

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE MASCARA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du grade de

MAGISTER

En Hydrogéologie et Environnement.

Par

NASRI Abdelkader

(Ingénieur d'état en hydrogéologie)

Thème

**Etude Hydrochimique du système Hydrogéologique du bassin du
Hodna**

Jury

Président	Mr KHALDI Abdelkader	Professeur de l'Univ. Mascara
Encadreur	Mr AZZAZ Habib	(M.C.A).Univ.Mascara
Examineur	Mr BEKKOUSSA Belkacem	(M.C.A).Univ.Mascara
Examineur	Mr HAMIMED Abderrahmane	(M.C.A).Univ.Mascara
Examineur	Mr BENSLIMANE Mohamed	(M.C.A).Univ.Mascara

-Année Universitaire- : 2014/2015

Remerciements

Nous tenons à remercier avant tout le Dieu, le très miséricordieux, le tout miséricordieux qui grâce à lui nous sommes arrivés à ce stade.

Depuis le début de la rédaction de ce mémoire, j'avoue que je rêvais le moment où je devrais rendre hommage à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Il faut certainement commencer par les initiateurs de cette riche expérience, Mr.

Le docteur ABZAZ Habib qui a permis à ce travail de prendre forme et substance par son inestimable soutien scientifique et moral, a bien voulu suivre et orienter ce travail, pour son attention, ses précieux et sincères conseils.

Je ne sais pas comment exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude à

Mr. Le professeur KHALDI Abdelkader, le recteur de l'université de Mascara qui a eu la bienveillance d'accepté de juger ce travail et de présider ce jury.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs : Mr. Le docteur BEKKOUSSA Belkacem, Mr le docteur HAMMED Abderrahmane et Mr le docteur BENSILMANE Mohamed d'avoir accepté d'évaluer et de juger ce travail.

Je voudrais remercier également Mr KASSI Abdelouahabe le directeur de l'A.N.R.# de Djelfa qui n'a pas lésiné à me donner toutes les informations et de la mise à disposition de nombreuses données de base de réalisation de ce travail.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont apporté aides, discussions et idées scientifiques tout au long de ce périple.

Un grand merci à Mr ALLAM Baghdad (ingénieur hydrogéologue de DRE de Mascara) pour tous les soutiens morales et aides scientifiques

J'adresse mes sincères remerciements à mes enseignants de tous mon parcours d'étude, mes collègues d'étude et de travail.

Enfin, des remerciements ne seraient pas des remerciements, sans une pensée pour toutes les personnes qui m'ont soutenu au cours de toutes ces années (liste non exhaustive et sans ordre de préférence, aka = also known as).

Dédicaces

A ma famille (mes parents et mes frères, sœurs)

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter.

*En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour me
permettre d'atteindre cette étape de ma vie.*

Avec toute ma tendresse.

A tous les neveux et nièces.

Meilleurs vœux de succès dans vos études.

A mes oncles, tantes, cousins et cousines.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.

Affectueuse reconnaissance

*A tous ceux-là dont les noms n'ont pas été cités ici mais qui ont eu un rôle
déterminant tant par leurs encouragements, leur soutien moral et matériel surtout
dans les moments difficiles. Je leur exprime ma profonde gratitude*

A tous mes amis

A tous ceux qui me sont cher(e)s

A tous les universitaires

Résumé

La plupart des régions nord africaines se caractérisent par des zones arides et semi-arides. En Algérie, la zone aride représente près de 90 % de la superficie globale dont 80 % est Hyperaride.

L'approvisionnement en eau potable et sa gestion sont devenus une tâche très difficile à satisfaire tous les besoins sous l'action de la surexploitation des nappes influençant directement la qualité et la quantité des eaux du système aquifère.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, sur le bassin endoréique du Hodna (formant au cœur de l'Algérie une longue dépression d'une superficie de 8 500 km² qui sert de niveau de base aux oueds d'un bassin fermé de 24 500 km²), faisant état de la surexploitation et de la détérioration de la qualité des eaux de la nappe du Mioplioquatenaire. Par sa géomorphologie (cuvette), son climat steppique et la présence du Chott, la région ne cesse à rattraper son état d'équilibre hydrogéologique.

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les connaissances sur le système aquifère du bassin du Hodna, principale ressource d'eau potable dans une région soumise à des influences steppique Atlasique tellien et saharien. Il s'agit de mettre en valeur la situation, hydrogéologique et hydrochimique de la nappe du Mioplioquatenaire. Sur le plan hydrogéologique ; la nappe du Mioplioquatenaire est retrouvée dans des formations géologiques constituée de sable, gravier et conglomérat, l'alimentation de cette nappe est générée soit par l'infiltration des eaux de précipitations soit latéralement par les formations carbonatées du Crétacé alors que son écoulement est dirigé principalement vers le chott Hodna. Sur le plan hydrochimique, les résultats des analyses physico-chimiques ont permis de déterminer le faciès chimique Chloruré et sulfaté-calcique et magnésien des eaux de cette nappe et leur mécanisme d'acquisition chimique.

Mots clés : bassin du Hodna, chott, nappe du Mioplioquatenaire, formations carbonatées, steppique, endoréique, conglomérat.

Summary

Most North African regions are characterized by arid and semi-arid climate. In Algeria, arid region represents almost 90% of the total area of which 80% is hyper arid.

The supply of drinking water and water management have become a very difficult task to satisfy all requirements under the action of the overexploitation of aquifers directly influencing the quality and quantity of the aquifer system waters.

It is in this context that the present study is registered on the endorheic basin Hodna (forming the heart of Algeria a long depression with an area of 8 500 km² which serves 8 basic levels to a wadi closed basin of 24,500 km²), citing overfishing and the deterioration of the water quality of the water table of Mioplioquatenaire. By its geomorphology (bowl), its steppe climate and the presence of the Chott, the region continues to catch hydrogeological equilibrium.

The main objective of this study is to improve knowledge on the aquifer system Hodna basin main drinking water resource in a region subject to influences Atlasic Tellian steppe and Sahara. This is to highlight the situation, hydrogeological and hydrochemical Mioplioquatenaire of the table. On the hydrogeological plan; Mioplioquatenaire of groundwater is found in geological formations is of sand, gravel and conglomerate, eating this layer is generated either by the infiltration of precipitation water is laterally Cretaceous carbonate formations while its flow is directed mainly Chott to Hodna. On the hydrochemical, the results of physicochemical analyzes were used to determine the chemical facies chloride and sulfate and magnesium-calcium water of this tablecloth and chemical acquisition mechanism.

Keywords: Hodna basin, chott, tablecloth Mioplioquatenaire, carbonate formations, steppe, endoreic, conglomerate.

ملخص:

تتميز معظم مناطق شمال افريقيا بالمناخ الجاف أو شبه الجاف. في الجزائر، تمثل المناطق الجافة ما يقرب من 90% من المساحة الكلية منها 80% هي أشد جفاف. أصبحت إمدادات مياه الشرب وإدارتها مهمة صعبة جدا لتلبية جميع الاحتياجات و ذلك بسبب الإفراط في استغلال المياه الجوفية التي تؤثر بشكل مباشر على نوعية وكمية المياه و نظام المياه الجوفية.

وفي هذا السياق يتم تسجيل هذه الدراسة على حوض الحضنة (يتواجد في قلب الجزائر بمساحته قدرها 2500 م² و يعتبر نقطة التقاء 8 أحواض لأودية أساسية مشكلة حوض مغلق بمساحة قدرها 24500 كم²، نظرا للاستغلال المفرط وتدهور نوعية المياه من منسوب المياه الطبقة الجوفية الميوليوكتارنية، لا تزال المنطقة الجيومورفولوجية للنشط تحت المناخ السهبي لم تستعد بعد توازنها الهيدروجيولوجي.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحسين المعرفة بشأن نظام المياه الجوفية لحوض الحضنة باعتباره المورد الرئيسي لمياه الشرب في المنطقة التي تخضع لتأثيرات سلسلة الأطلس التلي، السهوبي والصحراوي. وهذا بتسليط الضوء على الوضع الطبقة الجوفية الميوليوكتارنية بالإتجاهات الهيدروجيولوجية والهيدروكيميائية.

على الإتجاه الهيدروجيولوجي: تم العثور على مختلف التكوينات الجيولوجية من الرمل والحصى والحصى الكبير للطبقة الجوفية الميوليوكتارنية ، يتم تغذية هذه الطبقة إما عن طريق تسلل هطول المياه مباشرة أو التسلل أفقيا عن طريق الطبقة الجيولوجية للكربونات الطباشيري بينما يتم توجيه تدفقها بشكل رئيسي إلى شط الحضنة. على الإتجاه الهيدروكيميائية، استخدمت نتائج التحاليل الفيزيائية والكيميائية لتحديد النوعية الكيميائية لمياه هذه الطبقة المتمثلة في كبريتات المغنيسيوم والكالسيوم، التي بدورها تسمح لنا بمعرفة آليات الإكتساب الكيميائي للمياه.

كلمات مفتاحية: شط الحضنة، شط ، الطبقة الجوفية الميوليوكتارنية ، التشكيلات الكربونية، السهوب، حوض مغلق ، الحصى الكبير.

Tables des matières

INTRODUCTION GENERALE	08
CHAPITRE 01 : GENERALITE	
1.INTRODUCTION :.....	10
2.SITUATION GEOGRAPHIQUE :.....	10
3.LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE :.....	12
3.1.Le sous bassin versant de l'Oued Elleham :	12
3.2.Le sous bassin d'Oued M'cif :	12
3.3.Le sous bassin d'Oued Barika :	12
3.4.Le sous bassin d'Oued K'sob :	12
3.5.Le sous bassin d'Oued Boussaâda :	12
3.6.Le sous bassin d'Oued Soubella :	13
3.7.Le sous bassin d'Oued Lougman :	13
4.CONTEXTE CLIMATIQUE	14
4.1.Introduction :	14
4.2.Etude des facteurs climatiques:	14
4.2.1.La pluviométrie :	14
4.2.1.1.Interprétation de la carte des précipitations :	14
4.2.1.2.Variations interannuelles des précipitations :	16
4.2.1.3.Variations moyennes mensuelles des précipitations :	18
4.2.1.4.Variations saisonnière des précipitations :	19
4.2.2.Les températures :	19
4.2.2.1.Variation des moyennes mensuelles des températures :	20
4.3.Evapotranspiration et déficit d'écoulement:	21
4.3.1.Déficit d'écoulement :	22
4.3.2.L'évapotranspiration potentielle (ETP) :	23
4.3.2.1.L'ETP De Thornthwaite (1944) :	23
4.3.3.L'évapotranspiration réelle (ETR) :	24
4.3.3.1.Formule de Turc :	25
4.3.3.2.Formule de M. Coutagne :	26
4.4.L'humidité de l'aire :	26
4.5.L'insolation :	27
4.6.Le vent :	27
4.7.Caractérisation de climat :	27
4.7.1.Diagramme Ombrothermique :	27
4.7.2.Indice de De Martonne :	28
4.8.Bilan hydrologique :	30
4.8.1.Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite :	30
4.8.2.Commentaire sur le bilan-hydrologique :	34
4.9.Conclusion :	34
5.CONTEXTE GEOLOGIQUE :	35
5.1.Introduction :	35
5.2.Cadre géologique régional :	35
5.3.Géologie locale :	37
5.4.Descriptions lithostratigraphiques :	39
5.4.1.Primaire :	39
5.4.2.Secondaire :	39
5.4.2.1.le Trias :	39
5.4.2.2.Le Jurassique :	39
5.4.2.3.Le Crétacé :	40

5.4.3.Tertiaire :	42
5.4.3.1.Le Paléocène :	42
5.4.3.2.Le Néogène :	43
5.4.4.Quaternaire :	44
5.4.4.1.le Quaternaire ancien ou Moulouyen :	44
5.4.4.2.Le Quaternaire moyen :	45
5.4.4.3.Le Quaternaire récent :	45
5.5.Cadre structural :	47
5.5.1.Tectonique :	47
5.5.2.Paléogéographie	49

CHAPITRE 02 : HYDROGEOLOGIE

1.INTRODUCTION :	51
2.GEOMETRIE DE L'AQUIFERE :	51
2.1.Les coupes géologiques reprises :	51
2.1.1.La coupe A : (Fig 21)	52
2.1.2.La coupe B : (fig 22)	54
2.1.3.La coupe C : (fig 23)	54
2.2.Les coupes géologiques réalisées :	54
2.2.1.La coupe 1 : (fig 25)	56
2.2.2.La coupe 2 : (fig 26)	56
2.2.3.La coupe 3 : (Fig 27)	57
2.2.4.La coupe 4 : (fig 28)	58
2.2.5.La coupe 5 : (fig 29)	58
2.3.Conclusion :	59
3.DEFINITION DU SYSTEME AQUIFERE :	60
3.1.Structure hydrogéologique :	60
3.1.1.Nappe superficielle :	60
3.1.2.Nappe profonde :	60
3.2.Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère :	61
3.2.1.Inventaire des points d'eau :	61
3.2.2.Etude de la piézométrie :	62
3.2.2.1.Interprétation des cartes piézométriques :	62
3.2.2.2.Fluctuation de la nappe :	66
3.2.3.Caractéristique hydrodynamique :	71
3.2.3.1.Pompage d'essais par la méthode de Jacob :	71
3.2.3.2.TRANSMISSIVITE, COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT ET RAYON D'ACTION	74
4.CONCLUSION :	75

CHAPITRE 03 : HYDROCHIMIE

1.INTRODUCTION :	76
2.METHODE ET ANALYSE :	76
2.1.Acquisition des données hydrochimiques et méthode d'analyse :	76
2.2.Validation des analyses chimique :	77
2.2.1.Méthode de traitement des données :	79
3.RESULTATS :	79
3.1.Résultats des mesures physico-chimiques des eaux :	79
3.1.1.Distribution spatiale des paramètres physico-chimiques :	79
3.1.1.1.Les paramètres physiques :	79
3.1.1.2.Paramètres chimique :	83
3.1.2.Etude des rapports caractéristiques :	90
3.1.2.1.Le rapport (Na ⁺ /K ⁺) :	90

3.1.2.2.Les rapports (Na^+/Cl^-) et ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$) :	91
3.1.2.3.Le rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$) :	91
3.1.2.4.Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$) :	92
3.1.2.5.Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$) :	93
3.1.2.6.Le rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) :	93
3.1.2.7.Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$) :	94
3.1.2.8.Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$)/ ($\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$) :	94
3.1.2.9.Le rapport (Na^+/Cl^-) / ($\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$) :	95
3.1.2.10.Le rapport ($\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$) :	96
3.1.2.11.Les rapports ($\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$), ($\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$) et ($\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$) :	97
3.1.2.12. ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) – conductivité électrique :	99
3.1.2.13.Etude du strontium (Sr):	99
3.1.3.Classification hydrochimique des eaux :	100
3.1.3.1.Le diagramme de Piper :	100
3.1.3.2.Comportement des eaux dans le triangle des cations :	101
3.1.3.3.Comportement des eaux dans le triangle des anions :	101
3.2.Résultats de l'étude statistique multi-variée :	102
3.2.1.Statistique descriptive :	103
3.2.2.Analyse en composante principale :	103
3.2.2.1.Matrice de proximité (Coefficient de corrélation de Pearson) :	103
3.2.2.2.Valeurs propres :	104
3.2.2.3.Vecteurs propres :	106
3.2.2.4.Coordonnées factorielles :	106
3.2.3.L'analyse de classification hiérarchique	109
3.2.3.1.Principe de la méthode :	109
3.2.3.2.Application et résultats :	109
4.CONCLUSION :	110
CONCLUSION GENERALE:	112
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE:	114
TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX	117
ANNEXE	120

INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'Antiquité, l'eau a toujours été considérée comme une source renouvelable et inépuisable. De nos jours, plusieurs pays sont touchés par l'épuisement de leurs ressources en eau, du fait des conditions climatiques et de l'accroissement de la demande (Blinda, 2009 in Hamzaoui et al 2012).

Les pays du pourtour méditerranéen, considérés comme semi-aride seront de plus en plus confrontés à des pénuries d'eau, tant les pressions provenant de l'agriculture, de l'industrie et des populations y sont fortes et croissantes. C'est tous ce qui est bien retrouvé au cœur des steppes algériennes, la cuvette Hodnéenne s'allongeant sur une superficie presque uniforme entourée par des reliefs montagneux assez élevés dont elle est subite dans les dernières décennies une forte sécheresse et une désertification courante rendant le domaine de l'eau de plus en plus vital et les ressources en eaux souterraines de plus en plus sollicités d'une façon à dégrader la qualité et la quantité de ces eaux alors qu' à un certain époque l'eau de la région du Hodna était considéré comme des réserves inépuisable par son degré d'artésianisme jaillissant et son extension.

Toutes ces contraintes conduisent les chercheurs à multiplier les études sur le demain de l'eau au niveau de cette région afin d'avoir quelque notion sur le comportement hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines agissant à une gestion durable de ces ressources. La présente thèse vient s'ajout de plus à d'autres travaux et peut pallier à ces carences dans le domaine de la gestion de ces eaux. Il s'agit d'avoir les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques des systèmes aquifères du bassin de Hodna.

Pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons développés les chapitres suivants :

Le premier chapitre englobe des généralités de la région d'étude, il s'agit d'apporter toutes les informations de base concernant la situation géographique et hydrographique, le régime climatique permettant d'évaluer les apports d'eau alimentant les réserves souterraines, et la synthèse géologique dans le but de schématiser la géométrie de l'aquifère et son extension.

Le deuxième chapitre sera consacré pour l'étude du fonctionnement hydrogéologique et hydrodynamique du système aquifère. Il s'agit d'établir des cartes piézométriques permettant d'évaluer le taux de fluctuation de la nappe au cours du temps dans le but d'extraire la distribution des paramètres hydrodynamiques du système aquifère à travers le bassin.

Le troisième chapitre sera consacré pour l'étude hydrochimique du système aquifère. Il s'agit de traiter les données hydrochimiques de 19 points d'eau échantillonnés par l'A.N.R.H en utilisant deux méthodes d'interprétation :

- La première a été menée en vue de faire un état des lieux de la chimie des eaux en fonction des paramètres physico-chimiques. Il s'agit d'analyser ces paramètres d'une

façon à établir des cartes de répartition spatiale de ces paramètres à travers le bassin et définir les faciès chimiques des eaux souterraines.

- La deuxième a été retenue en vue de bien confirmer les résultats trouvés dans la partie précédente par l'utilisation de l'approche statistique (l'analyse des composantes principales et L'analyse de classification hiérarchique).

CHAPITRE 01 : GENERALITE**1. INTRODUCTION :**

On sait que chaque étude hydrogéologique et hydrochimique dans une région devrait être précéder par une appréciation préliminaire sur tous les plans que ça soit géographique, climatique, géologique etc. Dans cette présente section de l'étude, on va essayer préalablement d'identifier géographiquement et géomorphologiquement notre région de travail dans le but d'avoir une idée sur la forme et le prolongement du bassin de Hodna. Ensuite, on va entamer une aperçue climatique afin de déterminer et de quantifier le bilan hydrologique du bassin. Finalement, on termine par une synthèse géologique agissant à reconstituer l'histoire chrono-stratigraphique et énumérer les phénomènes tectoniques touchant notre région d'étude.

2. SITUATION GEOGRAPHIQUE :

Le bassin du Hodna s'étend sur une superficie d'environ 25500 Km² et est situé à environ 100 à 150 Km de chaîne de montagne au Sud de la mer. Ce bassin est en effet la portion centrale d'un bassin hydrographique endoréique. Il représente le cinquième et le centre des bassins en Algérie orientale.

L'endoréisme du Hodna se représente comme une longue dépression sous forme d'une cuvette de 8500 Km² et de 400 m d'altitude moyenne où on trouve un ensemble de chott ou surface salée. Cette dépression est entourée par des arcs de montagnes presque continues de Nord et l'Est culminant d'environ 1400 à 1800m reliant l'Atlas Tellien à l'Atlas Saharien et le massif des Ouennougha à l'Aurès, en passant par les monts du Hodna et du Belezma. Au Sud, les Monts de Boussaâda et le massif de la chaîne de Zap culminant à environ 1300 et 1600m, occupent la partie méridionale du bassin et forment le couloir des Hautes Plaines où dominent de grandes falaises. A l'Ouest est limitée par le bassin du Zahrez Chergui et les Hautes Plaines Algéroises.

La forme du bassin de Hodna correspond à la forme d'amincissement de la carte d'Afrique, elle englobe en très grande partie la wilaya de Msila, des parties des wilayas de Batna, de Bordj-Bouariridj, Djelfa, Média, Sétif et Bouira. (Figure 01).

De façon à résumer la morphologie du bassin de Hodna, on peut discrétiser la zone en trois parties :

- Le cadre montagneux : c'est au niveau de l'intersection de l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien où les Monts de Hodna, les Monts Belezma et les Monts de Boussaâda forment un cadre presque continu.
- Les piedmonts : c'est des zones de jonctions entre les monts et les plaines où se trouvent des collines sous formes des plans inclinés permettant l'écoulement des eaux vers les plaines. Au niveau de ces zones, les oueds descendant des montagnes (les oueds M'sila et

Selmane) et les ruisseaux temporaires découpent et ravinent ces collines en formant des alluvions récentes.

- La plaine : La plaine de M'sila couvre une superficie d'environ 500 km². Elle est limitée au Nord et à l'Est par les glacis. Au Sud, la courbe de niveau 400m marque grossièrement le passage de la plaine au chott d'où une pente de 0.55%. (Amroune, 2008).

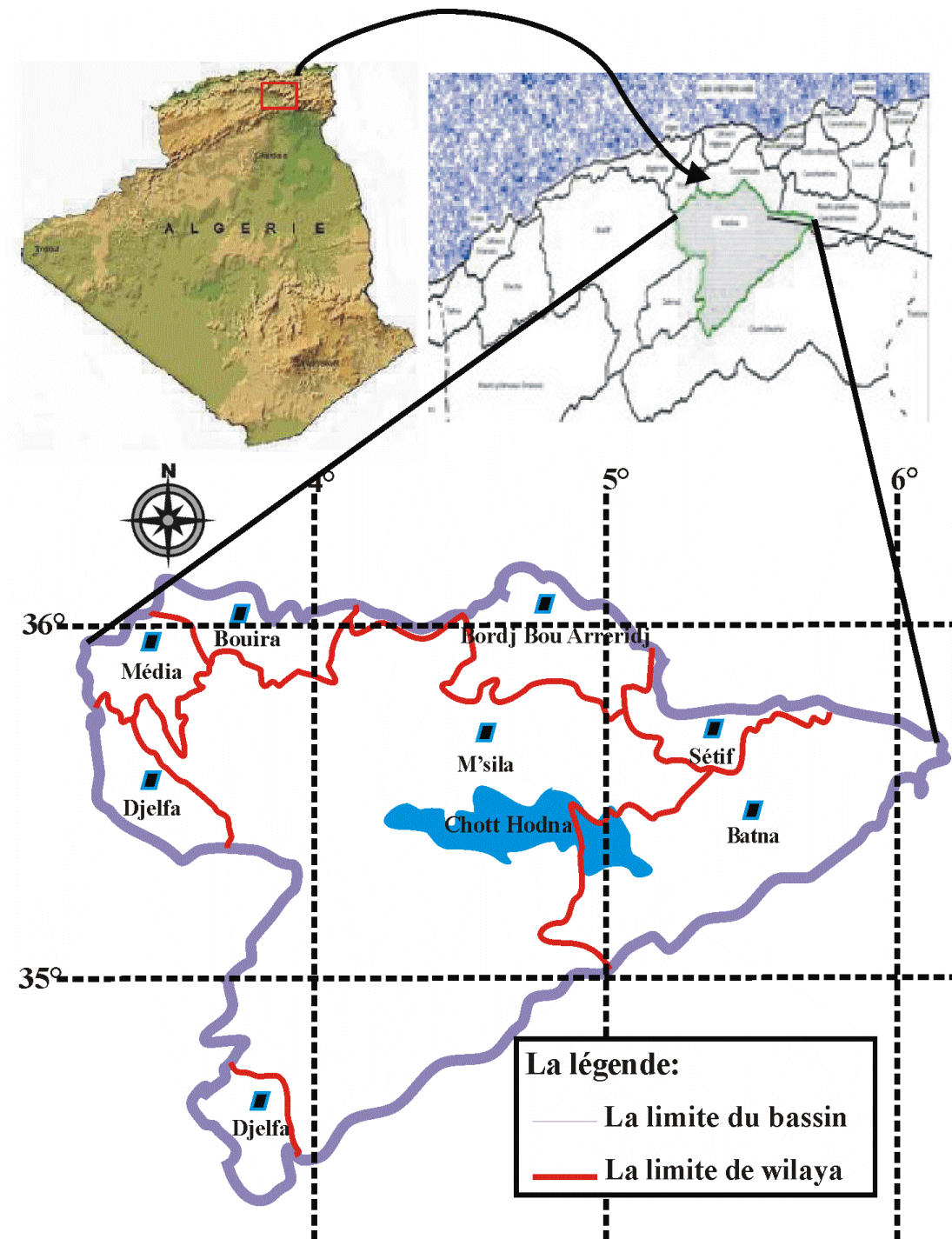


Figure 01 : Situation géographique du bassin de Hodna

3. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE :

Le chevelu hydrographique du bassin de Hodna est relativement dense. Il est repartie sur la presque totalité du bassin dont les oueds prennent naissance dans les monts et s'acheminent vers le chott. Chaque Oued draine un sous bassin et prend une structure déterminée dont on trouve : Tableau (01).

3.1. Le sous bassin versant de l'Oued Elleham :

Le sous bassin d'Oued Elleham couvre une superficie de 6759,3 km². Il prend une forme cyclique. C'est le cours d'eau le plus important du bassin (figure 02), il prend naissance de l'Est du mont de Hodna et s'achemine de façon régulière dans la partie centrale du sous bassin vers le chott selon la direction Est – Ouest.

3.2. Le sous bassin d'Oued M'cif :

Le sous bassin d'Oued M'cif couvre une superficie de 5235,2 km² représentant le deuxième sous grand bassin du bassin de Hodna. Il prend une forme d'une bonde incliné suivant la limite Sud-est du bassin dont l'Oued collecte les affluents issus du massif de la chaîne de Zab et s'achemine de façon presque rectiligne vers le chott.

3.3. Le sous bassin d'Oued Barika :

Le sous bassin d'Oued Barika couvre une superficie de 3783 km². Il occupe la partie Est du bassin de Hodna. Généralement, ce bassin est drainé par deux oueds qui sont l'oued Barika et l'oued Bitam. Ces deux oueds collectent les affluents du massif de l'Aurès et s'acheminent parallèlement vers le chott.

3.4. Le sous bassin d'Oued K'sob :

Le sous bassin de l'Oued K'sob couvre une superficie de 3605 km². L'Oued K'sob collecte les affluents des monts de Hodna et Belezma, ces affluents alimentent l'oued K'sob en un caractère d'écoulement périodique. Il se perd par endroit dans les dépôts de sable et de gravier de son lit pendant les périodes d'étiages. Il prend son cheminement de façon presque rectiligne jusqu'il traverse la ville de M'sila où son nom devient l'oued M'sila et s'achemine vers le Chott Hodna.

3.5. Le sous bassin d'Oued Boussaâda :

Le sous bassin d'Oued Boussaâda couvre une superficie de 2913km². C'est le principal dans la partie sud du bassin, son réseau hydrographique est constitué par un nombre moins important d'affluents et sous affluents qui collectent les eaux de ruissellement des monts de Boussaâda où il constitue un paysage touristique important sous forme des petits cascades et des falaises dans des formation gréseuse. Il s'achemine vers le Chott Hodna en direction Sud-ouest, Nord-est.

3.6. Le sous bassin d'Oued Soubella :

Le sous bassin d'Oued Soubella couvre une superficie de 1828 km². Son réseau hydrographique est constitué par un nombre des affluents de mêmes ordre qui prennent naissances des monts de Belezma et s'acheminent parallèlement vers le Chott Hodna en direction Nord-est, Sud-ouest.

3.7. Le sous bassin d'Oued Lougman :

Le sous bassin d'oued Lougman couvre une superficie 336 km². C'est le plus petit sous bassin du bassin de Hodna. Son réseau hydrographique est le seul qui ne verse pas dans le Chott Hodna, il prend son naissance dans les monts de Hodna et s'achemine vers le sous bassin d'oued K'sob.

Tableau 01 : les superficies des sous bassin hydrographiques du bassin de Hodna

Le sous bassin	Elleham	Lougman	K'sob	Soubella	Barika	Boussàada	M'cif
La superficie (km ²)	6759.3	336.9	3605	1828	3783	2912.9	5235.2

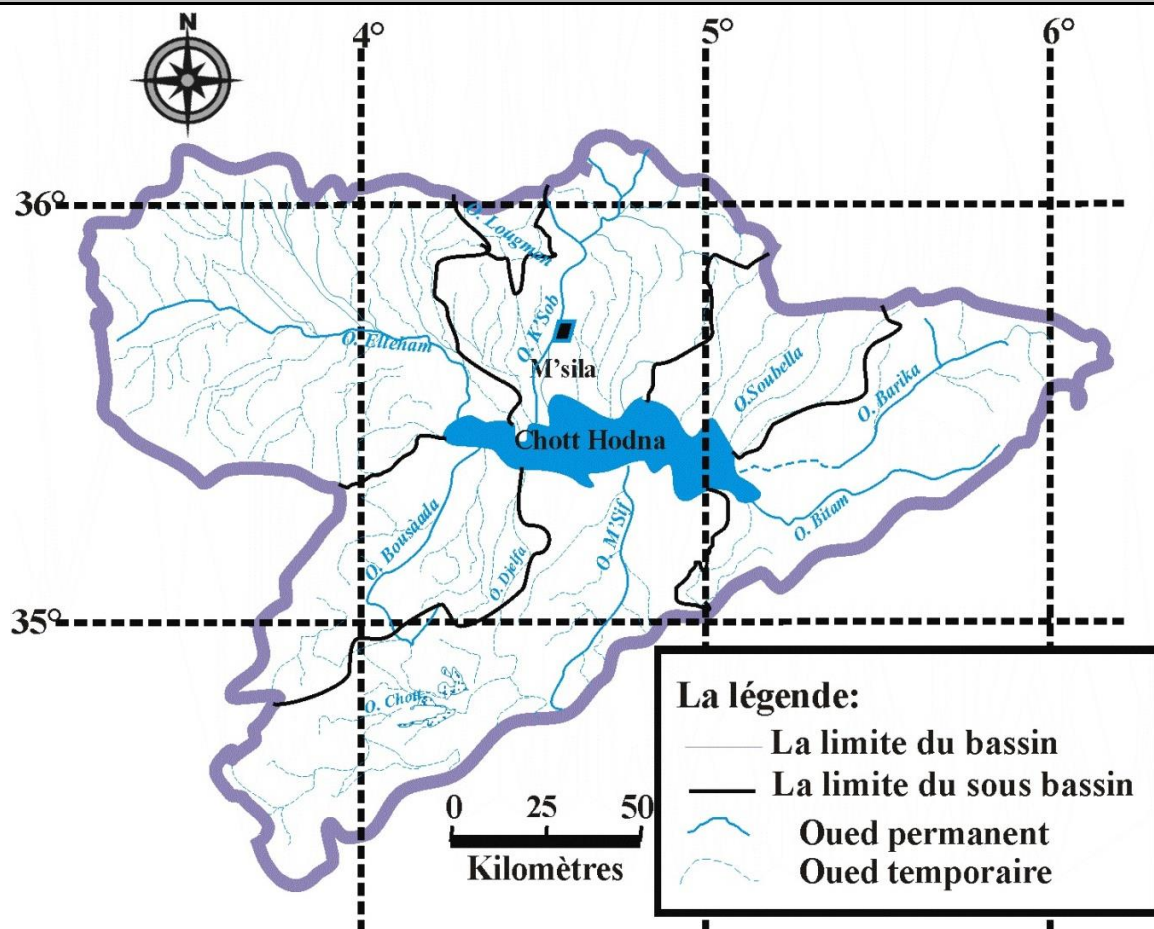


Figure 02 : le réseau hydrographique du bassin de Hodna

4. CONTEXTE CLIMATIQUE

4.1. Introduction :

L'étude climatique d'une région est un paramètre rendant très essentiel dans tous les domaines de recherche scientifique que sa soit hydraulique, hydrogéologique, environnementale, agricole... elle traite essentiellement des problèmes qualitatives et quantitatives de l'eau au cours des processus de son cycle. Elle est basée sur des facteurs tels que la température, les précipitations, le vent, l'humidité relative à l'air, l'altitude et la latitude. Tous ces facteurs ont des influences sur la qualité et la quantité de l'eau au cours de son cycle.

Dans notre région d'étude, on tentera de procéder à des calculs à partir de données météorologiques disponible, en utilisant des méthodes de calcul conformément à leurs conditions d'application dans le couloir méditerranéen afin d'examiner les principaux facteurs climatiques permettant par la suite l'établissement d'un bilan hydrologique pour appréhender le fonctionnement du système hydraulique du bassin de Hodna. Il s'agit des formules et des abaques estimés expérimentalement par des chercheurs permettant d'identifier facilement le régime climatique dans chaque région à partir des facteurs tels qu'ils sont énoncés précédemment.

4.2. Etude des facteurs climatiques:

Les conditions climatiques et pluviométriques en premier lieu jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique. Les précipitations interviennent par :

- Leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance pluviale
- Leur répartition mensuelle et saisonnière qui distingue les régimes hydrologiques.
- Leurs totaux journaliers et surtout les averses : facteur générateur des crues.

(Boulghobra N, 2006).

4.2.1. La pluviométrie :

Les précipitations forment un paramètre hydrologique de grande importance dans le fonctionnement d'un bassin versant. Cependant, l'estimation exacte de la lame d'eau précipitée sur la totalité du bassin, reste une opération particulièrement délicate, et nécessite l'utilisation de différentes méthodes, afin de prendre en compte toutes les contraintes géographiques qui peuvent exister, notamment l'altitude, la topographie, l'exposition ou l'orientation des versants.

4.2.1.1. Interprétation de la carte des précipitations :

Les stations utilisées pour la réalisation de la carte des précipitations du bassin de Hodna sont sélectionnées selon leur emplacement dans le bassin et leur richesse en données mensuelles des précipitations durant la période 1980-2004. Puisqu'on n'a pas toutes les données efficaces pour tracer une carte des isohyètes de la région d'étude, on essaye de réaliser une carte moyennement

représentative sans prendre en considération les facteurs suivante : éloignement à la mer et l'exposition du bassin versant.

Tableau 02 : stations pluviométriques utilisées pour la réalisation de la carte pluviométrique du bassin de Hodna.

code station	nom de station	X Lambert (Km)	Y Lambert (Km)	Z (m)	Approximatif	Période de mesure	P Moyenne annuelle (mm)
50702	Ain Kharmane	629,81	239,98	501		1984-2004	158,06
52003	Ain Melh	632,66	173,38	944		1984-2004	164,31
51801	Baniou	648,65	236,23	579		1984-2004	169,78
50701	Chellal	652,70	247,58	410		1984-2004	186,41
50802	Elhaourane M,F	667,34	285,29	748		1984-2004	269,66
51005	Ksob Barrage	668,48	282,13	545		1984-2004	201,81
50901	Medjez	672,59	286,82	573		1984-2004	227,94
50703	Rocher de sel	642,41	260,31	428		1984-2004	184,25
50601	Sidi Ameer	609,86	231,6	781		1984-2004	165,56
51703	Slim	593,66	178,51	1 072		1984-2004	156,10
51009	Tarmount	642,96	281,33	450		1984-2004	215,63
50303	Bel Aroug	597,5	237,51	693		1984-2004	197,17

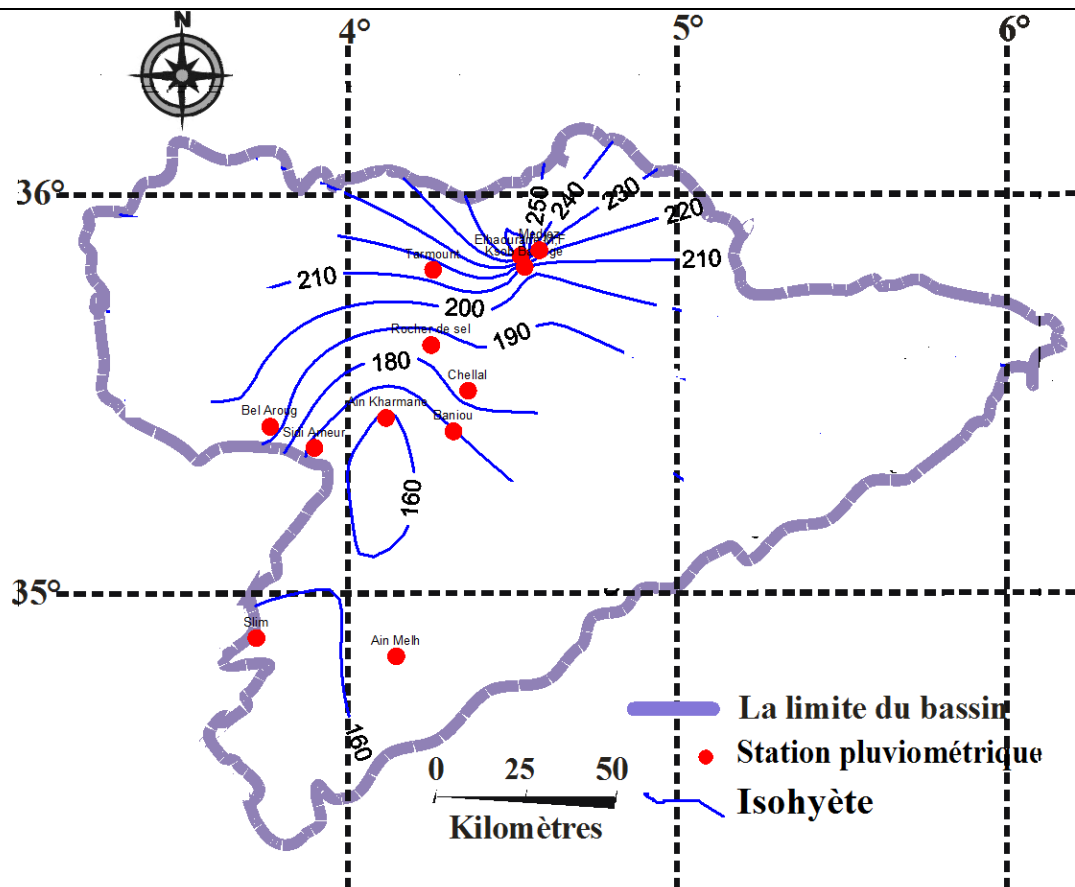


Figure 03 : la carte des isohyètes du bassin de Hodna durant la période (1980,2004)

La carte des précipitations moyennes réalisée donne la répartition spatiale des précipitations. Cette carte couvre une période s'étalant de 1984 à 2004. Les traits essentiels qui s'en dégagent montrent une stabilisation longitudinale avec une faible diminution des précipitations d'Ouest en Est et une évolution latitudinale avec une diminution des précipitations du Nord (littoral) au Sud (Sahara) dont elle confirme la théorie de l'éloignement à la mer. A cela s'ajoute une évolution locale due à l'influence de l'altitude et de l'orographie.

La figure montre que la partie Nord du bassin est arrosée que la partie Sud, cela confirme la théorie de l'éloignement à la mer. On note des valeurs maximales de l'ordre de 250 mm au Nord de Msila, des valeurs minimales de l'ordre de 160 mm dans la partie Sud.

Des valeurs moyennes sont enregistrées dans la partie centrale du bassin.

4.2.1.2. Variations interannuelles des précipitations :

Dans le but d'avoir une confirmation sur la diminution latitudinale de la précipitation dans le bassin de Hodna, nous avons choisi deux stations d'emplacement différent (Medjez au Nord et Ain Melh au Sud) (figure 03) dont ses données sont relatives aux années comprises entre 1980 et 2004.

Tableau 03 : Données des précipitations moyennes annuelles durant la période 1980, 2004 de la station de Medjez et Ain Melh.

Année	Medjez	Ain Melh
1980	191,4	135,0
1981	262,9	217,7
1982	259,0	135,3
1983	129,3	121,6
1984	178,8	157,7
1985	303,9	182,0
1986	275,0	160,0
1987	228,5	109,1
1988	203,6	147,1
1989	305,1	214,6
1990	208,8	125,8
1991	331,7	154,0
1992	212,3	137,9
1993	155,2	91,50
1994	148,9	285,9
1995	309,9	147,8
1996	203,0	188,3
1997	199,0	247,4
1998	206,2	119,8
1999	276,8	163,8
2000	181,4	83,2
2001	143,9	137,0
2002	231,3	218,4
2003	366,2	262,5
2004	186,5	165,8
M.P.	227,9	164,3
E-Type	63	52

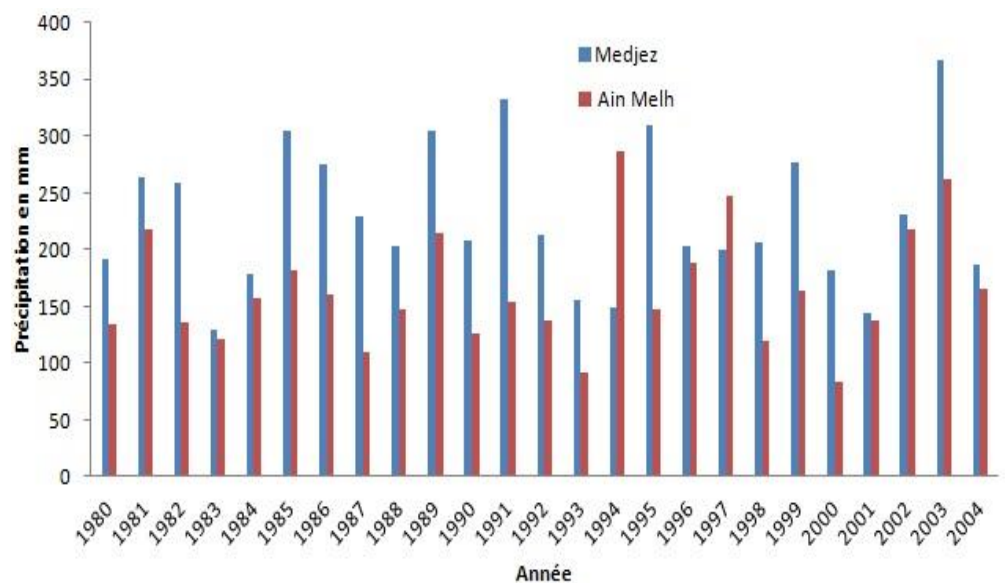


Figure 04 : variation interannuelle des précipitations durant la période 1980 -2004.

Station de Medjez :

L'évolution interannuelle des totaux moyens annuels (figure 04) montre que l'année la plus pluvieuse est 2003 avec une hauteur de 366 mm et l'année la moins pluvieuse est 1983 avec une hauteur de 129 mm.

Station d'Ain Melh :

La figure montre que l'année la plus pluvieuse est 1994 avec une hauteur de 285,9 mm au contraire de l'année 2000 qui marque un indice de sécheuse de l'ordre de 83,2 mm.

L'analyse de cet histogramme permettra de dire :

- La partie Nord du bassin est généralement plus arrosée par rapport à la partie Sud,
- Le module pluviométrique varie de 164 à environ 227mm à travers le bassin,
- Des pics de précipitation annuelle sont presque observés tous les 5 ans,
- L'allure des courbes présente une relative correspondance entre les deux stations.

4.2.1.3. Variations moyennes mensuelles des précipitations :

Tableau 04 : données des moyennes mensuelles de précipitation durant la période 1980 - 2004 de la station de Medjez et Ain Melh.

Nom de station	Période	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
Ain Melh	1980/2004	29,2	27,6	18,9	13,1	15,6	8,3	6,1	11,0	19,7	5,0	1,8	7,4
Medjez	1980/2004	24,9	22,7	26,2	23,6	20,7	17,2	22,2	21,5	29,9	9,0	4,1	5,5

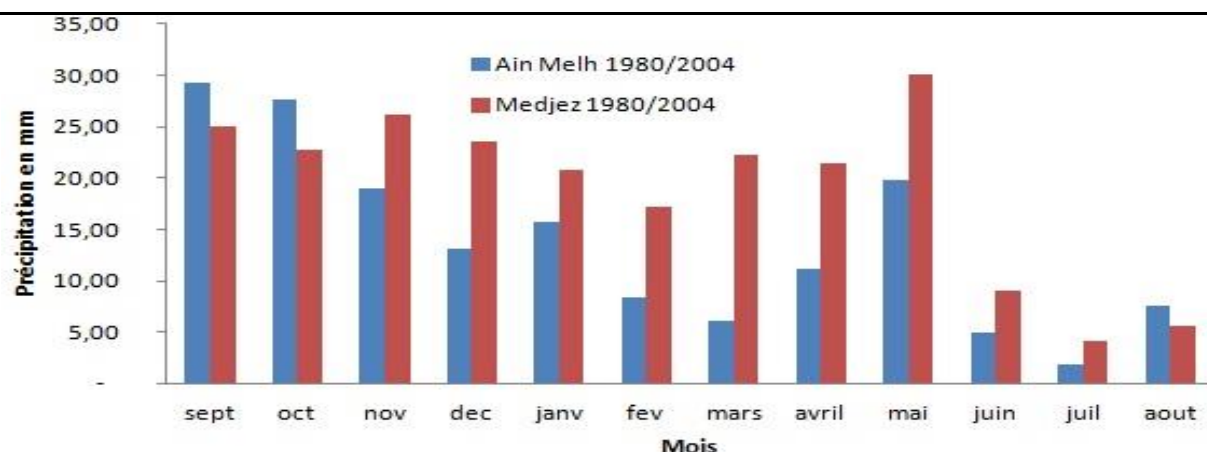


Figure 05 : Variation des moyennes mensuelles de précipitation durant la période 1980/2004

Station de Medjez :

L'histogramme des variations mensuelles de précipitation durant la période 1980 et 2004 montre que le mois le plus pluvieux est celui du mois de Mai avec une valeur de l'ordre de 30 mm au contraire du mois de Juillet qui marque un minimum de l'ordre de 4mm.

Station d'Ain Melh :

D'après L'histogramme ci-dessus ; on observe que le mois le plus humide est celui du mois de Septembre avec une valeur d'environ 29mm par contre le mois le plus sec est celui du mois de Juillet avec une valeur de l'ordre de 2mm.

- La partie Nord du bassin est plus arrosée que la partie Sud durant le mois de Novembre jusqu'au mois de Juillet et le contraire est vrai pour les mois restants.
- L'allure de l'histogramme de ces deux stations présente presque une correspondance durant les mois d'année.
- Durant les mois de Septembre et Octobre les précipitations sont relativement élevées au Sud par rapport au Nord, ceci est dû à l'importance des orages dans la région sud.

4.2.1.4. Variations saisonnière des précipitations :

Dans le but de savoir le comportement pluviométrique saisonnière au niveau du bassin de Hodna, nous avons tracé un histogramme de variation des moyennes saisonnières de précipitation (figure 06) qui, par conséquence montre que :

- Pour les deux stations, la saison pluvieuse est l'Automne et la saison sèche est l'Eté.
- La partie Nord du bassin est plus arrosée plus particulièrement au cours des saisons d'hiver et de printemps par rapport à la partie Sud.
- La partie Sud du bassin est caractérisée par un automne pluvieux en raison des pluies orageuses.

Tableau 05 : données des moyennes saisonnières de précipitation durant la période 1980,2004.

Nom de station	Période	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Ain Melh	1980/2004	25,2	12,4	12,3	4,7
Medjez	1980/2004	24,6	20,5	24,5	6,2

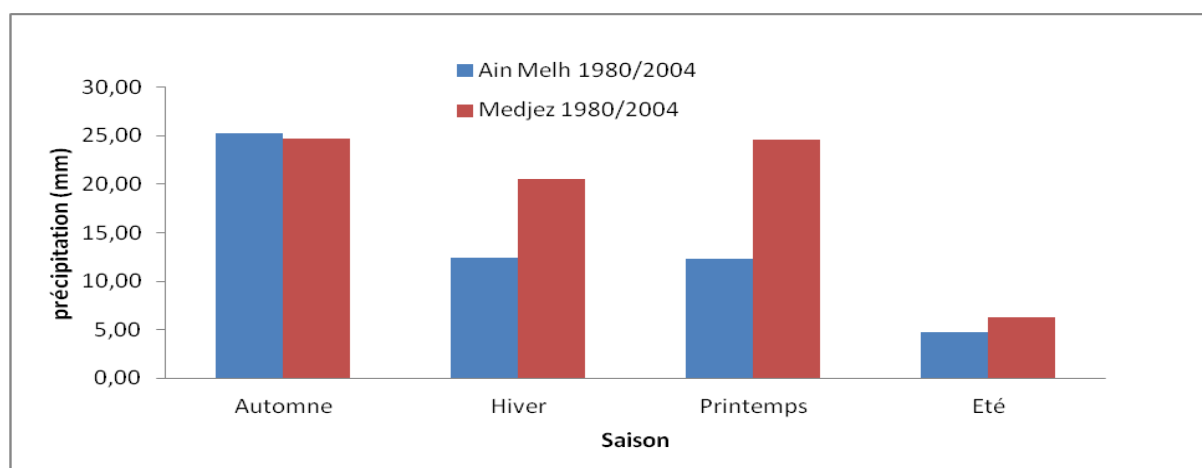


Figure 06 : Variation des moyennes saisonnières de précipitation durant la période 1980/2004

4.2.2. Les températures :

Les températures représentent un élément fondamental du climat. Elles sont liées à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de la salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique (Lamini, 2012).

« Les températures sont en étroite relation avec l'altitude, notamment, au niveau de l'Atlas saharien. Sur la plate-forme saharienne l'évolution de la température est essentiellement due à

l'effet de la latitude. Le gradient thermique moyen admis en Algérie (Seltzer 1948) est de 0.50 °C/100 m. Ce gradient est, cependant, plus élevé dans l'Atlas saharien oriental. Il est de 0.75 °C/100 m. (Nemouchi, 2001). Sary (1976) avait établi une carte des amplitudes annuelles (degré de continentalité) » (Chabour, 2006).

Cette constatation place le bassin de Hodna dans un couloir orienté Nord-Sud compris entre les iso-amplitudes supérieures de 26 à 31°C du mois de Juillet et les iso-amplitudes inférieures de 6 à 9°C du mois de Janvier. (Figure 07) :

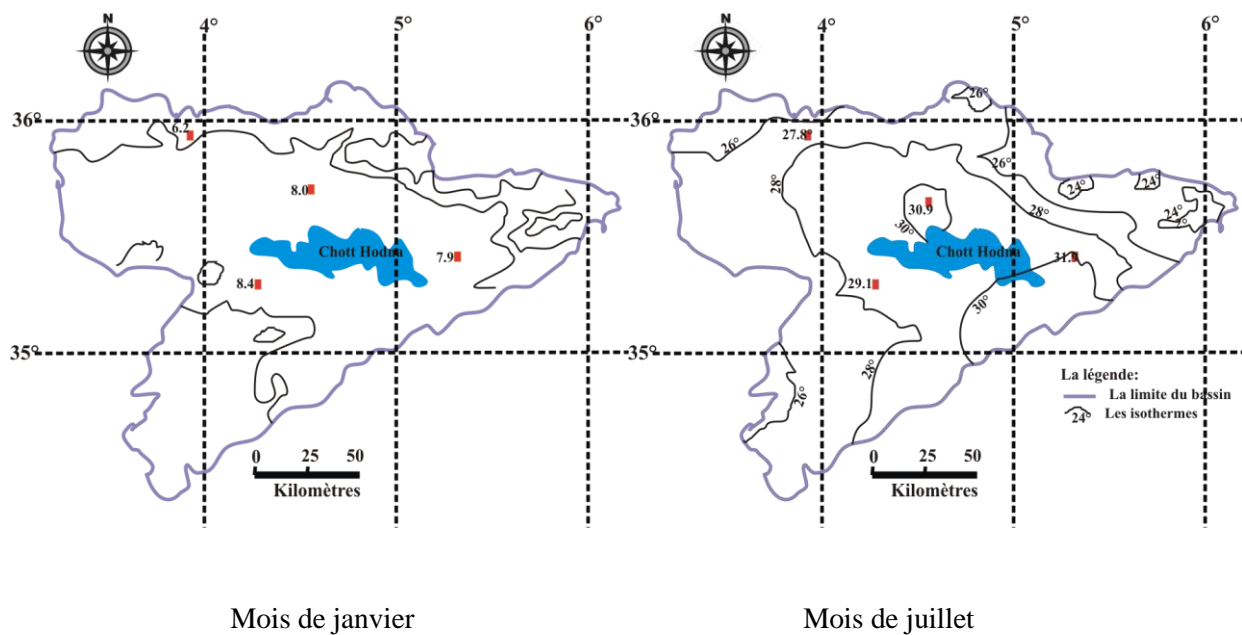


Figure 07 : Variation des amplitudes de température du mois de Janvier et de Juillet au niveau du Bassin de Hodna (ANRH)

4.2.2.1. Variation des moyennes mensuelles des températures :

On constate généralement que la température minimale est atteinte quelques temps avant le lever du soleil alors que la température maximale s'observe vers midi au soleil. Le relevé des températures maximale et minimale en fin de journée permet d'évaluer, à quelques dixièmes de degrés près, la température moyenne journalière T_j

$$T_j = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 0,1$$

Les données thermiques utilisées dans la présente étude sont celle de la station de Medjez qui présente la série la plus homogène durant la période de (1990 – 2005). Les observations faites sur cette période (figure 08) montrent que les mois de juin, juillet et août sont plus chauds en général avec des moyennes maximales de l'ordre de 36 à 43 °C.

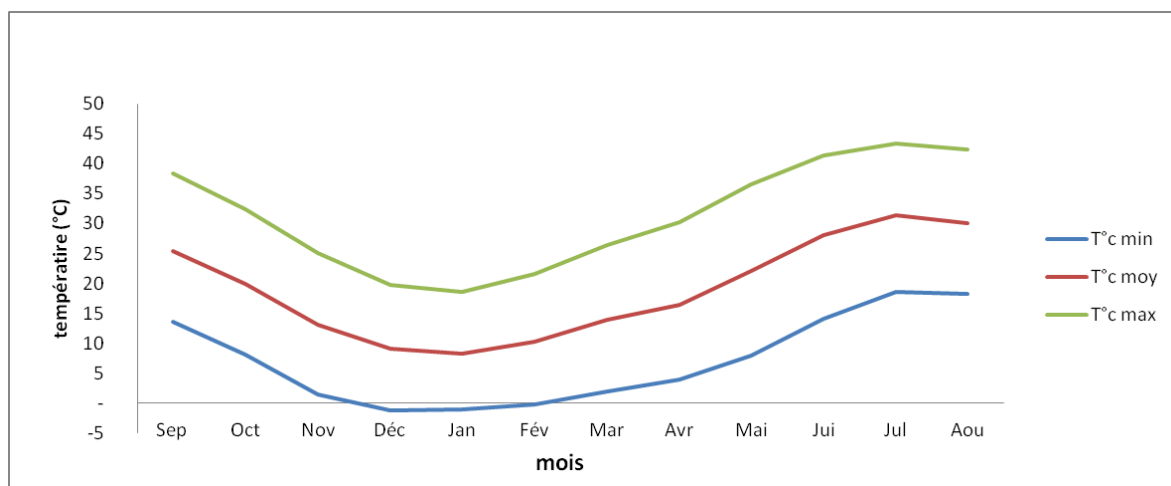


Figure 08 : Variation des moyennes mensuelles de température durant la période 1990/2005

Tableau 06 : Données des moyennes mensuelles de température de la station de Medjez durant la période 1990/2005.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Année
T°c min	13,6	8,1	1,4	- 1,2	- 1,1	- 0,3	2,0	4,0	7,9	14,1	18,6	18,3	7,1
T°c moy	25,4	19,9	13,1	9,1	8,3	10,2	13,9	16,4	22,1	28,1	31,4	30,1	19,0
T°c max	38,4	32,4	25,1	19,7	18,6	21,6	26,4	30,3	36,5	41,4	43,4	42,3	31,3

Les maxima s'observent durant le mois de juillet et août et les minima thermique durant les mois de décembre et de janvier. Les régions situées au niveau des reliefs sont caractérisées par des hivers particulièrement rigoureux, avec des températures nettement en dessous de 0°C.

4.3. Evapotranspiration et déficit d'écoulement:

Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, etc.), soit le plus souvent à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration. Pour l'évaporation, la quantité d'eau qui repart dans l'atmosphère dépend uniquement des paramètres physiques tels que la température de l'air, de l'eau, de la vitesse du vent, du degré hygrométrique, de l'ensoleillement, etc. L'évapotranspiration, elle, dépend en plus

du couvert végétal et de son stade de développement ; sa mesure en est rendue d'autant plus difficile. (J.P. Laborde 2000)

4.3.1. Déficit d'écoulement :

Le déficit d'écoulement désigne la quantité d'eau tombée sur un bassin versant et qui n'a jamais arrivé à l'exutoire de ce bassin. C'est la quantité d'eau subite les processus d'infiltration et d'évapotranspiration. Les principales méthodes destinées à la mesure du déficit d'écoulement sont la méthode de COUTAGNE, la méthode de WUNDT et la méthode de VERDEIL dont chaque méthode a des conditions d'application. Puisque notre région d'étude se trouve au niveau du contour méditerranéen, la méthode de VERDEIL est la plus proche à la réalité pour estimer la valeur de D.E, elle consiste à reporter la valeur de la précipitation moyenne annuelle sur l'abaque représentative de $P=F(D)$, calculée à partir de l'ensemble des données disponibles au MAGHREB, puis repérer ou lire la valeur du déficit d'écoulement en (mm). (Figure 09)

L'abaque de calcul du déficit d'écoulement Verdeil (1988)

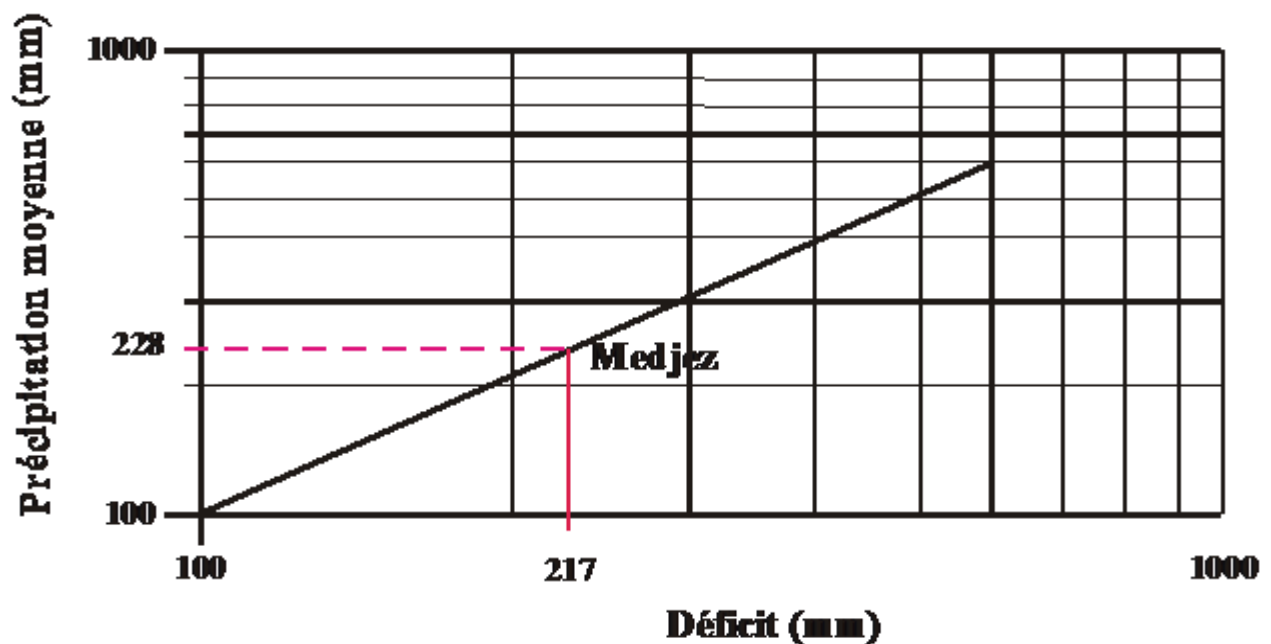


Figure 09 : l'abaque de déficit d'écoulement de verdeil 1988

4.3.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (notée par la suite ETP) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant. (J.P. Laborde 2000). Elle représente la consommation en eau nécessaire pour que la végétation ne souffre jamais du manque d'eau.

Plusieurs méthodes sont destinées pour la mesure de l'ETP dont chaque méthode a des conditions d'application. La plus complète et la plus complexe est certainement la formule de Penman basée sur la notion de bilan énergétique. Cependant, le nombre de paramètres utilisés par cette formule (différentes températures, hygrométrie, rayonnement global, albédo, etc.) font que son emploi est rarement possible compte tenu des mesures disponibles.

4.3.2.1. L'ETP De Thornthwaite (1944) :

La formule tient compte des données facilement accessibles : la température moyenne de l'air et la durée théorique de l'insolation qui dépend de la saison et de la latitude. L'évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm) est donnée par :

$$ETP (\text{mois, non corrigée}) = ETP = 16 \left(\frac{10\bar{t}(m)}{I} \right)^a$$

Avec

* \bar{t} = température moyenne mensuelle (°C)

* I = indice thermique annuel

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \text{ et } i = \left(\frac{\bar{t}(m)}{5} \right)^{1,514}$$

* a = fonction de l'indice I : $a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$

$$ETP (\text{mois, corrigée}) = ETP (\text{mois, non corrigée}) * K$$

Avec

* K : coefficient de correction qui dépend de la latitude de la station et de la durée moyenne d'ensoleillement du jour.

Les résultats de l'ETP obtenus par la méthode de Thornthwaite au niveau du bassin de Hodna durant la période 1990/2004 sont enregistrés dans le tableau ci-après :

Tableau 07 : Données des moyennes mensuelles d'ETP durant la période 1990,2004

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Année
T(C°)	25,40	19,90	13,10	9,10	8,30	10,20	13,90	16,40	22,10	28,10	31,40	30,10	19,00
i	11,71	8,10	4,30	2,48	2,15	2,94	4,70	6,04	9,49	13,65	16,15	15,15	96,85
ETP'' (mm)	115,4	70,03	29,72	14,08	11,66	17,79	33,56	47,10	86,82	142,1	178,3	163,5	910,23
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	-
ETP* (mm)	118,9 5	67,93	25,56	11,97	10,14	15,12	34,56	51,34	105,0 5	171,8 9	219,3 9	189,7 3	1021,64

ETP'' : ETP non corrigée. ETP* : ETP corrigée.

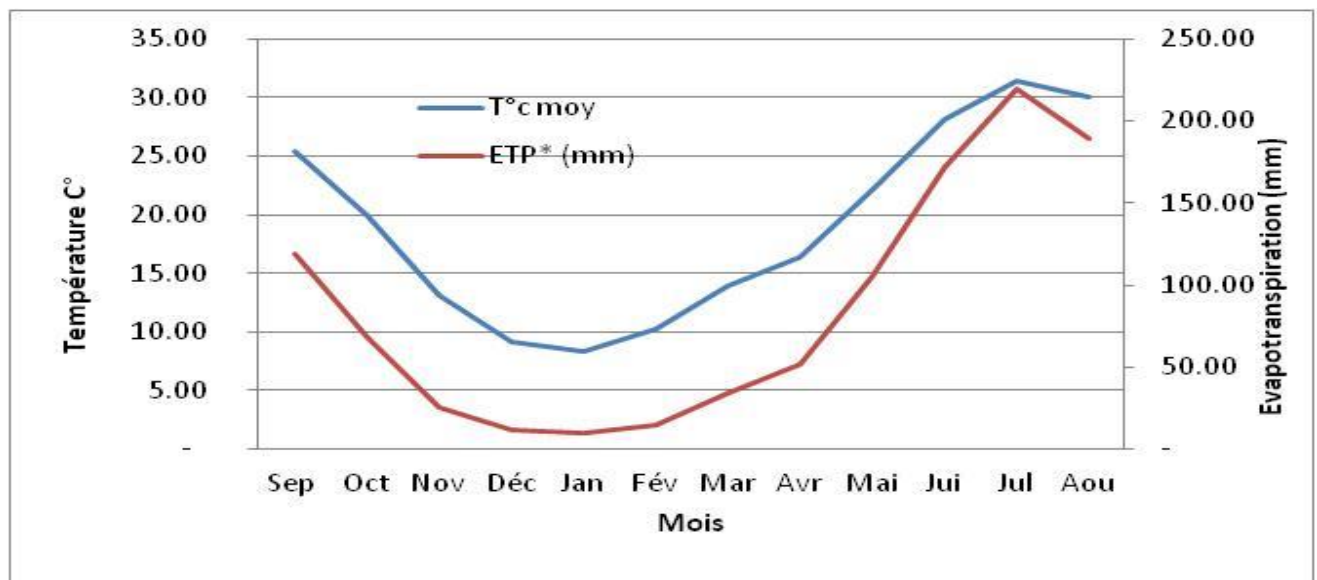


Figure 10 : l'évolution mensuelle de la température et de l'ETP.

La figure 10 montre bien la relation la plus courante entre la température et le taux d'évapotranspiration potentielle. Elle présente une correspondance très parfaite entre ces deux courbures.

4.3.3. L'évapotranspiration réelle (ETR) :

On appelle évapotranspiration réelle (notée par la suite ETR), la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant. (**J.P. LABORDE 2000**). Puisque notre région d'étude se trouve sous l'influence d'un climat **mixte**, on doit préférer pour calculer l'ETR l'utilisation des deux principales méthodes à savoir : la formule de Turc et le bilan de Thornthwaite.

4.3.3.1. Formule de Turc :

En 1953, TURC a établi une formule de l'ETR résultant des comparaisons des expériences qui ont été faites à l'échelle du bassin versant à ceux qui ont été faites sur des cases lisimétriques :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec $L = 300 + 25T + 0,05T^3$

* P : Pluviométrie annuelle (mm)

* T : Température moyenne (C°)

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle calculées pour la période 1990-2004 à la station de Medjez sont données dans le tableau 08.

Tableau 08 : Données des moyennes annuelles d'ETR durant la période 1990,2004 :

Année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
p (mm)	208.8	331.7	212.3	155.2	148.9	309.9	203.0	199.0	206.2	276.8	181.4	143.9	231.3	366.2	186.5
T(°C)	18.3	17.1	18.2	19.1	19.6	17.5	18.1	19.2	18.6	18.8	19.1	19.1	18.4	17.9	18.9
ETR (mm)	215.5	329.3	218.9	161.9	155.5	310.6	209.7	206.3	213.2	282.0	188.5	150.3	237.7	361.6	193.6
I	7.39	12.23	7.52	5.34	5.04	11.29	7.23	6.81	7.20	9.62	6.23	4.95	8.14	13.13	6.46

N.B. : I : indice de Martonne

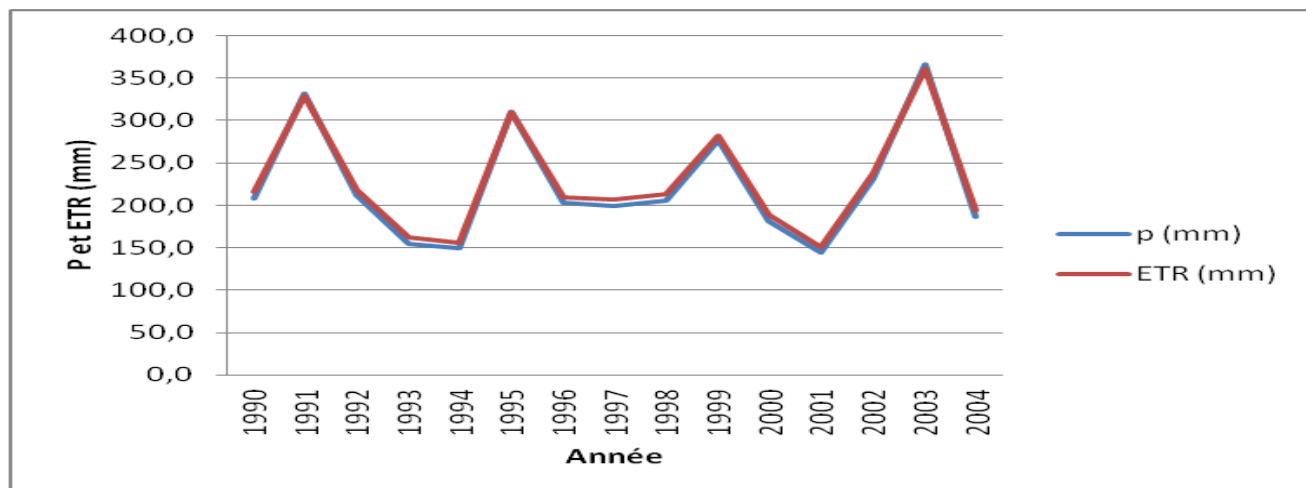


Figure II : Variation des moyennes annuelles de précipitation et ETR durant la période 1990,2004.

4.3.3.2. Formule de M. Coutagne :

L'évapotranspiration réelle est calculée à partir de la relation suivante :

$$ETR = P - \lambda P^2 \dots\dots\dots (*)$$

Où :

- * P : précipitation moyenne annuelle en (m).
- * T : température moyenne annuelle en (°C).

$$\text{Avec } \lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

Cette relation n'est applicable que si P est compris entre $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$

- Si $P < \frac{1}{8\lambda}$: ETR=P et il n'y pas d'écoulement.
- Si $P < \frac{1}{2\lambda}$: le déficit est pratiquement indépendant de P et est donné par la formule :

$$ETR = 0,20 - 0,035T \dots\dots\dots (\ll \ll)$$

Pour une valeur de température de 18,5°C, λ sera égale à 0,29.

Donc, la relation (*) est applicable : $ETR = P - \lambda P^2 \Leftrightarrow ETR = 212,92mm$

La valeur de l'évapotranspiration réelle calculée au niveau de la station de Medjez durant la période 1990-2004 est de l'ordre de 212,9 mm.

4.4. L'humidité de l'aire :

Lorsqu'on parle d'humidité, on a recours à la notion d'humidité relative (HR), que l'on définit comme la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à une température et une pression données. L'humidité relative va de 0 à 100% dont :

- HR < 35%, L'air est sec.
- 35% < HR < 65%, L'air est moyennement humide.
- HR > 65%, l'air est humide.

À l'intérieur d'un même espace, l'HR varie inversement proportionnel en fonction des changements de température, dont en se basant sur ce principe on marque une augmentation de l'humidité du Sud vers le Nord du bassin de Hodna. Il s'agit d'un air sec du mois de Juillet plus particulièrement dans le prolongement de la plaine alluviale de Hodna.

4.5. L'insolation :

L'ensoleillement effectif est en moyenne égal à 8 heures/jour, comparé à l'ensoleillement potentiel qui n'est rien d'autre que la durée du jour et qui est en moyenne de 12 heures/jour (très élevé). Sur le plan temporel, l'ensoleillement et l'évapotranspiration évoluent parallèlement, les maximums sont enregistrés en Juillet et les minimums en Décembre. (A.Amroune, 2008).

Tableau 09 : L'ensoleillement à la Station de M'sila (1990-2005).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Annuel
Ensoleillement (h/mois)	265	249	200	175	188	227	257	275	313	325	345	313	261

4.6. Le vent :

Les vents dominants sont ceux de l'Ouest et du Nord-Ouest qui est fréquents pendant la période hivernale, ils sont relayés par les vents du Sud (Sirocco) pendant la saison estivale (Juin, Juillet, Août) avec un nombre de jours variant entre 25 et 34 jours par an. (A.Amroune, 2008).

Tableau 10 : Vitesse moyenne du vent à la Station de M'sila (1990-2005)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Annuel
Vitesse moyenne du vent (m/s)	3,8	3,8	3,9	4,2	4,0	4,0	4,3	5,4	4,8	4,5	4,8	4,2	4,3

4.7. Caractérisation de climat :

La recherche d'indices bioclimatiques, permettant de caractériser le plus simplement possible le niveau de sécheresse ou d'aridité d'un lieu ou d'un climat, a été une préoccupation importante de la communauté scientifique dans la première moitié du XXe siècle (Curé, 1945 in Lamini, 2012). Les chercheurs ont fait des études sur le comportement climatique des régions du globe terrestre dans le but de bien savoir et extraire des relations et les indices permettant d'identifier facilement le régime climatique d'une région déterminée à partir des facteurs (précipitation et température). Les relations les plus couramment utilisées sont le diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls et l'indice de Martonne.

4.7.1. Diagramme Ombrothermique :

Généralement, le diagramme Ombrothermique est le plus utilisé dans la détermination du climat d'une région déterminée. Il tient compte l'évolution immédiate des moyennes mensuelles de précipitation (P mm) et de température (T °C) et donne une expression relative à la sécheresse estivale en durée et en intensité.

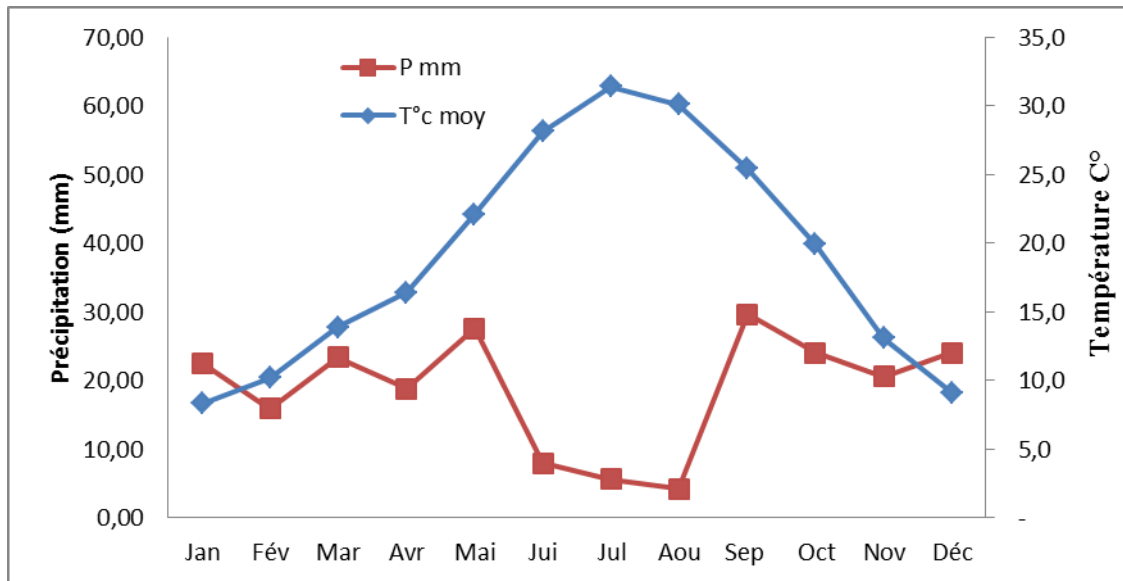


Figure 12 : diagramme Ombrothermique de la station de Medjez durant la période 1990,2004

Au niveau de la station de Medjez, on retrouve deux saisons d'inégales durées :

- ✓ L'une humide s'étalant, sur trois mois (Novembre à Février), elle est caractérisée par une précipitation de l'ordre de 25 mm pendant le mois de Décembre.
- ✓ L'autre sèche, s'étalant sur quatre mois (Mai à Aout). La température moyenne atteint son maximum au mois du Juillet de plus de 32°C°.
- ✓ L'élévation de la précipitation au cours du mois de septembre et octobre peut être exprimée par les pluies torrentielles (orageuses).

4.7.2. Indice de De Martonne :

Comme ce qu'on a dit précédemment, les climatologues développent leurs recherches sur le globe terrestre dans le but d'avoir des modèles permettant d'estimer le climat de chaque région à partir des facteurs climatiques telle que la précipitation et la température. Parmi ces climatologues, Martonne (1926) a établi un indice qui définit l'aridité du climat à l'échelle annuelle par l'équation :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Où :

- * I : indice d'aridité
- * P : précipitation moyenne annuelle en (mm).
- * T : température moyenne annuelle en (°C).

Application :

Pour $P = 224,10\text{mm}$ et $T = 18,51^\circ\text{C}$

Ce qui donne : $I = 7,86$

Donc, selon la classification de Martonne dans le tableau ci-dessous, notre région d'étude se trouve sous l'influence d'un climat steppique. Fi

Tableau11 : Classement de climat en fonction de l'indice d'aridité de Martonne

Classement de l'Indice d'Aridité	Type de Climat
$I < 5$	climat hyperaride
$5 < I < 7,5$	climat désertique
$7,5 < I < 10$	climat steppique
$10 < I < 20$	climat semi-aride
$20 < I < 30$	climat tempéré.

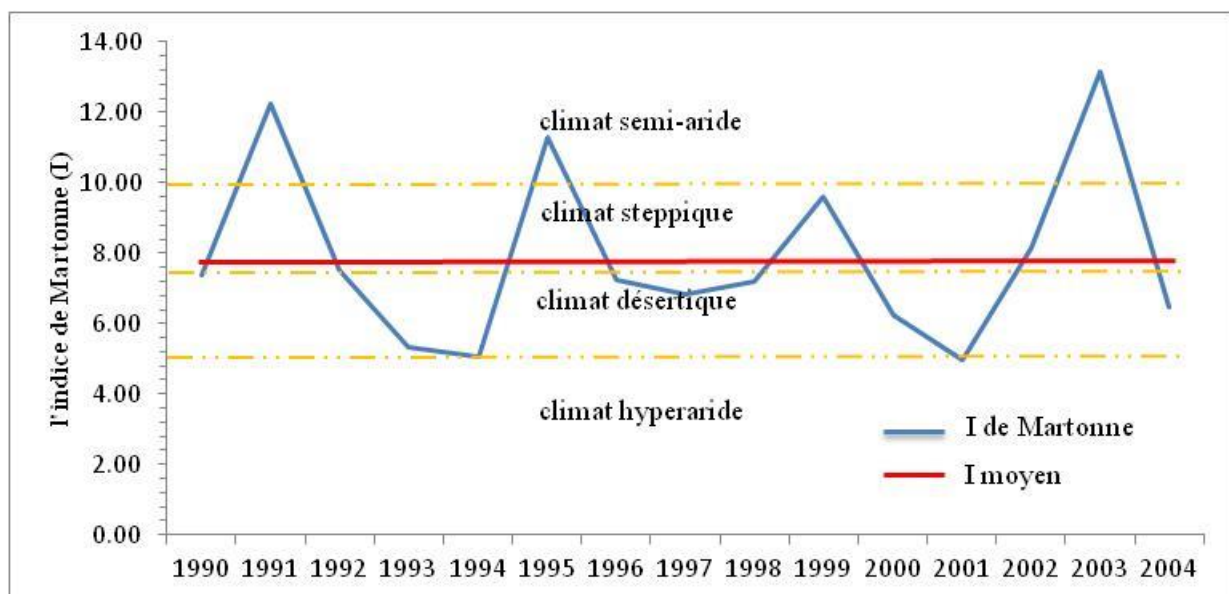


Figure 13 : Variation de l'indice d'aridité de la station de Medjez durant la période 1990,2004

Les résultats issus du calcul de l'indice d'aridité, consignés dans le tableau 08, révèlent que les valeurs de l'indice varient entre 4,95 (2001) et 13,13 (2003) avec un moyen de l'ordre de 7,86 à la station de Medjez. La figure 13 montre bien le changement climatique au niveau du bassin du Hodna durant la période (1990 ,2004) dont on enregistre une oscillation importante de la courbe

allant d'un milieu hyperaride 6% jusqu'au milieu semi-aride 20% passant par un milieu désertique 46,6% et un milieu steppique 26%. Elle permet de classer le bassin du Hodna dans un milieu steppique.

4.8. Bilan hydrologique :

Il est intéressant de noter que le bilan hydrologique est un ensemble des processus de circulation d'une quantité d'eau au cours du temps dans un bassin déterminé. On peut schématiser ces processus comme suite :

- Les précipitations.
- Le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain.
- Les évapotranspirations.

L'équation du bilan hydrologique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donnés :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S)$$

Avec :

- * P : précipitations (liquide et solide) [mm],
- * S : ressources (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],
- * R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm],
- * E : évaporation (y compris évapotranspiration) [mm],
- * S + DS : ressources accumulées à la fin de la période [mm].

4.8.1. Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite :

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU) ; cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes.

La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU qui est de l'ordre de 0 à 200 mm suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm). On admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement, il faut avoir satisfait le pouvoir évaporant (ETP = ETR). Par ailleurs, la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement. (J.P. LABORDE 2000).

Cette méthode met à la disposition des hydrogéologues un instrument pratique pour le calcul de l'évapotranspiration réelle en se basant sur les températures, les précipitations,

l'évapotranspiration potentielle, le réserve utile, le déficit agricole, l'excédent de l'écoulement et la variation du stock en eau du sol (Tableau 11).

Le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant (quelle que soit sa taille), considéré comme un système fermé, dont on peut résoudre l'équation de base :

$$P = R + I + D$$

Cette équation est valable à n'importe quel intervalle de temps ayant une signification hydrologique (année hydrologique, épisode de crue, saison hydrologique...).

A. Evaluation de la réserve d'eau utile :

C'est la réserve facilement utilisable (RFU), on l'a calculé par l'application de la formule de M. Hallaire(1960) : qui est la suivante : (L.GOUAIDIA, 2008)

$$RFU = \frac{1}{3} \cdot Da \cdot He \cdot P$$

Où :

- * Da : densité apparente du sol, pour le bassin de Da = 1.3
- * He : humidité équivalente en %, estimée à 25 %.
- * P : profondeur de la couche traversée par les racines, estimée à 20 cm

$$RFU = 21\text{mm}$$

B. Calcul de l'ETR :

On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle, à partir de la pluie du mois P, de l'ETP et de la RFU.

➤ Si $P > ETP$, alors :

- ETR = ETP il reste un excédent ($P - ETP$) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q

➤ Si $P < ETP$:

- on évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit :

$$ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$$

$$RFU = 0 \text{ ou } RFU + P - ETP$$

Si $RFU = 0$, la quantité ($Da = ETP - ETR$) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Tableau 12 : calculs du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite du bassin de Hodna.

mois	sep	oct	nov	déc	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jul	aou	année
P (mm)	24,9	22,7	26,2	23,6	20,8	17,3	22,2	21,5	30	9,0	4,1	5,5	227,9
ETP* (mm)	118,9	67,9	25,6	12	10,1	15,1	34,6	51,3	105,0	171,9	219,4	189	1021,6
Variation (mm)	-94	-45,2	0,7	11,6	10,6	2,1	-12,4	-29,8	-75,1	-162,9	-215,2	-184,2	
RFU ₂₁ (mm)	0,0	0,0	0,7	12,3	21,0	21,0	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
ETR (mm)	25	22,7	25,6	12	10,1	15,1	34,6	30,1	30	9,0	4,1	5,5	223,9
Excédent (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0
Déficit agricole (mm)	94	45,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,2	75,1	162,8	215,2	184,2	797,7
Ecoulement (mm)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,96	1,54	0,77	0,39	0,19	0,10	0,05	0,02	

ETP* : Evapotranspiration potentielle corrigée.

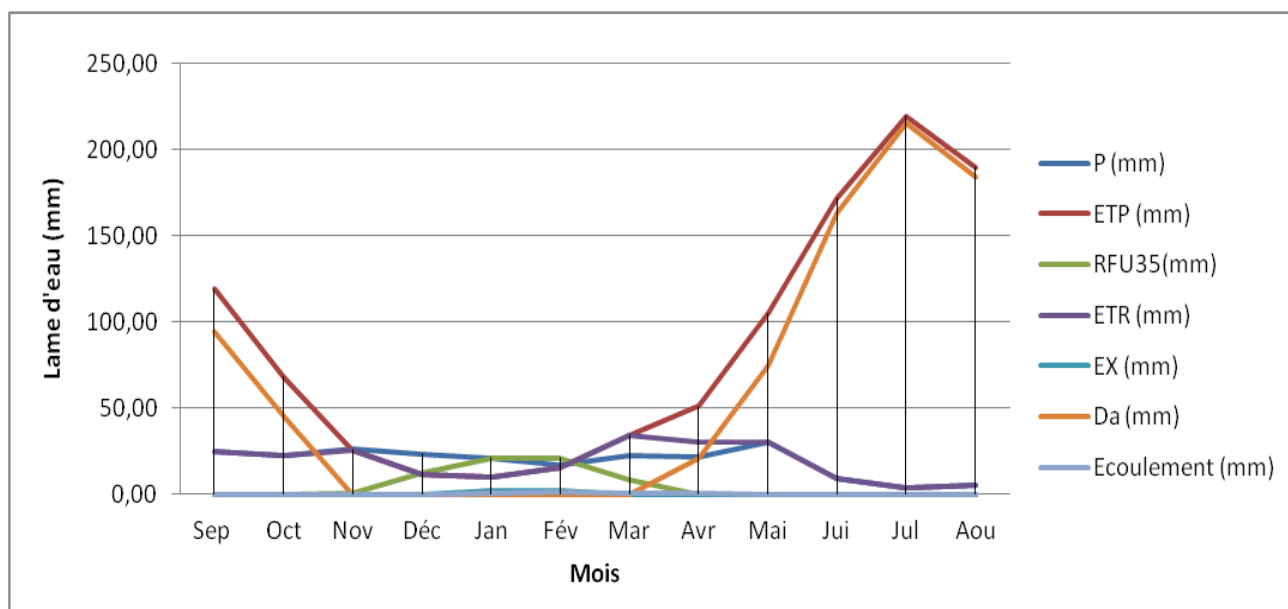


Figure 14 : Bilan hydrologique à la station de Medjez, par la méthode de Thornthwaite durant la période 1990-2004.

Les remarques qu'on peut citer d'après la figure ci-dessus, sont énumérées ci-après :

- l'allure de la précipitation et l'ETR présente une certaine correspondance permettant de monter la réaction des végétations à la demande en eau.
- L'allure du déficit agricole et l'excédent est inversement proportionnel.
- Le RFU retrouve sa situation dans les mois où il y a une variation négative entre les précipitations et L'ETP.
- L'écoulement estimé est presque nul au niveau du bassin.
- Pendant la saison froide, le bilan hydrique est positif où les précipitations couvrent les besoins de l'ETP et permettent la formation d'une réserve facilement utilisable RFU.

- Dès le mois de Mars apparaît un déficit agricole qui se poursuit jusqu'à l'épuisement de la RFU.
- L'enregistrement de ce déficit agricole coïncide avec la période sèche.

C. Répartition de l'excédent :

La méthode de Tixeront-Berkaloff sera utile pour estimer la lame d'eau écoulée au niveau du bassin pour une année hydrologique. Elle est présentée comme suite :

$$R = \frac{P^3}{3ETP^3}$$

Où :

- * R : Ruissellement (mm).
- * P : Précipitations moyennes mensuelles (m).
- * ETP : Evapotranspiration potentielle (m).

L'application de cette formule donne :

R=3.7mm, il confirme la valeur trouvée par Thornthwaite.

D. Infiltration:

Sa valeur sera déterminée par la relation I=P-D-R dont :

- * R : Ruissellement (mm).
- * P : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- * D : Déficit d'écoulement (mm).

D (de verdeil)=217mm, P=228mm. Donc I=7,24mm.

Tous les résultats du bilan hydrologique trouvés sont représentés dans le tableau 13.

Tableau 13 : bilan hydrologique à l'échelle du bassin de Hodna.

Elément du bilan	lame d'eau (mm)	%
Apports	227,94	100
Ruissellement	3,70	2
Déficit	217,00	95
Infiltration	7,24	3

Remarque :

Il est à noter que les valeurs trouvées sont des résultats des données de la station de Medjez durant la période 1980-2004 seulement les valeurs de température et le vent qui sont enregistrées dans la station de Msila. Puisque la station de Msila se trouve très près de la station de Medjez, il est très utile de combler les lacunes des données entre ces deux stations.

4.8.2. Commentaire sur le bilan-hydrologique :

On sait que le calcul du bilan hydrologique d'un système hydraulique se fonde sur des principes et des conditions d'application des formules empiriques permettant plus ou moins d'évaluer quantitativement le cycle de l'eau au niveau d'un bassin hydrographique. L'établissement du bilan hydrologique au niveau du bassin de Hodna nous a permis d'extraire les traits suivants :

- Un apport désignant le taux de précipitation de moins importance plus particulièrement dans la partie Sud du bassin.
- Un ruissellement de l'ordre de 2% confirmant la perturbation de l'écoulement de l'eau au niveau du bassin et le pouvoir infiltrant du sol au niveau de la plaine de M'sila.
- Un déficit d'écoulement constituant la partie la plus importante du bilan coïncide presque avec la précipitation. Il nous a permis d'évaluer le pouvoir agricole et l'influence des facteurs climatiques tels que la température et le vent au niveau du bassin.
- Une infiltration de l'ordre de 3% confirmant bien l'incertitude de l'application de la méthode du bilan hydrologique. Elle est généralement trop sous-estimée.

4.9. Conclusion :

Le bassin de Hodna se trouve sous l'influence de transition de deux climats variant du type méditerranéen à semi-aride dans la partie extrême Nord du bassin au type aride dans le reste avec un automne pluvieux, un hiver froid et un été chaud et sec, influencé par des facteurs géographiques (éloignement à la mer, altitude et orientation du relief). Les précipitations et les températures enregistrées influent sans aucun doute sur la chimie des eaux par dilution pendant la période pluvieuse et par concentration pendant la période sèche.

La répartition des précipitations n'est pas homogène dont nous avons enregistré une valeur moyenne annuelle durant la période 1980,2004 de l'ordre de 227 mm dans la partie Nord du bassin par contre qu'une de l'ordre 164 mm dans la partie Sud. Le déficit est estimé à 217 mm mobilisant un taux de 95% de précipitation.

La température joue un rôle primordial dans le climat du bassin de Hodna, nous avons enregistré une valeur moyenne annuelle de l'ordre de 18°C durant la période 1990,2005.

5. CONTEXTE GEOLOGIQUE :

5.1. Introduction :

La géologie est une partie très importante dans toute étude hydrogéologique et hydrochimique. Ainsi, la lithologie, la tectonique et la structure géologique jouent un rôle primordial sur la qualité des eaux suite à la dissolution des minéraux qui se trouvent dans la roche et sur la quantité d'eau qui ruissèle ou s'infiltre selon le type du terrain. Donc la connaissance de géologie est primordiale.

On sait que le bassin endoréique de Hodna est le résultat d'accident des deux chaînes Atlasiques ; Tellien et Saharien. Cet accident engendre la complexité de la géologie en divers zones du bassin sur tous les plans (faciès, structural, stratigraphique...).

La géologie du bassin de Hodna a été étudiée en se référant aux anciens travaux géologiques, réalisés par de nombreux géologues chercheurs tels que : « Tissot 1864, Ville 1868, in J. Savornin (1908) », R. Guiraud 1973 et les travaux relativement récents de Vila 1980 ont apporté une synthèse de la géologie du Nord de l'Algérie orientale. Ils ont réalisé des coupes et des cartes géologiques de la région d'étude.

5.2. Cadre géologique régional :

La région d'étude fait partie de la ceinture plissée alpine qui constitue l'ossature des reliefs de toute l'Algérie septentrionale au Nord de la flexure saharienne. Cette orogénèse ceinturant la méditerranée occidentale depuis les Iles des Baléares est généralement détachée en plusieurs domaines structuraux et paléogéographiques bien distincts.

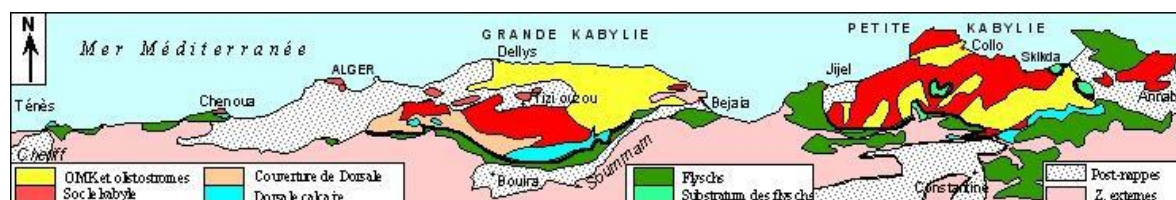


Figure 15 : Carte structurale schématique de la chaîne Maghrébide montrant la disposition des zones internes et externes; d'après Durand Delga et Fontboté (1980) in F. BOUKROUH, 2008

Cette chaîne est un tronçon de la chaîne alpine d'Afrique du Nord qui s'étend du Rif à la Sicile le long du littoral africain de la méditerranée (Figure 15). Le domaine orogénique maghrébin, d'âge Cénozoïque, comporte le Tell-Rif (« Maghrébides ») et les Atlas. Le Tell-Rif est interprété classiquement comme une chaîne de type alpin, c'est-à-dire résultant de la fermeture de la Téthys maghrébine; les Atlas, à l'inverse, sont compris comme des orogènes intra-continentaux.

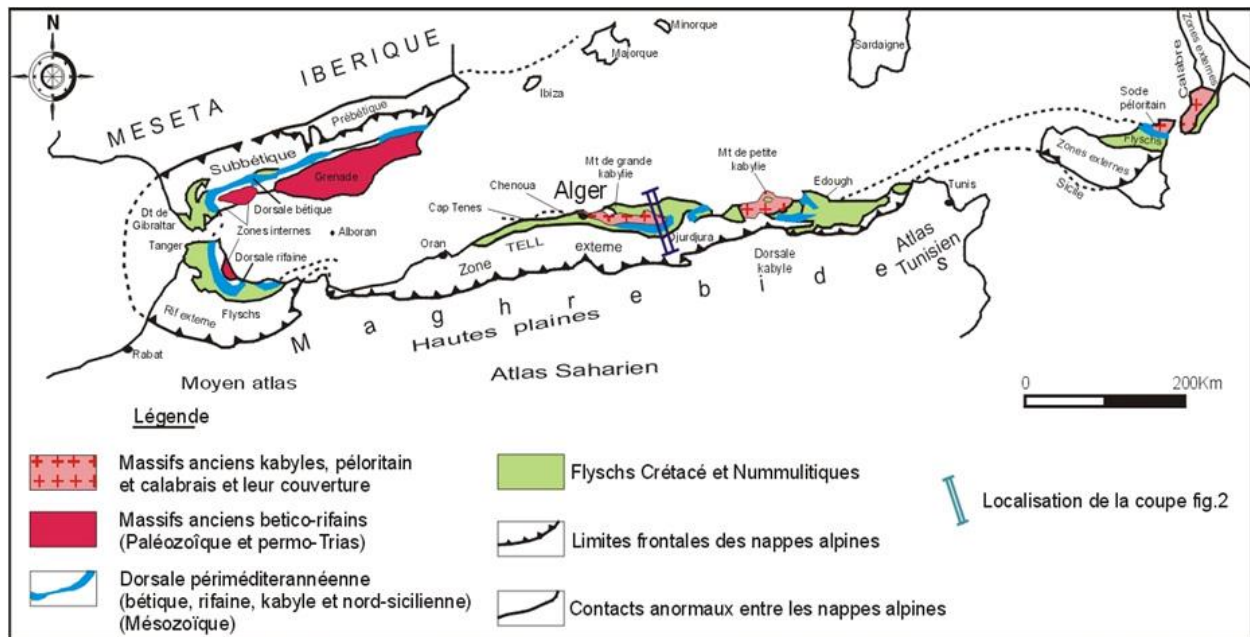


Figure 16 : L'orogène Alpin périméditerranéen (D'après Durand-delga, 1969) in BOUEDJA, 2010

Donc, on peut résumer les principales unités structurales de l'Algérie comme suite :

- ✓ l'Atlas tellien, constitué de reliefs et de plaines littorales
- ✓ les Hauts Plateaux et les Hautes Plaines
- ✓ l'Atlas Saharien formant une longue suite de reliefs orientés NE-SO
- ✓ la plate-forme saharienne.

Ces trois premiers domaines et la plate forme saharienne constituent deux unités tectoniques majeures séparés par la faille sud atlasique dont la première unité porte l'empreinte de la tectonique alpine (des séries plissées et charriées) sous le nom du domaine de la Berbérie (Busson, 1989) limité au Sud par la flexure sud atlasique et la deuxième appartient au craton africain qui est relativement stable. (Bouedja, 2010)

Le Nord de l'Algérie appartenant au domaine alpin est constitué de reliefs jeunes modelés au cours du Tertiaire. Ce domaine est délimité par les éléments suivants :

- ✓ au Sud, l'Atlas saharien est né d'un long sillon subsident compris entre les hauts plateaux et la plate-forme saharienne. Au Mésozoïque, ce sillon fut comblé par une puissante série sédimentaire (7000 à 9000m.). Durant le Tertiaire, une tectonique compressive réactive les structures extensives antérieures en failles et structures inverses aboutissant à la formation de cette chaîne montagneuse.
- ✓ le Hodna est un bassin d'avant fosse dont la séquence de remplissage débute par des dépôts continentaux d'âge Eocène et Oligocène et se poursuit par un Miocène marin.

- ✓ les Monts des Aurès prolongent l'Atlas saharien vers le Nord-Est. Ils se présentent sous forme d'une série de synclinaux et anticlinaux de direction ENE (Guiraud, 1990). Sa jonction avec le Hodna se fait par l'intermédiaire des Monts du Belezma (dans sa partie occidentale) et avec la plaine d'El Outaya et Biskra par l'intermédiaire des djebels Metlili, El Azreg... (dans sa partie méridionale).
- ✓ au centre, des plates-formes comme la Méseta oranaise à l'Ouest et le môle d'Ain Regada à l'Est.
- ✓ dans la partie septentrionale, l'Atlas tellien est une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur et des bassins de type intra montagneux dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène. Des bassins néogènes tardifs comme le Hodna se sont installés sur ces nappes. (Chabour, 2006).

5.3. Géologie locale :

On sait que l'endoréisme de Hodna est le résultat de la rencontre des deux grands massifs de l'Atlas Tellien et de l'Atlas Saharien où la géologie est à la fois complexe et diverse sur tous les plans (structure, stratigraphie, facies...). Il s'agit d'une succession, du Nord vers le Sud, d'un ensemble sédimentaire suivante : (A.N.R.H, 2006).

- a) les Monts du Hodna : zone anticlinale dont l'intérêt hydrogéologique se limite à la présence de sources thermo-minérales liées à l'existence de failles profondes.
- b) Le Bassin de subsidence tertiaire fonctionnant depuis l'Eocène à Msila et qui s'étend au Miocène à toute la plaine du Hodna. La principale formation aquifère y est constituée par le Pontien – Pliocène continental, plissé en vastes ondulations recouvertes en discordance par le Quaternaire et reposant sur un substratum crétacé tectonisé et érodé.
- c) La zone pré-atlasique crétacée, au Nord du grand accident de Boussâada, se présente en compartiments faillés peu plissés, plongeant vers la cuvette du Zahrez Chergui. Cette zone s'enneige vers l'Est sous la plaine et le Chott, où elle a été retrouvée par géophysique et sondages. Malgré les pendages, mais à la faveur des failles, une circulation s'établit depuis les plateaux dominant à l'Ouest en direction de la dépression hodnéenne.
- d) L'Atlas Saharien, ensemble plissé WSW-ENE dont les capacités aquifères sont peu connues sauf dans l'Est du bassin où existent de nombreuses et importantes sources en relation avec le Céno-mano-Turonien carbonaté.

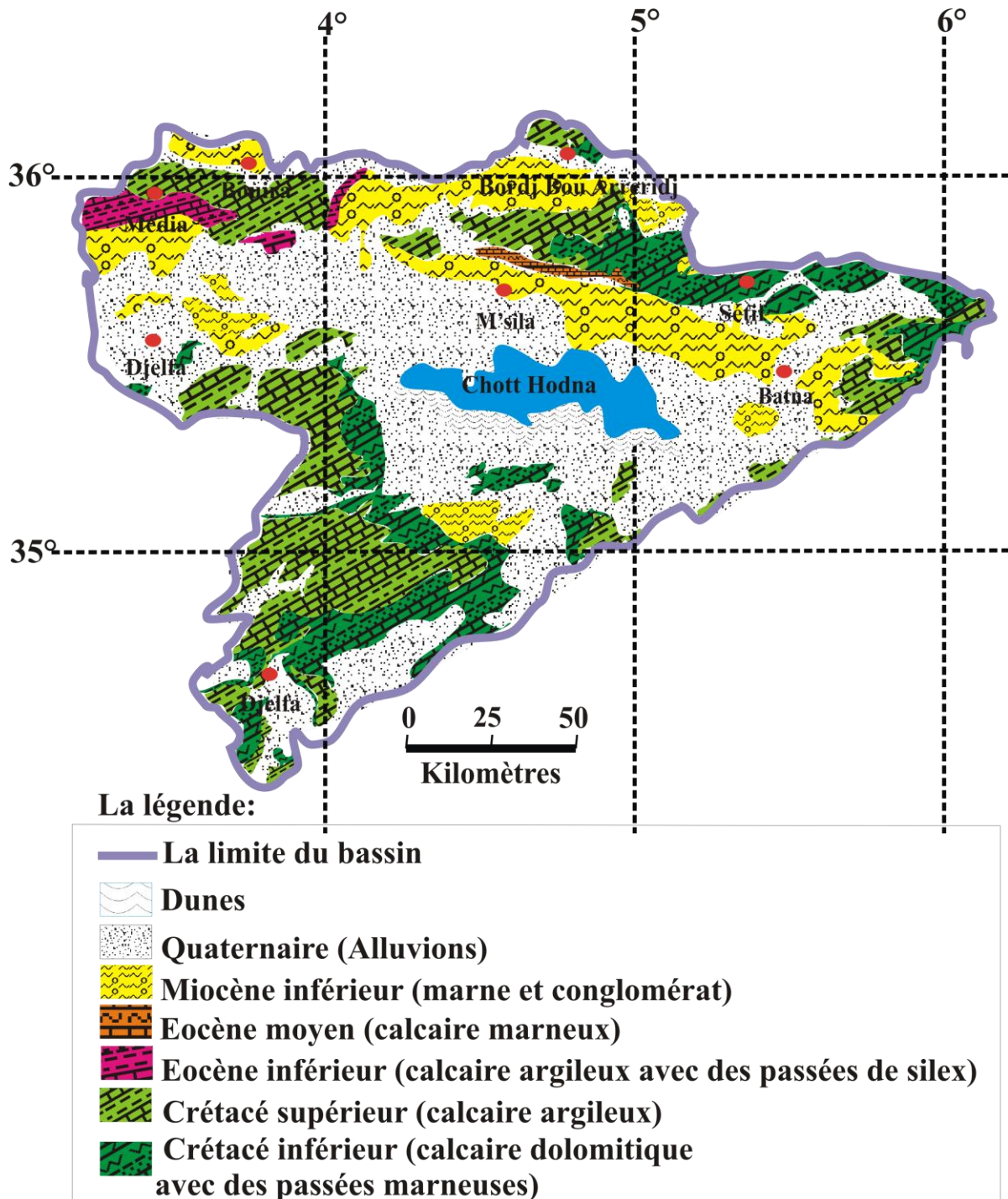


Figure 17 : la carte géologique simplifiée du bassin de Hodna. Extrait de la carte géologique de l'Algérie 1/500.000.

5.4. Descriptions lithostratigraphiques :

D'après les travaux qui ont été faites au niveau de la région d'étude depuis des dizaines d'années, M^{er} R.Guiraud 1973 traite la synthèse de toutes ces travaux et donne un aperçu géologique bien détaillé permettant de comprendre et restituer l'histoire géologique du bassin de Hodna. Le log lithostratigraphique le plus représentatif du bassin de Hodna décrit principalement les différentes formations géologiques affleurant sur le flanc Sud des monts du Hodna.

5.4.1. Primaire :

Les formations paléozoïques sont absentes au niveau de la région de Hodna. Elles se trouvent au nord de celle-ci sous forme des coupeaux du socle primaire observées comme étant des terrains allochtones (sédimentaires, éruptifs et métamorphiques).

5.4.2. Secondaire :**5.4.2.1. le Trias :**

Il est presque absent dans la région d'étude, seulement quelques affleurements sous forme pseudo diapirique (Boussâada) et des contacts anormaux (Ouled Tebbane, Boutaleb) sont observées comme une série triasique reconstituée par R.Guiraud comportant de la base au sommet :

- Une formation gréseuse.
- Une formation évaporitique inférieure traduisant la reprise d'influences marines.
- Des passées calcaro dolomitiques.
- Enfin des intercalations volcaniques basiques.

5.4.2.2. Le Jurassique :

Le Jurassique est observé au niveau de la partie centrale et orientale des monts du Hodna sous forme des résultats d'accident majeur (plissé et faillé).

A. Le Lias :

L'affleurement des formations liasique est observé généralement au niveau de Djebel Soubella en état faillé. Il est représenté par une série très épaisse de dolomies massives, des calcaires dolomitiques et une succession de marnes et de marno calcaires du Toarcien.

B. Dogger :

Il est observé sous forme d'une auréole plus large des formations de calcaires et de marno calcaires autour du Lias. Leur épaisseur peut atteindre les 80 m au niveau de l'Oued Soubella.

C. Kimméridgien, Tithonique et Berriasien :

Ils sont observés principalement dans la partie orientale du Hodna sous forme des affleurements des formations suivantes :

- des calcaires compacts et des calcaires marneux alternant avec des marnes grises d'épaisseur de l'ordre de 300 à 350m au niveau de (Dj Soubella et Dj Afghane)
- des alternances des calcaires gris avec des marnes grises d'épaisseur environ 250 m au niveau de l'Oued Tebban.
- des calcaires sublithographiques beiges surmontés par des marnes grises alternant avec des calcaires.

On trouve aussi ces formations dans le Sud du Chott El Hodna.

5.4.2.3. Le Crétacé :

A. Crétacé inférieur :

L'affleurement du Crétacé inférieur est observé dans la chaîne pré Atlasique (la limite Nord de la dépression Hodnéen). Il est reconnu par un sondage mécanique profond.

A.1. Valanginien :

Il est représenté par une puissante série marneuse à ammonite de 180m reposant en concordance sur le Berriasien. Sur cette série, elle succède des formations néritiques représentées par des marnes grises et rouges ainsi que des grès à ripple-marks et des calcaires grossiers, gréseux, ferrugineux et granuleux.

A.2. Hauterivien, Barrémien :

L'affleurement de l'Hauterivien est représenté par des formations dolomitico-gréseuses avec des grès à la base.

L'affleurement de Barrémien est représenté par des formations des calcaires dolomitiques surmontés par des grès d'épaisseur environ 200m au niveau de Djebel Boutaleb.

A.3. Aptien :

L'Aptien est représenté par des affleurements des barres calcaires dolomitiques surmontées par une alternance des calcaires rudistes, des grès blancs à ripple-marks, des marnes rouges. L'épaisseur varie de 200 à 300 m.

A.4. Albien :

Son épaisseur est de l'ordre de 370m. Dans la partie Nord du bassin, il se trouve au niveau de la feuille de Tarmount sous forme de faciès argilo gréseux et dolomitique. Au Sud, il est représenté par la succession suivante :

- Des marnes et des marno calcaires avec de minces intercalations de calcaires cristallins à débris lumachelles,
- Des calcaires sub lithographiques noduleux (15 m environ).
- Une série marneuse de quelques mètres d'épaisseur ainsi qu'un banc de calcaire glauconieux de même épaisseur.

B. Crétacé supérieur :**B.1. Cénomanién :**

Généralement, le Cénomanién est représenté dans la région d'étude par des formations de marnes noirâtres et verdâtres d'épaisseur environ 200 à 300m.

Seulement, le Cénomanién inférieur est marqué par des centaines de mètres de calcaires francs et le Cénomanién supérieur est formé par un calcaire souvent dolomitisé de 200 à 400 m. Au sud, l'ensemble de cet étage est reconnu sous forme de marnes et de gypse et d'une alternance de calcaires et de marnes.

B.2. Turonien :

L'affleurement du Turonien est principalement au Nord du bassin d'épaisseur environ 150m. Il comprend :

- des calcaires gris à pattes fines.
- des calcaires argileux noirs.
- des calcaires à Fissurines et Globigérines.
- des calcaires à Nérinées.

Ces calcaires sont plus ou moins dolomitisés et reposent en générale dans toute la région sur la dolomie grise ou noire (Dj Tarf et Djeddoug). La base de l'étage est calcaro dolomitique. Le Turonien est reconnu par des calcaires zoogènes plus ou moins dolomitisés. (Souk Ouled Naadja).

Par contre Au sud, il s'agit de calcaires subrécifaux, d'alternance de calcaires et de marnes et de calcaire lithographique. L'épaisseur peut atteindre 250 m. (Grine 2010)

B.3. Sénonien – Danien :

Le Sénonien est représenté par une succession des facies calcaro marneux et des marnes lumachelliques de nombreuses interstratifications de calcaire argileux. Il affleure au niveau de L'oued K'sob sous forme d'un dépôt de Mæstrichtien transgressif de 200 mètres d'épaisseur dont Le Mæstrichtien est composé de deux barres calcaires à niveaux dolomitiques séparées par des marnes et des calcaires marneux.

Le Danien est représenté par des marnes noires, schisteuses et pyriteuses recouvrant normalement le Mæstrichtien. Il affleure au niveau de Mâadid.

5.4.3. Tertiaire :**5.4.3.1. Le Paléocène :**

Les formations Paléogènes sont bien marquées au niveau de la partie méridionale des monts de Hodna. Elles affleurent sous formes des bandes presque parallèles plongeant vers la cuvette Hodnène.

A. Montien :

Le Montien est représenté par des marnes grises, noires feuilletées avec de minces bancs de calcaires argileux (15 à 20 mètres).

B. Thanétien :

Le Thanétien est représenté par des marnes et des marno-calcaires avec des passées plus ou moins phosphatées surmontées par des calcaires à silex.

C. Eocène :

L'Yprésien débute par des calcaires à petits lits de silex (15 mètres), ensuite viennent des calcaires argileux et marnes indurées (20 m), enfin des calcaires noirs à lits ou à boules de silex, formant des falaises séparées par de minces veines marno-calcaires à rares passées phosphatées (70 m).

D. Le Lutétien inférieur :

Le Lutétien inférieur est représenté par une série des formations suivante :

- Des calcaires et des calcaires argileux lumachelliques à Thersités de 20 mètres.
- Des marnes grises à passées calcaires argileuses et des calcaires à petits nodules de silex (30 mètres).
- Des calcaires lumachelliques à Huîtres (thersités) admettant quelque passées marneuses (18mètres).

E. Le Lutétien supérieur :

Il affleure sous forme d'une puissante formation d'environ 400m d'argiles vertes avec des passées gypseuses irrégulières.

F. Le Lutétien supérieur allochtone :

Il affleure au niveau de l'oued K'sob sous forme principalement de trois formations différentes :

- Des marnes argileuses ocre à bancs décimétriques.
- Des calcaires marneux blancs à lumachelles.
- Des Thersités et des Ostrea multicostat.

G. Le Lutétien supérieur autochtone :

Il représente des gros bancs de gypses à passées de sel gemme et de marnes blanches. Son épaisseur est de l'ordre de 100 à 200 mètres dans la région de M'sila.

H. Oligocène autochtone :

Il affleure au sud de Mâadid sous forme d'une série grès arileuse. ces bancs décimétriques de grès sont caractérisés par :

- Une couleur rouge
- Des bruns fins avec des éléments grossiers et anguleux
- des stratifications entrecroisées.

A la base de ces bancs, on observe des bancs de calcaire grumeleux blancs, mal cimentés et de faciès lacustre.

I. Oligocène allochtone:

L'Oligocène allochtone comporte à la base des marnes brunes claires, lamelleuses, grasses à rares miches de grès légèrement glauconieux.

5.4.3.2. Le Néogène :**A. Miocène :****A.1. Miocène inférieur :**

Le Miocène inférieur présente un caractère spécifique au niveau des confins de Hodna. Ce caractère comporte des faciès détritiques et continentaux passant à des formations lacustres et évaporitiques à la partie orientale de Dj Metlili qui sont en discordance sur le Paléogène.

Sur l'Oued El Djelf, le Miocène affleure sous la succession suivante (R. Guiraud 1973) :

- Des conglomérats à ciments calcaires grès.
- Des marnes vertes et rougeâtres alternant avec des rares niveaux gréseux (15 à 20 mètres).
- Un conglomérat représentant la base des Miocène moyen.

A.2. Miocène moyen :

Le Miocène moyen est représenté par la succession suivante :

- Quelque mètre de conglomérat surmonté par des calcaires à algues (lithotamniées), Huitres, Pecten et Spatangues.
- Une très puissante formation marneuse (marne gypse saline) comportant de rares et minces intercalation gréseuse (grès plus au moins ferrugineux ou glauconieux).

Son épaisseur atteint les 1300 mètre sur les piémonts du versant méridional des monts de Hodna.

A.3. Miocène supérieur :

Il est représenté essentiellement par des formations marno gréseuses d'épaisseur environ 400 m.

- Des marnes de couleur grise et verdâtre souvent sableuses ou gypseuses sont en alternance avec des passées de grès friable et surmontées par des grès conglomératiques.
- Des grès marquant la période de régression dans le bassin de Hodna

B. Pliocène :**B.1. Le Pliocène inférieur :**

Il est caractérisé par une barre grès-conglomératique qui repose en discordance sur le Miocène moyen à l'Ouest de M'sila. A l'Est, aux environs de Berhoum, il est en contact avec le Miocène supérieur. Des conglomérats à galets bien roulés alternant avec des marnes. L'épaisseur de cette formation est de quelques dizaines de mètres. Sur les conglomérats, reposent en concordance des marnes souvent sableuses et gypseuses. Ces marnes renferment en abondance des microfaunes remaniées provenant de Miocène, du Crétacé et rarement de l'Eocène (G. Glaçon, 1970 in Grine, 2010).

B.2. Le Pliocène supérieur :

Il débute sur un substratum ne présentant aucune trace de ravinement. On note une diminution des épaisseurs des formations grossières de la périphérie vers le centre du bassin du Hodna, qui s'accompagne d'une réduction de la taille des galets. Au niveau de la plaine de M'sila, il est représenté par des niveaux irréguliers de conglomérats alternant avec des grès et des marnes sableuses.

5.4.4. Quaternaire :

Le Quaternaire est représenté principalement sous forme des dépôts continentaux qui ont en discordance sur des formations Néogènes et parfois paléogènes. Ces formations sont souvent protégées par des croutes calcaires gypseuses.

5.4.4.1. le Quaternaire ancien ou Moulouyen :

Le Quaternaire ancien ou Moulouyen affleure en discordance sur les formations conglomératiques et sableuses du Pliocène. Il est représenté par la série suivante : des formations de base argilo sableux rouges de 2 à 3 mètres recouvert par des calcaires pulvérulents et progressivement concrétionnés. Ensuite vient se déposer une dalle calcaire renfermant des galets anguleux, provenant des remaniements de la croute calcaire. Elle est unie par un ciment rosâtre très résistant (3 à 4 mètres) et caractérisant le Quaternaire ancien. On trouve principalement ces formations dans le Nord de Barhoum.

5.4.4.2. Le Quaternaire moyen :

Le Quaternaire moyen est observé principalement dans les glacis des piémonts et les lits des Oueds sous forme d'une alternance des couches irrégulières. Ces glacis ont une épaisseur de l'ordre de 15 à 20 mètres, ils renferment des cailloutis, des blocailles mal classées (le volume de certains blocs dépasse 1m³) et des colluvions plus ou moins rougeâtres.

5.4.4.3. Le Quaternaire récent :

Le Quaternaire récent est observé le long de la plaine de Hodna, il est constitué essentiellement des alluvions sous forme des lentilles dont l'épaisseur est très importante près du Chott el Hodna tandis qu'il est mince dans la partie amont près des reliefs. On distingue les trois niveaux suivants:

A. Soltanien I :

Le Soltanien 1 est représenté par des formations conglomératiques de base assez grossières, mal classées dont l'épaisseur est irrégulière, au-dessus de ces formations viennent des lentilles de galets interstratifiés au sein des argiles sableuses. Dans la partie Sud du M'sila au niveau de l'Oued K'sob, le Soltanien I est représenté par un cône de déjection.

B. Soltanien II :

Le Soltanien est représenté à la base par une formation à passées caillouteuses surmontée par des sables argileux gris jaunâtre à verdâtre. Cette formation montre souvent des passées très riches en Gastéropodes lacustres. Lorsqu'on se rapproche du Chott, la proportion des éléments argileux augmente ce qui laisse les lits des oueds encaissés par rapport à la surface de ces formations.

C. Le Rharbien :

Le Rharbien est caractérisé par une basse terrasse emboîtée dans les précédentes, occupe souvent les fonds des entailles creusées par des oueds dans la plaine du Hodna. Celle-ci est constituée de petites accumulations lenticulaires de graviers bien roulés alternant avec des marnes sableuses brunes épaisses de 04 à 05 mètres. Peu avant la période actuelle, se sont formés des reliefs plus ou moins allongés, constitués par un matériel argilo gypso sableux, très riches en foraminifères miocènes remaniés et présentant des stratifications obliques.

ETAGES		LITHOLOGIE	DESCRIPTION LITHOLOGIQUE
PLIO - QUATERNAIRE			Alluvions, limons et sables
MIOCENE	Supérieur		Marnes et calcaires gréseux
			Grès et conglomérats
	Inférieur à Moyen		Marnes
			Argiles gréseuses
			Grès Conglomérats de base
PALEOGENE	OLIGOCENE		Argiles et grès
	EOCENE		Marnes gypseuses
			Calcaires à silex
	PALEOCENE		Marnes Calcaires à silex
CRETACE	Supérieur	SENONIEN	Marnes et calcaires
			Marnes gypseuses
		TURONIEN	Calcaires et marnes
		CENOMANIEN	Calcaires
	Inférieur		Argiles
		ALBIEN	
		APTIEN	Calcaires et marnes
		BARREMIEN	Calcaires à Huîtres
			Grès blanc
		NEOCOMIEN	Argiles et calcaires Marnes
JURASSIQUE	Supérieur		Marnes et calcaires
	Moyen		Marnes, calcaires et dolomies
	Inférieur		Calcaires dolomitiques
TRIAS			Argiles, gypse et dolomies Grès

Figure 18 : Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Hodna. (SONATRACH.2005) in Grine 2010)

5.5. Cadre structural :

Comme ce que nous avons décrit précédemment, Le bassin de Hodna est le résultat de l'intersection des deux chaînes atlasique (tellien et saharien). C'est ce que nous a permis de dire qu'il est très riche en structure géologique très différente caractérisant le domaine autochtone du Hodna. Ce dernier englobe :

- la partie septentrionale des Monts des Oulad Naïl ,
- la zone préatlasique renommée sous le nom du bassin néogène du Hodna et constituée de plis anticlinaux larges, à grands rayons de courbure, et synclinaux étroits. Elle est supportée une sédimentation continue au cours du Miocène et Pliocène
- les Monts du Hodna.

5.5.1. Tectonique :

Les principaux massifs qui constituent l'ensemble autochtone hodnéen sont d'Ouest à l'Est (figure 19) : les anticlinaux de: Ouled Tebben, Bou Taleb, Guetiane, Hadjar Labiod et l'anticlinal arqué du Fournal-Talkhempt.

Vers L'Ouest ; les monts du Hodna avec le vaste anticlinal de Maadid - Ouled Tebben s'engouffrent sous les dépôts du Miocène synchrone- nappe qui est à son tour recouvert par les nappes telliennes de Sidi Aissa. Il s'agit en fait d'un anticlinal grossièrement E-W, qui s'infléchit d'ailleurs à ses deux extrémités occidentale et orientale au NE, souvent coffré et assez complexe englobant le massif des Ouled Tebben à direction atlasique (NE-SW) (Boutaleb 2001).

Selon l'étude qui a été effectuée par l'A.N.R.H sous la tutelle du bureau d'étude Icosium forage & engineering services mai 2006, nous avons résumé les phases tectoniques affectant le bassin de Hodna comme suite :

Le bassin du Hodna est découpé en quatre secteurs principaux, délimités par la morphologie, la disposition structurale, les reconnaissances géophysiques et les coupes de forages, ces secteurs étant eux mêmes organisés en deux provinces tectoniques : Hodna Ouest et Hodna Est que sépare la « transversale de Colbert-Fennel », accident Nord-Sud (fig.19) emprunté au Nord du Chott par le cours de l'Oued Soubella et au Sud du Chott par l'Oued Mcif. A l'Est de cet accident, la profondeur du bassin Miocène est nettement plus réduite.

La tectonique du Miocène au Nord du chott sous le remplissage récent (plaine de M'sila et Barika) est dominée par de larges synclinaux et anticlinaux E-W : anticlinal de Chott el Hammam, synclinaux de Magra, de Djezzar, de Barika-Tobna. Au Sud du chott, le substratum des séries crétacées est organisé en une série de horsts et grabens que délimitent des accidents E-W. Ce qui est important pour l'hydrogéologie ce sont les secteurs où se développent de grandes épaisseurs de Miocène continental 3ème cycle, dans le prolongement vers l'ouest des synclinaux

miocènes de Magra (Ain Kelba), Djezzar et Sefar (Barika). Ces secteurs sont moins importants sous la plaine de M'sila où se développe le cône de déjection ancien de l'Oued K'sob. Dans la plaine de Bou Saada, des zones d'épaisseurs notables du Miopliocène sont aussi présentes.

✓ **Zone de Bou Saada-Guelalia**

C'est la rive sud du Chott, caractérisée par l'absence de Miocène marin et une épaisseur de Tertiaire moins importante qu'au Nord du Chott. Elle est limitée :

- A l'Est et au Sud par les pointements jurassiques des Fennd et le massif du Meharga,
- Au SW l'anticlinal du Dj Kerdala,
- A l'Ouest les Dj Zemra et Selat.

Par ailleurs, la ville de Bou Saada et l'Oued Temsa-Maittar délimitent deux zones structurales distinctes (G.Cornet, 1954) :

- Au Nord un plateau rattaché aux Hautes Plaines Algéroises,
- Au Sud une partie plissée rattachée à l'Atlas Saharien. Une grande faille E-W sépare les deux zones.

✓ **Zone de Ain Oum Chemel**

Plaine quaternaire et Miopliocène, limitée au Nord par le Dj Meharga , à l'Est par des petits reliefs néocomiens, à l'Ouest par les affleurements Barrémo-Bédouliens et Aptiens. Drainée par l'Oued Melah.

✓ **Zone de M'sila**

Comprend le bassin Miocène bordant au Sud les Monts du Hodna, limité à l'Est par l'anticlinal du Chott el Hammam, qui se prolonge à l'ouest par une zone haute passant par Chellal (CGG, 1968).

✓ **Zone de Barika**

C'est tout le secteur oriental du Chott. Vers l'Ouest, le Sud, l'Est et le Nord, il est respectivement limité par : les anticlinaux du Dj Fozna, du Dj Ahmar, du Dj Metlili, le synclinal de Seggana, les Monts du Belezma, les diapirs du Dj Djezzar, les synclinaux du Dj Djezzar et de Magra.

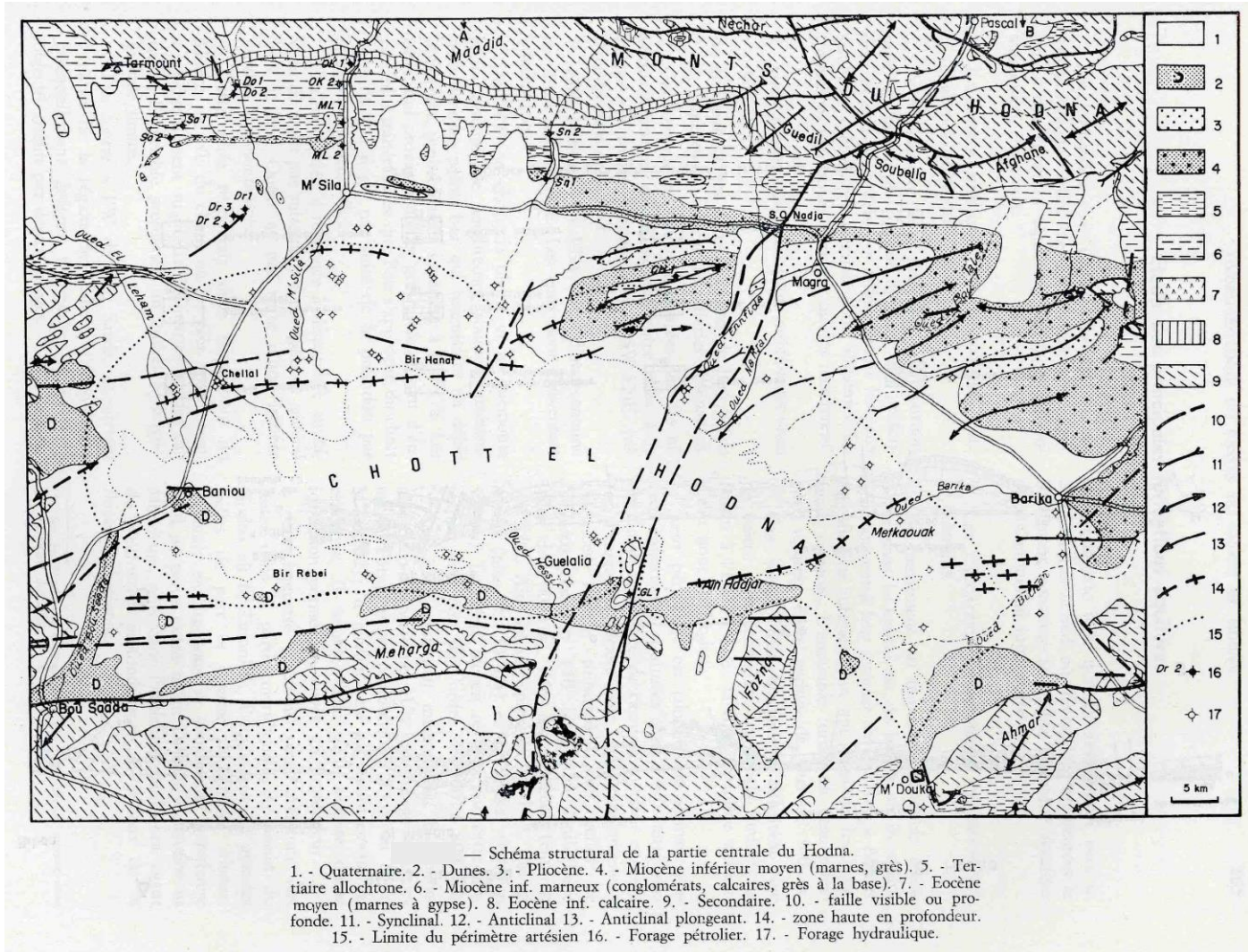


Figure 19: Schéma structural du Hodna (R.Guiraud, 1969, in A.N.R.H, 2006).

5.5.2. Paléogéographie

D'après R. Guiraud (1973 in Grine 2010), l'évolution du bassin du Hodna a été marquée par plusieurs épisodes géodynamiques. Au Crétacé inférieur, le Hodna et ses bordures correspondaient au prolongement de la plate forme saharienne soumise à ce niveau à des influences marines et deltaïques. Au Cénomanién, Turonien et Sénonien, une émergence de la zone centrale des monts du Hodna a fait suite aux déformations liées à la phase Laraminienne. Le Paléocène est caractérisé par une instabilité des bordures du bassin. Une tendance transgressive pendant l'Eocène inférieur, est marquée par un développement des faciès calcaires ou marno-calcaires à silex. Une régression généralisée est soulignée par le dépôt des séries lagunaires parfois continentales suivies d'une émergence générale par la phase pyrénéo atlasique responsable des déformations majeures.

Une transgression marine s'opère à partir du Burdigalien jusqu'au Pliocène inférieur et moyen avec au Miocène supérieur un dépôt des séries évaporitiques. D'après Flandrin J (1948), l'axe de cuvette hodnéenne se plaçait au Nord de M'sila à l'Eocène, alors qu'il se situait à peu près à la bordure septentrionale du Chott actuel, au Miocène. La phase de compression de la base du Quaternaire s'accompagne du comblement du bassin et donne l'essentiel du modelé actuel. Le Quaternaire a été ensuite marqué par le dépôt de formations très peu épaisses et généralement étagées, du fait de l'absence de subsidence et de l'incidence des variations climatiques cycliques qui caractérisent cette période. L'aridité du climat constitue l'un des facteurs responsable de l'implantation des sebkhas, phénomène qui s'est produit dès le début du Quaternaire dans le bas Sahara.

CHAPITRE 02 : HYDROGEOLOGIE**1. INTRODUCTION :**

Dans ce présent chapitre, l'accent sera mis sur les formations géologiques susceptibles de renfermer des réserves d'eau, les ressources existantes, un inventaire des points d'eau et les données de la piézométrie. Elle sera terminée par une étude hydrodynamique de l'écoulement des eaux souterraines afin d'avoir une appréciation globale sur le comportement hydrogéologique au niveau du bassin de Hodna.

D'après les études qui ont été faites dans le bassin de hodna, selon (Ahit, 1970), il estime que l'étude hydrogéologique disponible se fait principalement au niveau du terrain autochtone atlasique et hodnéen où les séries détritiques du Miopliocène sont souvent assez grossières et constituent également de bonnes formations aquifères. Dans la cuvette du Hodna seuls les grès de la base du Miocène, bien développés au Sud et à l'Ouest de Msila et les conglomérats du Pliocène sont particulièrement favorables à l'accumulation des nappes aquifères.

2. GEOMETRIE DE L'AQUIFERE :

Les formations géologiques perméables qui ont certain forme permettant de contenir l'eau ont l'intérêt de les définir géométriquement afin d'avoir une idée sur la puissance d'eau qu'elles peuvent être contenir. L'identification géométrique des aquifères est basée sur la corrélation lithostratigraphique, elle a pour objectif de réaliser des coupes géologiques transversales entrecroisées permettant de représenter l'aquifère sous forme d'un model en 3D.

2.1. Les coupes géologiques reprises :

Selon les études qui ont été effectuées au niveau du bassin du Hodna, nous avons par l'utilisation du logiciel Corel Draw repris les coupes géologiques ayant été déjà réalisées.

L'emplacement de ces coupes géologiques réalisées est représenté dans la figure 20.

Nous nous sommes efforcés de reconstituer la morphologie générale de l'aquifère en essayant de faciliter le tache pour réaliser ultérieurement des cartes représentatives du toit et du mur des formations aquifères à partir des logs stratigraphiques des forages et des puits bien répartie dans notre région d'étude. Il s'agit de faire une interpolation par krigeage de ces données au niveau de la partie plaine du bassin dans le but d'avoir des cartes d'isovaleur de chaque formation géologique perméable.

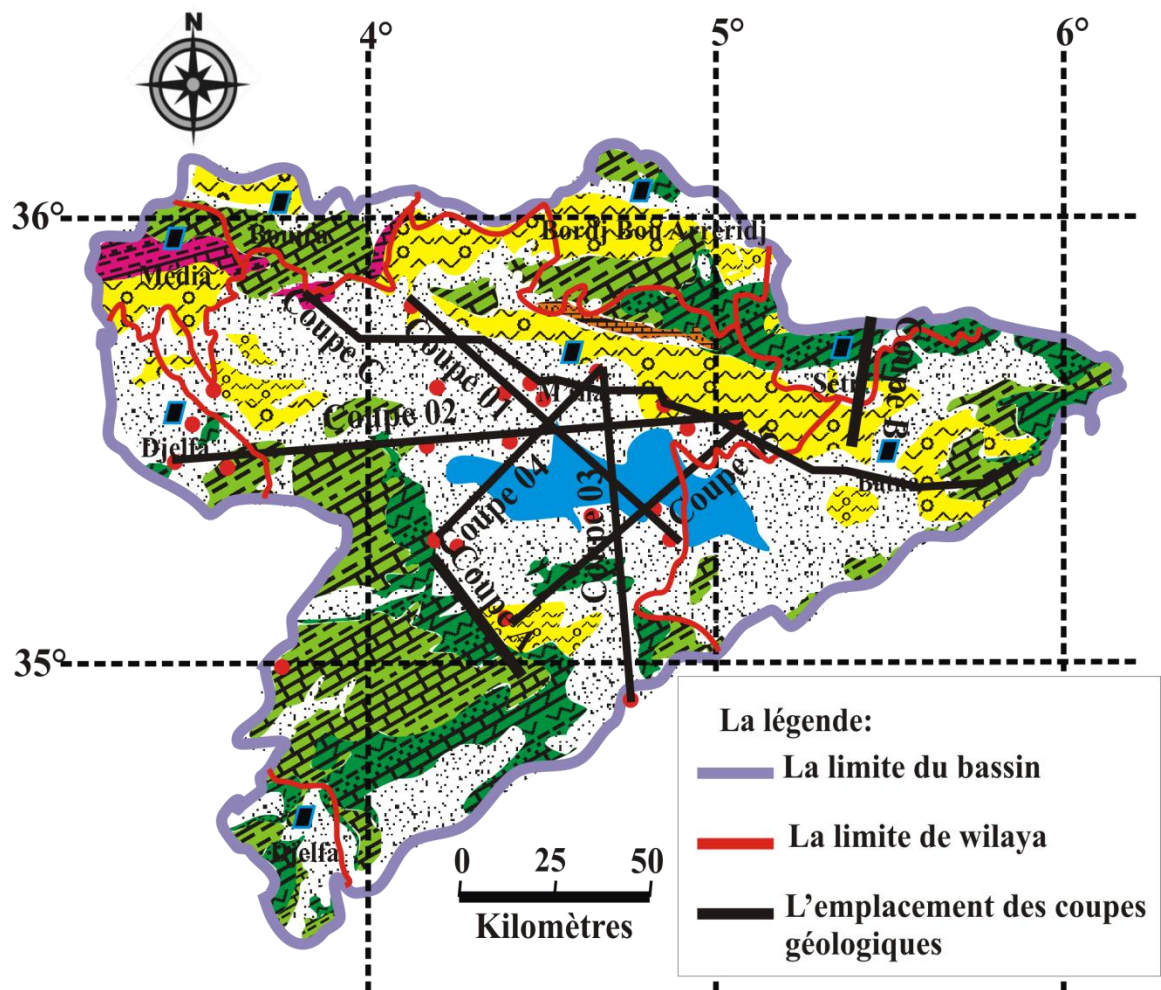


Figure 20 : l'emplacement des coupes géologique au niveau du bassin de Hodna

2.1.1. La coupe A : (Fig 21)

C'est une coupe géologique représentative de la série du Mésozoïque et Cénozoïque de l'Atlas saharien oriental et du Hodna, elle traverse généralement les formations carbonatées du crétacé sous forme d'une bande étroite dont elle permet de reconstituer l'histoire chrono stratigraphique de cette région à partir de la structure géologique de ces formations (plis et faille).

Les formations Albien de grès et de calcaire sont en affleurement importante au niveau de la région de Boussâda. Elles représentent un aquifère de grand puissance dont son épaisseur varie de 400 à 600m, son substratum se présente sous forme d'un banc de calcaire massif de Valanginien et son toit comportant une couche très puissante d'argile du Cénomani.

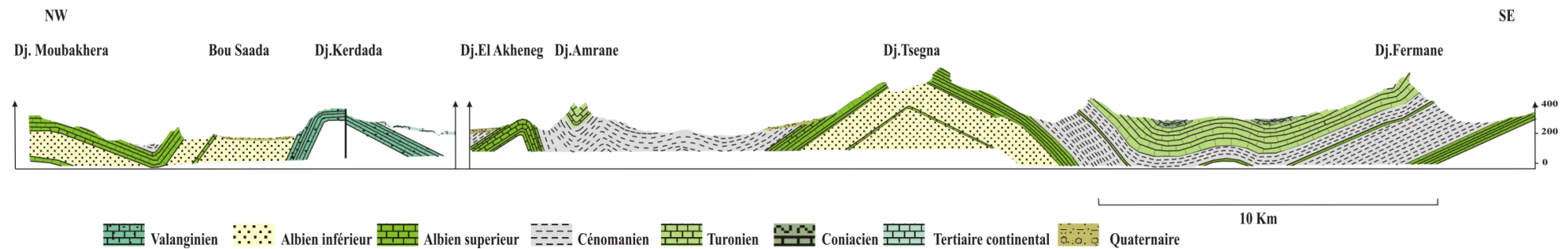


Figure 21 : Coupe géologique reprise à travers des monts des Ouled Nail (D'après Emberger, 1960).

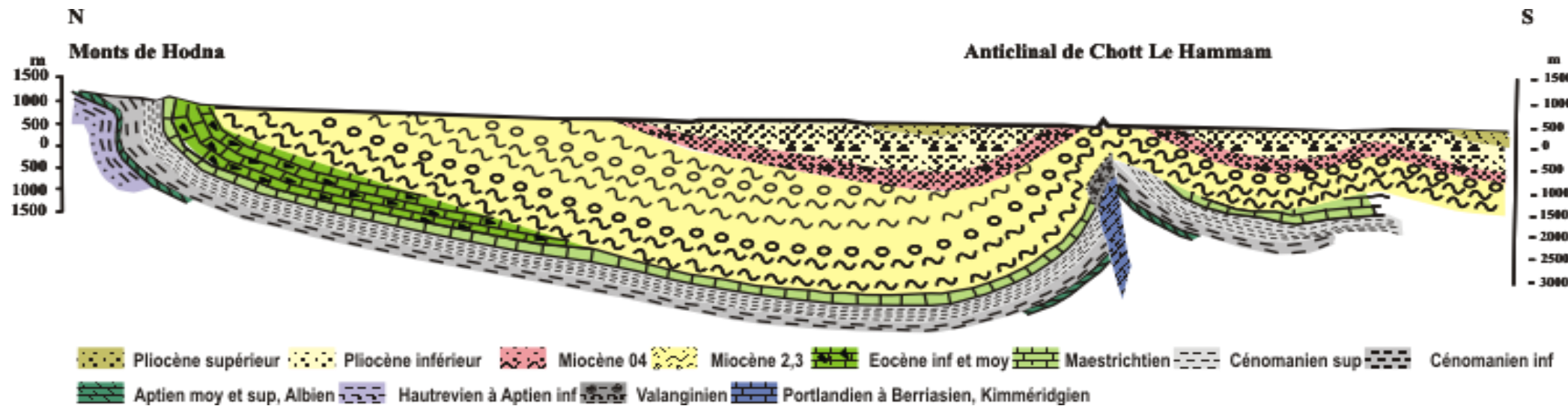


Figure 22 : Coupe géologique reprise du bassin oriental de Hodna et de l'anticlinal du Chott EL Hammam (d'après Guiraud. 1973)

2.1.2. La coupe B : (fig 22)

Elle traverse la partie Nord Oriental du bassin de Hodna dont elle désigne le phénomène structural du Chott El Hammam. Il s'agit d'un déroulement de deux failles parallèles permettant de former un horst. Le Miocène marneux se trouve sous forme d'une couche très puissante de l'ordre de 2000m, il représente un toit d'un aquifère de calcaire d'Eocène et un substratum d'un aquifère de gravier et sable du Plioquaternaire.

2.1.3. La coupe C : (fig 23)

Elle traverse l'ensemble du bassin d'Ouest à l'Est dans une portée de l'ordre de 220 km, dont elle confirme la remontée du Substratum marneux du Miocène sur l'anticlinal du Chott EL Hammam présentée dans la coupe B. Ce substratum se trouve en affleurement dans la partie extrême Ouest du bassin où il délimite bien le système aquifère à l'Ouest (synclinal de Msila) par contre dans la partie Est, il est remplacé par le marne du Cénomanién où il constitue un assise imperméable d'une aquifère bicouche de calcaire gréseux du Turonien et de remplissage du Plioquaternaire (synclinal de Barika).

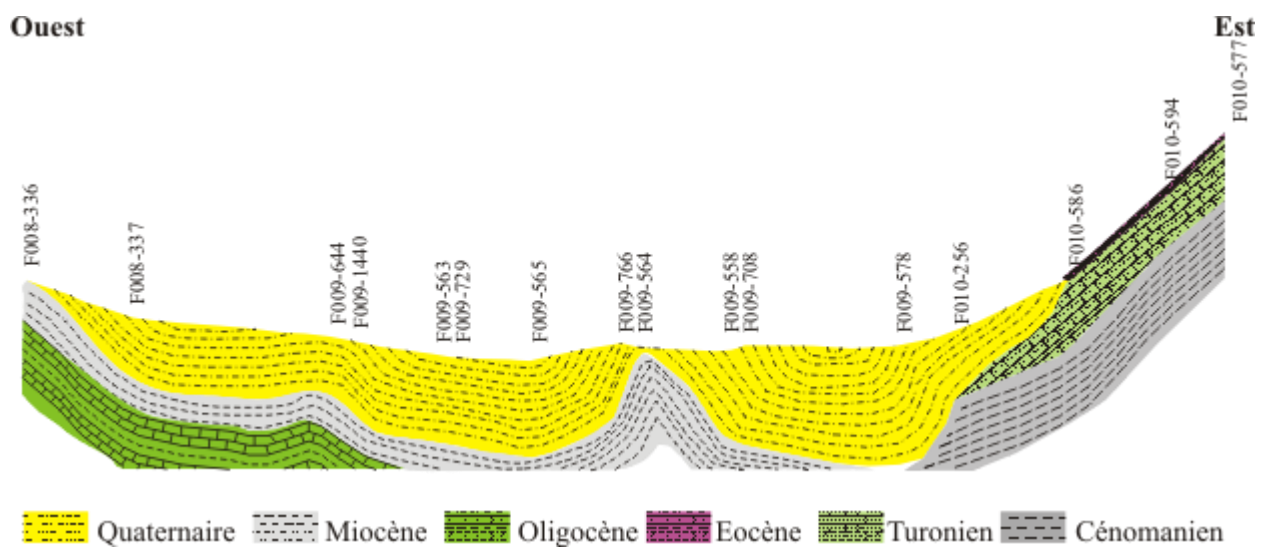


Figure 23: Coupe géologique reprise représentative du bassin de Hodna de l'Ouest à l'Est (A.N.R.H, 2006)

2.2. Les coupes géologiques réalisées :

D'après les logs des forages et des puits réalisés dans le bassin de Hodna, nous avons essayé de prévenir une synthèse géométrique des formations géologiques par la corrélation lithostratigraphique dans le but d'avoir une idée sur le comportement hydrogéologique du système aquifère (condition aux limites, le bilan hydrogéologique). Nous avons largement consulté les logs des forages disponibles sur la zone d'étude afin de faire une corrélation selon des axes projetés sachant que le but n'est bien sûr pas d'appréhender les détails structuraux, mais plutôt d'obtenir une représentation globale fidèle à l'échelle de la zone d'étude (figure 24).

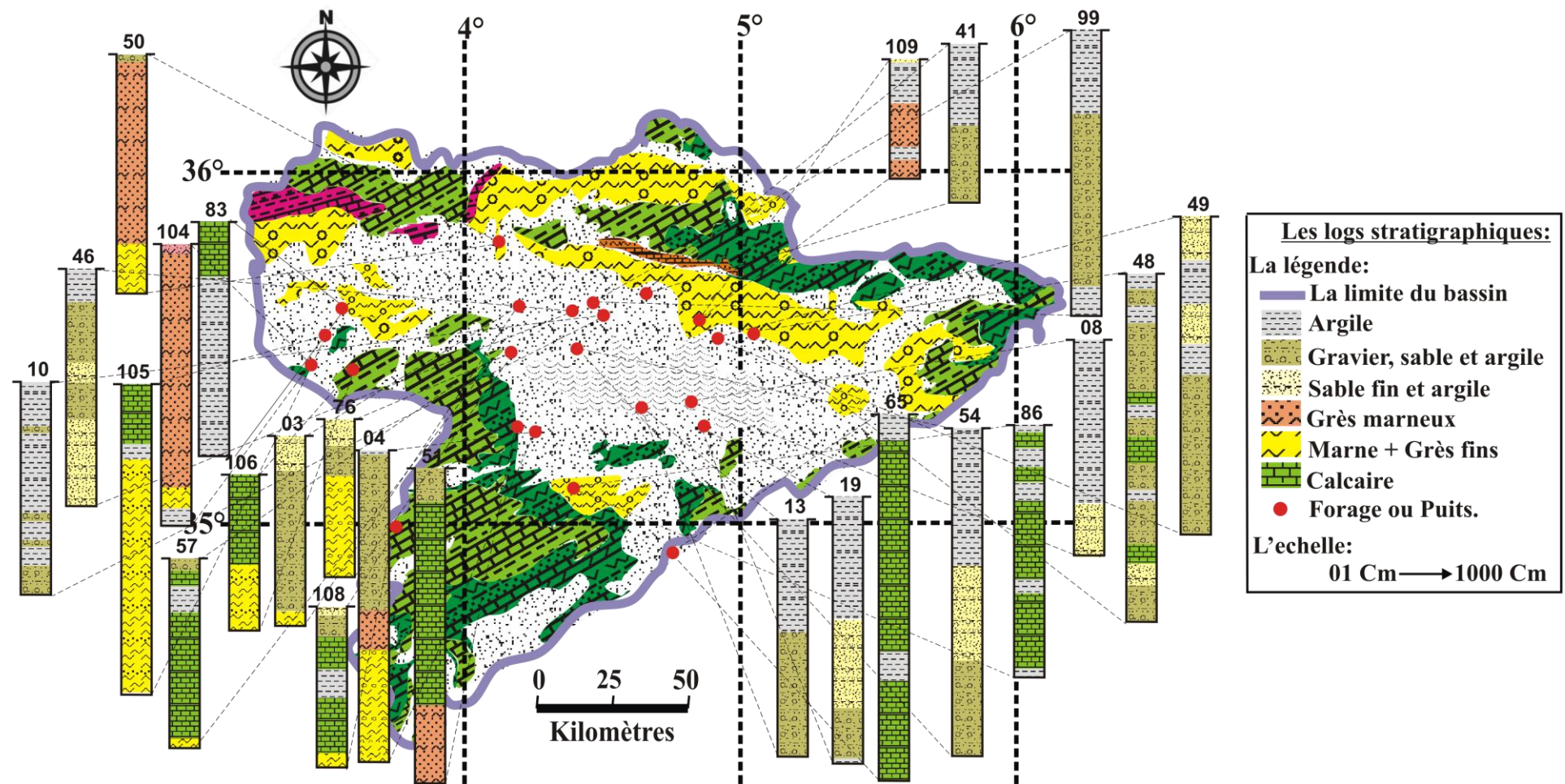


Figure 24 : Situation des forages utilisés pour la corrélation lithostratigraphique.

2.2.1. La coupe 1 : (fig 25)

D'une portée d'environ 90 km, elle traverse presque la partie centrale du bassin en direction (Nord-Ouest)-(Sud-Est), passant par le Chott entre Msila et M'doukal. Elle décrit bien le prolongement de la puissante couche de remplissage Mioplioquaternaire perméable (galets, graviers, sables et conglomérats avec passées argileuses et argilo-sableuses) le long du synclinal de M'sila, dont cette couche repose sur un substratum marneux du Miocène délimitant bien le système aquifère au Nord-Ouest.

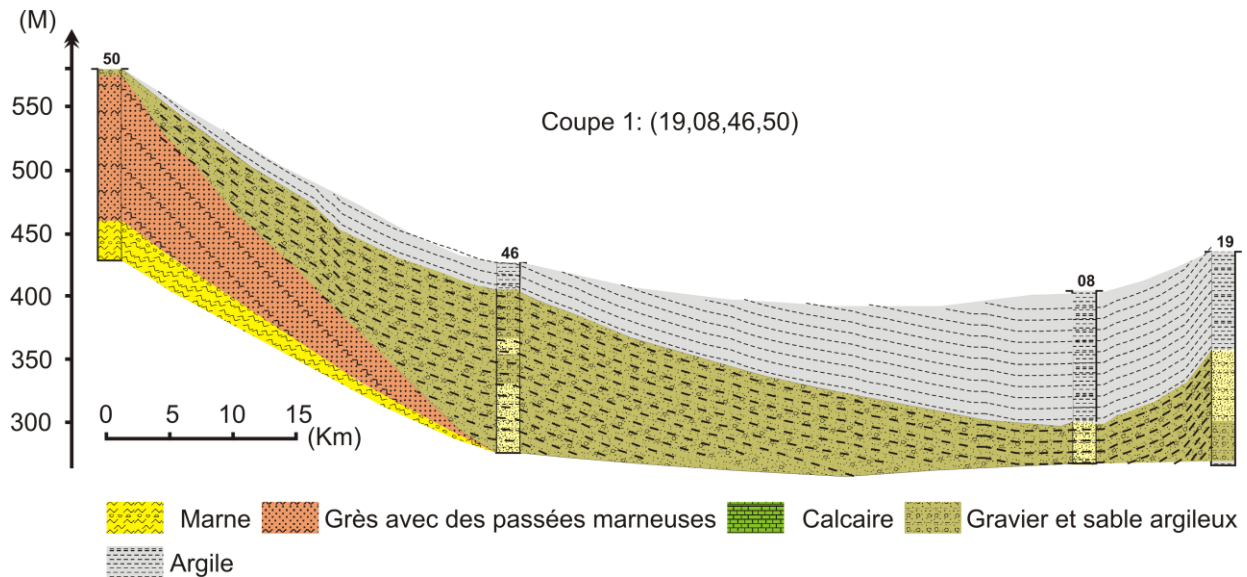


Figure 25 : Coupe géologique représentative de la partie centrale du Nord-Ouest à Sud-est du bassin de Hodna

2.2.2. La coupe 2 : (fig 26)

D'une portée d'environ 139 km, elle traverse le bassin de Hodna de l'Ouest à l'Est, passant par Djelfa et la limite Est du synclinal de M'sila. Elle montre bien le remplissage Mioplioquaternaire perméable énoncé dans la coupe 01. Elle traverse la partie septentrionale des Monts de Boussâda où affleure l'Eocène sous forme de bancs de calcaire. L'amincissement de la couche de remplissage vers les Monts de Boussaâda montre que ce remplissage Mioplioquaternaire est le résultat de la dégradation des formations géologique d'Eocène.

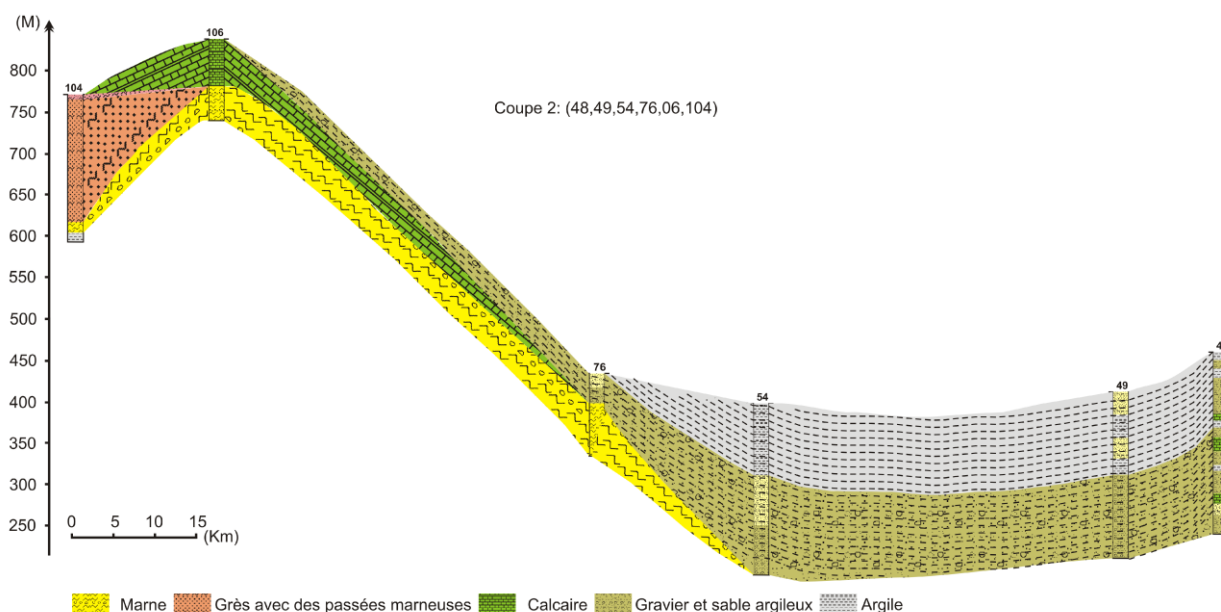


Figure 26 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna de l'Ouest à l'Est traversant la bordure septentrionale de l'Atlas Saharien

2.2.3. La coupe 3 : (Fig 27)

D'une portée de 82 km, elle traverse le bassin de Hodna du Nord au Sud, passant de la région de Ben Sour vers la région de Msila en traversant le Chott, elle décrit bien la structure de la limite méridionale du bassin dont le remplissage Mioplioquaternaire se trouve au contact direct avec les formations carbonatées du Turonien.

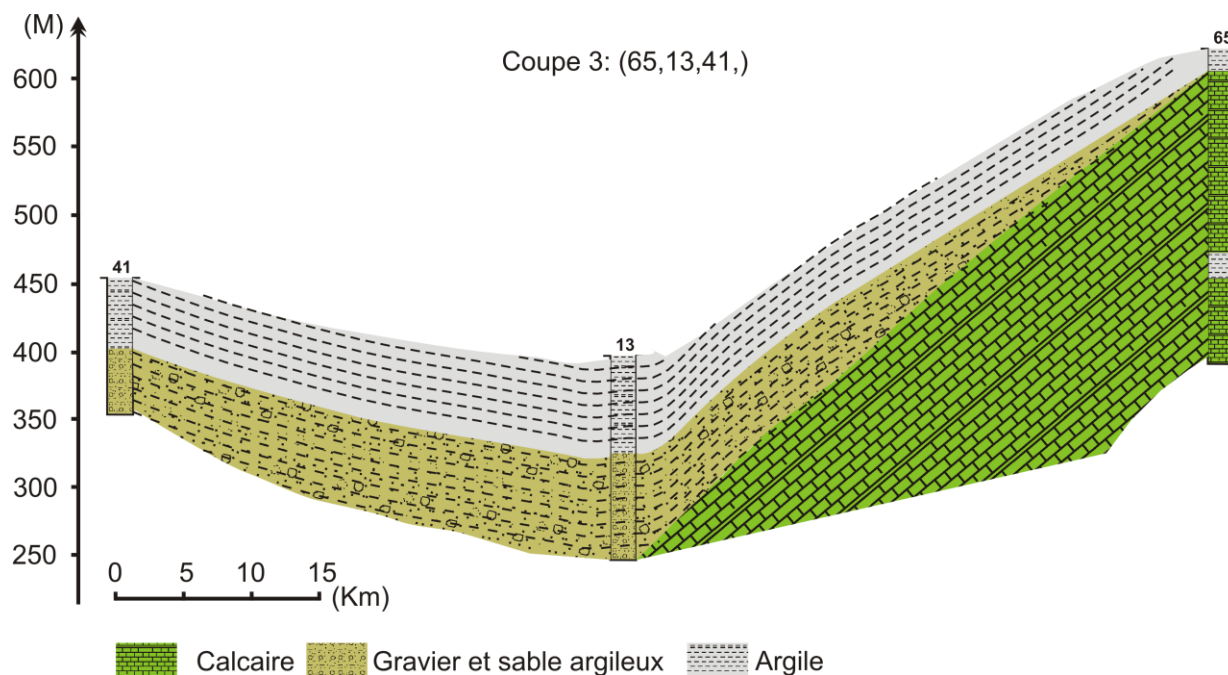


Figure 27 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna du Nord au Sud traversant le Chott.

2.2.4. La coupe 4 : (fig 28)

Elle traverse le bassin de la région de Boussaâda vers la région de M'sila. Elle confirme bien le contact entre les formations carbonatées du Crétacé et le remplissage Mioplioquaternaire le long de la rive septentrionale de l'Atlas Saharien (Monts de Boussaâda) dont les formations Albiennes (bancs de grès à des passages marneux) viennent à contribuer à la recharge du système aquifère de Hodna.

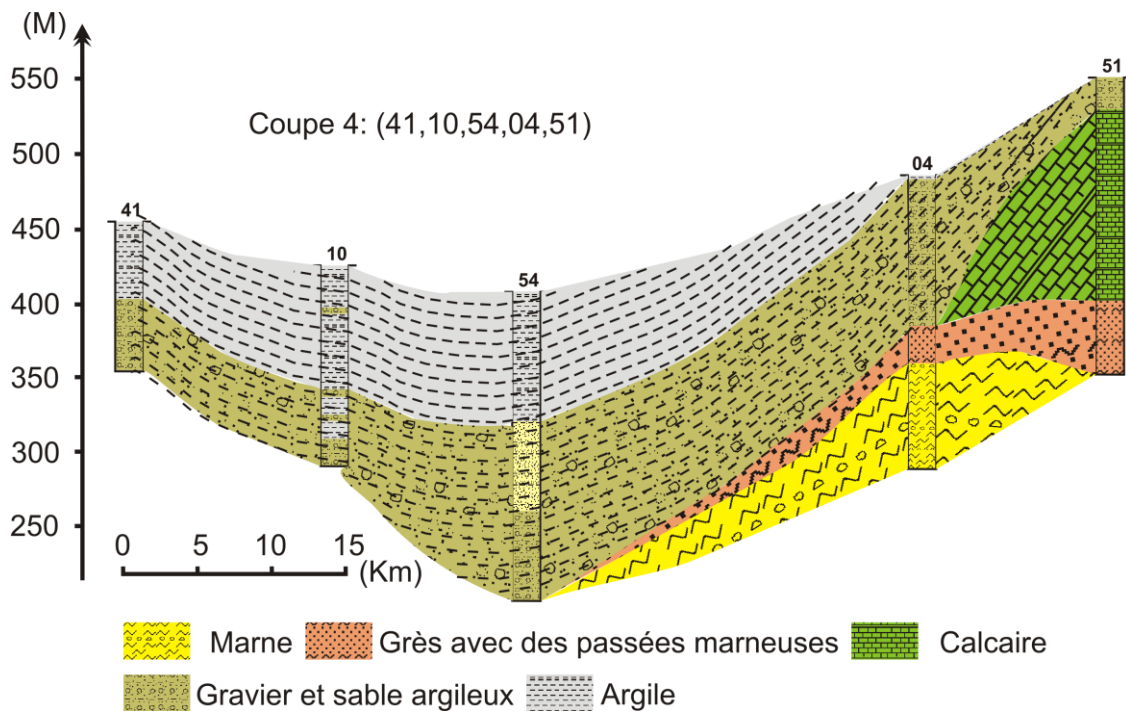


Figure 28 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna du Nord au Sud traversant le Chott.

2.2.5. La coupe 5 : (fig 29)

D'une portée d'environ 78 kms, elle représente presque une translation de la coupe 4 vers l'Est de quelque dizaine de kilomètre dont elle traverse le bassin de la région de Boussaâda (Oultene) vers la région de Megra passant sous le Chott. Elle montre ainsi le contact du Crétacé et du Miopliocène décrit précédemment dans la partie septentrionale des Monts de Boussaâda.

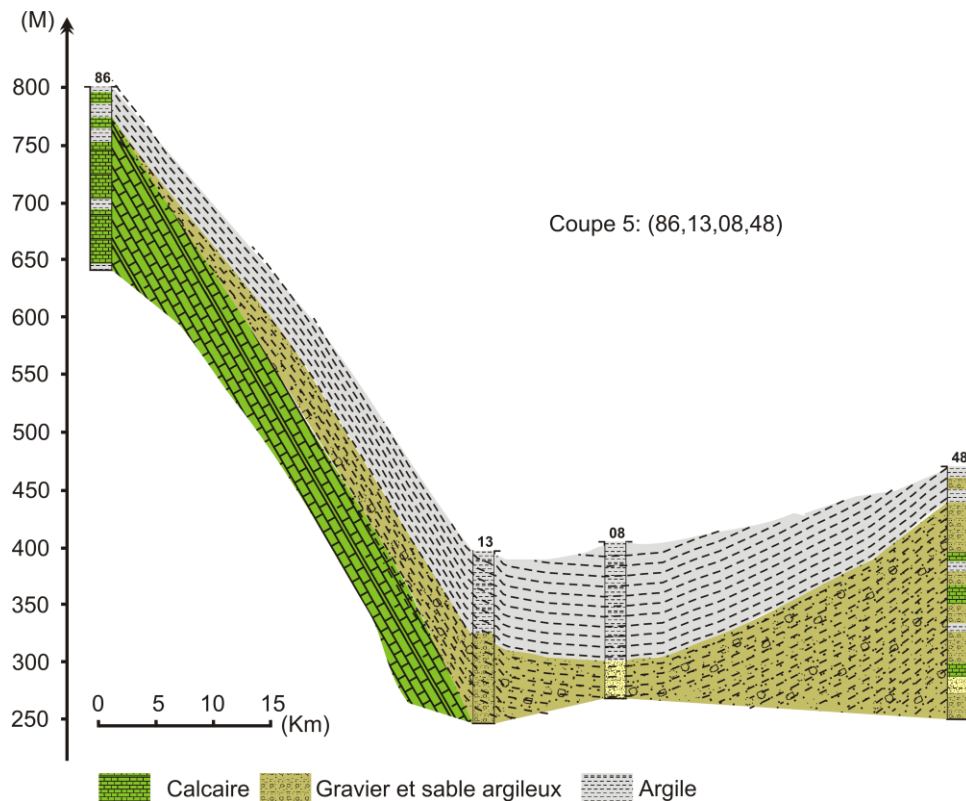


Figure 29 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna du Sud-ouest au Nord-est traversant le Chott

2.3.Conclusion :

D'après la corrélation lithostratigraphique effectuée au niveau du bassin de Hodna en utilisant les logs des forages et s'inspirant de la géologie des affleurements, nous avons découvert plein de choses concernant la mise en place et la disposition des formations géologiques agissant à identifier la structure du système aquifère du bassin de Hodna. Le traitement des données des études réalisées et les travaux effectués nous ont permis d'avoir beaucoup d'informations à savoir :

- Le remplissage du Mioplioquaternaire (galets, graviers, sables et conglomérats avec passées argileuses et argilo-sableuses) est presque uniforme sur toute la partie plane du bassin dont son épaisseur varie de l'ordre de 50 à 300 m.
- Le remplissage du Mioplioquaternaire repose sur une assise constituée de marnes d'âge Miocène marin.
- Le remplissage du Mioplioquaternaire est en contact direct avec les grès de l'Albien dans le Hodna méridional et occidental et les calcaires du Turonien dans le Hodna oriental.
- La remontée du substratum marneux Miocène au niveau de l'anticlinale du Chott El Hammam sépare deux unités hydrogéologiques, c'est le synclinale de M'sila et de Barika.

3. DEFINITION DU SYSTEME AQUIFERE :

3.1. Structure hydrogéologique :

Le traitement des coupes géologiques réalisées au niveau du bassin du Hodna à partir de la corrélation lithostratigraphique nous a permis de confirmer la réalité des études qui ont été faites par les hydrogéologues (Guiraud 1973, Amroune 2008 et Grine 2010) dont ils peuvent considérer l'aquifère comme étant bicouche avec deux niveaux perméables séparés par un ensemble semi-perméables formé par une alternance de marnes et d'argiles plus ou moins sableuses et graveleuses avec des passées d'alluvions grossières.

« Le Hodna forme un immense bassin endoréique de près de 24000 km² au centre duquel le système aquifère occupe une superficie de 8000 km². Les données litho-stratigraphiques fond apparaitre de nombreux aquifères qui peuvent jouer un rôle hydrogéologique important au niveau du bassin du Hodna. Ce sont les formations perméables qui affleurent largement sur les reliefs de bordure. En profondeur, il y a une forte interconnexion entre les divers aquifères grâce au mouvement tectonique »

3.1.1. Nappe superficielle :

Au terme d'examen des coupes géologiques réalisées, les contours de la nappe superficielle ne peuvent être délimités avec précision selon des critères géologiques et sur des logs des forages. Elle est rencontrée par des puits domestiques autour du Chott à des profondeurs variables d'argiles sableuses et de galets du Plioquaternaire. Ces derniers ont des caractéristiques morphologiques et granulométriques qui changent d'une zone à l'autre dont, on rencontre :

- De gros galets et des limons marno-gypseux moins épais du Salésien au Nord du M'sila,
- Des conglomérats du Soltanien aux périphériques immédiats du Chott,
- Vers le Sud, des sédiments argilo-sableux, avec de rares intercalations de graviers.

Cette nappe est plus facile à exploiter et son alimentation s'est effectuée seulement par l'infiltration directe des eaux de précipitation.

3.1.2. Nappe profonde :

Elle est bien marquée dans les coupes géologiques réalisées. Cet aquifère est constitué de formations géologiques du Mioplioquaternaire (galets, graviers, sables et conglomérats avec des passées argileuses et argilo-sableuses) et s'étend sur l'ensemble de la plaine et sur une épaisseur de l'ordre de 50 à 350 m. Cette nappe satisfait en grande ampleur le besoin en eau potable pour les habitations du bassin de Hodna. Elle est rencontrée à des profondeurs variables par forages dans la partie Nord du bassin, parmi autour du Chott ; elle devient artésienne ce qui montre la structure de captivité de cette nappe illustrée dans les coupes géologiques réalisées.

Selon les études et les campagnes de données relevées historiquement, le phénomène de l'artésianisme a fait sa disparition progressive d'une année à l'autre à cause de la multiplication de l'implantation des forages dans l'enceinte artésienne de Hodna sans prendre en considération le mécanisme de l'écoulement des eaux souterraines et l'exigence d'une intense exploitation de la ressource. La preuve ; c'est qu'en 1858 au lieu dit Metkaouak (16 km à l'Ouest de Barika figure 20), 500 forages ont été effectués dans cette région (Savornin 1908).

L'alimentation de cette nappe est générée comme suit :

- Latéralement le long de la bordure méridionale de l'Atlas tellien (formations carbonatées des Monts de Hodna, des Monts de Bellezma et Monts des Aurès) et le long de la bordure septentrionale de l'Atlas Saharien (les formations aquifères, depuis le Jurassique jusqu'au Tertiaire continental des Monts de Ouled Nail).
- Linéairement par l'infiltration des Crues des Oueds.
- Directement par l'infiltration des eaux de précipitation.

Par contre ; les sortie de la nappe est effectuée par :

- Les pertes vers le chott, en raison de l'artésianisme et par la suite de l'évaporation.
- Les pertes souterraines quoique de faibles importances, par le seuil de M'doukal, au Sud-est de Barika vers les plaines de Biskra.

Ces eaux souterraines communiquent avec celles des bassins voisins vers l'Ouest et surtout vers le Sud, ce qui nous confirme que le bassin n'est pas fermé dans le sens hydrogéologique.

3.2. Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère :

3.2.1. Inventaire des points d'eau :

Les données que nous avons rassemblées pour cette étude proviennent principalement des documents de l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique de Djelfa (1980,2005).

Dans le cadre de ce travail, nous avons effectué un traitement des données piézométriques d'environ 430 points d'eau (forages, puits et sources) d'une période allant du 1980 jusqu'au 2003 en essayant d'extraire les années les plus représentatives du point de vue de la fiabilité et de la répartition homogène de ces données piézométrique dans le bassin de Hodna. Sur ce principe, nous allons limiter quatre campagnes de mesure (1980,1984, 1988 et 2003) afin d'avoir une idée sur le comportement piézométrique de la nappe du Mioplioquatenaire que ce soit les conditions aux limites et l'évolution piézométrique au cours du temps.

3.2.2. Etude de la piézométrie :

L'étude piézométrique joue un rôle primordial dans la détermination hydrodynamique des systèmes aquifères, elle consiste à traiter la distribution spatiale des charges et des potentialités hydrauliques de l'ensemble des données ponctuelles des points d'eau dans le but de synthétiser des cartes représentatives de l'écoulement souterrain au niveau d'un bassin hydrographique. Elle permet de remplir un formulaire d'une carte d'identité d'un système aquifère d'une façon à bien analyser et schématiser les fonctions capacitatives et conductrices du réservoir et du comportement hydrodynamique de ce système aquifère.

3.2.2.1. Interprétation des cartes piézométriques :

Suite au traitement des données piézométriques des points d'eau au niveau du bassin de Hodna, nous avons par l'utilisation du Surfer 8 (méthode de Krégage) réalisé des cartes piézométriques. L'interprétation des cartes a permis de repérer les zones d'alimentation (flux de potentiel imposé positif) et les zones de flux de potentiel imposé négatif (exutoire de la nappe).

« L'interprétation de la carte piézométrique, appuyée sur la carte structurale du réservoir, aboutit à cinq opérations »: (Hadadji, 2007).

- ✓ Analyse morphologique de la surface piézométrique.
- ✓ Etude de la structure de l'aquifère. Anomalies structurales du réservoir. Distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques;
- ✓ étude des fonctions du réservoir : distribution spatiale des stocks d'eau et régime de l'écoulement de l'eau souterraine.
- ✓ Étude du comportement hydrodynamique de l'aquifère : débits imposés entrants et sortants, potentiels imposés.
- ✓ Analyse des fluctuations de la surface piézométrique des aquifères à nappe libre.

A l'échelle régionale des cartes piézométriques, la nappe du Mioplioquaternaire s'écoule principalement vers la partie centrale du bassin (le Chott Hodna) en parallèle avec le réseau hydrographique ce qui montre qu'il existe une concordance parfaite entre le bassin versant hydrogéologique et hydrologiques.

Les cartes piézométriques présentées en figure 30, 31, 32 et 33 ont été établies à partir des relevés piézométriques des campagnes de mesure qui ne présentent pas de très grande précision. Cependant les données collectées ne sont pas synchrones, les campagnes sont étalées dans le temps (elles sont des données annuelles). De plus, les mesures sont nanties d'un degré relatif d'incertitude car les niveaux statiques n'ont probablement pas été atteints pour tous les puits, ces derniers étant dépendants du temps d'arrêt des pompes avant les mesures. A cela

s'ajoute l'incertitude liée au nivellement des puits. Malgré toutes ces incertitudes, elle est représentative des caractères généraux de l'écoulement, à savoir :

- ✓ en partie Nord-Ouest du bassin (sous bassin d'Oued Elleham), la nappe s'écoule du Nord-Ouest vers le Chott, avec un gradient hydraulique moyen de 2,4 ‰, plus marqué dans le secteur Nord-Ouest de la carte. Ce gradient commence à évoluer vers le Chott, ce qui montre une augmentation de débit sous l'effet du rétrécissement de la section d'écoulement, ce qui permet de dire qu'il y a une coïncidence entre le sous bassin hydrographique et hydrogéologique d'Oued Elleham, cette accroissement du gradient hydraulique correspond à une zone très alimentée. L'allure de la carte piézométrique nous a montré que l'alimentation de la nappe est générée principalement par les affleurements des formations carbonatées des Monts de Hodna au Nord, l'Atlas Saharien au Sud et les formations gréseuses de l'Albien à l'Ouest.
- ✓ En partie Sud du bassin (Oued M'sif), la nappe s'écoule très rapidement du Sud vers le Chott, avec un gradient de l'ordre de $1,1.10^{-2}$. L'alimentation de cette nappe est générée directement par les formations carbonatées des Monts de Boussaâda.
- ✓ En partie Est et Sud-Est (Oued Barika, Oued K'sob), la nappe s'écoule lentement de l'Est vers le Chott avec un gradient hydraulique de l'ordre de 1 ‰. L'alimentation de cette nappe est générée par les affleurements carbonatés des Monts des Aurès. Dans cette partie du bassin, l'écoulement est interrompu par la remontée du Substratum marneux du Miocène sur l'anticlinal du Chott EL Hammam ce qui impose une perturbation de l'estimation des paramètres hydrodynamiques et ainsi l'établissement du bilan hydrogéologique de la nappe.

Concernant l'évolution piézométrique au cours du temps, on note : (fig 30, 31, 32 et 33)

- ✓ Les cartes piézométriques respectent une même allure ceux qui montre que la nappe gère son écoulement et son alimentation comme il a été décrit précédemment.
- ✓ L'allongement général NO et SE vers le chott de la structure piézométrique dominante dans l'ensemble des cartes piézométriques.
- ✓ La carte piézométrique du 1980 présente un fort débit d'écoulement matérialisé par des charges importante le long des reliefs des affleurements carbonatés et gréseuses. Ceci est probablement dû à un apport pluviométrique important.
- ✓ Les cartes piézométriques du 1984, 1987 et 2003 présentent une diminution accentuée d'une année à l'autre du débit d'écoulement, il se peut qu'il y ait une dégradation climatique éventuelle ou une intensification des pompes par les agriculteurs.

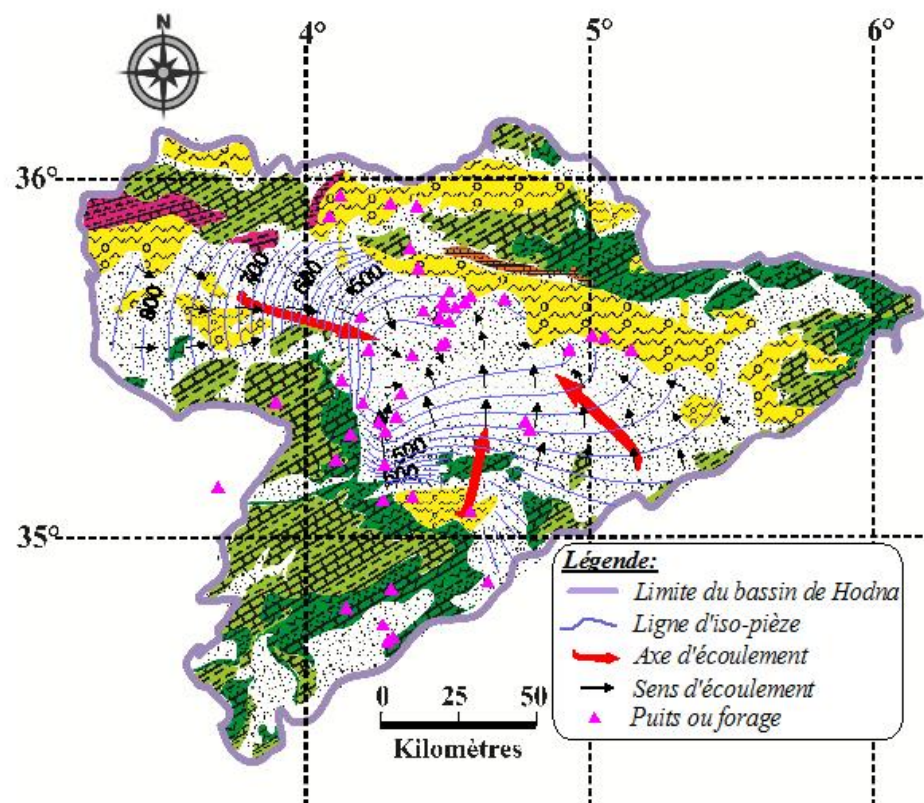


Figure 30: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 1980.

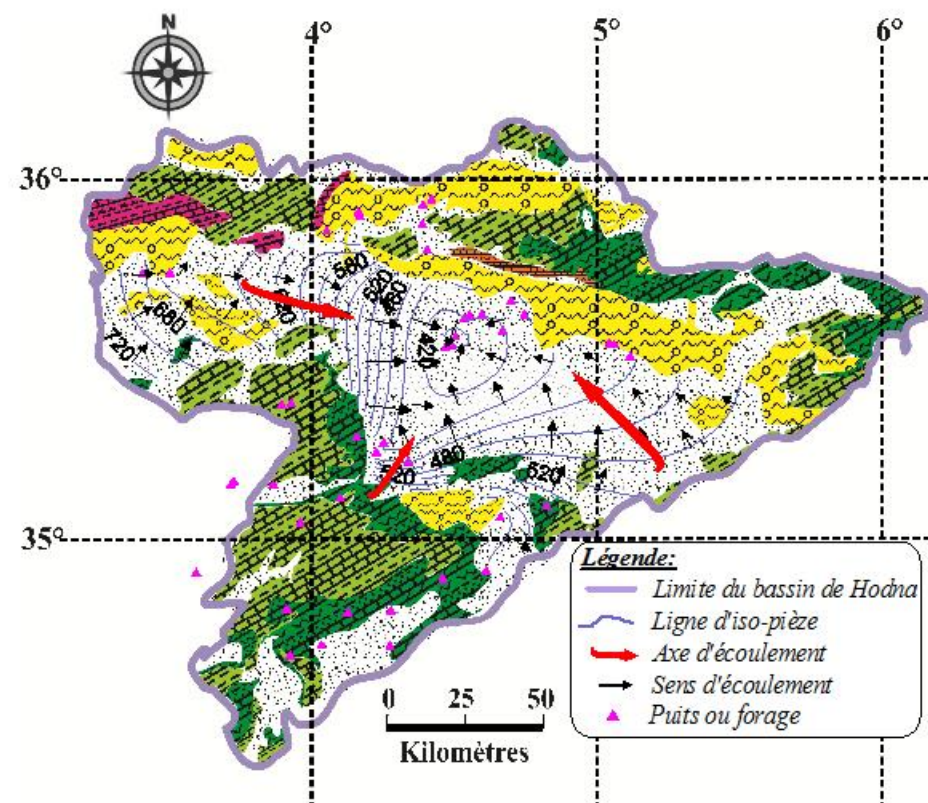


Figure 31: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 1984.

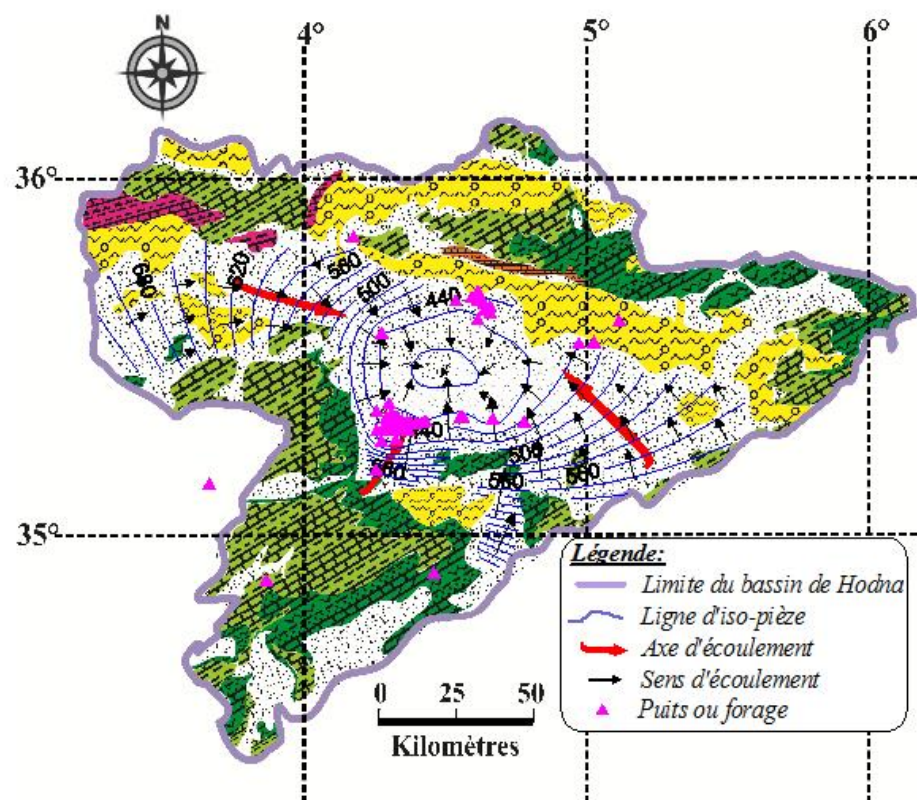


Figure 32: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 1987.

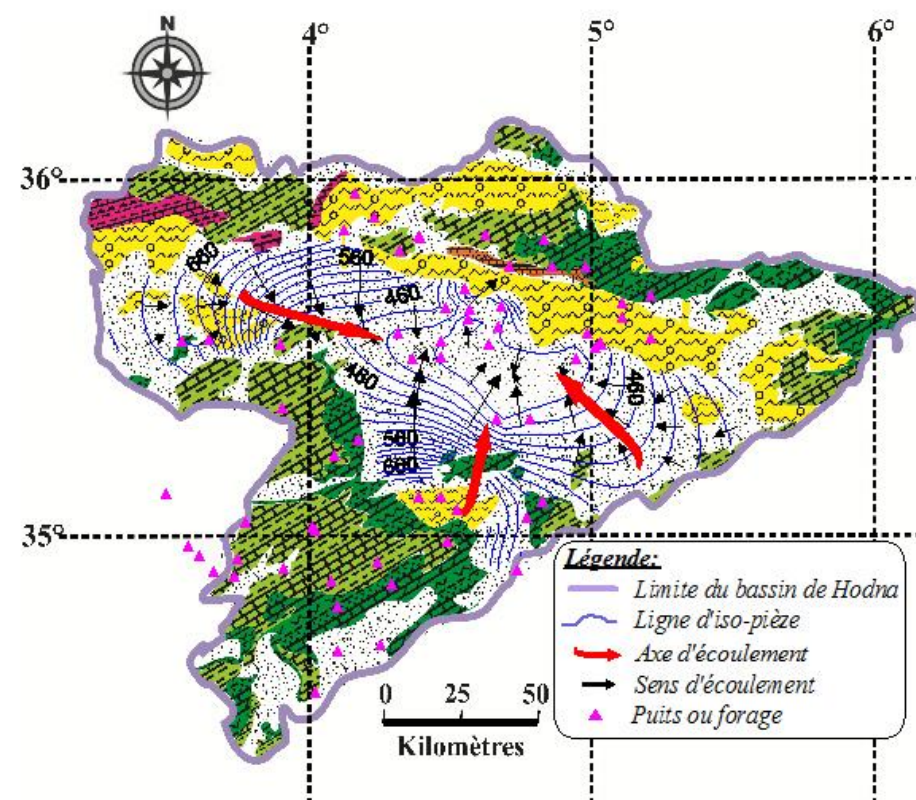


Figure 33: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 2003.

3.2.2.2. Fluctuation de la nappe :

Les fluctuations de la surface piézométrique sont la conséquence d'un ensemble de propriétés physiques d'un aquifère (transmissivité, emmagasinement, surface d'alimentation, type de décharge) (Bernard et al 1971). Elles jouent un rôle primordial dans la détermination des paramètres hydrodynamiques du réservoir aquifère d'une façon à contribuer à la construction d'un modèle hydrogéologique permettant de gérer la nappe systématiquement. De plus ; pour poursuivre l'évolution piézométrique d'une nappe au cours du temps on doit recourir à l'interprétation préalable des cartes piézométriques de chaque période. Il s'agit de schématiser le réseau d'écoulement qui est défini par (Castany et Margat, 1977) comme étant un ensemble des lignes équipotentiels et des lignes de courant décrivant un système d'écoulement bidimensionnel, dans un milieu aquifère continu. Dans un milieu isotrope et en régime permanent, ces lignes deviennent orthogonales. La détermination d'un réseau d'écoulement tient compte de la distribution des charges hydrauliques (équipotentiels) ainsi que la distribution spatiale des distances horizontales entre les piézomètres existant sur le terrain. Par interpolation numérique des charges hydrauliques mesurées dans chaque piézomètre, on est capable d'avoir la distribution spatiale des équipotentiels donc le réseau d'écoulement. (ACEVEDO, 1996).

Pour poursuivre l'évolution piézométrique de la nappe du Mioplioquatenaire du bassin du Hodna, nous avons recouru au traitement numérique des relevées piézométriques effectuées par l'A.N.R.H durant la période (1954, 2003) voir annexe. Puisque ces données piézométriques ne sont pas suffisantes pour établir des cartes de haute et de basse eau (régime annuelle de la nappe), nous n'avons qu'une seule occasion de suivre l'évolution piézométrique de la nappe en régime interannuelle. A cet effet ; nous avons essayé d'établir des cartes piézométriques les plus représentatives (répartition spatiale des données piézométriques importantes) dans une objective de :

- Suivre l'évolution piézométrique en régime interannuel suivant une droite traversant le bassin du Nord-ouest, Sud-est passant le Chott Hodna (figure 34).
- Suivre le phénomène de l'artésianisme au tour du Chott Hodna (figure 35).

Cependant ; une fois atteinte cette objective, il ne sera pas utile de la prendre en considération comme étant un élément de base pour les recherches à venir. C'est une tentative ou une approche à la réalité permettant de comprendre d'une façon globale le comportement hydraulique des eaux souterraines au niveau du bassin de Hodna.

A- Evolution piézométrique selon une droite Nord-Ouest, Sud-Est passant par le Chott Hodna :

Nous avons projeté les cartes piézométriques des périodes (1954, 1972, 1978, 1984, 1987 et 1989) sur une droite traversant le bassin du Nord-Ouest, Sud-Est passant par le Chott Hodna dans le but de réaliser une coupe transversale agissant à bien illustrer l'ensemble des informations de variation piézométrique à travers le bassin du Hodna comme suite figure 34:

- ✓ La coupe confirme l'écoulement rapide de la nappe de l'Ouest vers le Chott avec un gradient de l'ordre de 5,3‰.
- ✓ La vitesse d'écoulement commence à stabiliser vers les périphériques immédiats du Hodna.
- ✓ L'amplitude de variation du niveau piézométrique dans la partie Nord-Ouest du bassin est de l'ordre de 10 à 15 mètres dont le niveau piézométrique commence à diminuer depuis l'année 1972 jusqu'à atteindre son maximum dans l'année 1984. Ce niveau reprend son état dans l'année 2003.
- ✓ L'amplitude de variation du niveau piézométrique dans les périphériques immédiats du Chott n'est pas de grande importance. Il est de l'ordre de moins de 8 mètre cela peut être dû à l'importance du mécanisme du recharge latérale dans toutes directions.

A partir de l'analyse de la figure 34, nous avons remarqué que pendant les années 50, époque où la nappe était beaucoup moins sollicitée, les fluctuations piézométriques étaient de grandes amplitudes. Ces amplitudes devenaient moins importantes pendant les années 70, grâce essentiellement à une pluviométrie très importante. Pendant les années 80, à cause de la persistance de la sécheresse et par conséquent de la surexploitation de la nappe, les amplitudes se sont accentuées, notamment celles de décharge, et le niveau moyen n'a cessé de diminuer. Enfin, pendant les années 2000, ces amplitudes commencent à reprendre son état comme celui des années 70 grâce à l'amélioration du régime climatique de la région du Hodna.

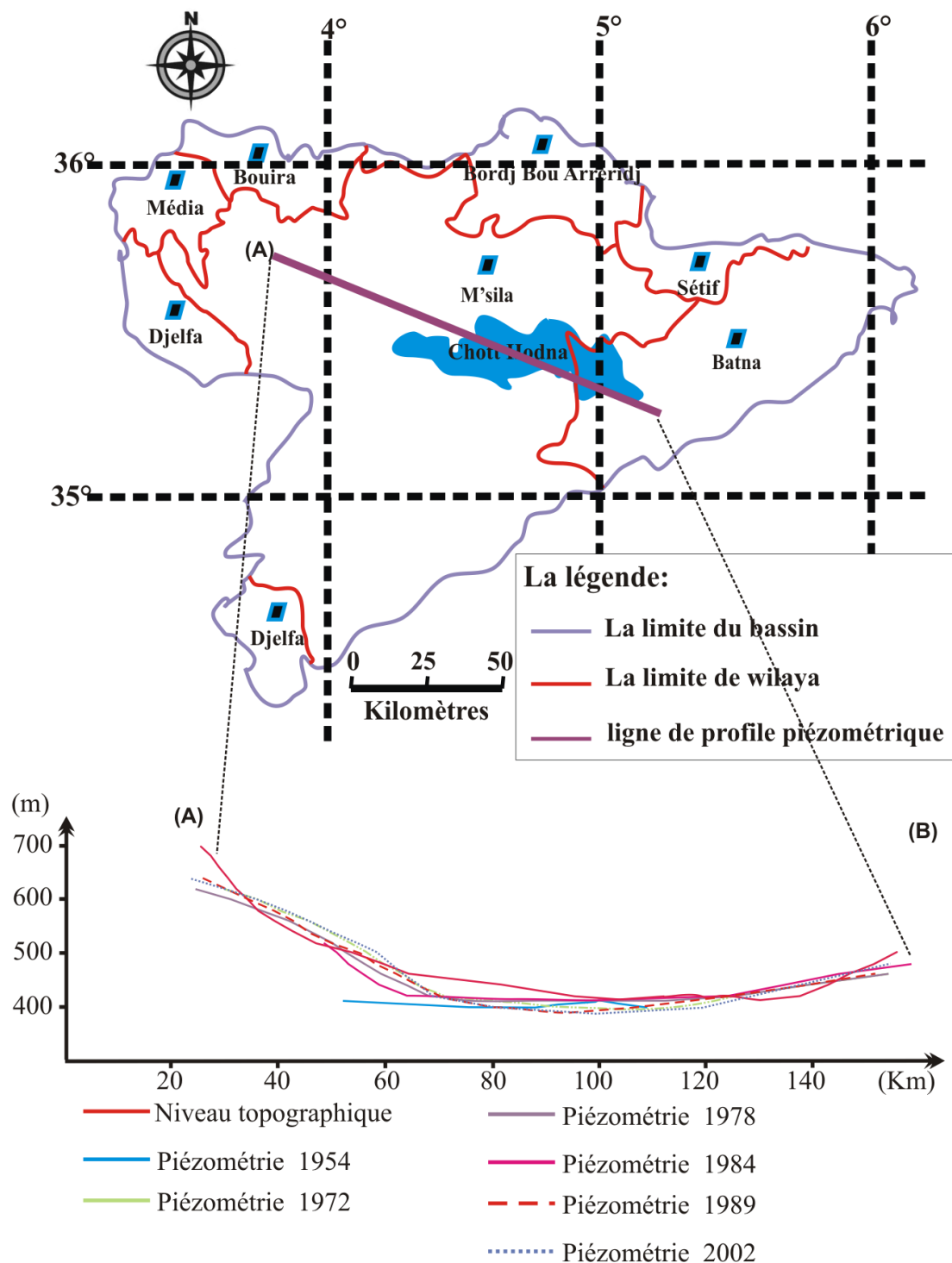


Figure 34: Evolution piézométrique spatiale de la nappe le long de la coupe transversale AB Nord-ouest, Sud-est au cours de la période (1954,1989)

B- Evolution de l'artésianisme au tour du Chott Hodna :

Nous avons réalisé des cartes déterminant l'évolution de l'auréole d'artésianisme au tour du Chott Hodna dont nous avons constaté que :

- ✓ Une réduction progressive d'une année à l'autre de l'auréole de l'artésianisme, cela peut être du généralement à la surexploitation de la nappe et l'impact de la sécheresse.
- ✓ l'auréole de l'artésianisme n'a pas respecté la même forme ovale, cela peut être dû principalement à l'importance du mécanisme d'écoulement souterrain dans un massif géologique complexe.
- ✓ L'auréole de l'artésianisme recouvre une superficie importante dans la partie Nord du Chott. C'est ce qui permet de montrer la contribution importante de la bordure méridionale des monts de l'Atlas tellien au rechargement en grande valeur de du système aquifère du bassin du Hodna.

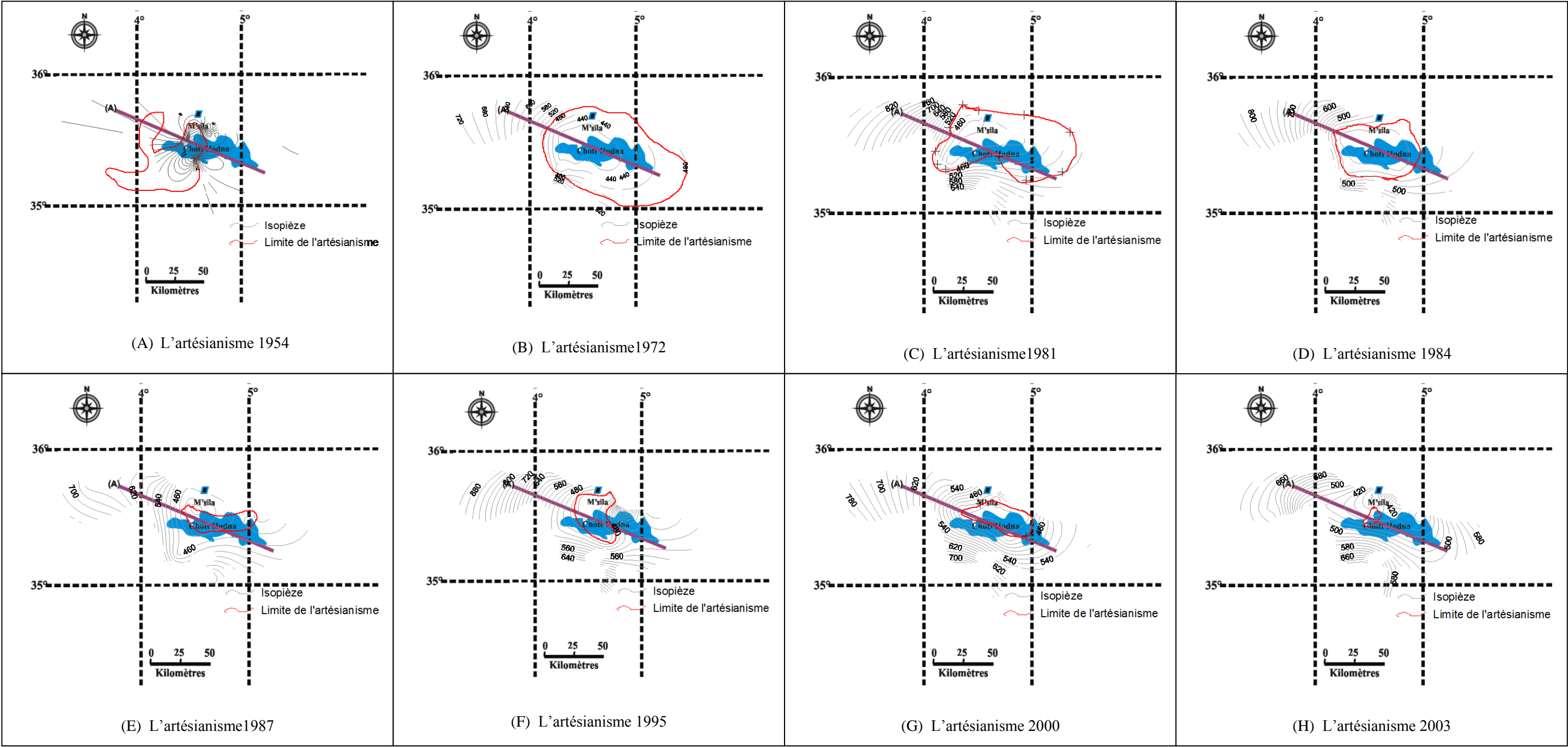


Figure 35: Evolution de l'artésianisme de la nappe au cours de la période (1954,2003)

3.2.3. Caractéristique hydrodynamique :

Il s'agit d'extraire les paramètres hydrodynamiques du système aquifère du bassin de Hodna telle que la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement. D'une façon à bien enrichir notre travail nous avons recouru à des travaux ayant été déjà réalisés par R.Grigne (2010). Il a adopté l'interprétation des résultats des essais de pompage en s'appuyant sur la réalisation des courbes de descente et remonté de quelque forages dans le but d'avoir les paramètres hydrodynamiques du système aquifère du bassin de Hodna.

3.2.3.1. Pompage d'essais par la méthode de Jacob :

a- Interprétation des données du pompage d'essai de longue durée (forage d'Ouled Madhi)

Ce forage est implantée dans la partie centrale de la plaine au coordonnées Lambert (X=674.750 Km, Y=265.100 Km) de 200 m de profondeur, l'essai de pompage a durée 24 heures pour la descente et avec un débit constant de 36 l/s.

b- La courbe de descente

La courbe est caractérisée par une augmentation régulière du rabattement en fonction du temps (Figure 36) : On peut calculer la transmissivité d'après la pente de la droite qui est déterminée par l'accroissement du rabattement sur le module logarithmique noté « C », Ce qui donne : $C1 = 0,23$ et $T = 2,9.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

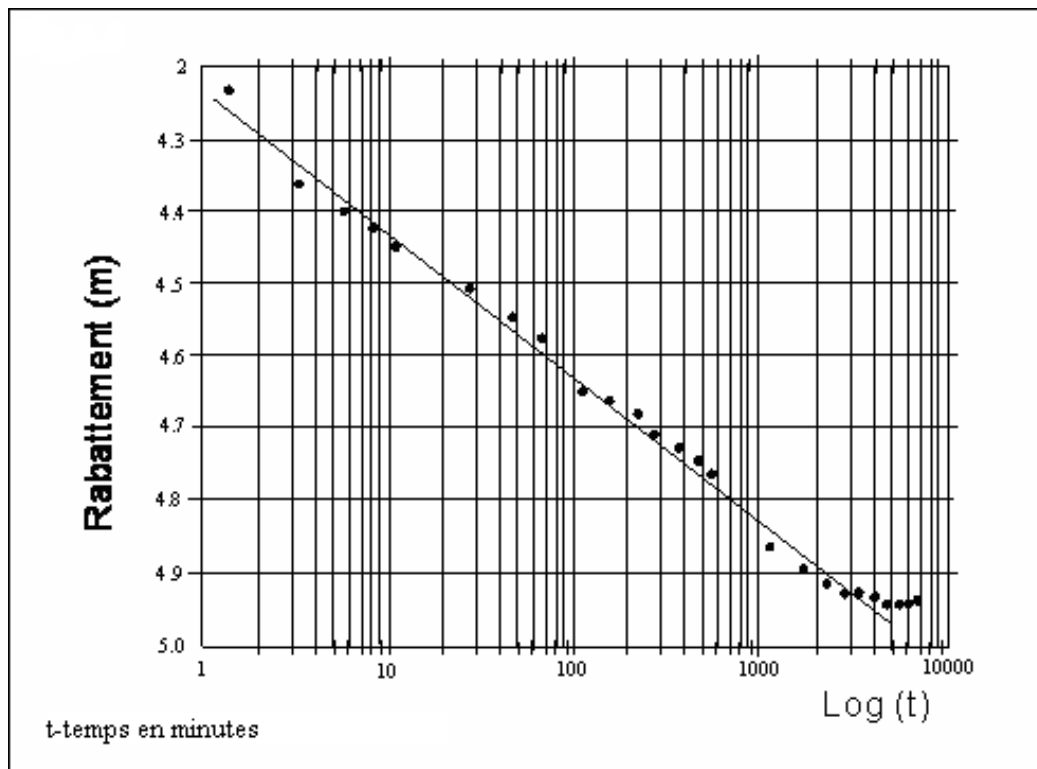


Figure 36 : Courbe de descente forage Ouled Madhi (Grigne, 2010)

c- La courbe de remontée

La remontée est régulière, la droite représentative a pour pente (Figure 37) : $C = 0,14$ d'où $T = 4,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

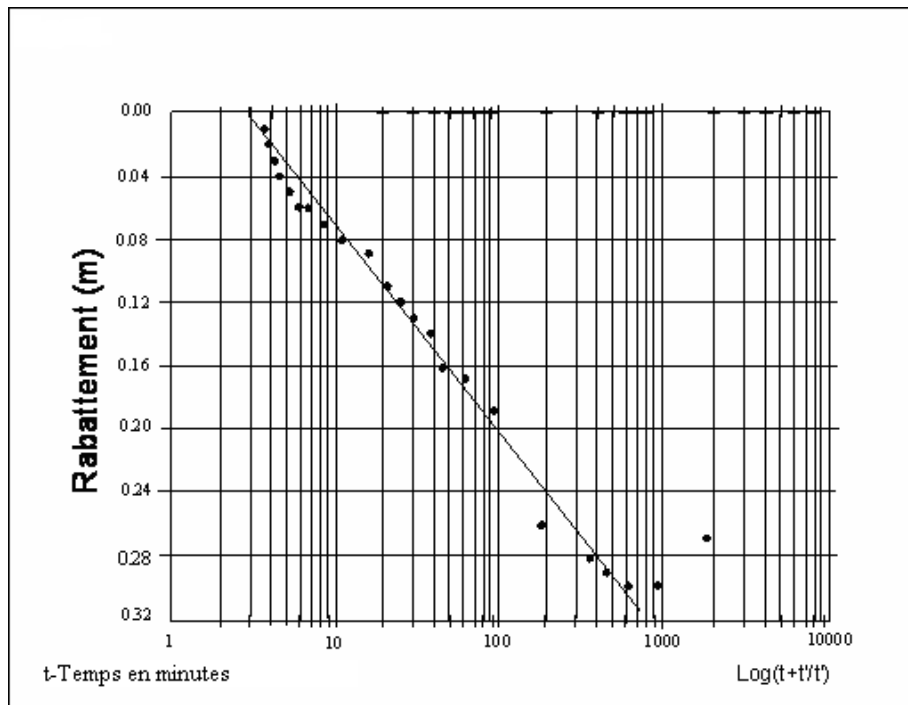


Figure 37 : Courbe de remontée forage Ouled Madhi (Grine ,2010)

Les valeurs de transmissivité de la descente et de la remontée sont très proches, ce qui indiquant que l'essai de pompage a été réalisé dans de bonnes conditions une bonne transmissivité, donc une bonne perméabilité et/ou une forte épaisseur des alluvions dans la zone d'Ouled Madhi.

d- Interprétation des données du pompage d'essai de longue durée (forage de Bir Hanate)

Cet essai réalisé le 08/04/2006 a duré 24 heures pour la descente avec un débit constant de 36 l/s.

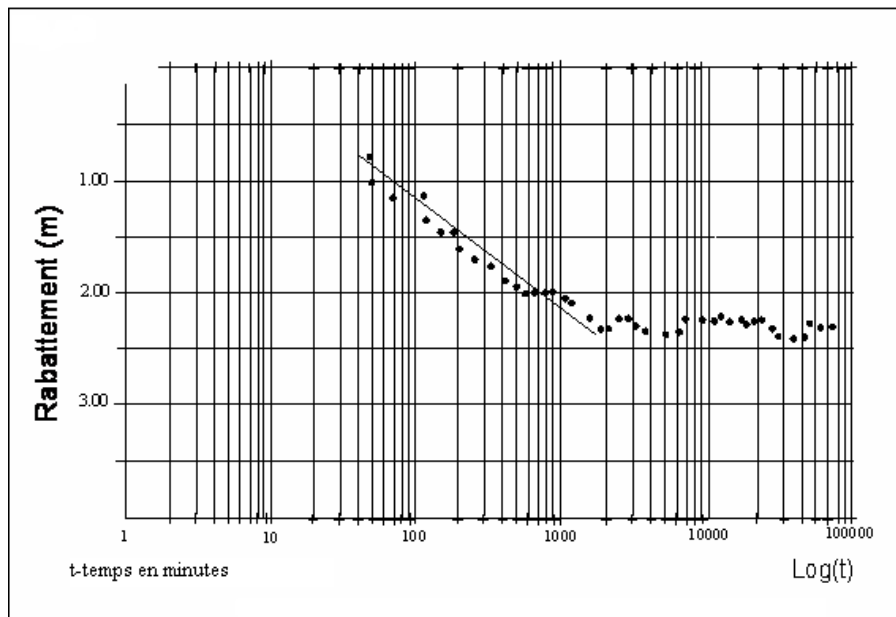


Figure 38 : Courbe de descente (Forage Bir Hanat 24 heures) (Grine, 2010)

La courbe de descente montre deux phases (Figure 36) : Un premier tronçon de droite caractérisé par une augmentation rapide du rabattement, donnant une pente de $C1 = 0.60$ et une transmissivité $T1 = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

e- La courbe de remontée

Cette courbe met en évidence une seule phase (Figure 39), traduisant une remontée régulière de la nappe. La droite représentative a pour pente $C = 0.3 \cdot 10^{-2}$ d'où $T = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

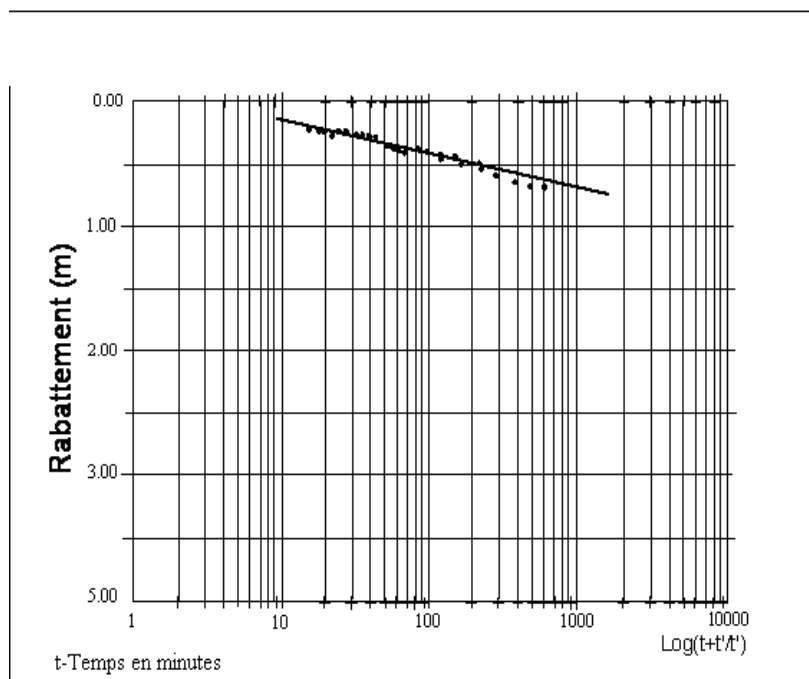


Figure 39 : Courbe de remontée Forage Bir Anat (24heures) (Grine, 2010)

3.2.3.2. TRANSMISSIVITE, COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT ET RAYON D'ACTION.

Les valeurs des transmissivités varient de 8.10^{-5} à 2.10^{-2} m²/s. Les variations locales sont également importantes, à l'exemple du Sud-Est de M'sila (de 10^{-4} à 10^{-2} m²/s). Les coefficients d'emménagement varient de 10^{-5} (zone de Boussaâda) à 10^{-4} (en zone de M'sila) ce qui confirme l'état de la nappe captive en cette dernière zone. Les rayons d'action vont de 2000 à 4250 m, pour la nappe profonde et sont de l'ordre de 240 m pour la nappe phréatique.

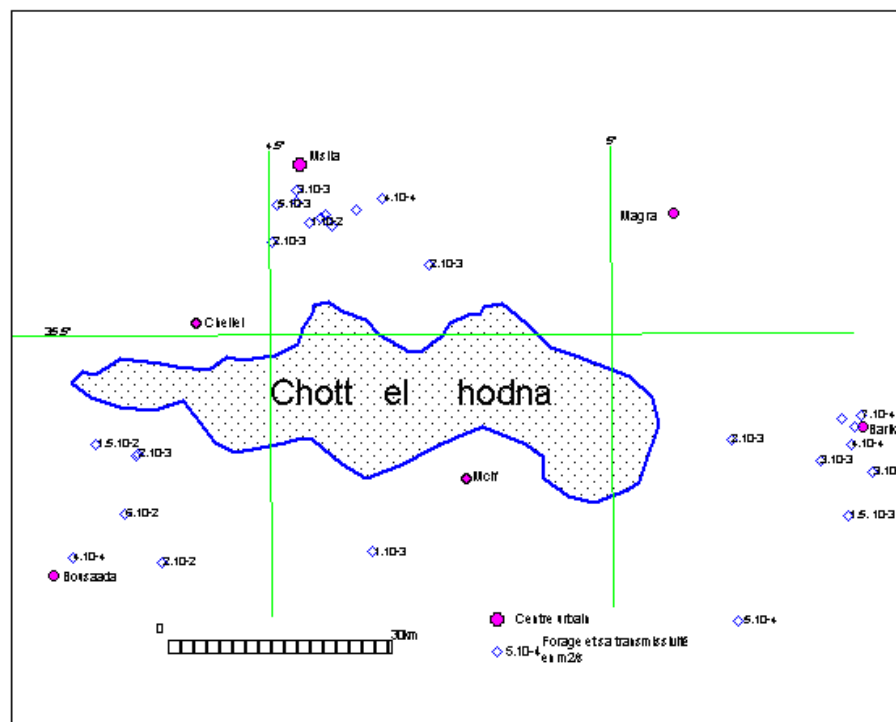


Figure 40 : Carte des transmissivités à travers la plaine hodnéenne (nappe profonde)
(Données de Derekoy pour FAO 1973) in Grine, 2010)

4. CONCLUSION :

La zone faisant l'objet d'étude est située dans la partie centrale de l'Algérie. Elle est le résultat de l'accident majeur de l'Atlas tellien et l'Atlas Saharien, caractérisé par un climat steppique.

Les principales formations géologiques rencontrées sont : les formations de Crétacé des calcaires dolomitiques avec des passées marneuse au Nord et Sud-Ouest de la dépression Hodnéenne, les formations Eocènes des calcaires argileux et marneux retrouvé le long de l'Atlas tellien, les formations Miocène de marne et conglomérat retrouvé principalement aux périphériques des monts de l'Atlas tellien et ainsi les monts de Boussâda et enfin les formations des alluvions du Quaternaire retrouvées sur toute la partie plaine du bassin.

L'étude hydrogéologique nous a permis de distinguer que Le système aquifère du bassin du hodna comporte une superposition de deux niveau perméable (aquifère bicouche) dont le premier est composé des terrains Plioquaternaire des alluvions et des graviers retrouvés aux périphériques immédiates du Chott Hodna. Ce niveau se trouve en état d'urgence à cause de la surexploitation (facilement exploitable par des puits domestiques). Le deuxième niveau est composé des terrains du Mioplioquaternaire (galets, graviers, sables et conglomérats avec des passées argileuses et argilo-sableuses), il est rencontré par des puits profond aux piedmonts alors qu'il devient en charge aux alentours du Chott hodna.

CHAPITRE 03 : HYDROCHIMIE

1. INTRODUCTION :

L'eau souterraine est d'une importance capitale dans la plupart des régions du monde. Toutefois, cette ressource qui était jadis de bonne qualité, se trouve actuellement menacée par diverses sources ponctuelles et diffuses de contamination. L'eau qui constitue un élément incontournable pour le développement économique est menacée de contamination sous l'effet de l'essor économique avec un développement de l'activité agricole et surtout de l'élevage associé à une forte expansion démographique. Il convient donc de connaître et suivre la qualité de cette ressource (Boubakar, 2010).

La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel est très variable. Elle dépend de la nature géologique du sol d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle aurait pu rencontrer lors de l'écoulement. Ainsi la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique, détermine sa qualité (Jain et *al*, 2005 in Amadou et *al* 2014).

L'utilisation intensive des ressources naturelles et l'accroissement des activités humaines ont engendré de graves problèmes sur la qualité des eaux souterraines (Foster, 1995 ; Mor et al, 1995 in Amadou et *al* 2014). L'étude hydro chimique des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à la satisfaction des besoins. Elle permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine minérale. Elle permet également de comprendre le fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères. Des études hydrogéologiques et physico-chimiques seront intégrées et employées pour déterminer d'une part l'influence de ces facteurs et de l'autre les mécanismes contrôlant la chimie des eaux souterraines dans la région.

Cette étude se propose d'améliorer les connaissances sur la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et de déterminer l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région à partir d'une combinaison des méthodes hydro-chimiques et de l'Analyse en Composantes Principales.

2. METHODE ET ANALYSE :

2.1. Acquisition des données hydrochimiques et méthode d'analyse :

Les données des paramètres physico-chimiques des points d'eaux que nous pourrions les traitées proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (2011). Elles ont été enregistrées à partir d'une campagne d'un nombre de 21 point biens réparties sur l'ensemble de la cuvette du Hodna. Cette étude sera considérée comme étant un travail complémentaire des anciens travaux de Guiraud 1973, Grine 2010 agissant à améliorer certaines connaissances

hydrochimiques d'une façon permettant de comprendre les mécanismes d'acquisition chimique des eaux souterraines aux cours de son trajet vers le Chott Hodna.

2.2. Validation des analyses chimique :

Le calcul de la balance ionique est une méthode très efficace pour la validation des analyse chimique de l'eau dont les résultats de ces analyse ne peuvent pas considérées comme représentatives que si la balance ionique est inférieure à 5%. A partir du calcul de la balance ionique des échantillons utilisés, il en ressort que 2 sur 21 échantillons présentant une balance ionique entre 38% et 72%. Par contre les autres échantillons présentent une balance ionique très satisfaisante de l'ordre 2% en moyenne. Ainsi pour confirmer la validité et l'efficacité de ces analyses, deux corrélations significatives ont été pris en considération, l'une représente la variation de la teneur de l'ensemble des cations en fonction des anions avec un coefficient de corrélation $R^2=99,74\%$ et l'autre représente la variation de la teneur de l'ensemble des ions en fonction de la conductivité électrique mesurée in situ avec un coefficient de corrélation $R^2=99,62\%$ (figure 41). Ces deux arguments nous ont permet de procéder au traitement des données hydrochimiques validées sans aucune contrainte.

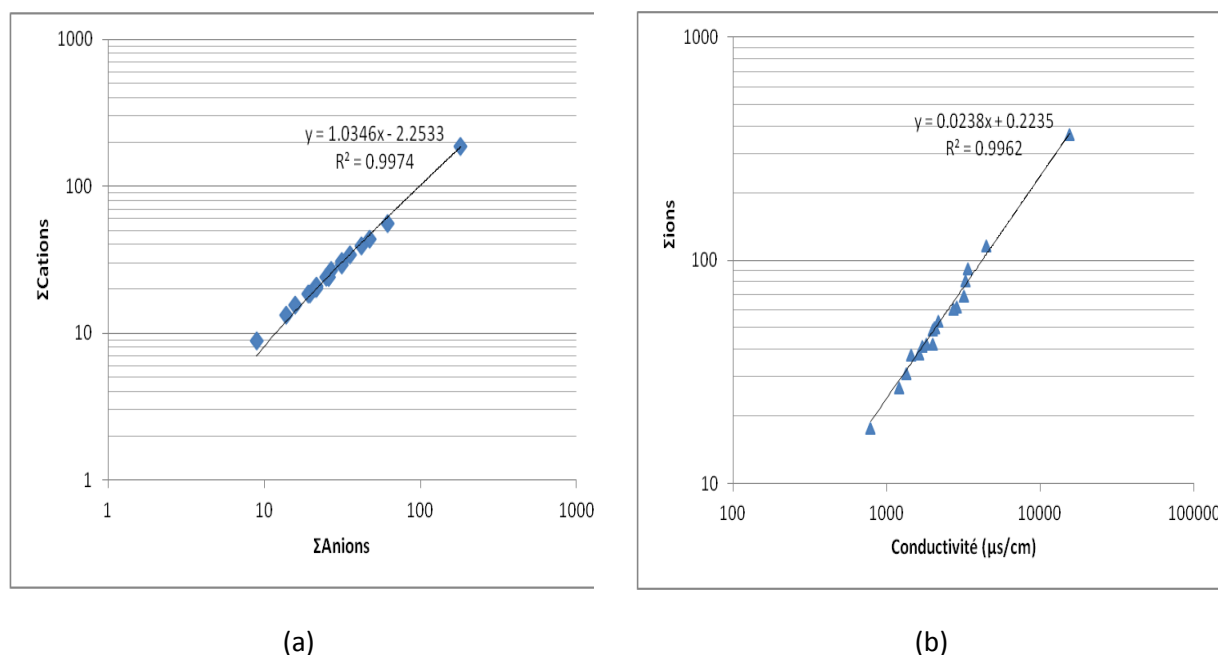


Figure 41:(a)Somme des anions versus somme des cations (b) Corrélation entre la somme des ions et les conductivités électriques

Les résultats de la validité des données hydrochimiques des eaux de la cuvette du Hodna sont ordonnés dans le tableau (14) :

Tableau 14: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du bassin de Hodna (2011)

n	Nom	TDS	T°C	pH	c25°C	Balance	Cations	Anions	Ca	Mg	Na	K	Sr	Li+	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO3	F	Br	SiO2	O2
							meq/l	[mg/L]															
1	Hod1	3590	22.1	7.09	4480	5%	61.359	55.299	462.4	236.6	427.7	8.3			208.9	681.5	1537	6.93	20.51			16.2	8.6
2	Hod2	1038	22.2	7.33	1338	1%	15.7	15.454	130.1	58.5	97.2	4.45	2.03	0	240.9	118.4	363.2	1.02	19.37	1.02	1.96	15.3	5.2
3	Hod3	2897	25.5	7.27	3380	4%	47.568	44.005	243.3	142.2	542.4	5.2			210.4	547.8	1169	19	17.48			13.8	7.8
4	Hod4	1248	22.1	7.23	1448	1%	19.085	18.672	161.7	70.82	115	4.79	2.52	0	233.3	141.7	483.6	12.7	18.74	1.13	2.01	14.8	5.5
5	Hod5	1590	23.1	7.21	2000	2%	24.962	23.922	254.3	82.5	121.2	4.81	3.69	0	189.1	191.8	684.5	35.6	18.74	1.27	2.14	14.8	11.4
6	Hod6	1594	23.1	7.28	2050	4%	25.852	24.072	224	97.21	150.1	2.55	3.4	0	219.6	245.4	613.5	20.2	14.82	0.6	2.51	11.7	4.4
7	Hod7	1788	21.8	7.06	2160	0%	26.795	26.95	278.4	104	93.8	6.49	4.09	0	149.4	105.6	946.2	78.6	17.6	1.23	2.15	13.9	6.4
8	Hod8	1280	22.9	7.31	1626	2%	19.526	18.664	193.4	72.38	85	5.99	2.78	0	167.8	67.1	587.4	78.2	16.97	1.12	1.99	13.4	6
9	Hod9	892	22	7.46	1200	2%	13.795	13.226	145.4	50.09	52.5	3.32	2.04	0	152.5	99.81	313.1	52.9	17.22	1.16	2.01	13.6	7.6
10	Hod10	617	22.7	7.51	786	1%	8.9037	8.8113	63.4	42.42	49.4	2.2	1.75	0	253.2	42.1	140.9	5.1	15.58	0.92		12.3	5.2
11	Hod11	1376	23.6	7.31	1704	2%	21.201	20.228	92.3	79.93	228.3	1.38	1.89	0.1	332.4	192.4	417.1	11.2	15.96	0.81	2.05	12.6	3.6
12	Hod12	1391	23.9	7.34	1810	2%	21.519	20.809	163	100.4	115	2.25	2.54	0	285.2	142.2	552.9	9.1	15.45	0.64	2.06	12.2	7.3
13	Hod13	2189	22.9	7.25	3200	2%	35.49	33.987	213.8	111.5	352.8	8.04	3.47	0.1	292.8	570	568.1	49	15.83	0.74	2.93	12.5	7.2
14	Hod15	1980	21.8	7.23	2860	1%	31.216	30.798	180.8	95.65	322.2	7.62	4.52	0.1	225.7	427.7	691.8		20.26	1.34	2.2	16	0.9
15	Hod16	1350	31.2	7.33	1991	3%	21.708	20.309	130.9	68.61	215.2	3.9	2.8	0	222.7	252.6	423.2	6.4	19.88	1.35	2.03	15.7	2.9
16	Hod17	1954	22.5	7.4	2730	3%	31.398	29.398	184.8	104.5	304.8	4.4	8.61	0.1	282.1	345.2	682.3	16.3	17.73	1.42	2.19	14	2
17	Hod18	1640	24.2	7.38	2070	3%	25.785	24.164	139	93.54	252.7	2.6	3.69	0.1	323.3	224.6	565.4	14.9	16.46	1.08	2.23	13	4.4
18	Hod20	11131	24.1	7.22	15500	-2%	180.6	187.14	691.9	742.3	1946	13.6			176.9	3704	3694	139	23.05			18.2	0.7
19	Hod21	2648	21.9	7.18	3250	4%	42.15	39.254	483.5	114.5	190.8	6.29	5.92	0	151	352.9	1058	265	16.21	1.05	3.02	12.80	7.8

2.3.Méthode de traitement des données :

Le traitement des données hydrochimiques validées précédemment sur les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du Hodna a été réalisé à l'aide des méthodes hydrochimiques et statistiques multivariées. L'étude hydrochimique consiste à extraire les types de faciès hydrochimique des eaux et tracer des cartes d'iso-teneurs représentant la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques à travers le bassin du Hodna. L'approche statistique a été utilisée dans le but d'avoir une idée sur l'origine de la minéralisation des eaux et de confirmer les résultats trouvés dans la première méthode en se basant sur l'analyse en composante principale et la classification hiérarchique.

3. RESULTATS :

3.1. Résultats des mesures physico-chimiques des eaux :

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques réalisées sur les eaux souterraines du bassin de Hodna sont consignés dans le Tableau 14.

Il ressort de l'analyse de ce tableau que les eaux de la région sont neutres, avec un pH qui varie de 7,06 à 7,51 pour une moyenne de 7,28. La conductivité électrique des eaux varie de 786 à 15500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 2925,42 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux sont fortement minéralisées dans l'ensemble, cependant on y rencontre par endroit certains points d'eau qui ont une faible minéralisation. Il s'agit de l'alentour immédiat du Chott Hodna (786 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1704 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

3.1.1. Distribution spatiale des paramètres physico-chimiques :

Pour que ça soit une bonne représentation graphique des cartes iso teneurs, il faut qu'il y ait une bonne répartition spatiale des échantillons sur toute la zone d'étude. Sur ce principe ; les échantillons qui ont été prélevés par l'ANRH (2011) ont permis d'établir des cartes iso-teneurs très significatives. Il s'agit de mettre en valeur la répartition spatiale des paramètres physico-chimiques d'une façon à comprendre le mode d'acquisition chimique des eaux souterraines au cours de son trajet vers le Chott Hodna.

3.1.1.1.Les paramètres physiques :

- **Le pH :**

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques dans les diagrammes Eh-pH. Le pH de l'eau conditionne les équilibres physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôts). Le pH est corrigé selon le cas par élimination du CO_2 dissous en excès ou par correction de la dureté carbonatée (Djidel, 2008).

Généralement, les eaux souterraines du bassin de Hodna sont neutres.

- **La température :**

Elle est mesurée in situ sur l'ensemble des points d'eau, elle est relativement élevée, vu son climat marquant une moyenne de l'ordre de 19°C dans le secteur d'étude (d'après les données issues de la station de Medjez), Ce qui laisse penser que le système aquifère du Hodna est en équilibre thermique avec l'atmosphère. Elle reste toujours dans les normes de potabilité (figure 42). Elle varie entre 21,8°C à 25,5 °C avec un moyen de l'ordre de 22,9°C dont on note un pic élevé de l'ordre de 31°C à la limite extrême Sud-Est du Chott. Il se peut qu'il y ait un phénomène de thermalisme dans cette région.

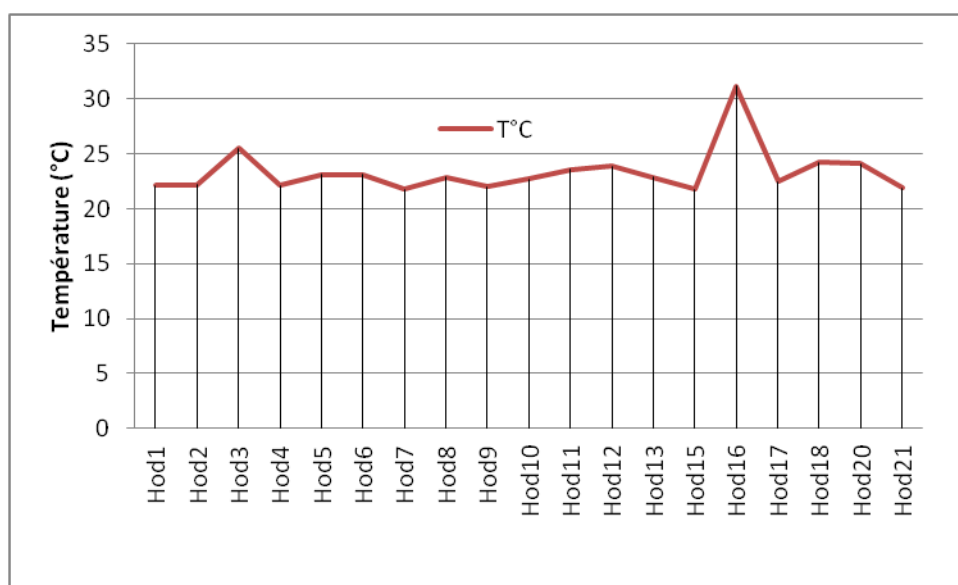


Figure 42: Variation de la température des eaux souterraines au niveau de la cuvette du Hodna (2011)

- **La conductivité électrique :**

Traduisant la capacité d'une eau (solution aqueuse) à conduire le courant électrique, la conductivité électrique est directement liée à la force ionique qui découle des formations traversées par cette eau dans le bassin hydrogéologique ainsi qu'à son temps de séjour dans le réservoir. Elle donne ainsi une bonne appréciation sur la minéralisation globale de cette eau. En effet, une eau est d'autant plus conductrice qu'elle est plus minéralisée (Hamit, 2012).

La figure (43) représente la distribution spatiale des valeurs de conductivité électrique à 25°C à travers la cuvette du Hodna. Généralement, elle distribue de façon hétérogène à travers la région du Hodna dont on note des valeurs <3000µS/cm (norme de potabilité des eaux) ayant un pourcentage de 82% qui se localisent principalement dans les piedmonts et la partie plaine de Msila par contre les 18% des valeurs dépassant la norme de potabilité arrivant jusqu'à une valeur trop élevée de l'ordre de 15500 µS/cm localisant le long d'une droite traversant la partie Est du Chott. Cette dernière montre ce qu'il a été décrit par Grine, 2010 dont il a supposé que l'élévation des valeurs de conductivité est causée par la remontée de Trias gypseux le long de la

faille dite de Colbert-Guellalia d'orientation NNE-SSW traversant la partie Est du Chott et arrivant jusqu'à la formation Jurassique du Djebel Soubella.

Pour confirmer l'interprétation de Grine, nous avons tracé une courbe de variation de conductivité en fonction du teneur de sulfate (figure 44). Cette figure montre une correspondance adéquate entre la conductivité et la teneur du sulfate qui est d'origine des formations gypseuses.

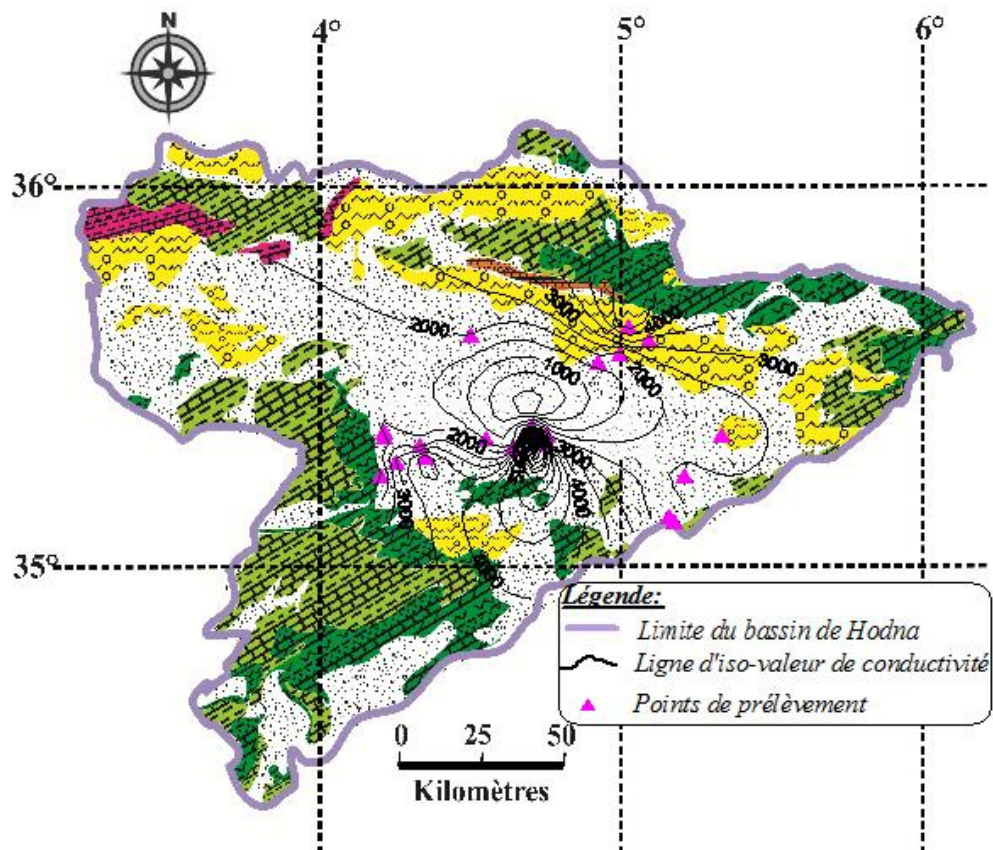


Figure 43: Carte de distribution spatiale de la conductivité au niveau de la cuvette du Hodna.

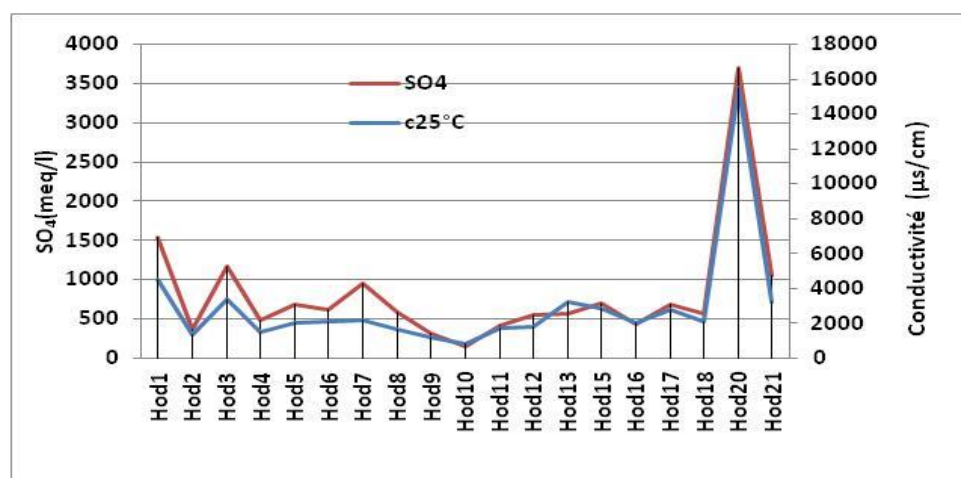


Figure 44 : Variation de la conductivité et la teneur du Sulfate au niveau de la cuvette du Hodna.

Selon la classification de minéralisation en fonction de la conductivité du Rodier et al (tableau 15), les eaux souterraines de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du bassin du Hodna sont très minéralisées. Elles dépassent les 1000 $\mu\text{S/cm}$.

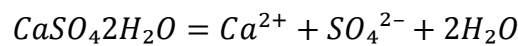
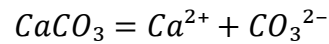
Tableau 15: Relation entre minéralisation et conductivité à 20°C (Rodier et al, 2009).

100 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 200 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation faible
200 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 333 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation moyenne
333 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 666 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
666 $\mu\text{S/cm}$ < conductivité < 1000 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation importante
conductivité > 1000 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation élevée

3.1.1.2. Paramètres chimique :

- **Le calcium** : Fig 45

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4).



La carte montre qu'il y a une distribution hétérogène des teneurs de calcium à travers la cuvette du Hodna dont on note des valeurs maximales de l'ordre de 200mg/l à 690mg/l localisant le long des piedmonts (foyer des infiltrations et du lessivage) et dans le puits 21 situé au niveau de la partie Sud-Est du Chott. Cette dernière confirme la remontée du Trias gypseux (le calcium provient essentiellement de la dissolution du gypse). Ces grandes valeurs commencent à diminuer vers la dépression du Chott Hodna jusqu'à atteindre essentiellement des teneurs dépassant la norme de potabilité qui est 100 mg/l, cette diminution des teneurs de Ca^{2+} est justifiée par le phénomène de dilution des eaux au cours de son trajet vers le Chott.

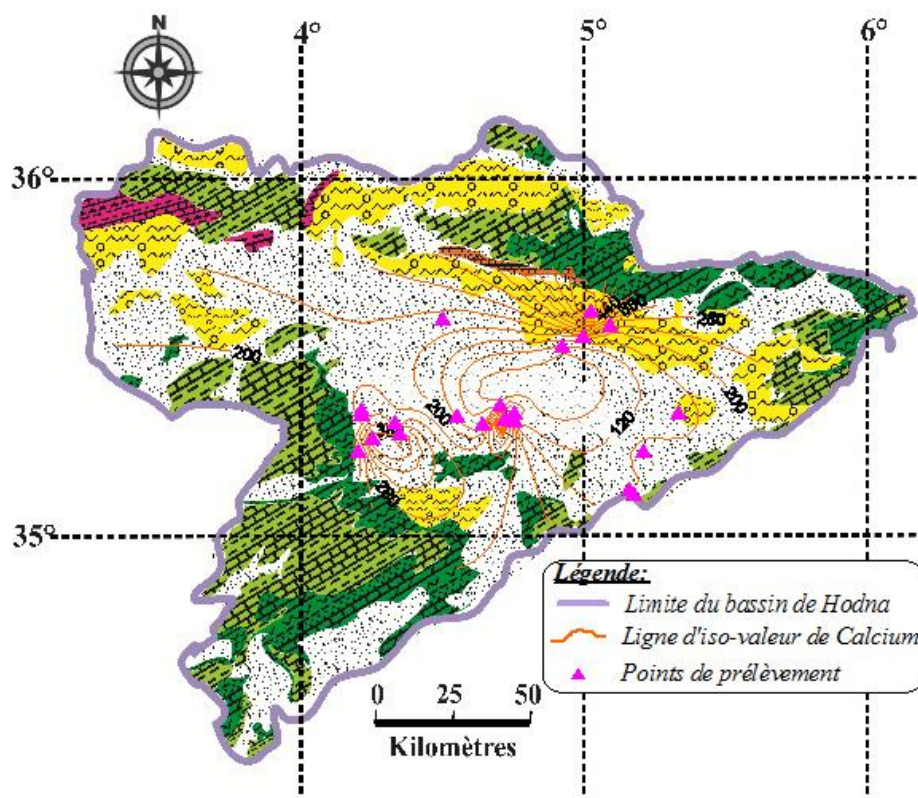


Figure 45: Carte d'iso-teneur du calcium en mg/l de la nappe du Hodna

- **Le magnésium :** Fig 46

Généralement le magnésium accompagne le plus souvent le calcium, il provient de la dissolution des dolomies ou des calcaires dolomitiques (Soit des formations salifères riche en magnésium « MgSO_4 »). La carte de distribution des teneurs de magnésium présente une même allure que celle du calcium. Les teneurs de Mg^{2+} oscillent essentiellement entre 42 mg/l et 142 mg/l avec un moyen de l'ordre 87mg/l (elle dépasse la norme de potabilité) à l'exception pour les deux puits n°01 et n°20 présentant des valeurs extrêmement fortes. Ces différences de teneurs pourraient avoir leur explication dans un processus similaire à celles des ions Ca^{2+} décrit ci-haut. Le magnésium provient en partie du flanc Sud des monts du Hodna à partir des calcaires dolomitiques du Barrémien et de l'Aptien. (Amroune, 2008)

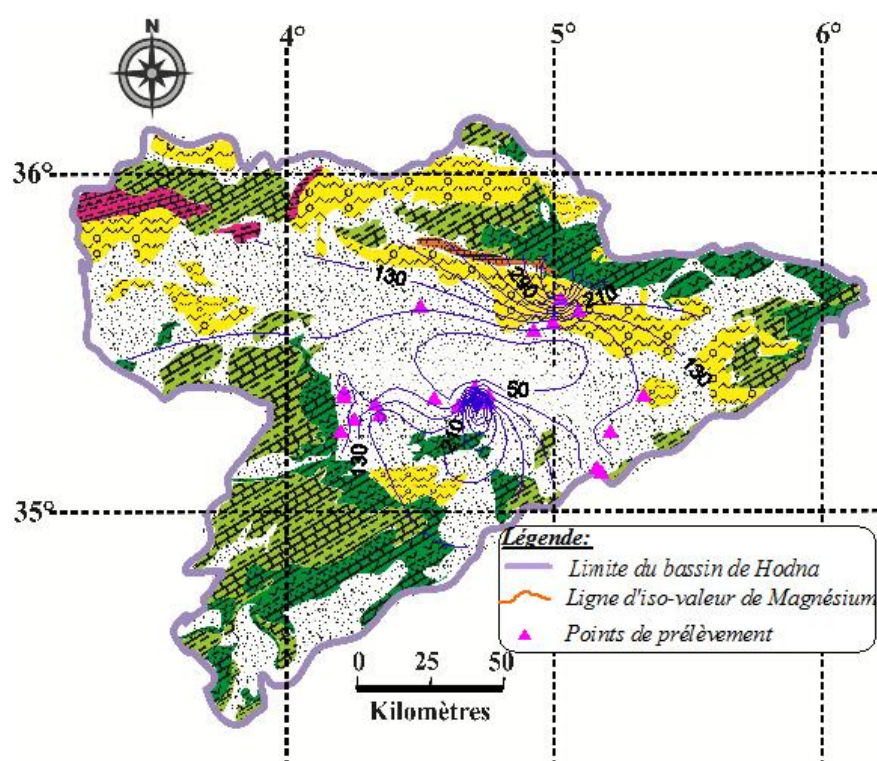


Figure 46 : Carte d'iso-teneur du magnésium en mg/l de la nappe du Hodna

- **Le sodium et le potassium :**

Le sodium est un élément constant de l'eau, toutefois les concentrations peuvent être extrêmement variables. Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques contenant du chlorure de sodium, le sel peut provenir de la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, des retombées d'origine marine, de la venue d'eaux salées dans les nappes aquifères, des nombreux usages industriels etc...(Belghiti et al, 2013) .

La figure (47) présente une distribution hétérogène des teneurs de sodium dont on enregistre de faibles valeurs de l'ordre 49mg/l à 197mg/l répondant à la norme OMS (200mg/l) localisant

essentiellement dans les piedmonts à l'exception de quelques points au voisinage de la faille décrite précédemment, ces faibles valeurs commencent à augmenter vers la dépression du Chott et la partie Est du bassin jusqu'à atteindre des valeurs extrêmement élevées de l'ordre de 1946 mg/l. Cette augmentation de la concentration peut être expliquée par le phénomène d'échange de base agissant à la minéralisation des eaux souterraines du Hodna au cours de son trajet vers le Chott ou par des venues d'eau salées du Chott dans l'aquifère. Par contre, au niveau de la partie Est du Bassin, l'élévation de la teneur de sodium peut être expliquée par la remontée du substratum marneux sous l'effet de l'anticlinal du Chott El hammam qui va agir à minéraliser les eaux et ce en fixant un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^+ .

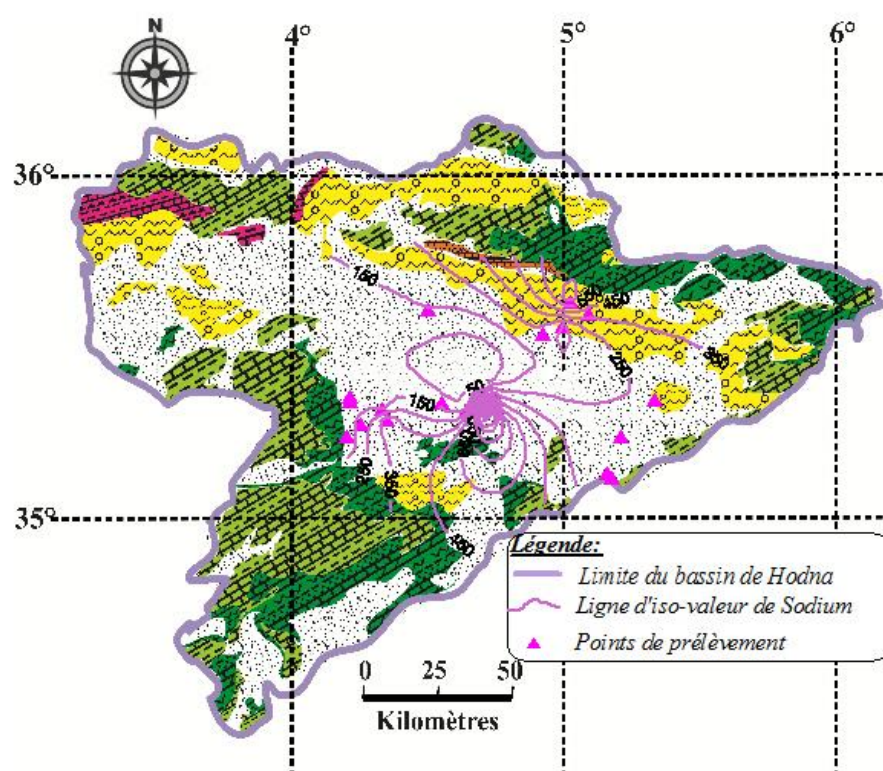


Figure 47: Carte d'iso-teneur du sodium en mg/l de la nappe du Hodna

Le potassium provient de l'altération des formations argileuses, des formations Quaternaires et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) retrouvées dans les eaux usées agricoles (Djidel, 2008). La carte d'iso teneur du potassium présente une distribution presque homogène dont ces valeurs oscillent entre 1,4mg/l à 13,6 mg/l restant toujours inférieures à la limite de potabilité (12 mg/l) fixé par l'OMS avec un moyen de l'ordre de 4,5mg/l.

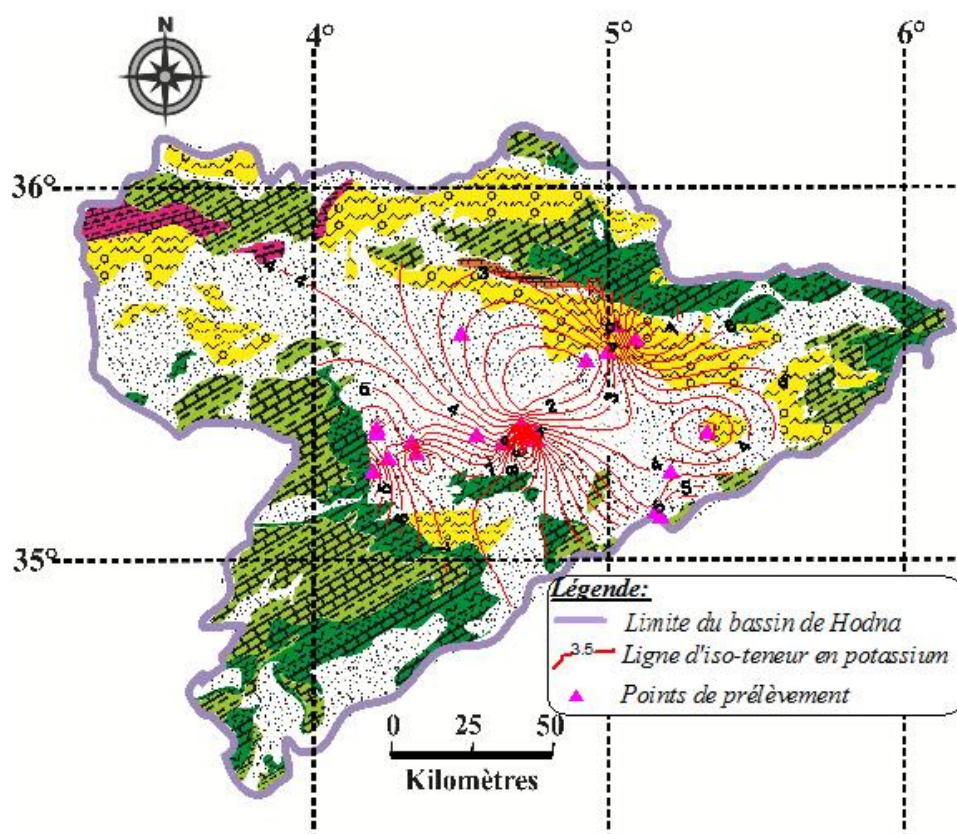


Figure 48: Carte d'iso-teneur du potassium en mg/l de la nappe du Hodna

- **Les chlorures :** Fig 49

Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines. Ainsi, ils peuvent provenir d'une intrusion d'eau marine, ou par contamination par les eaux usées. Ils peuvent provenir également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo sableuses ou argileuses. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion des canalisations et des réservoirs à partir de 50 mg/l (norme de l'O.M.S) (Amroune, 2008).

L'ion Cl^- représente dans la presque totalité des analyses chimiques l'élément dominant dans la concentration en sels des eaux de cette région, la carte d'iso teneur de Chlorure présente une distribution hétérogène de la concentration en Cl^- dont on enregistre des valeurs de l'ordre de 63% des points d'eaux répondant à la norme de l'O.M.S (250mg/l) localisant dans les piedmonts et la partie Nord-Ouest du bassin. Cette concentration commence à évoluer vers la partie Sud-Est du bassin au périphérique de la région de M'doukhel. On note des extrêmes valeurs dans quelques points suivant la ligne Nord-Sud traversant le chott que nous avons décrit précédemment, cela se peut provient d'une intrusion des eaux salées du Chott El Hodna.

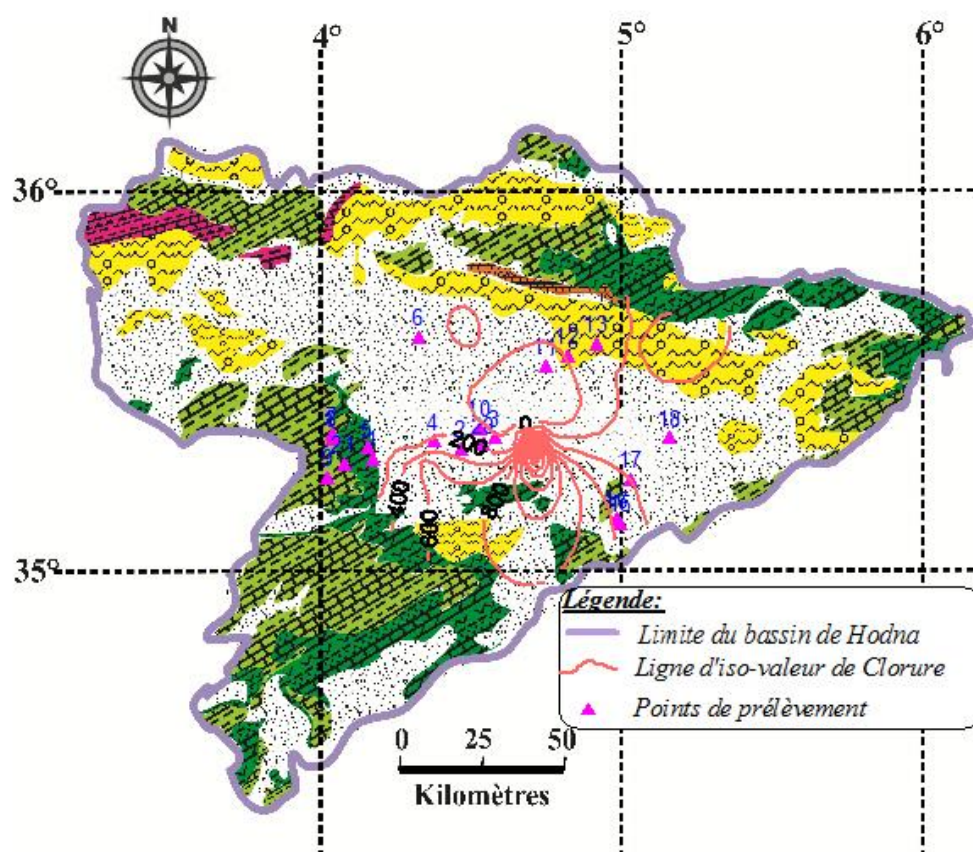
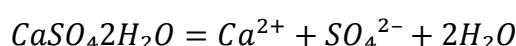


Figure 49: Carte d'iso-teneur du chlorure en mg/l de la nappe du Hodna

• **Les sulfates :** Fig 50

La présence des ions sulfate dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses selon la relation suivante :



L'analyse de la carte des teneurs en sulfate révèle qu'elle est superposable à la carte des conductivités électriques et que la distribution spatiale des teneurs n'est pas homogène. Les teneurs en sulfates varient entre un minimum de 140,9 mg/l et un maximum de 3694,0 mg/l. Comme le montre la carte, les teneurs les plus fortes sont observées dans la zone Nord du bassin juste à la limite méridionale des monts du Hodna où on trouve des niveaux gypseux du Lutétien et des niveaux argileux de l'Oligocène et ainsi dans la partie Sud-Est du Chott confirmant la remonté du Trias gypseux décrit précédemment. Ces fortes valeurs commencent à diminuer progressivement vers la partie centrale du bassin sous l'effet du phénomène de dilution.

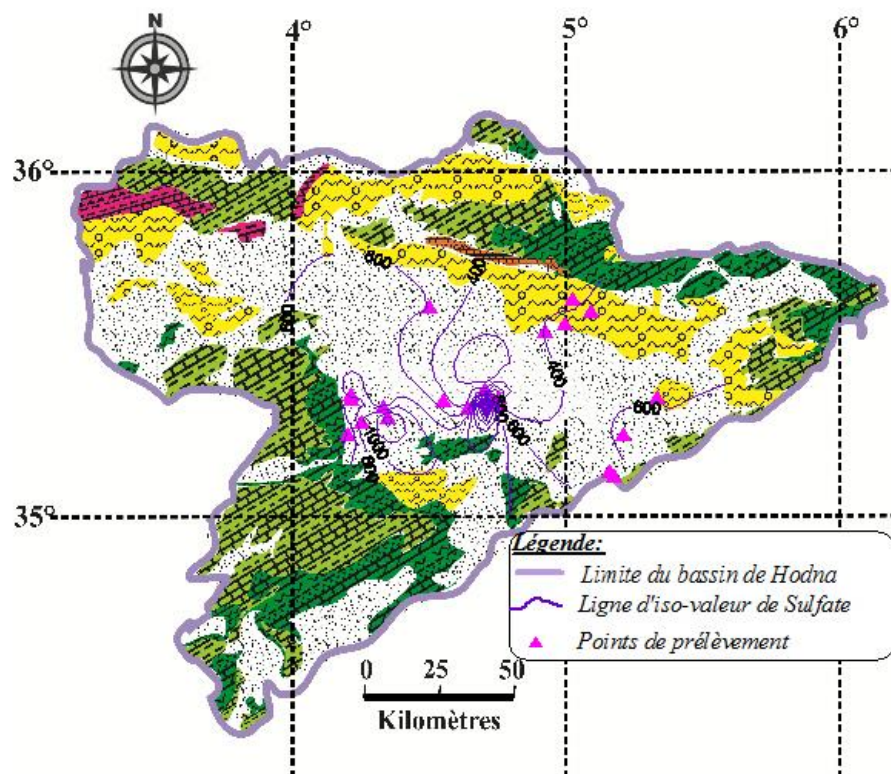
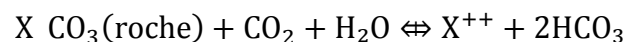


Figure 50: Carte d'iso-teneur du sulfate en mg/l de la nappe du Hodna

- **Les bicarbonates :** Fig 51

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale suivante :



Remarque : L'élément (X) peut être le (Ca⁺⁺), ou le (Mg⁺⁺), il est beaucoup probable que ce soit le Ca⁺⁺, car le Mg⁺⁺ est très solubles, sauf si l'eau est thermique. (Amroune, 2008).

Les teneurs des bicarbonates oscillent entre 149mg/l et 332mg/l avec une moyenne de l'ordre de 227mg/l. la carte de distribution des teneurs en bicarbonate montre que les fortes valeurs sont localisées dans la partie Nord du bassin le long de la bordure méridionale de la chaîne Atlasique (calcaires à silex de l'Yprésien, calcaires noduleux de l'Albien inférieur). Ces fortes valeurs commencent à diminuer d'une façon parallèle vers la partie Sud du bassin. La répartition des teneurs en bicarbonates semble n'est pas en corrélation avec les autres éléments.

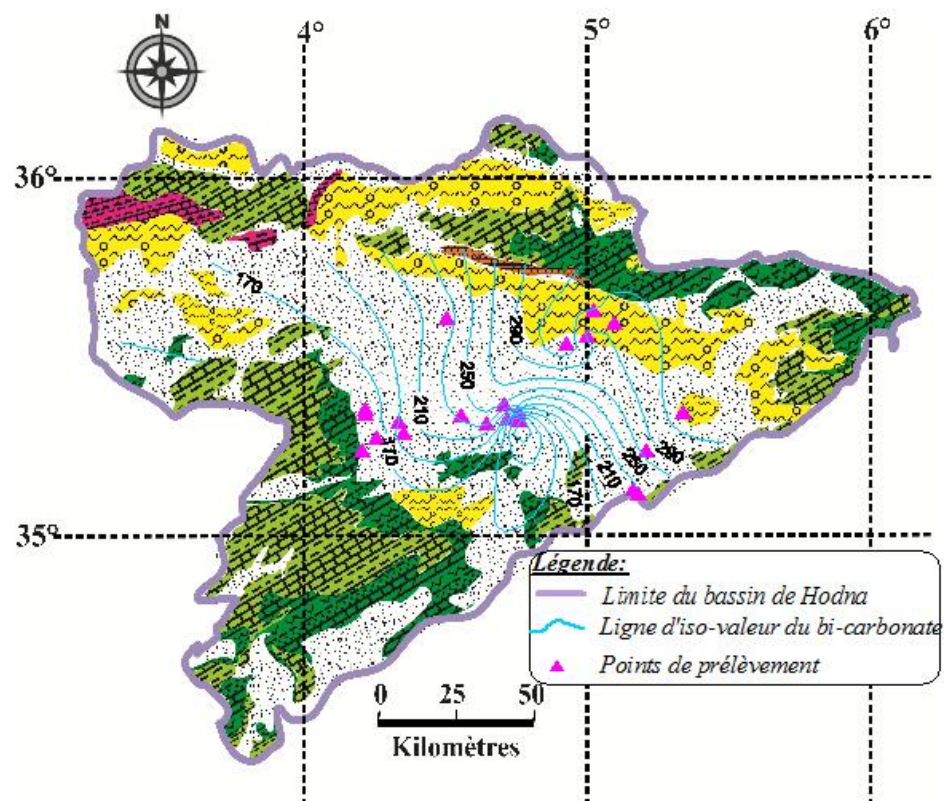


Figure 51: Carte d'iso-teneur du bicarbonate en mg/l de la nappe du Hodna

- **Les nitrates :**

L'analyse des nitrates dans les eaux permet d'obtenir des informations sur la présence de matières organiques dans le sol. Si des analyses d'autres composés azotés sont réalisés (NH_4^+ , NO_2 , azote total...), il devient possible d'estimer la manière dont la matière organique est dégradée. Tels que rapportés par différents auteurs (Nkotagu, 1996 ; Njitchoua et al, 1996 ; Girard et Hillaire-Marcel., 1996; Walvoord et al, 2003 ; Stadler et al, 2008), la présence de nitrates, en concentration élevée, dans des aquifères sous climat aride, serait due à une pollution anthropique. (Hamit, 2012)

L'analyse de la carte des teneurs en nitrates (Figure 52) révèle que la distribution spatiale des teneurs est presque homogène dont on enregistre des valeurs répondant à la norme OMS (<50mg/l) sur tous le bassin à l'exception de trois ponts situées dans les zones méridionales des Monts du Hodna, les zones septentrionales des Monts de Boussâada et la zone Sud-est de la limite immédiat du Chott Hodna qui sont les plus affectés par les nitrates avec des teneurs dépassant le seuil de potabilité fixé par la norme OMS.

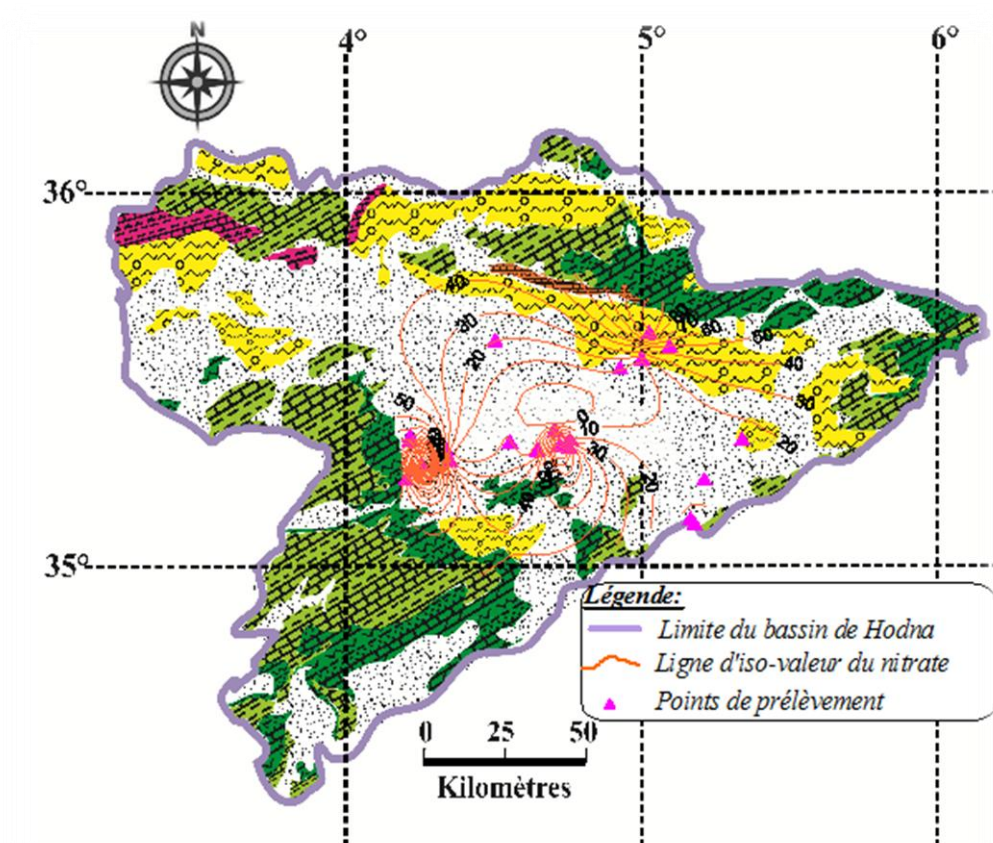


Figure 52: Carte d'iso-teneur du nitrate en mg/l de la nappe du Hodna

3.1.2. Etude des rapports caractéristiques :

On détermine ici l'origine géologique des éléments chimiques à partir de la bonne corrélation qui existe entre eux. Il s'agit d'illustrer la relation qui existe entre deux ions ou groupes d'ions afin de comprendre les réactions chimiques ayant lieu au sein de l'aquifère.

3.1.2.1. Le rapport (Na^+/K^+) :

L'analyse de ce rapport révèle que les eaux souterraines de la cuvette du Hodna ont une prédominance totale du sodium.

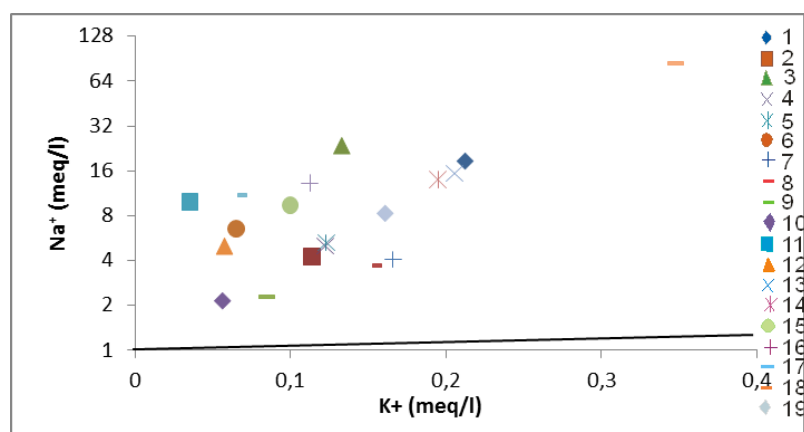


Figure 53 : La relation Sodium-potassium dans les eaux

3.1.2.2. Les rapports (Na^+/Cl^-) et ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$) :

- Figure (54, a) : Le nuage de points est presque s'aligné dont la forte corrélation entre les deux éléments (Na^+ et Cl^-) met en évidence leur origine chlorurée sodique (halite). Cependant ; les points s'éloignant de la droite de corrélation peuvent être avoir comme origine la dissolution des minéraux silicatés ou échange de base.
- Figure (54, b) : Le nuage de points s'aligne presque, ce qui indique une origine commune des deux éléments, liée à la dissolution des niveaux gypseux contenu dans l'aquifère.

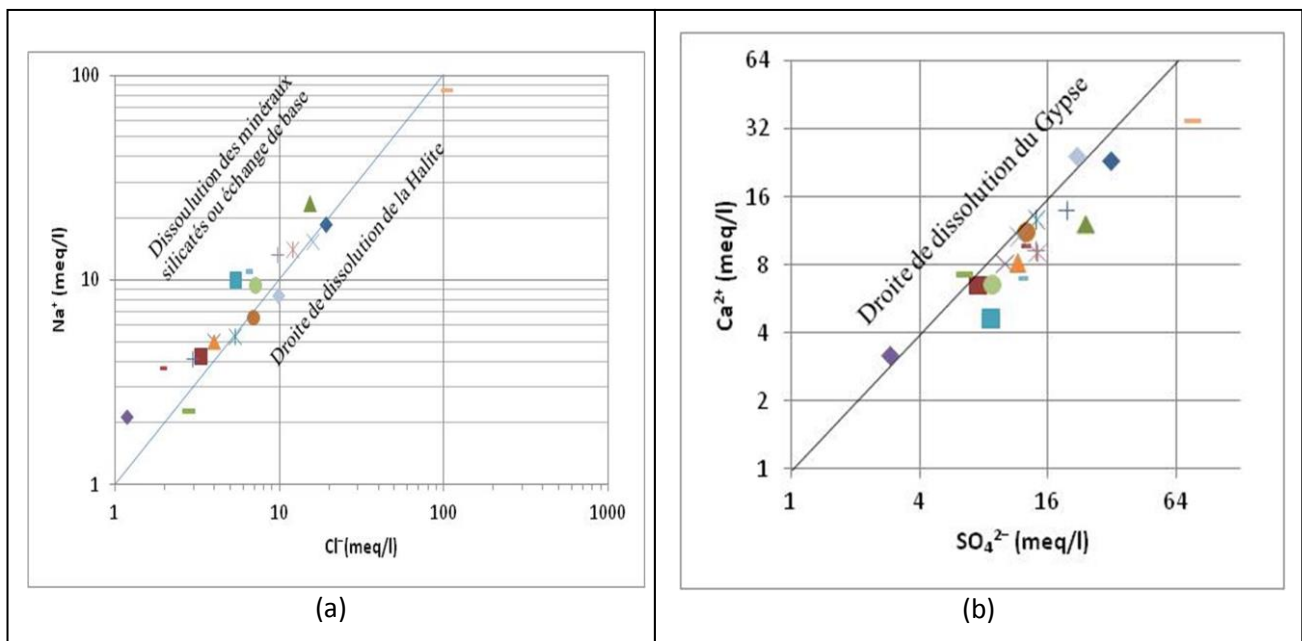


Figure 54: distribution des échantillons par rapport à la droite de mise en solution de l'halite (a) et à la droite de mise en solution du Gypse (b)

Cette distribution traduit, d'une part, un déficit en calcium qui pourrait être attribué à une précipitation de calcite et/ou à un échange de base (Ca/Na) sur les minéraux argileux et d'autre part, un relatif excès de sodium.

3.1.2.3. Le rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$) :

Le nuage de points représente deux séries s'alignant en parallèle dont l'axe de corrélation passe entre ces deux séries (figure 55). Cela montre qu'il y a deux origines possibles de ces deux éléments :

- les points situés au-dessous de la droite de pente 1 caractérisent les eaux présentant un excès en Ca^{2+} accompagné d'un déficit en Na^+ , ce qui montre que le calcium provient de la dissolution du gypse et de la calcite ;

- les points situés au-dessus de la droite de pente 1 caractérisent les eaux présentant un excès en Na^+ accompagné d'un déficit en Ca^{2+} , ce qui montre que le calcium provient de la dissolution des minéraux carbonatés constituant l'essentiel des formations aquifères.

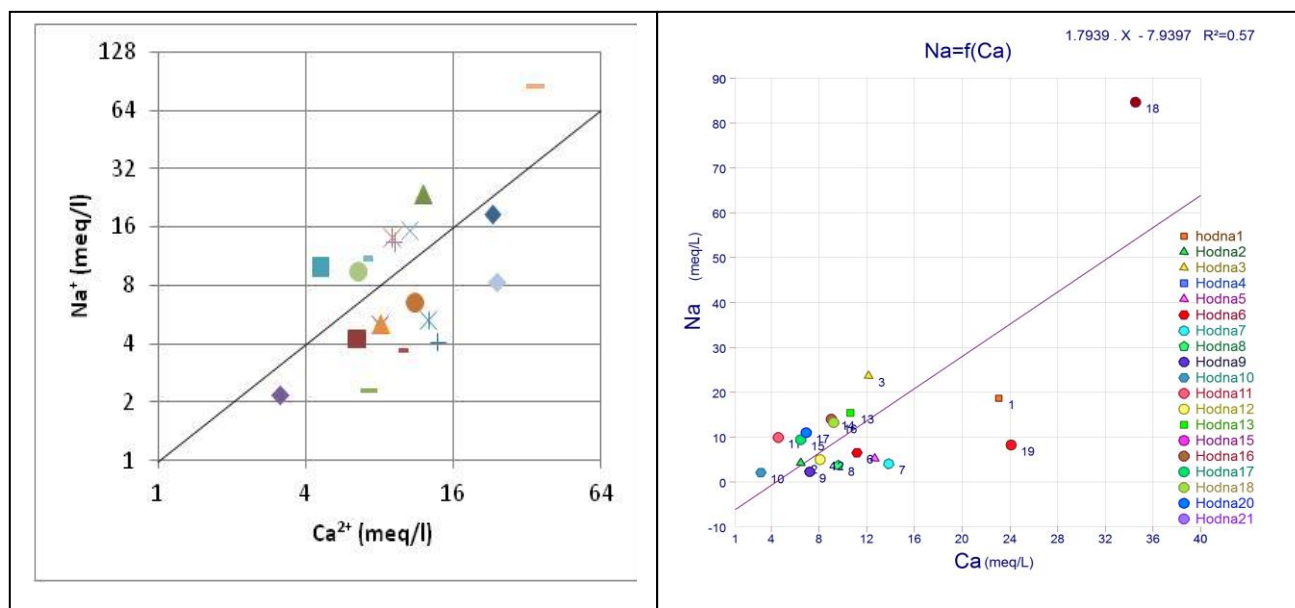


Figure 55: La relation Sodium-calcium dans les eaux

3.1.2.4. Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$) :

L'évolution des sulfates est plus rapide par rapport au sodium, mais l'alignement du nuage de points (figure 56), fait nettement apparaître des origines autres que le gypse aux sulfates (sels sulfatés sodiques).

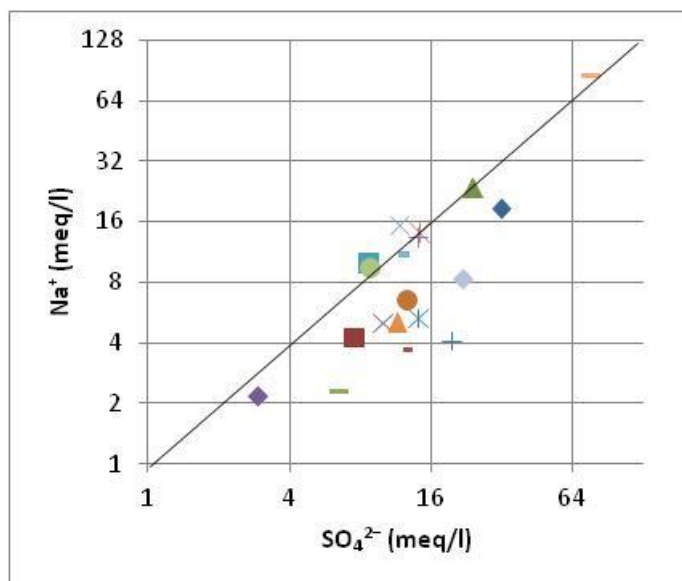


Figure 56 : La relation Sulfates-sodium dans les eaux

3.1.2.5. Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$) :

L'alignement des différents points (figure 57), montre qu'il s'agit d'une évolution parallèle des deux éléments, et suggère une origine sulfatée magnésienne.

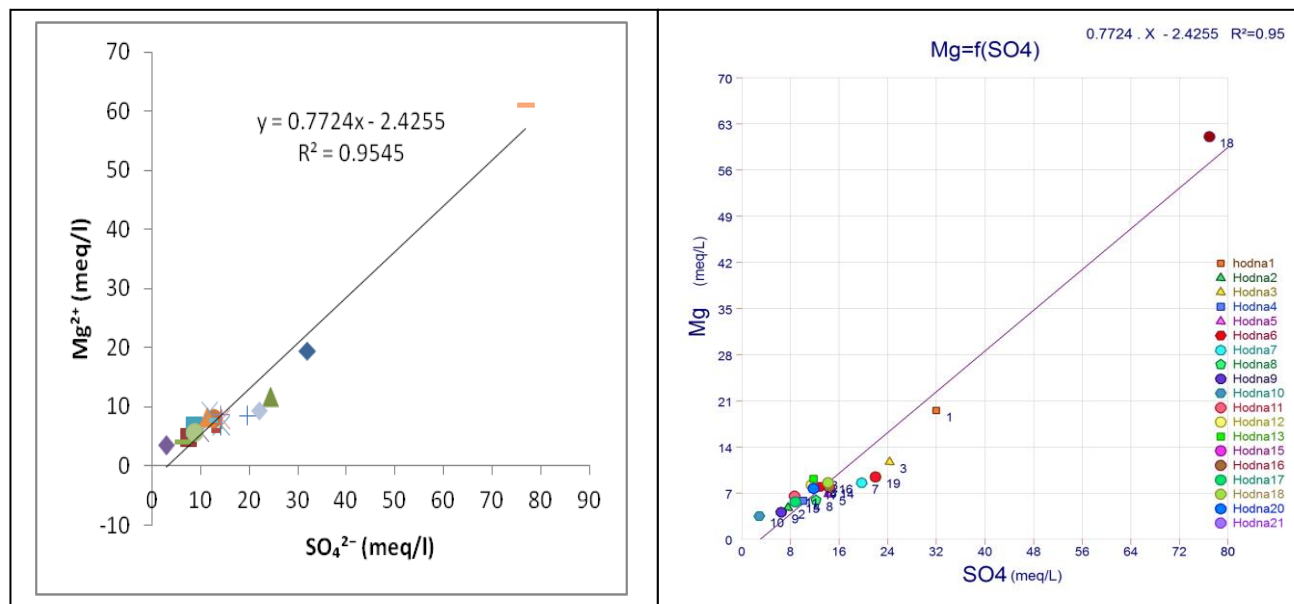


Figure 57 : La relation Sulfates-magnésium dans les eaux

3.1.2.6. Le rapport ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) :

La relation entre ces deux ions est illustrée par la Figure 58, où des droites de ratio Mg/Ca ont été placées comme référentiel. Les prélèvements issus d'une dissolution congruente du calcaire et de la dolomie se répartissent dans les valeurs basses du graphique entre les domaines purement dolomitiques et purement calciques. Les points, qui au contraire ont une source de magnésium autre (Fournillon, 2012).

L'analyse de la figure 58 révèle qu'il y a une tendance des deux ions de s'aligner. La dispersion du nuage des points se rapproche le plus souvent au domaine purement dolomitique.

Nous constatons qu'il y a une tendance des deux ions de s'aligner, rappelant l'origine carbonatée (calcaire); relativement le plus souvent à la dissolution du calcaire au contraire à certains échantillons (10, 11, 17 et 18) prévenant à la dissolution de la dolomite.

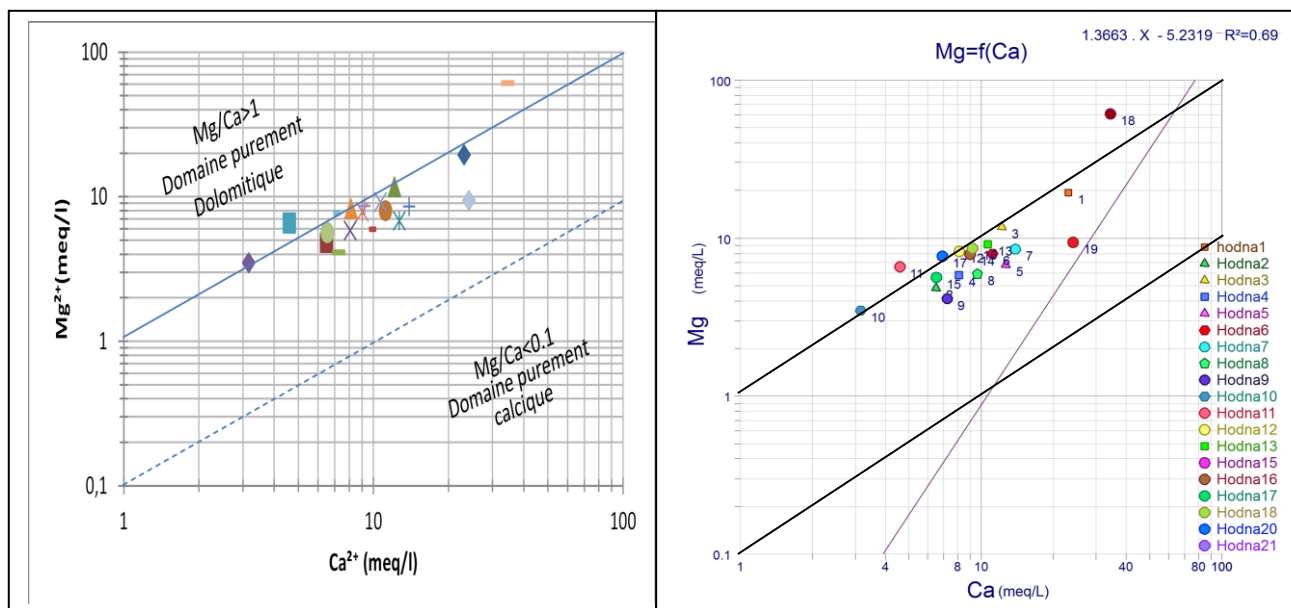


Figure 58 : La relation Calcium-Magnésium dans les eaux

3.1.2.7. Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$) :

L'alignement des différents points (figure 59), montre qu'il s'agit d'une évolution parallèle de ces éléments, et fait suggérer une origine sulfatée – magnésienne et calcaïque.

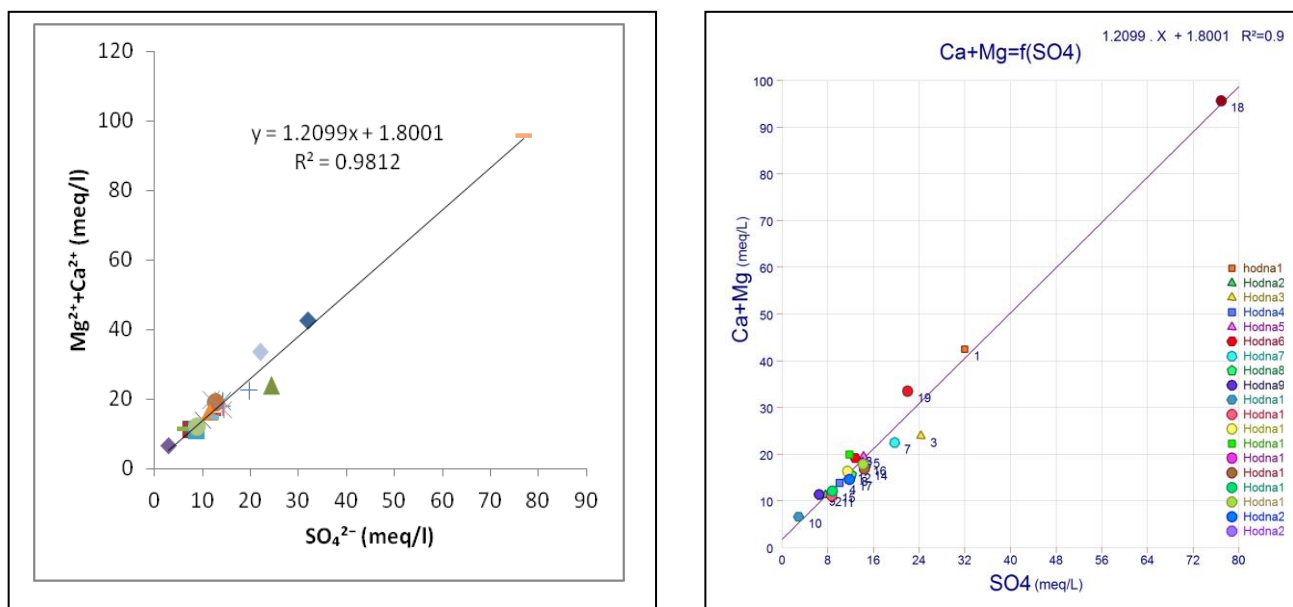


Figure 59 : La relation Calcium et magnésium-sulfate dans les eaux

3.1.2.8. Le rapport ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$)/ ($\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$) :

La combinaison de ces éléments (SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+) dans un même graphe permet d'extraire l'origine d'acquisition chimique des eaux.

L'analyse de la figure 60 révèle qu'il y a deux principales origines chimiques des eaux dont une origine chlorurée sulfatée sodique concerne une partie des échantillons par contre l'autre partie a

une origine sulfatée. Cette dernière partie des échantillons concerne les eaux venant de la partie Est du Chott, elles sont influencées par la remontée du Trias gypseux sous l'effet de l'anticlinal du Chott El hammam.

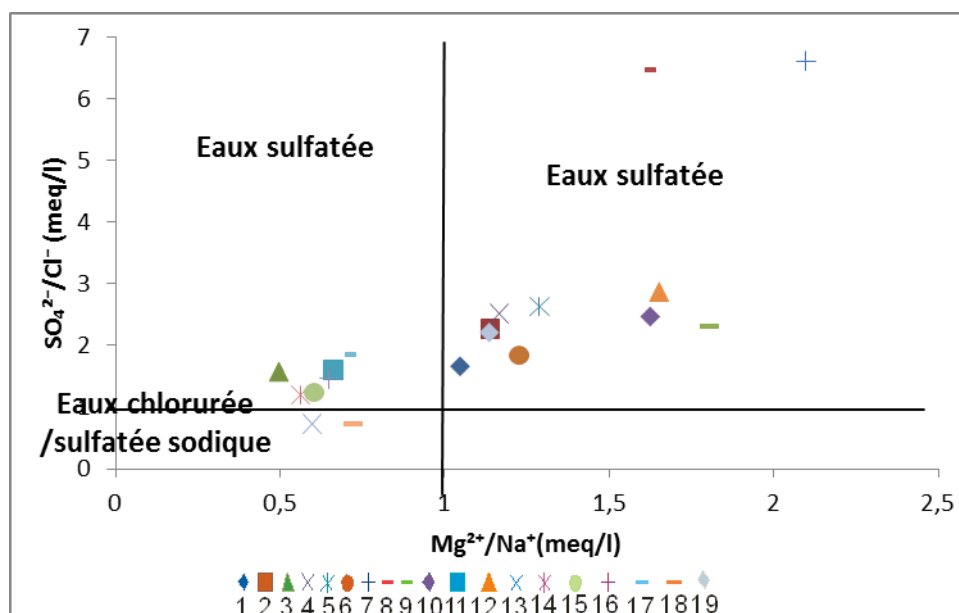


Figure 60 : Relation entre les paramètres dominants $(SO_4^{2-}/Cl^-) / (Mg^{2+}/Na^+)$

3.1.2.9. Le rapport $(Na^+/Cl^-) / (Ca^{2+} / (HCO_3^- + SO_4^{2-}))$:

Pour permettre de suivre le chimisme des eaux de l'aquifère de la zone d'étude et de définir le sens d'échange ionique entre l'eau et les terrains encaissants, l'indice d'échange de base (i.e.b) est utilisé. L'expression de cet indice est la suivante :

$$i. e. b = r \frac{Cl^- - (K^+ + Na^+)}{Cl^-}$$

Ce rapport est positif quand la teneur en sodium et en potassium est faible. En d'autres termes quand l'eau a été faiblement en contact avec des minéraux capables de céder facilement ces cations interchangeables. Ces échanges d'ions contenus dans la matrice avec ceux présents dans la solution sont très variables et dépendent, entre autres, de la nature du substrat. Ce rapport est négatif quand la teneur en sodium et en potassium est élevée, c'est-à-dire que l'eau a été fortement en contact avec des minéraux capables de céder facilement ces cations interchangeables. Ce phénomène d'échange de base est le plus généralement connu avec les argiles de type alumino-silicatés formées de couches ou de feuillets dont, la cohésion est assurée par l'existence de cations et d'eau inter foliaire. En effet, la surface des feuillets est chargée négativement, favorisant ainsi la possibilité d'échange des cations avec ceux de la solution du sol (Hamit, 2012).

Selon l'interprétation du (Debieche, 2002) de ce rapport : La projection des différents points sur le diagramme $(\text{Na}^+/\text{Cl}^-) / (\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}))$ (figure 61) montre que 85 % des points d'eau subissent un échange de base, 10 % des points présentent l'état naturel et 5 % un déficit en Ca^{2+} par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} dû sûrement aux formations gypseuses qui fournissent plus d'ions Ca^{2+} qui est peut-être par la suite consommé sous l'effet de la précipitation chimique ou l'effet de la fixation du calcium par les argiles (l'influence de la remonté du substratum marneux au niveau de l'anticlinal du Chott El hammam).

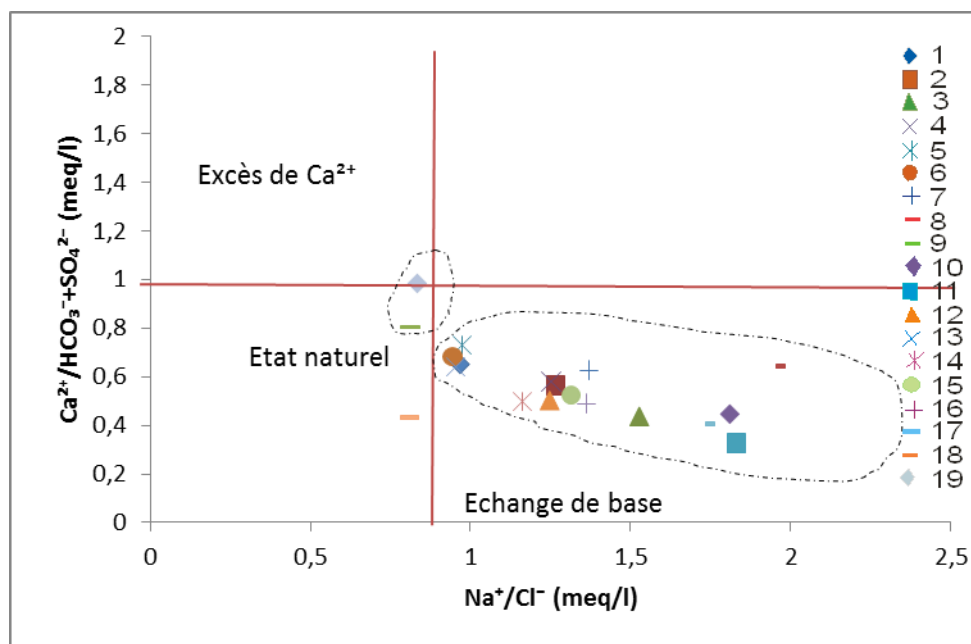


Figure 61 : Relation entre les paramètres $(\text{Na}^+/\text{Cl}^-) / (\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}))$ Échange de base

3.1.2.10. Le rapport $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) / \text{Ca}^{2+}$:

La projection des différents points sur le diagramme $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) / \text{Ca}^{2+}$ permet de comprendre l'origine du calcium dans les eaux (d'où il provient ? des bicarbonates ou des sulfates), ces deux paramètres indiquent principalement deux origines (les carbonates et le gypse).

L'analyse de la (figure 62, A) montre que l'ensemble des points qui se positionnent sur la droite de la pente 1 indique l'origine carbonatée des ions du calcium dont l'excès de ces derniers est interprété comme le résultat de la mise en solution du gypse.

Pour mettre en valeur les résultats trouvés, on recourt à la projection des différents points sur le diagramme $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) / \text{Ca}^{2+}$ (figure 62, B). Cette figure montre que l'ion de calcium de 85 % des eaux du Hodna provient de la dissolution des formations carbonatées alors que le reste (15%) a une origine évaporitique (dissolution du gypse).

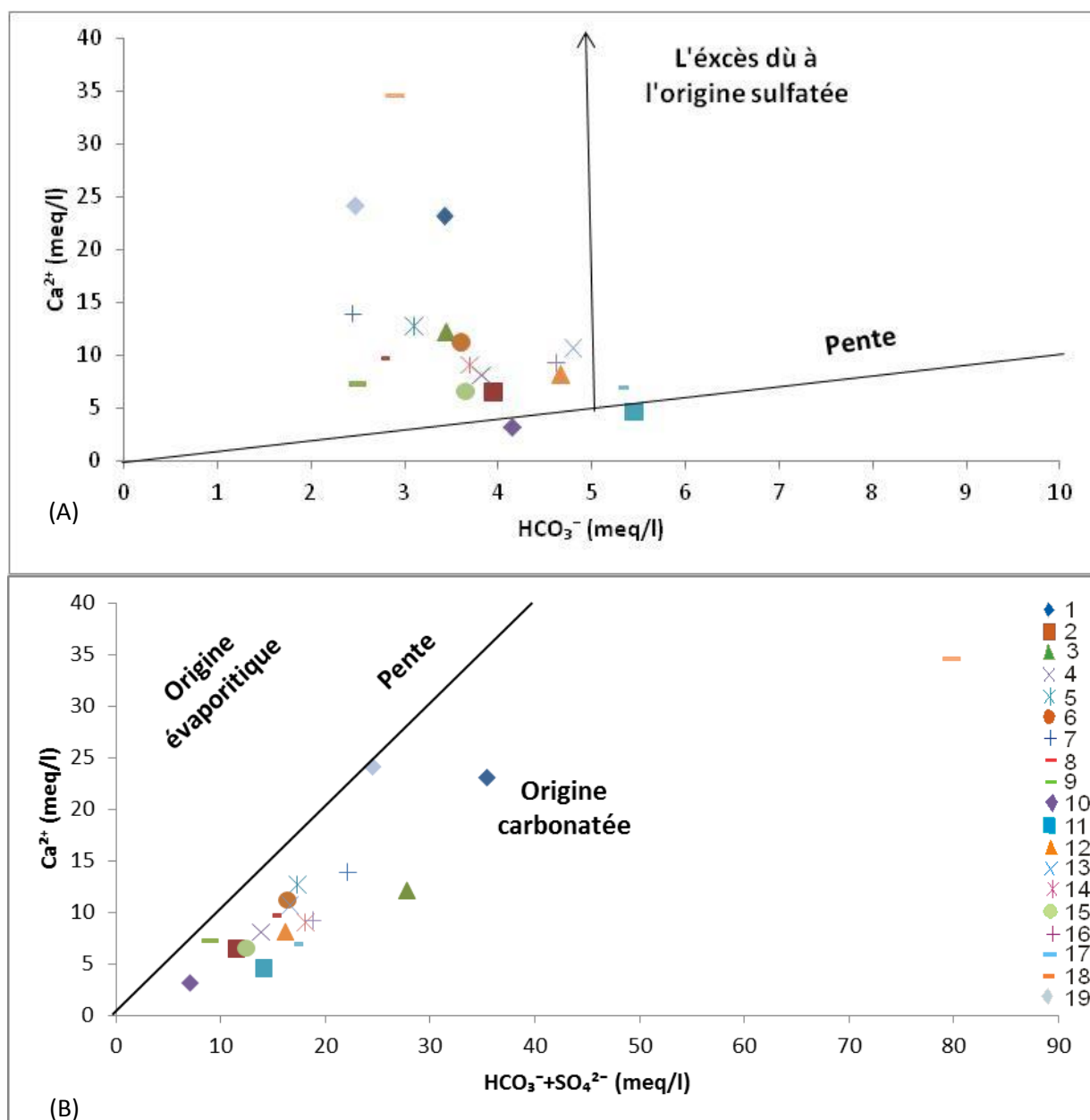


Figure 62 : Relation entre les paramètres ($\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$) Origine du calcium

3.1.2.11. Les rapports ($\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), ($\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$) et ($\text{HCO}_3^- / \text{Mg}^{2+}$) :

L'établissement de ce genre de graphe comprenant les éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^-) (Figure 63) permet de détecter l'origine des éléments carbonatés dans les eaux et de suivre son évolution d'une façon corrélable ou incorrélable. Il s'agit de bien savoir le lien entre ces éléments (graphe « A ». ce dernier montre bien l'influence principale des formations carbonatées sur le chimisme des eaux du Hodna dont on note plus de 95% des échantillons ayant des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} provenant de la dissolution des formations carbonatées alors que les 5% proviennent de la dissolution des formations sulfatées.

Le graphe « b » a été interprété précédemment.

Le graphe « c » réalisé montre le magnésium dans les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du Hodna a une origine principalement carbonatée à l'exception de quelque à côté du Chott (remontée du trias gypseux) qui a une origine issue des formations gypsifères.

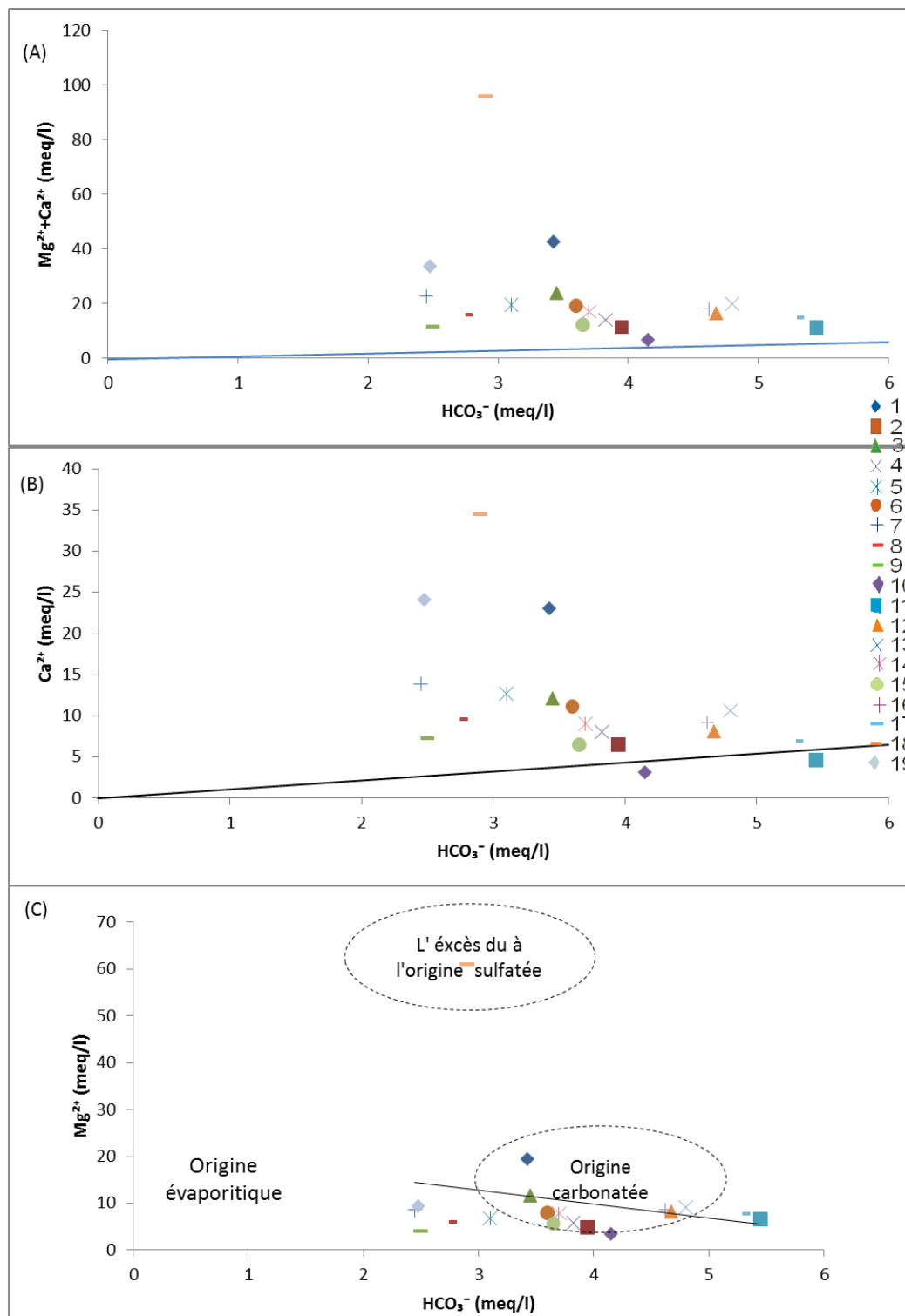


Figure 63 : Relation entre les paramètres (Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^-)

3.1.2.12. $(\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-})$ – conductivité électrique :

Ce rapport nous permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la dissolution des ions évaporitiques (Na^+ marqueur de l'halite et SO_4^{2-} marqueur du gypse) en fonction de la conductivité (Debieche, 2002). Ces deux ions (Cl^- , SO_4^{2-}) sont issus de deux formations différentes, le SO_4^{2-} provient du gypse et le Cl^- provient de la dissolution de l'halite et probablement d'une pollution anthropique.

L'augmentation de la conductivité du point 18 est liée seulement à la quantité des ions dissous dans l'eau.

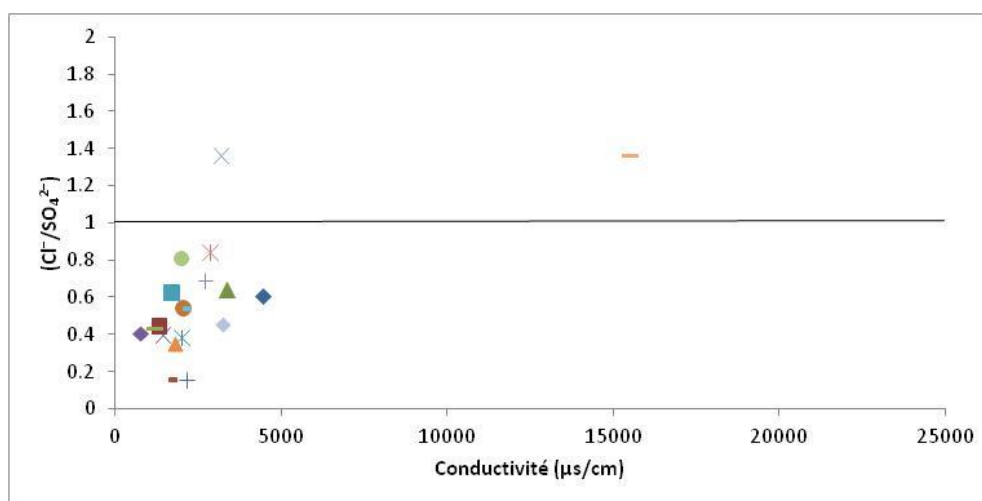


Figure 64: Variations des chlorures et des sulfates en fonction de la conductivité

3.1.2.13. Etude du strontium (Sr):

Le strontium (Sr^{2+}) est un élément de trace lié aux évaporites. Il forme ainsi un bon marqueur de leur présence (Carre, 1975 *in* Brins et al, 2011). Le strontium permet de distinguer les sulfates provenant de l'oxydation des sulfures (teneurs faibles) de ceux issus de la dissolution des évaporites (teneurs élevées). (Aigoun, 2000 et Abdesslem et al, 2000 *in* Brins et al, 2011).

Le rapport ionique (en concentration molaire) $\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ est caractéristique d'une origine évaporitique s'il est égal ou supérieur à 1 ‰ (Bakalowicz, 1988 *in* Brins et al, 2011). Il est supérieur à 5 ‰ dans les évaporites du Trias alpin (Meybeck, 1984 *in* Brins et al, 2011). Nous remarquons que les valeurs du rapport dans les eaux étudiées sont très élevées et dépassent dans tous les cas 5‰. Ceci confirme l'origine évaporitique de ces eaux. Ce rapport atteint un maximum de 21 ‰ au périphérique de la ville de Batna, puis commence à diminuer progressivement vers le long du cadre montagneux des Monts Hodna, Belezma et Boussâada jusqu'à atteindre son minimum de l'ordre de 5,6 ‰ au périphérique des Monts de Boussâada. Les valeurs moyennes entre 8 et 15‰ sont enregistrées autour du Chott Hodna.

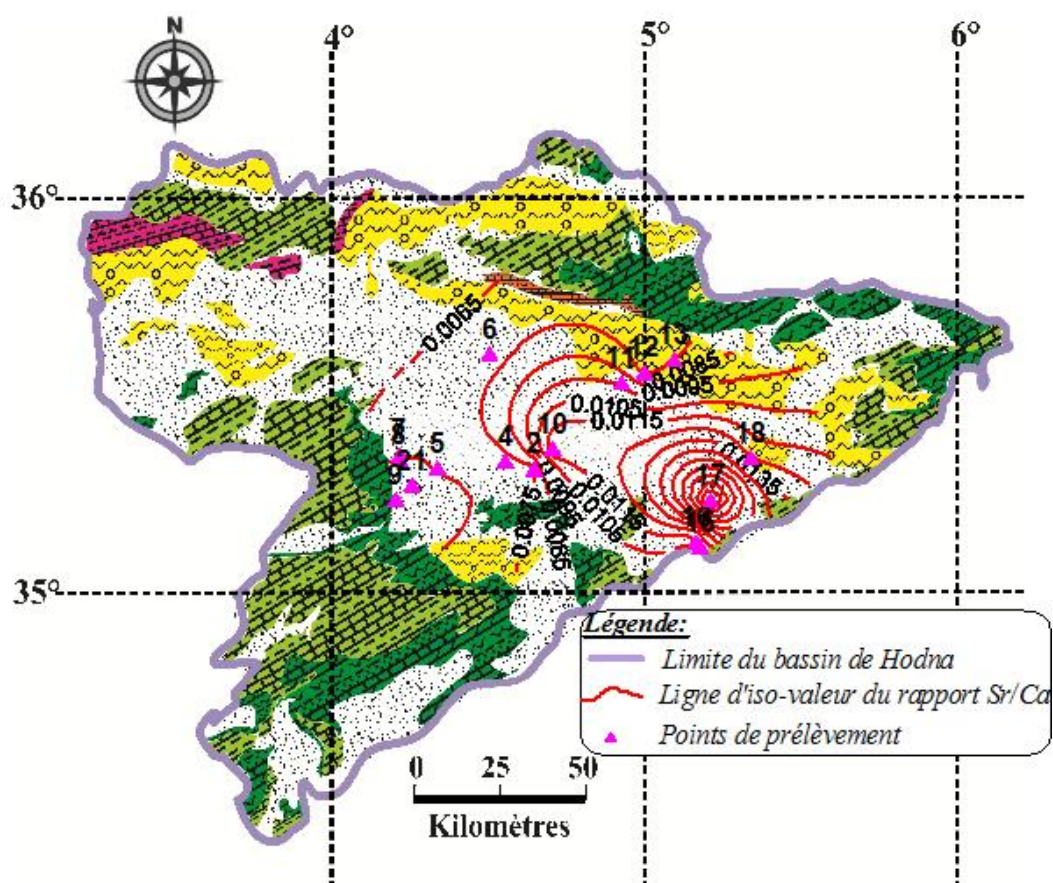


Figure 65 : Répartition spatiale du rapport Sr/Ca dans les eaux de la Cuvette de Hodna

3.1.3. Classification hydrochimique des eaux :

3.1.3.1. Le diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper paraît plus approprié pour une lecture rapide du faciès chimique des eaux. Il permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations sur le triangle de gauche, anions sur le triangle de droite). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique. A ces deux triangles est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès chimique de l'eau concernée. Il ne fournit pas d'indication sur la concentration absolue des composantes, contrairement au diagramme de Schoeller, d'où une certaine complémentarité des deux représentations (Lamini, 2012).

Le diagramme de Piper permet par son utilisation pour la classification des eaux en quatre grandes familles géochimiques (faciès bicarbonaté-calcique, faciès bicarbonaté-sodique et potassique, faciès chloruré et sulfaté-calcique et magnésienne, faciès chloruré-sodique ou sulfaté-sodique). Il permet également de déterminer les liaisons possibles entre chaque famille et extraire l'origine de la minéralisation de ces eaux.

La projection des résultats des analyses des eaux du bassin de Hodna sur le diagramme de Piper (figure 67) révèle une presque homogénéité de faciès chimique des eaux. Ce sont des eaux essentiellement Chlorurées et sulfatées-calciques et magnésiennes. Cette homogénéité dans la distribution spatiale des faciès chimiques de la zone d'étude peut être expliquée par le phénomène d'échange de bases entre l'eau et les argiles (échange de sodium et potassium des argiles contre calcium et magnésium des eaux) et l'importance du mécanisme de dilution des eaux au cours de son trajet vers le Chott. Ceci est en liaison directe avec la présence des formations gypseuses et des formations carbonatées notamment les calcaires et les dolomies de la région.

Le climat aride peut également influencer la composition chimique par effet de concentration lors de l'évaporation.

3.1.3.2.Comportement des eaux dans le triangle des cations :

Dans ce triangle ; les eaux du bassin de Hodna se regroupent essentiellement en deux grandes familles, que nous désignons par A et B, ces familles se distinguent par l'ordre d'abondance des cations et par leur rapports caractéristiques, ainsi :

- Les eaux de la famille A sont calcique avec des concentrations relatives élevées en calcium dépassant le 70% de la charge cationique totale.
- Les eaux de la famille B sont magnésiennes avec des concentrations relatives élevées en calcium dépassant le 30% de la charge cationique totale.

3.1.3.3.Comportement des eaux dans le triangle des anions :

Dans ce triangle, les eaux du bassin de Hodna se regroupent essentiellement en une seule famille. Cette famille se distingue par l'ordre d'abondance des anions et par leur rapport caractéristique dont ces eaux sont sulfatées chlorurées avec des concentrations relatives élevées en chlorure dépassant le 70% de la charge cationique totale.

L'examen des teneurs en éléments majeurs montre que la minéralisation est régie par le calcium et le magnésium pour les cations et par les sulfates pour les anions.

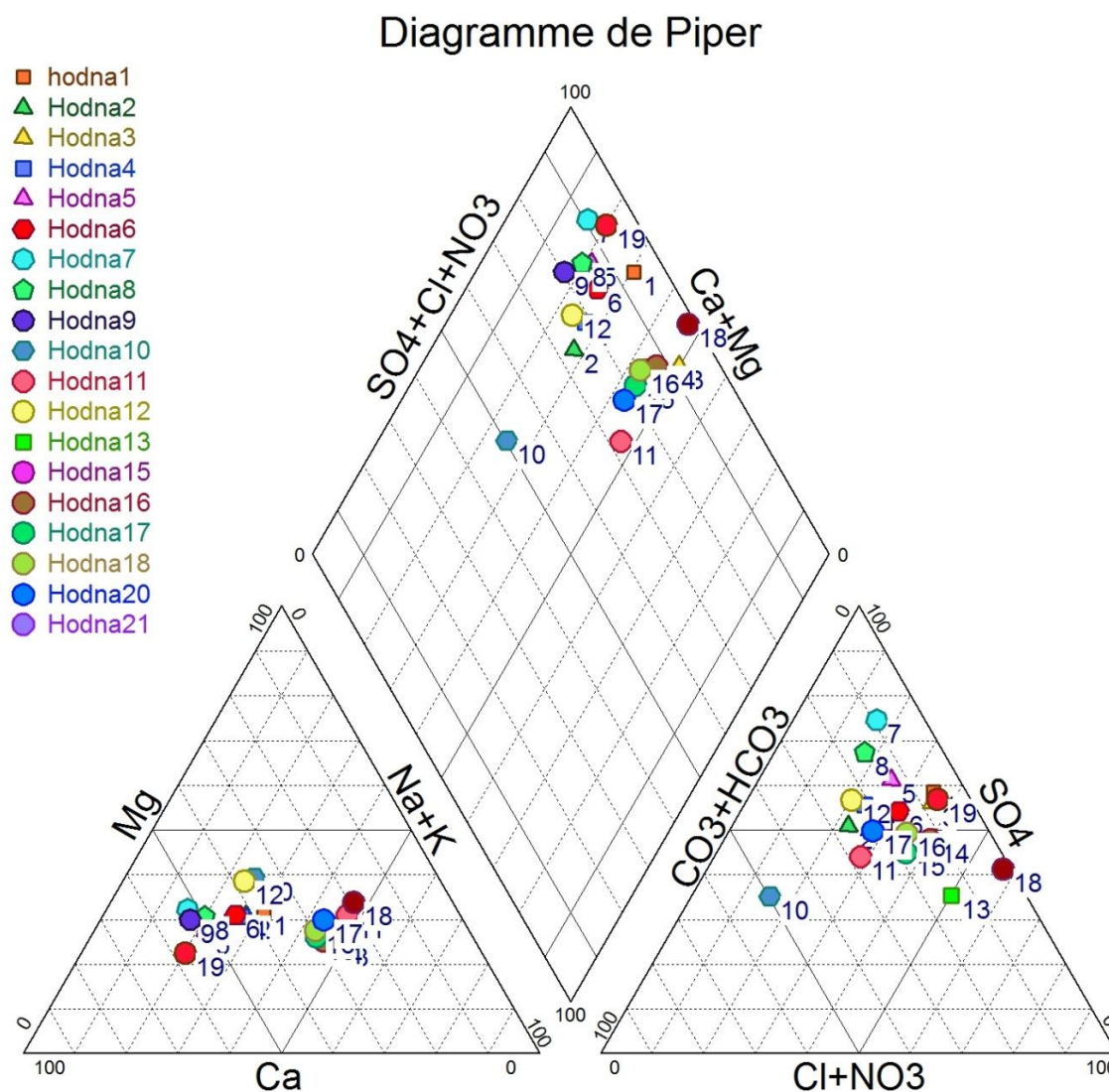


Figure 66: Représentation en diagramme de Piper des eaux analysées.

3.2. Résultats de l'étude statistique multi-variée :

L'approche statistique qui a été utilisée pour étudier les phénomènes de l'origine de la minéralisation des eaux est basée sur l'Analyse en Composantes Principales et L'Analyse de Classification Hiérarchique. Son application dans l'étude hydrochimique des eaux a été effectuée par plusieurs auteurs en Afrique et dans le monde avec des résultats très significatifs.

L'analyse statistique a été réalisée à partir de 19 descripteurs et 12 variables qui sont : pH, $c_{25^{\circ}\text{C}}$, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , NO_3^{-} et SiO_2 . L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA 6.0 et XLSTAT 4.3. Elle est pour objective de décrire et de classer les données pour permettre l'interprétation du fonctionnement hydrochimique de l'aquifère.

3.2.1. Statistique descriptive :

Il s'agit d'ordonner dans un tableau les résultats d'analyses descriptives des données hydrochimiques d'une façon à comprendre globalement la distribution quantitative des paramètres physicochimiques au niveau de la cuvette du Hodna.

Tableau 16: Statistique descriptive des résultats physico-chimiques de la nappe du Moi-Plio-Quaternaire du bassin de Hodna.

	Min (m)	Moy (μ)	Max (M)	Ecart-T (α)	Variance	CV (α/μ)	Normes OMS
pH	7.058	7.283	7.510	0.113	0.013	0.015	6,5≤pH≤8,5
c25°C	786.000	2925.421	15500.000	3175.090	10081196.600	1.085	≤400
TDS	617.000	2220.684	11131.000	2274.015	5171145.560	1.024	-
Ca++	63.400	233.495	691.900	154.868	23984.051	0.663	100
Mg++	42.420	129.876	742.300	154.077	23739.733	1.186	50
Na+	49.400	298.005	1946.000	421.038	177273.354	1.413	150
K+	1.380	5.167	13.600	2.890	8.354	0.559	12
Cl-	42.100	444.885	3704.000	809.840	655840.570	1.820	200
SO4--	140.900	815.326	3694.000	770.201	593209.703	0.945	250
HCO3-	149.400	227.221	332.400	56.535	3196.185	0.249	-
NO3-	1.020	43.771	265.200	64.099	4108.695	1.464	50
SiO2	11.700	14.042	18.200	1.682	2.830	0.120	

N.B. À partir de la ligne 4, les concentrations sont en mg/L.

3.2.2. Analyse en composante principale :

L'ACP est une méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est constituée, en lignes par des «individus» (forages, sources) sur lesquels sont mesurées des «variables quantitatives» (les éléments majeurs et les éléments traces) disposées en colonnes. Elle permet de réduire le nombre de variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes factoriels ou facteurs (CLOUTIER et al. 2008 ; YIDANA et al. 2008 in HAMZAOUI AZAZA et al, (2012).

3.2.2.1. Matrice de proximité (Coefficient de corrélation de Pearson) :

Le coefficient de corrélation mesure la liaison (linéaire) entre deux variables X_j et X_m dont la

relation est la suivante : $r_{jm} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_j)(x_{im} - x_m)}{S_m * S_j}$

Les résultats issus à partir du maintien des éléments corrélés deux à deux avec un coefficient de corrélation (r) significatif sont ordonnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 17: Matrice de corrélation entre les variables

	pH	c25°C	TDS	Ca++	Mg++	Na+	K+	Cl-	SO4--	HCO3-	NO3-	SiO2
pH	1	-0.309	-0.340	-0.612	-0.306	-0.227	-0.583	-0.234	-0.447	0.407	-0.339	-0.373
c25°C		1	0.998	0.840	0.993	0.984	0.818	0.994	0.975	-0.228	0.407	0.639
TDS			1	0.860	0.993	0.981	0.817	0.988	0.985	-0.246	0.421	0.633
Ca++				1	0.833	0.757	0.824	0.788	0.908	-0.504	0.670	0.530
Mg++					1	0.975	0.787	0.988	0.977	-0.221	0.363	0.633
Na+						1	0.768	0.989	0.945	-0.128	0.304	0.631
K+							1	0.788	0.830	-0.443	0.455	0.710
Cl-								1	0.950	-0.189	0.357	0.634
SO4--									1	-0.336	0.448	0.644
HCO3-										1	-0.559	-0.336
NO3-											1	0.033
SiO2												1

Il ressort de l'analyse de ce tableau que :

- Les éléments (conductivité électrique, TDS, calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures et sulfates) sont parfaitement corrélés entre eux. Par contre, elle présente une corrélation négative au bicarbonate. Ce qui confirme la même origine de ces éléments liée la nature du réservoir et aux phénomènes d'échange de base.
- Les bicarbonates présentent une corrélation négative avec tous les éléments à l'exception du pH. « Concernant les cations ; Ceci peut être due à une dissolution incongruente des minéraux silicatés comme pour les aquifères de fracture, n'est pas le seul processus conduisant à la mise en solution de ces cations. D'autres sources (atmosphérique et anthropique) et d'autres processus interviennent dans la minéralisation de ces eaux comme le montrent les différentes corrélations observées » (AKA et al, (2013).
- Les nitrates présentent une très faible corrélation avec tous les éléments. Ce qui confirme l'origine individuelle sous l'effet de l'activité anthropique liée à l'agriculture qui ne peut pas avoir une influence notoire dans le bassin du Hodna.
- Le pH présente également une faible corrélation négative avec tous les éléments. Cette faible corrélation avec la conductivité électrique et le Cl⁻ semble être liée à une hausse de la minéralisation totale (conductivités) et à des apports en ions NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺ suivis d'une baisse des concentrations en HCO₃⁻.
- Les chlorures, le calcium, le magnésium et le sodium participent de manière importante à la minéralisation totale des eaux.

3.2.2.2. Valeurs propres :

Il s'agit de construire la première composante F1 qui permet de maximiser le carré de sa corrélation avec les variables de la base de données : $\lambda_1 = \sum_{j=1}^p r_j^2(F_1)$

Dont : Inertie totale = Somme des variances des variable $I_p = P$

Lorsque les données sont réduites (ACP normée), Inertie totale = Trace(R) = p

→ Part d'inertie expliquée par $F_1 = \frac{\lambda_1}{p}$

De nouveau, on observe la décomposition de l'information en composantes non corrélées (orthogonales) $\sum_{K=1}^P \lambda_K = P$

Les résultats sont ordonnés dans le tableau ci-dessous

Tableau 18: Pourcentage de variance exprimée

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur propre	8.244	1.304	0.423	0.135	0.027	0.008
Variabilité (%)	68.704	10.866	3.526	1.127	0.228	0.065
% cumulé	68.704	79.570	83.095	84.222	84.451	84.515

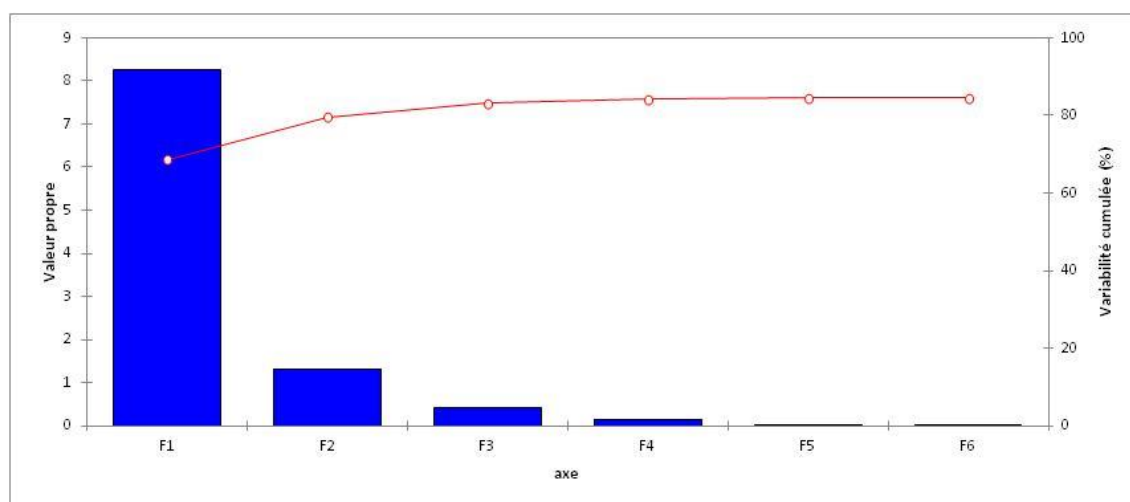


Figure 67: Pourcentage de variance exprimée

Il ressort à l'analyse de la figure ci-dessus qu'il y a deux axes à retenir pour l'interprétation des résultats puisqu'ils détiennent 79,57 % de la variance totale dont le premier axe (F1) exprime 68,04% et le deuxième, 11,53% de la variance totale. Donc ; il est très souhaitable de prendre en considération cette distribution spatiale des individus comme étant une valeur significative pour expliquer la variance du système.

Dans l'espace des variables, l'axe F1 apparaît comme un facteur de minéralisation (figure 68). Il est défini par la conductivité, le TDS et les teneurs en Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , k^+ , SiO_2 et SO_4^{2-} .

Ces différents éléments présentent des coefficients de corrélation élevés entre eux. En revanche, l'axe F2 est représenté par les bicarbonates, les nitrates et le pH, il représente l'hydrolyse acide des roches.

3.2.2.3. Vecteurs propres :

L'ACP revient à effectuer une rotation du système d'axes initial puisque les vecteurs propres sont orthogonaux entre eux et constituent donc un nouveau repère de coordonnées. Les cosinus entre les nouveaux axes et les anciens sont les composantes des vecteurs propres. Le 1er vecteur propre est le vecteur qui explique le mieux, simultanément toutes les variables de la matrice X. Ce vecteur minimise la somme des carrés entre les projections sur le vecteur et la position des points dans l'espace original. Le deuxième vecteur propre est celui qui explique le mieux, simultanément, l'ensemble des résidus obtenus, et ainsi de suite...

Tableau 19: l'ensemble des vecteurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
pH	-0.153	0.410	-0.349	0.453	-0.049	0.033
c25°C	0.342	0.167	-0.100	0.066	0.229	-0.439
TDS	0.343	0.139	-0.108	-0.046	-0.023	0.061
Ca ⁺⁺	0.320	-0.310	-0.211	-0.454	0.076	-0.049
Mg ⁺⁺	0.338	0.186	-0.072	-0.012	-0.515	-0.263
Na ⁺	0.328	0.291	-0.041	0.062	0.340	0.725
K ⁺	0.306	-0.180	0.381	0.042	0.402	-0.103
Cl ⁻	0.334	0.237	-0.101	0.275	0.148	-0.289
SO4 ⁻⁻	0.345	0.024	-0.022	-0.186	-0.538	0.307
HCO ₃ ⁻	-0.128	0.552	-0.024	-0.636	0.223	-0.130
NO ₃ ⁻	0.162	-0.418	-0.549	0.127	0.158	0.027
SiO ₂	0.228	0.020	0.589	0.216	-0.105	0.006

3.2.2.4. Coordonnées factorielles :

Les coordonnées (en anglais "scores") des variables et des individus sont simplement les projections sur les vecteurs propres:

Tableau 20 : Représentativité des axes factoriels

	F1	F2	Communalité initiale	Communalité finale	Variance spécifique
pH	-0.439	0.468	0.762	0.412	0.588
c25°C	0.981	0.191	0.999	0.998	0.002
TDS	0.986	0.159	1.000	0.997	0.003
Ca ⁺⁺	0.918	-0.354	0.964	0.968	0.032
Mg ⁺⁺	0.970	0.212	0.993	0.985	0.015
Na ⁺	0.943	0.332	0.990	0.999	0.001
K ⁺	0.878	-0.206	0.866	0.813	0.187
Cl ⁻	0.958	0.271	0.998	0.991	0.009
SO4 ⁻⁻	0.989	0.027	0.996	0.980	0.020
HCO ₃ ⁻	-0.366	0.631	0.699	0.532	0.468
NO ₃ ⁻	0.465	-0.477	0.758	0.443	0.557
SiO ₂	0.655	0.022	0.687	0.429	0.571

Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

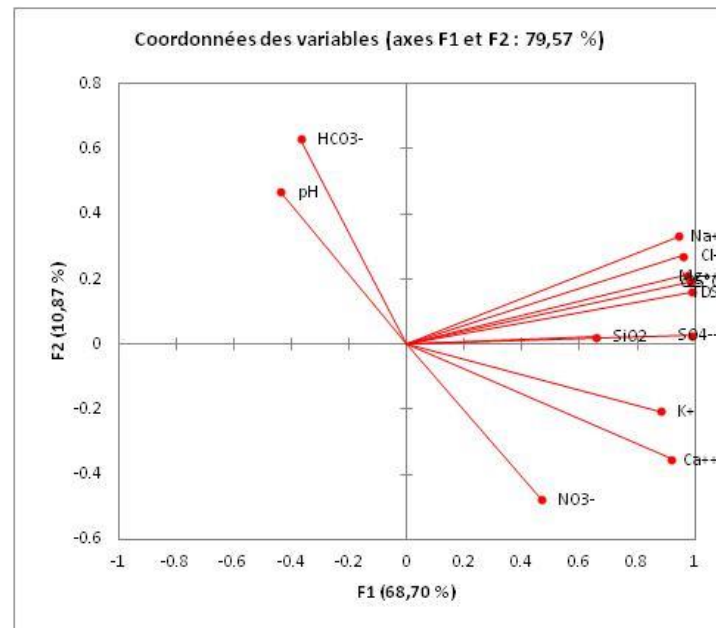


Figure 68 : Espace des variables du plan factoriel F1×F2

- **Analyse de l'espace des variables du plan factoriel F1xF2**

Les résultats sont représentés dans l'espace réduit des deux premières composantes principales sur le tableau 21 et la figure 70.

Tableau 21 : Corrélations entre les variables et les facteurs :

	pH	c25°C	TDS	Ca++	Mg++	Na+	K+	Cl-	SO4--	HCO3-	NO3-	SiO2
F1	-0.228	0.510	0.512	0.477	0.504	0.490	0.456	0.498	0.514	-0.190	0.242	0.340
F2	0.302	0.123	0.103	-0.228	0.137	0.214	-0.133	0.175	0.017	0.407	-0.308	0.014

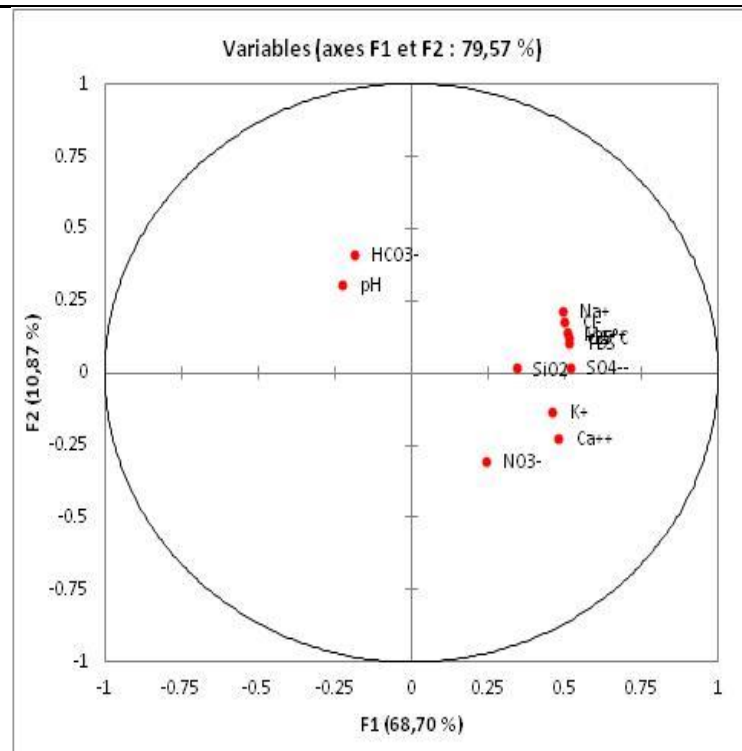


Figure 69: Cercle de corrélations entre les variables et les facteurs

Comme, ce que nous avons décrit précédemment, la figure ci-dessus montre une répartition de deux familles dont la principale famille regroupe l'ensemble des éléments à l'exception du pH et HCO_3^- avec une variance exprimée de l'ordre de 79,57%. Ces deux exceptions représentent la deuxième famille avec une variance exprimée de l'ordre de 11,53%. << Cette répartition montre d'une part l'influence du pH et de l'ion HCO_3^- sur les eaux les moins chargées, « d'autres part que les eaux les plus chargées sont caractérisées le plus souvent par le groupement K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- et NO_3^- » >> (AKA N et al, 2013).

- **Projection dans l'espace des individus**

Tableau 22 : Coordonnées des observations

Observation	F1	F2
Hod1	-0.009	-0.461
Hod2	-0.068	-0.879
Hod3	0.238	0.056
Hod4	1.350	-0.228
Hod5	1.176	-2.718
Hod6	-0.197	-0.077
Hod7	1.095	-1.199
Hod8	-0.039	0.596
Hod9	-0.473	0.535
Hod10	-2.536	-0.172
Hod11	-2.032	3.690
Hod12	-2.336	-0.201
Hod13	1.404	0.885
Hod15	-4.559	-0.970
Hod16	0.258	3.105
Hod17	3.252	-1.093
Hod18	0.029	0.503
Hod20	3.988	1.269
Hod21	-0.542	-2.641

NB : Les valeurs en gras correspondent pour chaque observation au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

Il ressort à l'observation de la figure ci-dessous qu'il y a principalement une grande famille constituée des eaux très dures, fortement minéralisées et ayant des teneurs moins élevées en nitrates (NO_3^-) et très élevées en chlorures et en sulfates. Cette famille regroupe 15 puits c'est-à-dire 78,9 % du total des puits échantillonnés.

Les autres puits contiennent des eaux moyennement acides à neutre, faiblement minéralisées et des teneurs faibles de nitrates et des teneurs très élevées des bicarbonates.

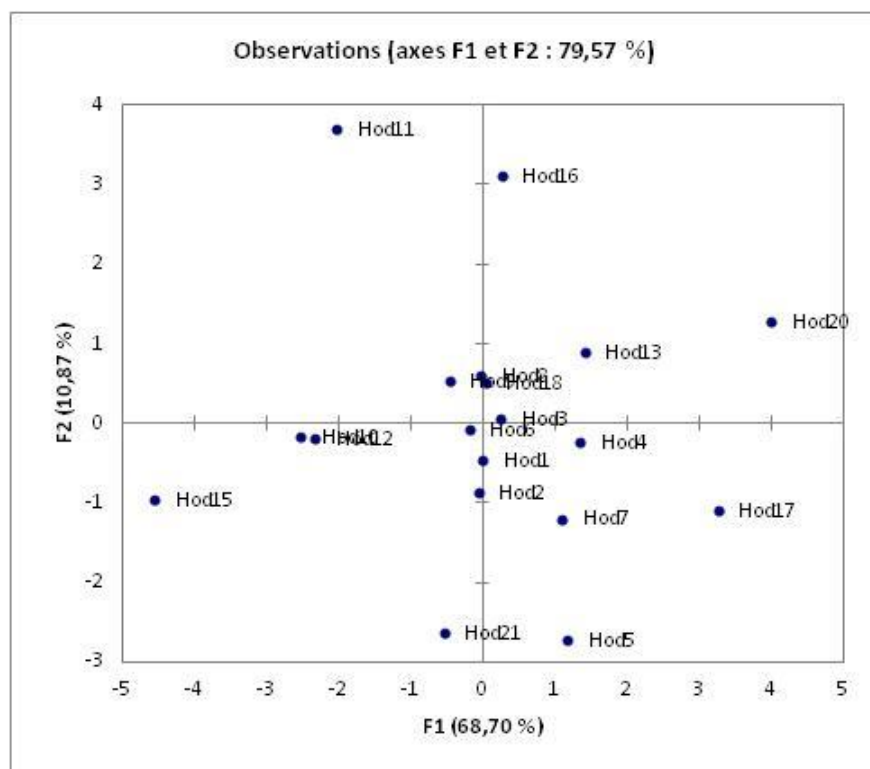


Figure 70 : Projections des individus dans le premier plan factoriel.

3.2.3. L'analyse de classification hiérarchique

3.2.3.1. Principe de la méthode :

L'analyse de classification ascendante hiérarchique est une méthode de classification itérative dont le principe est simple : on commence par le calcul de la dissimilarité entre les N objets. Puis on regroupe les deux objets d'une façon à minimiser le critère d'agrégation en créant une classe contenant ces deux objets. On calcule ensuite la dissimilarité entre cette classe et les $N-2$ autres objets par utilisation du critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classes d'objets d'une façon aussi à minimiser le critère d'agrégation. On continue par ce principe jusqu'à regrouper tous les objets. Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (Dendrogramme) dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus (Adda, 2013).

Plusieurs méthodes d'agrégation sont disponibles : méthode de Ward (inertie) et (variance), lien complet, lien simple, lien fort, lien flexible, lien moyen et lien proportionnel.

3.2.3.2. Application et résultats :

Nous avons par l'utilisation de la méthode du lien complet réalisé un dendrogramme de classification hiérarchique des éléments chimiques de ces 19 prélèvements d'échantillons au niveau de la région d'étude. Les observations qu'on peut tirer à partir de l'interprétation de la figure ci-dessous sont énumérées ci-après :

- Cette analyse permet de distinguer deux familles bien corrélables (figure 72), famille des évaporites et des carbonates. Le premier groupe est formé par les variables : SO_4^{2-} , Na^+ et Cl^- , le deuxième est formé par les variables : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , NO_3^- et SiO_2 .
- Le TDS et la conductivité présente une corrélation importante entre eux. Ils ont une correspondance adéquate.
- Cette analyse confirme la classification des faciès chimiques établie par le diagramme de Piper dont on trouve une contribution marquante entre les évaporites et les carbonates dans une même association.

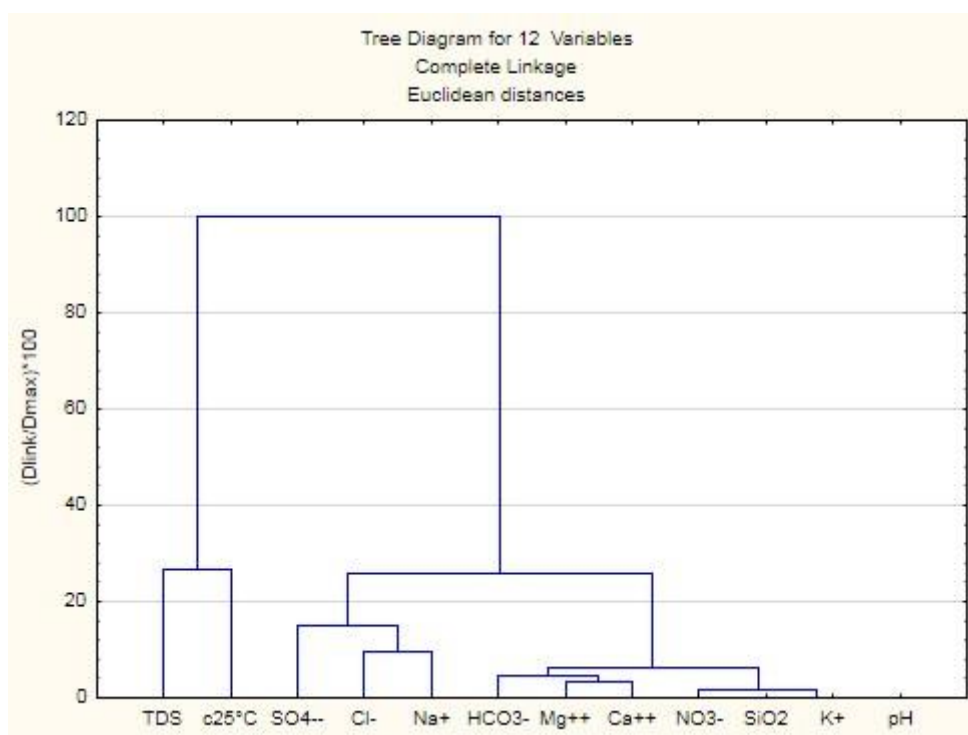


Figure 71: Dendrogramme des paramètres physicochimiques des eaux de la nappe du Mioplioquaternaire du bassin de Hodna (2011)

4. CONCLUSION :

Nous avons développé l'étude hydrochimique de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire comme suite :

La validation des données hydrochimiques par l'intermédiaire de la balance ionique et des corrélations quantitatives entre la somme des cations et des anions et entre la conductivité et les ions. Il apparut que plus de 90% des échantillons de l'année 2011 sont valides.

La cartographie des éléments physico-chimique de ces échantillons validés permet de savoir que :

Le calcium et le magnésium ayant une même allure de distribution spatiale dans le bassin dont ils donnent une concentration élevée le long des monts du Hodna générée par la dissolution des

formations carbonatées, cette concentration commence à diminuer sous le phénomène de dilution des eaux au cours de son trajet vers le Chott.

Par contre les autres éléments ont des manifestations particulières dont on enregistre des concentrations élevées des bicarbonates, des chlorures et des sodiums au centre du bassin montrant bien la complexité géologique du bassin sous l'influence des formations salifères d'une part et les marnes, les argiles d'autres part.

La classification chimique par l'utilisation du diagramme de Piper fait ressortir que les eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du Hodna sont essentiellement des Chlorurées et sulfatées-calciques et magnésiennes.

L'analyse des rapports caractéristique montre bien l'influence du phénomène d'échange de base sur le chimisme des eaux sous l'effet de la faible vitesse d'écoulements de ces eaux souterraines sur un substratum marneux et argileux.

Les eaux du bassin du Hodna ont des teneurs inférieures aux normes maximales admissibles pour Cl^- , NO_3^- , Ca^{++} et Mg^{++} . Ces eaux sont très dures, ce qui entraîne des inconvénients de cuisson et pour la lessive. Ces eaux ayant de fortes minéralisations et peuvent entraîner des risques de salinisations des sols.

L'étude statistique (A.C.P et A.C.H) nous a confirmé le caractère très minéralisant des eaux du bassin du Hodna.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce manuscrit de thèse porte sur le système aquifère du bassin du Hodna. Il a pour objectif d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement du système aquifère sollicité et de mettre en valeur la répartition des paramètres hydrogéologiques et hydrochimiques à l'échelle du bassin du Hodna agissant par la suite à remplir la banque des données permettant de gérer ce système aquifère quantitativement et qualitativement. Pour atteindre cette objective, nous avons développé ce travail en se basant sur des travaux qui ont été déjà effectués par les chercheurs (Savornin, 1908. Guiraud, 1973. Ameroune, 2008 et Grine, 2010) comme suite :

- ❖ Le premier chapitre a été consacré pour l'identification physique du système aquifère, cette identification présente le bassin endoréique du Hodna comme étant un system fermé (le réseau hydrographique prend un chevelu s'acheminant principalement des monts de l'Atlas Tellien et Saharien vers partie centrale du bassin qui est le Chott Hodna) sous l'influence d'un climat généralement steppique. L'étude géologique et la série stratigraphique type caractérisant la zone d'étude sont des formations d'origine sédimentaire à prédominance de sédiments carbonatés. Les affleurements rocheux qui constituent les principaux reliefs du bassin en l'occurrence les montagnes situées le long de la série Atlasique Tellien et Saharien sont des sédiments en grande majorité datant du secondaire, les grandes plaines du centre sont des sédiments du Mio-Mlio-Quaternaire.

Du point de vue lithologique, les principales roches et sédiments qui composent le sol du bassin sont des alluvions argilo-sableuses, des conglomérats, des calcaires, des dolomies, des marnes, des argiles, des sables, des grès et des sels sédimentaires de chott ou de sel diapirique.

Du point de vue tectonique, nous savons que Le bassin de Hodna est le résultat de l'intersection des deux chaines atlasique (tellien et saharien) donc il est affecté par le grands accident tectonique connu sous le nom la « transversale de Colbert-Fennd », accident Nord-Sud emprunté au Nord du Chott par le cours de l'Oued Soubella et au Sud du Chott par l'Oued Mcif. Cet accident est caractérisé par la présence de multiples failles (tectonique cassante) et d'une structure souple et plissé (tectonique souple).

- ❖ Le deuxième chapitre a été consacré pour La compréhension du comportement hydrogéologique du système aquifère du bassin du Hodna. La réalisation des coupes géologiques à partir des logs lithostratigraphique de certains puits dans la zone d'étude a confirmé la complexité géologique du fait de l'importance de l'activité tectonique à l'échelle

régionale de la zone d'étude. L'étude de ces coupes géologique fait ressortir qu'il y a une superposition de deux niveaux perméables séparés par un niveau semi-perméable dont nous avons les considère dans cette étude comme un seul aquifère renfermant des terrains du Mio-Plio-Quaternaire. L'étude de la piézométrie fait suggérer que les eaux souterraines du bassin du Hodna se trouvent en état d'urgence à cause de la prolongation de la sécheresse et la surexploitation intensive de ces ressources. L'étude des paramètres hydrodynamique de l'aquifère du Hodna montre que Les valeurs des transmissivités varient de 8.10^{-5} à 2.10^{-2} m^2/s . avec un gradient hydraulique important le long du relief et faible dans la partie plaine du Bassin.

- ❖ Le troisième chapitre a été consacré pour le traitement physico-chimique de 19 échantillons prélevés par ANRH en 2011. La cartographie des paramètres physico-chimiques permet de comprendre la relation eau-roche dont le mécanisme d'acquisition chimique est important dans les foyers d'infiltration (affleurements carbonatés le long des monts Atlasique) où le rôle de la dissolution est efficace. Ce mécanisme est développé au cours de l'écoulement des eaux souterraines vers le Chott Hodna où le rôle de la dilution (échange de base) est efficace. L'étude des rapports caractéristique confirme bien l'origine principalement carbonatée des eaux à travers presque tous le Bassin alors que l'origine sulfatée est générée par la remontée du Trias gypseux au niveau de l'anticlinal du Chott El Hammam. L'origine des chlorures est générée par l'intrusion des eaux salées du Chott El Hodna. L'étude de faciès chimique classe les eaux de Hodna dans un type des eaux essentiellement des Chlorurées et sulfatées-calciques et magnésiennes. L'étude statistique (A.C.P et A.C.H) nous a confirmé le caractère très minéralisant des eaux du bassin du Hodna et confirme bien les résultats trouvées dans le traitement physico-chimique des eaux.

Bibliographie

1. ACEVEDO N, (1996). Méthodes d'études d'un aquifère à nappe libre: application au cas de Lachenaie. Diplôme de maîtrise des sciences appliquées (M.Sc.a)-Université de Montréal. 245 pages.
2. ADDA M, (2013). Caractérisation hydrochimique et pollution des eaux souterraines en contexte urbain : cas de l'agglomération oranaise (Algérie). Thèse de magistère- Université d'Oran. 170 pages.
3. AKA N et al, (2013). étude hydrochimique et microbiologique des nappes d'alterites sous climat tropical humide : cas du département d'Abengourou (sud-est de la cote d'ivoire) / Larhyss journal, 16 (2013), 31-52. 22 pages
4. AMROUNE A, (2008). hydrogéologie et qualité des eaux souterraines de la plaine de M'sila. Thèse de magistère- Université de Batna. 133 pages.
5. AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES, (2006). modélisation du système aquifère du hodna. Mission I : collecte, analyse et synthèse des données. Etude réalisée par ICOSIUM FORAGE & ENGINEERING SERVICES. 55 pages
6. AMADOU H, LAOUALI M, MANZOLA A, (2014). Caractérisation hydro chimique des eaux souterraines de la région de Tahoua (Niger). Journal of Applied Biosciences 80:7161 – 7172 ISSN 1997–5902.
7. BELGHITI et al, (2013). Etude de la qualité physico -chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe Plioquaternaire dans la région de Meknès (Maroc) - larhyss journal, issn 1112-3680, n°14, juin 2013, pp. 21-36 .
8. BERNARD M et al (1971). Fluctuation du niveau piézométrique dans les réservoirs calcaires du Jura neuchâtelois Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles- Université de Neuchâtel. 6 pages.
9. BOUEDJA F, (2010). Tectonique actuelle et récente et risque sismique de la région de Constantine. Thèse de magistère- Université de Setif. 154 pages.
10. BOUKROUH F, (2008). Etude géologique des dépôts évaporitiques du bassin de Guelma. Thèse de magistère- Université de Constantine. 112 pages.
11. BOULGHOBRA N, (2006). Protection de la ville de skikda contre l'inondation « essai de P.P.R.I). Thèse de magistère- université de Batna. 179 pages.
12. BOUTALEB A, (2001). Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna : Géologie, Pétrographie des dolomies, Micro thermométrie et implications métallogéniques. Thèse de doctorat d'état- Université des sciences et de la technologie d'Alger. 404 pages.

13. BRINS N, BOUDOUKHA A, (2011). Classification statistique et hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya. (wilaya de Biskra)-Algérie. Courrier du Savoir – N°11, Mars 2011, pp.41-46- Université de Biskra.
14. CHABOUR N, (2006). Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. Thèse de doctorat d'état- université de Constantine. 171 pages.
15. DEBIECHE T.H, (2002). Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. thèse de doctorat - Université de Franche-Comté. 235 pages.
16. DJIDEL M, (2008). Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Thèse de doctorat-Université de Annaba. 165 pages.
17. FOURNILLON A, (2012). Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (Var et Bouches-du-Rhône, SE France). Thèse de doctorat- Université Aix Marseille. 426 pages.
18. GOUAIDIA L, (2008). Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est algérien. Thèse de doctorat en science- Université de Annaba. 131 pages.
19. GRINE R, (2010). les perspectives hydrogéologiques de la plaine de la cuvette hodnéenne. Thèse de magistère- Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene ALGER. 142 pages.
20. GUIRAUD. R (1973). Evolution post- triasique de l'avant pays de la chaine alpine d'après l'étude du bassin du Hodna et les régions voisines. Thèse de doctorat-Université de Nice.
21. HADADJI A et AL (2007). L'état de la surexploitation des nappes de la plaine de Ghriss (Wilaya de Mascara). Mémoire d'ingénieur d'état- Université d'Oran. 101 pages.
22. HAMIT A, (2012). Étude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad). Thèse de doctorat- Université de Poitiers. 319 pages.
23. HAMZAOUI AZAZA F et al, (2012). Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques Rapport Geo-Eco-Trop 36: 49-62 - Université de Tunis El Manar. 14 pages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

24. LABORDE J P, Eléments d'hydrologie de surface. Université de Nice - Sophia Antipolis. Edition 2000.
25. LAMINI A, (2012). Etude géochimique et minéralogique des Chotts de la région d'El Hadjira. Thèse de magistère- université d'Ouargla. 122 pages.
26. RODIER et al, 2009 : Analyse des eaux.
27. SAVORNIN S (1908). L'hydrologie du Hodna. Gouvernement de l'Algérie. Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie 3^{ème} série. 150 pages.

Liste des figures

Figure 01 : Situation géographique du bassin de Hodna.....	11
Figure 02 : le réseau hydrographique du bassin de Hodna	13
Figure 03 : la carte des isohyètes du bassin de Hodna durant la période (1980,2004)	15
Figure 04 : variation interannuelle des précipitations durant la période 1980 -2004.....	17
Figure 05 : Variation des moyennes mensuelles de précipitation durant la période 1980/2004.....	18
Figure 06 : Variation des moyennes saisonnières de précipitation durant la période 1980/2004.....	19
Figure 07 : Variation des amplitudes de température du mois de Janvier et de Juillet au niveau du Bassin de Hodna (ANRH)	20
Figure 08 : Variation des moyennes mensuelles de température durant la période 1990/2005.....	21
Figure 09 : l'abaque de déficit d'écoulement de verdeil 1988	22
Figure 10 : l'évolution mensuelle de la température et de L'ETP.	24
Figure 11 : Variation des moyennes annuelles de précipitation et ETR durant la période 1990,2004.....	25
Figure 12 : diagramme Ombrothermique de la station de Medjez durant la période 1990,2004.....	28
Figure 13 : Variation de l'indice d'aridité de la station de Medjez durant la période 1990,2004.....	29
Figure 14 : Bilan hydrologique à la station de Medjez, par la méthode de Thornthwaite durant la période 1990-2004.	32
Figure 15 : Carte structurale schématique de la chaîne Maghrébide montrant la disposition des zones internes et externes; d'après Durand Delga et Fontboté (1980) in F.BOUKROUH, 2008	35
Figure 16 : L'orogène Alpin périméditerranéen (D'après Durand-delga, 1969) in BOUEDJA, 2010.....	36
Figure 17 : la carte géologique simplifiée du bassin de Hodna. Extrait de la carte géologique de l'Algérie 1/500.000.....	38
Figure 18 : Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Hodna. (SONATRACH.2005) in Grine 2010)	46
Figure 19: Schéma structural du Hodna (R.Guiraud, 1969, in A.N.R.H, 2006).	49
Figure 20 : l'emplacement des coupes géologique au niveau du bassin de Hodna	52
Figure 21 : Coupe géologique reprise à travers des monts des Ouled Nail (D'après Emberger, 1960).....	53
Figure 22 : Coupe géologique reprise du bassin oriental de Hodna et de l'anticlinal du Chott EL Hammam (d'après Guiraud. 1973).....	53
Figure 23: Coupe géologique reprise représentative du bassin de Hodna de l'Ouest à L'Est (A.N.R.H, 2006)	54
Figure 24 : Situation des forages utilisés pour la corrélation lithostratigraphique.....	55
Figure 25 : Coupe géologique représentative de la partie centrale du Nord-Ouest à Sud-est du bassin de Hodna	56
Figure 26 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna de l'Ouest à l'Est traversant la bordure septentrionale de l'Atlas Saharien.....	57
Figure 27 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna du Nord au Sud traversant le Chott.	57
Figure 28 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna du Nord au Sud traversant le Chott.	58

Figure 29 : Coupe géologique représentative du bassin de Hodna du Sud-ouest au Nord-est traversant le Chott	59
Figure 30: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 1980.....	64
Figure 31: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 1984.....	64
Figure 32: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 1987.....	65
Figure 33: Carte piézométrique du bassin de Hodna de l'année 2003.....	65
Figure 34: Evolution piézométrique spatiale de la nappe le long de la coupe transversale AB Nord-ouest, Sud-est au cours de la période (1954,1989).....	68
Figure 35: Evolution de l'artésianisme de la nappe au cours de la période (1954,2003)	70
Figure 36 : Courbe de descente forage Ouled Madhi (Grine, 2010).....	71
Figure 37 : Courbe de remontée forage Ouled Madhi (Grine, 2010).....	72
Figure 38 : Courbe de descente (Forage Bir Hanat 24 heures) (Grine, 2010)	73
Figure 39 : Courbe de remontée Forage Bir Anat (24heures) (Grine, 2010)	73
Figure 40 : Carte des transmissivités à travers la plaine hodnéenne (nappe profonde) (Données de Derekoy pour FAO 1973) in Grine, 2010).....	74
Figure 41:(a)Somme des anions versus somme des cations (b) Corrélation entre la somme des ions et les conductivités électriques	77
Figure 42: Variation de la température des eaux souterraines au niveau de la cuvette du Hodna (2011).....	80
Figure 43: Carte de distribution spatiale de la conductivité au niveau de la cuvette du Hodna.	81
Figure 44 : Variation de la conductivité et la teneur du Sulfate au niveau de la cuvette du Hodna.	81
Figure 45: Carte d'iso-teneur du calcium en mg/l de la nappe du Hodna.....	83
Figure 46 : Carte d'iso-teneur du magnésium en mg/l de la nappe du Hodna.....	84
Figure 47: Carte d'iso-teneur du sodium en mg/l de la nappe du Hodna.....	85
Figure 48: Carte d'iso-teneur du potassium en mg/l de la nappe du Hodna	86
Figure 49: Carte d'iso-teneur du chlorure en mg/l de la nappe du Hodna	87
Figure 50: Carte d'iso-teneur du sulfate en mg/l de la nappe du Hodna.....	88
Figure 51: Carte d'iso-teneur du bicarbonate en mg/l de la nappe du Hodna.....	89
Figure 52: Carte d'iso-teneur du nitrate en mg/l de la nappe du Hodna	90
Figure 53 : La relation Sodium-potassium dans les eaux.....	90
Figure 54: distribution des échantillons par rapport à la droite de mise en solution de l'halite (a) et à la droite de mise en solution du Gypse (b)	91
Figure 55: La relation Sodium-calcium dans les eaux	92
Figure 56 : La relation Sulfates-sodium dans les eaux.....	92
Figure 57 : La relation Sulfates-magnésium dans les eaux	93
Figure 58 : La relation Calcium-Magnésium dans les eaux.....	94
Figure 59 : La relation Calcium et magnésium-sulfate dans les eaux.....	94
Figure 60 : Relation entre les paramètres dominants ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) / ($\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$).....	95
Figure 61 : Relation entre les paramètres (Na^+/Cl^-) / ($\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$) Échange de base.....	96
Figure 62 : Relation entre les paramètres ($\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$) Origine du calcium.....	97
Figure 63 : Relation entre les paramètres (Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^-).....	98
Figure 64: Variations des chlorures et des sulfates en fonction de la conductivité	99
Figure 65 : Répartition spatiale du rapport Sr/Ca dans les eaux de la Cuvette de Hodna.....	100
Figure 66: Représentation en diagramme de Piper des eaux analysées.	102
Figure 67: Pourcentage de variance exprimée	105
Figure 68 : Espace des variables du plan factoriel F1×F2	107
Figure 69: Cercle de corrélations entre les variables et les facteurs	107
Figure 70 : Projections des individus dans le premier plan factoriel.	109

Figure 71: Dendrogramme des paramètres physicochimiques des eaux de la nappe du Mio-plioquaternaire du bassin de Hodna (2011)	110
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Liste des tableaux

Tableau 01 : les superficies des sous bassin hydrographiques du bassin de Hodna	13
Tableau 02 : stations pluviométriques utilisées pour la réalisation de la carte pluviométrique du bassin de Hodna.	15
Tableau 03 : Données des précipitations moyennes annuelles durant la période 1980, 2004 de la station de Medjez et Ain Melh.	17
Tableau 04 : données des moyennes mensuelles de précipitation durant la période 1980 - 2004 de la station de Medjez et Ain Melh.	18
Tableau 05 : données des moyennes saisonnières de précipitation durant la période 1980,2004.....	19
Tableau 06 : Données des moyennes mensuelles de température de la station de Medjez durant la période 1990/2005.....	21
Tableau 07 : Données des moyennes mensuelles d’ETP durant la période 1990,2004	24
Tableau 08 : Données des moyennes annuelles d’ETR durant la période 1990,2004 :	25
Tableau 09 : L’ensoleillement à la Station de M’sila (1990-2005).....	27
Tableau 10 : Vitesse moyenne du vent à la Station de M’sila (1990-2005)	27
Tableau11 : Classement de climat en fonction de l’indice d’aridité de Martonne.....	29
Tableau 12 : calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite du bassin de Hodna.	32
Tableau 13 : bilan hydrologique à l’échelle du bassin de Hodna.....	34
Tableau 14: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du bassin de Hodna (2011)	78
Tableau 15: Relation entre minéralisation et conductivité à 20°C (Rodier et al, 2009).	82
Tableau 16: Statistique descriptive des résultats physico-chimiques de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire du bassin de Hodna.	103
Tableau 17: Matrice de corrélation entre les variables	104
Tableau 18: Pourcentage de variance exprimée	105
Tableau 19: l’ensemble des vecteurs propres.....	106
Tableau 20 : Représentativité des axes factoriels.....	106
Tableau 21 : Corrélations entre les variables et les facteurs :	107
Tableau 22 : Coordonnées des observations	108