évidence la superposition d'au moins deux nappes : la première rencontrée est contenue dans la partie fissurée (fractures et joints de stratifications) des calcaires dolomitiques du Djénine de transmissivité faible ($10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) ; la deuxième est celle d'El Guelmouna se trouvant à une profondeur comprise entre 200 et 250 m, dont l'épaisseur est de 50 m et ayant une transmissivité de l'ordre $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

La structure anticlinale de ces calcaires n'est pas favorable à l'emménagement de réserves, ce qui explique les faibles potentialités en eau de la région de Chabket Mennouna.

2.2. Aquifère des grès du Carbonifère

Ces terrains affleurent sur une grande partie de l'anticlinal de Chabket Mennouna, sur le flanc Ouest de l'anticlinal de la Zousfana, du Djebel Arhlal. Les études précédentes ont montré que les grès sont le siège de nappes libres ; la porosité est due à la dissolution du ciment.

L'écoulement des eaux se fait du Nord-Est au Sud-Ouest avec une alimentation dans les affleurements de Djebel Béchar.

La nappe du Westphalien est rencontrée à une profondeur inférieure à 10m et notre aquifère devient sub-affleurant au Nord, en particulier dans la zone de Kenadsa. Cette nappe a été testée par trois sondages à faible profondeur et dont le débit n'excède pas 5 L/s. Nous n'avons pu avoir plus d'informations sur ces sondages en raison de leur ancienneté.

2.3. Aquifère des calcaires du Turonien

Les calcaires fissurés formant la Première Barga de Béchar constituent un repère morphologique régional. Cette formation carbonatée constitue un très bon aquifère à circulation de fissure, bien que son épaisseur soit faible (25 à 40m). Ces calcaires fissurés sont localisés essentiellement dans la bordure sud du bassin de subsidence de Béchar-Kenadsa (environ 4000 km² qui représente le secteur oriental du grand bassin Crétacé d'Er-Rachidia-Boudnib qui fait, lui, environ 8000 Km²).

L'aquifère du Turonien contient la principale nappe de la région ; libre en bordure, elle devient captive vers le centre du bassin.

Cette nappe reçoit une bonne alimentation qui peut se faire soit directement par les eaux de pluie, soit indirectement du haut, à partir de nappes superficielles.

La réserve de cette nappe est certainement considérable et l'importance de son débit se traduit par le fait qu'elle alimente les sources les plus importantes du bassin :

- La source de Boukaïs, constitue l'exutoire des calcaires turoniens par l'intermédiaire d'une grande faille correspondant à la flexure saharienne. Son débit est de 17 L/s (1964). Cette source est exploitée pour l'irrigation des périmètres de Boukaïs à un débit de 7.5 L/s (ANRH,1992).
- La source des calcaires de Djorf-Torba se déverse directement dans l'Oued Guir. Son débit est de 10L/s (1970). Ceci est dû probablement au lessivage de la formation sénonienne gypsifère par les eaux de la nappe calcaire du Turonien.

Par ailleurs, les forages implantés dans les calcaires turoniens (région d'Ouakda) se sont révélés, dans la totalité des cas, productifs. La profondeur du niveau piézométrique est comprise entre 22 et 36.5m.

Les débits réels sont entre 0.5 et 35L/s. La transmissivité, déterminée en quelques points d'eau, a des valeurs comprises entre 2.0×10^{-5} et 11.5×10^{-3} m²/s ; elle atteint parfois des valeurs très importantes (10^{-2} m²/s) avec un débit spécifique de 4.29 L/s.

Cette variabilité est due à la nature même de la perméabilité de la formation aquifère ; cette perméabilité a pour origine des phénomènes de fracturation et dissolution chimique des calcaires.

2.4. Aquifère des calcaires lacustres de l'Eocène supérieur

L'Eocène supérieur est constitué :

- à la base par une vingtaine de mètres de conglomérats, de marnes et marno-calcaires ;
- au sommet par une dalle de calcaires lacustres de 20 à 40 mètres d'épaisseur environ, formant la deuxième Barga de Béchar presque tabulaire ; la nappe est contenue dans ces calcaires lacustres.

La plupart des Oueds contournent le plateau Eocène et ne participent pas à son alimentation. Cette dernière semble se faire uniquement par infiltration directe au niveau des affleurements. Les seuls exutoires naturels visibles, sont quelques sources dont le débit est insignifiant.

2.5. Aquifère des formations du Quaternaire

Les formations quaternaires occupent de très grandes étendues. Elles constituent principalement le sommet de la petite Hamada, des terrasses alluviales, des Ergs, des alluvions récentes d'Oueds, de Sebkhass et des dépôts de pentes.

☀ Inféro-flux de l'oued Guir et la nappe de la plaine d'Abadla : La nappe des alluvions de l'oued Guir offre une ressource possible en eau souterraine. La profondeur du niveau piézométrique est d'environ 6 mètres dans la partie basse du Guir. Les puits dans la plaine d'Abadla ont fourni des débits inférieurs à 10 L/s.

☀ Inféro-flux de l'oued Zousfana : il s'agit d'une nappe à faible profondeur, qui devient affleurant en amont de Taghit. Elle est contenue dans un terrain à lithologie variable (argiles, sables, grès et conglomérats).

☀ Inféro-flux de l'oued Béchar : la profondeur de la surface piézométrique de la nappe d'inféro-flux de Béchar présente des valeurs moyennes comprises entre 5 et 10 mètres. Cette nappe est alimentée par les eaux de pluie.

☀ Aquifère de la vallée de la Saoura : dans la vallée de la Saoura existe une série de terrasses. Elle est composée de sables très fins avec souvent des argiles à la base. Cette terrasse est tributaire de la nappe de l'Erg. En effet, l'alimentation de celle-ci se fait principalement par les eaux de ce dernier.

2.6. Nappe du Jurassique de Mougheul : le champ captant de Mougheul, situé au nord à 70km de la ville de Béchar, est formé de quatre forages de profondeur variant entre 45 à 95 m. Ces forages, implantés dans le Jurassique inférieur, signalées que toutes les prévisions de ramener l'eau de Mougheul vers Béchar sont abandonnées. Car il expose un rabattement important (tarissement).

❖ Synthèse

La figure ci-dessous (figure III. 2) synthétise les aquifères dans la région de Béchar

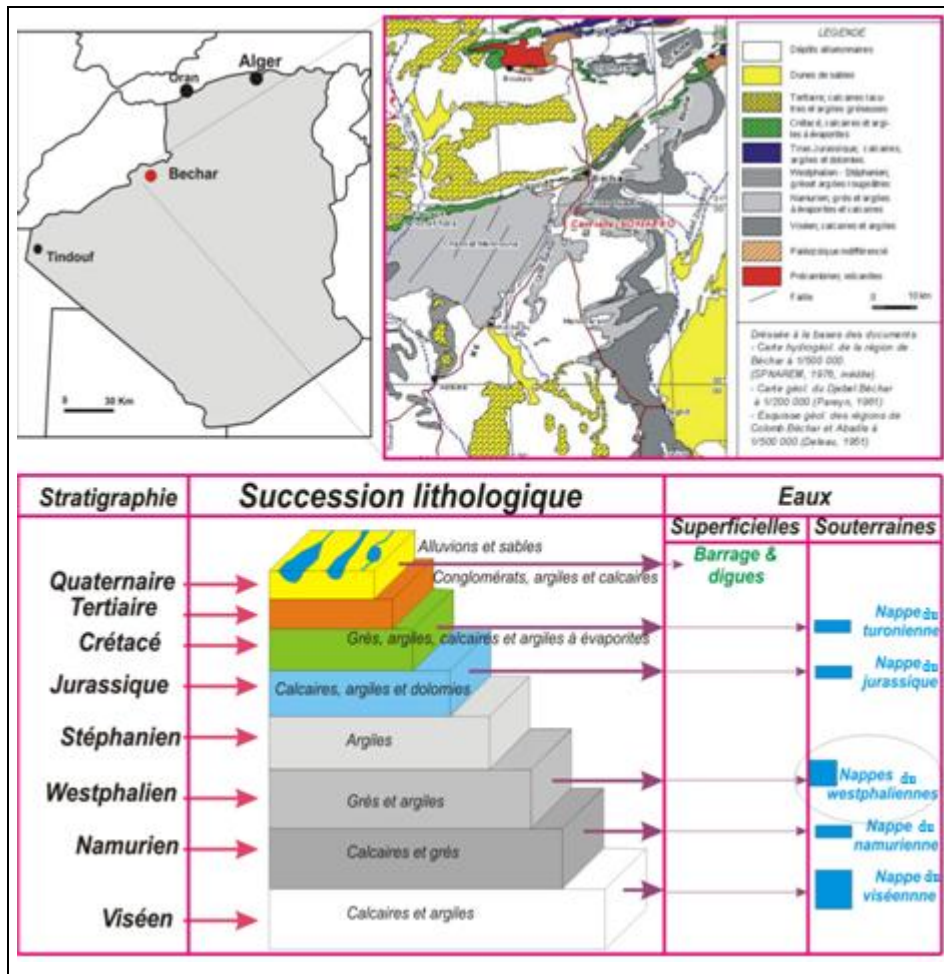


Figure III.2. Esquisse géologique et eaux souterraines dans la région de Béchar (Deleau 1960)

III.3. La piézométrie régionale

La carte piézométrique élaborée par l'ANRH, 1991, montre 3 niveaux piézométriques de 3 nappes distinctes (figure III. 3) :

- **Nappe du Turonien (CT)** : elle montre bien un écoulement vers le S-W, c'est-à-dire vers l'exutoire de la source de la rive droite.
- **Nappe du houiller Namurien : (h N)** montre aussi un écoulement vers le S-W.
- **Nappe du Viséen** : elle occupe la partie de la Zousfana indique bien un sens d'écoulement vers le S-E.

On remarque que l'aquifère multicouche du Westphalien ne figure pas sur cette carte, c'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'étudier ce système.

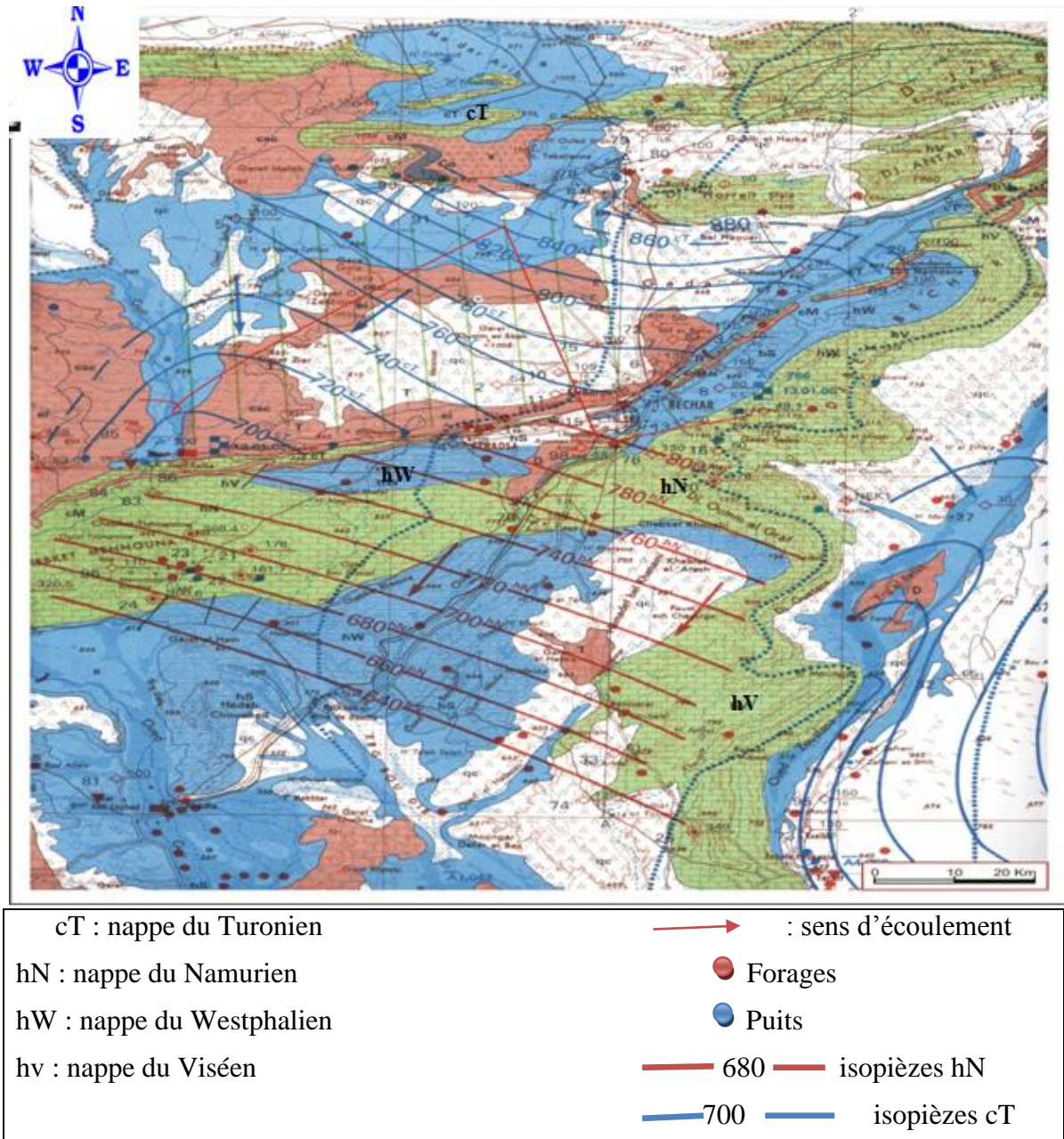


Figure III. 3. Carte piézométrique de Béchar. (ANRH 1991)

III.4. Hydrogéologie

4.1. La nappe des grès carbonifères

Les grès carbonifères sont le siège de nappes aquifères libres qui sont séparées entre elles chacune à un régime hydraulique indépendant. Dans la succession, l'eau peut se trouver soit dans la partie altérée des terrains grés-marneux, soit dans la zone fracturée des quartzs du Westphalien ou du Stéphanien. La localisation de ces nappes se trouve dans la zone entre Djebel Béchar et Kenadsa où elles sont exploitées par différents puits.

La nappe des grès carbonifères donne lieu à un certain nombre de sources, environ neuf (9). Les plus connues sont : Aouinat Hamou Aïssa, Aïn Cheikh, Aïn Dir et Sidi Mbarek. Ces sources alimentaient dans le passé la piscine communale, ainsi que les jardins de la palmeraie de Kenadsa. L'eau de ces 3 sources est acheminée à partir de la source-mère, située au pied de la Barga, et distante d'environ 3Km du centre-ville de Kenadsa, par un conduite gravitaire de diamètre de 260mm, prolongée d'une seguia

4.1.1. Lithologie des grès carbonifères

Le terme grès carbonifères définit les formations grés-marneuses à rares observation des calcaires et de grès quartzitique du Westphalien et du Stéphanien. Ces terrains affleurent sur une grande partie de l'anticlinal de Menouar sur le flanc Ouest de l'anticlinal de la Zouzfana du Djebel Béchar jusqu'à Djebel Arhlal. Les grès marno-calcaires sont limités en bancs de 20 à 40 cm d'épaisseur, intercalés par des groupes de 5 à 15 bancs dans les marnes schisteuses sur 25 à 30m de profondeur. D'après Deleau, la superposition de ces couches du Carbonifère est comme donné dans le tableau ci-dessous.

Les grès présentent une porosité majeure due à la dissolution du ciment ; les vides entre les grains de quartz permettent la formation des nappes.

Les grès quartzitiques sont compacts (perméabilité de fissures) et donnent lieu à de petites nappes.

Tableau.III.1. La superposition des couches du carbonifère d'après Deleau

Les couches du Carbonifère	La lithologie	Epaisseur
• Westphalien D	- Alternance de marnes et schiste - Conglomérats et grès	400m 180m
• Westphalien C	Alternance grès et marnes schisteuses avec du charbon	900m
• Kenadsien	Alternance grès et marnes avec des schistes	440m
• Westphalien C inférieur	Calcaires, grès et schistes	620m

4.1.2. Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe

Les grès carbonifères de la zone Sud de Béchar ont généralement des débits de l'ordre de 4 à 5 L/s et une transmissivité de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ environ. Par contre, dans la zone de Kenadsa, le débit des puits diminue avec des valeurs qui peuvent atteindre 0.1L/s. Les valeurs de la perméabilité, déterminées pendant les recherches de charbon conduites dans la zone Sud de l'anticlinal du Chabket Mennouna, sont de l'ordre de 10^{-6} m/s et celles-ci sont extrêmement variables en fonction de la présence de fractures. Le petit nombre des données de puits dans cette zone, montre des débits moyens inférieurs à 0.5 L/s.(Deleau1952)

4.1.3. Potentialité des nappes

L'alimentation de la nappe des grès carbonifères peut se produire par infiltration des pluies dans la zone montagneuse d'affleurement des grès et à travers les crues des oueds qui traversent ces affleurements.

Les conditions d'alimentation sont favorables pour les nappes qui sont dans les grès du bord oriental et méridional du bassin de Béchar-Kenadsa, moins favorable pour les nappes qui circulent au Sud du bassin de l'anticlinal de Chabket Mennouna.

La zone d'alimentation des premières nappes est constituée par le versant occidental de Djebel Béchar, elle a une superficie totale d'environ 360 Km^2 , l'eau dans cette zone est prélevée dans les puits de la zone de Béchar Djedid et Kenadsa (=20 L/s).

Le débit à l'exutoire de ces nappes, mesuré pendant l'exploitation de la mine de charbon de Béchar Kenadsa durant la période 1942-1954 c'est-à-dire avant les exploitations actuelles, était de l'ordre de 25 L/s.

Dans la zone de l'anticlinal de Chabket Mennouna et précisément dans la partie Sud de l'anticlinal, les conditions hydrogéologiques sont assez différentes car les bancs gréseux se trouvent dans des conditions favorables d'alimentation, seulement dans une zone limitée adossée aux montagnes du Djebel Oum el Graf, c'est-à-dire pour une zone d'impluvium possible d'environ 50 Km^2 . Donc, en appliquant le même facteur d'infiltration probable dans la zone montagneuse, il est de l'ordre de 1L/s.

En aval de la zone montagneuse, l'alimentation par les crues des oueds et des précipitations (rares) sur les grès sont négligeables car la perméabilité de ces terrains est importante.

Dans ces conditions, la mise en production de ces aquifères doit prendre en considération les réserves exploitables.

4.2. Paramètres hydrodynamiques

L'analyse piézométrique a pour but d'étudier le comportement hydrodynamique de la nappe des grès carbonifères dans son environnement géologique.

Le sens d'écoulement de la nappe des grès carbonifères est généralement Nord-Est – Sud-Ouest avec une confrontation entre le sens d'écoulement et le sens d'orientation des failles existant dans la zone d'étude. L'eau circule dans des conduites souterraines, qui résultent de la fracturation des grès.

4.3. Types de captage

Au niveau de Kenadsa il existe 3 types de captage :

☒ **Sources** ; Elles sont nombreuses. Leur débit est faible et de l'ordre de 0.5 L/s. Les sources jaillissent à partir des grès du Westphalien supérieur (faisceau supérieur) au-dessous de la Première Barga et leur eau est canalisée, pour aboutir dans les jardins.

☒ **Les puits** : en général, ils sont aussi en nombre considérable, leur profondeur faible, ne dépassent pas une dizaine de mètres (figure en annexe)

☒ **Les forages**

Ces dernières années, les autochtones se sont familiarisés avec le forage par battage, en raison du soutien étatique, leur commodité dans la réalisation et c'est moins encombrant. Ces forages sont mal à très mal équipés, avec un inconvénient majeur qui consiste à traverser plusieurs nappes.

- **Inventaire** : il est très difficile d'établir un inventaire exact des ouvrages de captage d'eau toutefois, un essai peut être donné ici. Selon le bulletin de la DPAT, on peut exposer l'inventaire suivant :

Tableau III.2. Ouvrages de captage (DPAT, 2007)

Commune de Kenadsa	Puits	Digue	Sources	Barrage	Forages
Nombre	264	01	21	01	40

Bulletin de la DPAT, 2007.

III.5. Base de données

Une campagne de mesure piézométrique et d'échantillonnage a été réalisée dans le cadre de ce travail (Mai 2015). (Figure III.4). Différents ouvrages ont fait l'objet de cette campagne.

- **Un puits traditionnel** : le puits n°3 « Kebouna »
- **Prise d'échantillon de la source d'Aïn Edir (Ech 08)**



Figure III.4. Points d'eau

Les données sont dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.3. Résultats de la piézométrie au niveau du terrain d'étude

N°	N° Ech	Type	Désignation	Niveau statique(m)	Z (m)	Niveau piézométrique(m)
1	N°1	Forage	Aïn cheikh	26,5	753,27	726,77
2	N°2	Puits	Kebouna	3,1	749,7	746,60
3	N°3	Puits	Hassi Planat (djamai)	5,1	749,8	744,70
4	N°4	Puits	Hassi Soltani	3	738,5	735,50
5	N°5	Puits	Aïn sidi Mbarek	9,15	742,8	733,65
6	N°6	Source	Aïn cheikh	0	756,23	756,23
7	N°7	Puits	Alfred	3,95	750,5	746,55
8	N°8	Source	Aïn Edir	0	747,2	747,20
9	N°9	Forage	Hammam Drissi	7,5	751	743,50
10	N°10	Source	Aïn sidi Mbarek(S)	0	742,8	742,80
11	N°11	Puits	La piscine	6,8	749,4	742,60
12	N°12	Puits	Puits apprentissage	3,8	751,9	748,10

5.1. Elaboration de la carte piézométrique

L'étude du fonctionnement, des aquifères, passe évidemment par la définition des écoulements souterrains et par l'identification des zones d'alimentation et de décharge.

Pour ce faire, nous avons repris dans le cadre de ce projet l'ensemble des relevés piézométriques effectués, en Mai 2015, sur la majorité des points d'eau du système aquifère.

Quoiqu'insuffisantes, ces données permettent néanmoins d'esquisser les grandes lignes des écoulements souterrains et surtout d'orienter les résultats de ce travail.

Pour élaborer la carte piézométrique il faut connaître les niveaux statiques de chaque ouvrage et calculer les niveaux piézométriques à l'aide de la relation :

$$N_{pz} = Z_i - N_{si} \text{ (m)}$$

où : N_{pz} = Niveau piézométrique en m ; Z_i = altitude (MNT) en m et N_{si} = Niveau statique en m.

5.2. La carte piézométrique de Kenadsa

- Base de données

La carte élaborée résulte d'une base de données (Tableau III.2) à partir de 3 sources, 7 puits et 2 Forages échantillonnés.

- Support cartographique

La carte topographique, du site d'étude, provient d'une carte topographique régionale (à l'aide du logiciel MapInfo), l'échelle de celle-ci est 1/200000 ; et nous avons procédé à l'habillage géologique (grâce aux données géologiques et hydrogéologiques) de cette carte.

Les altitudes des points ont été calculées par Modèle Numérique de Terrain (MNT) et à l'aide du logiciel Global Mapper, les cartes tirées de Google Earth sont de grandes utilités.

➤ La carte d'inventaire des points d'eau est dans la figure III.5.

- La carte piézométrique de la zone d'étude est dans la figure III.6.

5.3. Interprétation de la carte piézométrique

La carte piézométrique représente une synthèse importante dans l'étude hydrogéologique et son interprétation contribue à l'étude éventuelle du comportement hydrodynamique de la nappe.

L'étude piézométrique effectuée à partir des mesures des niveaux d'eau dans les différents points d'eau de Kenadsa, montre que l'écoulement des eaux souterraines suit une direction Nord-Est à Sud-Ouest

- ✎ L'écoulement suit un trajet de l'Est vers l'Ouest où nous distinguons une dépression des isopièzes au centre de l'aquifère, qui fait une perturbation des résultats, cela exprime le pompage en cours dans le puits.
- ✎ L'alimentation de la nappe serait régie par les précipitations sur les formations évaporitiques qui peuvent être en continuité hydraulique avec les grès sur une large bande orientée Est-Ouest.
- ✎ On note un sens d'écoulement du Nord vers le Sud assurant le jaillissement des sources au pied de la Première Barga. Puis les sens d'écoulement divergent vers l'Est et l'Ouest.
- ✎ On remarque aussi une ligne de partage des eaux au centre de région d'étude.
- ✎ Les axes de drainages se trouvent à l'est et l'ouest de la région d'étude où il y a l'abondance des sources.

Ces interprétations de la carte piézométrique sont le résultat des différentes études sur uniquement des points d'eau que nous avons échantillonnés.

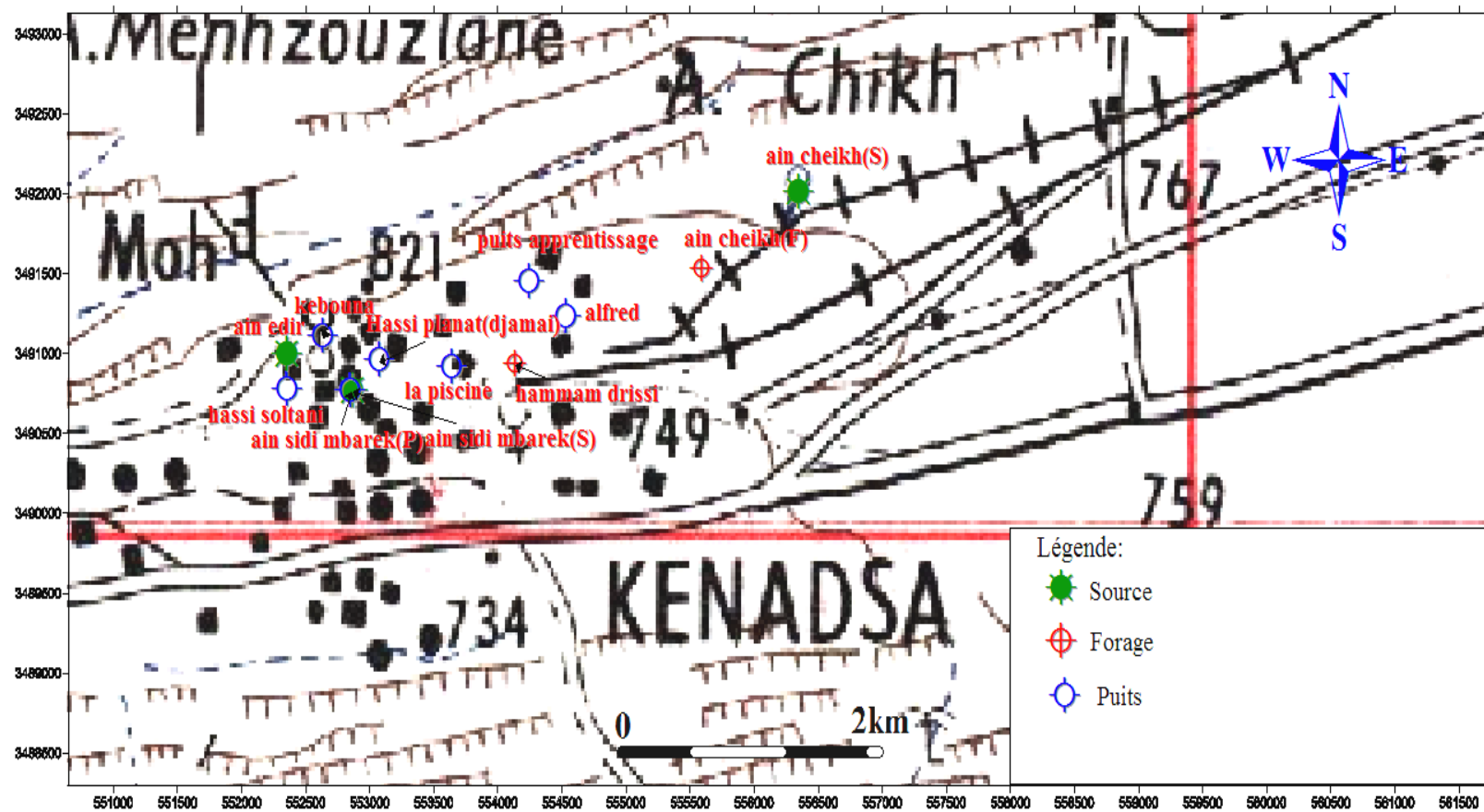


Figure III.5. Carte d'inventaire des points d'eau

CHAPITRE III - HYDROGEOLOGIE

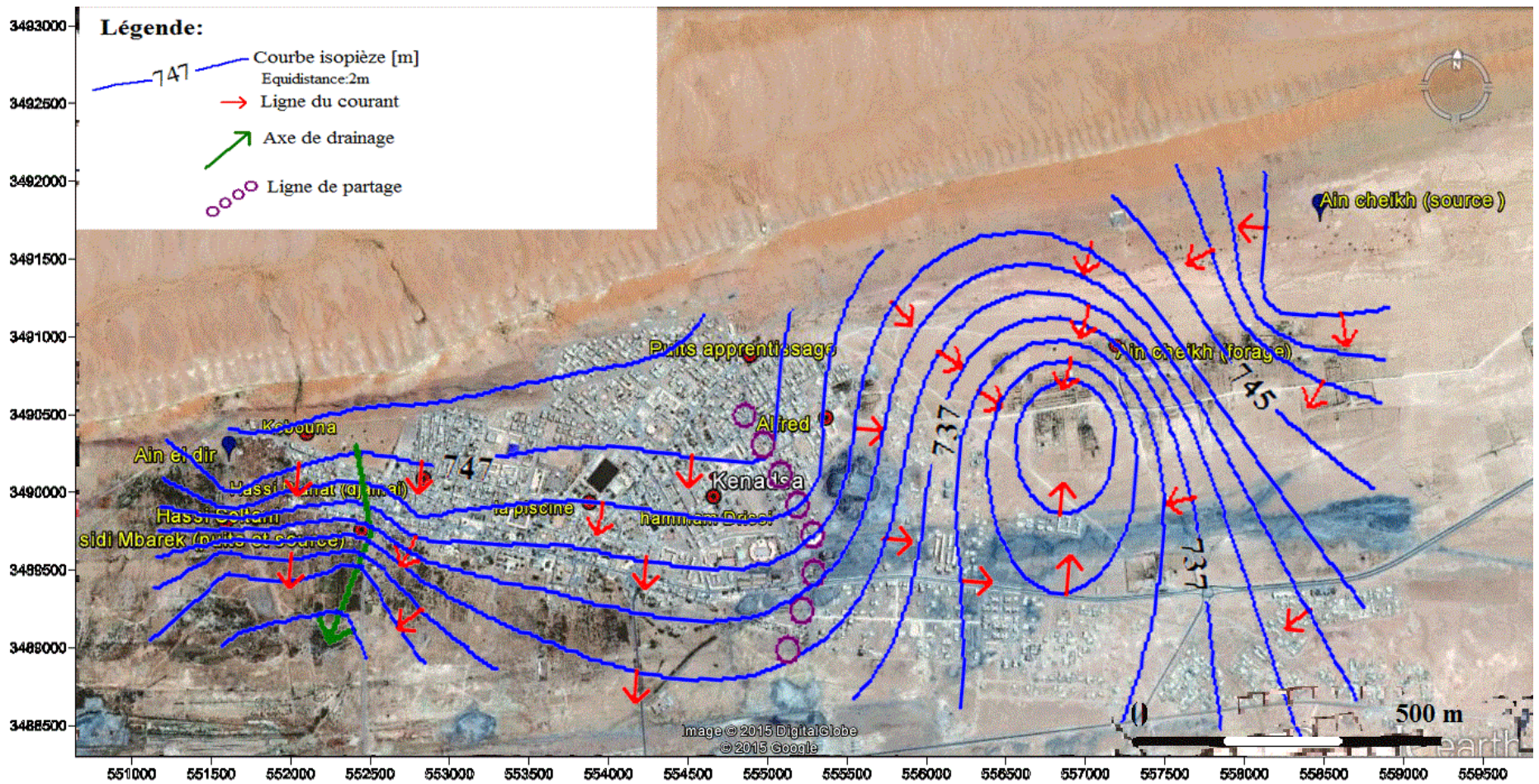


Figure III.6. Carte piézométrique de la zone d'étude

5.4. Calcul du gradient Hydraulique

$i = \frac{\Delta h}{l}$ où ΔH est la différence d'altitude en m, l = la distance entre les isopièzes en m et i le gradient hydraulique.

❖ A l'Est : $\Delta h = h_2 - h_1 \Rightarrow \Delta h = 743 - 331 = 12\text{m}$ et $l = 360\text{m}$

$$I = \frac{12}{360} = 0.033$$

Tableau.III.4. Les résultats de calcul des gradients hydrauliques.

	Δh en (m)	La distance (l) en m	Le gradient hydraulique (i)
A l'Est	$\Delta h = 743 - 331$ $\Delta h = 12$	360	$I = 0.033$ $I = 3.33\%$
Au Centre	$\Delta h = 747 - 739$ $\Delta h = 8$	780	$I = 0.010$ $I = 1\%$
A l'Ouest	$\Delta h = 747 - 737$ $\Delta h = 10$	330	$I = 0.030$ $I = 3\%$

D'après les calculs du gradient hydraulique on distingue :

- Une fort gradient hydraulique à l'Est et l'Ouest de la région d'étude indiqué par des isopièzes très rapprochés ce qui implique une zone de drainage (pompage excessif) à leur aval.
- Une faible gradient hydraulique au centre de la région étudié caractérisé par des isopièzes espacés.

CHAPITRE III - HYDROGEOLOGIE

III.6. Conclusion

Le Westphalien à Kenadsa abrite un system aquifère imposé par la lithologique alternative entre les grès et les argiles. Cette disposition est compliquée par les phénomènes structuraux (tectoniques).

La carte piézométrique, réalisée sur la base des 12 ouvrages (07 puits, 03 sources et 02 forages), permet de suggérer des sens d'écoulement différents.

On note un sens d'écoulement vers l'Ouest, assurant le jaillissement des sources au pied de la Première Barga. Puis les sens d'écoulement divergent vers l'Est et l'Ouest.

Les eaux souterraines se situent à de faibles profondeurs,(estimation de recharge).

IV.1 Introduction

L'hydrochimie a pour but la connaissance des caractéristiques chimique ou physico-chimiques des eaux souterraines des processus de leur acquisition et des loi qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous sol. Les eaux souterraines représentent une phase aqueuse dont la composition peut être très complexe étant donné son grand pouvoir dissolvant.

La plupart des eaux qui circulent en lessivant les terrains ne conservent en fait qu'une minéralisation réduite et qui varie en fonction du contexte géologique et du climat. La composition chimique d'une eau souterraine est fonction d'un certain nombre de phénomènes telles que la concentration, l'hydratation, l'oxydation, ect...

Dans ce qui suit, nous présenterons les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du secteur afin de confirmer leur origines, définir leur faciès chimique et de comparer et suivre leurs évolutions dans l'espace.

L'étude des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines étudiées s'est basée sur l'échantillonnage et l'analyse des eaux de douze (12) points d'eau.

Les prélèvements ont été effectués par nous même au cours de trois campagnes d'échantillonnages réalisées les 04, 11 et 12 Mai 2015.

L'analyse des eaux échantillonnées a concerné aussi bien, les éléments chimiques majeurs que les éléments chimiques indicateurs de pollution tels que les nitrates et l'ammoniaque.

Les analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de recherche N°25 de l'université de Abou Baker Belkaïd- Tlemcen, en mai 2015.

Les principaux résultats sont portés sur le tableau IV.1.

CHAPITRE IV - CONTEXTE HYDROCHIMIQUE

Tableau. IV.1. : présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des points d'eau prélevés (mai 2015)

N° d'ordre	éléments points d'eau	pH	T °C	CE $\mu\text{S/cm}$	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ +K ⁺ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	NH ₃ ⁻ mg/L	CO ₂ mg/L
F1	Ain cheikh(F)	7,2	24,5	7310	513	273	1386,675	46,36	1924,1	98	998,10	0,42	128
P1	kebouna	7,75	24,6	5910	232,4	134,64	1391,034	40,26	1455,5	100	952,11	0,54	108
P2	Hassi Planat (djamai)	7,43	24,5	5640	316,6	158,04	1183,149	91,5	1633	103	418,76	0,38	160
P3	Hassi Soltani	7,48	24,5	7400	336,6	172,44	1680,789	85,4	1633	116	1499,37	0,47	220
P4	Ain sidi Mbarek(P)	7,41	24,6	6570	304,6	237,24	1478,169	64,66	1455,5	98	1339,10	0,71	192
S1	Ain cheikh(S)	7,83	24,6	18030	1086,2	548,28	3735,993	37,82	5822	232	672,49	0,71	164
P5	Alfred	7,75	24,5	6880	432,8	299,52	1377,312	48,8	1633	78	1263,25	0,28	180
S2	Ain Edir	7,87	24,6	4470	224,4	122,16	971,346	36,6	969,15	61	962,81	0,19	184
F2	Hammam Drissi	7,35	24,7	5660	360,6	215,64	1121,709	67,1	1065	123	1422,13	0,49	128
S3	Ain sidi Mbarek(S)	7,4	24,5	7580	340,6	220,44	1727,589	61	1810,5	103	1342,56	0,71	136
P6	la piscine	7,63	24,6	8960	408,8	297,12	2037,372	62,22	2165,5	137	1533,00	0,31	152
P7	Puits apprentissage	7,7	24,7	9910	569	335,4	2081,115	64,66	2556	133	1442,69	0,35	200

IV.2 Paramètres organoleptiques

Les caractères organoleptiques sont des paramètres qui doivent être détectés au moment du prélèvement : certaines odeurs peuvent, par exemple, disparaître pendant le transport, où l'aspect de l'échantillon se modifie au cours du transport et du stockage (apparition d'une coloration, de précipité).

2.1 La couleur

La coloration d'eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques.

La couleur de l'eau est généralement due à la présence de substances organiques colorées (principalement des acides humiques et fulviques) provenant d'humus du sol.

Selon les résultats obtenus de l'analyse, les eaux de différents points d'eau sont dans l'ensemble incolores sauf le point d'eau (p6) qui illustre la source de Ain cheikh (valeurs non portées dans le tableau .IV.1) (voir annexe)

2.2. L'odeur

Dans les eaux souterraines, les odeurs proviennent, soit des produits chimiques, soit de la matière organique en décomposition, soit des protozoaires, ou bien des organismes aquatiques. L'odeur qui est due à la présence simultanée ou de plusieurs produits peut être plus intense que la somme des odeurs dues à chaque constituant.

Dans notre secteur d'étude toutes les eaux prélevées ne présentent pas d'odeur.

2.3. Le goût

D'une façon générale, il est bien difficile de porter un jugement sur la qualité d'une eau par l'évaluation de la saveur. En dehors de la salinité, une saveur désagréable peut révéler la présence de substance indésirable dont il importerait de préciser l'origine. C'est le cas en particulier de certaines saveurs amères, douces et sucrées décelables à la dégustation et du goût imputable à des concentrations très faibles de substances fortement sapides.

Dans les eaux prélevées et analysées de notre région n'y a pas de goût.

2.4. La turbidité

La turbidité d'une eau est due à la présence de particules en suspension, elle peut aussi être due à la présence de particules inorganiques. Une forte turbidité peut protéger les micro-organismes des effets de la désinfection et stimuler la croissance bactérienne.

La valeur de la turbidité varie en fonction de la nature géologique de point d'eau, généralement les eaux de la région de Kenadsa présentent une turbidité inférieure à la valeur acceptable préconisée par la norme (5 NTU). Seulement l'eau du puits S2 (la source de Aïn cheikh) est trouble (annexe01)

IV.3 Etude des paramètres physiques

3-1 le pH

Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité, et à l'exception de rejets industriels particulier, il est rare que le pH soit une contre indication à la potabilité.

Le pH des eaux naturelles est lié à la nature géologique des terrains traversés.

Les eaux évoluant en milieu carbonaté ont un pH élevé, alors que celles provenant de terrains pauvres en calcaires ou siliceux ont un pH voisin de 7 de quelques fois un peu inférieur.

Le pH représente l'état de l'équilibre carbonique. Le CO_2 libre dissous dans l'eau forme un acide faible qui abaisse le pH ;il réagit avec les bases pour former des carbonates acides, pratiquement insoluble, et des bicarbonate très solubles.

Selon la teneur en calcium et en magnésium ; le pH remonte au fur et à mesure de la neutralisation du CO_2 par l'une ou l'autre base.

Pour nous eaux échantillonnées, le pH varie de 7.20 à 7.87

3-2 La Température

La température naturelle joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et surtout des gaz ; elle régit la quantité d'oxygène dissout dans l'eau. Plus l'eau est chaude moins l'oxygène est capable de se maintenir en solution et le manque d'oxygène et l'un des indices de la pollution thermique.

Pratiquement, la température de l'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé de l'homme. Cependant une température supérieure à 15°C favorise le développement des micro-organismes pathogène en même temps qu'elle peu intensifier la fermentation qui agit comme pollution additionnelle diminuant la teneur en «oxygène dissout ».

Les variation brusques et soudaines de la température d'une eau doivent inciter a une enquête sérieuse pour vérifier si un mélange s'est produit avec des eaux d'autre origines.

Pour les eaux étudiées, la température des prélèvements à la source varie de 24.5°C à 24.7°C.

3-3 La conductivité

La conductivité d'une eau est conductance d'une colonne d'eau compris entre deux électrodes métalliques de 1 cm², séparées l'une de l'autres de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique.

La mesure de ce paramètre permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale et d'en suivre l'évolution. Donc la conductivité d'une eau naturelle est fonction de la teneur en sels électrolysables dissous.

Tableau. IV.2. Relation entre la minéralisation et la conductivité (Rodier J., 2009)

Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation
$CE < 100$	Très faible
$100 < C < 200$	Faible
$200 < C < 333$	Moyenne
$333 < C < 666$	Moyenne accent
$666 < C < 1000$	Important
$C > 1000$	Elevée

En ce qui concerne les eaux étudiées, on constate que la valeur de la conductivité varie de 4470 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au point n°8 (S3) (la source d’Ain el dir) à 18030 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au point d’eau n°6 (S2) (source d’Ain cheikh). Ces conductivité sont supérieur à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ceci implique une minéralisation élevée en fonction de la géologie des terrains traversés.

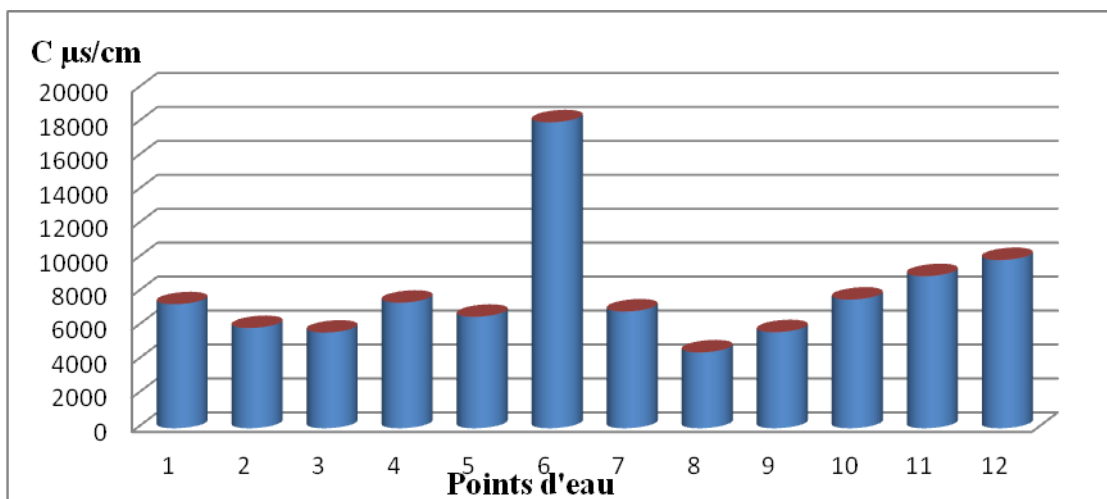


Figure IV.1. Histogramme de variation de la conductivité électrique $\mu\text{S}/\text{cm}$

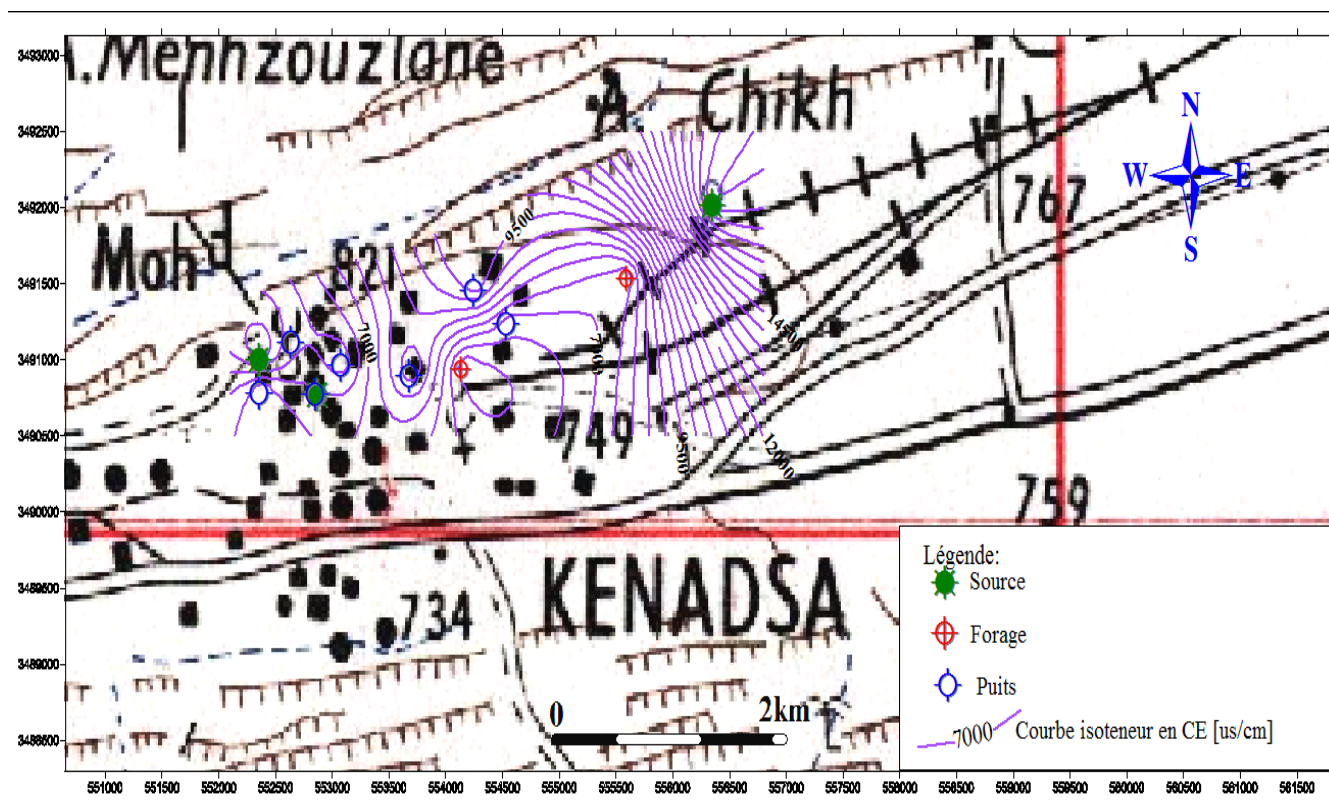


Figure IV.2. Carte des courbes d’isoteneur de conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

La carte d’isoteneur en conductivité indique une augmentation des teneurs de l’est vers l’ouest c’est-à-dire l’eau est chargée par les sels dissous pendant leur circulation dans les formations encaissantes.

3.4 La minéralisation

La minéralisation des eaux souterraines dépend généralement des terrains traversés, principalement des différentes couches géologiques traversées ainsi que la charge physico-chimique et biologique des eaux d’infiltrations.

D’une façon générale, elle est plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux superficielles. Les concentrations en résidu secs sont faibles lorsqu’il s’agit de roches granitiques, de sables siliceux et plus élevées dans le cas de roches sédimentaires (RODIER, 2009).

Les eaux très minéralisées, du fait de leur teneur en sodium, en calcium, en magnésium, en chlorures, en sulfates et en hydrogénocarbonates, semblent bien contribuer à l’homéostasie de l’homme et surtout de l’enfant ; cependant, elles peuvent poser des problèmes endocriniens très complexes (RODIER, 2009).

La minéralisation est calculée à partir de la conductivité.

Tableau IV.3. Le calcul de la minéralisation à partir de la conductivité (RODIER J., 2009)

Conductivité (µS/cm)	Minéralisation (mg/l)
Conductivité < 0	M= Conductivité *1.365079
50< Conductivité<166	M= Conductivité *0.947658
166< Conductivité<333	M= Conductivité *0.769574
333< Conductivité<833	M= Conductivité*0.715920
833< Conductivité<10000	M= Conductivité*0.758544
Conductivité>10000	M= Conductivité*0.850432

Tableau IV.4. La minéralisation des eaux étudiées

points d'eau	Désignation	Conductivité (µS/cm)	minéralisation (mg/l)
F1	Ain cheikh(F)	7310	5544,96
P1	Kebouna	5910	4483,00
P2	Planat (djamai)	5640	4278,19
P3	Hassi Soltani	7400	5613,23
P4	Aïn sidi Mbarek(P)	6570	4983,63
S1	Aïn cheikh(S)	18030	15333,29
P5	Alfred	6880	5218,78
S2	Ain edir	4470	3390,69
F2	hammam Drissi	5660	4293,36
S3	Ain sidi Mbarek(S)	7580	5749,76
P6	la piscine	8960	6796,55
P7	Puits apprentissage	9910	7517,17

3-5 L'alcalinité

L'alcalinité d'une eau est liée à la présence de bases fortes CO_2 et OH et de bases faible HCO_3 . Elle est toujours en relation direct avec le pH. On distingue :

- Le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) : il représente la somme des bases (forte et faible).
- Le Titre Alcalimétrique (TA) : il concerne les bases fortes lorsque le pH est supérieur à 8,3.

Pour les eaux étudiées, le TA est égale à 0 du fait que le pH ne dépasse pas 8.3.

Le TAC varie de 3°F au puits n°8 à 7.5°F au puits n°3(Ain sidi Mbarek).

3-6 La dureté totale

La dureté d'une eau est un caractère naturel liée au lessivage des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium.

CHAPITRE IV - CONTEXTE HYDROCHIMIQUE

On peut considérer qu'une eau ayant une dureté inférieure à 15°F (1°F=4mg de Ca ou 2.4 mg de Mg) par litre est une eau douce et qu'au dessus de 30°F, il s'agit d'une eau dure ou plus chargé en calcaire.

Une eau trop dure constitue un risque important d'entartage des canalisations.

La dureté totale est la somme de la dureté calcique et de la dureté magnésienne.

$$\text{DHT (°F)} = (\text{r Ca}^{++} + \text{r Mg}^{++}) \times 5$$

avec

$$1 \text{ meq/l} = 5^\circ\text{F} = 50 \text{ mg/l de CaCO}_3.$$

Tableau IV.5. Classification des eaux souterraines selon la dureté totale

Dureté (°F)	0 – 3	3 – 15	15 – 30	> 30
Eau	Très douce	Douce	Dure	Très dure

Au niveau de notre secteur d'étude, la valeur de la dureté des eaux varie de 108°F au Point d'eau n°8 à 500°F au point d'eau n°6

L'ensemble des eaux analysées présentent une dureté supérieure à 200°F.

Cette dureté relativement élevée résulte principalement de la provenance et circulation des eaux dans les formations carbonatées ainsi que de l'influence notable des encroutements calcaires.

IV.4. Etude des paramètres chimique majeurs

Le contrôle de la qualité des analyses chimiques est assuré par la balance ionique qui permet de comparer la somme des cations et la somme des anions.

Le calcul de la balance ionique est donné par la formule suivant :

$$\text{BI} = \frac{\sum r \text{ cations} - \sum r \text{ anions}}{\sum r \text{ cations} + \sum r \text{ anions}} \times 100$$

On peut considérer une analyse comme :

- bonne pour BI < 2

- acceptable pour $2 < BI < 5$
- mauvaise pour $BI > 5$

Tableau IV.6. Calcul de la balance ionique pour les eaux étudiées

les points d'eaux	r cation meq/l	r anion meq/l	BI %	L'analyse
Ain cheikh	94,6225	73,1	12,83	mauvaise analyse
Kebouna	69,2078	59,1	7,88	mauvaise analyse
Hassi Planat (djamai)	68,4383	56,4	9,64	mauvaise analyse
Hassi soltani	87,2263	74	8,20	mauvaise analyse
Ain sidi Mbarek	84,2723	65,7	12,38	mauvaise analyse
Ain cheikh	224,5331	180,3	10,93	mauvaise analyse
Alfred	92,5104	68,8	14,70	mauvaise analyse
Ain el dir	53,7782	44,7	9,22	mauvaise analyse
Hammam Drissi	73,3903	56,6	12,92	mauvaise analyse
Ain sidi Mbarek	92,9863	75,8	10,18	mauvaise analyse
la piscine	113,1124	89,6	11,60	mauvaise analyse
Puits Apprentissage	125,7705	99,1	11,86	mauvaise analyse

On remarque que toutes les eaux présentent une mauvaise analyse ; avec une balance ionique de 7.88% à 14.70%

4.1. Etude des principaux cations et anions

L'analyse chimique a concerné les cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et les anions : Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-

A. Les Cations

☒ Le Calcium (Ca^{2+})

Cet élément est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique.

Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), qui sont facilement solubles.

Les teneurs en Ca^{2+} sont comprises entre 224.4 et 1806.2 mg/L dans nos eaux.

La carte de (Figure IV.3.) permet de distinguer une augmentation de Ca^{2+} en allant vers l'est de la région de Kenadsa par exemple le point d'eau (S2) donne une valeur maximale de 1086.2mg/L ; il est près de la formation crétacée mais en allant de l'Est vers l'Ouest, on constate une diminution de la valeur de Ca^{2+} ; par exemple la très faible teneur se trouve à la source S3 avec une valeur de 224.4mg/L. Les teneurs en Ca^{2+} sont issues des formations du cénomaniens marne et l'argile gypsifère.

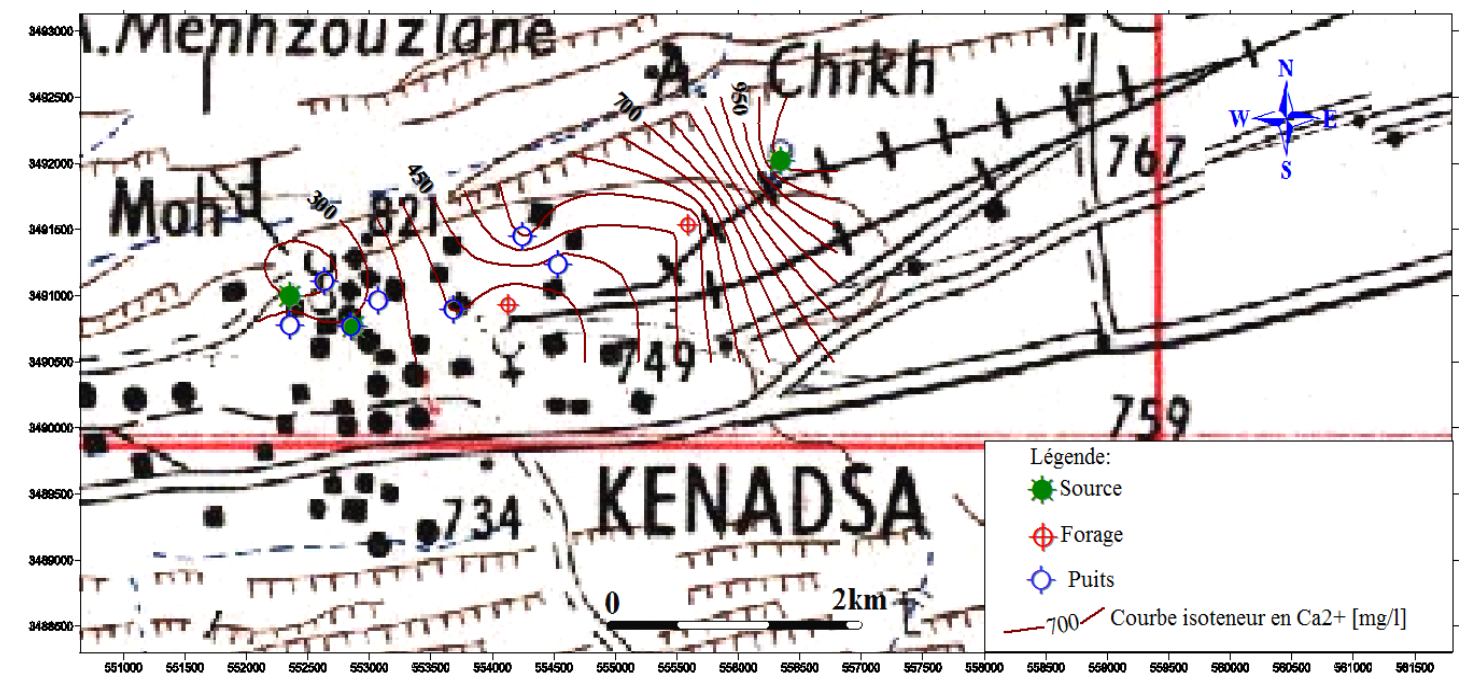


Figure IV.3. : Carte en courbe isoteneur de Ca^{2+} (campagne mai 2015).

☒ Magnésium (Mg^{2+})

Dans les formations carbonatées (les calcaires, les calcaires dolomitiques et les dolomies), la concentration en magnésium est contrôlée par les équilibres avec les minéraux carbonatés. Le magnésium est un élément prédominant dans les eaux drainant des aquifères contenant des carbonates magnésiens comme la dolomie.

Les teneurs en Mg^{2+} de nos eaux sont comprises entre 122.16 et 548.28mg/L. La valeur la plus élevée de la teneur en Mg^{2+} est localisé à l'est au niveau de S2 avec une teneur de 548.28mg/L, une valeur minimale de 122.16mg/L au niveau de S3.

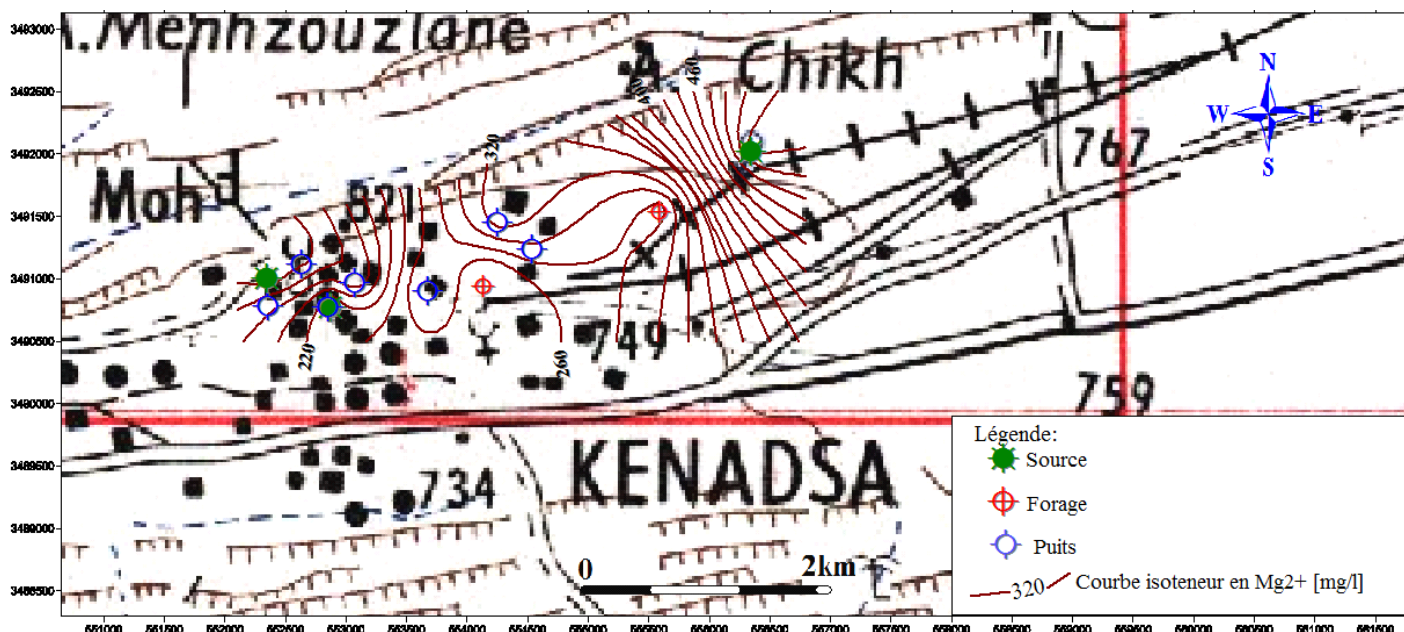


Figure IV.4. : Carte en courbe isoteneur de Mg^{2+} (campagne mai 2015).

Le sodium et le potassium (Na^+ , K^+)

Le sodium et le potassium sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportion variable. Le sodium peut provenir du lessivage des formations géologiques riches en $NaCl$; La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



Le potassium est beaucoup moins abondant que le sodium, rarement présent dans l'eau ; Il provient de l'altération des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques.

D'après la carte d'isoteneur en sodium et potassium (Figure IV.5.), les fortes teneurs se localisent à l'est de la zone d'étude au niveau de S2 (au niveau des sebkhas) d'une valeur de 3735.99mg/l, et une valeur minimal de 971.35 mg/l à S3.

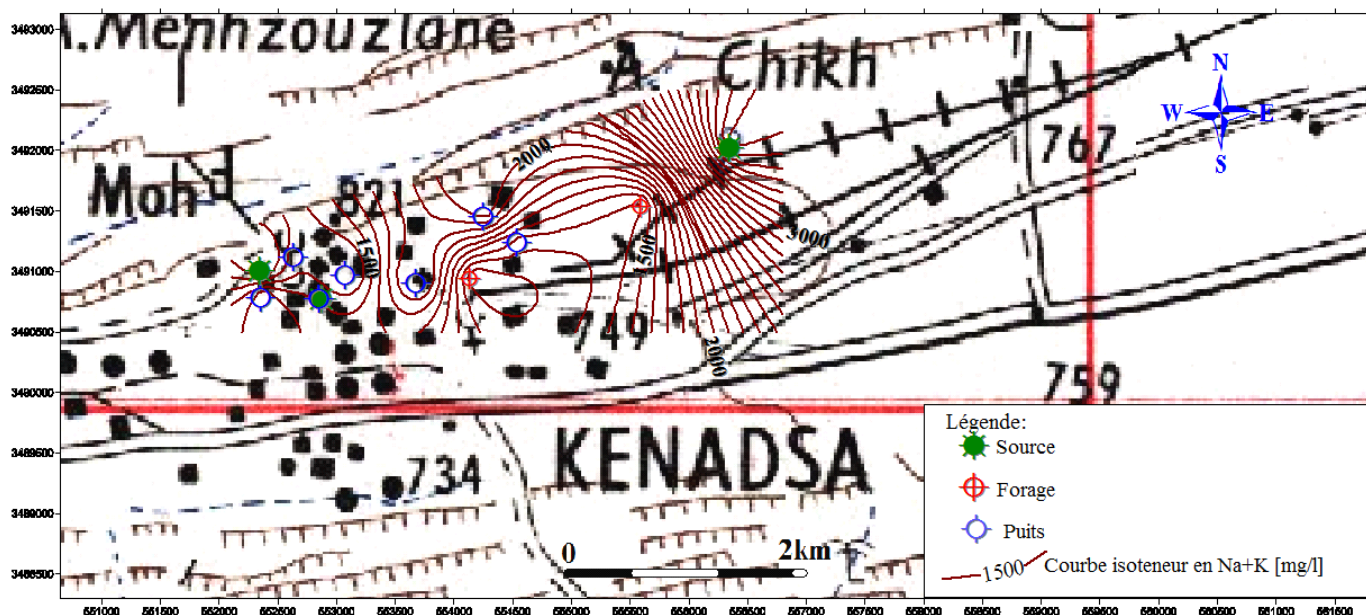


Figure IV.5. : Carte en courbe isoteleur de (Na+K) [mg/l]

B. Les Anions

⊕ Les Chlorures Cl⁻ :

Ils sont toujours présent dans les eaux naturelles en proportions très variables, leur présence dans l'eau résulte de :

- La dissolution des sels naturels par le lessivage de terrains salifères (gypseux, marneux ou argileux). La dissolution de ces sels étant très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argileuses.
- L'évapotranspiration intense dans les régions où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol, c'est le cas de la nappe phréatique de notre région d'étude.
- Soit par contamination par les eaux usées.

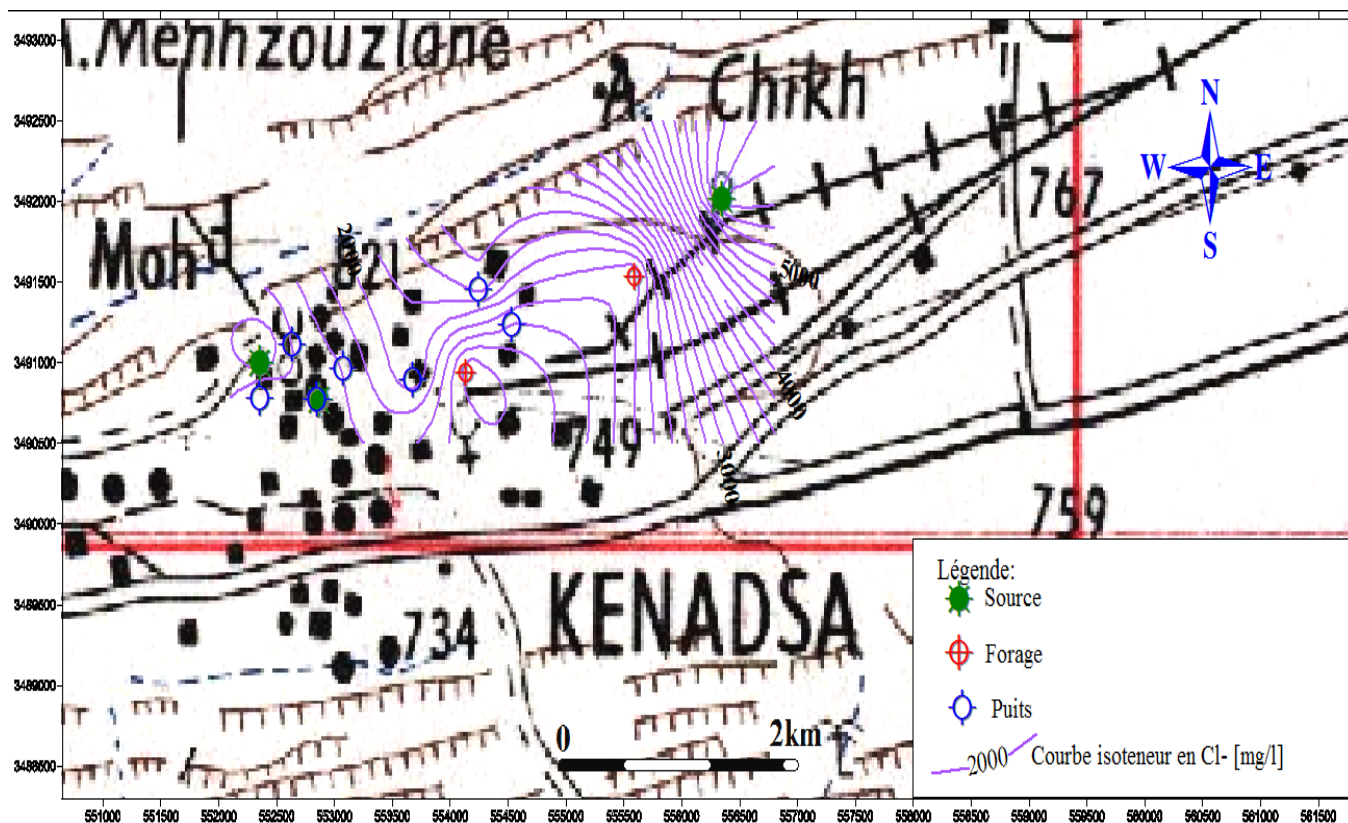


Figure IV.6. Carte en courbe isoteneur de Cl⁻ [mg/l]

D'après la carte d'isoteneur en chlorures (figure IV.6.), leur évolution est due au lessivage des terrains traversé ainsi que les fractures qu'ils existent et son direction. les fortes teneurs se localisent a l'est et l'ouest de la région d'une valeur maximal de 5822mg/l au secteur S2 , et au fur et à mesure on a une décroissement des teneur vers le centre de la région où les fractures sont plus au moins abondant

▣ Les sulfates (SO²⁻⁴) :

Les sulfates sont toujours présents dans l'eau naturelle, leur présence dans l'eau provient de :

- La dissolution des formations gypseuses.
- Légère solubilité de CaSO₄ avec des passées gypseuses.
- Des eaux usées industrielles.

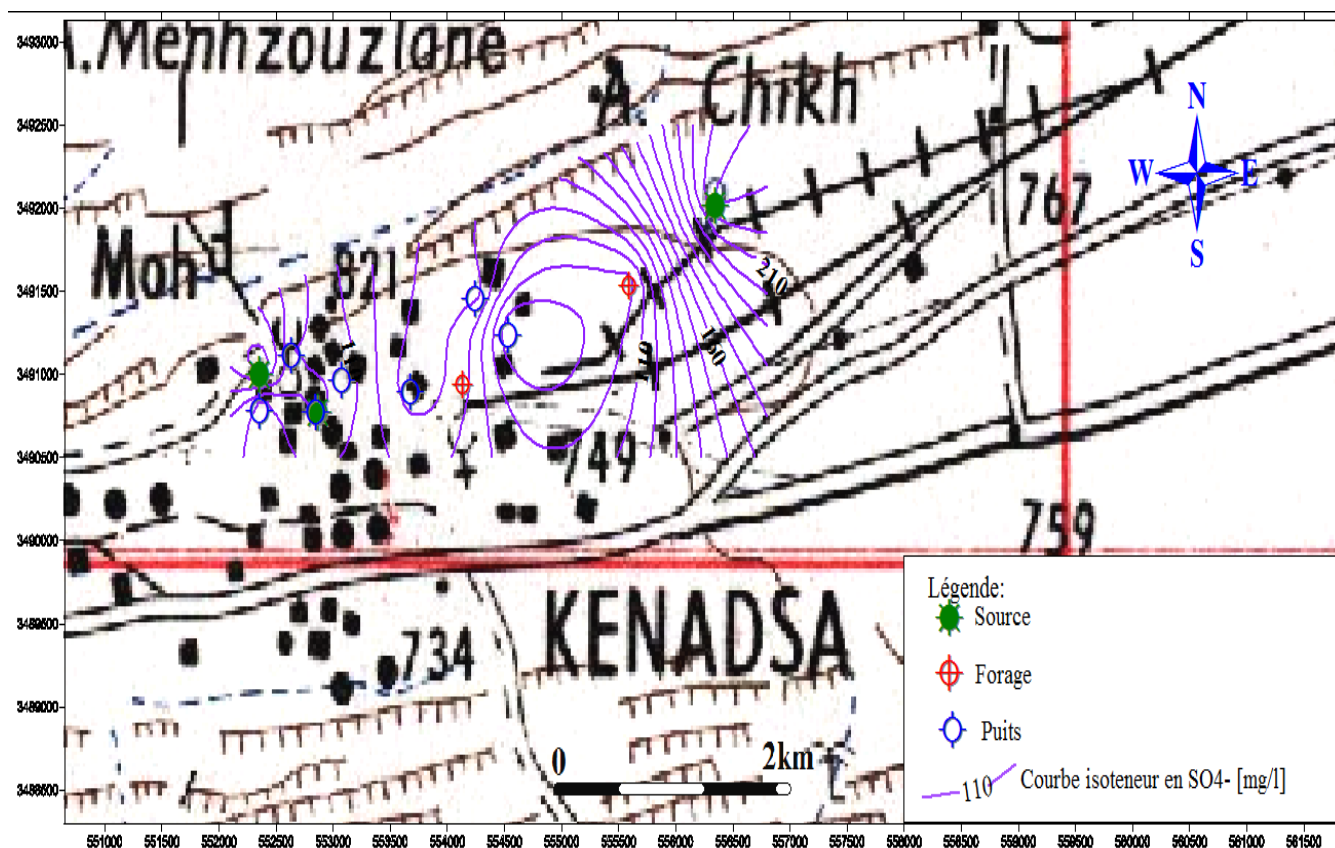


Figure IV.7. Carte en courbe isoteneur de SO₄²⁻[mg/l]

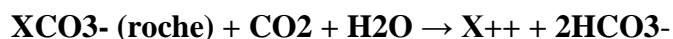
La carte d'isoteneur en sulfates (Figure IV.7.) montre que les fortes valeurs sont présentes à l'est de la région d'étude.

L'origine des sulfates dans les eaux est essentiellement liée à la nature lithologique des formations gypseuses, à leur solubilité, et à l'oxydation du soufre présent dans l'atmosphère.

■ Bicarbonates (HCO₃⁻) :

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées en fonction de la tension en CO₂, de la température, le pH de l'eau et la nature lithologique des terrains traversés.

Les bicarbonates sont le résultat de l'équilibre physicochimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon l'équation générale suivante :



La somme des équations de dissolution est donnée comme suit :

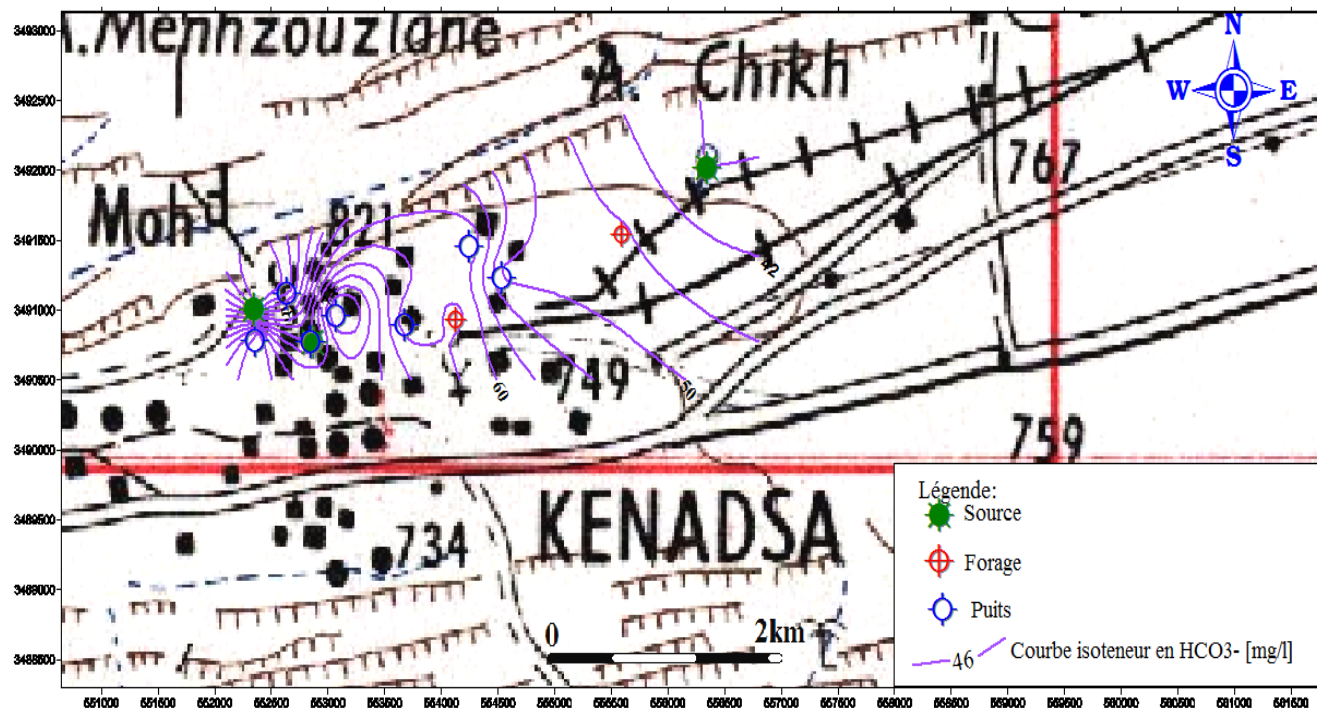
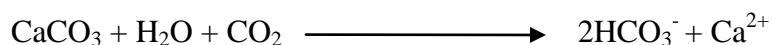


Figure IV.8. Carte en courbe isoteneur de HCO_3^- [mg/l]

L'analyse de la carte d'isoteneur en bicarbonates (Figure IV.8.) montre une augmentation des teneurs de l'est vers l'ouest, les forts valeurs se localisent à l'ouest au niveau de P2 d'une valeur maximal de 91.5mg/l, cette évolution due au lessivage des formation carbonatés

☒ Nitrates (NO_3^-)

L'ion nitrate (NO_3^-) est la forme le plus oxydée de l'azote. Les sources naturelles de nitrate sont principalement les eaux pluies et les interactions avec le sol et la végétation. Les sources anthropiques de nitrate sont nombreuses et sont essentiellement liées au lessivage des engrais et aux rejets domestiques et industriels.

La présence de nitrates dans les eaux de la nappe de Kenadsa, est un indice de pollution d'origine entropique.

Les teneurs en nitrates sont comprises entre 672.49 à 1533 mg/l. De fortes valeurs ont été observées au niveau du puits de la piscine .

La carte d'isoteneur en nitrates (Figure IV.9.) montre des concentrations très élevés, elles sont dues aux rejets des eaux usées, et la fort perméabilité du toit de l'aquifère (nappe libre).

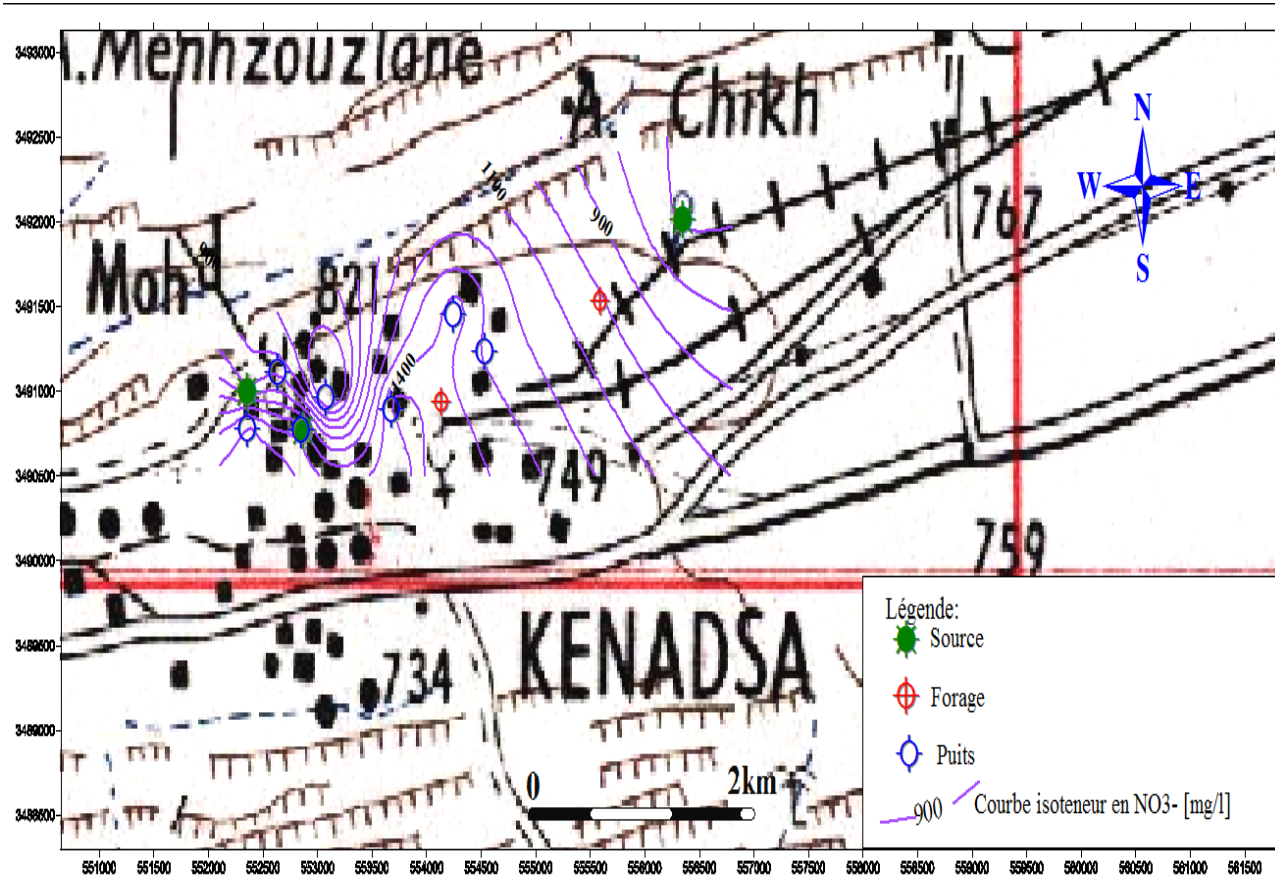


Figure IV.9. Carte en courbe isoteneur de NO_3^- [mg/l]

4.2 Etude des Rapports Caractéristiques

Elle est basée sur l'étude des trois rapports suivants :

$$r (\text{SO}_4^{--}/\text{Cl}^-) ; r (\text{Na}/\text{Cl}) \text{ et } r (\text{Mg}/\text{Ca})$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7. Calcul des rapports caractéristiques.

Points d'eaux	Désignation	r Mg/Ca	r SO4/Cl	r Na/Cl
F1	Ain cheikh (forage)	0,89	0,04	0,65
P1	Kebouna	0,97	0,05	0,75
P2	Hassi Planat (djamai)	0,83	0,05	1,29
P3	Hassi soltani	0,85	0,05	1,71
P4	Ain sidi Mbarek	1,30	0,05	1,27
S1	Ain cheikh (source)	0,84	0,03	0,47
P5	Alfred	1,15	0,04	0,80
S2	Ain el dir	0,91	0,05	0,71
F2	hammam Drissi	1,00	0,09	1,37
S3	Ain sidi Mbarek	1,08	0,04	1,13
P6	la piscine	1,21	0,05	1,14
P7	Puits apprentissage	0,98	0,04	1,02

4.2.1 Rapport caractéristique : rSO_4^{2-}/rCl^-

Les rapports sont généralement inférieurs à l'unité pour tous les points d'eau de notre région d'étude.

Ce qui montre une concentration élevée des Chlorures, probablement dû à la dissolution des sels par le lessivage des terrains salifères (évaporation en climat hyperaride) et des rejets des eaux usées d'origine domestique et industrielle.

4.2.2 Rapport caractéristique : rNa^+/rCl^-

On constate que les valeurs obtenues sont supérieures à l'unité, sauf pour F1, P1, S1, P5, S2, ce qui détermine la prédominance des chlorures sur le sodium.

4.2.3 Rapport caractéristique : rMg^{2+}/rCa^{2+}

Ce rapport est inférieur à l'unité pour la majorité des points d'eau, P1, P2, P3, P4, P6, P8, P12, il détermine la prédominance du calcium sur le magnésium. Les autres points P5, P7, P9, P10, P11, présentent un rapport supérieur à l'unité, ce qui implique la prédominance du Mg, qui provient du lessivage du faciès gypseux, ou dans les eaux drainant des aquifères qui constituent par les dolomies.

4.3 Faciès hydrochimiques

Les faciès ainsi que les principaux sous faciès hydrochimiques des eaux échantillonnées ont été déterminés à partir de leurs teneurs en milléquivalent/litre (des quantités en réaction) et leurs formules caractéristiques (tableau IV.8.et tableau IV.9.).

Tableau IV.8. Résultats des analyses chimiques en r (meq/l).

les points d'eaux	rCa ⁺² (meq/l)	rMg ⁺² (meq/l)	r Na ⁺²⁺ + K ⁺ (meq/l)	r Cl ⁻ (meq/l)	rSO ₄ ⁻²⁻ (meq/l)	rHCO ₃ ⁻ (meq/l)	rNO ₃ ⁻ (meq/l)
F1	25,65	22,75	46,22	54,2	2,04	0,76	16,10
P1	11,62	11,22	46,37	41	2,08	0,66	15,36
P2	15,83	13,17	39,44	46	2,15	1,5	6,75
P3	16,83	14,37	56,03	46	2,42	1,4	24,18
P4	15,23	19,77	49,27	41	2,04	1,06	21,60
S1	54,31	45,69	124,53	164	4,83	0,62	10,85
P5	21,64	24,96	45,91	46	1,63	0,8	20,38
S2	11,22	10,18	32,38	27,3	1,27	0,6	15,53
F2	18,03	17,97	37,39	30	2,56	1,1	22,94
S3	17,03	18,37	57,59	51	2,15	1	21,65
P6	20,44	24,76	67,91	61	2,85	1,02	24,73
P7	28,45	27,95	69,37	72	2,77	1,06	23,27

Tableau IV.9. Faciès caractéristiques des échantillonnées prélevés.

points d'eau	Anions	Cations	Faciès des eaux
F1	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > r Mg ⁺²	chloruré- sodique
P1	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > r Mg ⁺²	chloruré-sodique
P2	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > r Mg ⁺²	chloruré-sodique
P3	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > r HCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > r Mg ⁺²	chloruré-sodique
P4	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > r Mg ⁺² > rCa ⁺²	chloruré-sodique
S1	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > rMg ⁺²	chloruré-sodique
P5	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rMg ⁺² > r Ca ⁺²	chloruré-sodique
S2	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > rMg ⁺²	chloruré-sodique
F2	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > rMg ⁺²	chloruré-sodique
S3	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rMg ⁺² > r Ca ⁺²	chloruré-sodique
P6	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rMg ⁺² > r Ca ⁺²	chloruré-sodique
P7	r CL ⁻ > rNO ₃ ⁻ > rSO ₄ ⁻²⁻ > rHCO ₃ ⁻	r Na ⁺ + K ⁺ > rCa ⁺² > rMg ⁺²	chloruré-sodique

La totalité des eaux présentent un faciès chloruré-sodique.

Par ailleurs pour les échantillons au faciès chloruré-sodique la classification hydrochimiques permet de faire ressortir une prédominance variable entre les cations Ca^{+2} et Mg^{+2} et les anions SO_4^{-2} déterminant l'existence de deux sous faciès. On distingue :

- ☞ Un sous- faciès sulfaté calcique aux points : : F1, P1, P2, P3, S1, F2, S2, P7
- ☞ Un sous-faciès sulfaté magnésien aux points : S3, P4, P5, P6.

Pour mieux connaître les principaux aspects hydrochimiques, il convient d'interpréter les résultats par des représentations graphiques qui nous permettent de comparer facilement plusieurs eaux entre elles.

4.4. Représentation graphique

L'objectif principal d'une représentation graphique est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique.

Les faciès chimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. La nécessité d'une comparaison aisée voire une classification des eaux naturelles nécessite l'utilisation des représentations graphiques. De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées parmi lesquelles on peut citer :

- Le diagramme de Piper,
- Le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff,
- Le diagramme de Stiff,

Dans cette étude, les trois représentations graphiques sont utilisées :

4.4.1. Le diagramme de Schöeller-Berkaloff

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff est une représentation graphique semi logarithmique sur laquelle les différents ions sont représentés sur l'axe des abscisses et la teneur réelle en mg/l sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique permet de visualiser le faciès des eaux analysées. Cette représentation permet aussi la détermination du faciès d'une eau.

En effet, le diagramme de Schöeller-Berkaloff indique pour chaque eau analysée la teneur moyenne (mg/l) en éléments majeurs de ces eaux, de comparer des éléments en traces et d'établir les faibles variations entre les éléments chimiques.

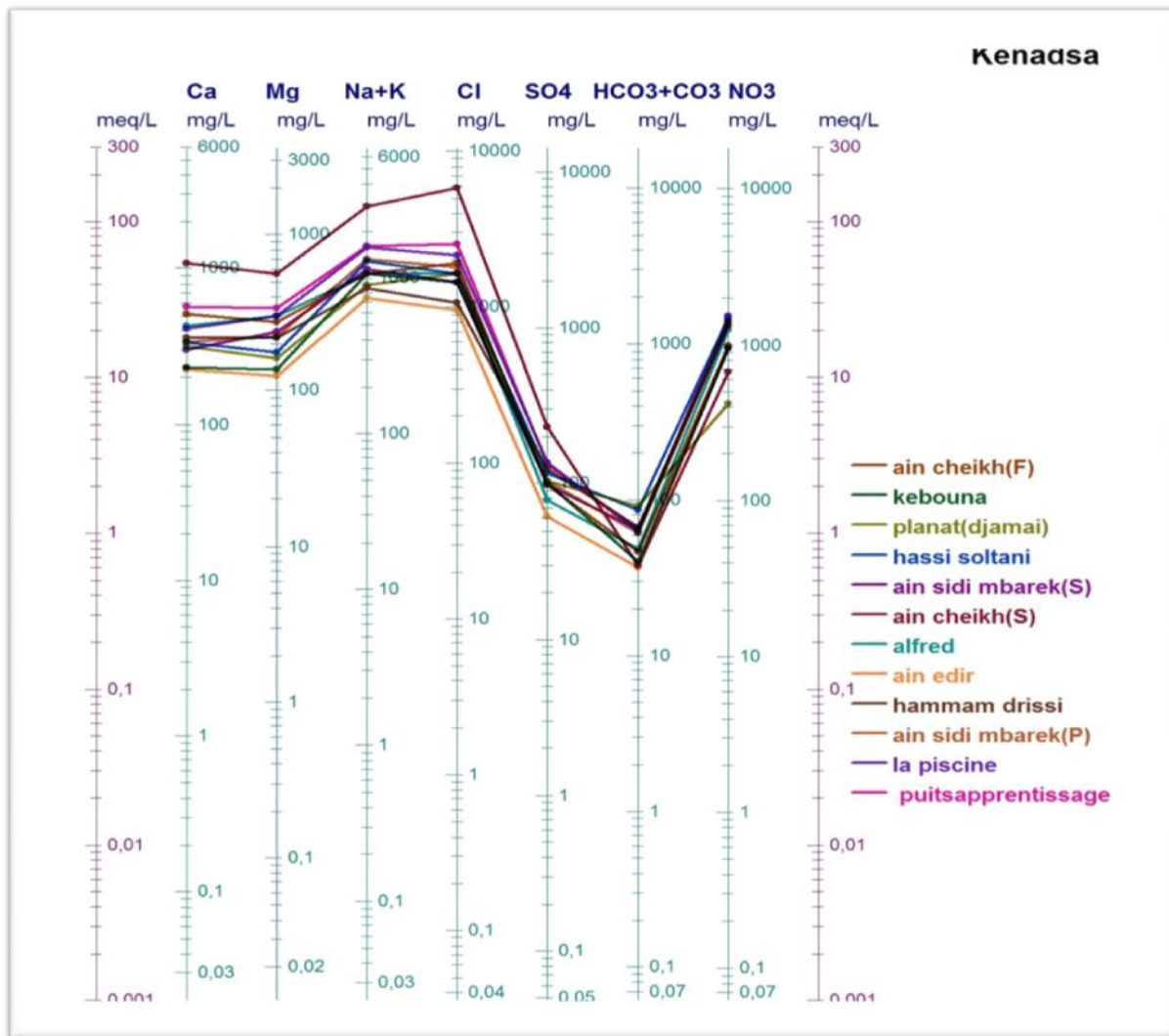


Figure IV.10. Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff.

L'interprétation des résultats des valeurs des analyses reportées sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (figure IV.10.) confirme le faciès et les sous faciès déterminés plus haut c'est-à-dire le faciès :

- ☞ Chloruré sodique et potassique.

4.4.2. Diagramme de Piper

Ce diagramme comporte un losange et deux triangles équilatéraux.

Cette méthode consiste à représenter sur les deux triangles les pourcentages des quantités en réactions (r %) de chaque cation et anion, ensuite les deux points sont reportés sur le losange en un seul point qui représente la famille chimique de l'eau.

L'avantage principal de ce digramme c'est qu'il permet une comparaison globale d'un grand nombre d'analyses d'une façon très simple.

La représentation des analyses nous a donné les mêmes résultats obtenus par la représentation sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff à savoir :

une eau Chloruré Sodique et Potassique.

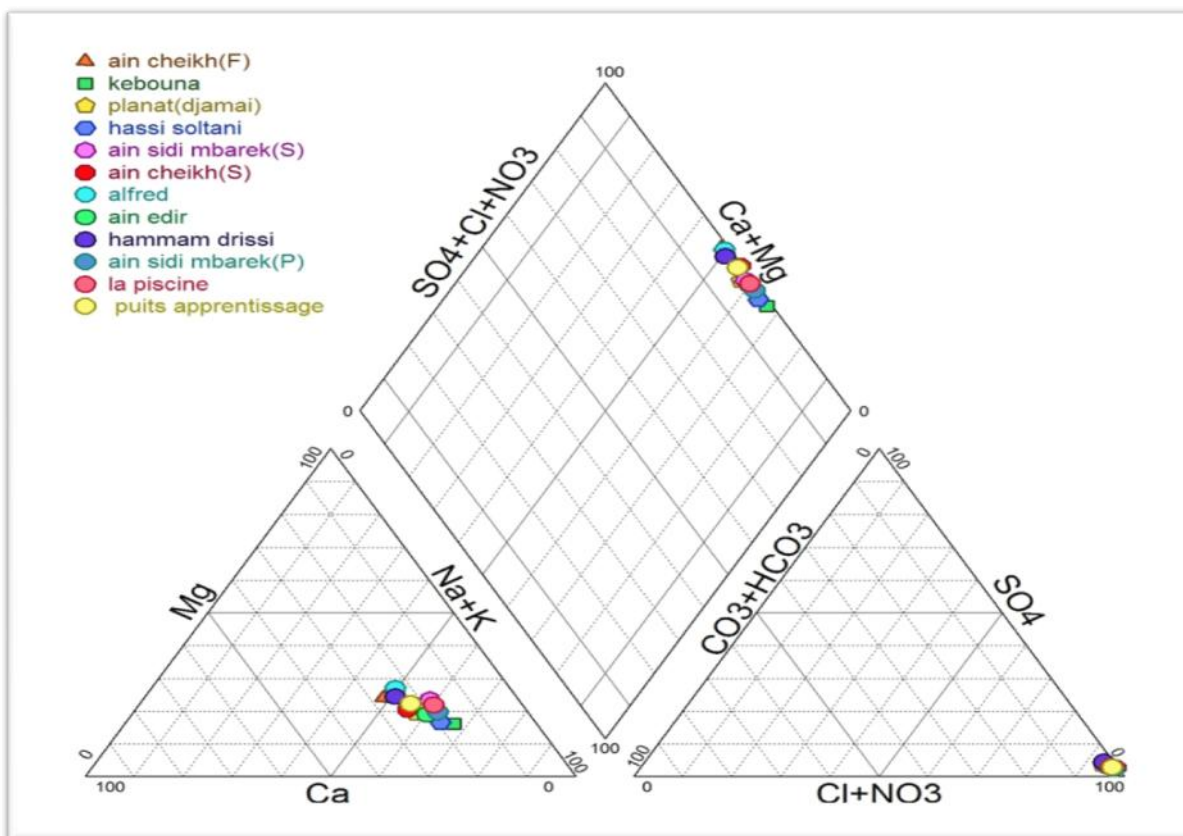


Figure IV.11. Représentation graphique des résultats sur le diagramme de Piper

Les résultats obtenus du diagramme de Piper (figure IV.11.) Confirme le faciès et les sous faciès déjà cités plus haut.

4.4.3. Diagramme de Stiff

Ce type de diagramme permet d'obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d'une famille d'eau donnée. Les données des analyses des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine. Les cations sont représentés à gauche ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} et Fe^{2+}) et les anions à droite (Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , NO_3^-).

Cependant comme ce diagramme ne peut faire que la représentation individuelle, on a choisi un échantillon représentatif dans chaque famille pour les illustrations.

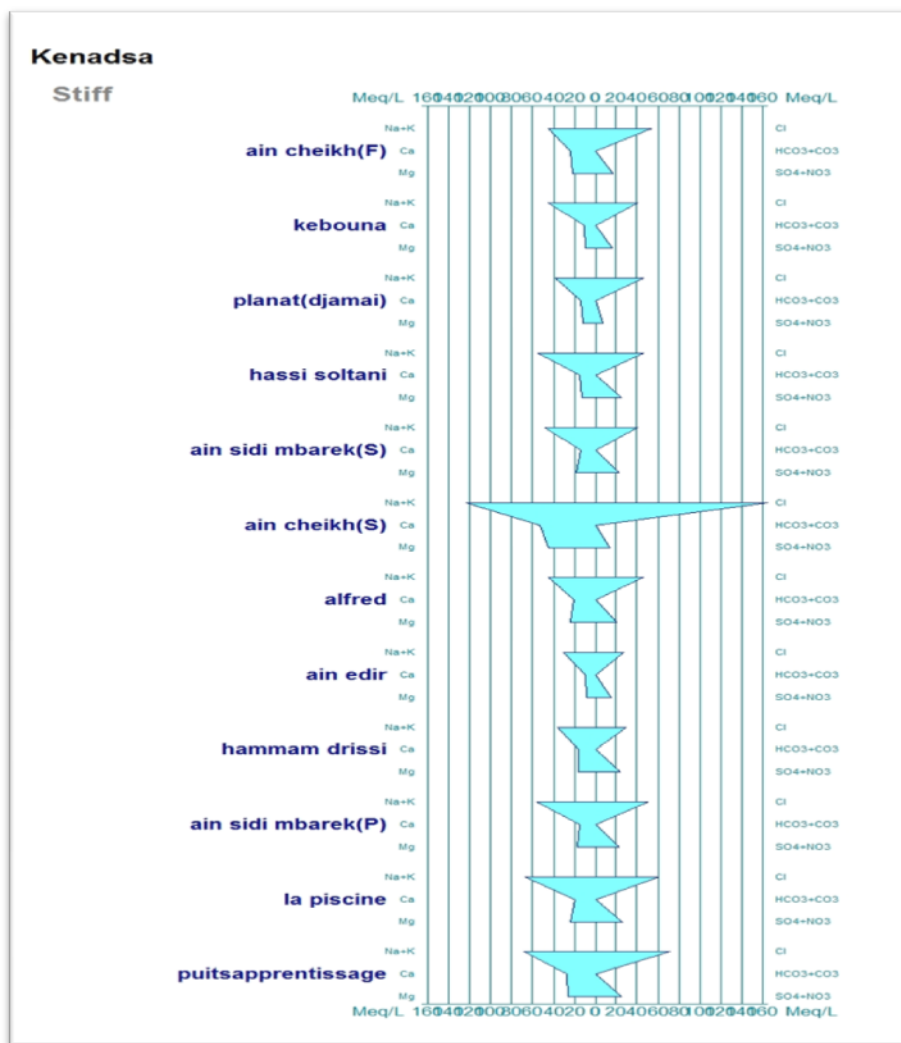


Figure IV.12. Représentation graphiques des résultats sur le diagramme de Stiff.

4.5. Indice de Saturation

Afin de mieux cerner les évolutions des eaux et les modifications chimiques qu'elles subissent dans les aquifères de surface, on recourt au calcul d'indices de saturation des minéraux (SI). L'utilisation de ces indices (précipitation/dissolution) est utile pour déterminer l'environnement géologique dans lequel percolent des eaux. Les SI sont définis par Chapel (Chapelle, 1993).

L'état thermodynamique du milieu aquifère par rapport à certains minéraux peut être déterminé par l'étude de leur indice de saturation et d'équilibre.

$$\text{SI} = \log (\text{IAP}/\text{K})$$

IAP : représente le produit de solubilité exprimé à l'aide des activités.

K : la constante d'équilibre relative à la dissolution du minéral.

Pour le cas de la calcite : $\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{+2} + \text{CO}_3^{-2}$

$$\text{IAP} = a\text{Ca}^{2+} \cdot a\text{CO}_3^{2-}$$

Donc le produit d'activité ionique est:

$$a\text{Ca}^{2+} = \text{activité de l'ion Ca}^{+2}$$

A l'état d'équilibre thermodynamique, le produit de solubilité de la calcite (KCaCO3) est :

$$\text{KCaCO}_3 = a\text{Ca}^{2+} \cdot a\text{CO}_3^{2-} / a \text{CaCO}_3$$

Alors, l'indice de saturation exprimé est :

$$\text{SI} = \log (\text{IAP}/\text{KCaCO}_3)$$

Si :

IS = 0 : l'eau est saturée vis-à-vis de la calcite

IS > 0 : l'eau est sursaturée par rapport à la calcite

IS < 0 : il montre que l'eau est sous-saturée vis-à-vis de la calcite

CHAPITRE IV - CONTEXTE HYDROCHIMIQUE

- ☞ Une valeur positive $SI > 0$ indique une sur-saturation de l'espèce minérale vis-à-vis du fluide considéré, donc une précipitation possible.
- ☞ Une valeur négative $SI < 0$ implique une sous-saturation de la solution en cette espèce minérale et sa possible dissolution.
- ☞ Une valeur neutre $SI = 0$, considérée comme un état d'équilibre (une saturation)

Les calculs d'indice de saturation sont effectués en utilisant la base thermodynamique la plus complète ; incluse dans le programme PhreeQC 2.10.

Ce programme est basé sur l'équilibre chimique de solutions aqueuses interagissant notamment avec des minéraux, et permet de déterminer les phases pouvant précipiter ou être dissoutes pour atteindre l'équilibre avec le fluide, ainsi que la prise en compte des effets d'un changement de température.

De la même manière, les indices de saturation vis-à-vis du gypse, de l'anhydrite, de l'aragonite, de la calcite, de la dolomite sont calculés.

Le calcul des indices de saturation a été obtenu en utilisant le logiciel Diagramme. Les résultats sont représentés dans le tableau IV.10.

Tableau. IV.10. : Indices de saturation des eaux souterraines de la zone étudiée.

Point d'eau	IS Calcite	IS Dolomite	IS Aragonite	IS Gypse	IS Anhydrite	IS Halite
Ain cheikh	-0.25	-0.42	-0.40	-1.42	-1.64	-4.41
Kebouna	-0.04	0.03	-0.19	-1.59	-1.81	-4.50
Hassi planat(djamai)	0.12	0.30	-0.02	-1.47	-1.69	-4.52
Hassi soltani	0.13	0.34	-0.01	-1.45	-1.67	-4.39
Ain sidi mbarek	-0.09	0.07	-0.24	-1.57	-1.79	-4.49
Ain cheikh	0.42	0.92	0.27	-1.00	-1.22	-3.56
Alfred	0.24	0.68	0.09	-1.58	-1.80	-4.48
Ain Edir	0.05	0.20	-0.09	-1.76	-1.98	-4.82
Hammam drissi	-0.05	0.04	-0.19	-1.38	-1.60	-4.74
Ain sidi mbarek	-0.10	-0.02	-0.24	-1.52	-1.74	-4.33
La piscine	0.18	0.58	0.03	-1.39	-1.61	-4.20
Puits apprentissage	0.38	0.89	0.23	-1.32	-1.54	-4.13

Les résultats obtenus dans le tableau IV.10. Montrent que les eaux étudiées sont sous-saturées par rapport au gypse et l’anhydrite et l’aragonite.

Nous remarquons que les indices de saturation de Gypse et d’Anhydrite se manifestent de la même façon, et cela est dû au temps de séjour (court) de l’eau en contact avec la roche.

On note aussi que ces eaux sont sursaturées par rapport à la calcite et dolomite dans la majorité des points d’eau. Ces eaux sont sous-saturée par rapport au l’halite qui indique une dissolution important de sodium.

4.6. Indice Chloro-Alcalin (ex i.e.b : indice d’échange de bases)

C’est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l’eau.

Il est obtenu à l’aide de la relation suivante :

$$I.C.A. = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{Cl}^-}$$

Si :

I.C.A. =0 il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l’eau et de l’encaissant.

I.C.A. <0 l’encaissant libère le sodium et le potassium et fixe le calcium.

I.C.A. >0 l’encaissant libère le calcium et fixe le sodium et le potassium.

Les valeurs de l’indice d’échange de base sont présentées dans le tableau IV.11.

Tableau IV.11. Valeurs des indices d’échange de base des eaux du secteur d’étude

Les points d'eau	rCl	r(Na+k)	I.E.B
F1	54,2	46,22	0,15
P1	41	46,37	-0,13
P2	46	39,44	0,14
P3	46	56,03	-0,22
P4	41	49,27	-0,20
S1	164	124,53	0,24
P5	46	45,91	0,00
S2	27,3	32,38	-0,19
F2	30	37,39	-0,25
S3	51	57,59	-0,13
P6	61	67,91	-0,11
P7	72	69,37	0,04

La majorité des valeurs sont négatives (07 points d'eau), elles s'échelonnent de -0.11 à -0.25. Ceci traduit des échanges entre le calcium de l'eau avec les formations encaissantes tandis que le reste des points d'eau, avec un indice positive entre 0 à 0.25 indiquent que les eaux souterrains de la nappe étudiée échangent les ions Na⁺ et K⁺ contre les ions Ca²⁺ Mg²⁺ de l'encaissant.

IV.5.Traitement statistique des données hydrochimiques

Nous avons effectué une étude statistique par analyse en composant principale sur les douze échantillons prélevés.

Nous avons prise en considération les éléments majeurs suivants :

Ca²⁺, Mg²⁺, (Na⁺+K⁺), HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, ainsi que la conductivité et le pH.

5.1. Statistique élémentaire

L'étude statistique des échantillons est basée sur le calcul de leurs paramètres, Ces dernières sont présentes dans le Tableau IV.12.

Tableau IV.12. Les paramètres statistiques de la série

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃	CE(μS/cm)
Max	7,87	18030	1086,2	548,28	3735,99	91,5	5822	232	1533,00
Min	7,2	4470	224,4	122,16	971,346	36,6	969,15	61	418,7583333
Moyenne	7,57	7860,00	427,13	251,16	1681,02	58,87	2010,19	115,17	1153,86
VAR	0,0	12465581,8	53509,2	13435,4	534600,5	314,8	1628958,2	1812,5	124904,5
Ecart type	0,22	3530,66	231,32	115,91	731,16	17,74	1276,31	42,57	353,42
Cv	0,03	0,45	0,54	0,46	0,43	0,30	0,63	0,37	0,31

5.2. Matrice de corrélations

Dans le tableau IV.13. Figurent les valeurs des coefficients de corrélation entre les teneures des différents éléments majeurs.

Tableau IV.13. Matrice de corrélation des éléments chimiques

	PH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na+K	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CE
PH	1								
Ca ²⁺	0,25	1							
Mg ²⁺	0,25	0,96	1						
Na+K	0,35	0,91	0,89	1					
HCO ₃ ⁻	-0,52	-0,3	-0,3	-0,24	1				
Cl ⁻	0,34	0,96	0,91	0,97	-0,29	1			
SO ₄ ²⁻	0,19	0,88	0,83	0,93	-0,08	0,92	1		
NO ₃ ⁻	-0,16	-0,25	-0,06	-0,12	0,16	-0,32	-0,15	1	
CE	0,33	0,96	0,93	0,99	-0,26	0,99	0,93	-0,17	1

Ces corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées à des variations de teneurs de ces différents ions.

Ceci indique également que ces différents paramètres ont tendance à évoluer concomitamment.

On remarque que la majorité des éléments majeurs sont corrélés positivement entre eux.

Tandis que les ions de HCO₃⁻ et NO₃⁻ sont corrélés négativement avec les autres éléments.

Les meilleures corrélations positives se retrouvent entre le Ca²⁺ avec les ions Mg²⁺ (0.96) et Na⁺+K⁺ (0.91), et Cl⁻ (0.96).

Il existe aussi une excellent corrélation entre la conductivité et les ions Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺+K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻.

Les mauvaises corrélations existent entre le HCO₃⁻, et NO₃⁻.

IV.6. Les Corrélations Caractéristiques

6.1. Le couple Na-Cl

Le graphe figure IV.13. montre qu'il y a une très grande corrélation entre les deux éléments **Na** et **Cl** cette corrélation traduit l'uniformité d'alignement des points, indiquant une origine commune qui est l'Halite (NaCl).

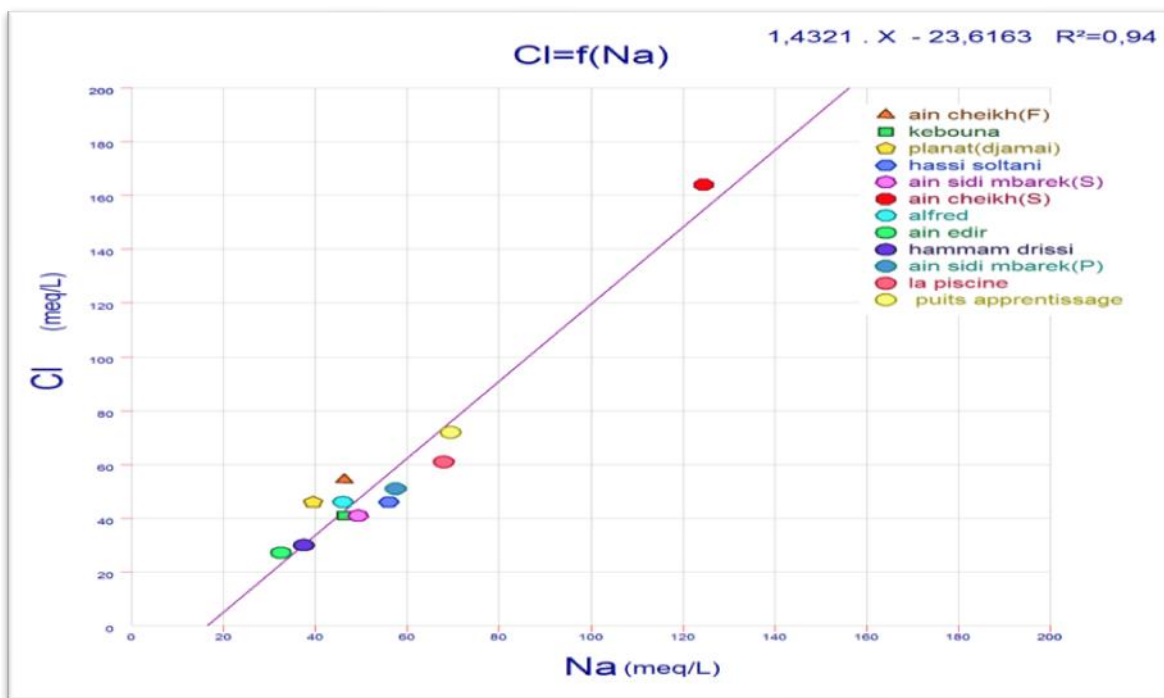


Figure IV.13. Corrélation entre Cl-Na

6.2. Le couple Ca-SO4

Le graphe figure IV.14. montre qu’il ya une grande corrélation entre les deux éléments **Ca** et **SO4**. Cette corrélation traduit l’alignement des points presque sur la même ligne, indiquant probablement une origine commune qui est par exemple l’Anhydrite (CaSO_4).

Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et le Pentahydrate ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

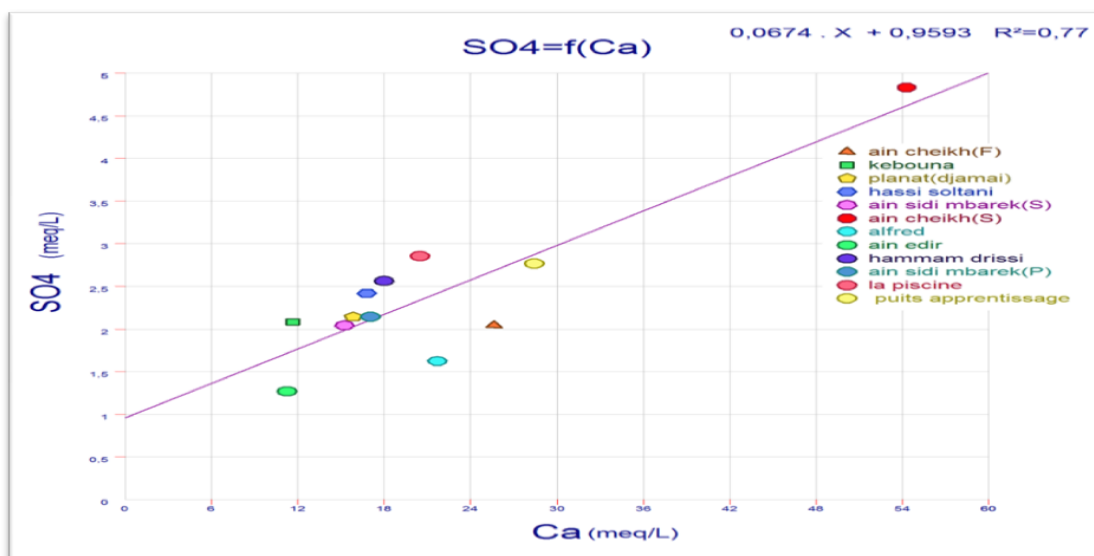


Figure IV.14. Corrélation entre Ca-SO₄

6.3. Le couple Ca-Cl

Le graphe figure IV.15. Montre qu'il ya une grande corrélation entre les deux éléments (Ca –Cl) cette corrélation traduit l'uniformité d'alignement des points.

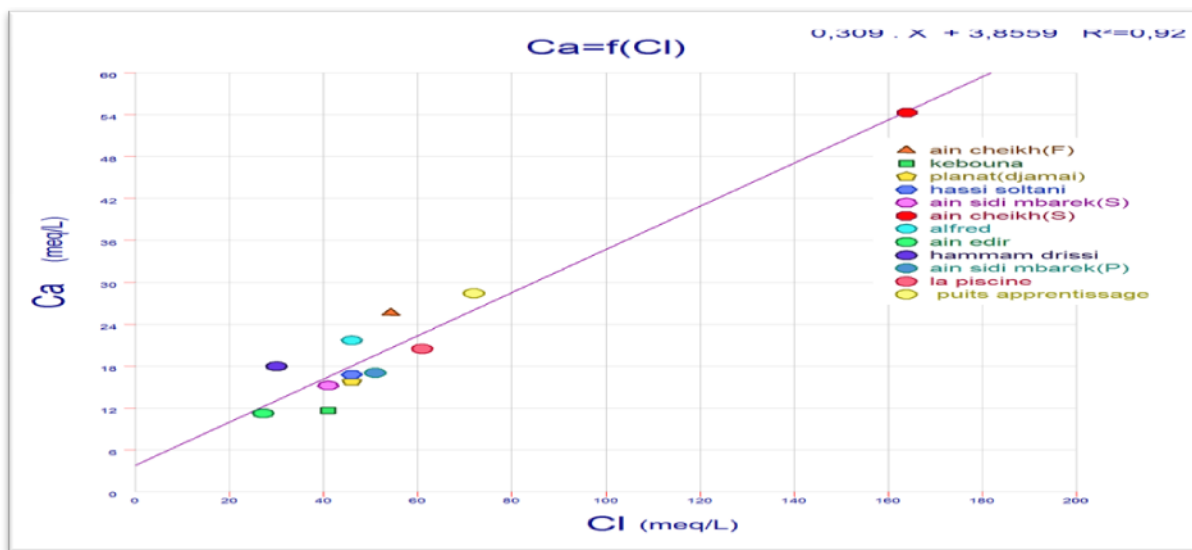


Figure IV.15. Corrélation entre Cl-Ca

IV.7. Potabilité des eaux étudiées

Une eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque pour la santé. Afin de définir précisément une eau potable, des normes ont été établies qui fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives et susceptibles d'être présentes dans l'eau (arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine).

Le fait qu'une eau soit conforme aux normes, c'est-à-dire potable, ne signifie donc pas qu'elle soit exempte de matières polluantes, mais que leur concentration a été jugée suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur.

Les concentrations des éléments chimiques dans l'eau interviennent directement dans la qualité et la potabilité des eaux. L'O.M.S et la norme algérienne a établie des normes de potabilité en fonction de la teneur en ces éléments.

L'eau est aujourd'hui la denrée alimentaire la plus fortement réglementée.

CHAPITRE IV - CONTEXTE HYDROCHIMIQUE

Tableau IV.14. Normes Algériennes de potabilité.

Paramètres	Unités	Concentration maximale admissible
Ph		6,5-8,5
Conductivité	µS/cm à 20°C	2880
Résidu sec	mg/L après séchage à 180°C	2000
Dureté Totale	mg/L de CaCO ₃	500
Calcium	mg/L	200
Magnésium	mg/L	150
Sodium	mg/L	200
Potassium	mg/L	20
Sulfates	mg/L	400
Chlorures	mg/L	500
Nitrates	mg/L	50
Nitrites	mg/L	0,1

L'Algérie s'est basée sur les recommandations de l'OMS, pour établir ses propres normes.

Tableau IV.15. Potabilité des eaux étudiées en fonction des normes algériennes

	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Remarque
Normes	200	150	200	20	500	400	50	Potable
F1	513	273		1386,675	1924,1	98	998,10	Non potable
P1	232,4	134,64		1391,034	1455,5	100	952,11	Non potable
P2	316,6	158,04		1183,149	1633	103	418,76	Non potable
P3	336,6	172,44		1680,789	1633	116	1499,37	Non potable
P4	304,6	237,24		1478,169	1455,5	98	1339,10	Non potable
S1	1086,2	548,28		3735,993	5822	232	672,49	Non potable
P5	432,8	299,52		1377,312	1633	78	1263,25	Non potable
S2	224,4	122,16		971,346	969,15	61	962,81	Non potable
F2	360,6	215,64		1121,709	1065	123	1422,13	Non potable
S3	340,6	220,44		1727,589	1810,5	103	1342,56	Non potable
P6	408,8	297,12		2037,372	2165,5	137	1533,00	Non potable
P7	569	335,4		2081,115	2556	133	1442,69	Non potable

A partir de la comparaison des concentrations des eaux étudiées avec les normes Algériens, on constate que la majorité des points d'eau présentent des concentrations dépassent les normes de potabilité à la Concentration Maximal Admissible (CMA) c'est-à-dire des teneurs élevées des ions dépassant les limites.

Ces derniers paramètres deviennent ces eaux inutilisables pour l'objectif (non potable).

On note que les concentrations des sulfates (SO_4^{2-}) sont dans la norme de potabilité.

IV.8. Aptitude des eaux à l'irrigation

La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un paramètre essentiel pour le rendement des cultures, le maintien de la productivité du sol et la protection de l'environnement.

Ainsi, les propriétés physiques et chimiques du sol, telles que sa structure (stabilité des agrégats) et sa perméabilité, sont très sensibles au type d'ions potentiellement échangeables présents dans les eaux d'irrigation.

L'appréciation de la qualité des eaux se fait à partir des normes de qualité basées sur les paramètres physico-chimiques, chimiques, bactériologiques et à chaque paramètre est affecté une valeur guide ou idéale et une valeur maximale admissible (CMA). On parle de non-conformité à la norme lorsque cette dernière est dépassée. Les normes de qualité peuvent être légèrement différentes d'une région à une autre, d'un pays à un autre et dépendent des conditions environnementales, socioéconomiques et culturelles locales ou régionales.

Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont:
- pH - Risque de Salinité - Risque de Sodium - Degré d'Adsorption du Sodium ou SAR...

8.1. Calcul des indices de l'eau en vue de leur utilisation agricole

8.1. 1. Indice de perméabilité

Des études récentes (Younsi, 2001 ; Debieche, 2002) indique que la perméabilité du sol dépend de plusieurs autres facteurs tels que la concentration totale de l'eau, la quantité de sodium, la concentration en bicarbonates et la nature du sol lui-même. Les trois premiers termes ont été combinés dans une seule formule donnant ce que l'on appelle l'indice de perméabilité (IP) défini par Doneen (Doneen, 1961).

L'indice de perméabilité est représenté par la formule suivante :

$$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO_3}}{Ca + Mg + Na} \times 100$$

Toutes les concentrations sont exprimées en [meq/L].

- Si $PI > 75\%$: eau d'excellente qualité.
- Si $75\% > PI > 25\%$: eau de bonne qualité.
- Si $PI < 25\%$: eau mauvaise pour l'irrigation.

Tableau IV.16. L'indice de perméabilité des eaux étudiée.

Points d'eau	PI	La qualité	Points d'eau	PI	La qualité
F1	49,77	bonne qualité	P5	50,59	bonne qualité
P1	68,17	bonne qualité	S2	61,65	bonne qualité
P2	59,42	bonne qualité	F2	52,38	bonne qualité
P3	65,59	bonne qualité	S3	63,01	bonne qualité
P4	59,69	bonne qualité	P6	60,93	bonne qualité
S1	55,81	bonne qualité	P7	55,98	bonne qualité

A partir des résultats du tableau IV.16. Nous remarquons que les eaux étudiées sont convenables avec un indice de perméabilité des sols qui indique une bonne qualité, ces indices varie entre 49.77% à 68.17%.

8.1.2. Les Chlorures

Lorsqu'ils sont présents dans l'eau d'irrigation, ces éléments contribuent à augmenter la concentration des sels solubles. Les sels de chlorures et de sulfates sont rapidement solubles. Ils peuvent donc être lessivés dans les sols qui se drainent bien.

- $Cl^- [meq/L] < 4 [meq/L]$: eau non toxique pour les plantes.
- $4[meq/L] < Cl^- [meq/L] < 10 [meq/L]$: toxicité modérée.
- $Cl^- [meq/L] > 10 [meq/L]$: toxicité sévère.

Tableau IV.17. Concentration des chlorures des eaux étudiée.

Points d'eau	Cl [meq/L]	la qualité	Points d'eau	Cl [meq/L]	la qualité
F1	54,2	Toxicité sévère	P5	46	Toxicité sévère
P1	41	Toxicité sévère	S2	27,3	Toxicité sévère
P2	46	Toxicité sévère	F2	30	Toxicité sévère
P3	46	toxicité sévère	S3	51	Toxicité sévère
P4	41	Toxicité sévère	P6	61	Toxicité sévère
S1	164	Toxicité sévère	P7	72	Toxicité sévère

D'après le tableau IV.17. La concentration des chlorures dépasse les 10meq/L qui fait que ces eaux ont une toxicité sévère sur les plantes.

8.1. 3.Nitrates

Une eau souterraine dont le milieu permet la dénitrification peut être exempte de nitrates, alors qu'une eau "polluée" par un apport important de matières organiques, d'engrais ou de rejets d'eau résiduaire peut présenter plusieurs centaines de mg/L de nitrates au-delà de la concentration maximale tolérée. L'apport de nitrates dans le sol, puis dans les eaux, est donc fortement lié à la quantité de matières organiques présente et aux conditions de milieu.

Les actions anthropiques sont donc importantes : utilisation d'engrais azotés et de lisier. De même, les rejets de stations d'épuration ou plus simplement de latrines et fosses septiques représentent un apport en matières organiques susceptibles de produire des nitrates.

- NO_3^- [mg/L] < 5 [mg/L]: eau non toxique pour les plantes.
- 5 [mg/L] < NO_3^- [mg/L] < 30 [mg/L]: toxicité modérée.
- NO_3^- [mg/L] >30 [mg/L]: toxicité sévère.

Tableau IV.18. Concentration des nitrates des eaux étudiées.

Points d'eau	NO_3^- (mg/l)	la qualité	Points d'eau	NO_3^- (mg/l)	la qualité
F1	998,10	toxicité sévère.	P5	1263,25	toxicité sévère
P1	952,11	toxicité sévère.	S2	962,81	toxicité sévère
P2	418,76	toxicité sévère.	F2	1422,13	toxicité sévère
P3	1499,37	toxicité sévère.	S3	1342,56	toxicité sévère
P4	1339,10	toxicité sévère.	P6	1533,00	toxicité sévère
S1	672,49	toxicité sévère.	P7	1442,69	toxicité sévère

D'après le tableau.IV.18. La concentration des nitrates est très élevé, s'atteindre les 1500 mg/l

8.1.4. Magnésium Hazard Absorption

En générale, le calcium et le magnésium sont à l'état d'équilibre dans l'eau, le taux élevé de magnésium dans l'eau influe sur sa qualité, l'eau devient de nature alcaline.

La formule utilisée pour le calcul de cette coefficient est :

$$\text{MH} = \frac{\text{Mg}^{2+} \times 100}{\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}}$$

Les concentrations en meq/L.

- Si $\text{MH} > 50$: eau ne convient pas à l'irrigation.

CHAPITRE IV - CONTEXTE HYDROCHIMIQUE

- Si $MH < 50$: eau convient à l'irrigation.

Tableau IV.19. Le Magnésium de Hazard des eaux étudiées.

Points d'eau	MH	La qualité	Points d'eau	MH	La qualité
F1	47,00	Eau convient	P5	53,56	Eau ne convient pas
P1	49,12	Eau convient	S2	47,57	Eau convient
P2	45,41	Eau convient	F2	49,92	Eau convient
P3	46,06	Eau convient	S3	51,89	Eau ne convient pas
P4	56,49	Eau ne convient pas	P6	54,78	Eau ne convient pas
S1	45,69	Eau convient	P7	49,56	Eau convient

Le tableau IV.19. Montre que les pourcentages du Magnésium Hazard dans la majorité des points d'eau convient à l'irrigation, il représente seulement quatre (04) points d'eau qui ne conviennent pas à l'irrigation car ils dépassent les 50%.

8.1.5. Kelly's ratio

L'aptitude de l'eau à l'irrigation, c'est aussi apprécié dans la base de Kelly's ratio, le taux de sodium vers calcium et de magnésium sont utilisés comme le taux de Kelly's (Kelly's ratio), il est exprimé par la relation suivante :

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

Les concentrations sont en [meq/L].

- Si $KR > 1$: eau ne convient pas à l'irrigation.
- Si $KR < 1$: eau convient à l'irrigation.

Tableau IV.20. Le Kelly's Ratio des eaux étudiées.

Points d'eau	KR	la qualité	Points d'eau	KR	la qualité
F1	0,955	Convient	P5	0,985	Convient
P1	2,030	ne convient pas	S2	1,513	ne convient pas
P2	1,360	ne convient pas	F2	1,039	ne convient pas
P3	1,796	ne convient pas	S3	1,627	ne convient pas
P4	1,408	ne convient pas	P6	1,502	ne convient pas
S1	1,245	ne convient pas	P7	1,230	ne convient pas

A partir de cet indice (KR) nous distinguons que ces eaux ne conviennent pas à l’irrigation dans la majorité des points d’eau, on a seulement 02 points d’eau qui conviennent à l’irrigation c’est-à-dire une KR inférieur à 1.

8.1.6. Pourcentage de sodium

Le sodium est l’un des éléments les plus indésirables dans l’eau d’irrigation. Cet élément a son origine de l’altération de la roche et du sol, des intrusions d’eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d’irrigation.

Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l’infiltration de l’eau.

Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d’argile et provoque la dispersion des particules du sol.

Il y a donc éclatement des agrégats du sol, ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu’il est sec et excessivement imperméable à l’eau. Le sodium contribue aussi directement à la salinité totale de l’eau et peut être toxique pour des cultures sensibles.

$$Na\% = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100 ; K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} \text{ en meq/L}$$

Tableau IV.21. Le pourcentage de sodium des eaux étudiées.

Points d’eau	Na%	Points d’eau	Na%
F1	48,85	P5	49,63
P1	67,00	S2	60,21
P2	57,63	F2	50,95
P3	64,23	S3	61,93
P4	58,47	P6	60,04
S1	55,46	P7	55,16

A l’exception de certaines cultures, ce paramètre n’a pas d’effet direct sur la culture.

Un taux de sodium échangeable supérieur à 15% indique que le sol contient trop de sodium qui se manifeste par la réduction de la porosité du sol, ceci limite la circulation de l’eau et de l’air dans le sol. Ceci va entraîner un stress hydrique même si on irrigue puisque l’eau n’arrive pas aux racines. De tels sols sont appelés sols sodiques.

D’après le tableau IV.21. les pourcentages de sodium indique des valeur plus ou moins important qui dépasse les 15 % ce qui montre que le Na+ prédomine dans le sol.

8.1.7. Sodium Adsorption Ratio « SAR »

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium des sels de chlorures de sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol.

De part cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (Todd, 1980). Lorsque la concentration des ions Na⁺ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment les cations Ca²⁺ dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquée cet effet.

Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium adsorbable, « Sodium Adsorption Ratio : SAR ». Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé.

Le S.A.R est donné par l'expression suivante :

$$SAR = Na / [(Ca+Mg)/2]^{1/2}$$

Les concentrations sont en [meq/L]

- SAR < 10 : eau excellent pour l'irrigation.
- 10 < SAR < 18 : eau bonne pour l'irrigation.
- 18 < SAR < 26 : eau convenable pour l'irrigation.
- SAR > 26 : eau médiocre.

Tableau IV.22. Le sodium adsorption ratio(SAR) des eaux étudiée.

Points d'eau	SAR	Qualité	Points d'eau	SAR	Qualité
F1	9,40	Excellent	P5	9,51	Excellent
P1	13,72	Bonne	S2	9,90	Excellent
P2	10,36	Bonne	F2	8,81	Excellent
P3	14,19	Bonne	S3	13,69	Bonne
P4	11,78	Bonne	P6	14,29	Bonne
S1	17,61	Bonne	P7	13,06	Bonne

D'après les calculs des SAR, le tableau IV.22. montre des valeurs entre 8.81 à 9.90 dans quatre (04) points d'eau, et le reste ajustée entre 10.36 à 17.61.

Ces résultats indiquent des eaux de bonne qualité pour l'irrigation donc pas de risque de salinité.

8.2. Synthèse des résultats de calcul des indices d'irrigation

Tableau IV.23. Résultats de calcul des indices d'irrigation.

Points d'eau	PI	CI (meq/L)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	MH	KR	SAR	Potabilité
F1	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	convient	Convient	excellent	Non potable
P1	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	convient	ne convient pas	bonne	Non potable
P2	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	convient	ne convient pas	bonne	Non potable
P3	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	convient	ne convient pas	bonne	Non potable
P4	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	ne convient pas	ne convient pas	bonne	Non potable
S1	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	Convient	ne convient pas	bonne	Non potable
P5	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	Ne Convient Pas	convient	Excellent	Non potable
S2	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	convient	ne convient pas	Excellent	Non potable
F2	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	convient	ne convient pas	Excellent	Non potable
S3	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	Ne Convient Pas	ne convient pas	Bonne	Non potable
P6	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère.	Ne Convient Pas	ne convient pas	Bonne	Non potable
P7	bonne qualité	Toxicité sévère	toxicité sévère	convient	Ne convient pas	Bonne	Non potable

A partir des résultats de calcul des indices d'irrigation, nous ne distinguons que les eaux étudiées sont généralement impropre pour l'irrigation tant que la majorité des facteurs dépasse la potabilité.

IV.9. Conclusion

La minéralisation des eaux étudiées varie de 3390.69 à 15333.29 mg/L. un seul faciès chimique se dégage

- Les eaux de la nappe de Kenadsa possèdent une conductivité très élevée et une dureté TH qui classe les eaux de la nappe de la région d'étude dans la classe des eaux très dures.

Les eaux captées dans la région de Kenadsa appartiennent à l'aquifère des grés-argileux.

Elles présentent le faciès chloruré-sodique.

Plus particulièrement, les eaux étudiées semblent se caractériser par un sous faciès sulfaté-calcique.

De la répartition spatiale des différents paramètres étudiés, il ressort qu'au niveau de la zone d'étude, la nature hydrochimique des eaux est déterminée essentiellement par la nature lithologique des formations des zones de recharge, par les distances parcourues ainsi que par l'amoindrissement de la profondeur du niveau piézométrique.

L'étude statistique, par analyse en composant principale (ACP), a confirmé et bien précisé les affinités entre les différents ions, renseignant sur l'origine ainsi que les regroupements spatiaux des échantillons étudiés.

Du point de vue de la qualité des eaux pour l'irrigation, la majorité des eaux des points étudiés présentent des risques de sodisation, mais pas de risque de salinisation.

En générale on peut dire aussi que les eaux sont impropres à la consommation humaine.

Conclusion Générale

A travers ce travail, nous avons commencé par présenter le cadre physique de la région d'étude incluant les contextes géographique, climatiques, morphologiques et hydrologique.

Le climat de la région de Kenadsa est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par une forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région. Ce climat est de type hyperaride, il est caractérisé par un hiver chaud et une période de sécheresse prolongée dominée par des vents de direction Nord-Sud.

L'étude géologique, basé sur les travaux de plusieurs auteurs ayant étudié la région, a permis de distinguer les principales formations géologiques de cette région ; à savoir :

- le pénéplaine est constitué par des grès de carbonifère qui est particulièrement le westphalien qui constitué par des formations grès-argileux.

- Les formations secondaires, formant grossièrement la 1^{ère} Barga constituées essentiellement par des terrains grès- argileux à gypse, évoluant vers des marnes et des calcaires massifs.

- Le Tertiaire constitue la 2^{ème} Barga et le plateau d'Oum Sbaâ. Elle comprend des argiles conglomératiques, des grès et des calcaires lacustres.

Sur le plan hydrogéologie, l'aspect lithologie et structural de formation géologique de la zone d'étude déterminent le principal système aquifère présent :

- L'unité des grès et argiles du westphalien

La carte piézométrie a permis de fournir des informations sur le sens d'écoulement souterrain et sur le mode d'alimentation du système aquifère. Dans notre secteur la nappe étudiée est essentiellement libre, contenu dans les niveaux grès-argileux. Elle est de type radial à écoulement divergent à l'Est et convergent a l'Ouest.

L'étude hydrochimique a permis de caractériser les principaux paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés au cours de la campagne de terrain du 04/11et 12 mai 2015.

Les résultats obtenus par l'interprétation des analyses chimiques de la zone étudiée, nous à montrer que seulement les teneurs en SO_4^{2-} sont dans l'intervalle des valeurs limites. Les teneurs Ca^{++} , Cl^- , K^+ , Na^+ et Mg^{2+} ont dépassées la norme Algérienne pour les eaux potables, Ainsi que les paramètres physiques tels que la conductivité et la minéralisation qui varie de 3390.69mg/l à 15333.29mg/l. l'excès de ces éléments dans l'eau de boisson peut entraîner des problèmes sur la santé humaine.

CONCLUSION GENERALE

Le diagramme de Piper et Schöeller-Berkaloff permettent de constater que les eaux analysées sont globalement chlorurées sodiques.

L'étude des facteurs indiquant la qualité des eaux d'irrigation montre que les eaux de la nappe étudiée ont une qualité chimique très mauvaise pour l'irrigation.

De la répartition spatiale des différents paramètres étudiés, il ressort qu'au niveau de la zone d'étude, la nature hydrochimique des eaux est déterminée essentiellement par la nature lithologique des formations des zones de recharge, par les distances parcourues ainsi que par l'amoinissement de la profondeur du niveau piézométrique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADDA M., 2013 - Caractérisation hydrochimique et pollution des eaux souterraines en contexte urbain cas de l'agglomération oranaise (Algérie). *Mémoire de Magister*, Université, Oran, p.32, 43, 49, 61 et 64.

AIT OUALI R., 1991. Le rifing des monts des ksour au lias. Organisation du bassin, diagenèse des assises carbonatées, place dans les ouvertures mésozoïques au Maghreb, *thèse d'état*, Alger p.33

BOUTADARA A. et BOULLAH I., 2014. Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Mougheul (wilaya de Béchar). Mémoire d'ingénieur d'état. Université d'Oran .p33, 81, 97.

BOUZNAD I., 2009. Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ (W. Ouargla) (Sahara septentrional algérien). Mémoire de Magistère Université , Annaba. p104 et 105.

CASTANY G., 1980. Hydrogéologie, principes et méthodes, Dunod édit. Paris, p.33

DELEAU P., 1951 : Alimentation de Colomb-Béchar », SERV. Géol. Algérie, Trav. Rec. Coll.III, p.37.

DELEAU P., 1952 - La région de Colomb-Béchar », 19^{ème} Cong. Géol. International. Monogr. Rég.1^{ère} série, Algérie, N°8, p.35.

DELEAU P., 1955 - Contribution à l'étude hydrogéologique de la région de Colomb-Béchar. Pub. Géol. Algérie ; N°6,

GALMIER O., 1953 - Caractéristique hydrogéologique de l'aquifère jurassique dans la plaine de Mougheul, (Ksour du Nord, Béchar)

IDROTECHNICA, 1976 - Etude hydrogéologique de la région de Béchar, SONAREM, rapport interne inédite.

MEBARKI S., 2012 - Caractéristique hydrogéologique de l'aquifère jurassique dans la plaine de Mougheul, (Ksour du Nord, Béchar), Mémoire de Magistère Université de Béchar. p.36, 40.

MEINDRE A., 1955 - Caractéristique hydrogéologique de l'aquifère jurassique dans la plaine de Mougheul, (Ksour du Nord, Béchar).

MEKKAOUI A. (2000) - Bordure du sillon atlasique et plate-forme Saharienne. Jurassique inférieur et moyen. (Grouz méridional, Charef-Fendi, Algérie Sud Occidentale. *Mémoire Magistère* Université. Oran, p.36, 38, 40 et 41.

MENCHIKOFF N., 1936 - Etude géologique sur les confins algéro-marocains du Sud, B.S.G.F, 5^{ème} série, p.34, 35.

OUDA S. et TIDJINI N., 2014 - contribution à l'étude des eaux souterraines dans les systèmes multicouches en zone aride cas du westphalien de Kenadsa. Mémoire, master, université de Béchar pp 28.

PARYEN C. 1961 - Les massifs carbonifères du Sahara sud-oranais, Edit. C.N.R.S,

PERRODON A., 1957 - Etude géologique des bassins néogènes sublithoraux de l'Algérie occidentale. *Mémoire*. du service. *carte géol.* Algérie n°12.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ROCHE M. A., 1973 - Hydrogéologie de la Haute Saoura (Sahara nord-occidental). Publ. CNRS, série Géol. Paris.

D. P. A. T. - Direction de planification et d'aménagement de territoire. Données **2009**

D. R. E. W. - La direction des ressources en eau de la wilaya. Données

Les données de la pluviométrie ont été fournies par l'**ANRH**.

O. N. M., 2015 : Office Nationale de Météorologie, « les données de la climatologie »,.

Logiciels :

MapInfo 08, Surfer 8, Global Mapper 11 ; Diagramme,.

ANNEXE

Annexe 01 : les coordonnées des points d'eau en UTM

Points d'eau	x	y	Z	NS	NP
F1	556196,890	3492004,970	753,27	26,5	726,77
P1	553242,460	3491581,450	749,7	3,1	746,60
P2	553677,190	3491430,360	749,8	5,1	744,70
P3	552959,430	3491247,490	738,5	3	735,50
P4	553459,360	3491236,190	742,8	9,15	733,65
S1	556939,000	3492487,000	756,23	0	756,23
P5	555140,020	3491702,190	750,5	3,95	746,55
S2	552958,300	3491469,160	747,2	0	747,20
F2	554739,820	3491402,340	751	7,5	743,50
S3	553459,360	3491236,190	742,8	0	742,80
P6	554287,600	3491365,180	749,4	6,8	742,60
P7	554854,130	3491922,360	751,9	3,8	748,10

Annexe 02 : les coordonnées des points d'eau en Lambert.

Point d'eau	type	Latitude	Longitude	Z
Ain cheikh (forage)	forage	31°33'42,05" N	2°24'28,25 "W	753,27
Kebouna	forage	31°33'22,73" N	2°25'23,64"W	749,7
Hassi Planat (djamai)	source	31°33'17,55" N	2°26'12,24" W	749,8
Hassi Soltani	puits	31°33'27,67"N	2°26'19 ,28"W	738,5
Ain sidi Mbarek (puits)	puits	31°33'25,59 " N	2°26'32,27" W	742,8
Ain cheikh	puits	31°33'18,23 "N	2°26'31,12"W	756,23
Alfred	Source	31°33'59,08"N	2°23'58,78"W	750,5
Ain el dir	Puits	31°33'23,23"N	2°25'39,05"W	747,2
hammam Drissi	Puits	31°33'17,55" N	2°26'12,24" W	751
Ain sidi Mbarek	source	31°33'23,82"N	2°26'03,94"W	742,8
la piscine	Puits	31°33'33,68"N	2°25'09,88"W	749,4
Puits apprentissage	Puits	31°33'39,35"N	2°25'19,18"W	751,9

ANNEXE

Annexe 03 : la source de aïn cheikh



Annexe 04 : la source de Aïn Edir

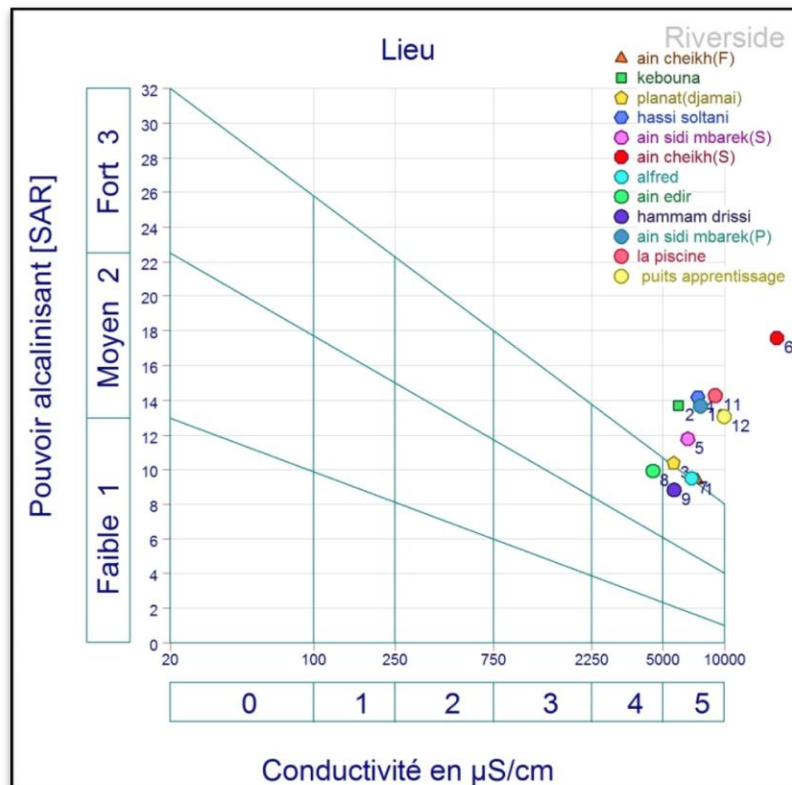


ANNEXE

ANNEXE 05 :La source de Ain Sidi Mbarek

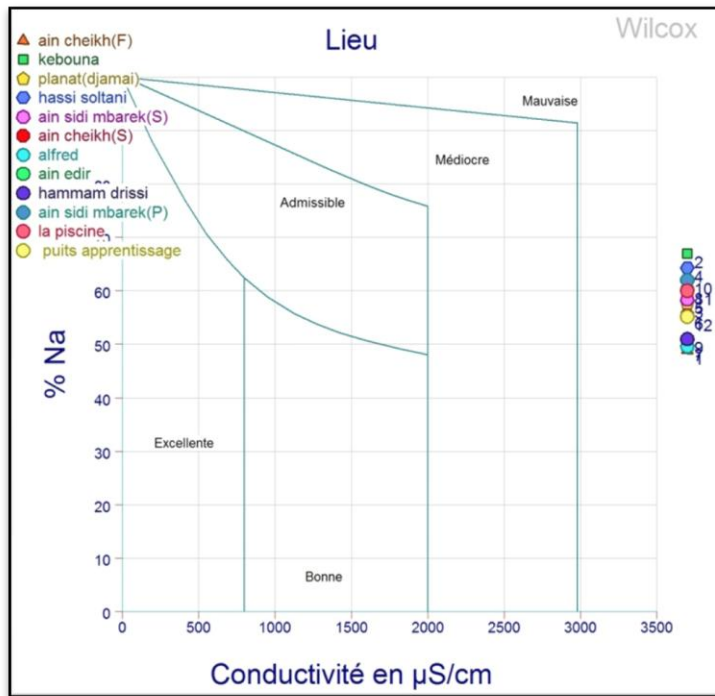


Annexe 06 : diagramme de SAR

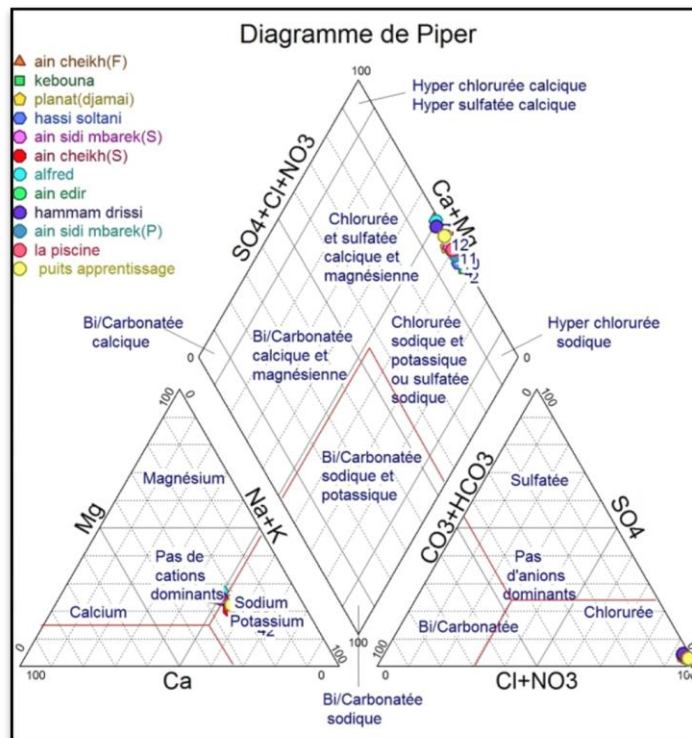


ANNEXE

annexe 07 : diagramme de pourcentage du sodium Na%



Annexe 08 : diagramme de piper



ANNEXE

Annexe 09 : les résultats des analyses chimiques

Point d'eau	type	TA	TAC en °F	TAC meq/l	NH ₃ - (mg/l)	CO ₂ - mg/l
Ain cheikh (forage)	forage	0	-0,5	-0,1	0,42	128
Kebouna	forage	0	-0,5	-0,1	0,54	108
Hassi Planat (djamai)	source	0	-0,5	-0,1	0,38	160
Hassi Soltani	puits	0	-0,5	-0,1	0,47	220
Ain sidi Mbarek (puits)	puits	0	-0,5	-0,1	0,71	192
Ain cheikh	puits	0	-0,5	-0,1	0,71	164
Alfred	Source	0	-0,5	-0,1	0,28	180
Ain el dir	Puits	0	-0,5	-0,1	0,19	136
hammam Drissi	Puits	0	-0,5	-0,1	0,49	184
Ain sidi Mbarek	source	0	-0,5	-0,1	0,71	128
la piscine	Puits	0	-0,5	-0,1	0,31	152
Puits apprentissage	Puits	0	-0,5	-0,1	0,35	200