

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Hydraulique**

Spécialité : **Technologies de Traitement des Eaux**

Par :

LALAM Asma

Sujet

**Caractérisations, classification et statistique multivariable des
eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine de MAGHNIA**

Soutenu publiquement, le / 06 / 2017, devant le jury composé de :

M BESSEDIK M	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Président
Mme BABA HAMED K	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Directrice de mémoire
M BOUANANI A	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
Mme BOULKI HACENE C	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Examinatrice
M MEGNOUNIF A	Professeur	Univ. Tlemcen	Examinateur

2016 - 2017

« L'eau est la force conductrice de la
nature »

Léonard de Vinci

DEDICACES

Ce mémoire est dédié à

Toute ma famille

Et

Tous ceux que j'aime et qui m'aiment

ASMA

Remerciements

Au nom d'**ALLAH** tout puissant, qui m'a éclairé les chemins du savoir et de la sagesse, Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bout ce modeste travail.

Je voudrais présenter mes vifs remerciements à mon encadreur Madame **K. BABA HAMED** à qui je voudrais également lui témoigner ma gratitude pour sa patience, son soutien, sa disponibilité, ses précieux conseils et son aide inestimable durant toute la période du travail afin de mener ce travail à bon port.

Je tiens à remercier très chaleureusement Monsieur **A. BOUANANI** mon second encadreur qui m'a permis de bénéficier de son encadrement. Je le remercie pour sa générosité, sa sympathie et ses précieux conseils.

C'est un honneur pour moi de voir dans mon jury Monsieur **M. BESSEDIK**, Madame **C BOUKLI HACENE** et Monsieur **A. MEGNOUNIF**. Qu'ils soient vivement remerciés.

Je tiens à remercier également Monsieur **M. BENSALAH**, Directeur du laboratoire de recherche n°25 de l'université de Tlemcen qui nous permis de travailler au sein du labo. Et Monsieur **HAMMOUDA** Ingénieur de laboratoire dans ce laboratoire, pour son aide inestimable et sa disponibilité.

Mes remerciements vont aussi à mademoiselle **L. BENDJEMA** doctorante au département d'Hydraulique, pour avoir pris de son temps pour m'apprendre à utiliser le logiciel Arcgis, pour sa générosité et sa sympathie.

Mes remerciements à tous les enseignants du Département d' **HYDRAULIQUE** de l'Université de Tlemcen et à tous mes collègues.

Résumé

La nappe alluviale de la plaine de Maghnia est caractérisée par un remplissage du dépôt d'une série continue de sédiments Mio_ Plio_Quaternaire, elle est alimentée par les pluies directement, et par les aquifères adjacents.

L'étude de la qualité des eaux, montre une élévation des teneurs chimiques en ions majeurs présentant ainsi un réel danger sur la santé de la population de la région. Ces eaux peuvent par ailleurs être utilisées pour l'irrigation car les indices calculés (Kr, Na%, et SAR) offre une qualité dans la plupart bonne à admissible ou médiocre.

L'application des tests statistiques s'est avérée fort intéressante, la représentation des diagrammes en boîtes à confirmé la prédominance du faciès chloruré magnésien. La classification ascendante hiérarchique a aussi contribué à affiner l'étude et classer les points d'eau en six classes distinctes.

L'Analyse en composantes principales a à son tour permis à classer les eaux et voir les différentes interactions chimiques entre les éléments majeurs.

Les différents tests statistiques marquent l'hétérogénéité de la lithologie de la plaine, en effet la différenciation des faciès résulte du lessivage des formations évaporitiques principalement gypsifères et la dissolution des carbonates des formations jurassiques.

Mots clés : Plaine de Maghnia – Minéralisation – Faciès – Classification ascendante hiérarchique – Analyse en composantes principales.

Abstract

The alluvial aquifer of the Maghnia Plain is characterized by a filling of the deposit of a continuous series of Mio_ Plio_Quaternary sediments, it is fed by the rains directly, and by the adjacent aquifers.

The study of water quality shows an elevation in the chemical content of major ions, thus presenting a real danger to the health of the population of the region. These waters can also be used for irrigation because the calculated indices (Kr, Na%, and SAR) offer a quality in most good to acceptable, even bed.

The application of the statistical tests proved very interesting, the representation of the boxed diagrams confirmed the predominance of the magnesian chloride facies. Hierarchical ascending classification has also helped to refine the study and classify the water points into six distinct classes.

The Principal Component Analysis has in turn allowed to classify the waters and see the different chemical interactions between the major elements.

The various statistical tests indicate the heterogeneity of the lithology of the plain, in fact the differentiation of the facies results from the leaching of the mainly gypsiferous evaporite formations and the dissolution of the carbonates of the Jurassic formations.

Keywords: Maghnia plain – Mineralization – Facies – Ascending hierarchical classification - Principal Component Analysis.

ملخص

من اجل فهم تمعدن المياه الجوفية في سهل مغنية قمنا بتطبيق بعض المعالجات الإحصائية للبيانات الهيدرولوجية للمياه الجوفية إضافة إلى ذلك دراسة بعض القوانين الخاصة بالري

سهل مغنية يقع في الشمال الغربي للجزائر يتميز بمناخه شبه القاحل و تتميز مياهه الجوفية بملاء سلسلة متواصله من الرواسب ذات الحقبه الزمنية ميو-بليو-كواترنار حيث يتم تغذيته بالأمطار ومخازن المياه المجاورة التي تأثر على الخصائص الفيزيائية والكيميائية.

تأكيدا على جودة المياه يتم دراستها إحصائيا عن طريق رسم خرائط وتحاليل إحصائية مناسبة ومتعددة لتجانس الخصائص الصخرية.

..**كلمات مفتاح** تمعدن المياه الجوفية.سهل مغنية.ميو-بليو-كواترنار.جودة إحصائية

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Liste des abréviations

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités	
I.1-Contexte géographique	3
I.1.1-Situation géographique	3
I.1. 2- Réseau hydrographique Bassin.....	5
I.2 -Contexte géologique	5
I.2.1- Cadre géologique générale	6
I.2.2-. Analyse Lithostratigraphique.....	7
I.2.2.1. Le Paléozoïque.....	7
1.2.2.2. Le Mésozoïque.....	8
I.2.2.3. Le Cénozoïque	8
I.2.2.4. Le Plio-Quaternaire	9
I.2.3- Etude structurale de la région d'étude	9
I.3- Contexte hydrogéologique	10
.3.1- Les limites et les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères	10
I.3.2- Nappe du Plio-Quaternaire.....	11
I.3.3-Analyse piézométrique	11
I.4-Conclusion.....	14
CHAPITRE II : Etude climatique	
II.1-Contexte climatique	15
II.2- Etude des précipitations	15
II.2.1. Précipitations annuelles	15
II.2.2. Précipitations mensuelles:	16
II.2.3. Précipitations saisonnières	17
II.3- Etude de la température	18
II.3.1-Variation annuelle des températures.....	19

II.3.2-Variation mensuelle de la température	19
II.4-Etude du climat	20
II.4.1- Méthode graphique de Bagnouls et Gaussen.....	21
II.4.2. Indice d'aridité annuelle de De Martonne	22
II.4.3-Indice d'aridité mensuelle de De Martonne.....	22
II.4.4-Indice de Moral	22
II.5- Conclusion	22
CHAPITRE III : Etude hydro- chimique	
III.1-Méthodologie	23
III.2-Caractéristiques physico-chimiques	26
III.3-Faciès des eaux souterraines de la plaine de Maghnia	43
III.4. Etude des paramètres	43
III.4.1. Potentiel d'hydrogène (pH)	44
III.4.2. Conductivité électrique (Ce).....	46
III.5-Qualité des eaux à des fins d'irrigation	46
III.5.1- Indice de Kelly's Ratio (KR)	46
4.Isolement et purification: III.5.2-Pourcentage de Sodium et classification par la méthode Wilcox.....	47
III.5.3- Sodium Absorption Ratio (SAR).....	50
III.6- Conclusion	53
CHAPITRE IV : Applications des tests statistiques aux données hydrochimiques	
IV .1. Diagrammes en boîtes «Boîte à moustaches = Box plot = Boîtes de Tukey »	55
IV.1.1. Définition.....	55
IV.1.2. Étapes de réalisation.....	55
IV.1.3. Objectif	55
IV.1.4. Représentations des boîtes à moustaches	56
IV.1.4.1. Représentation de l'ensemble des échantillons	56
IV.1.4.2. Représentation des échantillons pris selon les faciès	57
a)-Faciès chloruré magnésien.....	57
b)-Faciès chloruré sodique	59
d)-Faciès sulfaté calcique	60
e)- Faciès bicarbonaté magnésien.....	60
Conclusion	61

IV.2. Classification ascendante hiérarchique (C.A.H.)	62
IV.2.1.Principe	62
IV.2.2. Présentation de l’algorithme de la C.A.H.	63
IV.2.3. Choix de l’indice de dissimilarité entre les individus.....	65
IV.2.4-Méthode d'agrégation pour la Classification Ascendante Hiérarchique	65
IV.2.5. Mesure de proximité pour la Classification Ascendante Hiérarchique	65
IV.2.6-Application de la méthode C.A.H. aux données des eaux de la plaine de Maghnia	65
IV.2.6.1- Statistiques des nœuds	66
IV.2.6.2- Dendrogramme	67
IV.2.7- Conclusion	69
IV.3-Analyse en composantes principales (A.C.P.)	69
IV.3.1- Introduction.....	69
IV.3.2-Principe de l’A.C.P	69
IV.3.3-Analyse statistique multivariable.....	69
a- Analyse factorielle	69
b-Cercles de corrélations	70
IV.3.4-Applications de l’A.C.P. sur les eaux du Plio Quaternaire de la plaine de Maghnia	70
IV.3.5- Résultats de l’A.C.P.....	70
a)- Matrice de corrélation.....	70
b)-Analyse des graphiques.....	72
c)- Espace des variables.....	72
d)- Espace des individus	73
IV.4-Discussions des résultats (Comparaison entre CAH et ACP)	75
IV.5- Conclusion	77
Conclusion générale	78
Références bibliographiques	81
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Annexes	

Introduction générale

L'existence de toute sorte de vie est liée à la présence de l'eau. L'insuffisance de cette dernière est l'un des problèmes les plus cruciaux auxquels l'homme est confronté.

Au début du XXI^e siècle, les pressions exercées sur les ressources en eau sont de plus en plus fortes, l'extension des terres agricoles irriguées et l'utilisation de techniques d'irrigation non économes, la diversification des produits agricoles, l'urbanisation, le développement industriel et le tourisme sont parmi les nombreux facteurs qui contribuent à augmenter la pression sur les ressources en eau, et sont aggravés par les effets incertains du changement climatique. Ce qui contraint véritablement à sa recherche, notamment, par l'exploitation des eaux souterraines et autres. Bien que cette difficulté soit préoccupante, il n'en demeure pas moins que la qualité de ces eaux présente, néanmoins, un intérêt majeur.

L'allocation des ressources en eau est donc devenue une priorité pour de nombreux pays de la Méditerranée, du Moyen-Orient et de l'Afrique, et elle a besoin des informations fournies par la recherche scientifique pour guider une gestion durable et équitable.

En plus de l'importance géographique et agricole de la plaine de Maghnia, elle renferme une nappe phréatique qui est menacée par le fonçage illicite des puits et la pollution. Ces préoccupations nous ont poussées à établir cette étude qui constituera une contribution pour une meilleure connaissance de la qualité des eaux de l'aquifère alluvionnaire par l'utilisation des tests statistiques.

Notre travail est réparti en quatre chapitres comme suit :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités, pour donner une idée sur la situation de la plaine, sa géologie et ses caractéristiques hydrogéologiques.
- Le deuxième, portera sur l'étude climatique afin de déterminer le type du climat régnant dans la région ainsi.
- Le troisième chapitre traitera l'étude hydrochimique dans lequel nous mettons en évidence les caractéristiques des eaux de la plaine de Maghnia ainsi que les faciès.

Introduction générale

- Dans un dernier chapitre nous mettrons le point sur l'application de quelques tests statistiques sur les données hydrochimiques afin de montrer l'apport des statistiques dans les études de la qualité des eaux.
- Enfin, une conclusion générale dans laquelle une synthèse des résultats sera présentée.

Chapitre 1

Généralité

I.1-Contexte géographique

I.1.1- Situation géographique

Le secteur d'étude est situé à l'extrême Nord ouest algérien. Il est limité au Nord par le massif des Taras (Djebel Fillaoucène) qui l'isole de la mer méditerranée, au Sud et à l'Est par les monts de Tlemcen (respectivement les monts de Ghar-Rouban et les monts du Kef), à l'Ouest et au Sud ouest par la plaine des Angads et les monts de Béni Snassen (fig.I.1).

La plaine de Maghnia est relativement plate : s'étend sur une superficie 216,13 Km², 72% de la surface agricole utile est occupée par le secteur étatique. [Document Hydraulique Agricole, 2004].

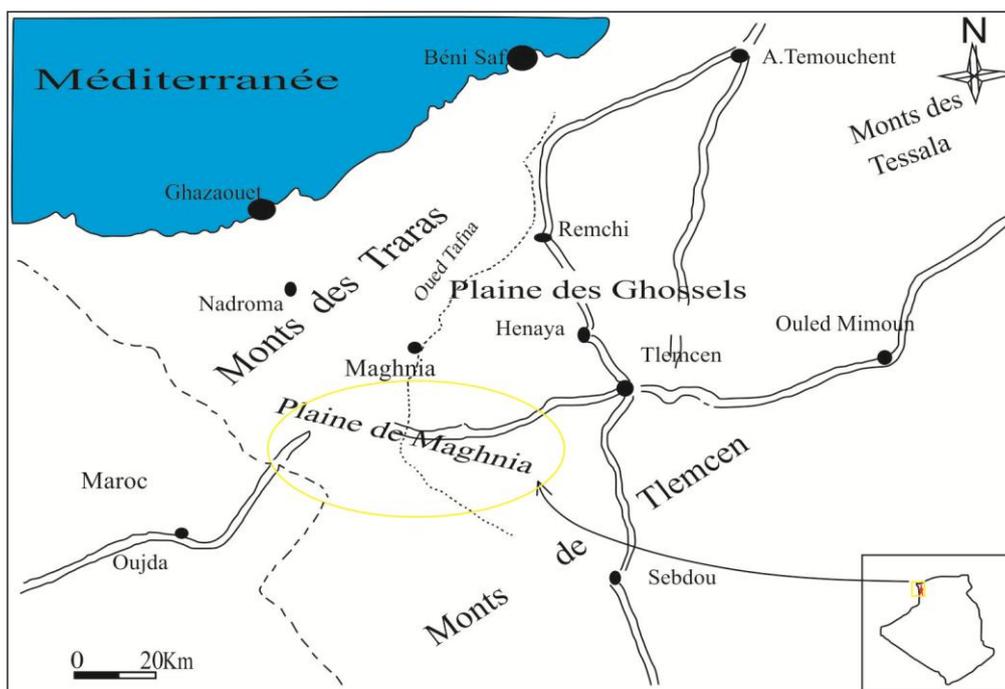


Figure I.1: Carte de localisation de la plaine de Maghnia (Baba Hamed K, 2007)

I.1.2- Réseau hydrographique

Cette étude est tirée essentiellement du travail de Baba Hamed, 2007.

Deux Oueds principaux traversent la plaine de Maghnia (fig.I.2) :

- Oued Mouilah avec deux affluents : Oued Bou-Naim et Aouedj,
- Oued Ouardefou avec trois affluents : Oued Abbas, Ouina, et Mehaguene.

- **Oued Mouilah** : important affluent rive gauche de la Tafna, prend naissance dans la région d'El Abed, en Algérie, à 550m d'altitude, puis pénètre au Maroc sous le nom d'oued Isly qui suit un cours intermittent. Il redevient permanent en aval de la ville d'Oujda (Maroc) à 490m d'altitude, sous l'appellation d'oued Bou Naïm, et enfin pénètre en Algérie, aux environs de Maghnia, et prend le nom d'oued Mouilah.

- **Oued Ouardefou** : est le plus important de la zone d'étude, il passe à proximité de la ville de Maghnia, son principal affluent est l'oued Mehaguene qui prend naissance dans le territoire Marocain.

- **Oued Abbas** : son principal affluent est l'Oued Mansour ainsi qu'un nombre assez important de cours d'eau tels que ceux qui collectent les eaux de ruissellement des monts d'El Gargachi, Rouaguen et El Babouche.

- Il est à signaler que cet oued sert d'exutoire aux rejets industriels des unités économiques de la ville de Maghnia (Document, Hydraulique Agricole, 2004).

Tableau I.1 : Caractéristiques des bassins versants de Mouilah et d'Ouardefou

Oueds	Mouilah	Ouardefou
Superficie du bassin versant (Km ²)	1827	612
Altitude moyenne (m)	854	676

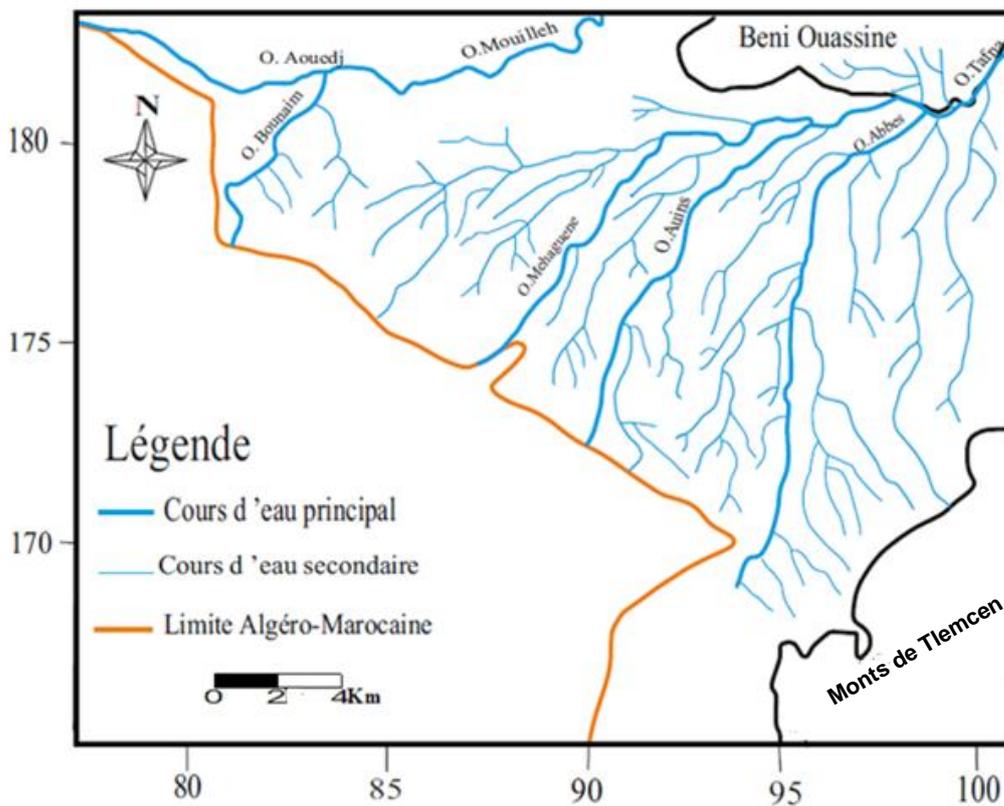


Figure I.2 : Réseau hydrographique de la plaine de Maghnia (Zennagui K &, Zerrouki F., 2006).

I.2- Contexte géologique

I.2.1- Cadre géologique générale

La plaine de Maghnia, du point de vue stratigraphique, fait partie du domaine tlemcenien, qui s'étend de la frontière algéro-marocaine à l'Ouest jusqu'aux environs de Tiaret à l'Est (fig. I.3).

C'est une cuvette allongée selon une direction ENE-WSW, comblée jusqu'à sa surface actuelle par des dépôts provenant de l'érosion des montagnes bordières (Rhar-Roubane et Djebel Fillaoucène).

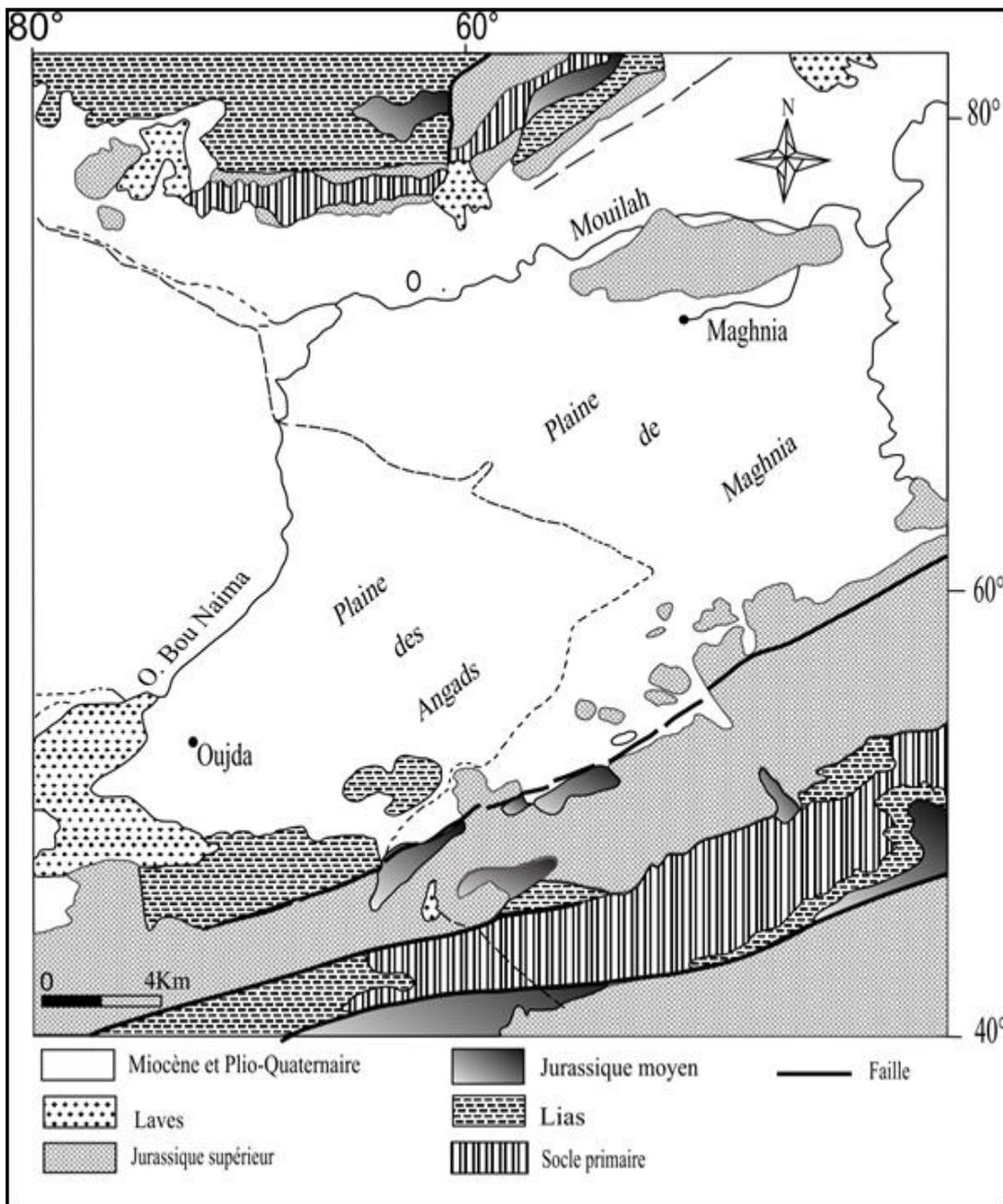


Figure I.3: Carte géologique de la plaine de Maghnia (Baba Hamed K., 2007)

I.2.2- Analyse lithostratigraphique

Du point de vue stratigraphique, nous distinguons (fig.I.4):

- les terrains primaires et secondaires qui composent les reliefs (Djebel Fillaoucène et Rhar-Roubane),
- les terrains néogènes et quaternaires.

Pr (m)	Age		Log	description géologique
80	Plio-Quaternaire			alluvions
	MIOCENE	TERTIAIRE		Marnes grises sableuses
				helvétiques à la base grès calcaires
540	Supérieur	SECONDAIRE		Dolomies
740				Marnes et calcaires marneux
890				Dolomies
1090				Grès quartzeux avec des bancs de marnes vertes ou lie de vin
1400				Marnes argileuses grises et argiles schisteuses
1480				Calcaires à laméllibranches et dolomies cristallines
1640			Moy	
1990	Inf	PRIMAIRE		Marnes violées, gypsifères et grès grossiers rouges avec intercalations argileuses
	PERMO-TRIAS			Calcaires
	Carbonifère			Granites
	Dévonien		Schistes et quartzites	
	Silurien			

Figure I.4: Série stratigraphique synthétique de la plaine de Maghnia. (Baba Hamed K., 2007)

I.2.2.1. Le Paléozoïque

Occupe la majeure partie de la région, il correspond à une bande formée essentiellement par des schistes et des quartzites primaires, cette zone est orientée SW-NE entourée au Nord et au Sud par des terrains secondaires (Renard Ph, 2005).

La série du socle primaire est synthétisée sur le tableau qui suit:

Tableau I.2 : Série du socle primaire

Système	Description lithologique
Silurien	Schistes avec une structure plissée et métamorphisée.
Dévonien	Schistes et quartzites, avec des inclusions de microbrèches probablement carbonifère, on y trouve parfois des granites à tourmaline.
Carbonifère	Schistes rubéfiés.
Permo-Trias	Formation détritique composée de galets locaux, schistes quartzites, grès et de roches éruptives, cimentées par des argiles rougeâtres.

I.2.2.2. Le Mésozoïque

Il est constitué essentiellement par des formations carbonatées, comportent parfois des éléments détritiques dérivant des affleurements primaires préexistants.

- Le Jurassique

C'est une succession de formations d'une épaisseur, d'environ plus de 1000 m, On peut différencier ces systèmes classés sur le tableau suivant : (Lucas G., 1942, Elmi S., 1978, 1983, Benest M., 1982, Mekahli L., 1988 *in* Baba Hamed K., 2007).

Tableau I.3 : Synthèse de la série du Secondaire

Période géologique	Epoque géologique	Etage géologique et description lithologique
JURASSIQUE	Supérieur Malm	<ul style="list-style-type: none"> - Tithonien : Les marno-calcaire de Raourai, les calcaires de Lato, les Marno-calcaires de Hariga, et Marno-calcaire d'Ouled Mimoun. - Oxfordien sup.- Kimméridgien sup. : Correspond à la formation des grès de Boumediène des monts de Tlemcen, les calcaires de Zarifet, présents au Djebel Fillaoucène et les dolomies de Tlemcen du Kimméridgien terminal. - Callovo-Oxfordien : <u>Argiles de Saïda</u> : Gréso-pélitique avec des alternances de marnes et de bancs épais de grès très riches en ammonites (macrocéphalites), affleurent aux Djebel Tizinbine et Djebel Boukhellal.
	Moyen Dogger	<ul style="list-style-type: none"> - Bathonien inférieur et moyen : représenté par des oolithes ferrugineuses de Deglen. Des calcaires gris qui passent aux calcaires micro-gréseux, affleurant au niveau du Djebel Tazmouret. - Aaléno-Bajocien: Calcaires à oolithes ferrugineuses.
	Inférieur Lias	<p>Ensemble calcaire de 300m d'épaisseur.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lias sup : Calcaires à encolithes de Belaïch dans le Horst de Rhar-Roubane à Djebel Belaïch. - Lias moy: Calcaires homogènes charmouthiens affleurant au Djebel Zeraïg et dans les Béni- Snassen. - Lias inf : Calcaires bleuâtres avec des passées dolomitiques affleurant dans la zone de Sidi-El-Abed au Sud de Rhar-Roubane.

I.2.2.3. Le Cénozoïque

Le Miocène transgressif est formé par une bande de grès calcaire qui s'appuie sur le Jurassique au Nord et au Sud de la plaine de Maghnia, plus on s'éloigne de ce contact vers le centre du bassin, plus le pourcentage des particules fines augmente et les grès sont progressivement remplacés par des horizons argileux ou marneux (d'âge Serravalien) gris plus épais environ 500 m d'épaisseur.

I.2.2.4. Le Plio-Quaternaire

Il affleure au sommet des formations précédentes, il est défini par une série complexe de dépôts discontinus composé d'éléments hétérogènes, avec quelques lambeaux de basaltes, ce qui signifie la présence d'une animation volcaniques (Bonnet P., 1966).

- Au Sud de la vallée de Maghnia, de part et d'autre des oueds Mehaguène et Ouardefou, s'étalent de puissantes formations pliocènes et quaternaires reposant sur des marnes miocènes à l'Est de la Tafna (fig.I.3).

- A l'Ouest, ce sont des alluvions rouges ou noires formées de graviers, de sable grossiers et de tufs.

- A l'Est d'Oued Abbés, s'étend une zone découpée par des vallées parallèles assez rapprochées, remblayées de sables rouges et de galets, séparées par des crêtes abruptes couronnées de tufs.

Des alluvions tendent à réaliser un nivellement par compensation des variations topographiques du relief miocène enterré, L'épaisseur de ces derniers diminue sur les crêtes miocènes et augmente au-dessus des cuvettes (Braik F & Boudieb H., 2004).

I.2.3- Etude structurale de la région d'étude

D'après Lucas (1942), La région étudiée englobe plusieurs unités structurales, On y différencie régulièrement du Sud au Nord :

- Une zone synclinale (Ras-Asfor),
- Une zone anticlinale (au Nord de Rhar-Roubane et de Béni-Bahdel),
- Une zone synclinale (des Monts de Kef),
- Une zone anticlinale (de Djebel Hamra),
- Une zone dévalée (de la plaine de Maghnia).

En plus, la plaine correspond à un fossé d'effondrement, rempli par des dépôts miocènes et quaternaires, dont les limites sont :

- Au Nord, le synclinal perché du type jurassique du Djebel Fillaoucène,
- Au Sud, le grand anticlinal de Rhar-Roubane.

I.3- Contexte hydrogéologique

I.3.1- Limites et les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères

L'étude hydrogéologique de la plaine de Maghnia, qui est le prolongement oriental de la plaine marocaine des Angads, a pour objectif de connaître les caractéristiques hydrodynamiques et hydrogéologiques de l'aquifère. Cette zone est caractérisée par des activités dans les domaines de l'industrie et de l'agriculture, ce qui annonce une grande exploitation de la nappe par plusieurs puits et forages se traduisant dans la réalité par une diminution du niveau piézométrique (Baba Hamed K., 2007).

Les caractérisations hydrogéologiques et les limites des formations aquifères de la zone d'étude sont inventoriées sur le tableau I.4:

Tableau I.4 : Inventaire des réservoirs aquifères de la région (Baba Hamed K., 2007)

Epaisseur (m)	Etage	Lithologie	Perméabilité (nature)
25-120	Plio-quaternaire	Alluvions	Perméables
50-800	Tortonien	Grès	Perméables
	Serravalien	Marnes	Imperméables
100	Tithonien supérieur	Dolomies de Terny	Perméables
100	Tithonien inférieur	Marno-calcaires de Raouraï	Imperméables
200	Kimméridgien supérieur	Dolomies de Tlemcen	Perméables
300-400	Kimméridgien supérieur - Oxfordien supérieur	Intercalations de marnes dans les grès bruns	peu perméables
150-250	Callovo-Oxfordien	Argiles de Saïda	Imperméables
300-400	Lias	Calcaires	Perméables
?	Permo-Trias	Argiles et grès	Imperméables
?	Primaire	Schistes et quartzites	Imperméables
?	âge non déterminé ?	Granites	Imperméables

I.3.2- Nappe du Plio-Quaternaire

L'aquifère de Maghnia est affecté par des variations des caractéristiques hydrodynamiques, il est caractérisé par différentes formations d'âge plio-quaternaire, la genèse d'un grand réservoir (nappe alluvionnaire), cette dernière varie d'un endroit à un autre en ce qui concerne le niveau d'eau, à cause de la surexploitation des puits et des forages pour l'irrigation et l'alimentation humaine (Baba Hamed K, 2007).

Le substratum de la nappe alluviale de la plaine étudiée, est défini par une formation imperméable, ce sont les marnes du Miocène (Serravalien), ces formations apparaissent en surface vers la périphérie de la plaine et s'enfoncent rapidement sous les formations alluvionnaires (Bonnet P, 1965 *in* Baba Hamed K., 2007).

Dans le cadre de cette étude Bonnet (1965,1969) a montré que le remplissage plio-quaternaire varie d'une localité à une autre (épaisseur). Ce remplissage contient une nappe très importante exploitée pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable, par des puits, Il devient épais lorsqu'on se déplace vers le centre de la plaine comme le montre la figure I.5.

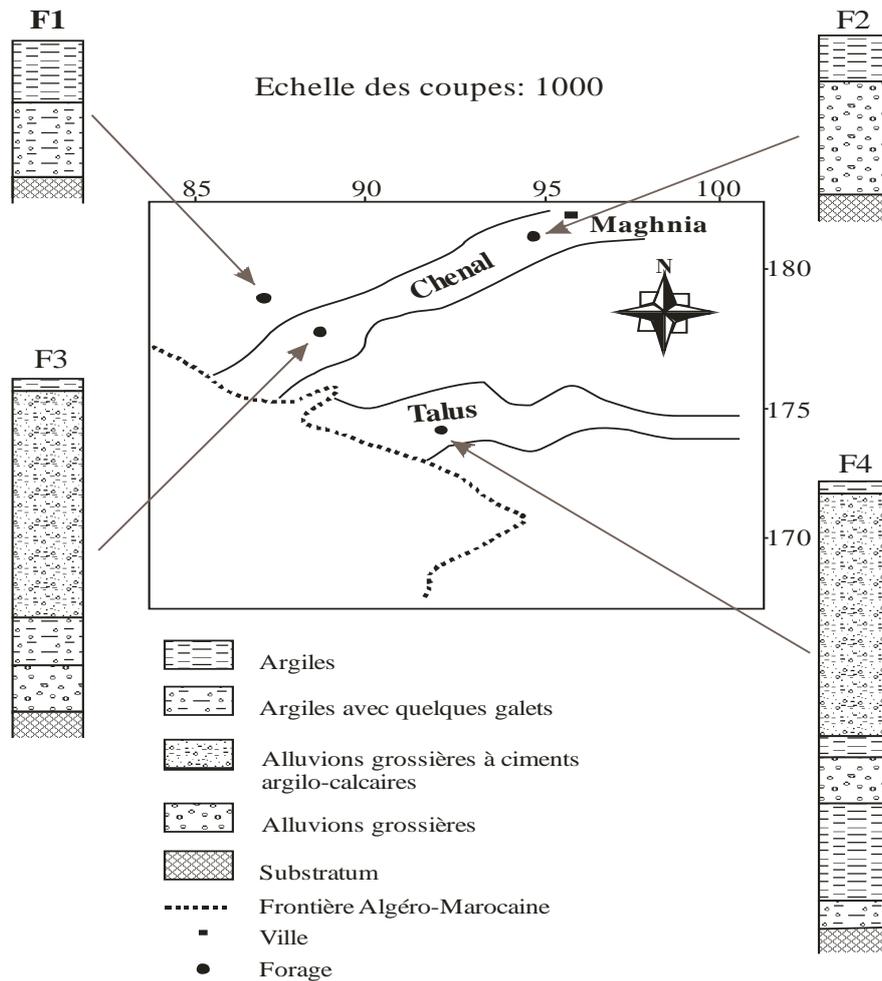


Figure I.5: Coupe des forages réalisés dans la plaine de Maghnia (Baba Hamed K., 2007)

Le substratum de la plaine est représenté par des marnes miocènes qui ont été atteintes plusieurs fois par des puits et forage de reconnaissance réalisés depuis 1948.

L'analyse des colonnes lithologiques de ces forages, montre que le remplissage de la plaine apparaît comme un empilement hétérogène d'argile stérile, d'alluvions grossières et de sable.

La plaine contient deux secteurs particuliers (Baba Hamed K., 2007) :

♦ **Un chenal**, orienté SW-NE et de pente NE, Il s'agit d'une ancienne vallée d'oued creusé dans les marnes miocènes et comblé par des alluvions.

♦ **Un Talus**, orienté E-W, il comprend des poudingues de galets de grande taille faiblement usées et à la base des passés argilo-sableuses.

I.3.3-Analyse piézométrique

La mesure du niveau des eaux souterraines est d'une importance fondamentale dans l'hydrogéologie. Le niveau des eaux souterraines de l'aquifère peut être utilisé pour plusieurs raisons, notamment pour la construction d'une carte piézométrique qui est nécessaire afin de connaître l'extension de l'aquifère, la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leurs zones d'accumulation.

Le tracé de la carte piézométrique réalisé en 1995 et en 2003 met en évidence (fig.I.6) :

Un gradient hydraulique qui n'est pas constant, sa variation pourrait s'expliquer probablement par l'hétérogénéité du terrain, ce dernier influe sur les paramètres de l'infiltration et l'évaporation.

La hauteur piézométrique varie entre 366,5m et 532,23m sur la carte piézométrique de Mai 1995, elle varie entre 358,2m et 474,2m pour celle de Décembre 2003, et entre 345,73m et 412,03m pour celle de Janvier 2010, soit une différence de charge hydraulique successive de 165,7m, 116m et 66,3m, Cette variation montre la diminution des précipitations et la surexploitation de la nappe.

L'écoulement souterrain s'effectue principalement sur les trois cartes, du Sud vers le Nord de la plaine de Maghnia,

Sur la carte piézométrique de 1995 et celle de 2003, l'axe de drainage principal d'écoulement est orienté du SSW vers NNE, l'écoulement diverge vers les deux extrémités Ouest et Est, de la plaine puis converge en aval de la plaine (Nord de la plaine), avec apparition d'une zone de dépression, la ligne de partage est située au centre de la plaine.

La carte piézométrique de Janvier 2010, montre une convergence des écoulements souterrains vers des dépressions situés à l'Ouest et au Nord de la plaine. L'apparition de ces dépressions est due probablement à l'exploitation excessive des eaux souterraines de la plaine.

a- Drainage de la nappe : La nappe, est drainée par l'oued Abbés et Oued Aouina, en plus, elle draine dans la partie centrale oued Méhaguene, donc une partie des écoulements échappe au drainage de l'oued Ouardefou.

b- Alimentation de la nappe : La recharge de l'aquifère plio-quaternaire se fait soit par :

- alimentation par les précipitations
- alimentation par les Monts de Tlemcen (Jurassique).
- alimentation par la plaine des Angads (Maroc) (Baba Hamed K., 2007).

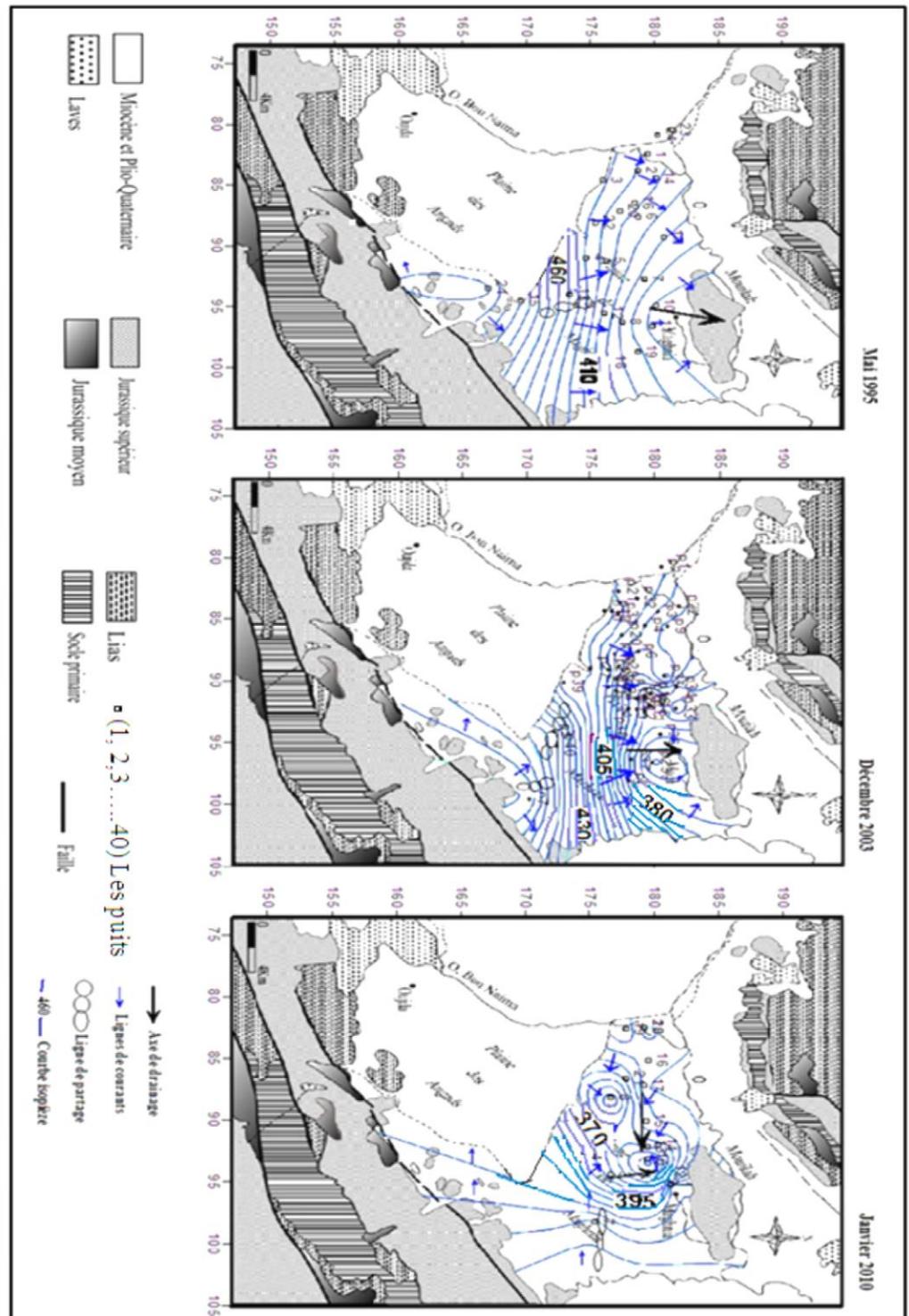


Figure I.6 : Cartes piézométriques de la plaine de Maghnia (Mai 1995, Décembre 2003 et Janvier 2010).

I.4- Conclusion

D'après l'étude hydrogéologique sur l'aquifères plio-quadernaire de la plaine de Maghnia, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- l'évolution du niveau piézométrique pour la période 1995-2010, met en évidence une diminution des précipitations et la surexploitation de la nappe,

- l'écoulement souterrain s'effectue principalement sur les trois cartes, du Sud vers le Nord de la plaine de Maghnia avec l'apparition de quelques dépressions au Nord-Ouest et au centre de la plaine durant les dernières années, ces dépressions sont dues probablement à l'exploitation excessive des eaux souterraines.

Chapitre 2

Climatologie

II.1-Contexte climatique

L’objectif principal de cette partie est le traitement et la présentation des données Climatiques afin de montrer l’évolution des paramètres pluviométrique et thermique et de donner une idée sur le climat de la région.

Pour ce faire, nous avons retenu la station de Maghnia dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Caractéristiques de la station de mesure.

	Station	Coordonnées			
Maghnia	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d’enregistrement	Etat
	34°81N	01°78W	428	1979/1980-2015/2016	Opérationnelle

Source : A.N.R.H

II.2- Etude des précipitations

II.2.1-Etude de la variation pluviométrique annuelle

Le tableau II.2 et la figure II.1, représentent la variation des précipitations annuelles à la station de Maghnia durant la période 1979/ 1980 à 2015/2016, où les précipitations fluctuent entre 172.6mm enregistrée en 1982/1983 et 485.5 mm observée en 1994/1995, avec une moyenne interannuelle de 302,1 mm.

Tableau (II.2) : Valeurs des précipitations moyennes annuelles à la station de Maghnia. (1979/1980-2015/2016).

Années	1979/1980	1980/1981	1981/1982	1982/1983	1983/1984	1984/1985
P(mm)	467,1	452,7	203,2	172,9	261,2	247,2
Années	1985/1986	1986/1987	1987/1988	1988/1989	1989/1990	1990/1991
P(mm)	290,7	393,3	189,2	274,8	290,9	264,4
Années	1991/1992	1992/1993	1993/1994	1994/1995	1995/1996	1996/1997
P(mm)	442,1	248,7	272,7	264,2	343,4	230,4
Années	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001	2001/2002	2002/2003
P(mm)	302,5	221,1	200,6	240,2	368,8	242,7
Années	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009
P(mm)	364,6	266,8	243,5	287,4	257,9	385,3
Années	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
P(mm)	398,1	271,2	305,6	404,8	485,5	447,2
Années	2015/2016	Pmoy = 302,1mm				
P(mm)	172,6					

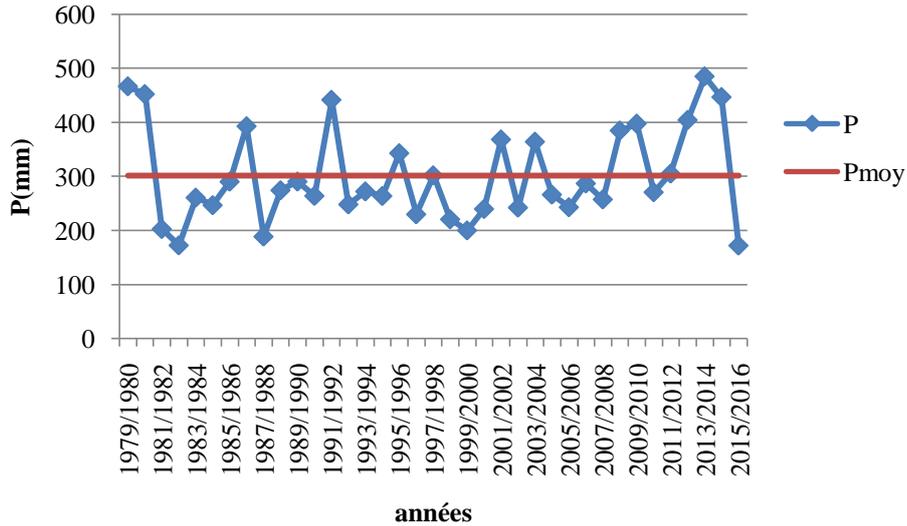


Figure II.1: courbe des précipitations annuelles à la station de Maghnia (1979/2016).

II.2.2-Etude de la variation pluviométrique mensuelle

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia sont consignées sur le tableau II.3.

Tableau II.3: Variations des précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)

Mois	S	O	N	D	J	F
P(mm)	14,1	28,4	43,2	32,7	35,5	35,2
Mois	M	A	M	J	Jt	A
P(mm)	34,6	30,4	33,2	6,5	3,5	4,8

la figure II.2, montre que le mois le plus pluvieux est le mois de Novembre, par contre Juillet est le mois le plus sec.

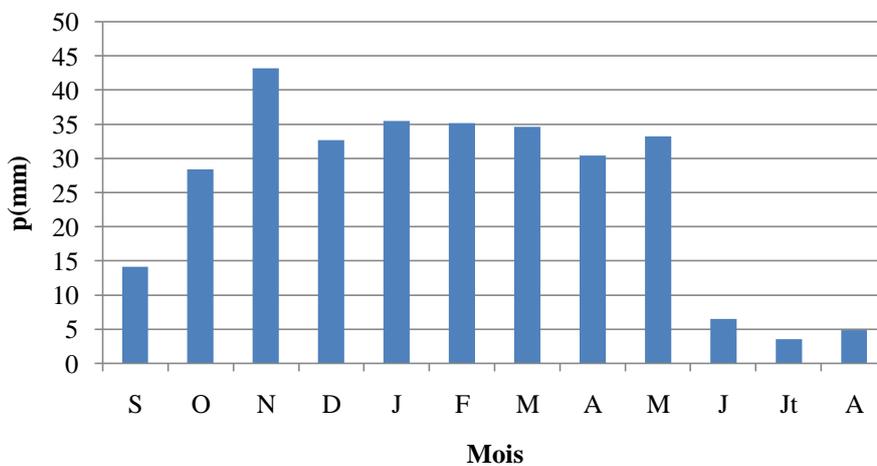


Figure II.2: Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016).

II.2.3-Etude de la variation pluviométrique saisonnière

Le tableau II.4, représente les valeurs moyennes des précipitations saisonnières à la station de Maghnia durant la période (1979/1980-2015/2016).

Tableau II.4: Répartition des précipitations saisonnières à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016).

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Mois	(S.O.N)	(D.J.F)	(M.A.M)	(J.Jt.A)
P(mm)	85.7	103.4	98.2	14.8

Sur la figure II.3, nous remarquons que l'Hiver est la saison la plus arrosée, l'Eté étant la plus sèche.

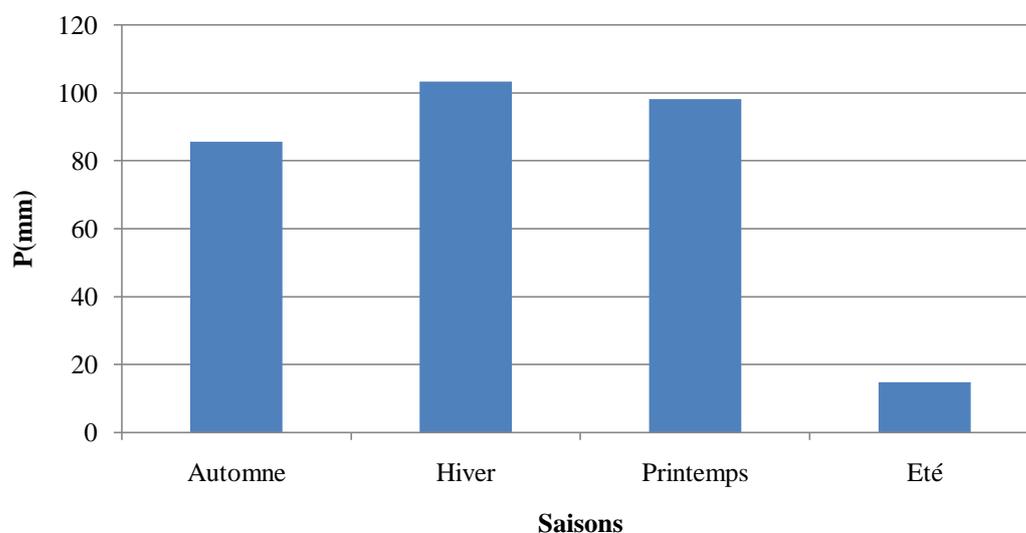


Figure II.3: Histogrammes des précipitations saisonnières à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016).

II.3- Etude de la température

II.3.1-Variation annuelle des températures

Les valeurs de la température moyenne annuelle à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016) sont reportées au tableau II.5 :

Tableau II.5 : Valeurs des Températures moyennes annuelles (1979/1980-2015/2016).

Années	1979/1980	1980/1981	1981/1982	1982/1983	1983/1984	1984/1985
T (°C)	17,7	16,4	19,6	18,02	18,6	18,9
Années	1985/1986	1986/1987	1987/1988	1988/1989	1989/1990	1990/1991
T (°C)	19,03	17,35	15,98	16,45	18,48	16,18
Années	1991/1992	1992/1993	1993/1994	1994/1995	1995/1996	1996/1997
T (°C)	15,81	15,88	16,59	16,89	18,5	17,63
Années	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001	2001/2002	2002/2003
T (°C)	16,68	16,74	16,82	17,93	17,03	17,78
Années	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009
T (°C)	17,38	17,11	17,38	17,58	17,22	17,04
Années	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
T (°C)	20,19	21,03	19,4	18,9	20,1	20,0
Années	2015/2016	Tmoy =				
T (°C)	19,8	17,9°C				

Les températures moyennes annuelles durant cette période oscillent entre 15.81°C enregistrée durant l’année 1991/1992 et 21,03°C en 2010/2011 Figure (.II.4).

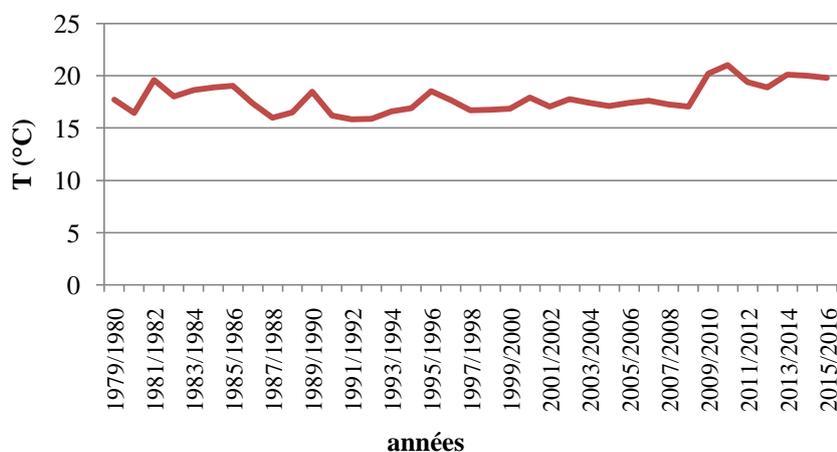


Figure II.4: Variation interannuelle des températures à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)

II.3.2-Variation mensuelle de la température

Les températures moyennes mensuelles de la station de Maghnia sont reportées au tableau II.6.

Tableau II.6 : Valeurs des températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	Jt	Jt	A
Tmoy	23,7	19,1	14,7	11,1	9,9	11,2	13,2	15,5	18,8	23,4	26,9	26,9

La représentation graphique de la variation des températures moyennes mensuelles (fig.II.5), montre que le mois de Janvier est le plus froid (9.9°C) et ceux de Juillet et Août sont les plus chauds avec 26.9°C.

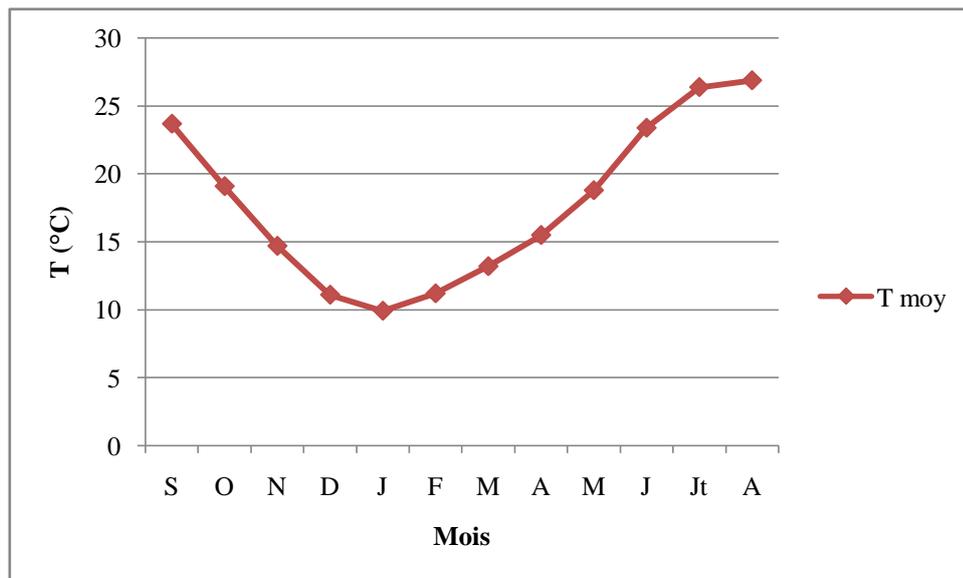


Figure II.5: Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)

II.4-Etude du climat

L'étude du climat nous permet de déterminer les périodes sèches et humides, et on se basant sur des indices, elle permet de déterminer le type du climat de la région à partir des précipitations et des températures. Pour ce faire, nous avons utilisé les données de la chronique (1979/1980-2015/2016), enregistrées à la station de Maghnia Tableau II.7.

Tableau II.7 : Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles

Mois	S	O	N	D	J	F
Pmoy (mm)	14,1	28,4	43,2	32,7	35,5	35,2
T moy (°C)	23,7	19,1	14,7	11,1	9,92	11,2
Mois	M	A	M	J	Jt	A
Pmoy (mm)	34,6	30,4	33,2	6,5	3,5	4,8
T moy (°C)	13,2	15,5	18,8	23,4	26,4	26,9

II.4.1- Méthode graphique de Bagnouls et Gausson

Les diagrammes pluviothermique de Bagnouls et Gausson sont établis selon la relation $P = 2T$, les précipitations sont portées à l'échelle double des températures.

- Pour la période sèche, la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations,
- Pour la période humide, la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures.

Pour la station de Maghnia, la figure II.6 permet de distinguer deux périodes :

- Une période humide : s'étend du mois de Novembre jusqu'à la fin du mois d'Avril,
- Une période sèche : occupe les autres mois de l'année.
-

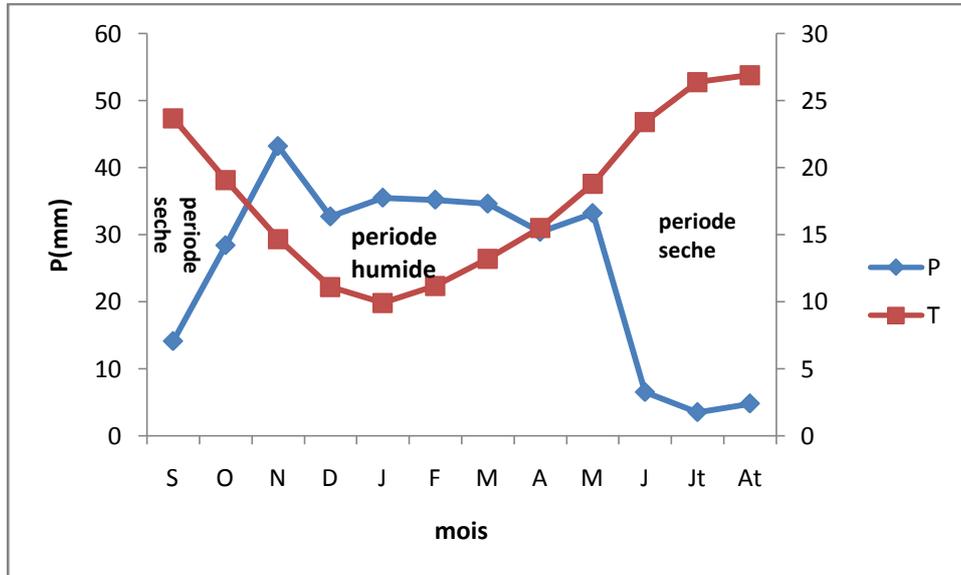


Figure II.6: Diagramme pluviométrique à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)

II.4.2. Indice d'aridité annuelle de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne, noté I, permet de déterminer le degré d'aridité d'une région.

L'indice d'aridité annuel s'écrit :

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

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

T : Température moyenne annuelle (°C)

Tableau II.8: Indice d'aridité de De Martonne.

P (mm)	T (°C)	I
302.1	17.9	10.68

L'indice d'aridité de De Martonne pour la station de Maghnia est de l'ordre de 10.68, reporté sur l'abaque de De Martonne (fig.II.7), indique un climat semi-aride, à écoulement temporaire.

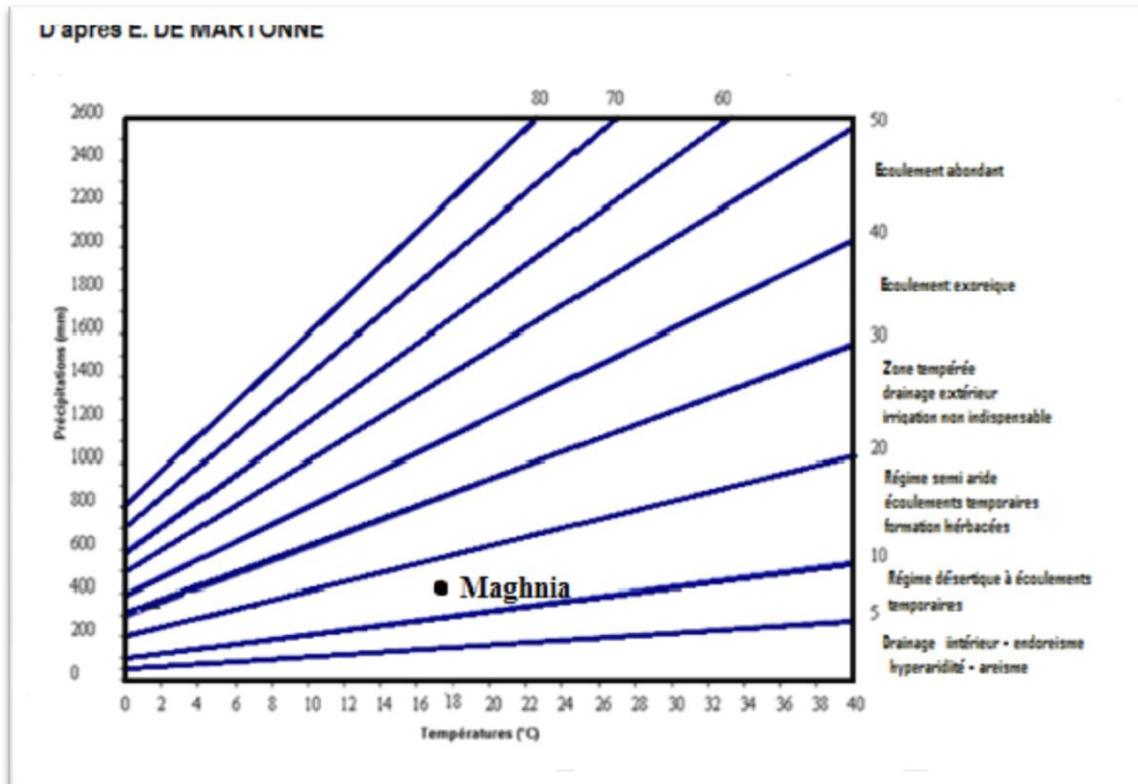


Figure II.7: Indice de De Martonne de la station la station de Maghnia

II.4.3-Indice d’aridité mensuelle de De Martonne

Cet indice est défini par la formule suivante : $I = \frac{12p}{t+10}$

p : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

t: Température moyenne mensuelle (°C)

- Si $I < 10 \Rightarrow$ mois très sec.
- Si $I < 20 \Rightarrow$ mois sec.
- Si $I < 30 \Rightarrow$ mois humide.
- Si $I > 30 \Rightarrow$ mois très humide

Les valeurs des indices d’aridité mensuelle (tableau II.9), indiquent que les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre sont des mois très secs, Novembre et Janvier sont des mois humides relativement aux autres mois qui restent et qui sont plus secs.

Tableau II.9: Valeurs des indices d’aridité mensuelle.

Mois	S	O	N	D	J	F
P moy (mm)	14,1	28,4	43,2	32,7	35,5	35,2
T moy (°C)	23,7	19,1	14,7	11,1	9,92	11,2
I	5,02	11,71	20,98	18,6	21,39	19,92
Mois	Mr	A	M	J	Jt	A
Pmoy (mm)	34,6	30,4	33,2	6,5	3,5	4,8
Tmoy (°C)	13,2	15,5	18,8	23,4	26,4	26,9
I	17,9	14,31	13,83	2,34	1,15	1,56

II.4.4-Indice de Moral

L'indice de Moral s'écrit :

$$I_{\text{Moral}} = P / (T^2 + 10 T + 200)$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

Cet indice permet de dire :

♦ Si, $I_M < 1 \Rightarrow$ climat sec, et si $I_M > 1 \Rightarrow$ climat humide.

A partir de l'équation précédente, On calcule $I_{\text{Moral}} = 0.43$

L'indice de Moral étant inférieur à 1, ce qui signifie que la zone est touchée par la sécheresse.

II.5- Conclusion

Les données climatologiques ainsi que les résultats obtenus selon les différentes méthodes, permettent d'attribuer à la région étudiée un climat semi-aride, caractérisé par deux périodes :

-Une période humide : s'étend de Novembre jusqu'à la fin Avril,

-Une période sèche : occupant les autres mois de l'année.

Les valeurs des indices d'aridité annuelle et mensuelle, indiquent que la zone est touchée par une forte sécheresse.

Chapitre 4

Hydro-

chimie

III.1-Méthodologie

L'étude hydro chimique concerne un nombre de 40 puits, répartis sur la plaine de Maghnia, les échantillons ont été prélevés majoritairement dans la nappe du Miocène et Plio – Quaternaire, (fig.III.1) et les analyses ont été réalisées par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques).

Les analyses chimiques concernent: le pH, la conductivité électrique, la minéralisation, les éléments majeurs : les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), et les anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-). Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines portent sur :

- Une comparaison des minimas et maximas des différentes teneurs des éléments chimiques, ainsi qu'une comparaison des concentrations des éléments dissous par rapport aux normes algériennes de potabilité,
- une classification des faciès, et une étude de qualité des eaux par plusieurs indices [Minéralisation, Kelly's Ratio (KR), Pourcentage de Sodium (% Na) et Sodium Absorption Ratio (SAR)].

La vérification des résultats des analyses physico-chimiques, et aussi la fiabilité des interprétations, dépendent des pourcentages trouvés par la balance ionique (BI), calculée par la formule suivante (en meq/L) :

$$\mathbf{BI} = \frac{|\sum r^+ - \sum r^-|}{\sum r^+ + \sum r^-} \times \mathbf{100}$$

- $\text{BI} \leq 2 \Rightarrow$ Une bonne analyse.
- $2 \leq \text{BI} \leq 5 \Rightarrow$ Une analyse acceptable.
- $\text{BI} > 5 \Rightarrow$ Une mauvaise analyse.

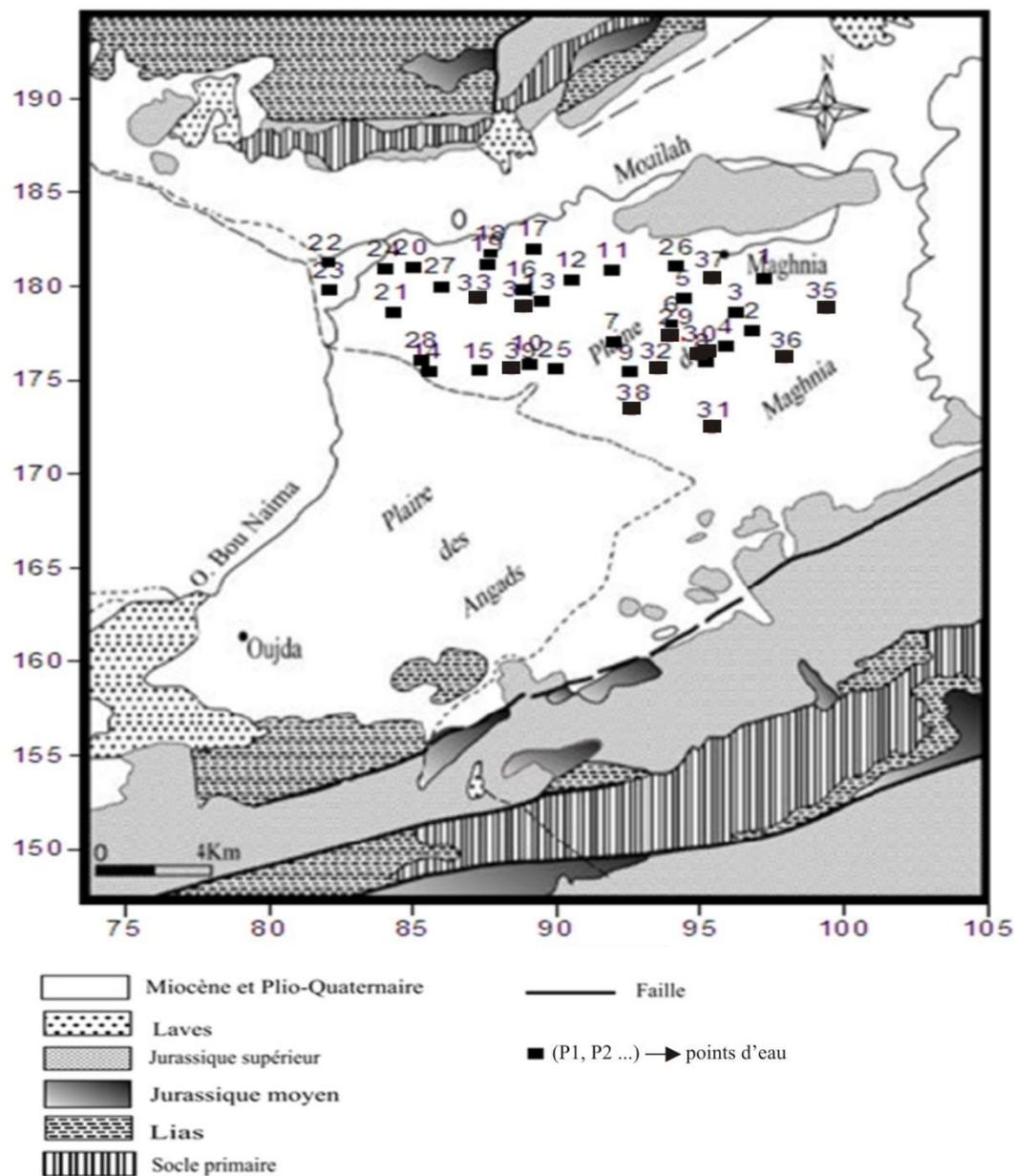


Figure III.1: Localisation des points d'eau de la plaine de Maghnia.

Les valeurs de BI montrent que des 40 points d'eau étudiés, seuls 12 points ont des valeurs de balances ioniques inférieures à 5, les qualifiant par de bonnes analyses (3 puits) et acceptable (9 puits). Les restes ont pour la majeure partie des valeurs proches de 5 Ceci est confirmé par la figure III.2.

Tableau III.1: Résultats de la balance ionique

Puits	Σ Cations (meq/L)	Σ Anions (meq/L)	BI (%)	Résultats
1	38,90	33,21	7,89	Mauvaise
2	15,80	13,06	9,48	Mauvaise
3	18,08	20,97	7,40	Mauvaise
4	17,90	16,59	3,79	Acceptable
5	24,91	28,55	6,81	Mauvaise
6	13,15	11,21	7,95	Mauvaise
7	14,90	28,74	31,70	Mauvaise
8	13,25	11,47	7,20	Mauvaise
9	10,78	7,72	16,57	Mauvaise
10	11,93	10,24	7,61	Mauvaise
11	14,17	22,64	23,01	Mauvaise
12	12,81	18,59	18,42	Mauvaise
13	8,32	8,59	1,62	Mauvaise
14	22,07	19,15	7,10	Mauvaise
15	28,27	24,65	6,83	Mauvaise
16	24,60	24,34	0,54	Bonne
17	20,93	17,56	8,78	Mauvaise
18	22,04	18,88	7,72	Mauvaise
19	22,16	24,14	4,28	Acceptable
20	24,87	21,76	6,65	Mauvaise
21	24,87	20,77	9,00	Mauvaise
22	28,71	30,32	2,72	Acceptable
23	25,36	23,05	4,77	Acceptable
24	24,65	28,50	7,23	Mauvaise
25	27,07	24,88	4,21	Acceptable
26	18,91	24,59	13,07	Mauvaise
27	17,97	25,04	16,43	Mauvaise
28	25,34	23,37	4,06	Acceptable
29	24,06	21,75	5,05	Acceptable
30	23,78	23,66	0,25	Bonne
31	40,16	42,35	2,66	Acceptable
32	14,08	19,51	16,16	Mauvaise
33	24,91	25,96	2,07	Bonne
34	23,63	27,36	7,31	Mauvaise
35	27,04	33,88	11,23	Mauvaise
36	14,76	12,44	8,53	Mauvaise
37	11,37	8,11	16,77	Mauvaise
38	18,03	15,63	7,15	Mauvaise
39	25,12	22,01	6,59	Mauvaise
40	18,01	16,98	2,97	Acceptable

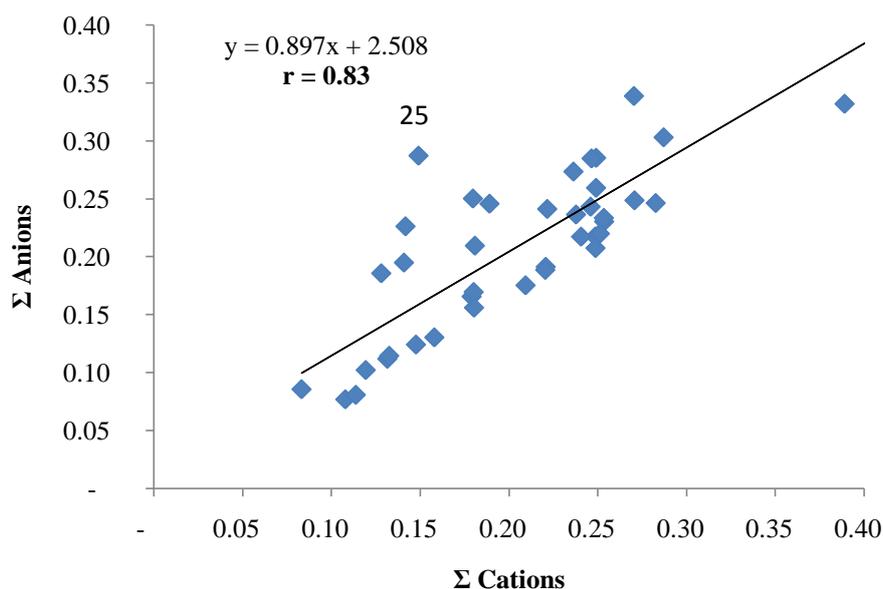


Figure III .2 : Corrélation entre les anions et les cations

Dans la suite de l'étude, nous allons prendre en considération la totalité des analyses (acceptables, bonnes et même celles considérées comme mauvaises), car même la corrélation entre la somme des cations et la somme des anions met en évidence en général une bonne similitude.

III.2- Caractéristiques physico-chimiques

Le chimisme des eaux souterraines dépend principalement du faciès lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs et mineurs.

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs minimales, maximales et moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux de la zone d'étude.

Tableau III.2: Valeurs minimales, maximales, moyennes, des paramètres physico-chimiques des eaux de la plaine de Maghnia

Eléments (mg/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Ce (μ.s/cm)	pH
Maximum	226,7	197,04	312,6	14	976,25	499.2	566,2	3700	8,1
Minimum	72	35,5	24	0,7	115	37	156	740	7,1
Moyenne	149,35	116,27	168,3	7,35	545,625	268.1	361,1	2220	7,6

D'après les résultats d'analyse des points d'eau (annexe I), nous constatons une variation importante en teneurs des cations et des anions :

26

a- Calcium : Métal alcalin terreux, composant majeur de la dureté de l'eau (TH). Sa teneur varie essentiellement selon la nature des terrains traversés [Rodier, 1984].

Les teneurs en Ca^{2+} des eaux de la nappe mio-plio-quaternaire, varient entre 72mg/L et 226.7 mg/L, la quasi totalité des valeurs ne dépassent pas la valeur limite recommandée par les normes algériennes de potabilité (Annexe II), fixée à 200 mg/L (trait rouge), à l'exception des concentrations au niveau de P31 qui est de 226.7.mg/L

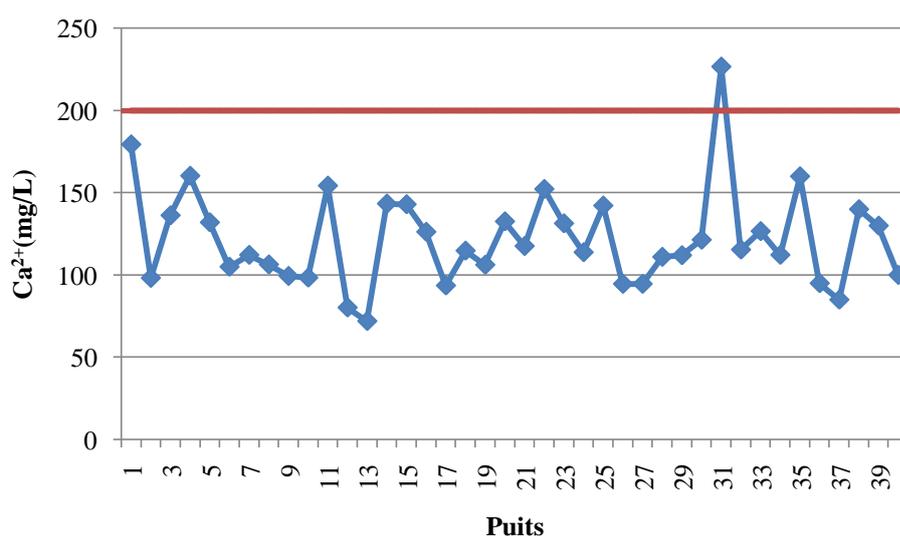


Figure III.3: Variation de l'ion Calcium

b- Magnésium: Un des éléments les plus répandus dans la nature, il constitue un élément significatif de la dureté de l'eau, il donne un goût désagréable à l'eau (Rodier, 1984).

Les valeurs de Mg^{2+} sont comprises entre 35.5mg/L et 197.04 mg/L, et dépassant ainsi les 150 mg/L fixée par les normes algériennes (JORA, 2011) (trait rouge) aux puits P1, P5, P31 et P35.

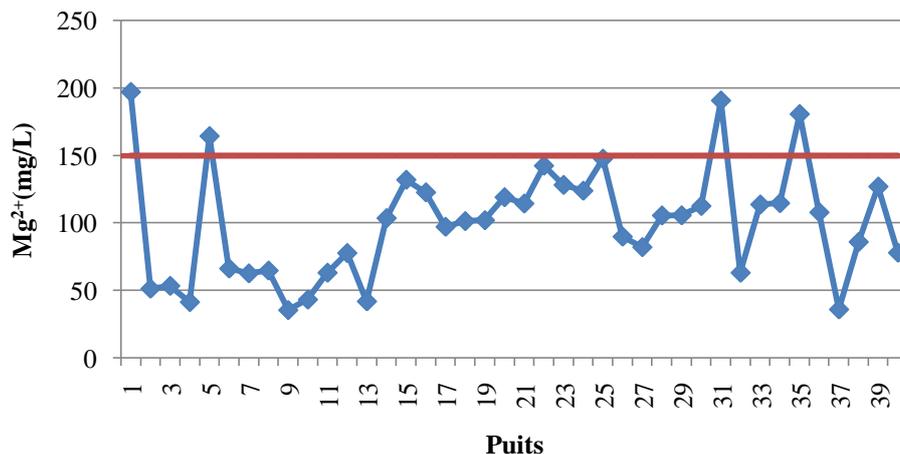


Figure III.4: Variation de l'ion Mg²⁺

c- **Sodium** : Les teneurs en Na⁺ sont comprises entre 24 mg/L et 312.8 mg/L , Dans plusieurs points d'eau (P1, P15, P21 P22 P28 P29 et P31, les concentrations, sont supérieures à la norme algérienne de pc 27 teneur limite à 200mg/L.

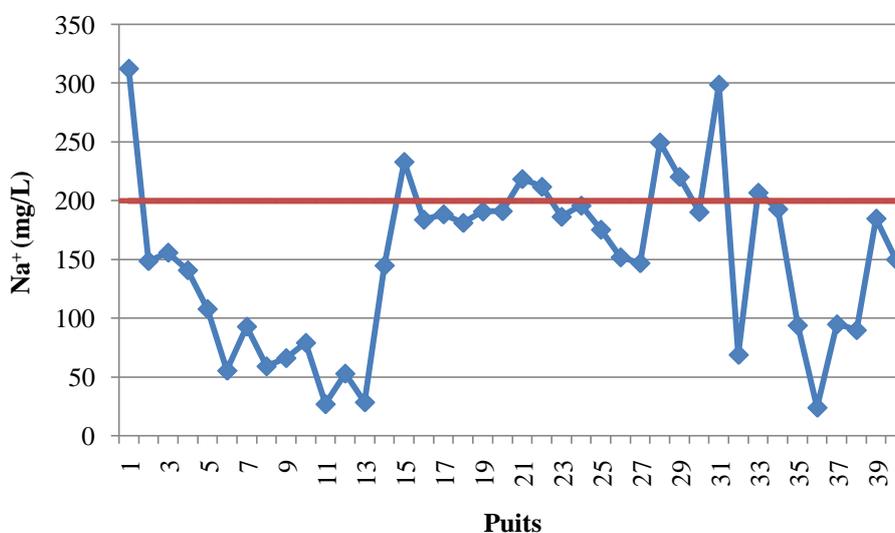
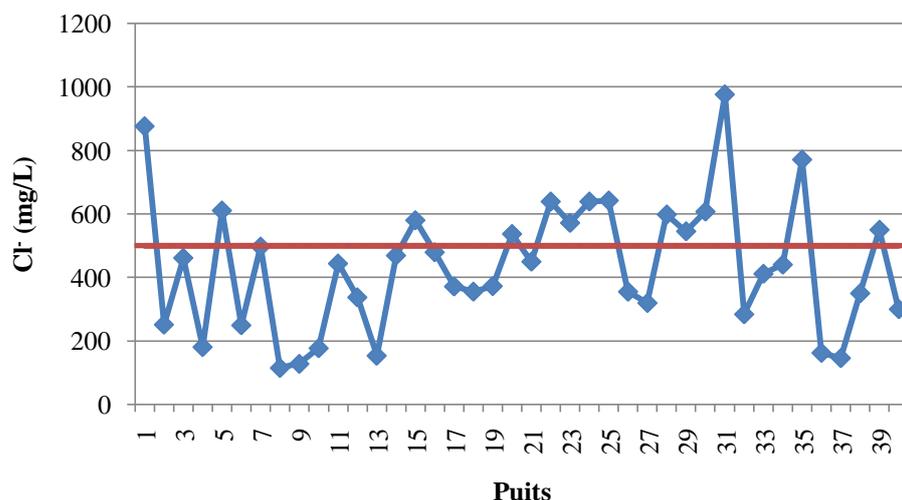
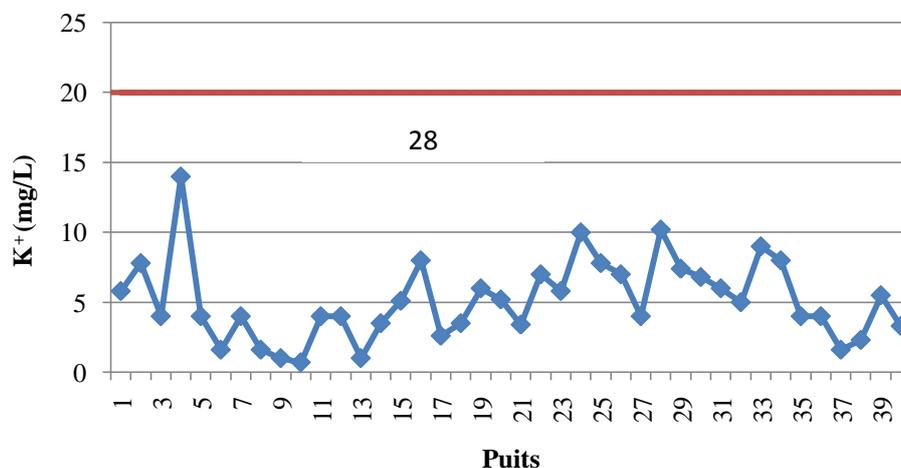


Figure III.5: Variation de l'ion Na⁺

d- **Chlorures**: Sachant que les normes algériennes de potabilité, fixe la valeur limite à 500 mg/L (JORA, 2011), les concentrations en chlorures dans les différents points d'eau sont inacceptables P1.P5.P15.P20.P22.P23.P24.P25.P28.P29.P30.P31.P35, P39, les teneurs sont comprises entre 115 mg/L et 976..25 mg/L,

Figure III.6: Variation des ions Cl⁻

e- Potassium: le taux du potassium varie entre 0.7 mg/L et 14 mg/L dans les eaux souterraines de la plaine de Maghnia. La teneur maximale ne dépasse pas la norme requise (20 mg/L).

Figure III.7: Variation des ions K⁺

e- Sulfates : Naturellement présents dans les eaux, en concentrations très variables (importants au contact de terrains gypseux ou proches de mines de fer), ils sont parfois le témoin d'une pollution industrielle (textile, papeterie...) (Queneau P. et Hubert J., 2009). Selon les normes algériennes de l'eau potable pour les sulfates, fixés à 400,00 mg/l (JORA, 2011), les concentrations étant comprises entre 37 mg/L et 499.2 mg/L, seules le puits P33 avec une concentration de 499.2 mg/L, dépasse la limite fixée.

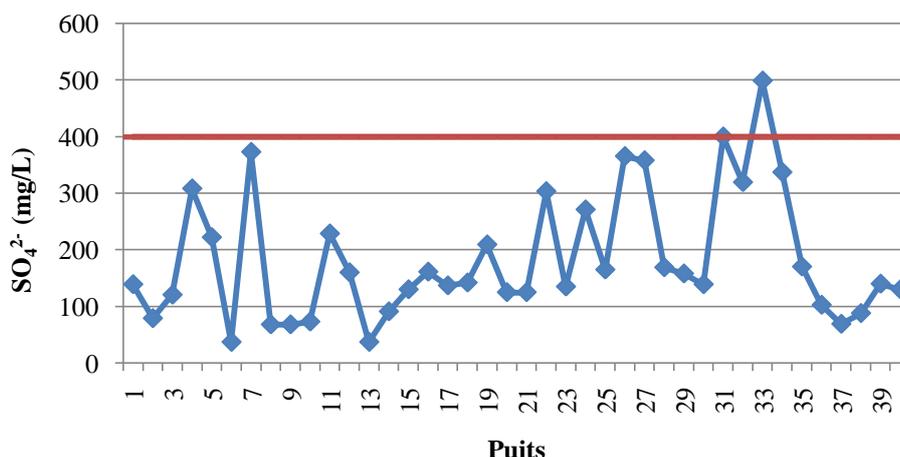


Figure III.8 : Variation des ions SO₄²⁻

L'analyse des caractéristiques hydro chimiques des 40 puits implantés sur la zone d'étude, indique l'existence de très fortes concentrations en Na⁺ et Cl⁻ aux puits (P1,P5, P15, P20,P21, P22,P23 ,P24, P25, P28, P29 ,P30,P31 , P39) localisés en extrême Nord-Ouest (Frontières Marocaines) et vers l'extrême Nord- Est de la plaine de Maghnia, leurs provenance ne peut être que anthropique, avec une probabilité de contamination par les produits chimiques utilisés en agriculture dans la région ou d'une pollution en provenance d'Oued Isly du pays voisin.

Sur d'autre puits situés au Nord - Est, nous observons des teneurs très élevées en Ca²⁺ et SO₄²⁻ (P31, P33) ce qui signifie une possibilité de lessivage des formations gypsifères dans cette zone.

III.3-Faciès des eaux souterraines de la plaine de Maghnia

La classification des eaux soute 29 s faciès chimiques, est donnée sur le tableau III.3:

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyse s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Schoeller-Berkaloff et de Piper.

La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel DIAGRAMME, conçu par Roland Simler du Laboratoire d'hydrogéologie, de l'Université d'Avignon (Version 2007).

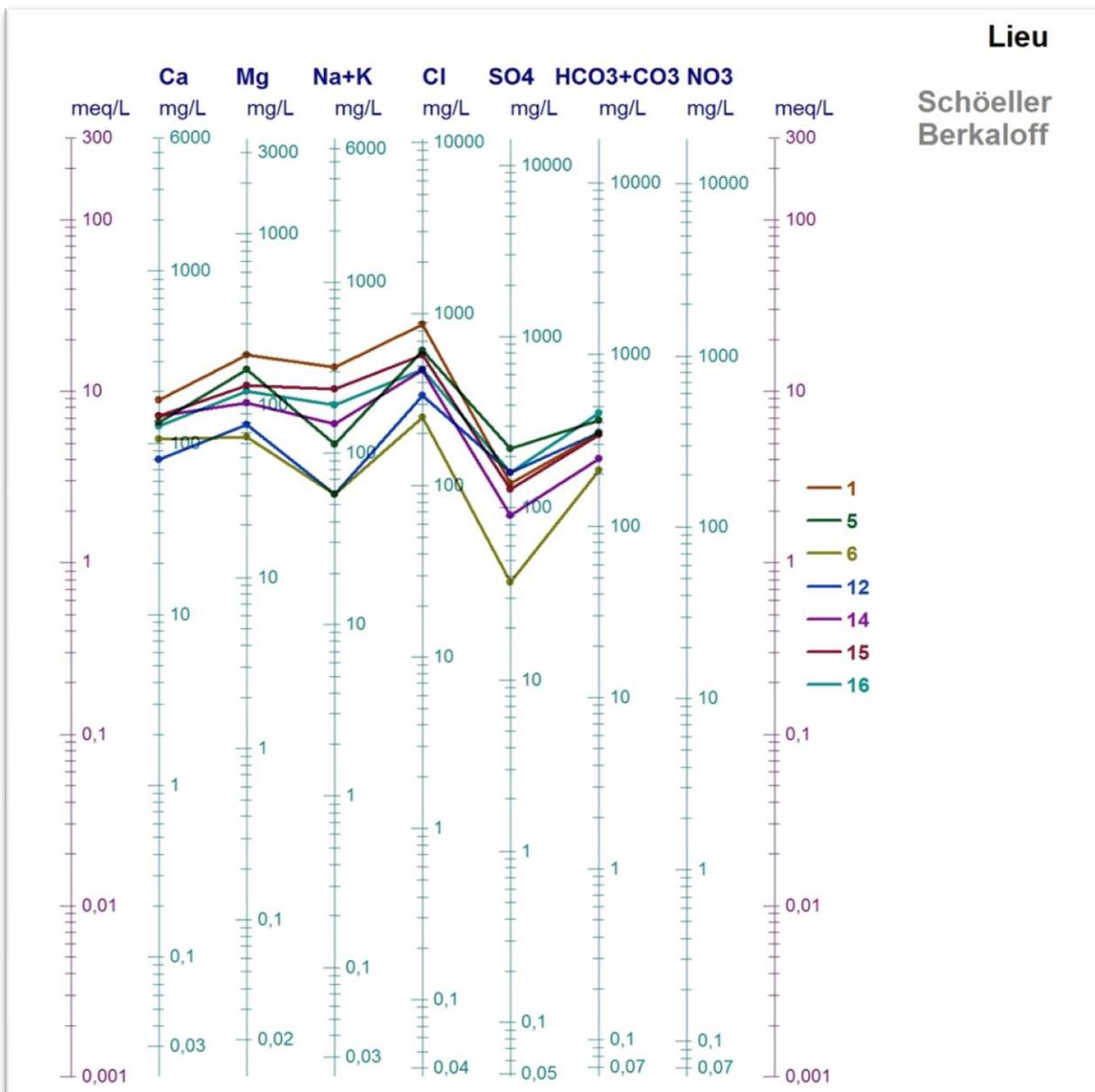
Ces diagrammes sont particulièrement adaptés à la détermination des formules caractéristiques des eaux, ou bien pour comparer des échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

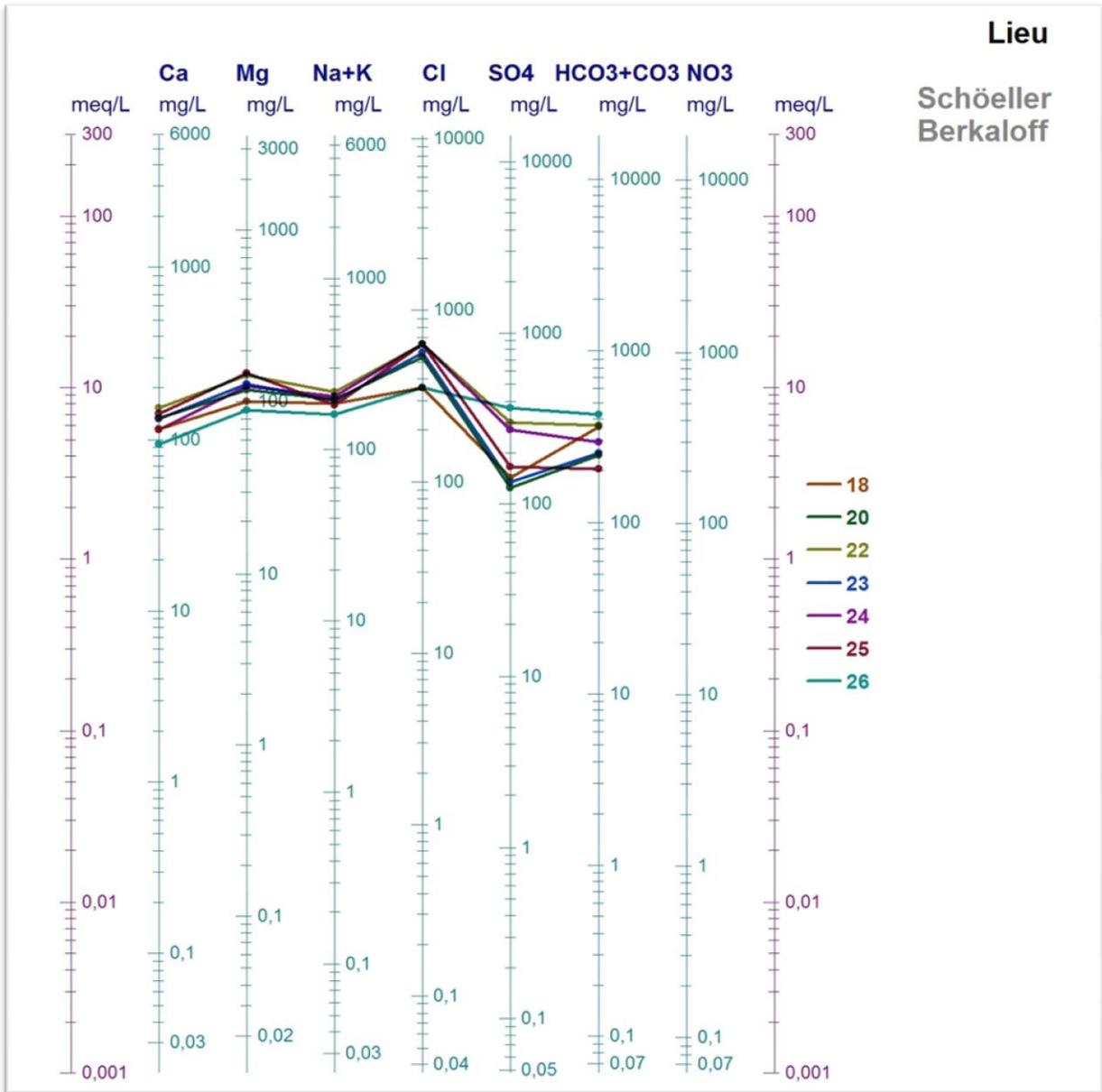
Tableau III.3: Classification des eaux souterraines de la plaine de Maghnia selon leurs faciès chimiques.

Puits	Faciès chimique	Formules caractéristiques
-------	-----------------	---------------------------

P1- P5-P6-P12-P14-P15-P16-P18-P20 P23-P27-P30-P34 P35-P38-P39.	Chloruré magnésien	$Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$ $Mg^{2+} > Na^+ + K^+ > Ca^{2+}$
P24-P31		$Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$ $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ + K^+$
P22-P25-P26-P31-P33		$Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ $Mg^{2+} > Na^+ + K^+ > Ca^{2+}$
P2-P3-P17-P19-P21-P40	Chloruré Sodique et potassique	$Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$ $Na^+ + K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$
P28-P29		$Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$
P9-P10-P11-P13-P37	Chloruré calcique	$Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ + K^+$
P7-P32		
P4	Sulfaté calcique	$SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$ $Ca^{2+} > Na^+ + K^+ > Mg^{2+}$
P8-P36	Bicarbonaté magnésien	$HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ + K^+$

Le report des résultats des analyses des 40 échantillons sur ces diagrammes est représenté sur les figures suivantes :





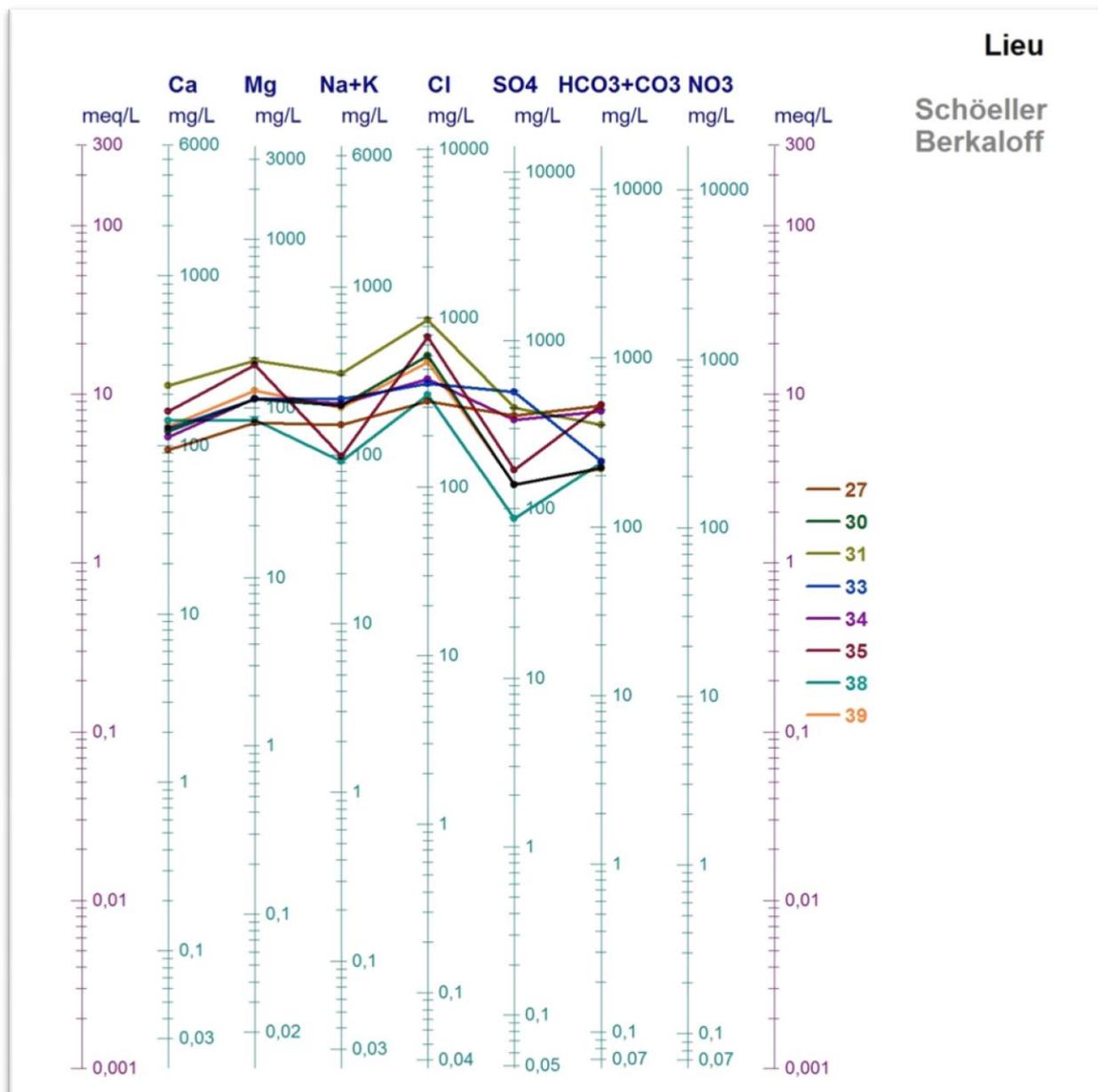


Figure III.9: Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les eaux à faciès chloruré magnésien

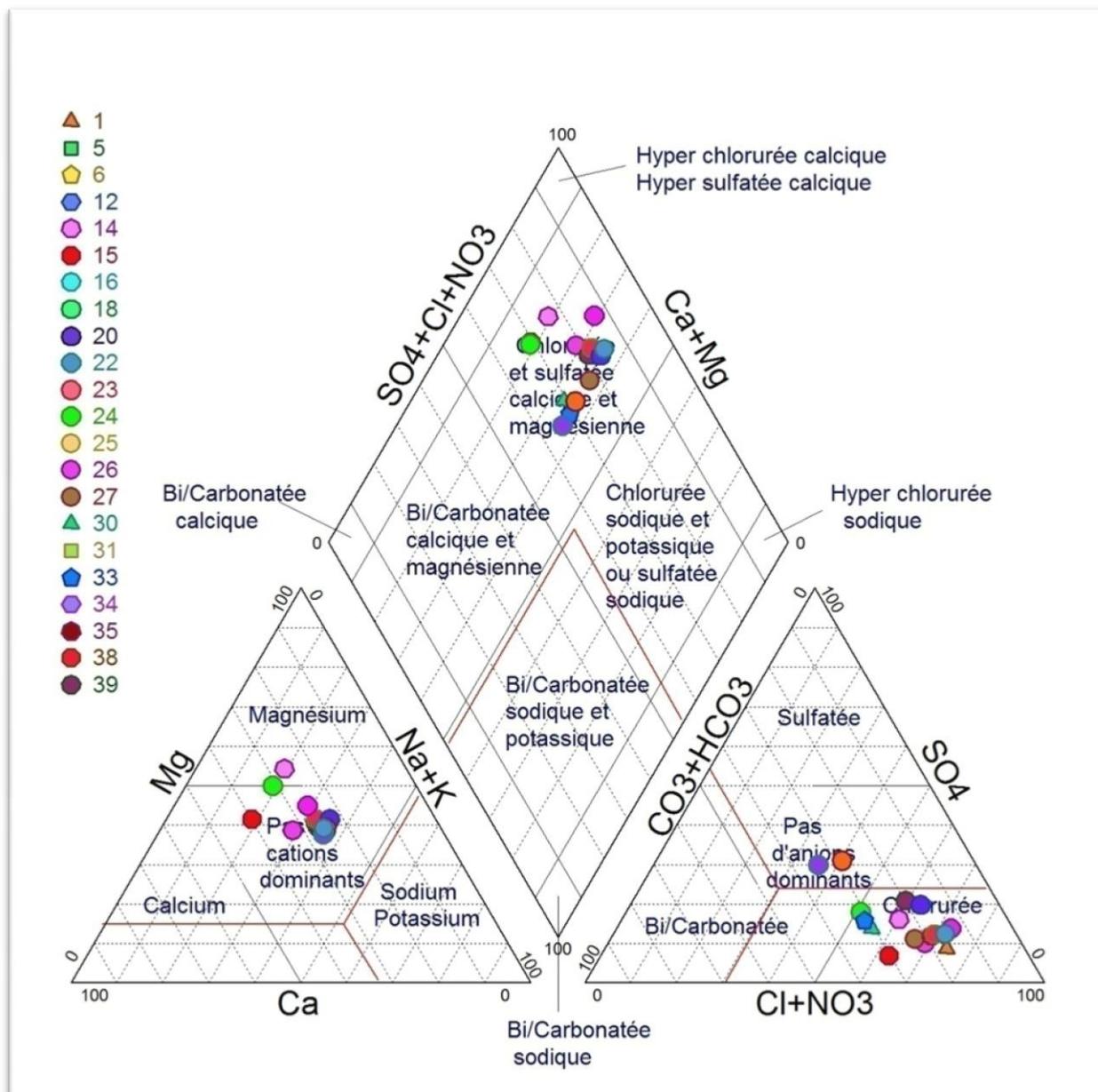


Figure III.10: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès chloruré magnésien

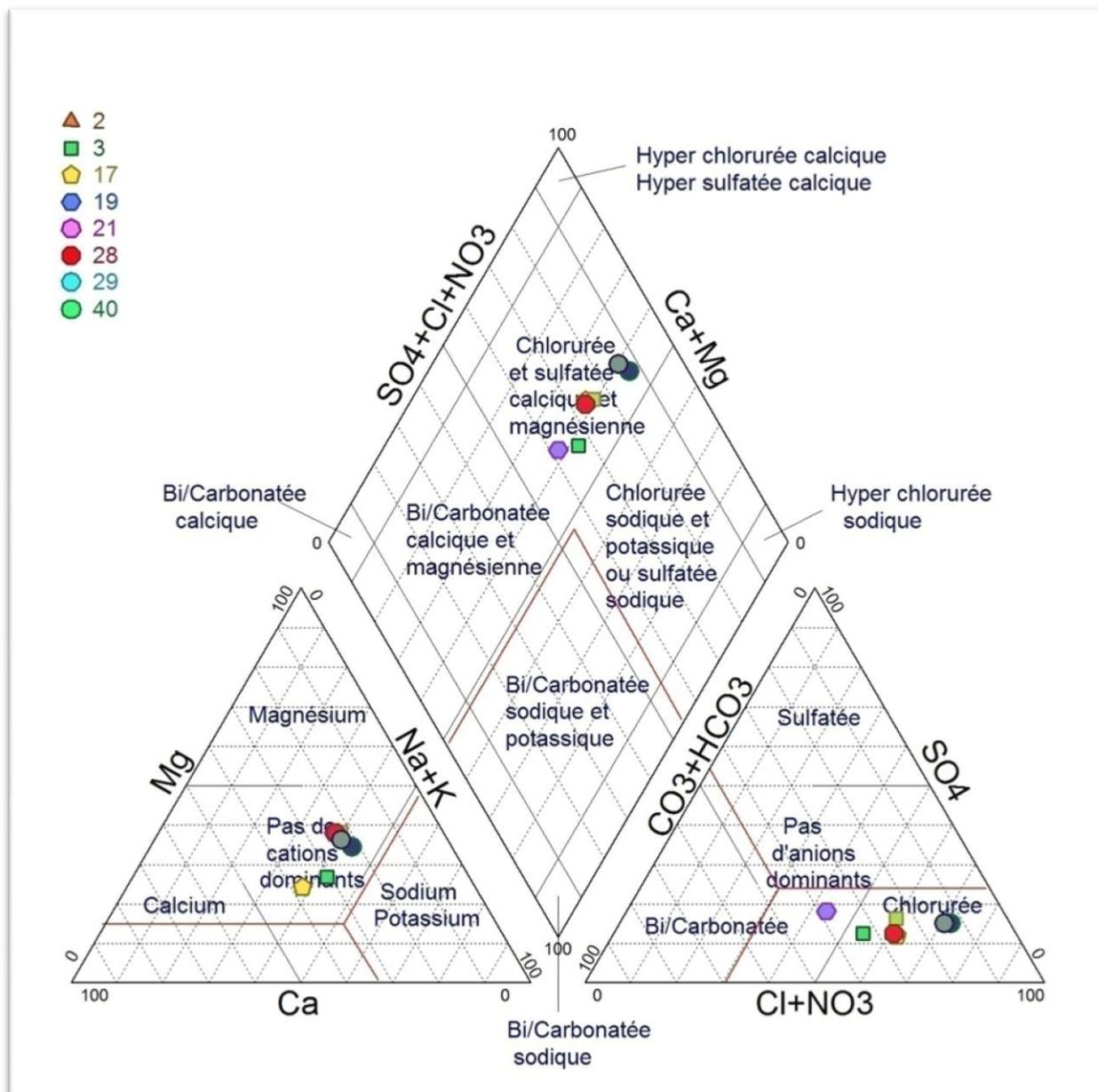


Figure III.12: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès chloruré sodique

Le faciès est chloruré calcique et magnésien avec un penchant vers le chloruré sodique et ceci est dû à l'absence de cations dominants entre le sodium et le magnésium (teneurs en Na^+ et Mg^{2+} très proches

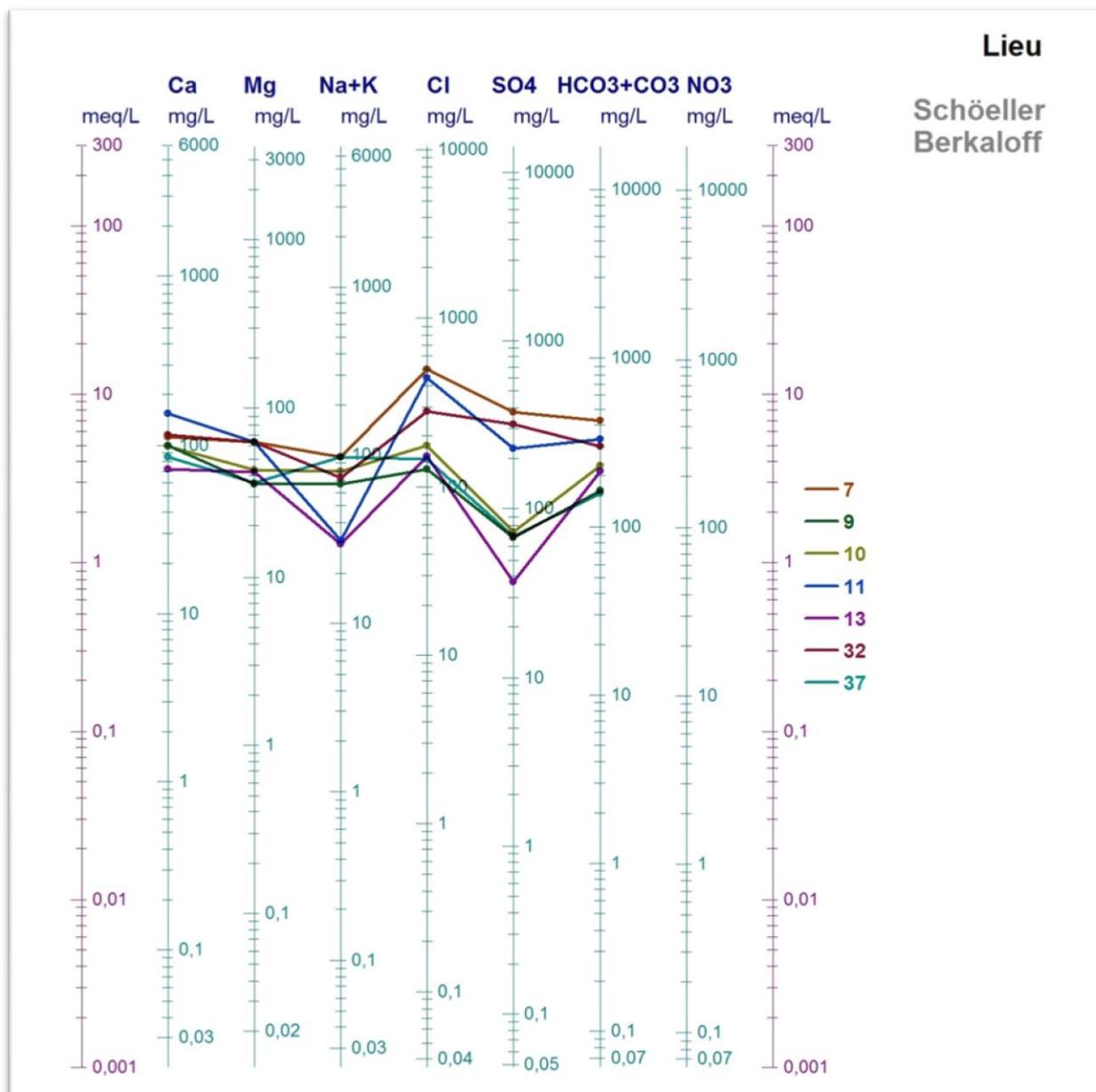


Figure III.13: Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les eaux à faciès chloruré calcique

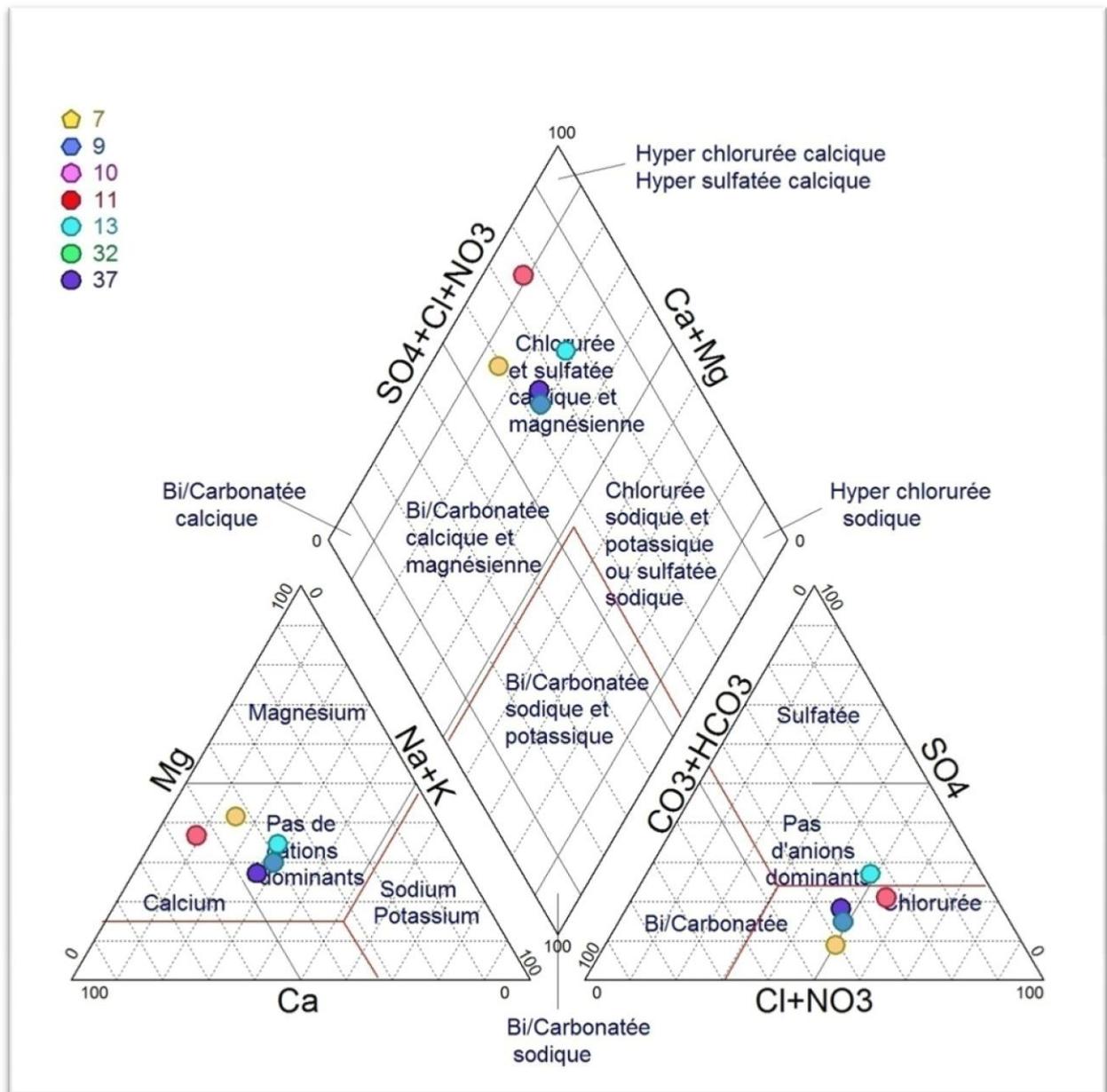


Figure III.14: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès chloruré calcique

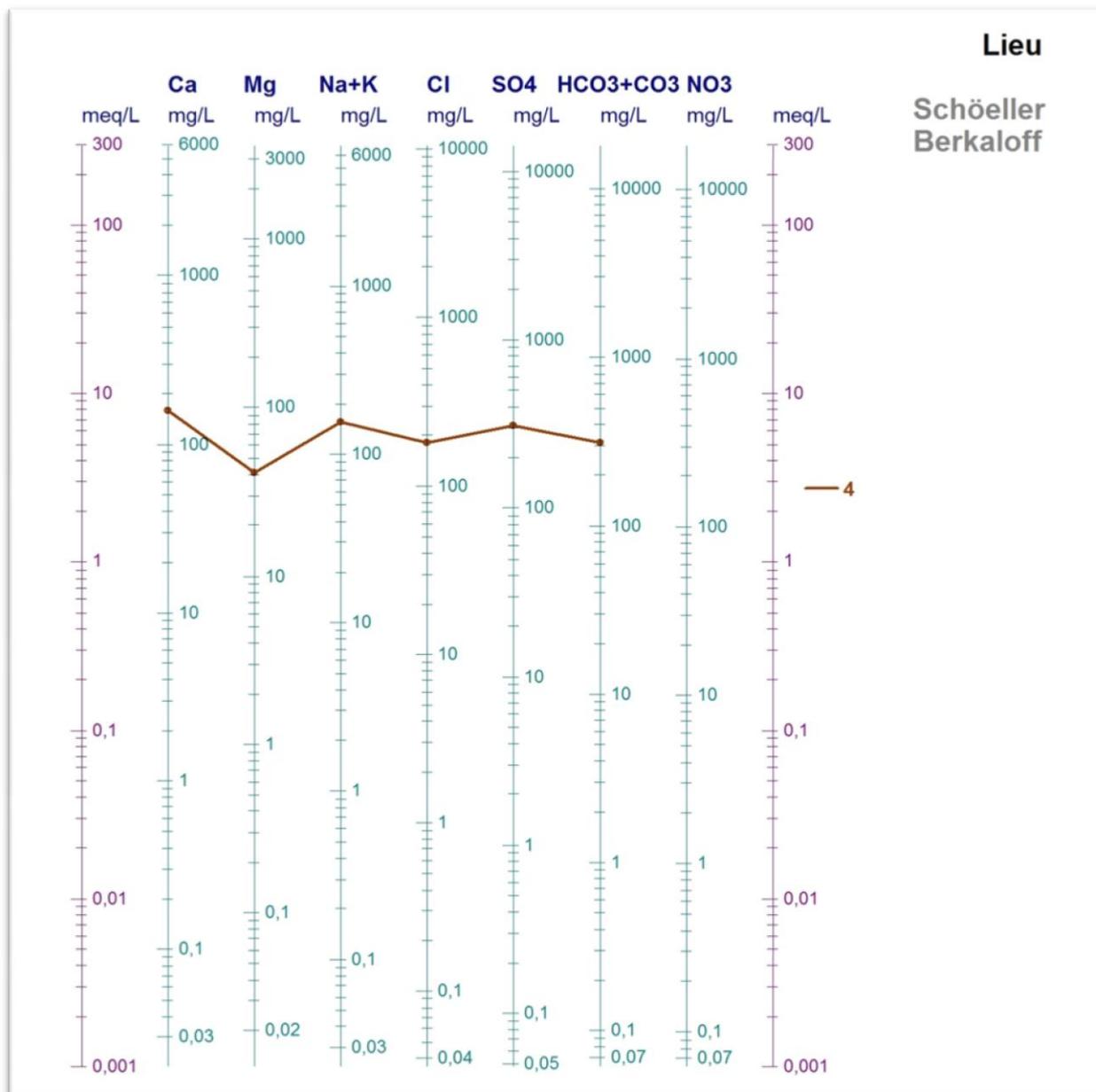


Figure III.15: Diagramme de Schoeller-Berkaloff pour les eaux à faciès sulfaté calcique

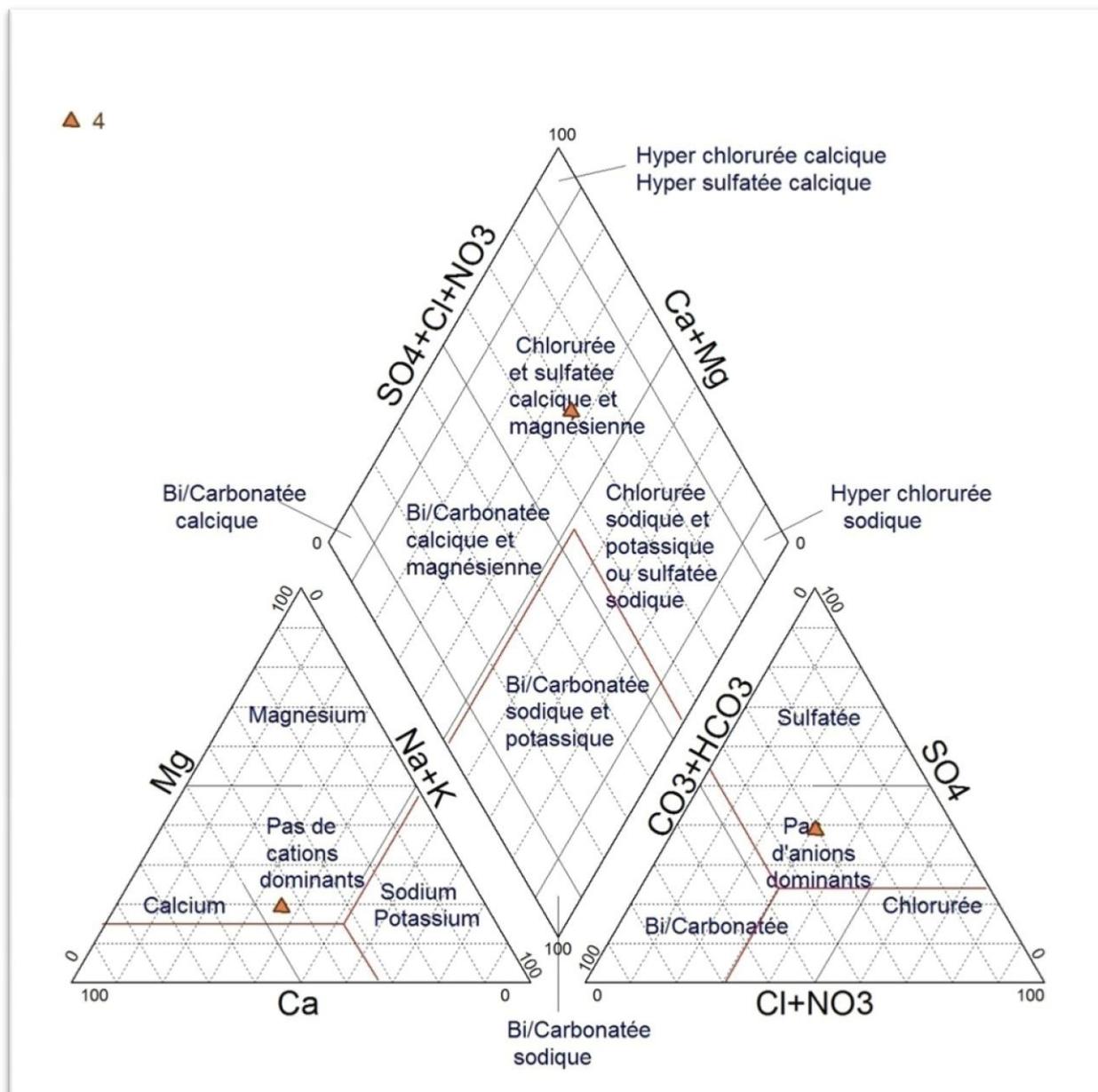


Figure III.16: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès sulfaté calcique

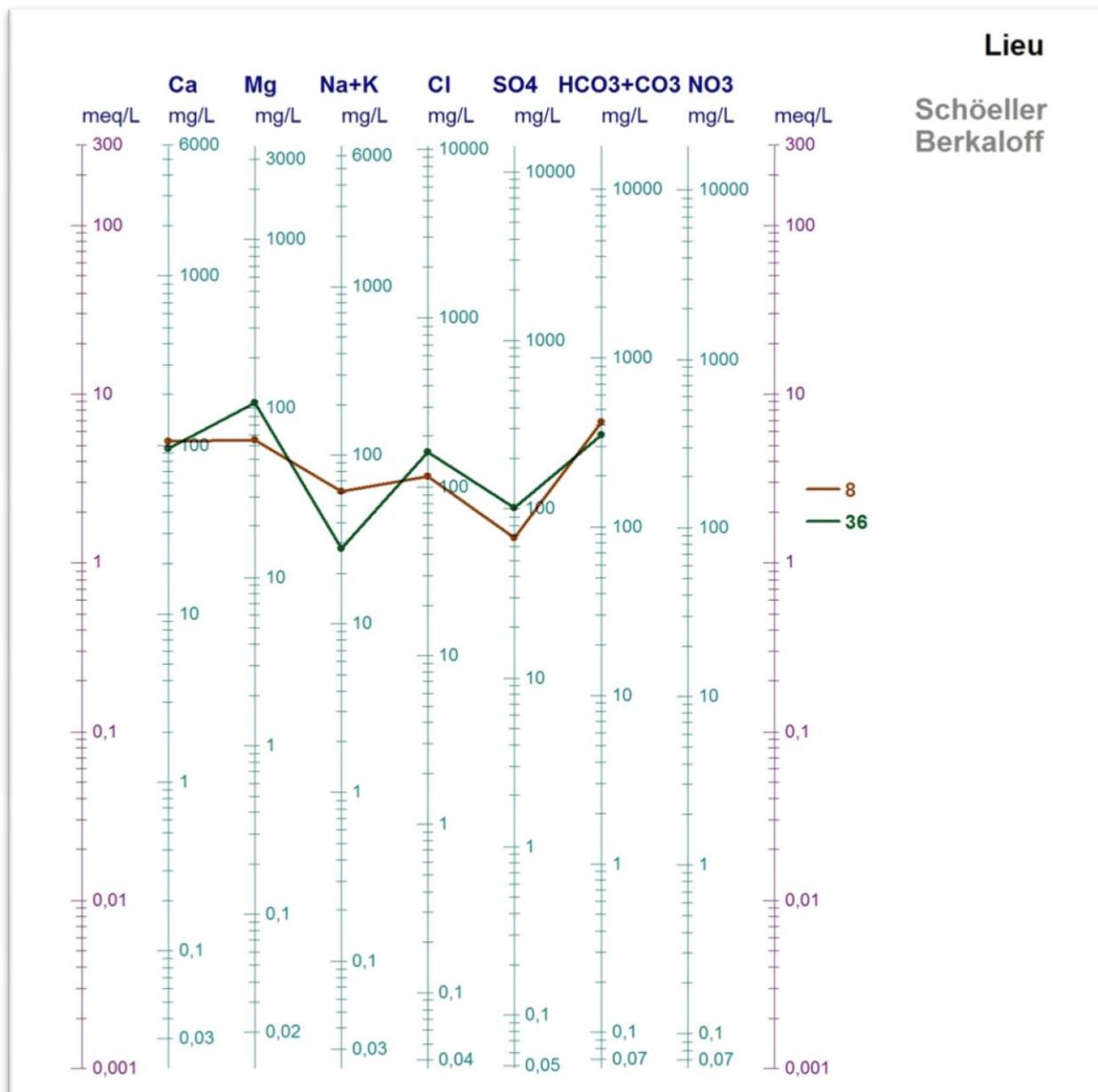


Figure III.17: Diagramme de Schoeller Berkloff pour les eaux à faciès bicarbonaté magnésien

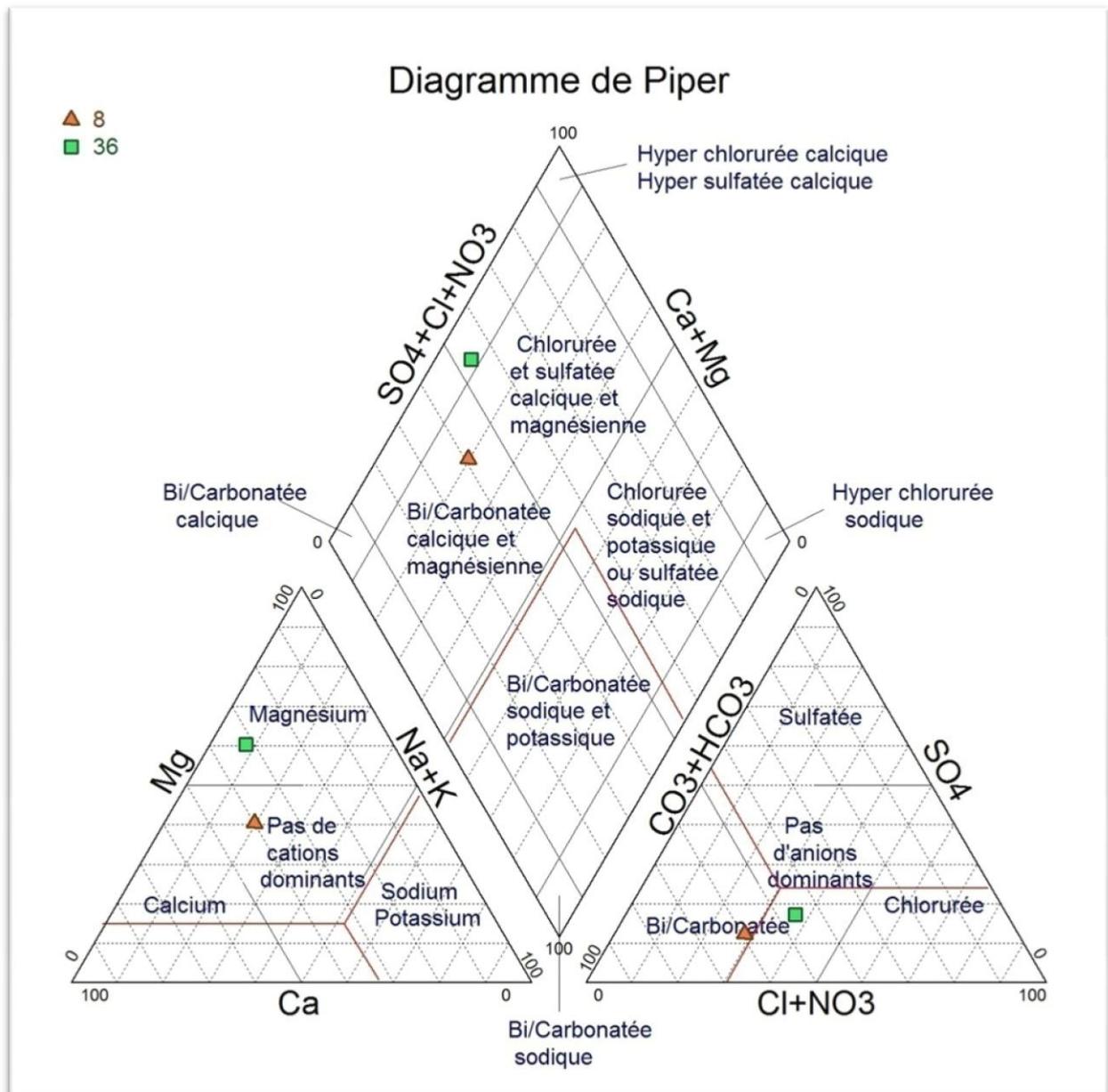


Figure III.18: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès bicarbonaté magnésien

D'après les diagrammes représentés sur les figures précédentes, nous pouvons classer les eaux de la plaine de Maghnia selon leur faciès dans les groupes suivants :

- Chloruré magnésien,
- Chloruré calcique,
- Sulfaté calcique,
- Chloruré sodique et potassique.
- Bicarbonaté magnésien.

III.4. Etude des paramètres

III.4.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Ce paramètre est caractérisé par un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples dont l'origine de l'eau. Le pH détermine l'acidité, l'alcalinité et la neutralité des solutions. Il est lié à la nature du terrain.

Tableau III.4: Classification des eaux selon le pH (JORA, 2011).

pH	Qualité des eaux
pH < 5	acidité forte
pH = 7	neutralité (eau pure)
pH de 7 à 8	neutralité rapprochée (eau de surface)
pH > 8	alcalinité, évaporation intense
pH de 5.5 à 8	majorité des eaux souterraines

Tableau III.5: Variations du pH des eaux de la plaine de Maghnia

Puits	pH	Puits	pH
1	7,8	22	7,1
2	7,7	23	7,7
3	7,9	24	7,7
4	8,1	25	7,3
5	7,4	26	7,5
6	7,8	27	7,7
7	7,4	28	7,6
8	7,6	29	7,9
9	7,4	30	7,2
10	7,7	31	8,1
11	7,9	32	7,3
12	8,0	33	7,2
13	7,7	34	7,2
14	7,7	35	7,6
15	7,7	36	7,4
16	8,0	37	7,3
17	7,9	38	7,5
18	7,5	39	7,3
19	8,1	40	7,4
20	7,3		
21	7,3		

D'après le tableau III.5 et la figure III.19, la quasi-totalité des eaux analysées sont dans les normes, puisqu'ils ont des pH compris entre 7.1 et 8.1.

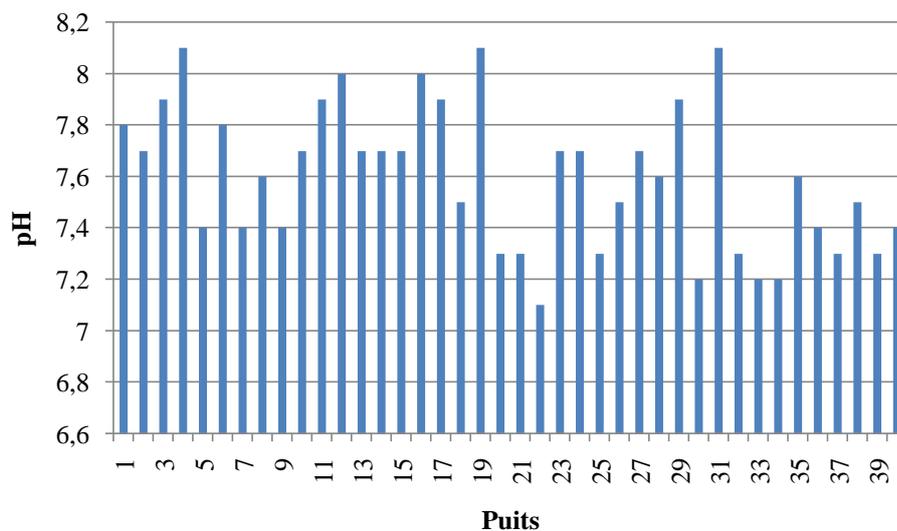


Figure III.19: Variations du pH

III.4.2. Conductivité électrique (Ce)

La conductivité permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau dans la mesure où la plupart des matières dissoutes dans l'eau, se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement.

L'évolution de la conductivité présentée sur la figure III.20, indique que les puits P1, P15.P31 ont des valeurs très élevées en conductivité dépassant les 2800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ fixées par les normes algériennes de potabilité, et qui classent leurs eaux souterraines dans la catégorie des eaux très salines d'après le tableau III.6.

Tableau III.6: Variation de la conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

Puits	Ce	Puits	Ce
1	3700	22	2236
2	1520	23	2680
3	1423	24	2033
4	2439	25	2740
5	1220	26	1524
6	1160	27	1525
7	1131	28	2800
8	1050	29	2580
9	910	30	2470
10	1000	31	3049
11	1626	32	1220
12	1220	33	1931
13	740	34	1931
14	2310	35	2452
15	2885	36	2134
16	1931	37	1033
17	2110	38	1475
18	2380	39	2675
19	1728	40	1573
20	2100		
21	2600		

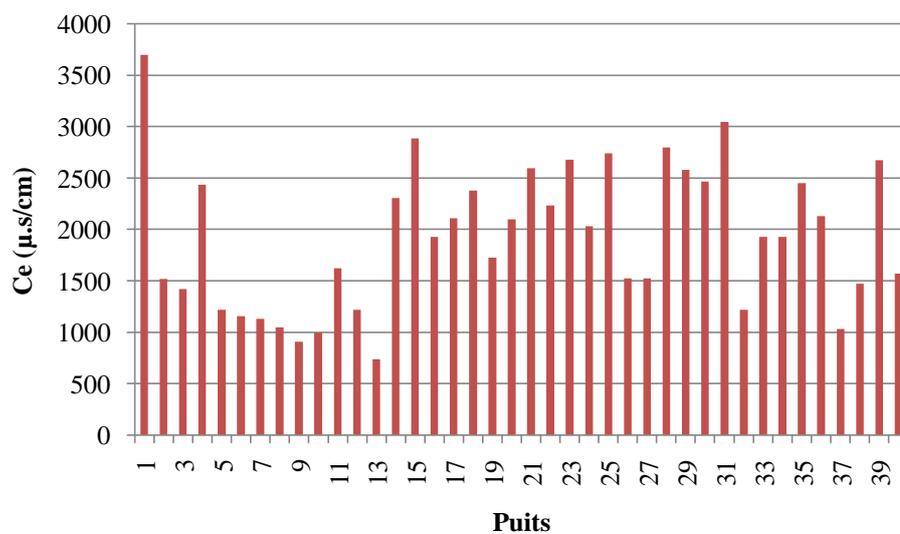


Figure III.20: Variation de la conductivité électrique au niveau des puits de la plaine de Maghnia

III.5-Qualité des eaux pour des fins d'irrigation

III.5.1- Indice de Kelly's Ratio (KR)

L'indice de Kelly's Ratio (KR) est représenté par le rapport des concentrations de Na^+ et la somme de Ca^{2+} et de Mg^{2+} . Il constitue une base pour la détermination de l'aptitude des eaux à l'irrigation [Paliwal K.V., 1967].

Une grande concentration en Na^+ dans l'eau d'irrigation est considérée comme inappropriée pour son utilisation. Cet indice est donné par la relation suivante :

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+}+Mg^{2+}}$$

- Si le $KR \leq 1 \Rightarrow$ L'eau est bonne pour l'irrigation ;
- Si le $KR > 1 \Rightarrow$ L'eau est mauvaise pour l'irrigation.

Tableau III.7: Valeurs de KR des eaux de la plaine de Maghnia

Puits	KR	Puits	KR
1	0,83	22	0,72
2	0,99	23	0,72
3	0,82	24	0,82
4	0,70	25	0,61
5	0,36	26	0,82
6	0,32	27	0,83
7	0,53	28	1,15
8	0,35	29	1,01
9	0,49	30	0,81
10	0,56	31	0,72
11	0,12	32	0,39
12	0,34	33	0,86
13	0,25	34	0,85
14	0,59	35	0,28
15	0,85	36	0,12
16	0,74	37	0,79
17	0,99	38	0,40
18	0,84	39	0,72
19	0,92	40	0,84
20	0,76		
21	0,94		

Comme le montre la figure III.21, la plupart des valeurs de KR sont inférieures à 1, ce qui indique la bonne qualité d'eau pour l'irrigation. Sauf quelque puits où le Kr dépasse légèrement 1 comme le P28 .

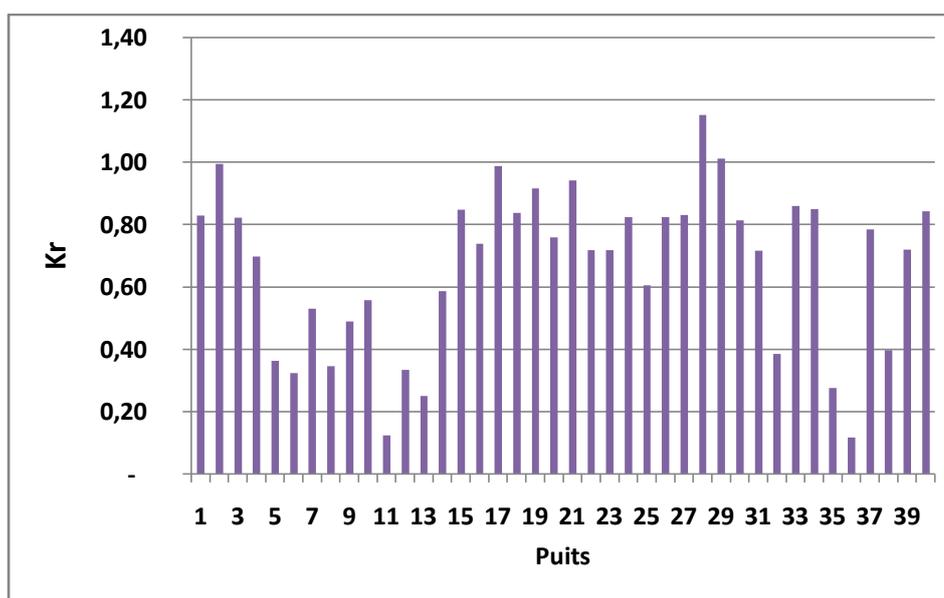


Figure III.21: Variation du Kelly's Ratio des eaux de la plaine de Maghnia.

III.5.2-Pourcentage de Sodium (% Na) et classification des eaux par la méthode Wilcox

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en Sodium. Le pourcentage de Sodium (% Na) de l'eau est un paramètre utilisé dans l'évolution de l'aptitude des eaux à l'irrigation (Wilox L.V., 1948 ; Tiwari T.N. et Manzoor A., 1988).

Le % Na peut être calculé par la relation suivante :

$$\% Na^+ = \frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100$$

Le tableau III.8, représente la classification des eaux de la région en fonction du pourcentage en Sodium, dont les valeurs varient entre 15,18% (P36) et 70,28% (P4) (tableau. III.9 et figure III.22.

Tableau III.8: Classification des eaux selon le % Na

Paramètre	Classe 1 Très bonne	Classe 2 Bonne	Classe 3 Admissible	Classe 4 Médiocre	Classe 5 Mauvaise
% Na	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	> 80
% Na des eaux de la plaine de Maghnia	P11-P13-P36	P5-P6-P7-P8-P9-P10-P12-P14-P32-P35-P38	P1-P3-P15-P16-P17-P18-P19-P20-P21-P22-P23-P24-P25-P26-P27-P29-P30-P31--P33-P34-P37-P39-P40	P2-P4-P28	

Tableau III.9: Valeurs de % Na des eaux de plaine de Maghnia

Puits	% Na	Puits	% Na
1	49,75	22	50,10
2	60,04	23	46,77
3	47,54	24	59,59
4	70,25	25	47,22
5	28,85	26	52,94
6	22,35	27	45,61
7	37,15	28	68,85
8	23,43	29	57,87
9	29,16	30	51,86
10	30,54	31	48,39
11	18,26	32	33,32
12	27,98	33	59,14
13	17,43	34	55,56
14	37,47	35	25,13
15	48,87	36	15,18
16	52,55	37	40,32
17	45,79	38	26,71
18	44,69	39	46,03
19	53,49	40	44,22
20	46,45		
21	46,84		

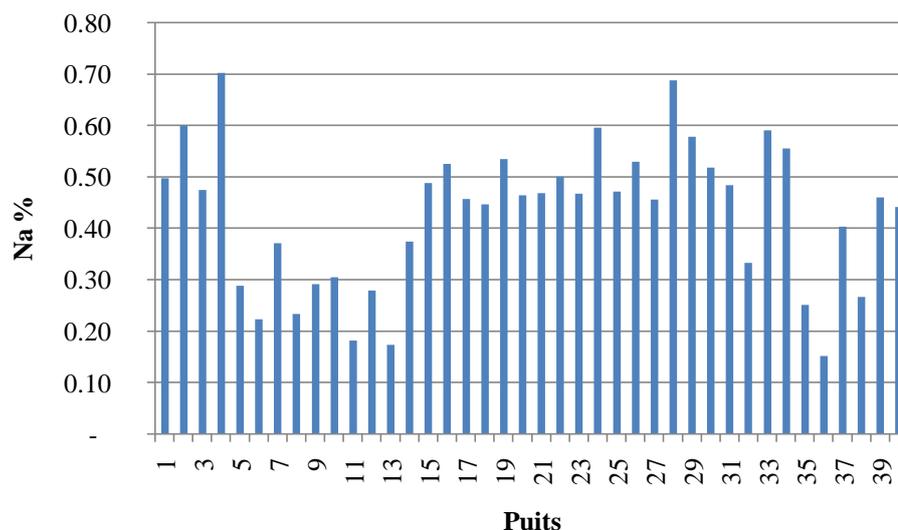


Figure III.22: Variation du pourcentage en Sodium des eaux de la plaine de Maghnia

En prenant en considération le %Na, nous pouvons déduire 4 classes d'eau pour notre région d'étude : Excellente, Bonne , Médiocre ,Admissible.

La classification de Wilcox est basée sur la conductivité électrique et la teneur en Sodium dans l'eau exprimée en pourcentage.

Le report des valeurs du pourcentage en Sodium en fonction de celles de la conductivité sur le diagramme de Wilcox, (fig.III.23), permet de voir une autre classification des eaux souterraines concernant leur aptitude à l'irrigation.

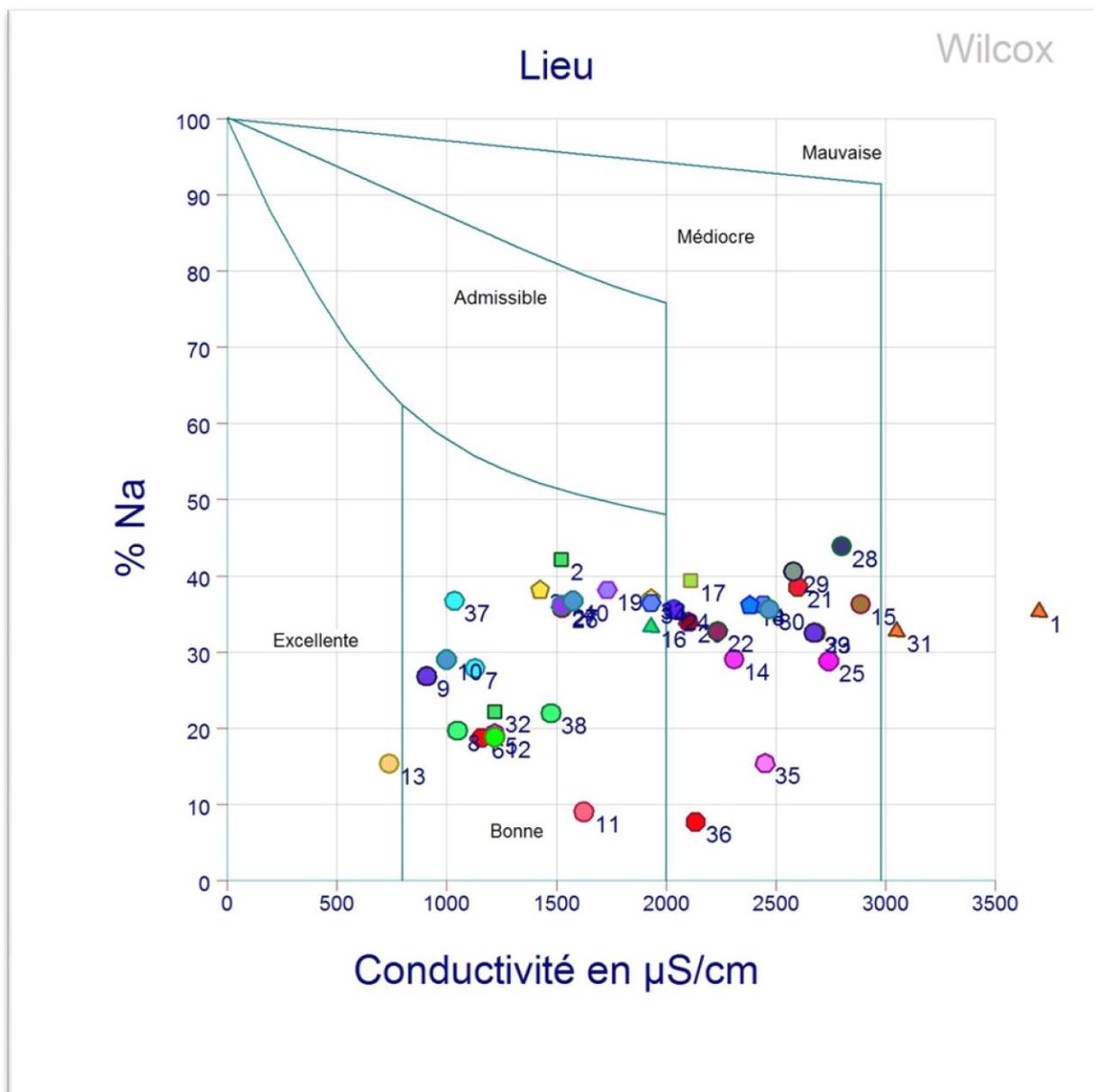


Figure III.23: Diagramme de Wilcox des eaux de la plaine de Maghnia

D'après la figure III.23, nous pouvons classer les eaux comme suit :

- Les classes « **EXCELLENTE** et **BONNE** » : représentent les eaux des puits faiblement minéralisées. Ces eaux se rencontrent majoritairement au Sud - Ouest et au Centre de la plaine de Maghnia.
- classe « **MEDIOCRE** » : cette classe regroupe le plus grand nombre de points d'eau, elle représente des eaux plus minéralisées que celles des classes précédentes. Ces eaux se manifestent à proximité des bordures ouest, nord-ouest et au centre de la plaine.

- La classe « **MAUVAISE** » : comporte deux points d'eau (P1.P31). qui procèdent des teneurs élevées en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-}

III.5.3- Sodium Absorption Ratio (SAR)

Les sols à grandes concentrations en Na^+ (en solution) sont connus pour avoir une mauvaise structure physique (Appelo C.A. & Postma D., 1993). La toxicité en Na^+ a lieu avec l'accumulation du Sodium dans les tissus des plantes. Une augmentation du SAR des eaux d'irrigation augmente celle des solutions du sol et par conséquent le sodium échangeable du sol (Isaac St. et al. 2009 *in* Moudjib A., 2010).

Le SAR peut être déterminé par l'équation suivante :

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

- $SAR < 10 \Rightarrow$ Eaux Excellentes.
- $10 \leq SAR \leq 18 \Rightarrow$ Eaux Bonnes.
- $18 \leq SAR \leq 26 \Rightarrow$ Eaux convenables.
- $SAR > 26 \Rightarrow$ Eaux Médiocres.

Tableau III.10 : Variations du SAR des eaux de la plaine de Maghnia

Puits	SAR	Puits	SAR
1	32,22	22	24,70
2	24,33	23	23,15
3	22,65	24	25,42
4	19,85	25	20,62
5	12,55	26	22,38
6	8,48	27	22,12
7	14,06	28	33,93
8	9,05	29	29,89
9	11,40	30	24,91
10	13,31	31	29,27
11	3,66	32	10,33
12	8,43	33	26,70
13	5,36	34	25,62
14	18,45	35	10,19
15	28,12	36	3,37
16	23,32	37	17,27
17	27,31	38	11,97
18	24,66	39	23,08
19	26,47	40	22,49
20	24,12		
21	28,70		

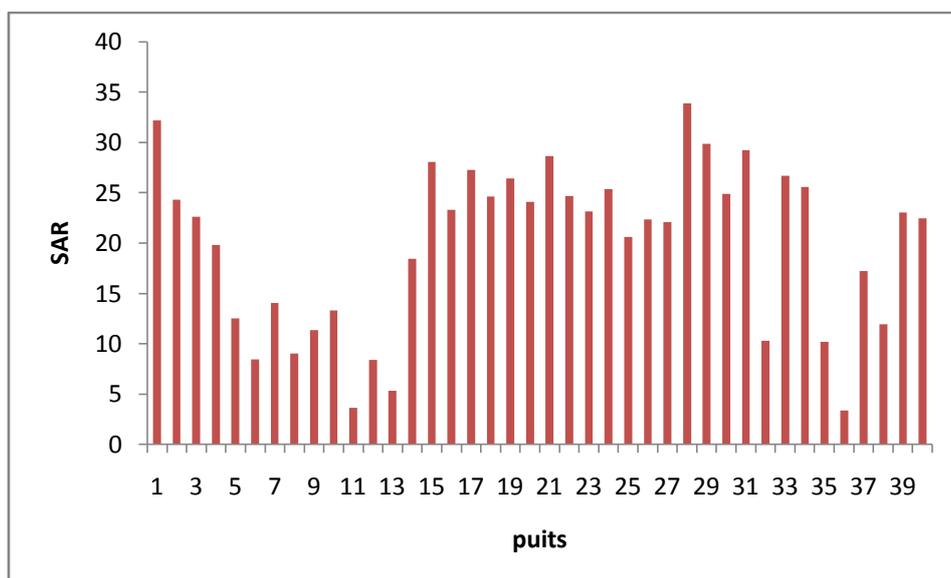


Figure III.24: Variation du SAR (Sodium Absorption Ratio)

D'après la classification et la figure III.24, nous constatons que les points d'eau ont majoritairement des valeurs de SAR inférieures à 26 qualifiant les eaux de bonnes et convenables, ou excellentes comme pour les puits P6, P8, P11, P12, P13, et P36 Exception faite pour quelque points où le SAR dépasse 26 et ainsi les eaux sont considérées comme médiocres (P1, P15, P17, P19, P21, P28, P29, P31, P33).

Le report des valeurs du SAR en fonction de la conductivité (Salinité-Sodicité) sur le diagramme figure III.25, met en évidence la présence de trois catégories d'eaux souterraines quant à leurs utilisations à des fins d'irrigation.

Tableau III.11: Classification des eaux selon le diagramme de Richards

1	Excellente	C1-S1	Eau utilisable sans danger dans l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels, sur sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensible, au sodium et sols à forte capacité d'échange d'ions (sol-argileux)
3	Admissible	C3-S1	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensible, au sodium et aux sols à faible perméabilité.
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

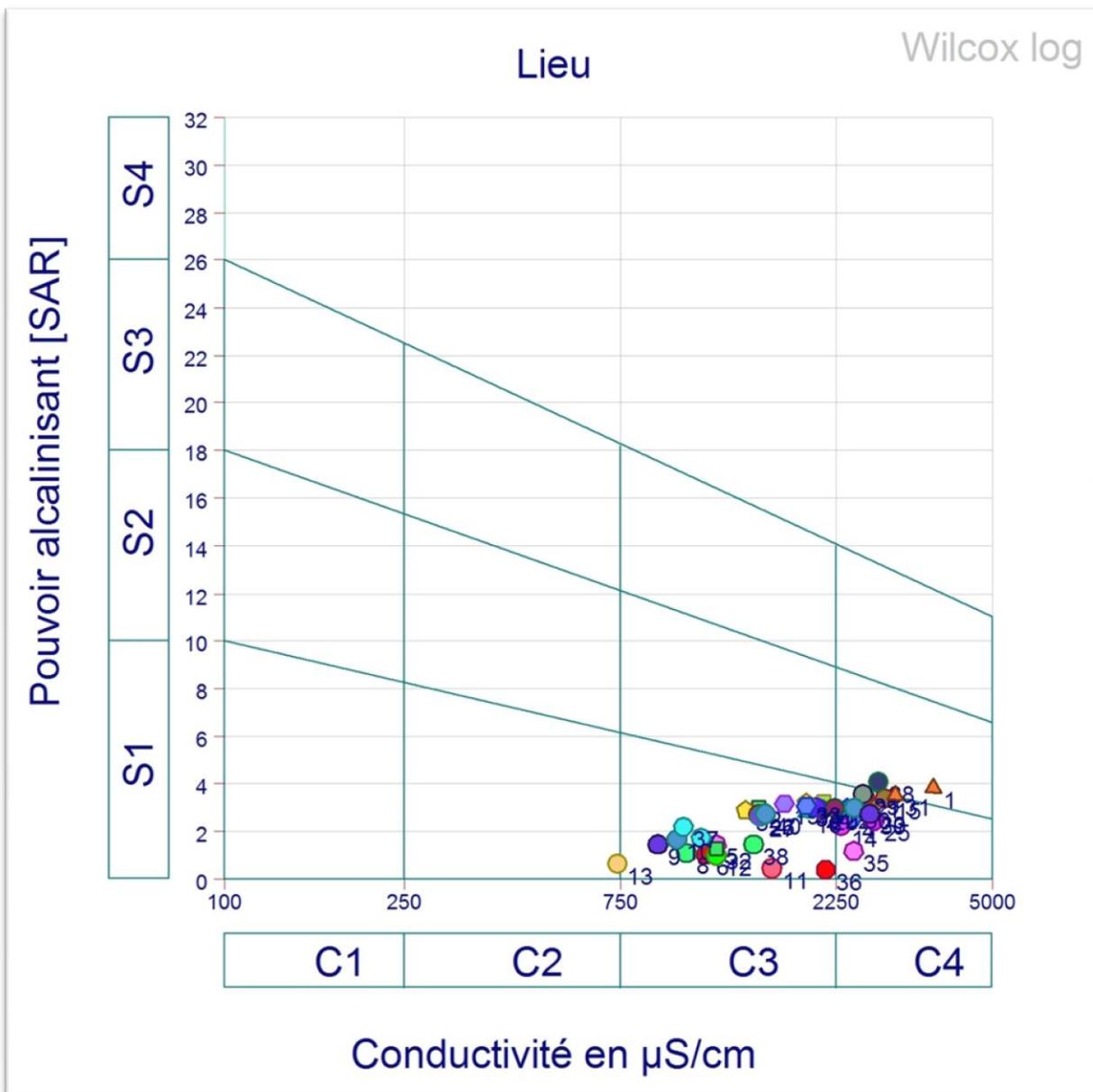


Figure III.25: Diagramme de Richards appliqué aux eaux de la plaine de Maghnia

III.6- Conclusion

Notre étude hydro-chimique des eaux de la nappe du Plio-Quaternaire de la plaine de Maghnia montre que les eaux sont d'une manière générale :

- Chloruré et sulfaté calcique et magnésien.
- Chloruré sodique et potassique.
- Bicarbonaté magnésien.

Les eaux souterraines qui circulent dans la nappe alluviale de Maghnia proviennent des formations d'âge secondaire formées essentiellement de calcaire, dolomie et formations gypsifères, qui bordent le secteur d'étude (les frontières marocaine au Nord-ouest la plaine des Angads et au Sud par les Monts de Tlemcen et aussi par les précipitations. Ensuite, elles s'écoulent dans un matériel très hétérogène des (alluvions, sables, graviers, tufs, dépôt évaporitique..., etc.) qui constitue la plaine elle-même.

53

Du point de vu, qualitative, les eaux souterraines de la plaine d'étude, présentent des teneurs assez élevées pour la plus part des éléments chimiques analysés, et dépassent largement les normes de potabilité algériennes, présentant ainsi un réel danger pour la santé de la population de la région.

L'estimation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation par l'utilisation de quelques indices tels que KR, SAR, NA%, montre que les puits de la plaine de Maghnia se classent majoritairement dans les catégories (bonne, admissible pour l'irrigation), et médiocre pour quelques puits (P1-P31) situés en aval de la nappe alluviale, en limitant l'utilisation de leurs eaux.

Chapitre 4

Statistique

Introduction

L'utilisation de la statistique pour le traitement des données hydro chimiques est devenue fondamentale pour l'étude des échantillons d'eau. Les exigences de l'assurance qualité rendent désormais obligatoires la connaissance d'un certain nombre de notions statistiques simples. Ce chapitre vise à répondre à un certain nombre de problèmes sur lesquelles vont s'articuler les différentes parties:

- Définir les paramètres statistiques d'une série de données par l'utilisation des diagrammes en boites,
- Faire une classification hiérarchique ascendante des données,
- Utiliser une analyse en composante principales ACP,
- Faire une modélisation permettant de mieux cerner cette qualité d'eau.

IV .1. Diagrammes en boites «Boîte à moustaches = Box plot = Boîtes de Tukey »

IV.1.1. Définition

Un diagramme en boites (aussi appelé boîte à moustaches, « boîte de Tukey » ou « box plot ») est un diagramme simple et rapide à faire, dont l'objectif consiste à montrer comment se distribue graphiquement une série de nombres. On a ainsi une lecture directe de la répartition des nombres d'une série.

IV.1.2. Étapes de réalisation

La méthode consiste à :

- Classer les données dans l'ordre croissant,
- Identifier la valeur maximale et minimale de la série,
- Calculer la médiane (nombre qui partage la série en deux ensembles numériquement égaux). Si la série comprend un nombre impair de valeurs, il n'y a pas de problème particulier, puisqu'il y a toujours un nombre médian qui partage parfaitement la série en deux groupes égaux.
Si par contre, la série compte un nombre pair de valeurs, il est impossible de trouver la médiane immédiatement. La solution est simple et logique : avec un nombre pair de données, le nombre médian est la moyenne des deux nombres centraux.
- Trouver les premier et troisième quartiles. On les appelle respectivement « quartile inférieur » et « quartile supérieur ».
On a, à ce stade, le second quartile, c'est la médiane. Il nous faut à présent la médiane de la première moitié de la série (premier quartile). On fait de même avec la seconde moitié de la série.
- Construire une « boîte » en reliant ces quartiles. Médiane et la valeur max et min.

IV.1.3. Objectif

Ce genre de diagramme permet de visualiser rapidement comment se fait la distribution des nombres dans une série donnée. C'est très pratique avec les séries comprenant beaucoup de valeurs. Ainsi :

- plus le corps de la boîte est petit, plus les valeurs « du milieu » sont homogènes, plus les moustaches sont grandes, plus les valeurs sont dispersées.
- plus la boîte est à gauche, plus les valeurs de la série sont basses. Pour ce genre de données, la « boîte à moustaches » est plus parlante qu'un histogramme ou un graphique en bâtons.

IV.1.4. Représentations des boîtes à moustaches

IV.1.4.1. Représentation de l'ensemble des échantillons

Les barres horizontales (couleur mauve) centrales sont les médianes. Les limites inférieure et supérieure des boîtes sont les premier et troisième quartiles, respectivement. 50% des données centrales se trouvent entre ces deux limites, 25% se trouvent au-dessus et 25% en-dessous.

Pour chaque boîte, les données situées respectivement en-dessous et au-dessus des extrémités inférieure et supérieure des moustaches peuvent être considérées comme hors-normes. Les traits en bleu sont le minimum et en rouge le maximum pour chaque espèce. Ici, la largeur horizontale des boîtes n'a pas de sens.

Les résultats d'application de ce test pour l'ensemble des échantillons sont illustrés sur le tableau IV.1 et la figure IV.1.

Tableau IV.1: Paramètres statistiques des eaux de la plaine de Maghnia

Paramètres statistiques (meq/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Minimum	3.591	2.922	1.146	3.239	0.770	2.557
Maximum	11.307	16.217	13.740	27.500	10.389	9.282
1er Quartile	4.980	5.300	4.102	8.338	2.415	3.886
Médiane	5.741	8.463	6.836	12.450	2.934	5.232
3ème Quartile	6.843	10.123	8.492	16.163	4.982	6.132

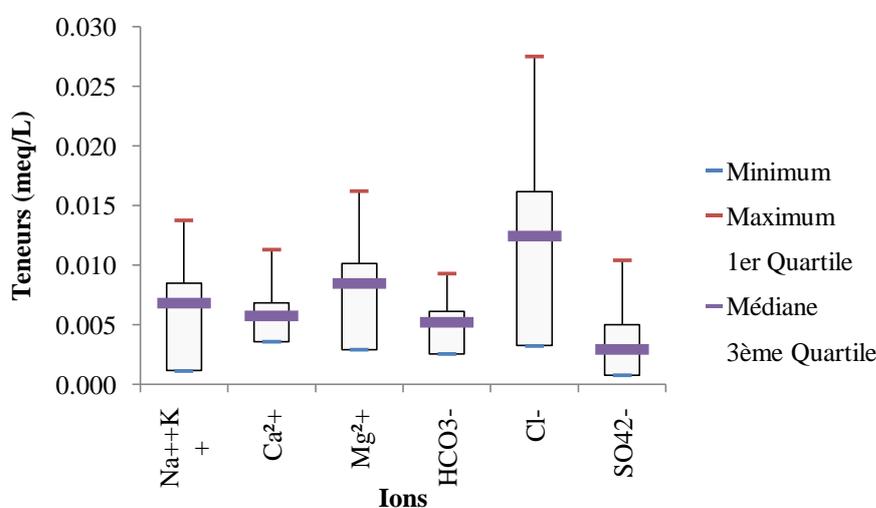


Figure IV.1: Représentation des eaux de la plaine de Maghnia

Une simple observation de la figure IV.1, fait ressortir le caractère dominant du faciès chloruré magnésien suivi du faciès chloruré sodique et potassique. Ces résultats confirment ceux déjà trouvés par la formule caractéristique, c'est-à-dire les (60%) des échantillons (chapitre précédent).

Là aussi, l'allure des boîtes donne une idée sur la dispersion spatiale des teneurs, en effet, les chlorures présentent une grande variabilité, suivi du magnésium et du sodium- potassium, ceci peut s'expliquer par des origines diverses de eaux (gypse, dolomie) c'est-à-dire que ces ions sont acquis lors du passage des eaux par plusieurs formations à savoir les dolomies, le gypse et les marnes. Par contre, nous remarquons que la boîte du calcium ou des bicarbonates est plus étroite indiquant ainsi une origine unique qui est celle des formations jurassiques carbonatées.

Le troisième quartile se confond avec le minimum pour tous les ions et tous les échantillons.

IV.1.4.2. Représentation des échantillons pris selon les faciès

Pour mieux cerner cet apport des statistiques en hydrochimie, nous avons tracé les boîtes à moustaches pour les familles des faciès des eaux déjà identifiés dans le chapitre précédent.

a)-Faciès chloruré magnésien

Il apparaît clairement sur la figure IV.2, que la variable Cl⁻, Possède la boîte la plus élevée pour les anions et le Mg²⁺ pour les cations. Le faciès est bien chloruré magnésien pour les échantillons : P1. P5. P6. P12. P14. P15. P16. P18. P20. P22. P23. P24. P29. P26. P27. P30. P31. P33. P34. P35. P38. P39, confirmant ainsi les formules caractéristiques (chapitre III). Nous remarquons aussi que les chlorures avec l'étendue de leurs boîtes révèlent une forte dispersion, il en est de même pour le magnésium et sodium-potassium à moindre degré.

Tableau IV.2 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées magnésiennes

Paramètres statistiques(meq/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Minimum	3,590	2,910	1,140	3,230	0,330	2,550
Maximum	11,290	16,200	13,738	27,500	10,400	9,280
1er Quartile	5,170	5,288	4,095	8,338	2,055	3,880
Médiane	5,810	8,450	6,830	12,450	2,900	5,120
3ème Quartile	7,008	10,113	8,495	16,173	4,648	6,130

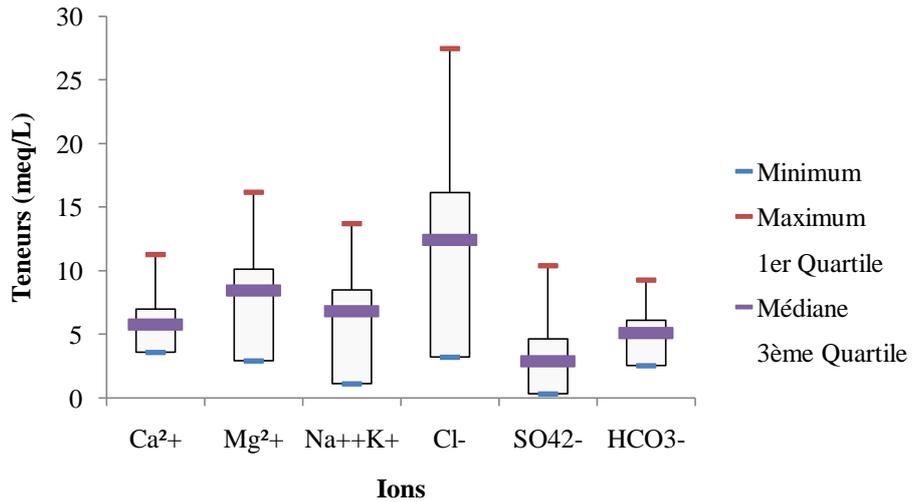


Figure IV.2: Représentation des eaux à faciès chloruré magnésien

b)-Faciès chloruré sodique

Spatialement les chlorures sont très dispersés suivis du magnésium et du sodium. Le calcium au contraire présente des teneurs presque assez semblables, les échantillons concernés sont (.P2-P3-P17-P19-P21-P28-P29-P40)

Tableau IV.3 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées sodiques

Paramètres statistiques(meq/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Minimum	4,670	4,220	6,600	7,070	1,640	2,990
Maximum	6,790	9,400	11,110	16,850	4,360	9,280
1er Quartile	4,968	5,905	6,828	9,958	2,575	3,945
Médiane	5,410	8,190	8,363	11,580	2,775	4,895
3ème Quartile	5,650	8,683	9,630	13,590	3,510	5,570

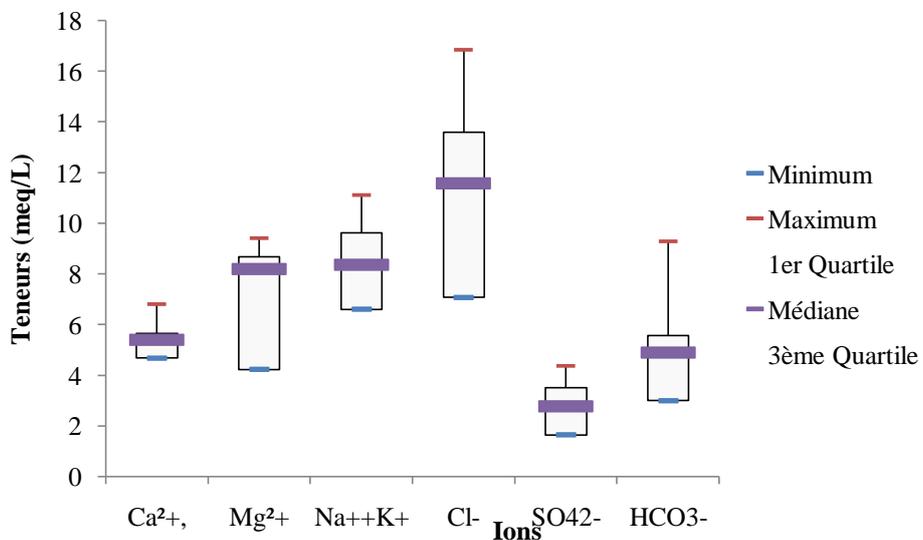


Figure IV.3: Représentation des eaux à faciès chloruré sodique

c)- Faciès chloruré calcique

Dans cette famille les chlorures sont relativement bien plus dispersés que les autres minéraux, le calcium, aussi est relativement plus dispersé par rapport aux autres échantillons.

Tableau IV.4 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées calciques

Paramètres statistiques(meq/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Minimum	3,590	2,910	1,265	3,600	0,770	2,550
Maximum	7,700	5,190	4,170	14,000	7,770	6,970
1er Quartile	4,408	3,083	1,676	4,163	1,415	2,890
Médiane	4,935	3,505	3,176	4,650	1,470	3,610
3ème Quartile	5,433	4,753	3,969	10,620	3,948	4,968

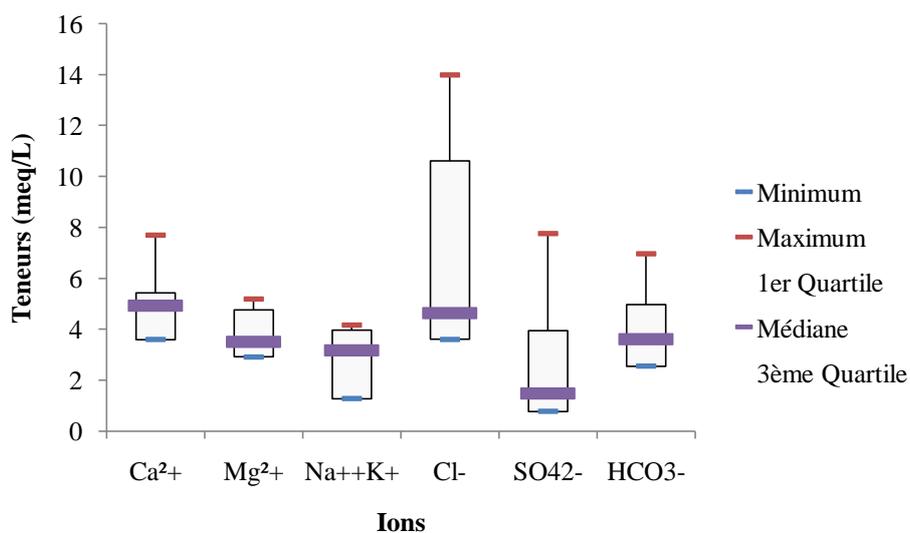


Figure IV.4: Représentation des eaux à faciès chloruré calcique

d)-Faciès sulfaté calcique

Etant donné que le groupe n'est représenté que par un seul échantillon (P4), la boîte se réduit en un seul trait confondu, toujours est-il qu'il résume bien la situation c'est-à-dire un faciès sulfaté calcique.

Tableau IV.5 : Paramètres statistiques des eaux sulfatées calciques

Paramètres statistiques(meq/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Minimum	7,996	3,413	6,488	5,082	6,420	5,090
Maximum	7,996	3,413	6,488	5,082	6,420	5,090
1er Quartile	7,996	3,413	6,488	5,082	6,420	5,090
Médiane	7,996	3,413	6,488	5,082	6,420	5,090
3ème Quartile	7,996	3,413	6,488	5,082	6,420	5,090

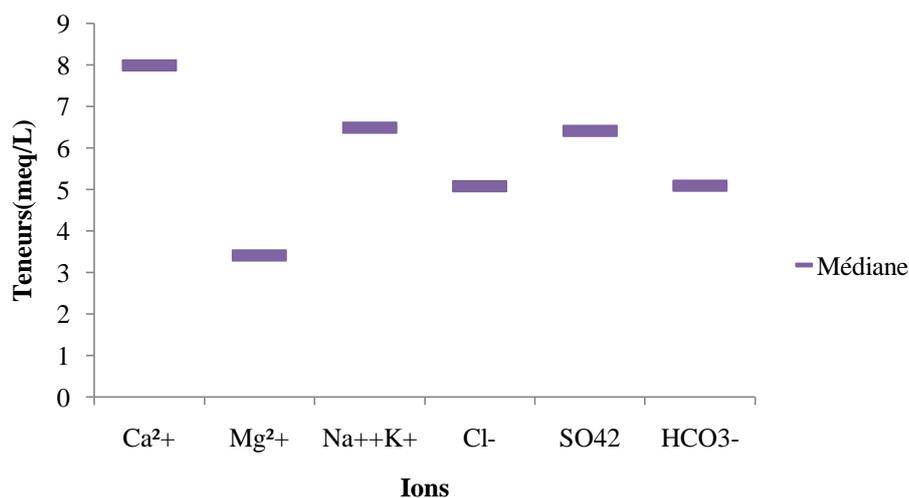


Figure IV.5: Représentation des eaux à faciès sulfaté calcique

e)- Faciès bicarbonaté magnésien

Dans ce groupe représenté par deux échantillons (P8, P36), la dispersion est très remarquable respectivement pour le magnésium, le sodium-potassium et les chlorures. Le calcium présente des valeurs proches.

Tableau IV.6 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées magnésiennes

Paramètres statistiques (meq/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Minimum	4,738	5,333	1,146	5,731	3,239	1,415
Maximum	5,307	8,880	2,615	6,820	4,577	2,135
1er Quartile	4,880	6,220	1,513	6,003	3,574	1,595
Médiane	5,022	7,107	1,880	6,275	3,908	1,775
3ème Quartile	5,165	7,993	2,248	6,548	4,243	1,955

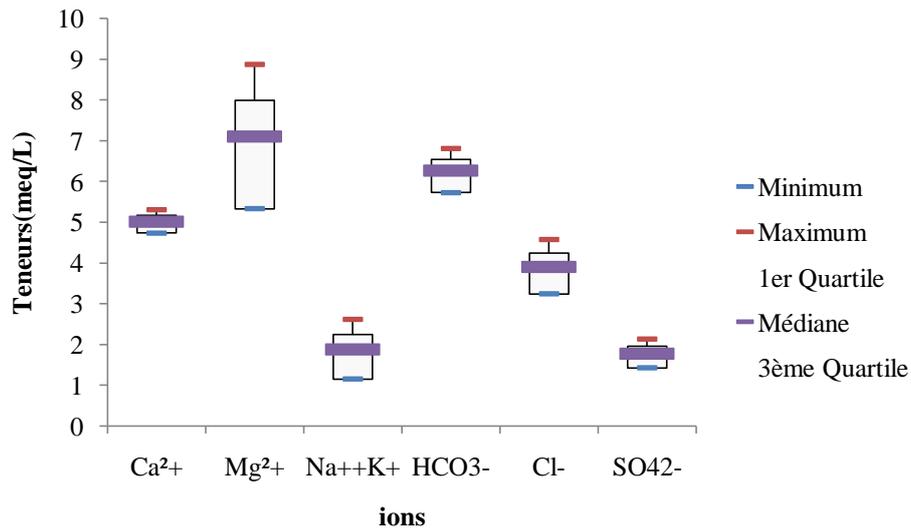


Figure IV.6:Représentation des eaux à faciès bicarbonaté magnésien

Conclusion

Ces statistiques représentées par les diagrammes en boîtes confirment clairement et aisément nos résultats trouvés au chapitre précédent. Il donne une idée plus simple de la dispersion des teneurs en éléments chimiques par une représentation plus aisée à analyser. Aussi cette méthode permet d'avoir une idée sur l'origine unique ou multiple des eaux.

IV.2. Classification ascendante hiérarchique (C.A.H.)

C'est une méthode d'analyse de données qui permet d'obtenir une représentation schématique simple d'un tableau de données complexe à partir d'une typologie (segmentation), c'est-à-dire une partition des n individus dans des classes, définis par l'observation de p variables (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).

La méthode consiste à regrouper entre eux des individus similaires selon certains critères, elle à répartir n individus, caractérisés par p variables en un certain nombre m de sous groupes aussi homogènes que possible, chaque groupe étant bien différencié des autres.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer cette méthode aux données hydro chimiques en utilisant le code XLSTAT.

IV.2.1.Principe

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple, il est résumé dans les étapes suivantes :

- Commencer par calculer la dissimilarité entre les n individus,
- Regrouper les deux individus dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux individus,
- Calculer ensuite la dissimilarité entre cette classe et les $n-2$ autres individus en utilisant le critère d'agrégation. Puis, regrouper les deux individus ou classes d'individus dont le regroupement minimise le critère d'agrégation,
- Continuer ainsi jusqu'à ce que tous les individus soient regroupés,

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme) (figure IV.7), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions. On peut alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau (dépendant soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs(Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).

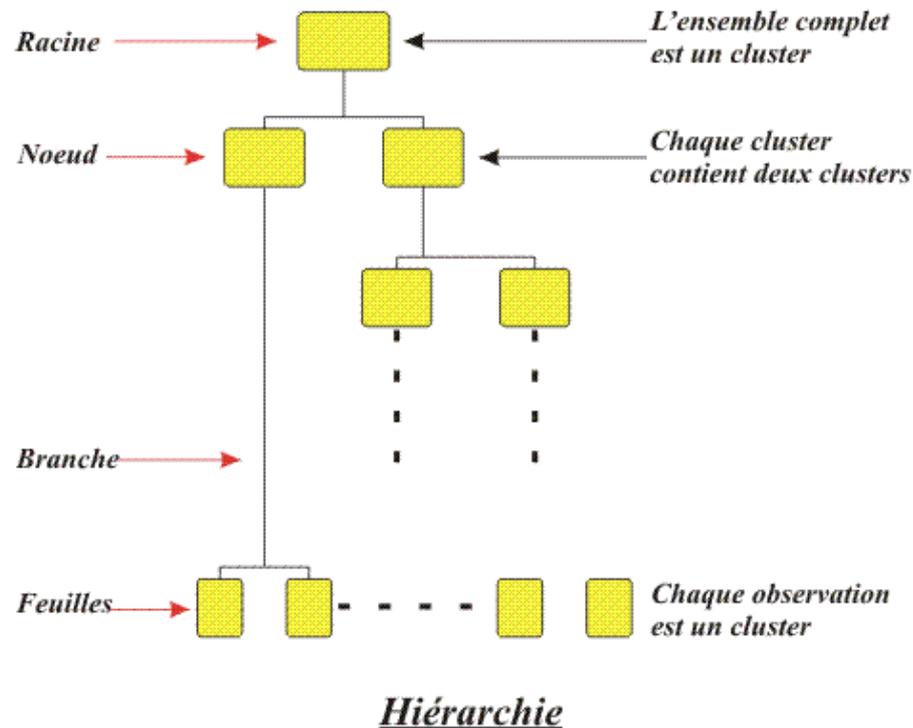


Figure IV.7 : Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).

IV.2.2. Présentation de l'algorithme de la C.A.H.

- *- 1^{ère} phase : Initialisation de l'algorithme
 - Les classes initiales = n singletons individus,
 - Calcul de la matrice des distances des individus 2 à 2.
- *- 2^{ème} phase : Itération des étapes suivantes
 - Regrouper les individus les plus proches au sens d'un critère choisi,
 - Mise à jour du tableau des distances en remplaçant les deux individus regroupés par le nouveau et en recalculant sa distance avec les autres classes.
- *- Fin de l'itération : agrégation de tous les individus en une seule classe.
- *- Réflexions pré-algorithme
 - Nécessité de définir une distance entre les individus,
 - Définir un critère de regroupement des individus à minimiser aussi appelé stratégie d'agrégation.
 - Stratégie pour définir la meilleure typologie finale.

Nous pourrions résumer les étapes de la C.A.H. comme suit :

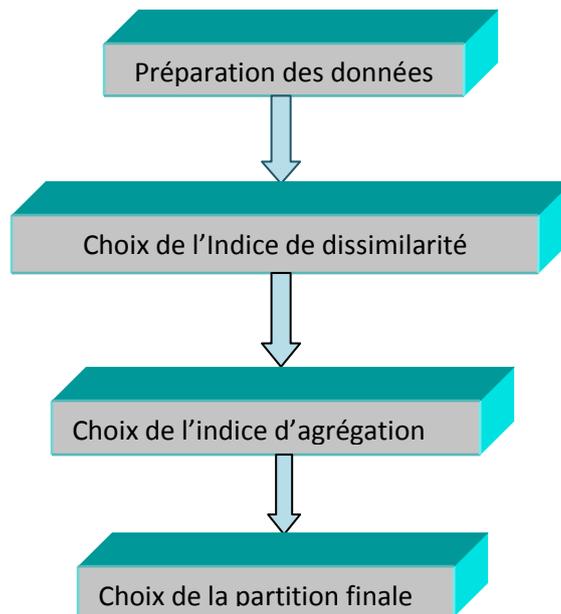


Figure IV.8: Etapes de la classification ascendante hiérarchique

IV.2.3. Choix de l'indice de dissimilarité entre les individus

Le choix de la mesure de la distance entre individus dépend des données étudiées et des objectifs, nous pouvons citer les distances suivantes:

- Distance euclidienne : le type de distance le plus couramment utilisé. Il s'agit d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel, en effet la distance euclidienne de deux individus M_i et M_j est par définition :
- **Distance** $(M_i, M_j) = \sum_k [(x_{ik} - x_{jk})^2]^{1/2}$
- Distance euclidienne au carré : permet de sur-pondérer les individus atypiques (éloignés), en élevant la distance euclidienne au carré :
- **Distance** $(M_i, M_j) = \sum_k [(x_{ik} - x_{jk})^2]$
- Distance de City-block (Manhattan) : cette distance est simplement la somme des différences entre les dimensions :
- **Distance** $(M_i, M_j) = \sum_k |x_{ik} - x_{jk}|$

IV.2.4-Méthode d'agrégation pour la Classification Ascendante Hiérarchique

Plusieurs méthodes d'agrégation sont disponibles, telles que celle de Ward (inertie), Ward (variance), lien complet, lien simple, lien flexible, lien moyen, lien proportionnel..... etc 'site web)

Mais la plus connue est celle de Ward.

La méthode de Ward a pour objectif :

- Un gain minimum d'inertie intra-classe à chaque agrégation,
- Perte d'inertie interclasse due à cette agrégation.

Elle utilise dans son calcul une analyse de la variance approchée afin d'évaluer les distances entre les classes par:

- Minimisation de la somme des carrées (SC) de tous les couples hypothétiques de classes : agrégation.

- Les indices d'agrégation sont recalculés à l'aide de la règle suivante :
Si une classe M est obtenue en regroupant les classes K et L, sa distance à la classe entre les barycentres de la classe M et de J. (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012)

On définit un ensemble de classes de l'ensemble des individus (fig. 1V.7), tel que :

- *- toute classe soit non vide,
- *- deux classes distinctes sont disjointes,
- *- tout individu appartient à une classe.

IV.2.5. Mesure de proximité pour la Classification Ascendante Hiérarchique

XLSTAT propose plusieurs similarités et plusieurs dissimilarités qui sont adaptées à un type de données particulier.

Tableau IV. 7 : Similarités / dissimilarités d'une C.A.H. proposées par XLSTAT

	Similarités	Dissimilarités
Quantitative data	<ul style="list-style-type: none"> - Corrélation de Pearson, - Corrélation de Spearman - Corrélation de Kendall - Inertie - Covariance (n) - Covariance (n-1) - Similarité générale 	<ul style="list-style-type: none"> - Distance euclidienne - Distance du χ^2 - Distance de Manhattan - Dissimilarité de Pearson - Dissimilarité de Spearman - Dissimilarité de Kendall - Dissimilarité générale
données binaires (0/1)	<p>Similarité/Dissimilarité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Indice de Jaccard - Indice de Dice - Indice de Sokal & Sneath - Indice de Rogers & Tanimoto - Indice de Sokal & Michener - Indice de Sokal & Sneath - Phi de Pearson - Indice de Ochiai - Indice de Kulczinski 	<p>Similarité/Dissimilarité</p> <ul style="list-style-type: none"> - Indice de Jaccard - Indice de Dice - Indice de Sokal & Sneath - Indice de Rogers & Tanimoto - Indice de Sokal & Michener - Indice de Sokal & Sneath - Phi de Pearson - Indice de Ochiai - Indice de Kulczinski

Source : logiciel XLSTAT

IV.2.6-Application de la méthode C.A.H. aux données des eaux de la plaine de Maghnia

Nous allons utiliser la C.A.H. pour la chimie des eaux de l'aquifère plio-quadernaire de la plaine de Maghnia, pour essayer de regrouper ces eaux en un nombre limité de groupes (classes), ces derniers auront deux propriétés :

- L'homogénéisation dans chaque classe et disparité entre les classes,
- Classes non prédéfinies mais découvertes au cours de l'opération.

Pour ce faire, nous avons utilisé le code de calcul XLSTAT – 2016, afin de regrouper les puits ayant des profils chimiques similaires. Le nombre d'individus est de 40 (puits) et les variables de 07 (ions majeurs : décrits au chapitre précédent).

La méthode du lien complet a été choisie pour cerner la plus grande distance entre deux groupes et pour la distance entre ces groupes c'est la distance euclidienne qui a été prise en considération vu sa fréquente utilisation dans ce genre de données.

Les résultats de cette méthode sont comme suit :

IV.2.6.1- Statistiques des nœuds

Nous avons réuni dans le tableau IV.9, les résultats concernant les nœuds successifs et les pertes d'inertie lors du passage d'une classe à une autre classe.

Ces résultats

Tableau IV.9: Nœuds successifs du dendrogramme

Nœud	Niveau	Poids
1	3,226	40
2	2,989	29
3	1,978	22
4	1,856	7
5	1,817	11
6	1,545	6
7	1,432	11
8	1,188	9
9	1,160	7
10	1,080	5
11	1,054	6
12	0,979	11
13	0,894	3
14	0,887	4
15	0,871	4
16	0,787	2
17	0,776	5
18	0,725	2
19	0,693	3
20	0,671	2
21	0,618	3
22	0,573	8
23	0,509	2
24	0,478	2
25	0,468	2
26	0,468	6
27	0,459	2
28	0,456	3
29	0,454	3
30	0,373	2
31	0,362	2
32	0,301	2
33	0,298	2
34	0,294	5
35	0,261	4
36	0,247	2
37	0,137	2
38	0,130	2
39	0,102	2

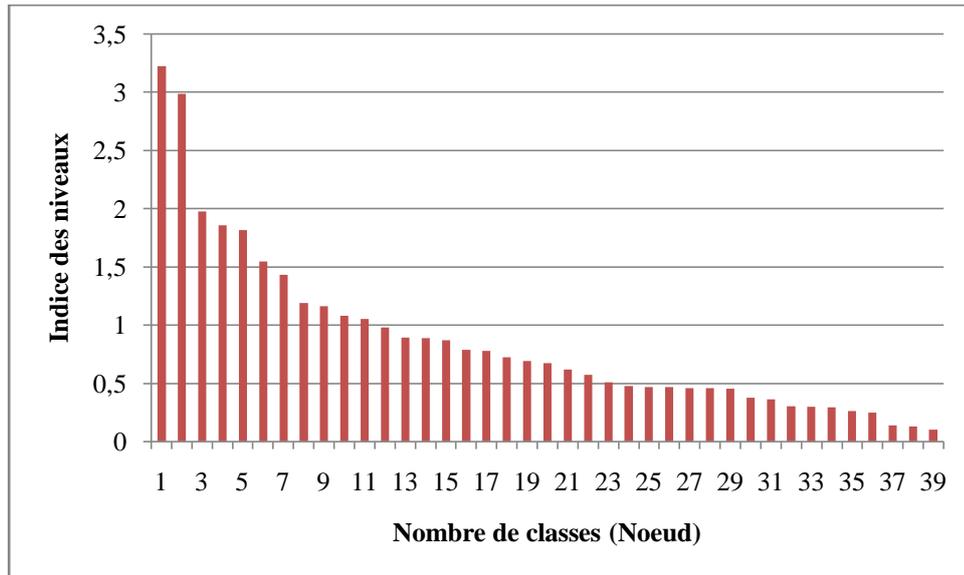


Figure IV.9: Diagramme des niveaux

IV.2.6.2- Dendrogramme

Le dendrogramme permet de visualiser le regroupement progressif des puits ; Si une troncature a été demandée, un trait en pointillé marque le niveau auquel est effectuée la troncature. Le dendrogramme tronqué permet de visualiser les classes après la troncature. Dans notre cas, la figure IV.10, montre trois classes (selon leur similarité en teneurs en ions majeurs) pour une troncature correspondant à une inertie de 1,978.

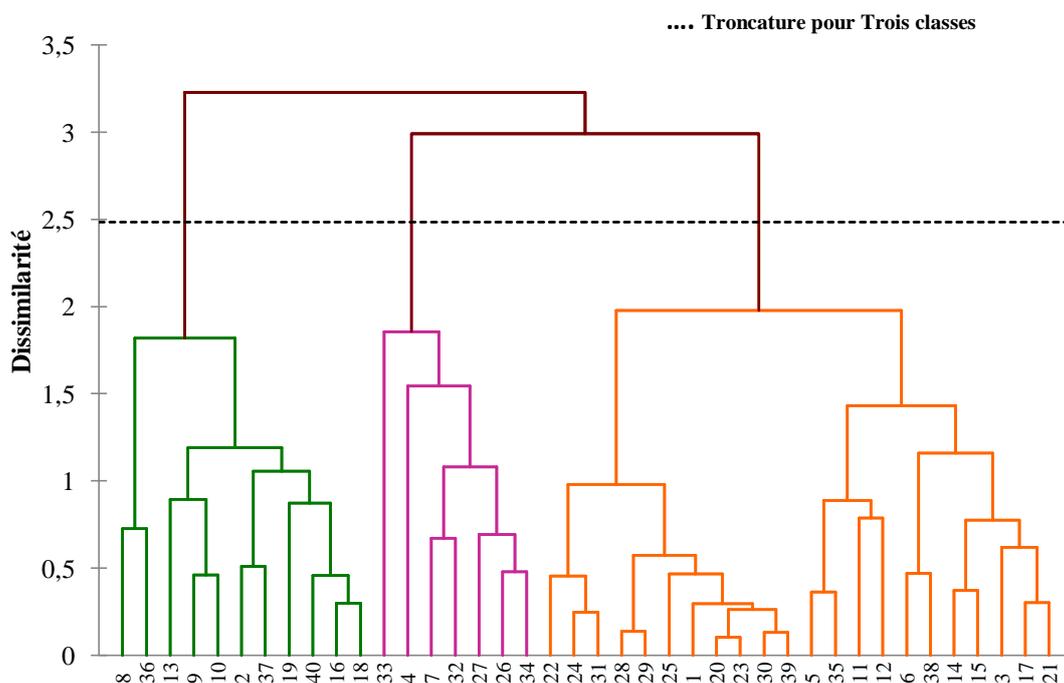


Figure IV.10: Dendrogramme des eaux du Plio-Quaternaire de la plaine de Maghnia

Nous avons essayé d’analyser le dendrogramme et extraire les différentes classes, pour ce faire, le tableau IV. 10 indique pour chaque puits sa classe d’affectation dans l’ordre initial des individus. Selon leurs teneurs en ions major.

Tableau IV.10: Classes des individus par la C.A.H.

Classes	Puits
1	1-3-5-6-11-12-14-15-17-20-21-22-23-24-25-28-29-30-31-35-38-39
2	2 – 8 – 9 – 10 – 13 – 16 – 18 – 19 – 36 – 37-40
3	4-7 – 26 – 27 – 32 – 33-34

Nous avons joint aux tableaux IV. 11, 12, 13, les intra-classes correspondant aux classes précédentes : ce sont les puits plus en plus proches selon la distance euclidienne

Tableau IV.11:Intra classes de la classe 1

Intra-Classes	Echantillons							
1	22 – 24 – 31 – 28 – 29 – 25 – 1 – 20 – 23 – 30-39				5 – 35 – 11 – 12 – 6-38 – 14 – 15 – 3 – 17-21			
2	22 – 24- 31		28 – 29- 25 – 1- 20-23-30- 39		5 – 35-11- 12		6 – 38-14 – 15 – 3- 17-21	
3	22	24- 31	25 – 1- 20- 23- 30- 39	28- 29-	5- 35-	11- 12	6- 38	14- 15- 3- 17- 21

Tableau IV.12:Intra classes de la classe 2

Intra-Classes	Echantillons				
1	8-36	2 – 9 – 10 – 13 – 16 – 18 – 19 – 37- 40			
2		9-10-13	2-16-18-19-37-40		
3	36-8	13	9-10	2-37	16- 18- 19- 40

Tableau IV.13:Intra classes de la classe 3

Intra-Classes	Echantillons			
1	33	4-7-26-27-32-34		
2		4	7-26-27-32-34	
3	33	4	7-32	26-27-34

IV.2.7- Conclusion

A l'issue de cette classification hiérarchique ascendante, nous pouvons dire que cette dernière présente beaucoup d'avantages, car elle a permis à partir du tracé du dendrogramme de visualiser le regroupement progressif des données, qui a pu nous fournir un nombre adéquat de classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

IV.3-Analyse en composantes principales (A.C.P.)

IV.3.1- Introduction

Pour l'interprétation significative de l'ensemble des données collectées de l'analyse chimique des eaux, nous avons utilisé la méthode de l'analyse en Composantes Principales (A.C.P) qui permet d'établir des corrélations entre les différentes variables et de préciser les relations entre les variables chimiques, les phénomènes à l'origine de ces relations ainsi que les relations communes ou spécifiques à chaque système.

IV.3.2-Principe de l'A.C.P

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses chimiques).

Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation.

Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée sur des variables centrées réduites à l'aide du logiciel EXCEL STAT -2016.

L'ACP est effectué sur les données chimiques de 40 points d'eau de la zone d'étude, de la campagne d'analyse de 1989, 7 variables ont été traitées, à savoir les ions majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}).

IV.3.3-Analyse statistique multivariable

L'objectif de cette analyse étant de décrire ou de classer les données, pour permettre l'interprétation du fonctionnement hydro-chimique des aquifères. Une analyse en composantes principales a été réalisée dans le but d'orienter l'étude hydro -chimique.

L'analyse en composante principale (ACP) est une méthode de réduction du nombre de variables permettant leur représentation géométrique. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls ([BourocheJ . M. &SaportaG., 1980).

a- Analyse factorielle

L'analyse factorielle (AF) est une méthode de synthèse qui permet de représenter un espace multidimensionnel par un espace de dimensions réduites qui soit une bonne Approximation de l'espace multidimensionnel (Strohmeier A., 1977; Davis J. C.1986; Saporta A., 1990).

Son objectif principal est d'extraire sous une forme condensée, la plus grande part de l'information contenue dans un lot de données numériques (Herbouch et Laffitte, 1970 *in* Gherissi R., 2008)]. Il s'agit d'expliquer les relations observées entre les fluctuations des teneurs des divers éléments dosés, en termes de relation plus simples et surtout plus fondamentales. Cette synthèse nécessite une série d'opérations mathématiques complexes, qui ont comme point de départ le tableau des coefficients de corrélation entre les variables.

Le but de notre étude, est de déterminer au moyen d'une approche statistique, les facteurs qui influencent sur la plus grande variabilité de ces éléments chimiques.

b-Cercles de corrélations

Corrélation entre les axes factoriels et les variables.

Chaque axe factoriel décrit une corrélation entre les variables analysées, les axes factoriels représentent les axes des éléments chimiques.

Sur le plan factoriel, les analyses des données se distribuent avec de nouvelles coordonnées qui dépendent du comportement des variables (Bouregaa M., 2008).

IV.3.4-Applications de l'A.C.P. sur les eaux du Plio Quaternaire de la plaine de Maghnia

Les résultats des analyses des éléments majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}), ont été traités à l'aide du logiciel EXCEL STAT -2016.

Le programme de calcul a fourni :

- Une matrice de corrélation des variables prises deux à deux.
- Les valeurs propres (variance sur les axes principaux) et la contribution des axes choisis à la variance totale (en pourcentage).
- Un tableau des coefficients de corrélation entre les variables et les axes factoriels Ainsi que leurs carrés
- Dans l'espace des individus, un tableau des coordonnées des individus sur les axes Factoriels et les cosinus des angles individu-axe factoriels.

Le but de cette A.C.P. est de tirer des conclusions concernant l'association des éléments chimiques, géochimiques et de caractériser la répartition des individus.

IV.3.5- Résultats de l'A.C.P.

a)- Matrice de corrélation

D'après les coefficients de corrélation ($r > 0,7$) (tableau IV.15), nous remarquons que les eaux présentent les caractéristiques suivantes :

- une bonne corrélation positive entre le Magnésium Mg^{2+} et les chlorures Cl^- .
- le Calcium Ca^{2+} est bien corrélé positivement avec les chlorures Cl^- .
- Le Sodium Na^+ est aussi bien corrélé positivement avec les chlorures Cl^- .
- Une corrélation assez bonne entre le Calcium et le Magnésium, ainsi qu'entre le Sodium et le Magnésium.

Tableau IV.14: Matrice de corrélation des paramètres chimiques des eaux de la plaine de Maghnia.

Variabes	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Ca ²⁺	1						
Mg ²⁺	0,642	1					
Na ⁺	0,496	0,640	1				
K ⁺	0,322	0,289	0,534	1			
Cl ⁻	0,739	0,876	0,702	0,363	1		
SO ₄ ²⁻	0,302	0,245	0,295	0,534	0,311	1	
HCO ₃ ⁻	0,152	0,301	0,063	0,080	0,182	0,434	1

R = 1

Bonne

Assez bonne

Moyenne

Mauvaise

On ne retient que les trois premiers axes principaux puisqu'ils expriment 83,378 % de la variance totale avec 51,355 % pour le premier facteur, 17,788% pour le second facteur et 14,235% pour le troisième facteur. Figure (III-8)

Le tableau ci-dessous illustre les valeurs propres des axes ainsi que leur contribution.

Tableau IV.15: Valeurs propres des axes et leurs contributions

Facteurs	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	3,59	1,25	1,00	0,50	0,32	0,25	0,10
Variabilité (%)	51,36	17,79	14,23	7,15	4,53	3,58	1,36
% cumulé	51,36	69,14	83,38	90,53	95,06	98,64	100,00

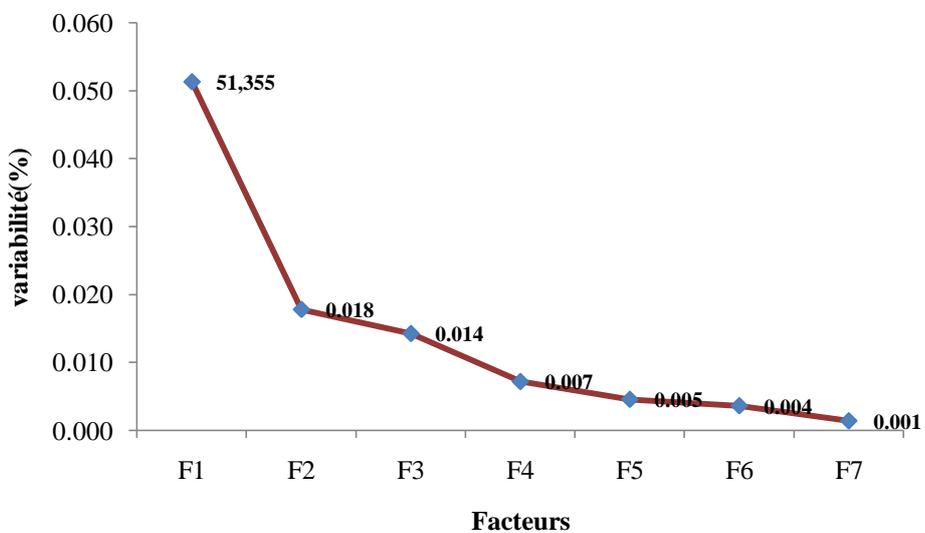


Figure IV.11: Valeurs propres de la matrice de corrélation

b)-Analyse des graphiques

Nous utilisons les composantes principales les plus intéressantes en termes de pourcentage de variabilité, pour observer la distribution des variables et des individus.

Dans ce cas, trois axes principaux ont été considérés. Le plan principal, ou plan (F1- F2) explique les trois cinquièmes (3/5) c'est-à-dire 69.14% de l'information le plan (F1 – F3) représente 65.8% c'est-à-dire légèrement moins par rapport au premier plan, les trois axes ensemble expliquent 83,378 % de l'information.

c)- Espace des variables

Le Tableau IV.13 montre que pour les variables,

-Le facteur 1 : exprimant 51.355% de l'inertie totale, est essentiellement très bien corrélé positivement et respectivement avec les variables : Chlorures, Magnésium et Sodium, il reste bien corrélé aussi avec le Calcium, et à un degré moindre le potassium et les sulfates, C'est le pôle des minéralisations, il est en bonne partie issu de l'interaction eau-roche (fig. IV.12).

-Le facteur 2 : exprime 17.788 % de l'inertie totale du nuage, il est bien corrélé positivement avec les sulfates SO_4^{2-} et avec un degré moindre avec les bicarbonates.

-Le facteur 3 : n'exprimant que 14,235%, il est moyennement corrélé positivement avec le Potassium et négativement avec les bicarbonates (fig.IV.13).

Tableau IV.16: Corrélation entre les variables et les axes principaux

	F1	F2	F3
Ca^{2+}	0,782	-0,221	-0,133
Mg^{2+}	0,856	-0,246	-0,292
Na^+	0,801	-0,202	0,263
K^+	0,608	0,310	0,639
Cl^-	0,904	-0,282	-0,139
SO_4^{2-}	0,554	0,706	0,156
HCO_3^-	0,339	0,649	-0,610

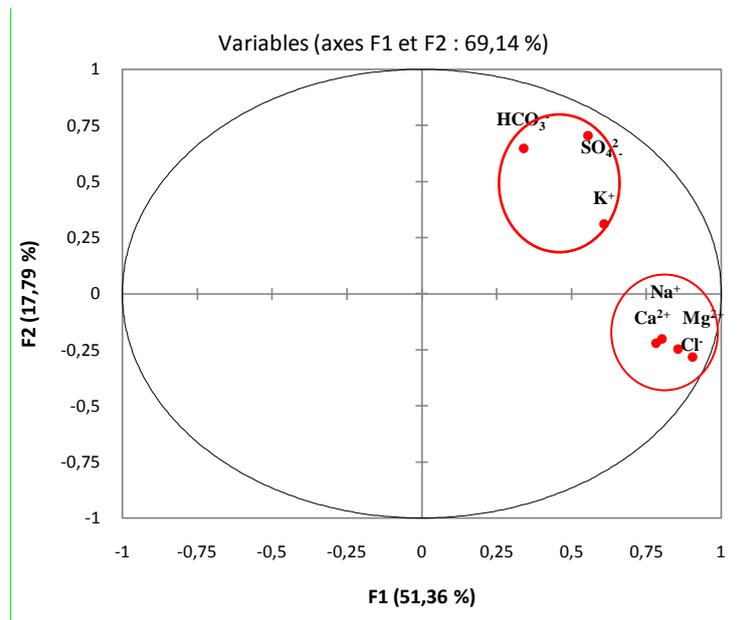


Figure IV.12: Projection des variables dans le plan factoriel (F1-F2) des eaux souterraines de la plaine de Maghnia

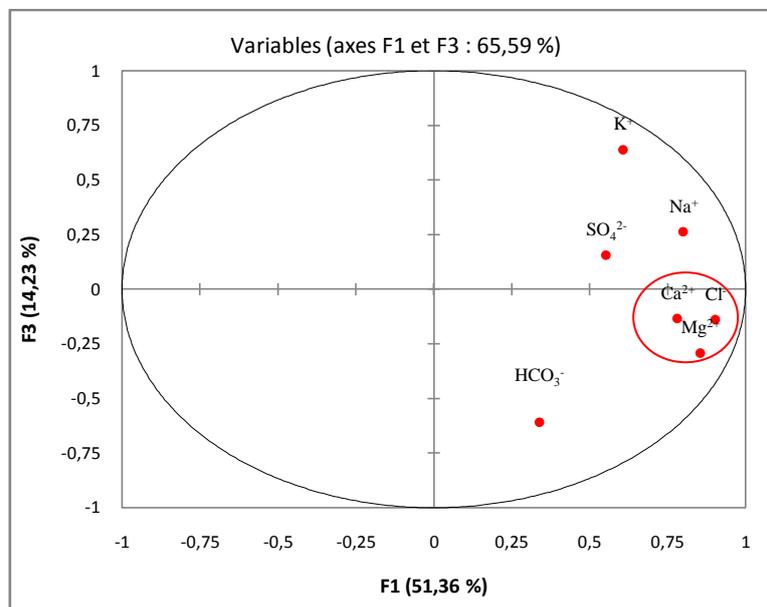


Figure IV.13: Projection des variables dans le plan factoriel (F1-F3) des eaux souterraines de la plaine de Maghnia.

d)- Espace des individus

Les individus se répartissent en fonction de leurs proximités dans les domaines définis par l'espace des variables (fig. IV.14 & 15):

L'analyse de la projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2) montre que nous pouvons subdiviser les points de mesure en 4 groupes (fig. IV.14).

- **Groupe1:**P21.P28.P15.P25.P14.P20.P39.P29.P30.P23P32.P11.P18.P3.P17.P38.P40.P2P16.P12.P36.P8.P10. P24.P35.P22

- **Groupe 2**.P37.P9.P13.P9.P6
- **Groupe 3** :P27.P7.P26.P4.P19.P34.P33
- **Groupe 4** : P1.P31
- **Groupe 1** : Ce sont les puits caractérisés par des teneurs élevées en Na^+ , Cl^-
- **Groupe 2** : Il regroupe les points d'eau moyennement minéralisés
- **Groupe 3** : Ce sont les puits caractérisés avec des teneurs élevées en sulfate et les bicarbonates. proviennent probablement des lessivages des roches gypsifères
- **Groupe 4** : ce sont les puits caractérisés avec des teneurs élevées en $(\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Cl}^-)$,

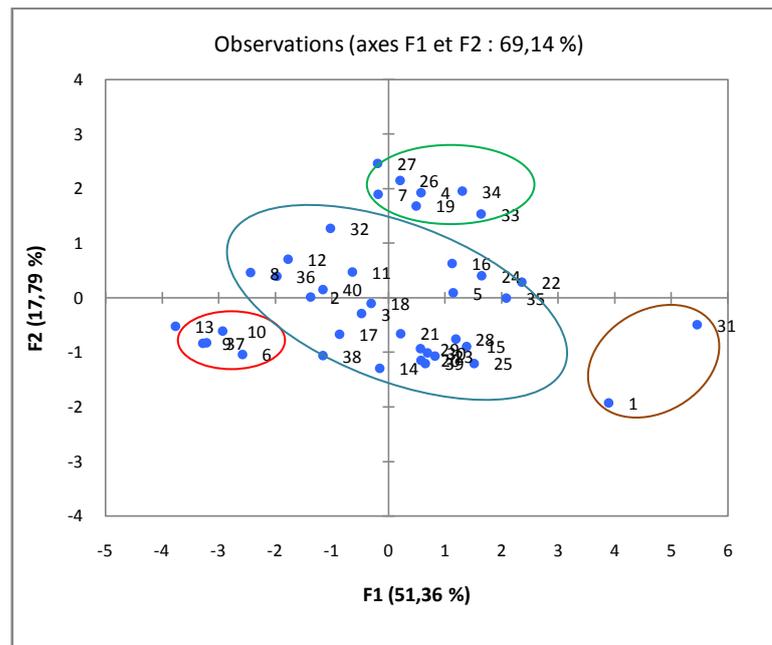


Figure IV.14: Projection des individus selon le plan (F1 – F2)

La deuxième analyse de la projection des individus faite sur le plan factoriel (F1-F3) montre une grande similitude avec la première projection (fig. IV.15) concernant le nombre de groupes qui est de cinq mais qui diffère dans l'attribution des individus:

- **Groupe1** : P5.P19.P21.P14.P18.P7.P27.P11.P3.P17.P40.P38.P32.P2.P25.P29.P30.P39.P23.P20.P26.P34.P16.P15.P22.
- **Groupe 2** :P4.P28.P33.P24.
- **Groupe 3** :P37-P9-P13-P10-P6-P12-P36-P8
- **Groupe 4**: P1.P31
- **Groupe5** : Le point d'eau 35, situé à l'extrême Nord-Ouest de la plaine de Maghnia, à proximité des frontières marocaines sont décalés vers le bas du plan, ils présentent une très forte concentration en bicarbonates.(525.9mg/L)

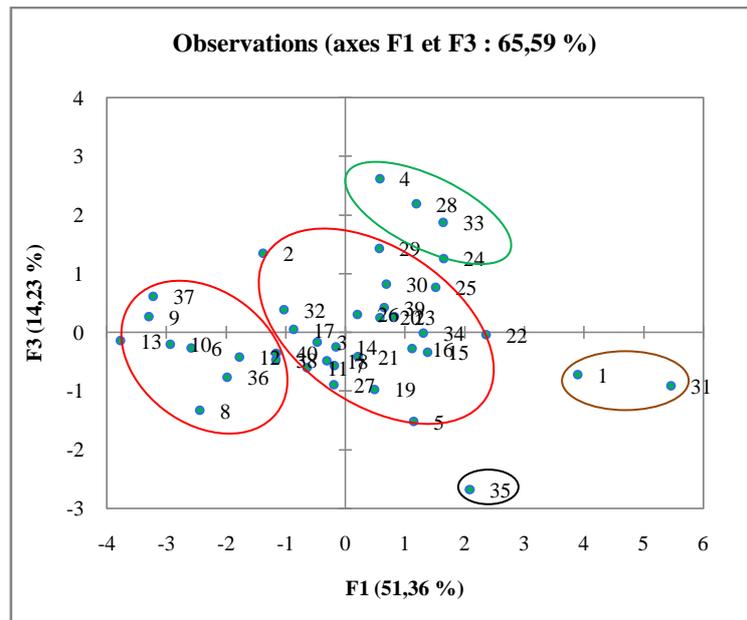


Figure IV.15: Projection des individus selon le plan (F1 – F3)

L'analyse en composantes principales, représentées par les matrices, les facteurs, et les cercles de corrélation, a confirmé le mode de minéralisation des eaux souterraines de la nappe alluviale de la plaine de Maghnia car :

- Certains puits situés à l'extrême Nord-Ouest (P1-P31) de la zone d'étude, sont caractérisés par de très fortes teneurs en Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} indiquent la probabilité d'une pollution chimique issue soit de l'utilisation excessive des pesticides pour l'irrigation, ou possibilité de contamination par les rejets qui proviennent du pays voisin, charriés par Oued Mouillah,
- D'autres puits situés au Nord et au Nord - Est (.P7.P26.P4.P19.P34.P33) de la plaine, présentent des valeurs élevées en HCO_3^- , cet élément provient probablement de la dissolution des formations carbonatées.

Le reste des points d'eau répartis sur toute l'étendue de la plaine de Maghnia, sont moyennement minéralisés avec une dominance des teneurs chlorurées, confirmant le faciès chimique des eaux souterraines dominant qui est chloruré magnésien sodique et calcique, d'où l'hypothèse d'une acquisition de la composition chimique des formations quaternaires qu'elles traversent.

IV.4-Discussions des résultats (Comparaison entre CAH et ACP)

La comparaison entre les résultats fournis par les deux méthodes CAH et ACP, montre une très grande similitude entre les deux tests (fig. IV.16), les puits sont regroupés presque dans les mêmes classes, exception faite pour les points d'eau 31 et 1 qui sont éloignés des autres groupes vraisemblablement à cause de la minéralisation élevée (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^-). Nous pouvons dire alors que l'ACP a fourni plus de détail que la CAH.

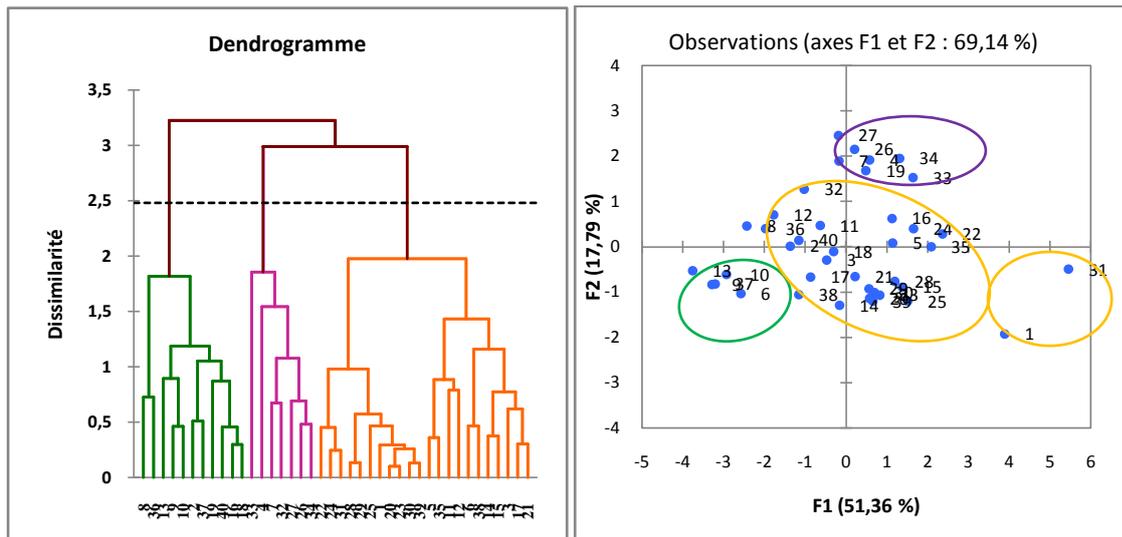
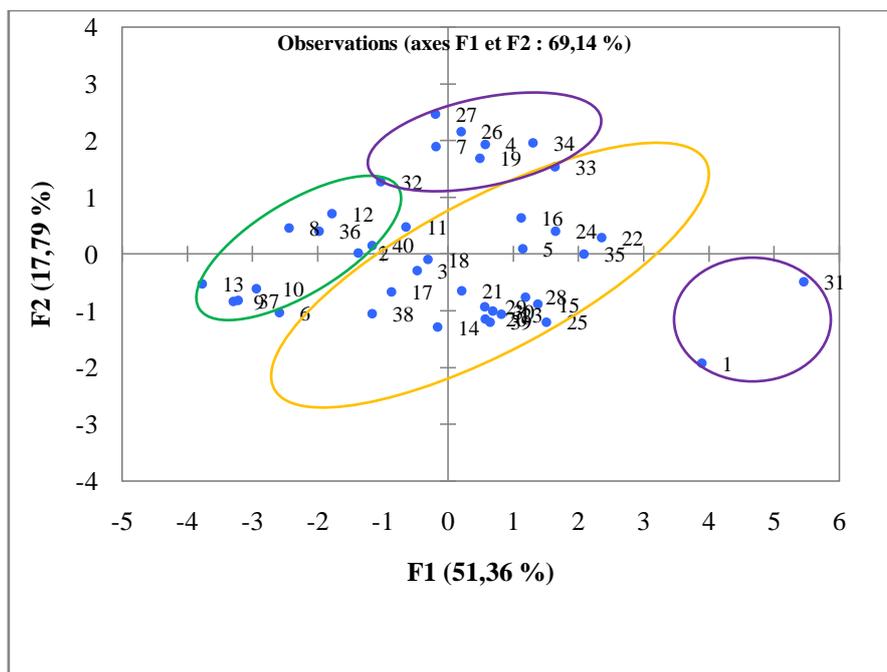


Figure IV. 16: comparaison entre la méthode CAH et ACP

Pour terminer nous avons tenté de confronter les résultats de la CAH avec l'ACP, pour ce faire, nous avons dessiné les classes issues du dendrogramme sur la projection factorielle (F1 – F2) de l'A.C.P. (fig. IV. 17). L'analyse de cette dernière figure met en évidence une certaine adéquation quand au nombre de classes, les puits 1 et 3 restent toujours isolés par rapport à l'ensemble. Nous remarquons aussi que la CAH a dissocié les points 32, 12, 11, 2, 40, 36 et 8 du grand cercle pour l'intégrer à la classe 3.

Figure IV. 17 : Confrontation C.A.H. et A.C.P.



IV.5- Conclusion

L'application de divers tests statistiques (Diagrammes en boîtes, CAH et ACP) confirme nos résultats de l'étude hydrochimique (chapitre III) concernant le mode de minéralisations des puits de la plaine et leurs teneurs en ions majeurs, ils permettent aussi de distinguer leur similarité chimique. Ces méthodes répartissent nos eaux en quatre groupes principaux:

Groupe 1 : (P7.P26.P4.P19.P34.P33) sont caractérisés par de très fortes teneurs en HCO_3^- , situés au Nord et au Nord - Est de la plaine.

Groupe 2 : (P1.P31) sont caractérisés par de très fortes teneurs en Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} situés à l'extrême Nord-Ouest de la zone d'étude,

Groupe 3 et 4 : Les restes des puits sont caractérisés par une minéralisation moyenne répartis sur toute l'étendue de la plaine.

Recommandations

1. Essayer de détecter par analyse, d'autres éléments chimiques, indicateurs de pollution industrielle et agricole, afin de confirmer l'hypothèse de la contamination chimique.
2. Avoir d'autres données plus récentes pour étudier l'évolution spatio-temporelle de cette minéralisation et essayer d'appliquer une ANOVA (analyse des variances) qui exprime mieux cette variabilité de la chimie des eaux.

Conclusion générale

Conclusion générale

La plaine de Maghnia est située à l'extrême Nord-Ouest algérien, elle s'étale sur une superficie de 216,13 Km²

Elle est caractérisée par un climat semi-aride avec une température moyenne annuelle de 17,9°C C. et des précipitations moyennes annuelles de 302,1 mm, durant la période 1979-2016, ce climat présente deux périodes.

- une période humide : s'étend du début Novembre jusqu'à la fin du mois d'Avril.
- une période sèche : s'étend du début Mai jusqu'à la fin Octobre

La géologie de la région d'étude (plaine de Maghnia) se caractérise par une série continue de sédiments Mio-Plio-Quaternaires.

L'étude hydrogéologique renseigne sur le sens de l'écoulement des eaux souterraines de l'aquifère alluvionnaire qui est orienté du Sud vers le Nord

La recharge de l'aquifère se fait à partir de trois alimentations :

- alimentation par les précipitations,
- alimentation par les Monts de Tlemcen (Jurassique),
- alimentation par la plaine des Angads (Maroc).

Notre étude hydro chimique montre que les faciès des eaux souterraines sont d'une manière générale Chlorurés calciques et magnésiens, chlorurés sodiques et potassiques, sulfaté calcique et bicarbonaté magnésien.

L'étude hydrochimique a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines et voir les facteurs naturels et anthropiques qui influent sur cette qualité.

Plusieurs modes et outils d'interprétation ont été utilisés (formules, abaques, diagrammes, statistique), qui ont montré :

La répartition spatiale des éléments chimiques a confirmé que l'origine de ces faciès est fortement liée à la nature lithologique de la nappe.

La présence de deux faciès chimiques marquant ainsi l'hétérogénéité de la lithologie, on peut citer:

le faciès chloruré magnésien, calcique, sodique caractérisant les eaux provenant des formations du remplissage Mio-Plio-Quaternaire, le faciès Sulfaté calcique résultant des formations évaporitiques principalement gypsifères surtout dans la partie Nord-est de l'aquifère .

Conclusion générale

Du point de vue qualitative, certains points d'eau dépassent largement les normes de potabilité algérienne présentant ainsi un réel danger sur la santé de la population de la région. Par ailleurs les puits sont classés dans les catégories bonne, admissible, et médiocre concernant l'aptitude des eaux pour des fins d'irrigation.

L'application des statistiques s'est avéré très intéressante pour la détermination des groupes, ainsi, nous avons pu par le biais de l'A.C.P. expliquer les corrélations entre les différents éléments chimiques majeurs et avoir des points de similarité entre les éléments permettant de regrouper les points d'eau.

La classification ascendante hiérarchique quant à elle, a facilité notre tâche concernant le choix des classes permettant d'avoir une idée sur le mode de minéralisation des eaux de l'aquifère alluvionnaire de la plaine de Maghnia.

Nous souhaitons avoir d'autres données pour d'autres campagnes des échantillons afin de comparer les résultats et avoir une idée sur l'évolution spatio-temporelle de cette minéralisation et essayer d'appliquer une ANOVA (analyse des variances) qui exprime mieux la variabilité spatio-temporelle de la chimie des eaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Appelo C.A. & Postma D., 1993.** Geochemistry, Groundwater and Pollution .Ed. Paperback, Rotterdam.683p.
- Baba Hamed K., 2007.** Hydrogéologie et modélisation d'une nappe alluviale, validation par approche géostatistique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (NW-algérien). Thèse Doctorat, Univ. Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 183p.
- Bonnet P., 1966.** Etude hydrogéologique de la plaine de Maghnia Rapport des services des études scientifiques, non publié, Univ. Tlemcen, Algérie.
- Bouregaa M., 2008.** Traitement informatique des données géochimiques (levé et forage) du secteur de Ténés- Cherchel. Mém. Ingénieur ,Univ. Tlemcen. 98p.
- Bouroche. J . M. et Saporta. G., 1980.** L'analyse des données.4^{ème} Ed.Collection Que Sais –je ? Presse Universitaire de France.47p.
- Braik F & Boudieb H., 2004.** hydrogéologique de la plaine de Maghnia (Algérie Nord Occidental), Mém. Ingénieur, Univ. Tlemcen, Algérie. 124p.
- Davis J. C.1986.** Statistics and data analysis in Geology . John Wiley & Sons. 118p.
- Document Hydraulique Agricole, 2004.**
- Gherissi R., 2008.** Les sources thermales du Nord algérien: Caractéristiques hydrogéochimiques, Mém. Ingénieur. Univ. Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie, 98p.
- Moudjib A., 2010.** L'aptitude des eaux de la région d'Ain-Sefra à des fins d'irrigations, Mém. Ingénieur,Univ, Tlemcen. Algérie, 132p.
- Paliwal K.V., 1967.** Effect of gypsum application on the quality of irrigation waters, The Madras Agricultural Journal.N°59, pp646-647.
- Queneau P. et Hubert J., 2009.** Place des eaux minérales dans l'alimentation. Rapport de l'académie national de médecine .Ed. Société française de l'hydrologie et climatologie médicale. France ,pp 175-220.
- Renard P, 2005.** La fin des certitudes ? Bulletin hydrogéologique N° 22. Centre d'hydrogéologie ,Univ. Neuchatel.Ed.Peter Lang .Suisse .17-22 pp.
- Rodier, 1984.**L'analyse de l'eau « eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer » Ed. Paris : Bordas, France. 568p.
- Saporta A., 1990.** Probabilité, analyse des données et statistique. Ed , Technip, Paris, France.
- Wilox L.V., 1948 .**The quality of water for agricultural use .US Dept Agriculture Tech. Bull.962, Washington DC, USA.
- Journal Officiel de la République Algérienne (JORA).2011.**Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif :la qualité de l'eau de consommation humaine .Ed.Les Vergers, Alger.Algérie.

Sites Web :

[http/.getamap.fr](http://getamap.fr)

[http/Hydraulique-agricole.actudz.com](http://Hydraulique-agricole.actudz.com)

<http://fr.wikihow.com/faire-une-bo%C3%A0Ete-%C3%A0-moustaches>

<https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/classification-ascendante-hierarchique-cah>

[facteur-et-tests-de-comparaisons-multiples-dans-excel?b_id=9283](https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/classification-ascendante-hierarchique-cah)

Logiciels utilisés :

Diagrammes – Corel DrawX6 - Excelstat2016

Liste des tableaux

- Tableau I.1 : Caractéristiques des bassins versants de Mouilah et d'Ouardefou
- Tableau I. 2 : Série du socle primaire
- Tableau I. 3 : Synthèse de la série du Secondaire
- Tableau I.4: Inventaire des réservoirs aquifères de la région (Baba Hamed K., 2007)
- Tableau II.1: Caractéristiques de la station de mesure.
- Tableau II.2 : Valeurs des précipitations moyennes annuelles à la station de Maghnia. (1979/1980-2015/2016).
- Tableau II.3: Variations des précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)
- Tableau II.4: Répartition des précipitations saisonnières à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016).
- Tableau II.5: Valeurs des Températures moyennes annuelles(1979/1980-2015/2016).
- Tableau II.6: Valeurs des températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)
- Tableau II.7 : Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles
- Tableau II.8: Indice d'aridité de De Martonne.
- Tableau II.9: Valeurs des indices d'aridité mensuelle.
- Tableau III.1: Résultats de la balance ionique
- Tableau III.2: Valeurs minimales, maximales, moyennes,des paramètres physico-chimiques des eaux de la plaine de Maghnia
- Tableau III.3: Classification des eaux souterraines de la plaine de Maghnia selon leurs faciès chimiques
- Tableau III.4: Classification des eaux selon le pH (JORA, 2011).
- Tableau III.5: Variations du pH des eaux de la plaine de Maghnia
- Tableau III.6: Variation de la conductivité ($\mu\text{s/cm}$)
- Tableau III.7: Valeurs de KR des eaux de la plaine de Maghnia
- Tableau III.8: Classification des eaux selon le % Na
- Tableau III.9: Valeurs de % Na des eaux de plaine de Maghnia
- Tableau III.10 : Variations du SAR des eaux de la plaine de Maghnia
- Tableau III.11: Classification des eaux selon le diagramme de Richards
- Tableau IV.1: Paramètres statistiques des eaux de la plaine de Maghnia
- Tableau IV.2 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées magnésiennes
- Tableau IV.3 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées sodiques
- Tableau IV.4 : Paramètres statistiques des eaux chlorurées calciques
- Tableau IV.5 : Paramètres statistiques des eaux sulfatées calciques
- Tableau IV.6 : Paramètres statistiques des eaux bicarbonatées magnésiennes
- Tableau IV. 7 : Similarités / dissimilarités d'une C.A.H. proposées par XLSTAT
- Tableau IV.9: Nœuds successifs du dendrogramme
- Tableau IV.10: Classes des individus par la C.A.H.
- Tableau IV.11:Intra classes de la classe 1
- Tableau IV.12:Intra classes de la classe 2

Liste des tableaux

- Tableau IV.13: Intra classes de la classe 3
- Tableau IV.14: Matrice de corrélation des paramètres chimiques des eaux de la plaine de Maghnia.
- Tableau IV.15: Valeurs propres des axes et leurs contributions
- Tableau IV.16: Corrélation entre les variables et les axes principaux

Liste des figures

- Figure I.1: Carte de localisation de la plaine de Maghnia (Baba Hamed K, 2007)
- Figure I.2 : Réseau hydrographique de la plaine de Maghnia (Zennagui K &., Zerrouki F.,2006).
- Figure I.3: Carte géologique de la plaine de Maghnia (Baba Hamed K., 2007)
- Figure I.4: Série stratigraphique synthétique de la plaine de Maghnia.(Baba Hamed K.,2007)
- Figure I.5: Coupe des forages réalisés dans la plaine de Maghnia (Baba Hamed K., 2007)
- Figure I.6 : Cartes piézométriques de la plaine de Maghnia(Mai 1995, Décembre 2003 et Janvier 2010).
- Figure II.1: courbe des précipitations annuelles à la station de Maghnia (1979/2016).
- Figure II.2: Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016).
- Figure II.3: Histogrammes des précipitations saisonnières à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016).
- Figure II.4: Variation interannuelle des températures à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)
- Figure II.5: Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)
- Figure II.6: Diagramme pluviométrique à la station de Maghnia (1979/1980-2015/2016)
- Figure II.7: Indice de De Martonne de la station la station de Maghnia
- Figure III.1: Localisation des points d'eau de la plaine de Maghnia.
- Figure III.2 : Corrélation entre les anions et les cations
- Figure III.3: Variation de l'ion Calcium
- Figure III.4: Variation de l'ion Mg^{2+}
- Figure III.5: Variation de l'ion Na^+
- Figure III.6: Variation des ions Cl^-
- Figure III.7: Variation des ions K^+
- Figure III.8: Variation des ions SO_4^{2-}
- Figure III.9: Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les eaux à faciès chloruré magnésien
- Figure III.10: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès chloruré magnésien
- Figure III.11: Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les eaux à faciès chloruré sodique
- Figure III.12: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès
- Figure III.13: Diagramme de Schoeller Berkaloff pour les eaux à faciès chloruré calcique
- Figure III.14: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès chloruré calcique
- Figure III.15: Diagramme de Schoeller-Berkaloff pour les eaux à faciès sulfaté calcique

Liste des figures

- Figure III.16: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès sulfaté calcique
- Figure III.17: Diagramme de Schoeller Berkloff pour les eaux à faciès bicarbonaté magnésien
- Figure III.18: Diagramme de Piper pour les eaux à faciès bicarbonaté magnésien
- Figure III.19: Variations du pH
- Figure III.20: Variation de la conductivité électrique au niveau des puits de la plaine de Maghnia
- Figure III.21: Variation du Kelly's Ratio des eaux de la plaine de Maghnia.
- Figure III.22: Variation du pourcentage en Sodium des eaux de la plaine de Maghnia
- Figure III.23: Diagramme de Wilcox des eaux de la plaine de Maghnia
- Figure III.24: Variation du SAR (Sodium Absorption Ratio)
- Figure III.25: Diagramme de Richards appliqué aux eaux de la plaine de Maghnia
- Figure IV.1: Représentation des eaux de la plaine de Maghnia
- Figure IV.2: Représentation des eaux à faciès chloruré magnésien
- Figure IV.3: Représentation des eaux à faciès chloruré sodique
- Figure IV.4: Représentation des eaux à faciès chloruré calcique
- Figure IV.5: Représentation des eaux à faciès sulfaté calcique
- Figure IV.6: Représentation des eaux à faciès bicarbonaté magnésien
- Figure IV.7 : Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).
- Figure IV.8: Etapes de la classification ascendante hiérarchique
- Figure IV.9: Diagramme des niveaux
- Figure IV.10: Dendrogramme des eaux du Plio-Quaternaire de la plaine de Maghnia
- Figure IV.11: Valeurs propres de la matrice de corrélation
- Figure IV.12: Projection des variables dans le plan factoriel (F1-F2) des eaux souterraines de la plaine de Maghnia
- Figure IV.13: Projection des variables dans le plan factoriel (F1-F3) des eaux souterraines de la plaine de Maghnia.
- Figure IV.14: Projection des individus selon le plan (F1 – F2)
- Figure IV.15: Projection des individus selon le plan (F1 – F3)
- Figure IV.16: comparaison entre la méthode CAH et ACP
- Figure IV.17 : Confrontation C.A.H. et A.C.P.

Liste des abréviations

- **% Na** : Pourcentage de Sodium
- **°F** : degré français
- **A.C.P** : Analyse en composantes principales
- **BI** : balance ionique (BI)
- **C.A.H**: Classification ascendante hiérarchique
- **Ca²⁺** : ion calcium
- **Ce** : Conductivité électrique
- **Cl**.ion chlorure
- **HCO₃⁻** bicarbonates
- **JORA** : Journal Officiel de la République Algérienne
- **K⁺**ion potassium
- **KR**: Kelly's Ratio
- **Meq/L** : milliéquivalent par litre
- **mg/ L** : milligrammes par litre
- **Mg²⁺**ion magnesium
- **Na⁺**ion sodium
- **pH** :
- **PH**: Potentiel d'hydrogène
- **SAR** : Sodium Absorption Ratio
- **SC** : Somme des carrées
- **SO₄²⁻**ion calcium sulfate

Annexes

Paramètres	Unité	Concentration Maximale Admissible
Conductivité	µs/cm à 23 °C	2800
Résidu Sec	mg/l après séchage à 105°C	2000
Dureté Totale	mg/l Ca CO ₃	500
Calcium	mg/l	200
Magnésium	mg/l	150
Sodium	mg/l	200
Potassium	mg/l	20
Sulfates	mg/l	400
Chlorures	mg/l	500
Nitrates	mg/l	50
Nitrites	mg/l	0,1
Ammonium	mg/l	0,5
Phosphate	mg/l	0,5
Aluminium	mg/l	0,2

Annex II: Les normes de potabilité d'une eau de consommation telles que précisées par le journal officiel de la république algérienne (Jora), 2011, Décret exécutif n°11-125

Puits mg/L	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
1	179,4	197,04	312,6	5,8	876,1	139	344
2	98,2	51,4	148,8	7,8	251,3	79	264,7
3	136,27	53,46	156	4	461,5	120,54	333,17
4	160,32	41,47	141	14	180,7	308,5	309,98
5	132	164,37	108	4	610,7	222,2	410,05
6	105	66,3	55,5	1,6	249,3	37	208,6
7	112,22	62,72	93	4	497	373,17	425,31
8	106,4	64,8	59,2	1,6	115	68	416
9	99,4	35,5	66,2	1	127,9	68	164,7
10	98,4	43,3	79,2	0,7	177	73	228,1
11	154,31	63,18	27	4	443,75	228,74	328,29
12	80,22	77,76	53	4	337,25	160,03	351,4
13	72	42	28,6	1	153,4	37	213,5
14	143,4	103,6	145	3,5	469	91	246,5
15	143	132	233,2	5,1	580	130	342
16	126,25	122,7	184	8	479,2	161,2	456,4
17	93,6	97,2	188,6	2,6	371,5	137	258,6
18	114,8	101,4	181,3	3,5	355,3	142	361,1
19	106,21	102,06	191	6	372,7	209,4	566,2
20	132,6	119,1	191,3	5,2	536,9	125	246,4
21	117,6	114,4	218,6	3,4	449,6	125	335,5
22	152,3	142,4	212	7	639	303,6	366,12
23	131,4	128,2	186,5	5,8	571,7	135	252,5
24	113,83	123,9	196	10	639	271,3	295,9
25	142,2	147,6	175,5	7,8	642,2	165	204,9
26	94,59	89,91	152	7	355	365,7	425,9
27	94,59	82,13	147	4	319,5	358,3	523,5
28	111	105,6	249,7	10,2	598,2	169	183
29	112	105,7	220,5	7,4	545,3	158	189,1
30	121,4	112,6	190,5	6,8	607,3	139	223,2
31	226,7	190,7	299	6	976,25	400,29	397,8
32	115,43	63,18	69	5	284	319,66	296,5
33	126,65	113,72	207	9	411,5	499,2	242,8
34	112,22	114,7	193	8	440,2	337,35	484,5
35	160	180,68	94	4	771	170,32	525,9
36	95	107,89	24	4	162,48	102,61	349,6
37	85	36	95	1,6	146	69	156
38	140	86	90	2,3	350	88	240
39	130	127	185	5,5	550	140	220
40	100	78	150	3,3	300	130	355

Ce (µs/cm)	PH
3700	7,8
1520	7,7
1423	7,9
2439	8,1
1220	7,4
1160	7,8
1131	7,4
1050	7,6
910	7,4
1000	7,7
1626	7,9
1220	8
740	7,7
2310	7,7
2885	7,7
1931	8
2110	7,9
2380	7,5
1728	8,1
2100	7,3
2600	7,3
2236	7,1
2680	7,7
2033	7,7
2740	7,3
1524	7,5
1525	7,7
2800	7,6
2580	7,9
2470	7,2
3049	8,1
1220	7,3
1931	7,2
1931	7,2
2452	7,6
2134	7,4
1033	7,3
1475	7,5
2675	7,3

Annex I : le tableau des résultats d'analyse en mg /L en annexe

