

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE de TLEMCCEN

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE

Présenté par

HAROUAT Mohammed Reda

Et

BENMEDJAHED Abdelrafie

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

(Spécialité : Hydrogéologie)

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROGEOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES
DE LA ZONE FRONTALIERE
SUD-OUEST DE MAGHNA (NORD-OUEST ALGERIEN).**

Soutenu le, devant le jury composé de :

Président	Mr BENCHOUK.M	MAA	Université de Tlemcen
Encadreur	M ^{me} GUETTAIA .S	MCB	Université de Tlemcen
Co-Encadreur	Mr BOUDJEMA .A	MCA	Université de Tlemcen
Examineur	Mr CHIKH.M	MAA	Université de Tlemcen

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur M^{me}. BOUDJEMA .S Née GUETTIA pour son aide, ses conseils et sa confiance qui nous ont permis de mener à bien notre mémoire.

Nos grands remerciements sont adressés aussi à notre Co-encadreur Mr. BOUDJEMA .A pour sa compréhension, ses conseils, son aide et ses orientations efficaces, durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier vivement Mr BENCHOUK.M et Mr CHIKH .M pour l'honneur qu'ils nous ont fait de faire part du jury, d'avoir accepté de présider et d'examiner ce travail.

Nous remercions également les enseignantes et les enseignants du département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'université de TLEMCEEN.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire : M^{me} BOUABSA.K, chef de service du laboratoire de l'ADE/ Maghnia, ainsi que M.YOUSFI, chef de la station de météo de Maghnia et M^{me} BEN AMARN, chef de service du laboratoire de l'ADE/ Tlemcen.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers parents : ma mère et mon père

**Pour leur soutien, leur patience, leur amour et leurs encouragements, durant mon
parcours de la vie quotidienne**

A mon frère et mes sœurs, leurs époux et enfants

A mes amis et mes camarades

Sans oublier le Chef de département et tous les enseignants du département /STU.

HAROUAT MOHAMMED REDA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères et leurs enfants, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis et camarades

A Réda, cher ami, avant d'être mon binôme

A vous, chers lecteurs.

BEMNEDJAHED ABDELRAFIE

Contribution à l'étude hydrogéochimique des eaux souterraines de la zone frontalière sud-ouest de Maghnia (Nord-Ouest algérien).

Résumé :

Notre modeste étude a pour objectif l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines captées par un certain nombre de forages de l'Algérienne Des Eaux (ADE) dans la commune frontalière de Béni-Boussaïd.

Cette étude a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines et de déterminer les facteurs naturels et anthropiques qui influent sur cette qualité. Le diagramme de Schoeller-Berkaloff montre que les faciès hydro- chimiques des eaux souterraines sont : Sulfaté calcique à sodique, Sulfaté magnésien, Bicarbonaté magnésien à calcique, Chloruré calcique. Le diagramme de Piper a classé les eaux de la région de Béni-Boussaïd selon deux grandes familles : Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne et Bicarbonatée calcique et magnésienne.

Du point de vue de la potabilité, 90% des forages sont conformes aux normes algériennes de potabilité. Les 10% restant sont caractérisés par des teneurs élevées en Sodium, Calcium et Sulfate qui dépassent les normes.

Concernant l'irrigation, la plupart des points d'eaux sont convenables, à l'exception de quelques forages. Selon le calcul des indices (Kr et %Na⁺) et les diagrammes de Riverside et de Wilcox, la plupart des classes sont bonnes à médiocres pour l'irrigation.

Enfin, l'utilisation des deux méthodes statistiques (ACP, CAH) et outils d'interprétation (diagrammes) a montré que :

- Les faciès sont fortement liés à la nature lithologique de l'aquifère.
- La présence de ces faciès chimiques témoigne de l'hétérogénéité de la lithologie de l'aquifère.

Mots clés : Béni-Boussaïd, eaux souterraines, qualité, Diagrammes, statistique, ACP, CAH.

Contribution to the hydro -geochemical study of groundwater in the south-west border area of Maghnia (north-west Algeria).

Abstract:

Our modest study aims to assess the physio-chemical quality of the groundwater captured by a number of boreholes from the algerian waters, in the border town of Beni-Boussaïd.

This study was carried out in order to characterize the quality of groundwater and to determine the natural and anthropogenic factors which influence this quality. The Schoeller-Berkaloff diagram shows that the hydro-chemical facies of groundwater are: Calcium to sodium sulphate, Magnesium sulphate, Magnesium to calcium bicarbonate, Calcium chloride. The Piper diagram classified the waters of the Beni-Boussaïd region according to two main families: Chloride and sulphate of calcium and magnesium, and Bicarbonate of calcium and magnesium.

From the point of view of potability, 90% of the boreholes comply with algerian standards for drinking water. The remaining 10% are characterized by high levels of Sodium, Calcium and Sulphate which exceed the standards.

Regarding irrigation, most of the water points are suitable, except for a few boreholes. According to the calculation of the indices (Kr and $\% Na^+$) and the Riverside and Wilcox diagram, most of the classes are good to mediocre for irrigation.

Finally, the use of two statistical methods (PCA, CAH) and interpretation tools (diagrams) showed that:

- The facies are strongly linked to the lithological nature of the aquifer.
- The presence of these chemical facies testifies to the heterogeneity of the lithology of the aquifer.

Keywords: Beni-Boussaïd, Groundwater, Quality, Diagrams, Statistics, PCA, CAH.

مساهمة في الدراسة الهيدروجيوكيميائية للمياه الجوفية في المنطقة الحدودية جنوب غرب مغنية (شمال غرب الجزائر). نبذة مختصرة:

تهدف دراستنا المتواضعة إلى تقييم الجودة الفيزيائية و الكيميائية للمياه الجوفية التي تم استغلالها بواسطة عدد من الآبار من الجزائرية للمياه ،في مدينة بني بوسعيد الحدودية.

أجريت هذه الدراسة لتقييم نوعية المياه الجوفية و تحديد العوامل الطبيعية و البشرية التي تؤثر على هذه النوعية. يوضح مخطط Schoeller-Berkaloff أن السمات المائية الكيميائية للمياه الجوفية هي : الكالسيوم إلى كبريتات الصوديوم، كبريتات المغنيسيوم، المغنيسيوم إلى بربونات الكالسيوم، كلوريد الكالسيوم. صنف مخطط بايبر مياه منطقة بني بوسعيد حسب عائلتين رئيسيتين : كلوريد و كبريتات الكالسيوم والمغنيسيا و بربونات الكالسيوم و المغنيسيا.

من وجهة نظر قابلية الشرب، 90٪ من الآبار تتوافق مع المعايير الجزائرية لمياه الشرب. أما نسبة الـ 10٪ المتبقية فتتميز بمستويات عالية من الصوديوم والكالسيوم والكبريتات تتجاوز المعايير.

فيما يتعلق بالري، فإن معظم نقاط المياه مناسبة، باستثناء عدد قليل من الآبار. وفقاً لحساب المؤشرات Kr و $\% Na$ ومخطط ريفرسايد و ويلكوكس، فإن معظم الفصول جيدة إلى المتوسط بالنسبة للري.

أخيراً، أظهر استخدام طريقتين إحصائيتين (PCA, CAH) وأدوات التفسير (الرسوم البيانية) ما يلي:

- * ترتبط الحسنة ارتباطاً وثيقاً بالطبيعة الصخرية لطبقة المياه الجوفية.
- * يشهد وجود هذه النواحي الكيميائية على عدم تجانس الصخر في الخزان الجوفي.

الكلمات المفتاحية: بني بوسعيد، المياه الجوفية، الجودة، الرسوم البيانية، الإحصاء، PCA، CAH .

Table des matières.

Remerciement

Dédicaces

Résumés

INTRODUCTION GENERALE.....	8
CHAPITRE 01 :SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	11
1- Localisation :	12
2- Aspects socio-économiques :	12
3- Hydrographie :.....	13
CHAPITRE 02 :CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE	14
1- Introduction :	15
2- Etude des précipitations :	16
2.1- Variations des précipitations moyennes annuelles :	16
2.2- Variation des précipitations moyennes mensuelles :	17
2.3- Les précipitations saisonnières :	17
3- Etude des températures :.....	18
4- Etude du climat :.....	20
4.1- Méthode graphique de Bagnouls et Gaussien :.....	20
4.2- Les indices climatiques :.....	21
5- Bilan hydrologique :	24
5.1- Evapotranspiration :.....	24
6- Conclusion :.....	28
CHAPITRE 03 :CONTEXTE GEOLOGIQUE	29
1- Cadre Géologique :.....	30
2- Série litho-stratigraphique :	30
2.1- Le paléozoïque :.....	30
2.2- Le Mésozoïque :.....	31
3- Etude Structurale de la région:	36
3.1- Tectonique souple :	36
3.2- Tectonique cassante :.....	37
4- Conclusion:.....	37

CHAPITRE 04:CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	38
1- Introduction :	39
2- Identification des différents aquifères :	39
3- Synthèse hydrogéologique :	41
4- Conclusion :.....	43
CHAPITRE 5:CONTEXTE HYDROGEOCHIMIQUE.....	44
1- Introduction :	45
1.1- Balance ionique :	46
2- ÉTUDE CLASSIFICATIVE ET QUALITATIVE DES EAUX SOUTERRAINES:	47
2.1- Faciès hydro-chimiques :.....	47
2.2- Aptitude des eaux souterraines pour la consommation humaine :.....	55
2.3- Aptitude des eaux souterraines destinées à l'irrigation :	63
3- ORIGINE DE LA MINERALISATION :.....	70
3.1- Etude statistique :.....	70
4- Conclusion :.....	76
CONCLUSION GENERALE	78
Références bibliographiques	
Annexes	
Liste des figures et des tableaux	
Résumés.	

INTRODUCTION GENERALE


Le territoire de la commune de Maghnia est situé au Nord-Ouest de la wilaya de Tlemcen en Algérie. Sur le plan administratif, la ville de Maghnia est limitée au Nord par la commune de Souani, au Sud par la commune de Béni-Boussaid, à l'Est par la commune de Hammam Boughrara et à l'Ouest par le Maroc.

Le bassin hydrogéologique de la plaine de Maghnia renferme des ressources hydriques assez importantes (Bonnet, 1965). L'accroissement des besoins en eau pour l'alimentation des populations, les activités industrielles et agricoles a conduit les gestionnaires à intensifier les prélèvements au niveau des principaux champs captant la plaine. Cette situation a eu pour conséquence une chute du niveau de la nappe du Plio-Quaternaire. Pour cela, et afin de renforcer les besoins en eau et d'identifier la géométrie et les caractéristiques des réservoirs du Jurassique, une prospection hydrogéologique a été menée sur la région de Béni-Boussaïd.

La commune frontalière de Béni-Boussaïd où sont concentrés les points d'eau retenus pour l'étude, est située à une quarantaine de kilomètres au Sud-Ouest de la ville de Maghnia. Sa population était de 15 000 habitants en 2016. Elle s'étale sur une superficie de près de 330 km², et est constituée de plusieurs localités éparses, dont Sidi Mbarek, Mohamed Salah, Hidès et Roubane, AyerAghrib et Ouled Moussa.

Depuis quelques années, la région revient progressivement à sa vocation naturelle, à savoir l'agriculture. Ce retour a été rendu possible grâce à la mise en service du petit barrage hydraulique de Tizi Sial d'une capacité de 3 millions de m³, destiné essentiellement à l'irrigation des terres agricoles ; Cette modeste réalisation a contribué grandement au développement des cultures maraîchères, de l'élevage et de l'arboriculture, notamment de l'olivier, ce qui a permis à l'agriculture de retrouver toute sa place dans le développement socio-économique de cette région frontalière avec le Maroc.

Le présent travail est une contribution à l'étude hydrogéochimique de quelques forages captés dans la région de Beni Boussaid (Zouia) par l'Algérienne Des Eaux (ADE) de Maghnia. Il s'étale sur cinq chapitres :

 **Chapitre 1 : Cadre Géographique.** Dans ce premier chapitre, nous présentons la situation locale de la région étudiée.

- ✚ **Chapitre 2 : Cadre Climatologique.** Dans ce second chapitre, nous faisons ressortir le type du climat général qui règne dans notre secteur d'étude ainsi que l'analyse de la variation des paramètres climatiques.

- ✚ **Chapitre 3 : Cadre Géologique.** Où nous décrivons les différentes formations géologiques et les grands traits structuraux présents dans la zone d'étude.

- ✚ **Chapitre 4 : Cadre Hydrogéologique.** Nous identifions, dans ce chapitre, les formations géologiques qui peuvent être aquifères.

- ✚ **Chapitre 5 : Cadre Hydrogéochimique :** Dans ce dernier chapitre, nous avons déterminé la qualité physico-chimique des eaux des forages, leurs faciès, leur potabilité selon les normes algériennes et aussi leur aptitude pour l'irrigation. Aussi, nous avons réalisé une étude statistique dans le but de comprendre l'origine de la minéralisation des eaux et la corrélation entre les différents éléments chimiques (ions).

- ✚ Ce travail est clôturé par une **Conclusion Générale**, dans laquelle nous avons avancé quelques recommandations visant une bonne gestion et une utilisation raisonnable des eaux des forages.

CHAPITRE 01 :

SITUATION GEOGRAPHIQUE

1. Localisation :

La commune de Béni-Boussaid, dont le chef lieu est Zouia, est située à l'Ouest de la wilaya de Tlemcen, à proximité de la frontière algéro-marocaine et plus précisément au Sud-Ouest de Maghnia, à une distance de 25 km de cette dernière, en accédant par la route qui relie Maghnia à El Abed (**Fig.1**).

La zone étudiée qui couvre une étendue d'environ 329 Km² (<https://www.wikipedia.org/>) est localisée sur le piémont Nord-Ouest du massif de Ghar-Roubane. Ce dernier constitue la terminaison occidentale des Monts de Tlemcen.

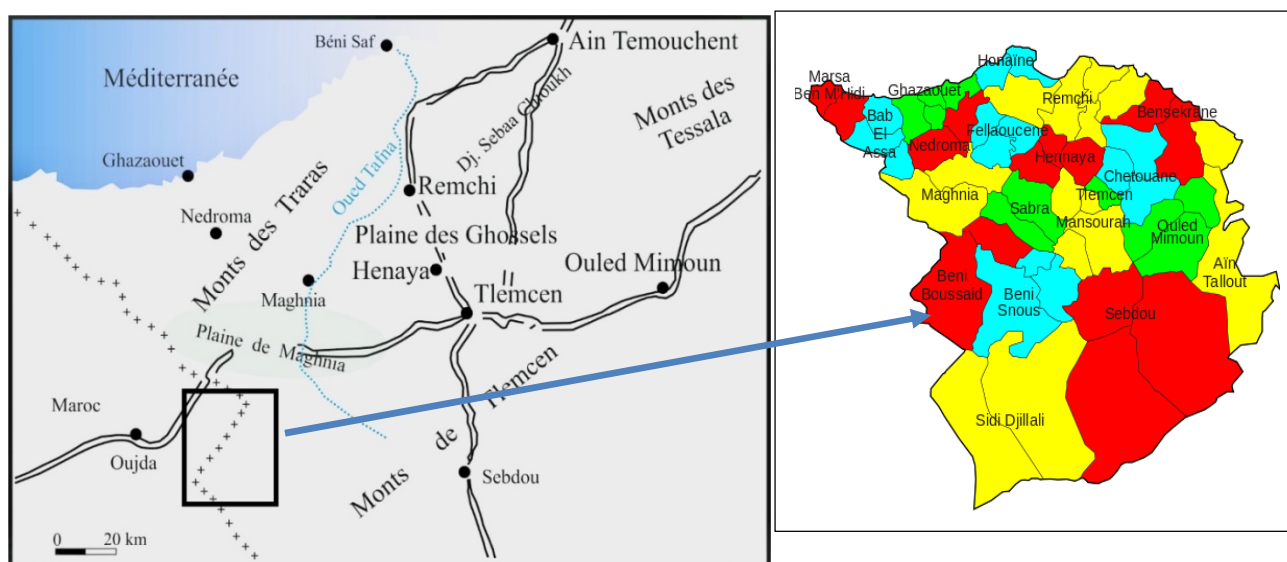


Fig.1 : Situation géographique de la zone d'étude.
(BABA HAMED.K, 2007 *modifiée*).

2. Aspects socio-économiques :

Beni Boussaïd est constituée de plusieurs localités éparses : Zouia, Sidi Mebarek, Mohamed Salah, Hïdess, Roubane, AyerAghrib et Ouled Moussa. Sa population a été évaluée à 15000 habitants, en 2016(Le Temps d'Algérie,18/01/2016).

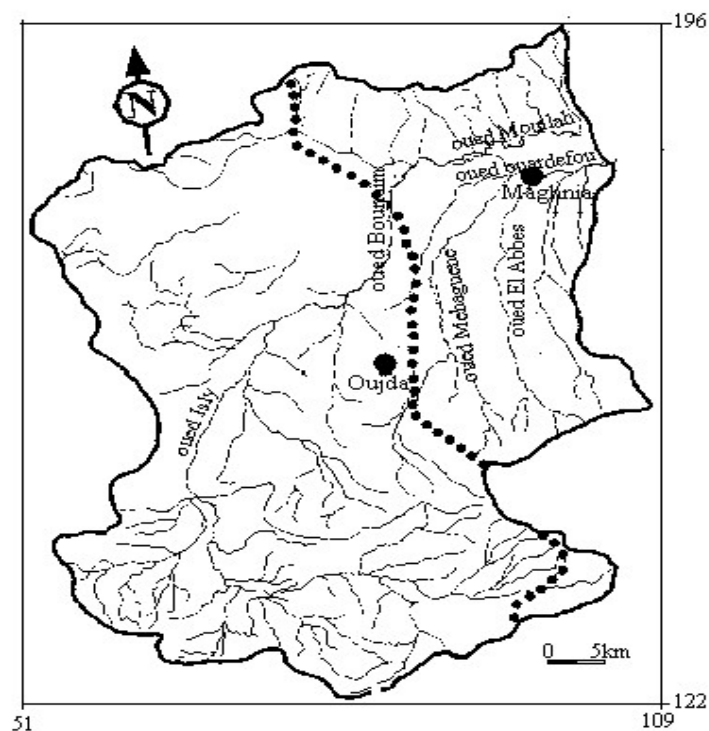
Cette commune est à vocation agricole. Depuis la mise en service du petit barrage de «Tizi Sial» d'une capacité de 3 millions m³, destinée essentiellement à l'irrigation des terres agricoles, les cultures maraîchères ont été développées, l'élevage et l'arboriculture, notamment l'olivier. Cette réalisation hydrique a permis à l'agriculture de retrouver toute sa place dans le développement

socio-économique de cette région frontalière avec le Maroc.

Une économie de substitution à la contrebande s'est installée depuis les trois dernières années et un intérêt particulier a été accordé aux jeunes dans la mise en valeur des terres et l'investissement dans le secteur de l'agriculture et l'agroalimentaire.

3. Hydrographie :

La zone d'étude fait partie du bassin versant de l'Oued Mouilah, important affluent rive gauche de la Tafna, qui prend naissance dans la région d'El Abed, en Algérie, à 1250m d'altitude, puis pénètre au Maroc sous le nom d'Oued Isly qui est un cours d'eau intermittent. Il redevient permanent en aval de la ville d'Oujda (Maroc) à 490m d'altitude, sous l'appellation d'oued Bounaïm, et enfin pénètre en Algérie, à environ 12 km à l'Ouest de Maghnia et prend le nom d'Oued Mouilah (Fig.2).



Légende :

∩ Cours d'eau.

••• Frontière algéro-marocaine.

Fig.2 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Mouilah (BABA HAMED.K, 2007).

CHAPITRE 02 :

CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE

1. Introduction :

La climatologie s'appuie sur l'analyse de la distribution statistique des variables météorologiques, telles que : la température, les précipitations, le soleil, l'humidité, le vent et la pression atmosphérique d'une région donnée sur une période donnée.

Les variables climatiques jouent un rôle important dans la formation et le comportement des systèmes aquifères.

Dans ce chapitre, nous analysons les données des deux principales variables météorologiques qui influent directement les régimes hydrologiques de la région où se situent les 20 puits retenus dans le cadre du thème de notre mémoire, à savoir :

- Les précipitations liquides, qui déterminent l'apport d'eau à la nappe. Nous analyserons leur abondance, et leur fréquence périodiques (annuelle, mensuelle et saisonnière).
- Les températures et leur influence sur l'évapotranspiration, paramètre essentiel du déficit d'écoulement.

L'étude des données de ces deux variables portera sur une période de 30 ans (1990-2019), pour expliquer les variations des principaux composants du système hydrologique (Annexes 1 et 2).

Les données ont été obtenues auprès de la station climatologique de Maghnia.

Tableau 1 : Caractéristiques de la station.

Station	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Type de la station
Maghnia	34°48'42.31"N	1°46'58.51" O	421	Climatologique

Source : (Google Earth Pro)

2. Etude des précipitations :

2.1. Variations des précipitations moyennes annuelles :

Les précipitations moyennes annuelles qui s'étalent sur la période de 1990/2019, sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2: Précipitations moyennes annuelles.

Période	Précipitations annuelles (mm)	Période	Précipitations annuelles (mm)
1990/1991	357,9	2005/2006	247,0
1991/1992	442,5	2006/2007	235,0
1992/1993	246,3	2007/2008	224,0
1993/1994	271,1	2008/2009	448,0
1994/1995	263,4	2009/2010	430,0
1995/1996	548,7	2010/2011	287,0
1996/1997	354,6	2011/2012	235,0
1997/1998	429,6	2012/2013	271,0
1998/1999	221,1	2013/2014	272,0
1999/2000	200,6	2014/2015	447,1
2000/2001	240,2	2015/2016	158,5
2001/2002	368,8	2016/2017	276,4
2002/2003	339,9	2017/2018	259,0
2003/2004	340,8	2018/2019	387,0
2004/2005	176,3	2019/2020	303,5
Moyenne annuelle (mm)	309.4		

Il apparait clairement ci-dessus que l'année **1995** a été la plus pluvieuse, avec **548.7mm** de précipitations et l'année **2015** la plus sèche, avec **158.5mm** de précipitations.

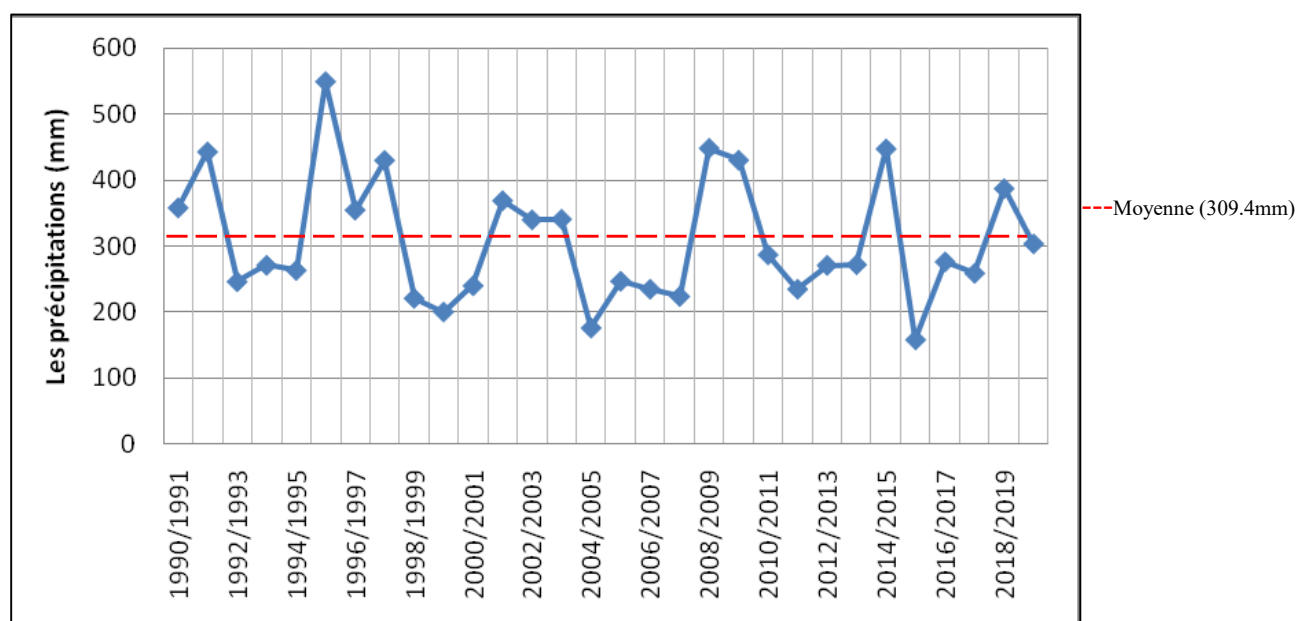


Fig.3: Variations des précipitations moyennes annuelles.

Ce graphe présente des variations alternées de périodes humides et sèches, avec une moyenne annuelle de **309.4 mm**.

2.2.Variation des précipitations moyennes mensuelles :

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles déterminées sur la période (1990-2019), sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
P(mm)	19,3	26,7	39,8	32,8	43,1	31,7	36,1	31,8	30,7	9	1,9	6,3

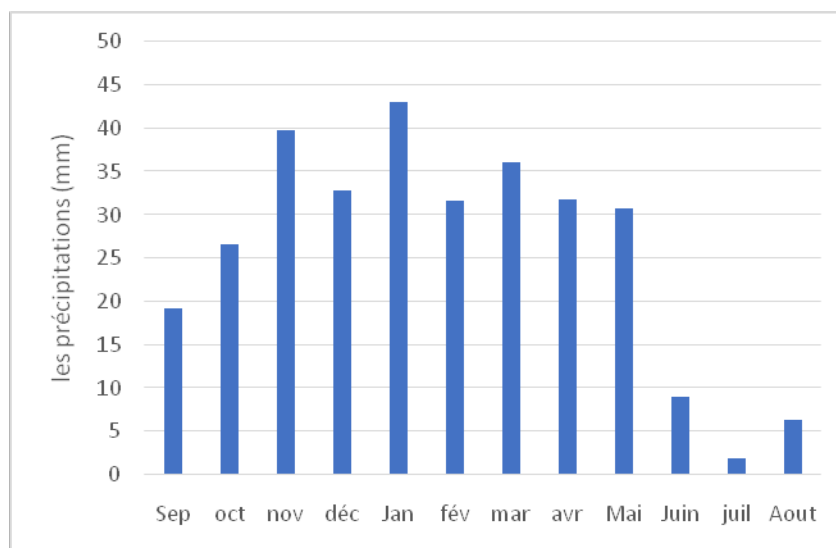


Fig.4: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles.

Le tableau 3 et la figure 4, montrent que le mois de Janvier est le plus humide, avec 43.1mm de précipitations, tandis que celui de Juillet est le plus sec avec 1.9mm.

2.3. Les précipitations saisonnières :

Les précipitations saisonnières correspondent aux quatre saisons de l'année , redéfinies comme suit:

- **Automne** : Septembre, Octobre, Novembre ;
- **Hiver** : Décembre, Janvier, Février ;

- **Printemps** : Mars, Avril, Mai ;
- **Eté** : Juin, Juillet, Août.

Le tableau 4 représente les valeurs moyennes des précipitations saisonnières à la station de Maghnia, durant la période 1990/2019.

Tableau.4 : Précipitations saisonnières.

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
P(mm)	85.8	107.6	98.6	17.2

L'histogramme des précipitations saisonnières (Fig.5) montre que l'hiver est la saison la plus humide ,suivi par le printemps et l'automne, par contre, l'été avec 17,2mm est la saison la plus sèche.

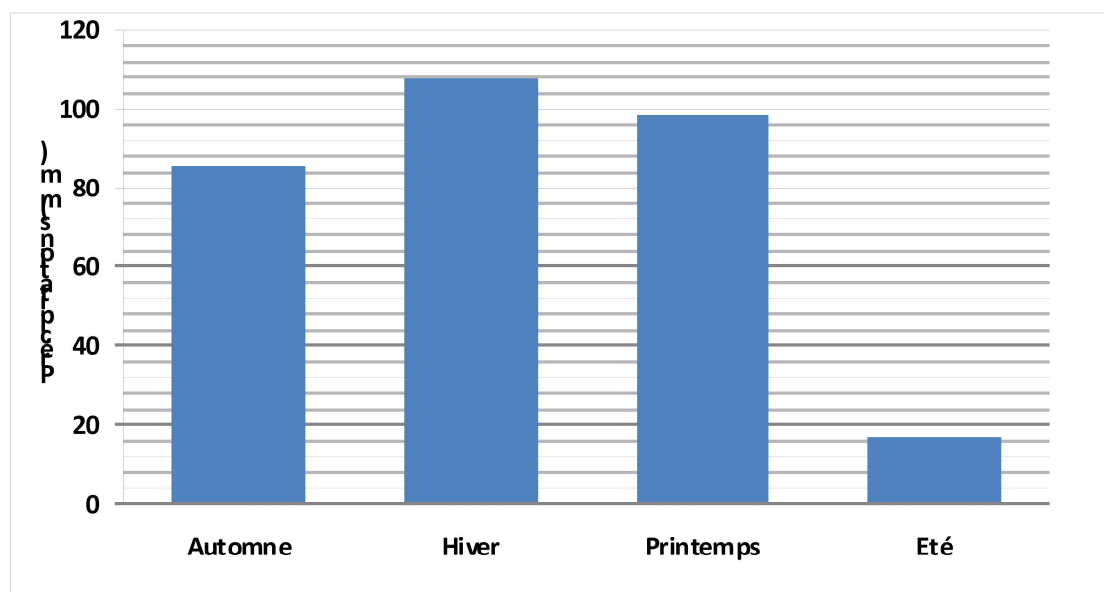


Fig.5 : Histogramme des précipitations saisonnières.

3. Etude des températures :

Le tableau ci-dessous montre les variations des températures mensuelles: minimales, maximales et moyennes sur une période de 30ans.

Tableau 5 : Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1990-2019).

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Août
T° max (C°)	29,3	25,2	20,3	17,2	16,2	17,4	20,0	22,4	26,0	30,5	34,4	34,7
T° min (C°)	16,5	12,9	8,9	6,1	4,7	5,6	7,3	9,0	12,4	16,0	19,2	20,0
T° moy (C°) (t.max+t.min) /2	22,9	19	14,6	11,6	10,5	11,5	13,6	15,7	19,2	23,2	26,8	27,3

- La plus basse et la plus haute valeur des températures maximales sont enregistrées respectivement aux mois de **Janvier** avec **16.2°C** et d'**Août**, avec **34.7°C**.
- La plus basse et la plus haute valeur des températures minimales sont enregistrées respectivement aux mois de **Janvier** avec **4.7°C** et d'**Août** avec **20°C**.
- Les températures moyennes sont calculées par la relation suivante : $T^{\circ}\text{moy}=(T^{\circ}\text{max}+T^{\circ}\text{min}) /2$; il ressort des résultats obtenus que le mois de **Janvier** est le plus froid, avec **10.5°C** et le mois d'**Août** est le plus chaud, avec **27.3°C**.

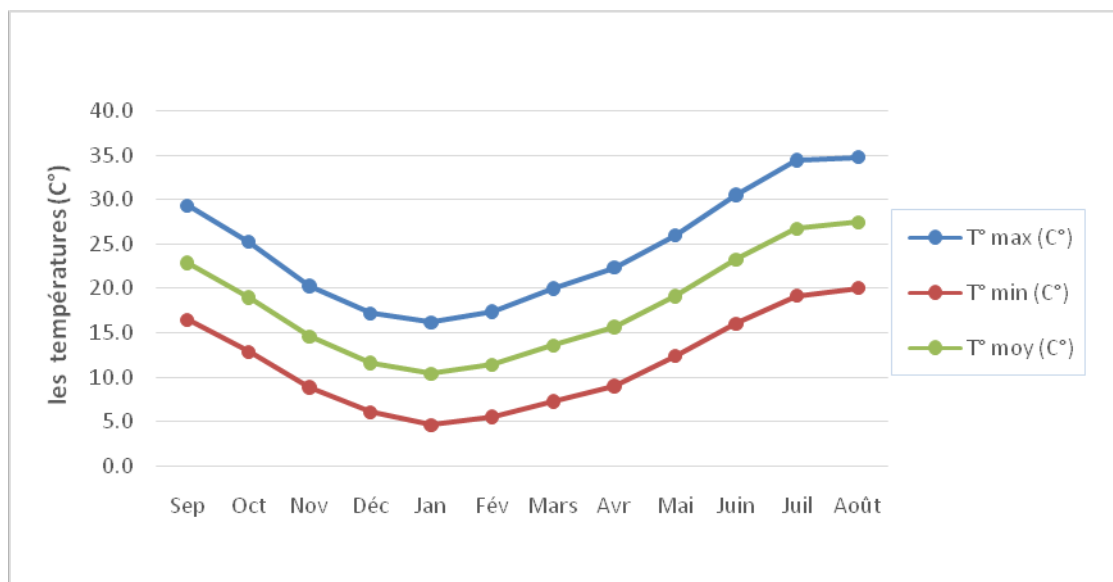


Fig.6 : Variations des températures moyennes mensuelles.

4. Etude du climat :

Elle permet de déterminer les types de climat de la région, à partir des précipitations et des températures; pour cela nous avons utilisé les données enregistrées à la station de Maghnia, sur la période s'étalant de 1990 à 2019.(tableau 6)

Tableau 6 : Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Août
P(mm)	19,3	26,7	39,8	32,8	43,1	31,7	36,1	31,8	30,7	9,0	1,9	6,3
T(C°)	22,9	19,0	14,6	11,6	10,5	11,5	13,6	15,7	19,2	23,2	26,8	27,3

4.1-Méthode graphique de Bagnouls et Gausсен :

Les diagrammes pluviothermiques de Bagnouls et Gausсен sont établis selon la relation :

$P \leq 2T$. Une période sèche est définie lorsque les précipitations moyennes du mois sont inférieures ou égales au double de la température moyenne du même mois.

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

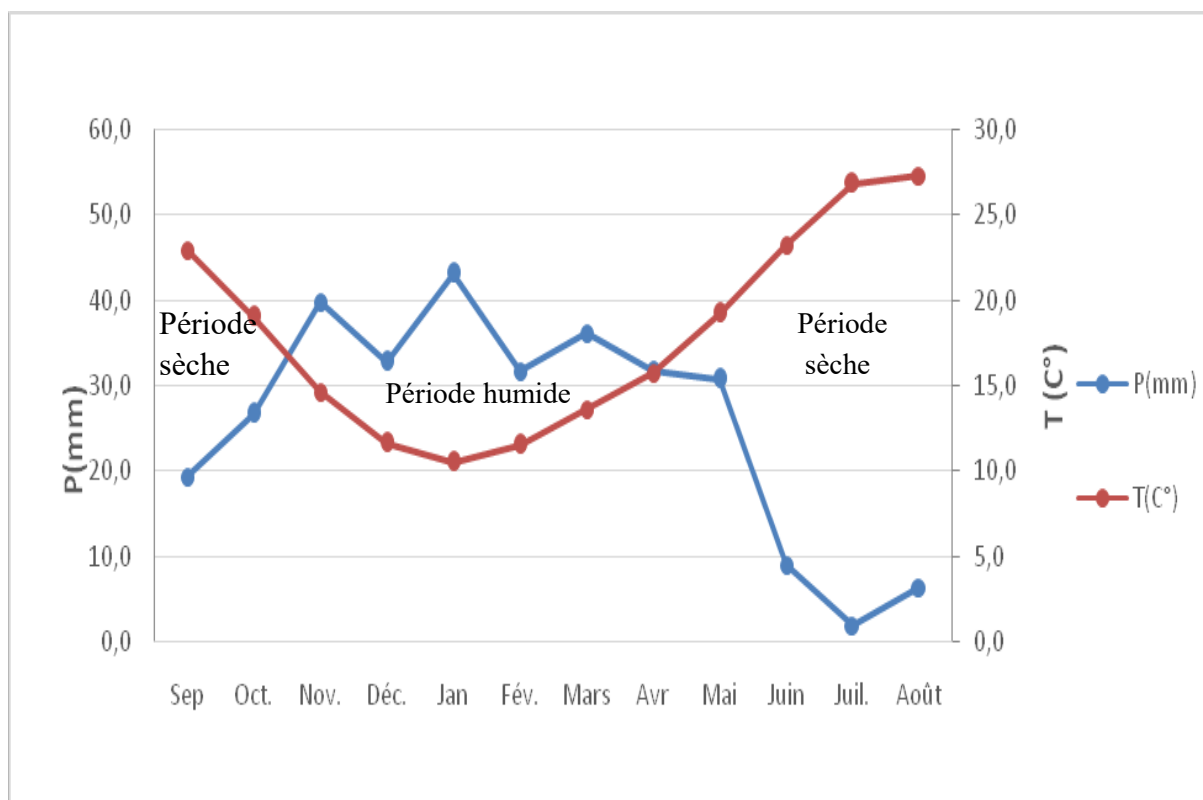


Fig.7 : Diagramme pluviothermique de la station de Maghnia (1990/2019).

Le graphique pluviothermique et l'application de la relation de **Bagnouls** et **Gausсен** nous permet d'observer dans l'année deux périodes assez distinctes :

- Une période humide : qui s'étend de Novembre, jusqu'au mois d'Avril.
- Une période sèche : qui s'étend de Mai, jusqu'au mois d'Octobre.

4.2-Les indices climatiques :

4.2.1-Indice d'aridité annuel de DE Martonne (I) :

$$I = P / (10+T)$$

Où : **P** représente les précipitations totales annuelles et **T** la température moyennes annuelles.

- ✓ **P (mm)** moyennes annuelles=**309,4mm**.
- ✓ **T (° C)** moyennes annuelles =**18 °C**.

Si :

- **20 ≤ I < 30** : climat tempéré.
- **10 ≤ I < 20** : climat semi-aride.
- **7.5 ≤ I < 10** : climat steppique.
- **5.0 ≤ I < 7.5** : climat désertique.
- **I < 5** : climat hyper- aride.

L'utilisation de la formule de **DE Martonne** avec les données ci-dessus nous donne un indice annuel **I = 11.05**, cet indice est dans l'intervalle : **10 ≤ I < 20** : climat **semi-aride**.

Conformément au diagramme de la figure **8**, cet indice correspond à un **climat semi-aride**, et à un **écoulement temporaire**.

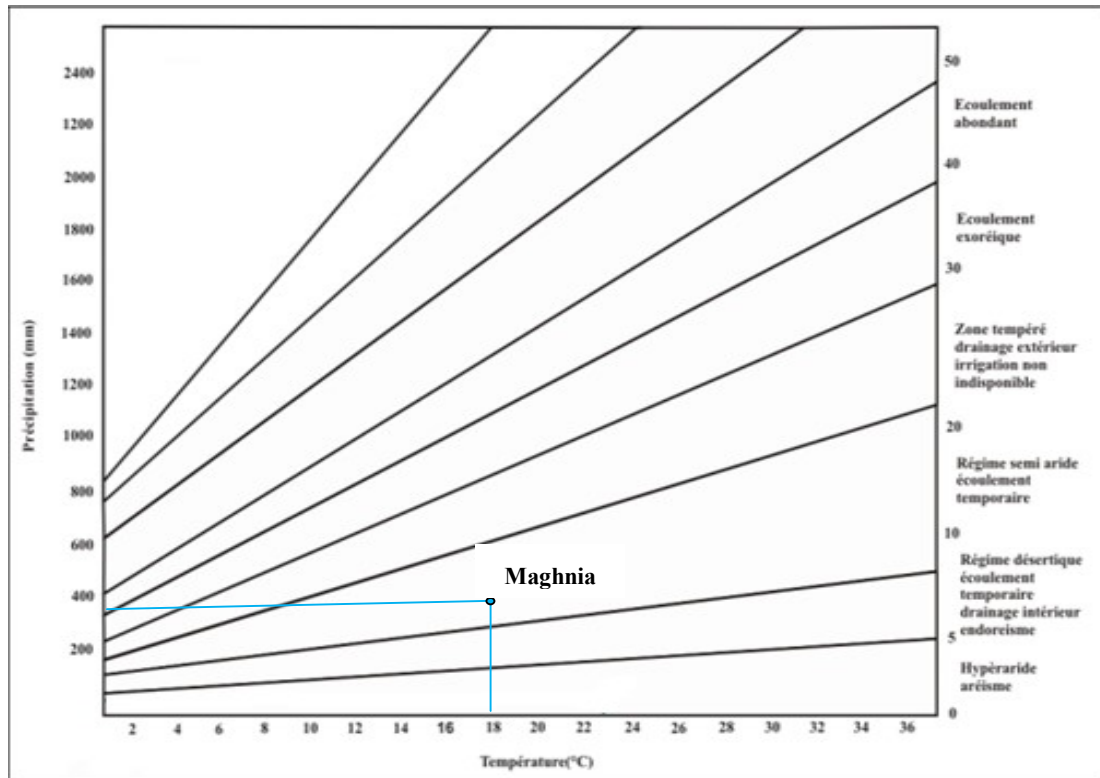


Fig.8 : Indice d'aridité annuelle de DE Martonne.

4.2.2-Indice d'aridité mensuelle de DE Martonne (i) :

$$i = 12p / (10 + t)$$

Avec :

- **p** : Précipitations moyennes mensuelles en (mm)
- **t** : Températures moyennes mensuelles en (°C)

Le tableau suivant montre les valeurs des indices d'aridité mensuels, déterminés par rapport aux précipitations et températures moyennes mensuelles, enregistrées dans la station d'étude.

Tableau 7 : Valeurs des indices d'aridité mensuels.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août
P(mm)	19,3	26,7	39,8	32,8	43,1	31,7	36,1	31,8	30,7	9,0	1,9	6,3
T(°C)	22,9	19,0	14,6	11,6	10,5	11,5	13,6	15,7	19,2	23,2	26,8	27,3
i	7,0	11,0	19,4	18,2	25,3	17,7	18,3	14,9	12,6	3,2	0,6	2,0
Climat	D	S	S	S	T	S	S	S	S	H	H	H

H : Hyper-aride, **D** : Désertique, **S** : Semi-aride, **T**:Tempéré.

D'après les résultats obtenus, le mois de Janvier est le mois **Tempéré**, les mois d'Octobre, Novembre, Décembre, Février, Mars, Avril et Mai sont des mois **Secs**, les mois de Juin, Juillet, Août sont classés **Hyper-arides** et Septembre est considéré comme **Désertique**.

4.2.3-Indice annuel de MORAL :

$$I_a = P / (T^2 - 10T + 200)$$

Où : I_a : indice de Moral; P : précipitations moyennes annuelles; T : températures moyennes annuelles.

Lorsque :

$I_a < 1$ le climat est considéré comme sec.

$I_a > 1$ le climat est considéré comme humide.

Avec :

$$P = 309,4\text{mm} ; \quad T = 18 \text{ }^\circ\text{C} ; \quad I_a = 0,89$$

Le climat de la zone d'étude est considéré comme sec.

4.2.4-Indice mensuel de MORAL :

$$I_m = \frac{P}{0,1Tm^2 - Tm + 20}$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm).

Tm : Températures moyennes mensuelles ($^\circ\text{C}$).

Tableau 8 : Valeurs des indices d'aridité mensuels.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
P(mm)	19,3	26,7	39,8	32,8	43,1	31,7	36,1	31,8	30,7	9,0	1,9	6,3
T($^\circ\text{C}$)	22,9	19,0	14,6	11,6	10,5	11,5	13,6	15,7	19,2	23,2	26,8	27,3
I_m	0,39	0,72	1,49	1,50	2,11	1,46	1,45	1,10	0,82	0,18	0,03	0,09
Type du Climat	A	A	H	H	H	H	H	H	S	A	A	A

Les quatre types de mois, indiqués par MORAL sont :

-Mois pluvieux (**P**) : $P > 0,1 T^2 + T + 30$

-Mois humide (**H**) : $0,1 T^2 + T + 30 > P > 0,1 T^2 - T + 20$

-Mois sec (**S**) : $0,1 T^2 - T + 20 > P > 0,05 T^2 - T + 10$

-Mois aride (**A**) : $P < 0,05 T^2 - T + 10$.

5. Bilan hydrologique :

5.1-Evapotranspiration :

L'évapotranspiration correspond à un phénomène complexe regroupant à la fois l'évaporation physique de l'eau contenue dans le sol et dans l'atmosphère et les processus de transpiration des végétaux. On distingue :

- L'évapotranspiration réelle (ETR) qui correspond à la quantité d'eau évaporée et transpirée dans les conditions du sol considéré.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) qui correspond à la quantité d'eau qui pourrait être évapo-transpirée dans les conditions de satisfaction complète des besoins en eau.

5.1.1-Méthode de TURC :

Pour évaluer l'ETR, on utilise la formule suivante :

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

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

P : Précipitations moyennes annuelles, en mm.

T : Température moyenne annuelle, en C°.

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle, en mm/an.

Tableau9 : Calcul de l'ETR par la méthode de TURC.

P (mm)	T(C°)	L	ETR (mm/an)	Écoulement et infiltration (mm) (P-ETR)
309,4	18	1041,6	311,89	-

L'application de cette méthode nous a montré que l'ETR est supérieure aux précipitations moyennes annuelles. La méthode de TURC n'est donc pas applicable dans notre cas.

5.1.2-Méthode de Coutagne :

Le déficit d'écoulement d'après Coutagne, est l'équivalent de l'évapotranspiration réelle, il est donné par l'équation : $D = P - \lambda P^2$

D : déficit d'écoulement (mm/an)

P : précipitation (mm/an)

T : température moyenne annuelle (C°)

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

$$\lambda = \frac{1}{0.8+0.14T} \text{ cette formule n'est applicable que pour : } \frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$$

La formule de Coutagne n'est donc pas applicable dans notre cas, car : $\frac{1}{8\lambda} > P$

Tableau 10 : Valeur du déficit d'écoulement (Coutagne)

P(mm)	$\frac{1}{8\lambda}$	$\frac{1}{2\lambda}$	D (mm)	Écoulement et Infiltration (mm) (P - D)
309,4	416,6	1666,6	-	-

5.1.3-Méthode de WUNDT :

Wundt a établi un abaque des courbes, modifié par M. Coutagne, permettant d'obtenir une valeur de déficit d'écoulement D en fonction de la température moyenne annuelle T et des précipitations moyennes annuelles P.(fig.9)

Les valeurs du déficit et du quotient d'écoulement en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations reportées sur l'abaque de Wundt donnent les résultats suivants :

Tableau 11 : Valeurs du déficit et du quotient d'écoulement.

P (mm)	T (° C)	D (mm/an)	Écoulement et infiltration (mm)
309,4	18	300	9,4 Soit 2,94% de P

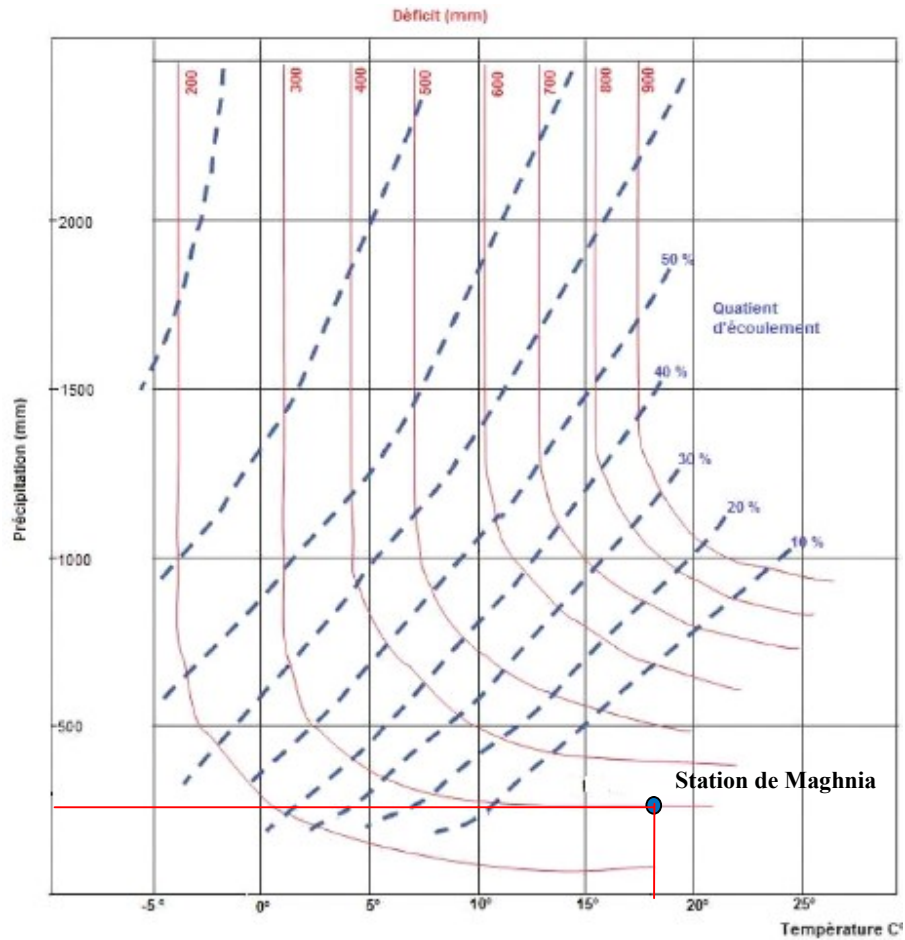


Fig.9 : Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).

5.1.4-Méthode de Thornthwaite :

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) des 12 mois de l'année sont données dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Valeurs de l'ETP.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Annuel
T(°C)	22,9	19,0	14,6	11,6	10,5	11,5	13,6	15,7	19,2	23,2	26,8	27,3	18
I	10,01	7,55	5,07	3,58	3,07	3,53	4,55	5,65	7,67	10,21	12,70	13,07	86,66
ETP non corrigée	101,38	71,10	43,11	27,84	23,04	27,39	37,67	49,49	72,53	103,92	136,68	141,57	835,73
K	1,03	0,97	0,87	0,86	0,88	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	-
ETP corrigée	104,42	68,97	37,50	23,95	20,28	23,28	38,80	53,94	87,04	124,70	166,76	164,22	913,86

ETP corrigée est exprimée en mm, il a été déterminé sur la base de l'équation de Thornthwaite ci-dessous :

$$ETP = 16 (10T/I)^a$$

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle.

T : températures moyennes mensuelles.

I : indice annuel.

i: indice mensuel.

$$a = 0.492 + 1.79 \cdot 10^{-2} I - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6.75 \cdot 10^{-7} I^3$$
$$I = \sum i; i = (T/5)^{1.514}$$

5.1.5-Bilan annuel :

La méthode de Thornthwaite permet d'établir un bilan hydrologique pour chaque bassin en prenant en considération des éléments déjà mentionnés. Ce bilan est présenté dans le tableau 14 ci-dessous.

Si : $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$

Si : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + (RU)$.

Tableau 13 : Eléments du bilan hydrologique calculés en (mm) pour la station de Maghnia.

Paramètres	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fer	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juill.	At	Annuel
P (mm)	19,3	26,7	39,8	32,8	43,1	31,7	36,1	31,8	30,7	9,0	1,9	6,3	309,4
ETP (mm)	104,42	68,97	37,50	23,95	20,28	23,28	38,80	53,94	87,04	124,70	166,76	164,22	913,86
RU (90mm)	0,00	0,00	2,30	11,15	33,97	42,39	39,69	17,55	0,00	0,00	0,00	0,00	/
ETR (mm)	19,30	26,70	37,50	23,95	20,28	23,28	38,80	53,94	48,25	9,00	1,90	6,30	309,20
Déficit agricole (mm)= ETP-ETR	85,12	42,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,79	115,70	164,86	157,92	604,66
E(mm)=RU-90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

P : Précipitations (mm), **ETP** : Evapo-Transpiration Potentielle (mm), **ΔU** : Variation de la réserve, **RU** : Réserve Utile = (90 mm), **ETR** : Evapo-Transpiration Réelle (mm), **D.A** : Déficit Agricole (mm), **E** : Ecoulement (mm).

L'application de la méthode de Thornthwaite dans notre région d'étude, nous a montré que l'**ETR** est légèrement égale aux précipitations, avec un déficit agricole égal à **604,6 mm**.

6. Conclusion :

L'étude climatologique nous a permis d'identifier le type du climat qui règne dans la région étudiée et de déterminer les différents paramètres du bilan.

La moyenne annuelle des précipitations est de **309,4mm**. La température moyenne annuelle est de **18°C**. Le mois de **Janvier** est le plus **humide**, avec **43.1mm** de précipitations, tandis que celui de **Juillet** est le plus **sec** avec **1.9mm**. Le mois de **Janvier** enregistre la température la plus basse avec **10.5°C** et le mois d'**Août** est le plus **chaud**, avec **27.3°C**. **L'hiver** étant la saison la plus **humide** et **l'été** la saison la plus **sèche**.

La méthode des courbes pluvio-thermiques, a permis de définir une **période humide** allant de la **mi-October**, jusqu'au **début du mois d'Avril** et une **période sèche** qui s'étend sur **le reste des mois** de l'année. Les **indices climatiques annuels et mensuels** ont fait ressortir le **type du climat** de la région étudiée (**semi-aride**) et ont permis la **classification des mois** en fonction de leurs températures et précipitations.

Le bilan calculé par la méthode de **Thorntwaite**, nous a montré que **l'ETR** est **légèrement égal aux précipitations**, avec un **déficit agricole de 604,6 mm**.

CHAPITRE 03 :

CONTEXTE GEOLOGIQUE

1. Cadre Géologique :

La région d'étude domine par le Sud, la plaine de Maghnia qui correspond à une zone déprimée, comblée d'une épaisse couche de graviers et de galets grossiers d'âge plio-quadernaire. Elle se trouve sur le piémont nord-ouest du Horst de Ghar-Roubane. Son territoire est constitué par des terrains paléozoïques et mésozoïques.

- Un socle paléozoïque fortement disloqué, qui se compose des formations sédimentaires et volcaniques, des intrusions de dacite et de granite ainsi que des formations métamorphiques (H. MAHBOUBI et D. MIMOUNI, 2014).
- Une couverture mésozoïque en discordance et en transgression sur cet ensemble plissé où reposent des roches à dominance carbonatée et terrigène du lias et du Dogger, recouvertes de dépôts gréseux de Callovo-Oxfordien. (H. MAHBOUBI et D. MIMOUNI, 2014)
- Des terrains néogènes et quadernaires forment la plaine de Maghnia, au Nord des Monts de Ghar-Roubane.

2. Série litho-stratigraphique :

Cette description est basée sur l'analyse de la carte géologique de G. LUCAS (1942) ainsi que du travail de MIMOUNI.H et MIMOUNI.D, 2014). (**Fig.10**)

2.1. Le paléozoïque :

Il est représenté par :

- Le Silurien qui englobe des formations de schistes et de quartzites, ainsi que des schistes quartzitiques et phtanite à graptolite.
- Le Dévonien qui présente des formations de grès à graviers de phtanite, calcaire récifal et fossilifère, et des schistes microbrèches.
- Le Carbonifère regroupe trois sous-systèmes : inférieur, moyen et supérieur qui présente des formations de brèches volcaniques et schistes, des grès marins et des formations de schistes, grès roux et poudingues.

2.2. Le Mésozoïque :

Dans notre zone d'étude, il est constitué principalement par :

2.1. Le Trias :

D'après G. Lucas, on distingue deux groupes principaux qui sont :

2.1.1. Le Permo-Trias des horsts :

Caractérisé par des poudingues fluviaux rouges qui affleurent dans la partie sud du horst de Ghar-Rouban.

2.1.2 Le Trias gypseux :

Constitué par des marnes violacées et gypsifères, à blocs de dolomites et de basaltes, dans la plaine de Magoura et dans la zone de Sidi El Abed.

2.2. Le Jurassique :

Les terrains jurassiques sont très développés dans la région de Ghar-Rouban, et constituent la couverture secondaire. On y distingue :

2.1.1. Le Jurassique inférieur (Lias) :

Le Lotharingien présente des formations de calcaires foncés à silex, et de calcaires gris sub-lithographiques.

Le Toarcien est constitué par des marnes et calcaires à ammonites et des calcaires gris sub-lithographiques, recouverts par des dolomies cristallines à Teniet Sassi.

2.2.2. Le Jurassique moyen (Dogger) :

- **L'Aalénien-Bajocien** : les deux étages sont constitués par des formations de calcaires et poudingues fins, et de dolomies très fines violacées à Teniet Sassi, des calcaires gris clair (Béni Bahdel) et des marnes à ammonites au niveau de Koudiet Zerga et Sidi Yahia Bensefia.

- **Le Bathonien** : il est constitué par des calcaires micro-gréseux, ferrugineux à oolithes, et des calcaires à lamellibranches et branchiopodes recouverts par des dolomies cristallines.

2.2.3 . Le Jurassique supérieur (Malm) :

On distingue deux systèmes avec les formations suivantes :

- **Le Callovo-Oxfordien** : constitué par des argiles grises ou noires. Il s'étend dans le secteur de Zouia, présenté par un ensemble argileux, à minces bancs de grès plus ou moins calcaires qui se terminent jusqu'au Lusitanien.

Les formations observables au Lusitanien sont des grès avec des intercalations argileuses, dolomitiques et calcaires à polypiers, brachiopodes, lamellibranches et échinodermes.

- **Le Kimméridgien-Berriasien inférieur**:sont constitués par des formations calcaires sublithographiques et de dolomies massives finement grenues à intercalations de calcaires sublithographiques et de calcaires argileux.

2.3. Le Cénozoïque :

3.1. Le Miocène supérieur (Messénien) :

On distingue les formations suivantes :

- Une formation de marnes grises helvétiques et sableuses d'environ 1000 m d'épaisseur au centre de la plaine de Maghnia.
- Une formation composée par des argiles ou marnes régressives ; son épaisseur est variable.

3.2. Le Pliocène :

Il est composé par des marnes sableuses, des conglomérats, des calcaires lacustres, et des marnes gypseuses.

3.3. Le Quaternaire :

Il est caractérisé par des sédiments de croutes calcaires, des dépôts de pentes, des limons généralement en croutes.

<i>Systèmes</i>	<i>Sous systèmes</i>	<i>Etages</i>	<i>Colonne lithologique</i>	<i>Epaisseurs moyennes</i>	<i>Formations lithologiques</i>
Jurassique	Malm	Kimméridgien		---	Dolomies à intercalations de calcaires
		Berriasien inférieur		---	Grès à intercalation d'argile
		Lusitanien		750 m	Argiles de Saïda
	Dogger	Bathonien		150 à 180m	Calcaire microgréseux
		Bajocien		150 m	Calcaire à oolites
		Aalénien			
	Lias	Toarcién		50 m	Calcaire de Belaïche
		Domerien		Sup. à 300 m	Calcaire spathique Tisseaou
		Carixien			Calcaire in Zailou
	Trias				---
Carbonifère	Supérieur	Westphalien			Schistes, grès roux poudingues
	Moyen	Namurien			Schistes, grès marin
	Inférieur	Viséen			Brèches volcaniques Tufs, microbrèches Schistes, quartzites à lit de calcaire
Dévonien					Schistes, microbrèches Calcaire récifal Grès à graviers de phtanite
Silurien					Schistes quartzites et phtanite à graptolite Schistes et quartzites

Fig.10 : Colonne lithologique du Horst de GharRoubane (G. LUCAS, 1942 in. H.MAHBOUBI et D.MIMOUNI, 2014, *modifié*).

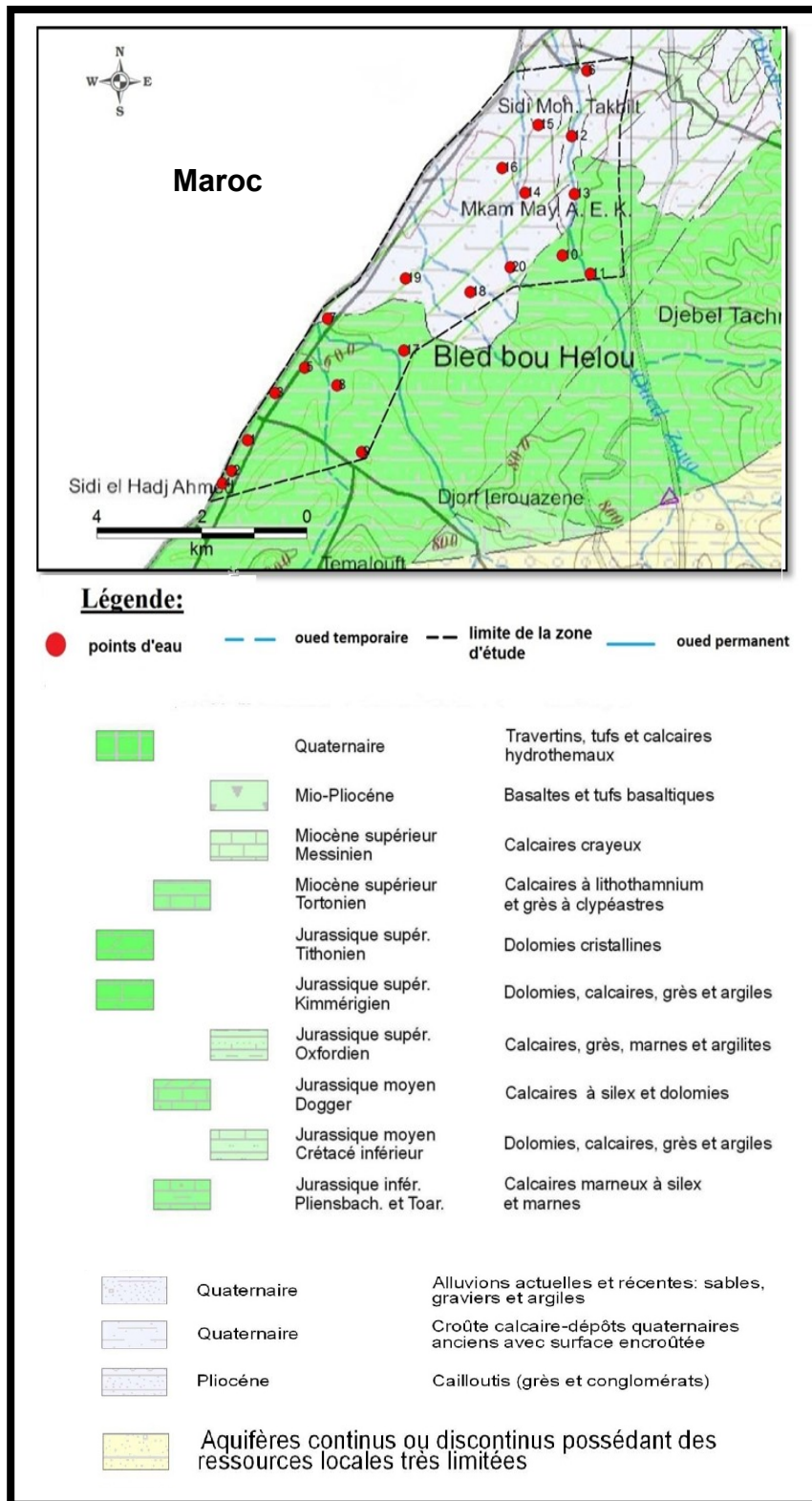


Fig.11 : Carte géologique de la zone d'étude
 Extraite de la carte hydrogéologique de Tlemcen 1/200000 (ANRH).

3. Etude Structurale de la région :

Le Horst de Ghar-Roubane s'allonge en une bande étroite, de 5 à 8 km vers l'Est, à partir de la frontière algéro-marocaine sur 25- 30 km. Au Nord et au Sud, il confine aux structures en grabens par l'intermédiaire d'un système de failles parallèles. Le seuil de Fernane subdivise selon un axe médian, le horst en deux parties : orientale et occidentale (SONAREM 1978, 1979 in MAHBOUBI.H et MIMOUNI.D, 2014).

D'après LUCAS (1942), la frontière algéro-marocaine du Nord au Sud englobe une succession de horsts et grabens, comme suit :

- Pli de Tenouchfi.
- La zone abaissée de la plaine de Maghnia.
- L'anticlinal de Djebel El Hamra.
- Une zone synclinale : les Monts du Kef.
- Une zone anticlinale : horst de Ghar-Roubane et Béni Bahdel.
- Une zone synclinale : Ras Asfour.
- Une zone anticlinale : les horsts occidentaux, Tounzait et plaine de Sebdu.
- Une zone synclinale : chaînons de Koudiat El Debar.
- Une zone soulevée : la plaine de Magoura.
- Une zone affaissée par gradins étagés dans Sidi El Abed.

Deux types de tectonique affectent les Monts de Ghar-Roubane:

3.1-Tectonique souple :

Trois plis kilométriques forment les Monts de Ghar-Roubane:

- Le pli de kouidiat Ezzerga, de direction $N55^\circ$ qui se prolonge jusqu'au Nord-Ouest de Tlemcen.
- Le pli de Tenouchfi, de direction $N55^\circ$ qui se prolonge à l'Est de Tlemcen.
- Le pli croiseur de Béni Bahdel, de direction $N15^\circ$.

G. LUCAS (1952) a considéré la direction $N15^\circ$ comme un accident dû au refoulement de couches vers l'extérieur, au cours de la montée verticale du socle profond.

3.2-Tectonique cassante :

Les failles qui affectent la région ont dans l'ensemble des directions bien déterminées ; elles ont joué à plusieurs reprises et présentent les orientations suivantes :

- Décrochements sénestres à pendage très fort, de direction N120°.
- Décrochement dextres direction N110°-N140°, à pendage très fort.
- Grandes failles bordières des horsts, de direction N85° et de pendage généralement très fort 70° et 90°.
- Failles verticales, de direction N55° (concourant avec les précédentes pour limiter les horsts).

4. Conclusion :

La synthèse géologique et structurale des Monts de Ghar-Roubane a montré que :

- La zone d'étude est composée d'une part, par des formations paléozoïques et mésozoïques qui constituent les reliefs et d'autre part, par des terrains néogènes et quaternaires qui forme la plaine de Maghnia.
- L'étage inférieur hercynien est constitué des roches de l'ère primaire (Paléozoïque) qui est caractérisé par une phase compressive qui est à l'origine des structures tectoniques du Carbonifère inférieur.
- L'étage supérieur de l'ère secondaire (Mésozoïque) est fait de dépôts jurassiques peu déformés. La région a acquis sa structure en horsts et grabens après les phases tectoniques tertiaires qui ont repris les accidents hérités de l'orogénèse hercynienne, et les réajustements structuraux, c'est l'allure actuelle de la région.

L'analyse litho-stratigraphique a montré les différentes formations qui peuvent présenter un intérêt hydrogéologique dans la région d'étude.

CHAPITRE 04 :

HYDROGEOLOGIE

1. Introduction :

Le but de ce chapitre est d'identifier les formations géologiques qui ont un intérêt hydrogéologique dans la région d'étude.

2. Identification des différents aquifères :

Les terrains jurassiques comprennent des réservoirs aquifères potentiels et paraissent favorables à l'existence des ressources en eau souterraines.

Les séquences lithologiques et les conditions tectoniques déterminées par le contexte géologique de la région d'étude permettent d'individualiser plusieurs formations aquifères. (Tableau.14).

Tableau.14 : Réservoirs et niveaux imperméables.

Systèmes	Sous-systèmes	Etages	Lithologie	Formations Hydrogéologiques
Jurassique	Malm	Kimméridgien-Berriasien inférieur	Dolomies à intercalations de calcaires	Aquifères moyennement poreux parfois fissurés
		Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur	Grès à intercalations d'argiles	
		Callovo-Oxfordien	Argiles de Saida	/
	Dogger	Bathonien	Calcaire microgréseux	Niveaux carbonatés Aquifères parfois Karstiques
		Bajocien Aalénien	Calcaire à oolites	
	Lias	Toarcien	Calcaire de Belaïche	
		Domérien	Calcaire spathique Tisseaou	
		Carixien	Calcaire in Zailou	
Trias	/		Marnes gypsifères	

- **Description des formations perméables / imperméables :**

Les dolomies et les calcaires du Kimméridgien : Les dolomies et les calcaires du Kimméridgien sont aquifères lorsqu'ils sont fissurés. Une densité élevée des fractures accroît la perméabilité et détermine la formation d'un réseau de circulation.

Les grès de Boumédiène : Cette formation a été attribuée au Lusitanien par Auclair et Biehler et a été replacée dans l'Oxfordien et le Kimméridgien par Benest.M. Cet aquifère n'est pas isolé du réservoir kimméridgien par un niveau imperméable sus-jacent. On peut parler d'un réservoir unique Lusitanien-Kimméridgien (Bonnet, 1965).

Les argiles de Saida : Elles correspondent à des dépôts argileux et marneux, à fines passées gréseuses. Cette formation est attribuée au Callovo-Oxfordien. Elle constitue un substratum imperméable qui empêche toutes les infiltrations vers les aquifères du Dogger et du Lias.

Le Lias et le Dogger : Les formations du Lias et du Dogger n'apparaissent qu'à la faveur de deux horsts : Ghar Roubane et Djebel Tenouchfi. Ces formations sont caractérisées par d'importantes variations latérales de faciès. Des forages hydrauliques et de reconnaissance ont traversé ces formations et ont permis de mettre en évidence les caractéristiques hydrogéologiques. Le Lias inférieur et moyen correspond à des calcaires massifs de plus de 200m d'épaisseur (Lucas, 1942).

Le Trias : constitué de marnes violacées et gypsifères. Il affleure à la faveur de structures diapiriques.

Le bassin d'alimentation de chaque nappe ne peut être défini, car il semble que les failles qui ont joué pendant et après le Miocène peuvent influencer les déplacements de l'eau. Elles ont un rôle de fermeture totale ou partielle et agissent sur la circulation des eaux d'un ou de plusieurs réservoirs.

Par manque des coupes lithologiques des forages retenus pour l'étude, nous nous sommes référés aux travaux du Professeur BENSAOULA.F, 2006 effectués sur la région d'étude.

3. Synthèse hydrogéologique :

L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) a mené dans la région de Béni Boussaid des prospections hydrogéologiques par forages profonds (500 m en moyenne) (Fig12). L'implantation de ces derniers fut effectuée sur la base des résultats d'une prospection géophysique, par la méthode électrique. Ces forages ont traversé les formations gréseuses du Lusitanien et les argiles du Callovo-Oxfordien. Aussi, ils ont recoupé, en partie, les formations carbonatées du Bajo-Bathonien (Jurassique moyen).

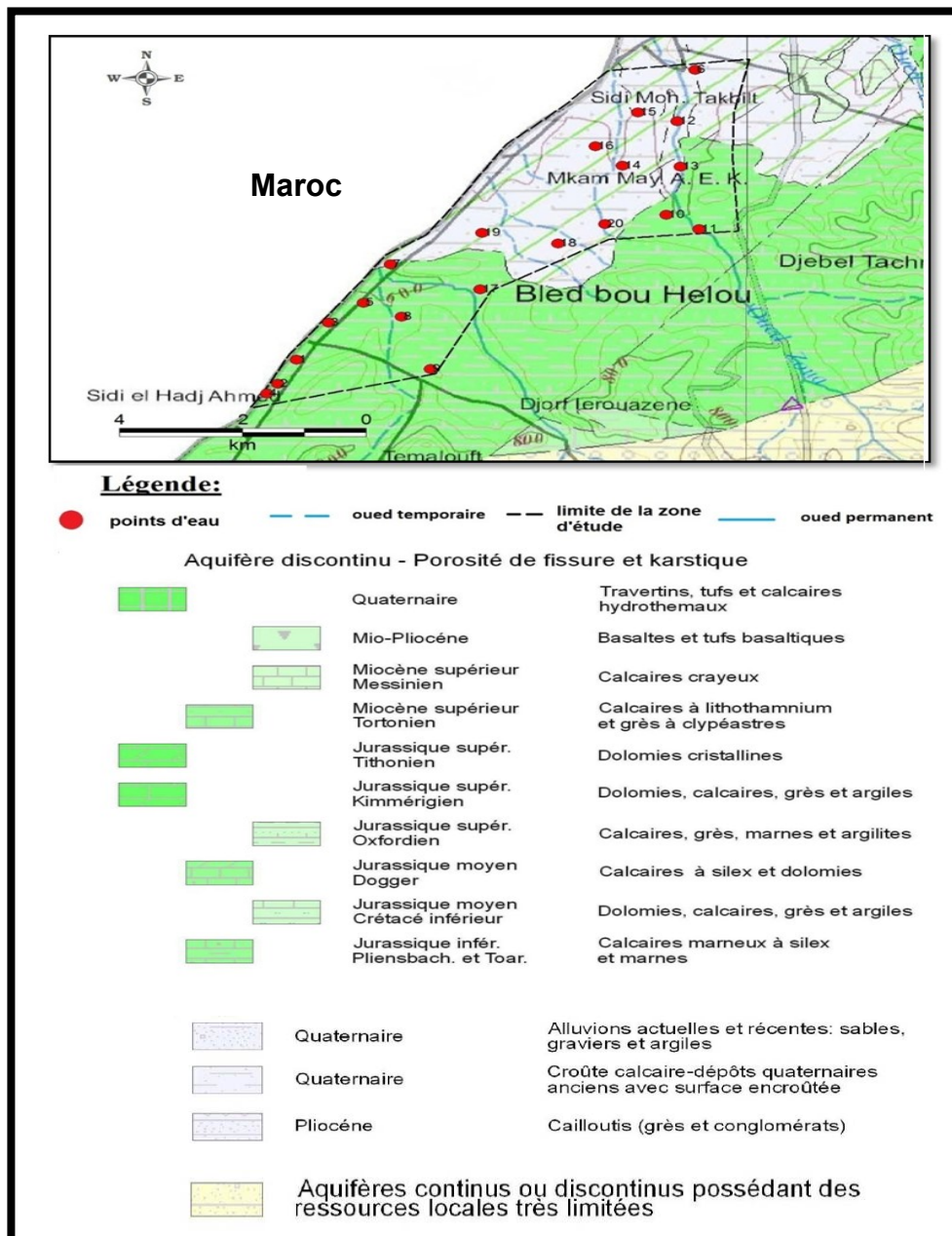


Fig.12 : Situation des forages
Extraite de la carte hydrogéologique de Tlemcen 1/200000 (ANRH).

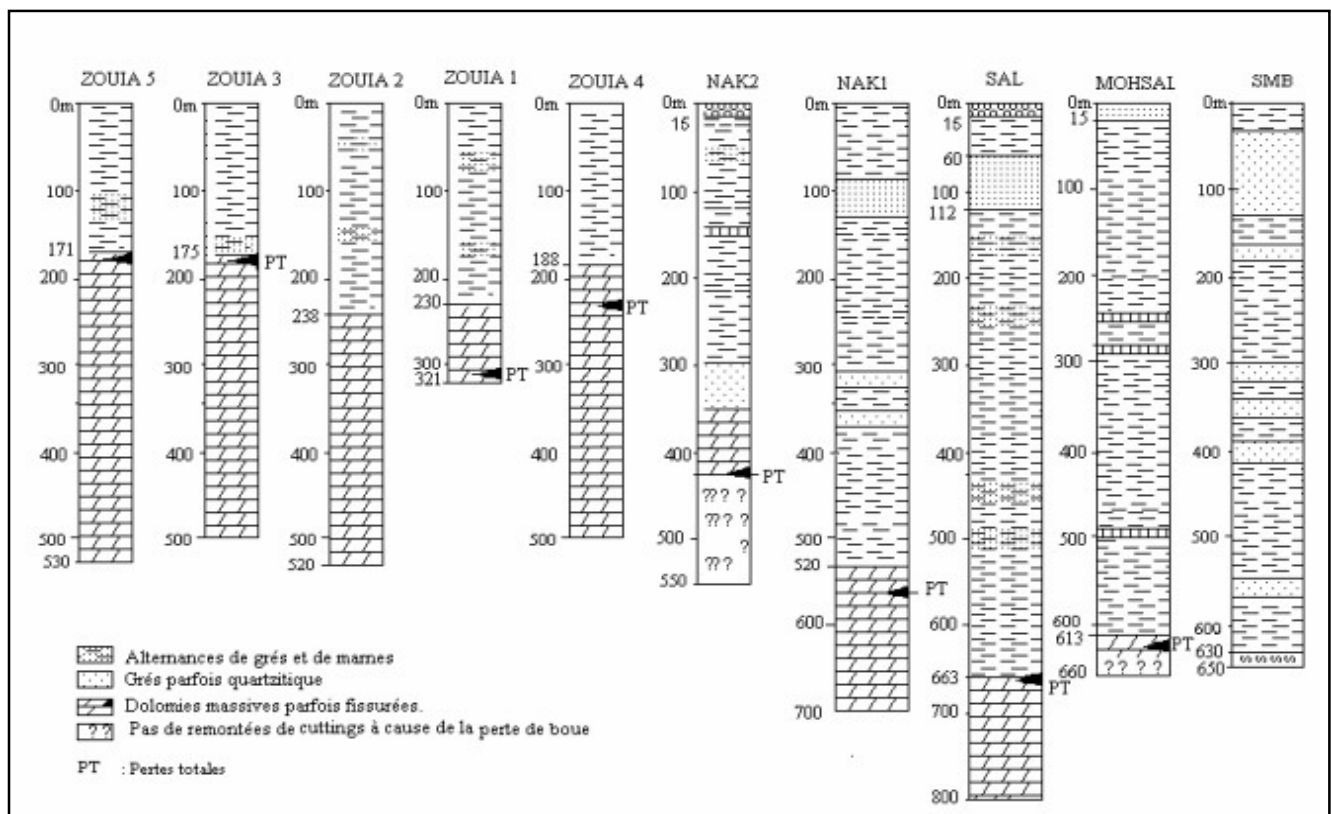


Fig13 : Coupes litho-stratigraphiques des forages (BENSAOULA.F, 2006).

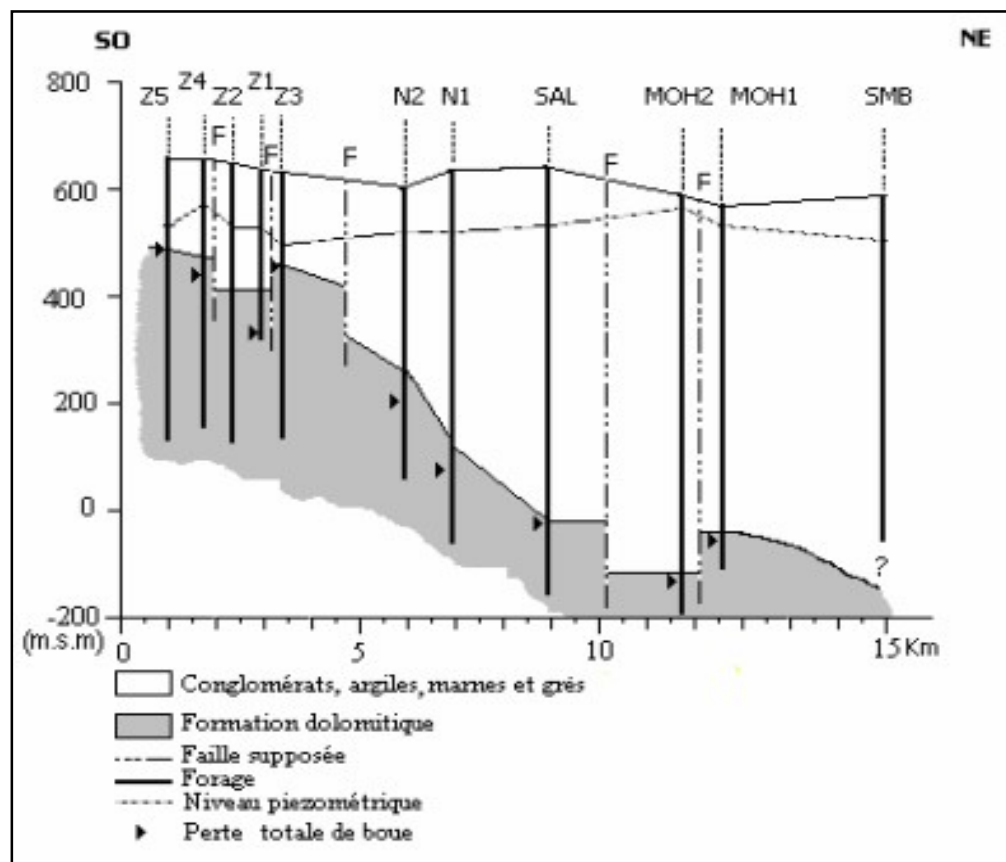


Fig14 : Coupe géologique et hydrogéologique synthétique établie à partir des données de forages (BENSAOULA.F, ADJIM.M, 2006).

Dans cette coupe établie sur la base des informations des forages qui ont tous été tubés jusqu'au toit des dolomies à l'exception de N1 et MOH2 où les niveaux gréseux supérieurs ont été crépinés, ceci permettrait une alimentation de la nappe gréseuse par celle ascendante des dolomies (BENSAOULA.F, ADJIM.M, 2006).

Notons aussi, que le toit des dolomies du Bajo-Bathonien est de plus en plus profond en allant du Sud-Ouest vers le Nord-Est (une dénivelée de plus de 500 m entre le forage Z5 et le forage MOH1 distants de 10 km environ a été remarquée). Le forage SMB, d'une profondeur de 650m n'a pas atteint les dolomies. 12 pertes totales de boue ont été constatées, dont 9 d'une profondeur inférieure à 50 m par rapport au toit des dolomies. Ces pertes totales de boue sont la conséquence d'une fissuration importante (BENSAOULA.F, ADJIM.M, 2006).

Ces constatations sont dues à la tectonique cassante qui a affectée la région et la subdivisé en horsts et grabens. D'après LUCAS (1942), à l'intérieur des affleurements du Lias et du Dogger, il a été observé des variations latérales de faciès rapides et importantes.

4. Conclusion :

Au vue de ce qui précède, nous pouvons conclure que les nappes du Jurassique dans la région de Béni Boussaid sont constituées par des formations aquifères fissurées et parfois karstifiées. L'aquifère carbonaté du Lias et du Dogger ont un intérêt hydrogéologique important. Leurs caractéristiques géométriques doivent être bien connues.

Les grès de Boumédiène, quand ils sont épais, possèdent des qualités intéressantes. Le forage SMB a permis de vérifier cela. Il a recoupé un passage gréseux de 100 m d'épaisseur et a produit un débit de 32 L/s (BENSAOULA.F, ADJIM.M, 2006).

CHAPITRE 5:
CONTEXTE
HYDROGEOCHIMIQUE

1. Introduction :

L'hydrogéochimie est l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux ainsi que la détermination de leur origine.

Pour atteindre cet objectif, nous avons analysé dans ce chapitre les paramètres physico-chimiques. Ensuite, nous avons déterminé les faciès chimiques et les familles des eaux souterraines de la région de Béni Boussaïd et estimé l'aptitude de la nappe à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation par des indices et des diagrammes. Nous avons également expliqué les corrélations entre les différents ions, par l'application de la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP). Enfin, nous avons utilisé d'autres méthodes statistiques sur les principaux paramètres caractérisant le chimisme des eaux de l'aquifère.

Notre étude a porté sur 20 échantillons prélevés à partir des forages localisés sur notre zone d'étude (**figure.15**).

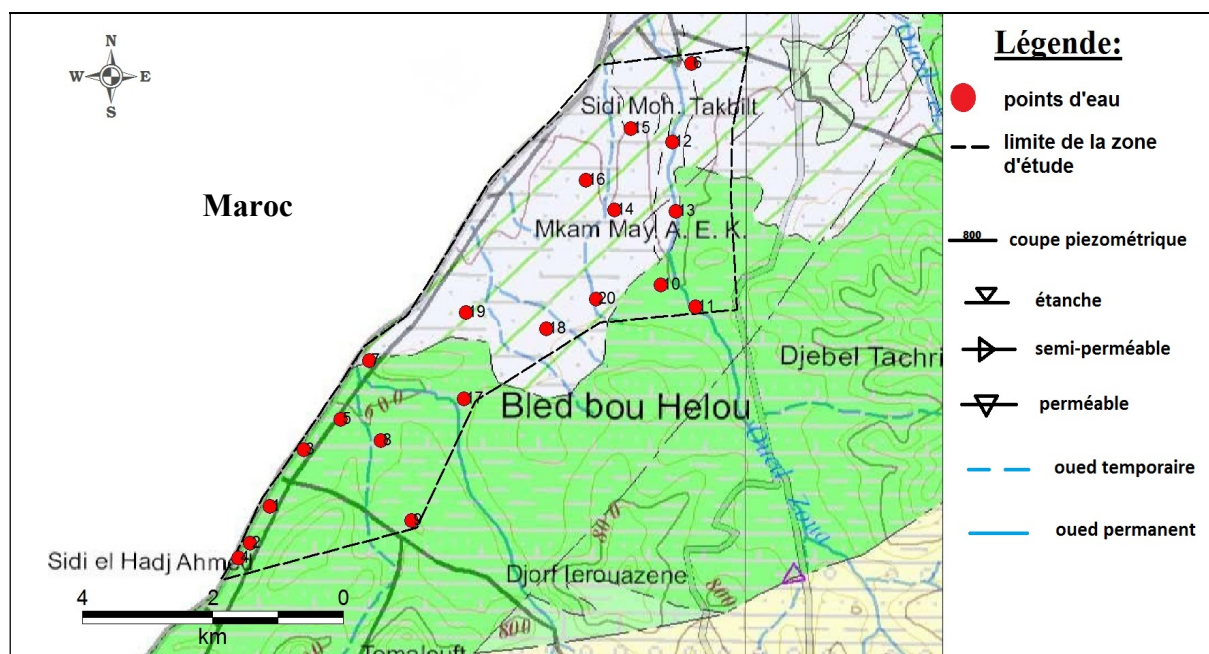


Fig.15 : Position des forages d'eau.

1.1- Balance ionique :

La balance ionique est déterminée par la formule suivante :

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

Lorsque :

BI < 2% : c'est une bonne analyse.

2% < BI < 5% : c'est une analyse acceptable.

BI > 5% : c'est une mauvaise analyse.

Tableau 15 : Résultats de la balance ionique des points d'eau de la région d'étude.

Nom des échantillons	Anions	Cations	BI	Observation
F1	11,59	11,68	0,37	Bonne
F2	47,12	48,61	1,56	Bonne
F3	32,52	32,63	0,18	Bonne
F4	11,76	10,75	-4,48	Acceptable
F5	12,33	11,68	-2,70	Acceptable
F6	10,11	10,30	0,91	Bonne
F7	9,50	9,84	1,75	Bonne
F8	8,68	8,92	1,40	Bonne
F9	12,59	11,97	-2,56	Acceptable
F10	8,53	8,59	0,34	Bonne
F11	13,18	12,96	-0,87	Bonne
F12	8,86	8,99	0,69	Bonne
F13	9,63	9,81	0,90	Bonne
1F4	9,63	9,21	-2,18	Acceptable
F15	8,94	9,16	1,25	Bonne
F16	8,62	8,81	1,06	Bonne
F17	7,20	7,43	1,58	Bonne
F18	9,31	9,90	3,08	Acceptable
F19	9,08	9,14	0,32	Bonne
F20	9,11	8,78	-1,86	Bonne

Les valeurs des balances ioniques (**BI**) montrent que sur les 20 points d'eau étudiés, on a des valeurs inférieures à (5%) (**Tableau 15**) pour la totalité des points. **15** puits sont qualifiés par une bonne analyse et **1** puits qualifié par une analyse acceptable.

2. ÉTUDE CLASSIFICATIVE ET QUALITATIVE DES EAUX SOUTERRAINES :

2.1-Faciès hydro-chimiques :

Les fronts chimiques de l'eau établissent un équilibre entre la composition chimique de l'eau et des roches ; L'eau prend une minéralisation qui sert à distinguer les faciès chimiques (**Tableau 16**).

Plusieurs méthodes ont été définies par divers auteurs pour classer et connaître les différents faciès hydro-chimiques des eaux.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les méthodes principales les plus connues à savoir :

- **La classification de Schoeller et Berkaloff.**
- **La classification de Piper.**
- **La classification de Stiff.**
- **La classification de Stabler.**

Toutes ces classifications sont basées sur la composition chimique des eaux.

2.1.1-Classification de Schoeller -Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller et Berkaloff permet de reconnaître simplement le faciès d'une eau souterraine, en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques. Les valeurs utilisées sont exprimées en **mg/L** au milieu du diagramme et latéralement en **meq/L**.

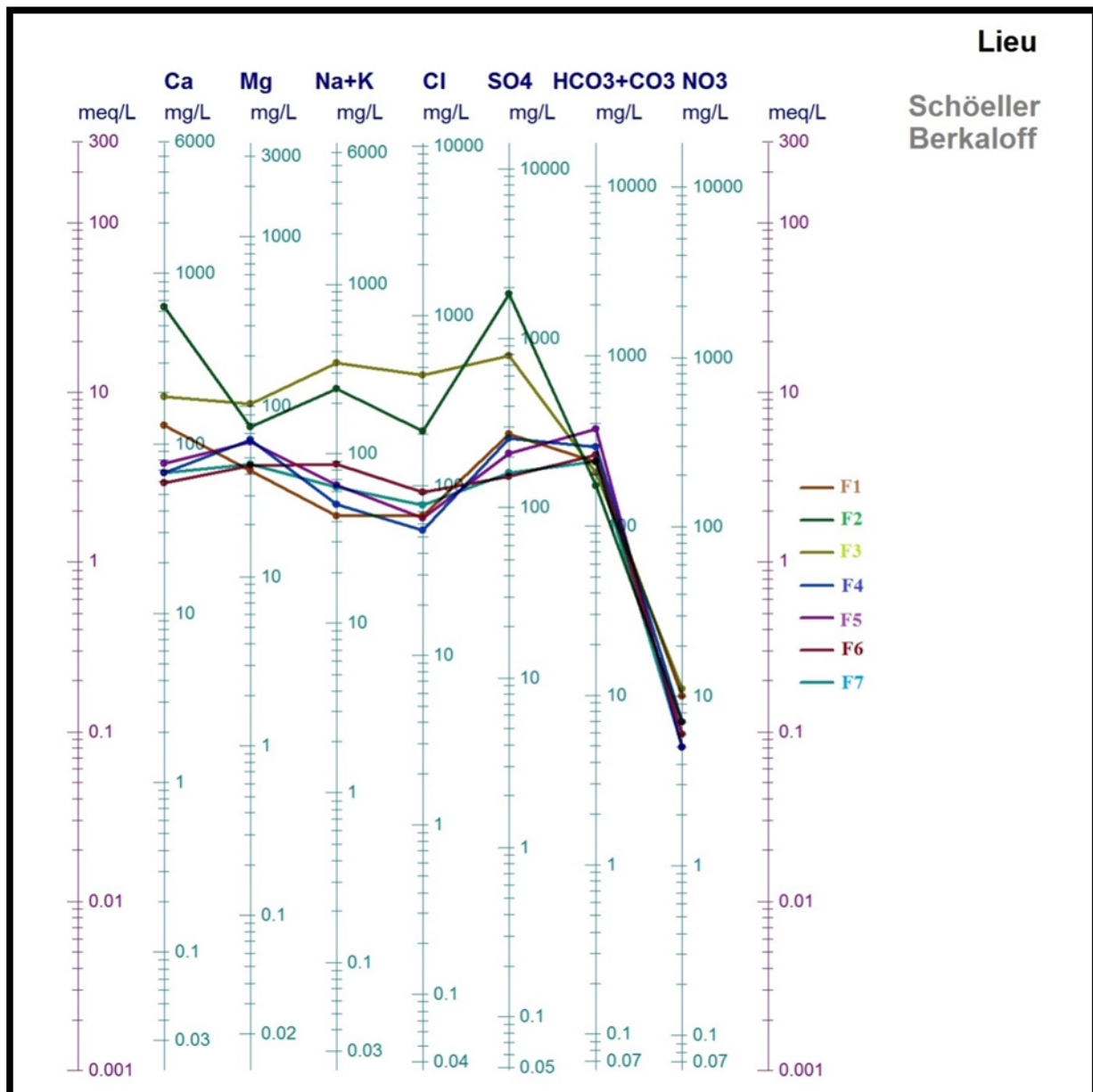


Fig.16 : Diagramme de Schoeller et Berkaloff. (Groupe1)

D'après le diagramme de Schoeller et Berkaloff (Groupe1), on distingue 3 types de faciès chimiques :

- Sulfaté calcique (F1, F2) et sulfaté magnésien(F4).
- Sulfaté sodique (F3).
- Bicarbonaté magnésien (F5, F6, F7).

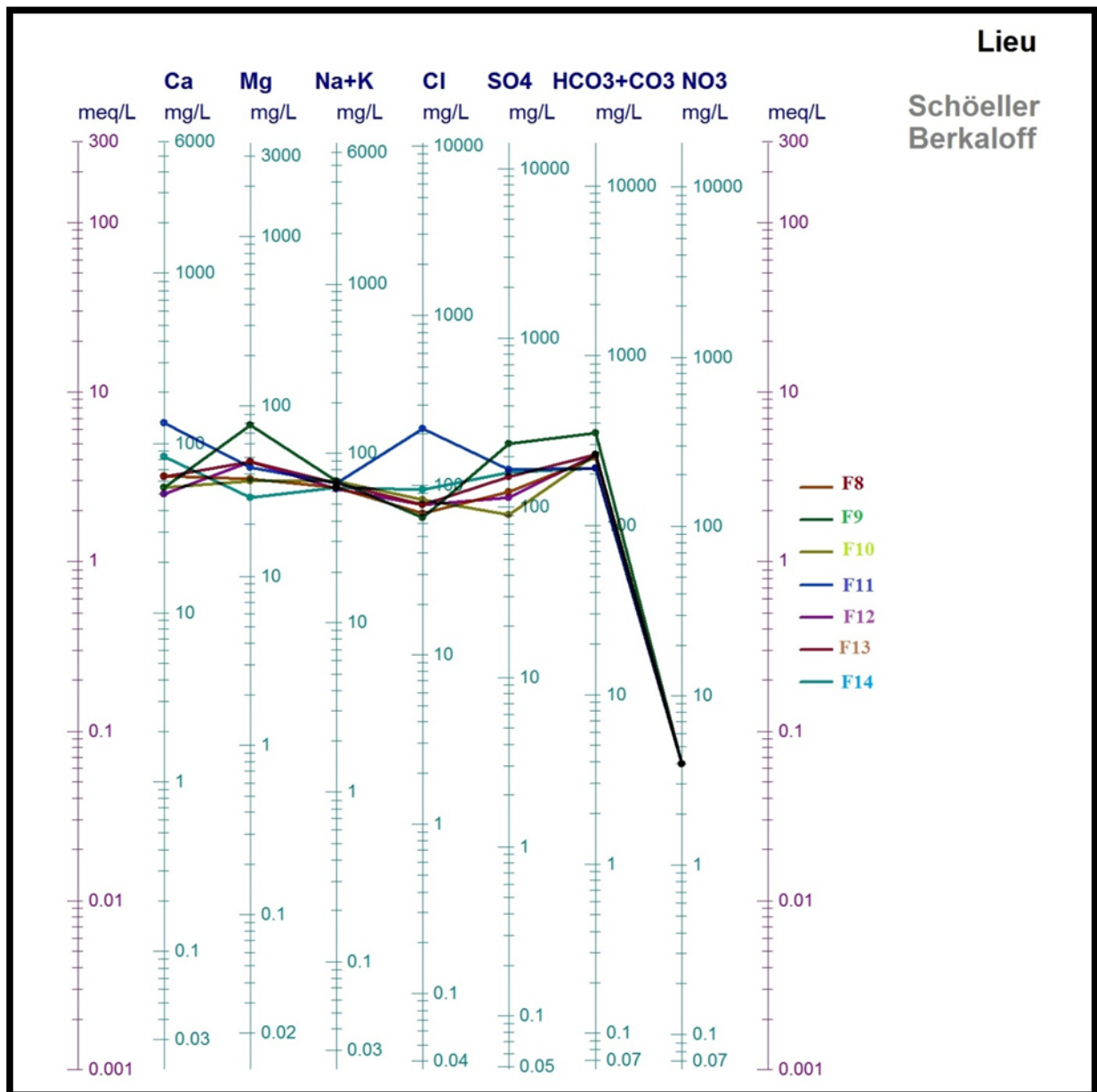


Fig.17 : Diagramme de Schoeller et Berkaloff. (Groupe2)

Le groupe2 (Fig.18) montre 2 types de faciès chimiques :

- Bicarbonaté magnésien (F8, F9, F10, F12) et bicarbonaté calcique (F13, F14).
- Chloruré calcique (F11).



Fig.18 : Diagramme de Schoeller et Berkaloff. (Groupe3)

Le groupe 3, nous distinguons deux faciès chimiques :

- Bicarbonaté magnésien (F15, F16, F19, F20) et bicarbonaté calcique (F17, F18).

Tableau 16 : Faciès chimiques des points d'eau.

Points d'eau	Anions	Cations	Faciès chimiques
F1	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{HCO}_3^- < \text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$	Sulfaté calcique
F2	$\text{NO}_3^- < \text{HCO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+}$	
F3	$\text{NO}_3^- < \text{HCO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+$	Sulfaté sodique
F4	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{HCO}_3^- < \text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+}$	Sulfaté magnésien
F5	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{+2}$	Bicarbonaté magnésien
F6	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$	
F7	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{+2}$	
F9	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$	
F10	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$	
F12	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$	
F13	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{+2}$	
F15	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$	
F19	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$	
F20	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+}$	
F8	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{+2}$	Bicarbonaté calcique
F14	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+}$	
F18	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+}$	
F16	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{+2}$	
F17	$\text{NO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$	$\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+}$	
F11	$\text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^- < \text{Cl}^-$	$\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{+2}$	Chloruré calcique

Selon le tableau ci-dessus et les diagrammes de **Schoeller- Berkaloff**, nous aboutissons à six (6) faciès chimiques :

- ✓ **Sulfaté calcique.**
- ✓ **Sulfaté sodique.**
- ✓ **Sulfaté magnésien.**
- ✓ **Bicarbonaté magnésien.**
- ✓ **Bicarbonaté calcique.**
- ✓ **Chloruré calcique.**

2.1.2-Classification de Piper :

Le diagramme de Piper utilise les éléments majeurs pour déterminer les différents faciès des eaux souterraines, il est particulièrement adapté à l'évolution des faciès des eaux, lorsque la minéralisation augmente. Il est composé de deux triangles et un losange. Les triangles sont d'abord remplis (un de cations et un d'anion) puis remplis le losange pour déterminer le faciès chimique.

Le report des résultats des analyses des 20 échantillons sur le diagramme de Piper est donné par la figure suivante :

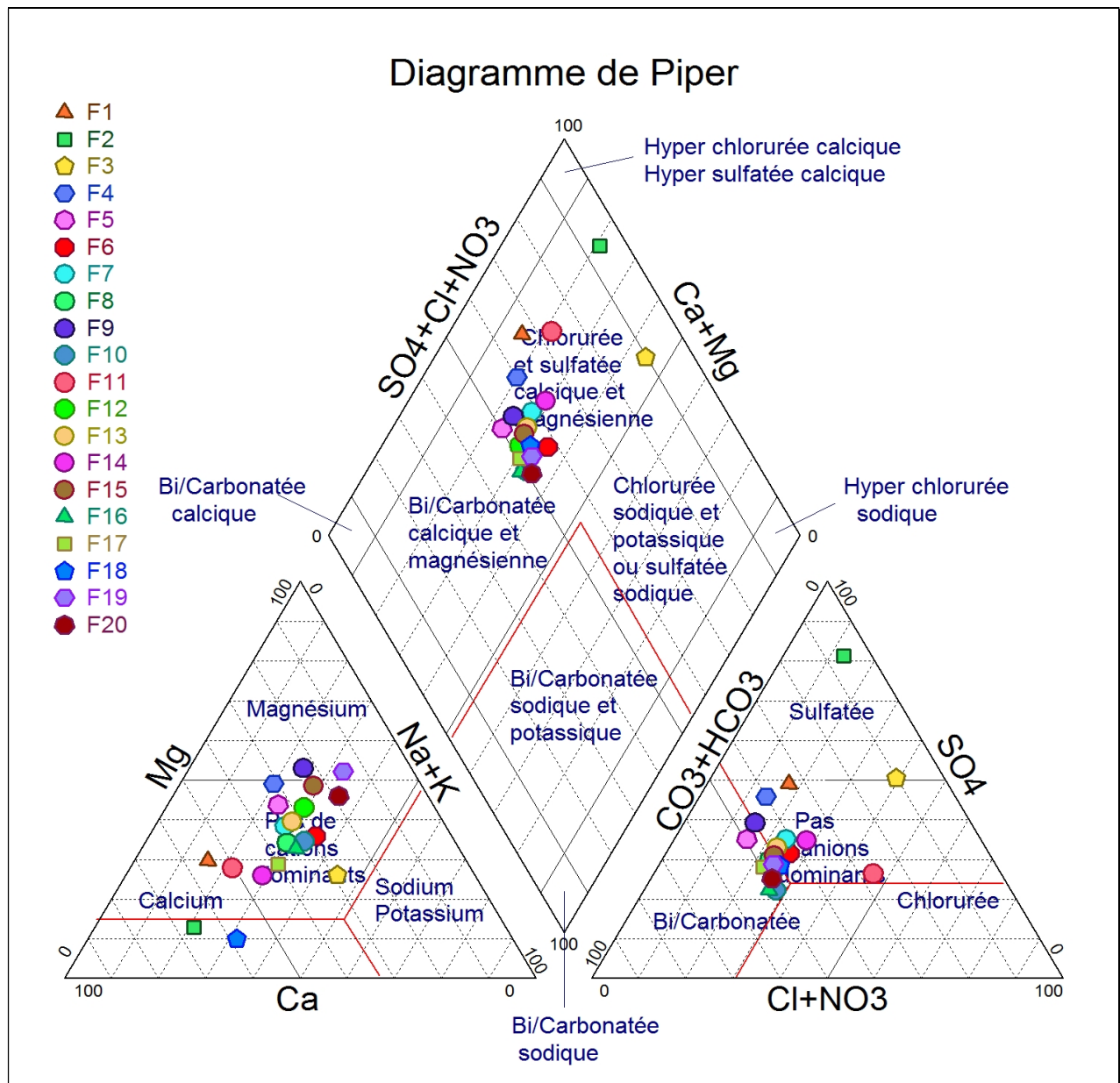


Fig.19 : Diagramme de Piper.

Selon ce diagramme, on peut classer les eaux de la région de Béni- Boussaid selon deux grandes familles des faciès chimiques :

- Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne,
- Bicarbonatée calcique et magnésienne.

2.1.3-La classification de Stiff :

Le diagramme de Stiff présente les analyses en deux axes différents, l'axe gauche présente les cations ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+}) et l'axe droit présente les anions (Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, $\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$). Les valeurs utilisées sont exprimées en meq/L.

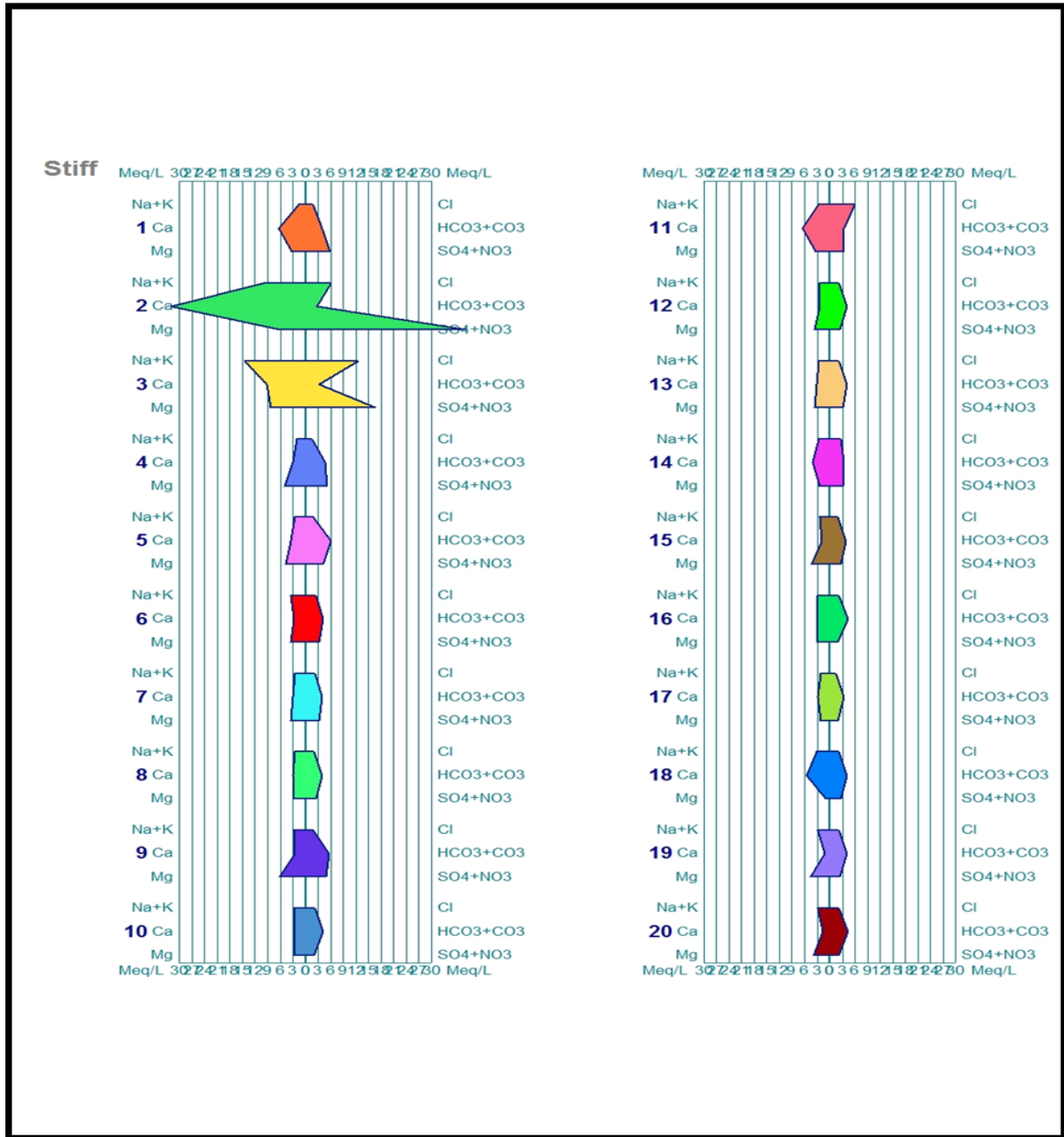


Fig.20 : Diagramme de Stiff.

D'après le diagramme de Stiff, nous observons les faciès suivants :

Bicarbonaté magnésien qui sont dominants : F5, F6, F7, F9, F10, F12, F13, F15, F19, F20.

Bicarbonaté calcique : F8, F14, F16, F17, F18.

Sulfaté calcique F1-F2, **sulfaté sodique** F3, et **sulfaté magnésien** F4. **Chloruré calcique** : F11.

2.1.4-La classification de Stabler :

Le diagramme de Stabler est utilisé pour déterminer rapidement les différents titres d'une eau (titre d'alcalimétrie, titre en sels d'acides forts et titre d'hydrotimétrie). Pour cela les concentrations en **meq/L** des anions et des cations sont reportées sur deux barres ou colonnes distinctes de même longueur, les concentrations étant reportées en %. La détermination des différents titres est visuelle.

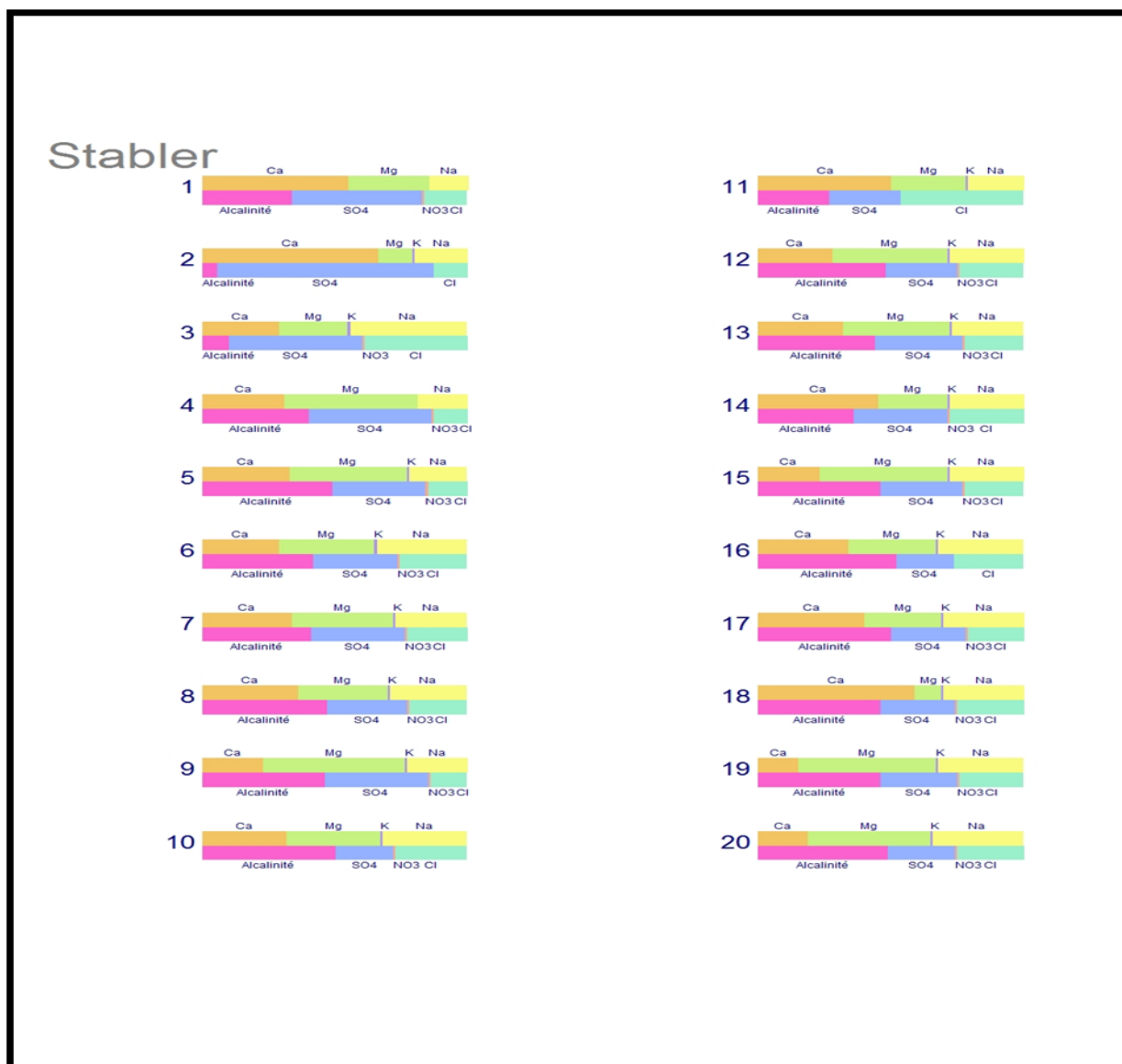


Fig.21 : Diagramme de Stabler.

D'après les diagrammes de Stabler, nous observons que le faciès dominant est **Bicarbonaté magnésien** sur les points d'eau ci-après de notre zone d'étude : F5, F6, F7, F9, F10, F12, F13, F15, F19, F20.

2.2-Aptitude des eaux souterraines pour la consommation humaine :

2.2.1-Analyse des paramètres physico-chimiques :

Sur la base des résultats des analyses physiques et chimiques des eaux souterraines de la région étudiée (**Annexe7et Tableau19**) et en se référant aux normes algériennes de potabilité, nous avons aboutis à ce qui suit :

1. PH :

D'après les normes algériennes,le pH doit être entre 6.5 et 9. Tous les points d'eau étudiés sont conformes aux normes (fig.22). La valeur maximale enregistrée est de 7.80au F15, tandis que la valeur minimale est de 7.00 au F9 et F13.

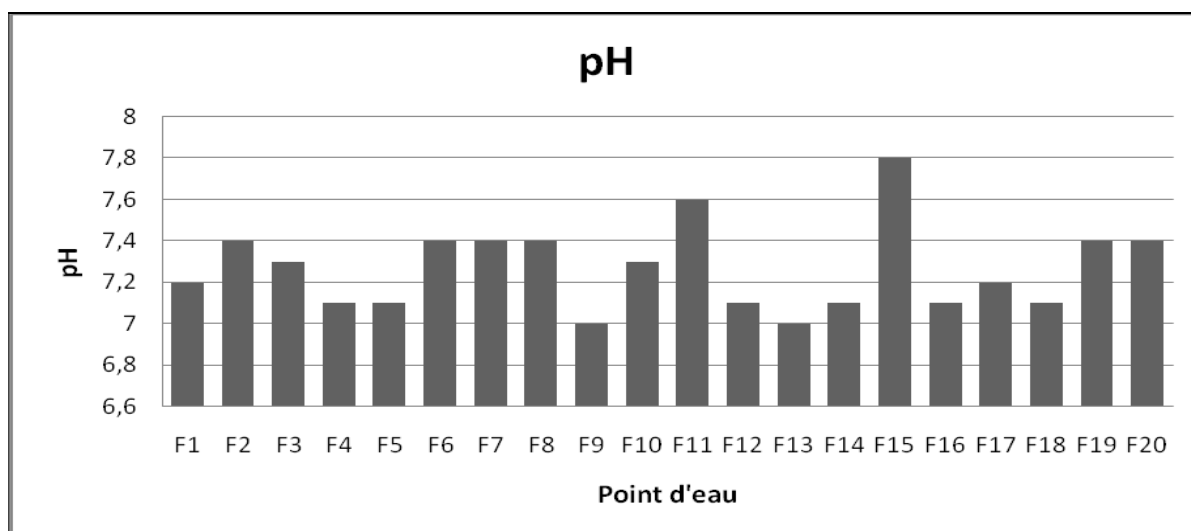


Fig.22 : Histogramme du pH.

2. Conductivité électrique (CE) :

La conductivité permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau dans la mesure où la plupart des matières sont dissoutes dans l'eau.

Le tableau suivant donne la relation entre la conductivité et la minéralisation des eaux (J. Rodier, 1984).

Tableau 17 : Relation entre la conductivité et la minéralisation (J. RODIER ,2009).

Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	Minéralisation (mg/L)
Conductivité <100	Très faible
100 < Conductivité < 200	Faible
200 < Conductivité < 333	Moyenne
333 < Conductivité < 666	Moyenne à accentuée
666 < Conductivité < 1000	Importante
Conductivité > 1000	Elevée

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de la conductivité et la classification de la minéralisation:

Tableau 18 : Conductivités et minéralisations des points d'eau étudiés.

Forages	Conductivité en ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation
F1	854	Importante
F2	2930	Elevée
F3	2450	Elevée
F4	893	Importante
F5	940	Importante
F6	783	Importante
F7	682	Importante
F8	709	Importante
F9	931	Importante
F10	783	Importante
F11	1105	Elevée
F12	661	Moyenne à accentuée
F13	661	Moyenne à accentuée
F14	784	Importante
F15	690	Importante
F16	644	Moyenne à accentuée
F17	608	Moyenne à accentuée
F18	660	Moyenne à accentuée
F19	/	/
F20	662	Moyenne à accentuée

Les valeurs des conductivités des forages, oscillent entre 608 et 2930 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Nous avons donc trois classes de la minéralisation : moyenne à accentuée, importante et élevée.

D'après la norme algérienne (2800 μ S/cm), le forage F2 présente une valeur élevée en conductivité (2930 μ S/cm), pour les autres forages, les valeurs sont conformes à la norme préconisée. La plus basse valeur est enregistrée au F17 (608 μ S/cm) (fig.23).

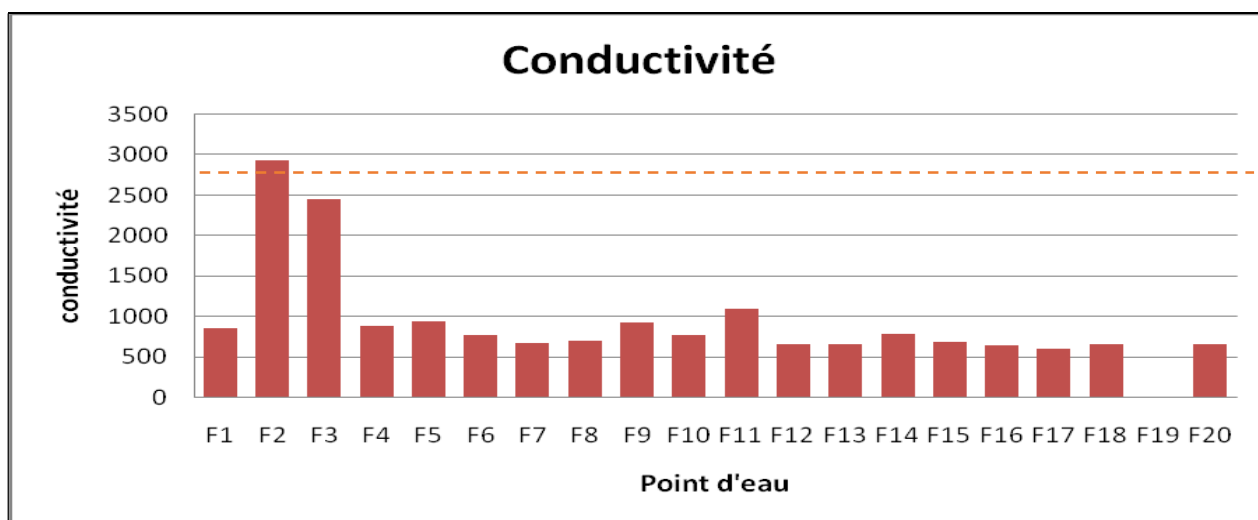


Fig.23 : Histogramme des conductivités.

3. Calcium :

D'après les normes algériennes de potabilité, la concentration maximale en Ca^{2+} est de 200 mg/L, le tableau 19 et la figure 24 montrent que les concentrations en calcium des points d'eau étudiés sont comprises entre 27mg/L (F19) et 191 mg/L(F3), à l'exception du F2 qui dépasse la norme, avec une teneur de 644 mg/L ; tous les autres points s'inscrivent à l'intérieur de cette norme.

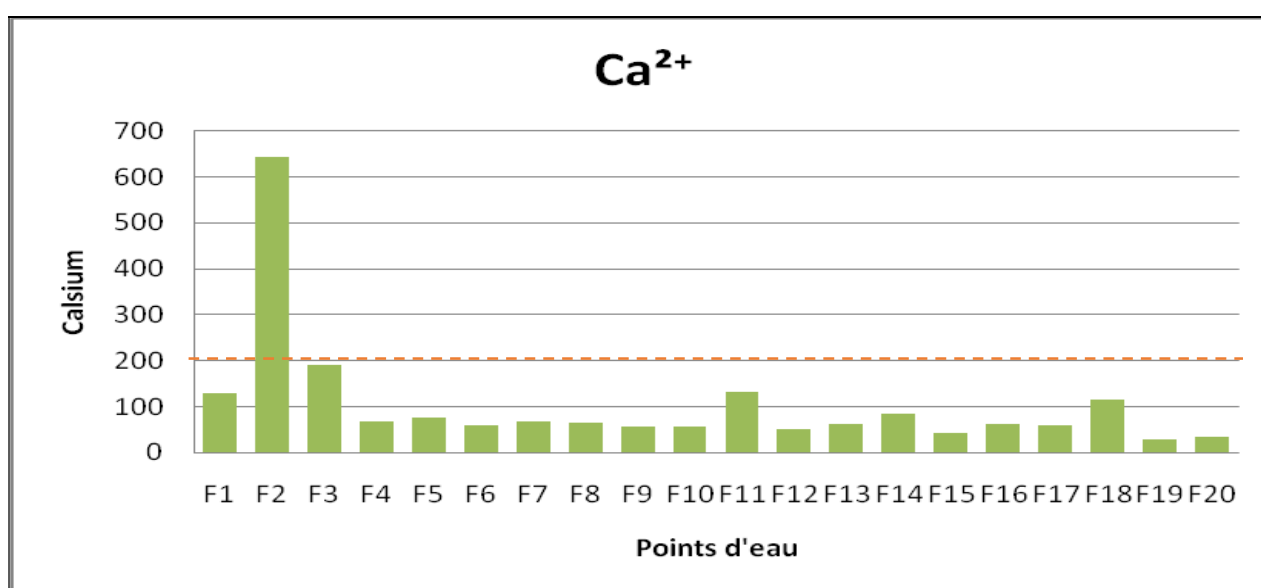


Fig.24 : Histogramme de Calcium.

4. Magnésium :

Les valeurs des concentrations en Mg^{2+} sont comprises entre 12mg/L(F18) et 103 mg/L (F3) (fig.25). Les concentrations de tous les points d'eau étudiés sont à l'intérieur de la norme algérienne de potabilité, fixées à 150 mg/L.

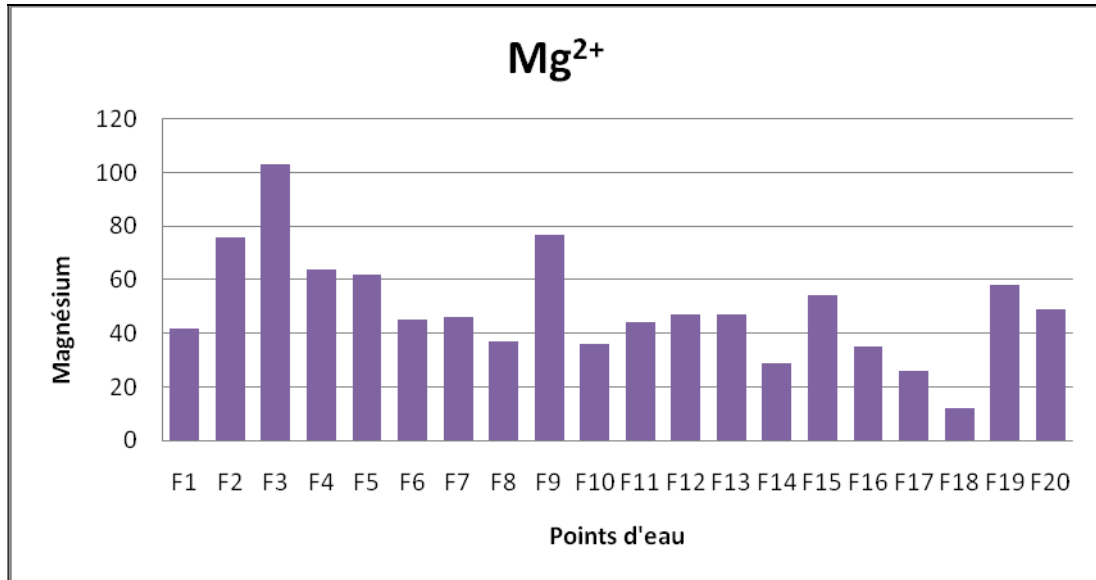


Fig.25 : Histogramme de Magnésium.

5. Potassium :

Les concentrations en K^+ des eaux des forages sont inférieures à la norme qui est plafonnée à 12 mg/L. A l'exception du forage F2 qui présente une valeur limite de 12 mg/L et du F3 qui dépasse la norme avec 16mg/L, Les concentrations en K^+ du reste des forages sont inférieures à la norme. (Fig.26)

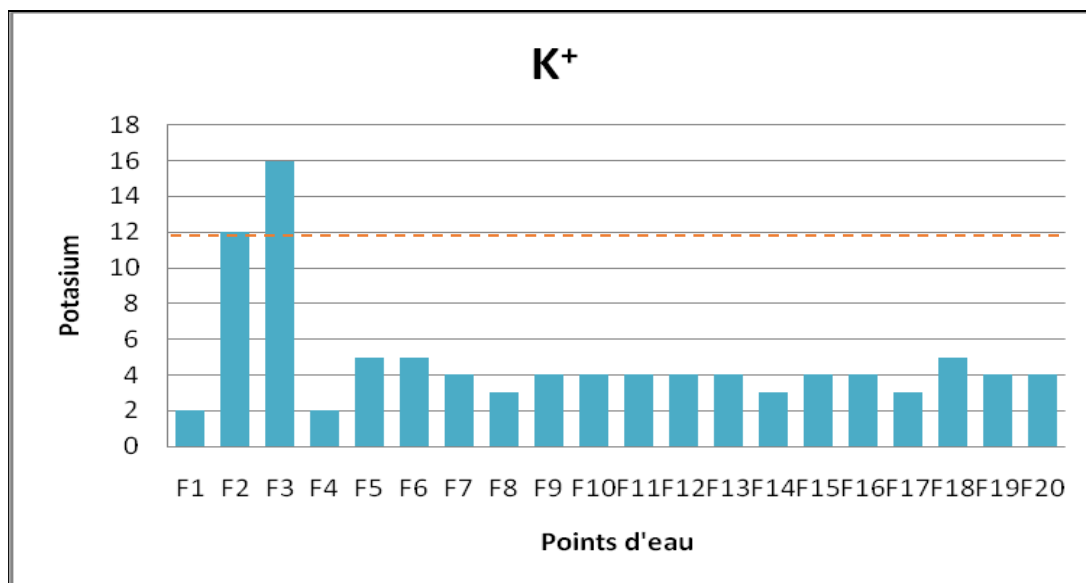


Fig.26 : Histogramme du Potassium.

6. Sodium :

Les concentrations en Na^+ des points étudiés varient entre 41 et 327 mg/L, tous les points d'eaux ont des concentrations inférieures à la norme algérienne de potabilité, fixée à 200 mg/L, à l'exception de deux forages F2 (228 mg/L) et F3 (327 mg/L) dont les concentrations dépassent la norme. (Fig.27)

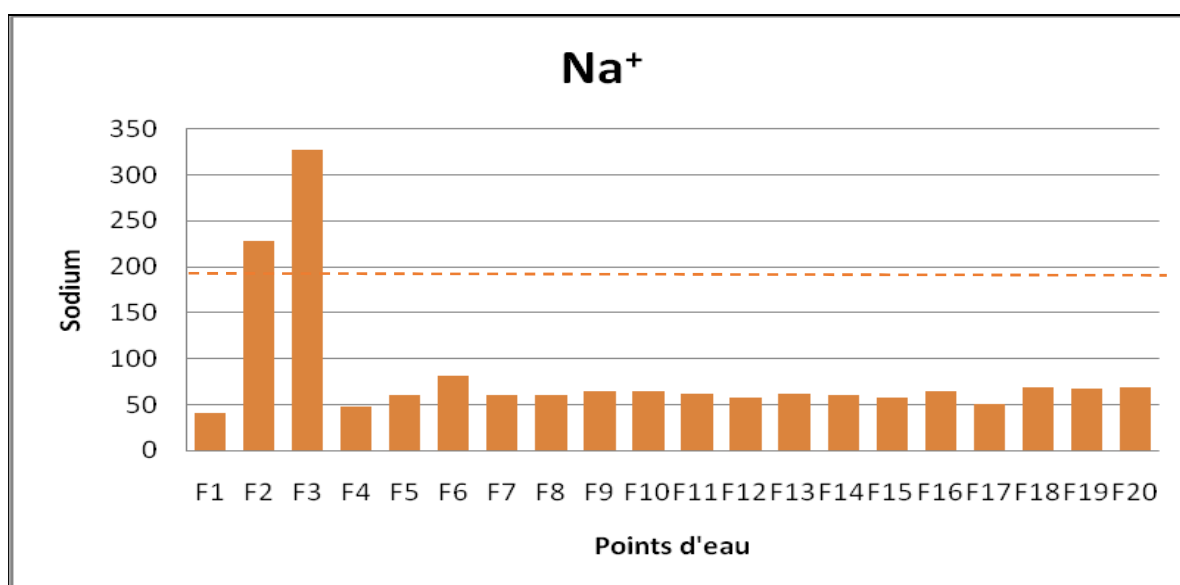


Fig.27 : Histogramme du Sodium.

7. Chlorure :

Les teneurs en Cl^- des forages d'eau étudiés varient entre 54 mg/L(F17) et 447 mg/L(F3). La norme est prescrite à 500mg /L, nous considérons donc que tous les points d'eau sont conformes à cette norme. (Fig.28)

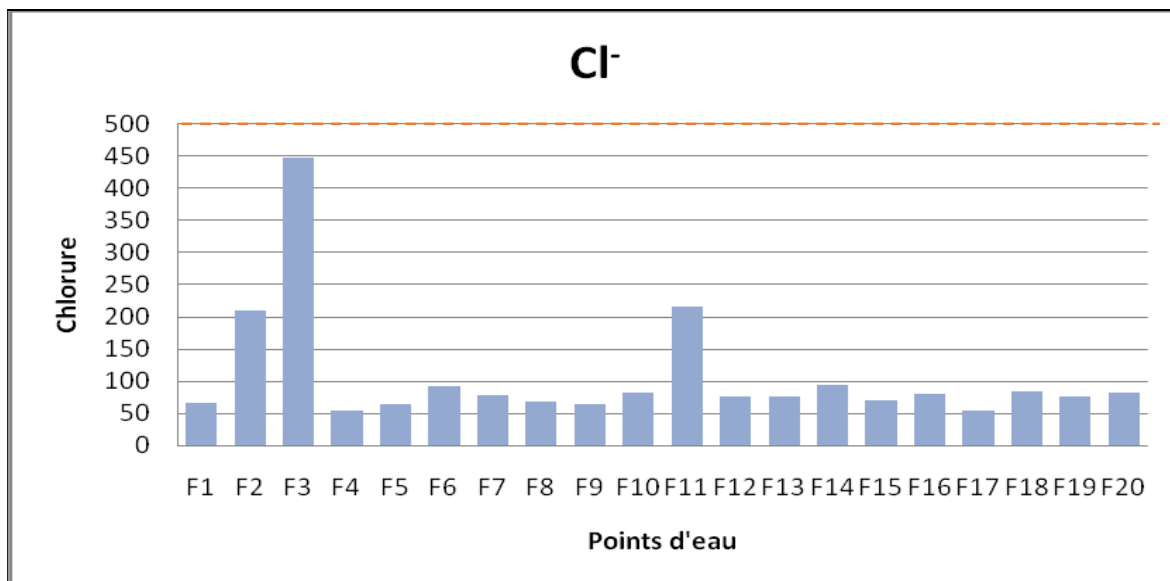


Fig.28 : Histogramme des Chlorures.

8. Sulfate :

D'après les normes, les concentrations en SO_4^{2-} sont fixées dans un intervalle maximal admissible de 400 mg/L, tous les points d'eau ont des concentrations inférieures à cette norme, sauf les forages F2 (1840mg/L) et F3 (788mg/L) qui dépassent cet intervalle (fig.29).

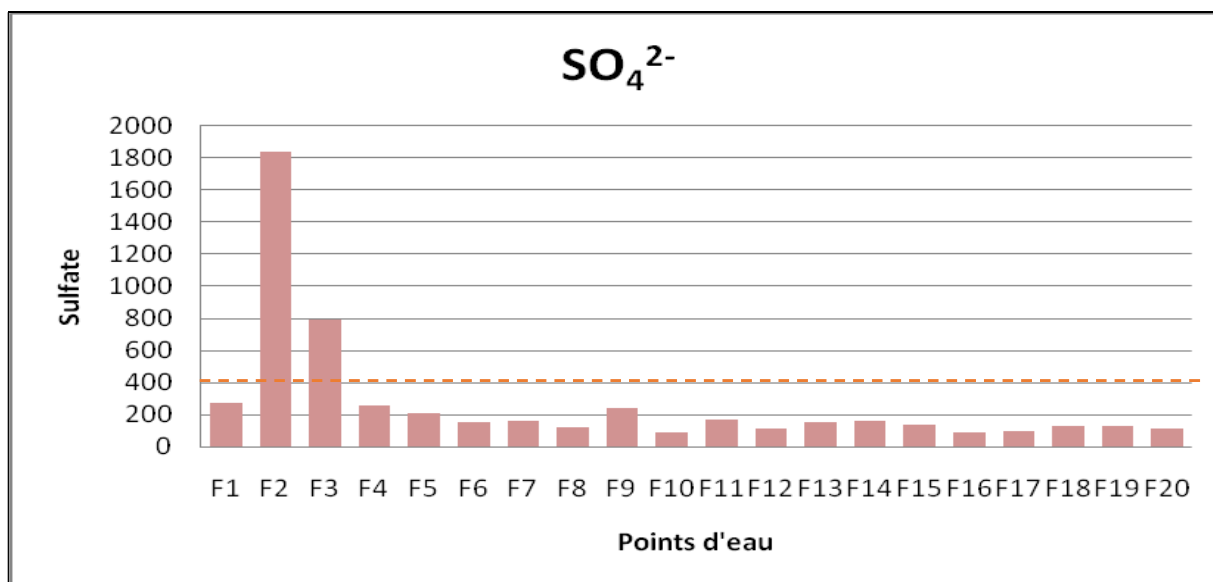


Fig.29 : Histogramme des Sulfates.

9. Bicarbonates :

Les teneurs en HCO_3^- des points d'eau sont comprises entre 171 et 373 mg/L, les normes algériennes ne fixent aucune valeur pour ce paramètre. (Fig.30)

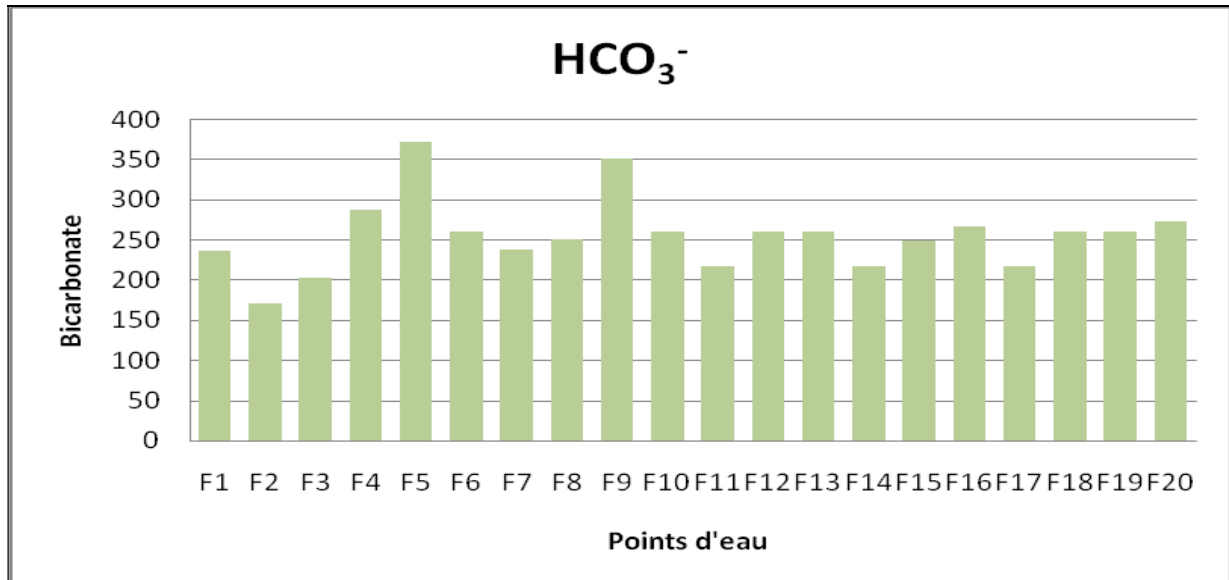


Fig.30 : Histogramme des Bicarbonates.

10. Nitrate :

Les valeurs des concentrations des NO_3^- des points d'eau étudiés varient entre 0 (F16) et 11 mg/L (F3), ces teneurs sont inférieures à la norme (50mg/L) (fig.31).

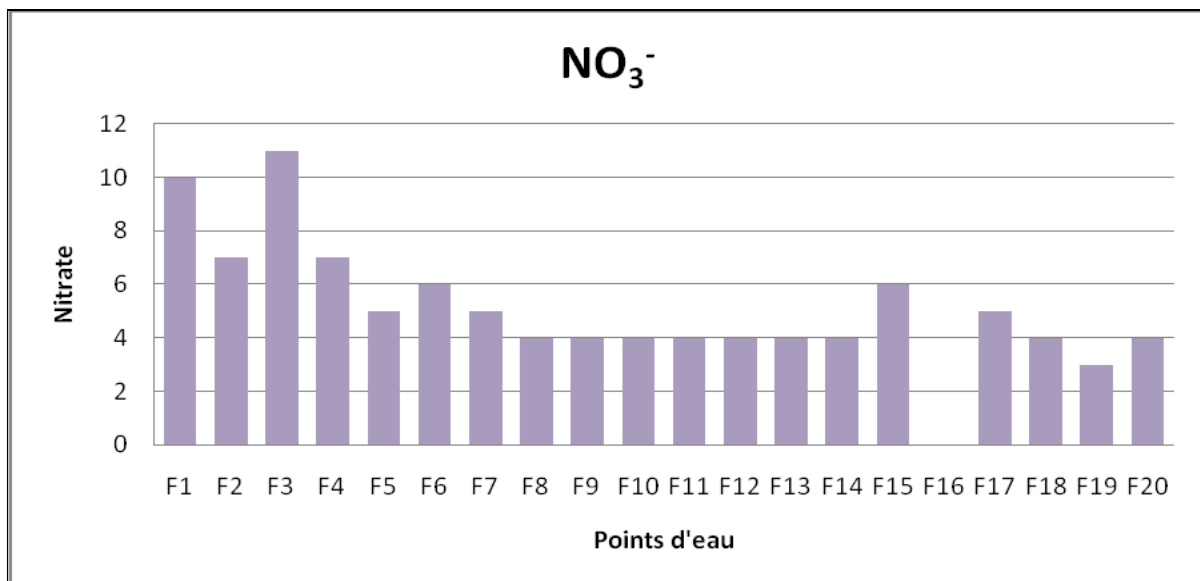


Fig.31 : Histogramme des Nitrates.

Tableau.19 : Etat qualitatif des eaux des forages selon les paramètres Physico-chimiques.

Paramètres	pH	Conductivité	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Etat
Les normes algériennes de potabilité	≥ 6.5 et ≤ 9	2800	75-200	150	12	200	200-500	200-400	/	50	/
F1	7,20	854	128	42	2	41	66	273	237	10	Potable
F2	7,40	2930	644	76	12	228	209	1840	171	7	Non potable
F3	7,30	2450	191	103	16	327	447	788	203	11	Non potable
F4	7,10	893	67	64	2	48	55	258	288	7	Potable
F5	7,10	940	77	62	5	60	64	208	373	5	Potable
F6	7,40	783	59	45	5	81	91	153	260	6	Potable
F7	7,40	682	67	46	4	60	77	160	239	5	Potable
F8	7,40	709	64	37	3	60	68	124	251	4	Potable
F9	7,00	931	55	77	4	64	64	238	352	4	Potable
F10	7,30	783	55	36	4	64	82	91	260	4	Potable
F11	7,60	1105	131	44	4	62	215	168	217	4	Potable
F12	7,10	661	50	47	4	58	76	115	260	4	Potable
F13	7,00	661	63	47	4	62	76	152	260	4	Potable
F14	7,10	784	83	29	3	60	94	161	217	4	Potable
F15	7,80	690	42	54	4	58	70	133	250	6	Potable
F16	7,10	644	61	35	4	64	80	91	267	0	Potable
F17	7,20	608	60	26	3	51	54	97	218	5	Potable
F18	7,10	660	116	12	5	69	83	127	260	4	Potable
F19	7,40	/	27	58	4	67	76	126	260	3	Potable
F20	7,40	662	33	49	4	69	81	110	273	4	Potable

D'après le tableau ci-dessus, nous constatons que deux forages ne sont pas potables F2 et F3, à cause des concentrations élevées en Ca²⁺, Na⁺, K⁺, et SO₄²⁻ qui dépassent les normes.

2.3-Aptitude des eaux souterraines destinées à l'irrigation :

Cette aptitude dépend de plusieurs facteurs, reliés à la nature des sols et des plantes. Elle peut être évaluée par un certain nombre d'indices et de diagrammes, tels que :

- L'indice de Kelly's Ratio (Kr).
- Sodium Adsorption Ratio (S.A.R).
- Diagramme de Riverside.

- Le pourcentage en sodium (% Na).
- Diagramme de Wilcox.

2.3.1-L'indice de Kelly's Ratio (KR) :

L'indice de Kelly's Ratio (KR) est représenté par le rapport des concentrations de Na^+ (meq/L), et la somme de Ca^{2+} (meq/L) et de Mg^{2+} (meq/L). 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 :

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

Si le **KR** < 1 \Rightarrow L'eau est bonne pour l'irrigation ;

Si le **KR** > 1 \Rightarrow L'eau est mauvaise pour l'irrigation ;

Tableau.20 : Classification des eaux selon l'indice de KR

Nom des échantillons	KR	Observation
F1	0,24	Bonne
F2	0,32	Bonne
F3	1,11	Mauvaise
F4	0,37	Bonne
F5	0,43	Bonne
F6	0,78	Bonne
F7	0,53	Bonne
F8	0,59	Bonne
F9	0,48	Bonne
F10	0,70	Bonne
F11	0,35	Bonne
F12	0,60	Bonne
F13	0,56	Bonne
F14	0,54	Bonne
F15	0,60	Bonne
F16	0,67	Bonne
F17	0,59	Bonne
F18	0,54	Bonne
F19	0,79	Bonne
F20	0,84	Bonne

D'après le tableau ci-dessus, nous remarquons que toutes les valeurs de **KR** sont inférieures à 1, ce qui indique la bonne qualité de l'eau pour l'irrigation, à l'exception du F3 qui présente une valeur supérieure à 1, donc son eau est mauvaise pour l'irrigation.

2.3.2-Sodium adsorption ratio (SAR) :

Le taux d'adsorption du sodium est une mesure de la quantité de sodium (Na) par rapport au calcium (Ca) et au magnésium (Mg) dans l'extrait aqueux de pâte de sol saturé. C'est le rapport de la concentration de Na divisé par la racine carrée de la moitié de la concentration de (Ca+Mg). Les sols qui ont des valeurs SAR de 13 ou plus peuvent être caractérisés par une dispersion accrue des matières organiques et des particules d'argile, une conductivité hydraulique saturée réduite et une dégradation générale de la structure du sol.

Le SAR peut être déterminé par la formule suivante :

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

- S.A.R < 10 : Eau excellente : eau à faible danger d'alcalinisation des sols.
- 10 < S.A.R < 18 : Eau bonne : danger d'alcalinisation assez appréciable.
- 18 < S.A.R < 26 : Eau convenable : danger d'alcalinisation important.
- S.A.R > 26 : Eau médiocre, danger de forte alcalinisation.

-Diagramme de Riverside :

Riverside a créé une classification qui considère le rapport entre le sodium absorbé par le sol (**SAR**) et la minéralisation totale.

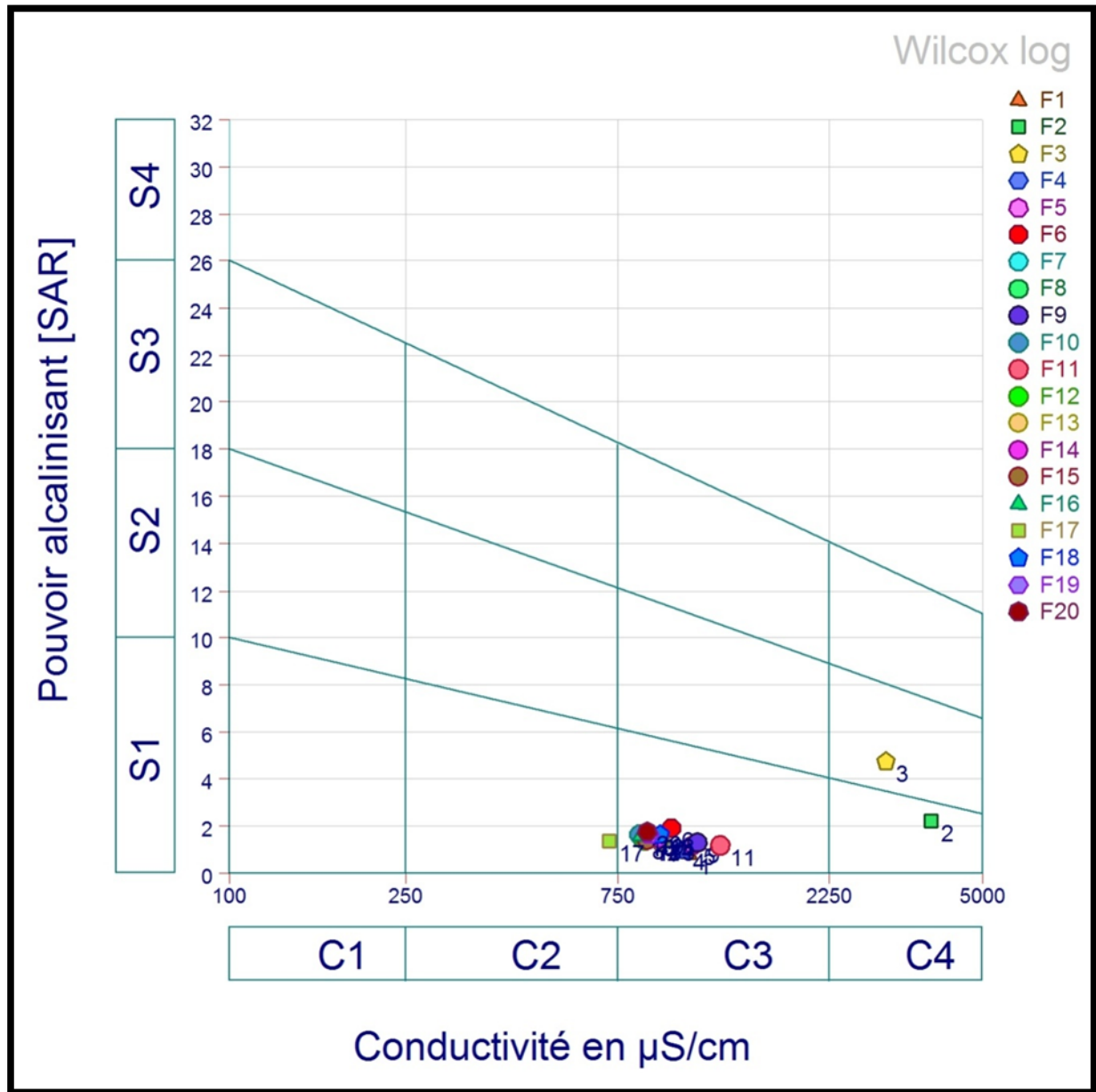


Fig.32 : Diagramme de Riverside

Tableau.21 : Classification des eaux d'irrigation d'après Servant, 1975 (U.S laboratoire de salinité).

Degré	Qualité	Classe	Description
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 sol ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à forte capacité d'échanges d'ions (sols argileux).
3	Admissible	C3-S1	En général, eau convenant à l'irrigation cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles 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	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisées sous certaines conditions sols très perméable, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel

Les résultats obtenus montrent que le forage F17 est dans la classe C2-S1 (*bonne* pour l'irrigation), F2 et F3 sont classés en C4-S1 et C4-S2 respectivement. Ils sont de qualité *médiocre*. Le reste des forages sont dans la classe C3-S1, ils sont de qualité *admissible* pour l'irrigation.

2.3.3-Pourcentage en sodium et classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium.

Le pourcentage du 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 pourcentage de sodium (% Na) peut être calculé par l'équation suivante :

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

Tableau.22 : Classification des eaux d'irrigation 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 de la zone d'étude	F1-F4	F2-F5-F6-F7 F8-F9-F10 F11-F12-F13 F14-F15-F16 F17-F18 F19-F20	F3		

En prenant en considération le % en Na⁺, nous pouvons déduire trois classes de qualité pour les points d'eau de notre région d'étude :

- ❖ Classe 1 (très bonne) : F1-F4
- ❖ Classe 2 (bonne) : F2-F5-F6-F7-F8-F9-F10-F11-F12-F13-F14-F15-F16-F17-F18-F19-F20.
- ❖ Classe 3 (Admissible) : F3

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 (figure 33) permet de voir une autre classification des eaux souterraines concernant leur aptitude à l'irrigation.

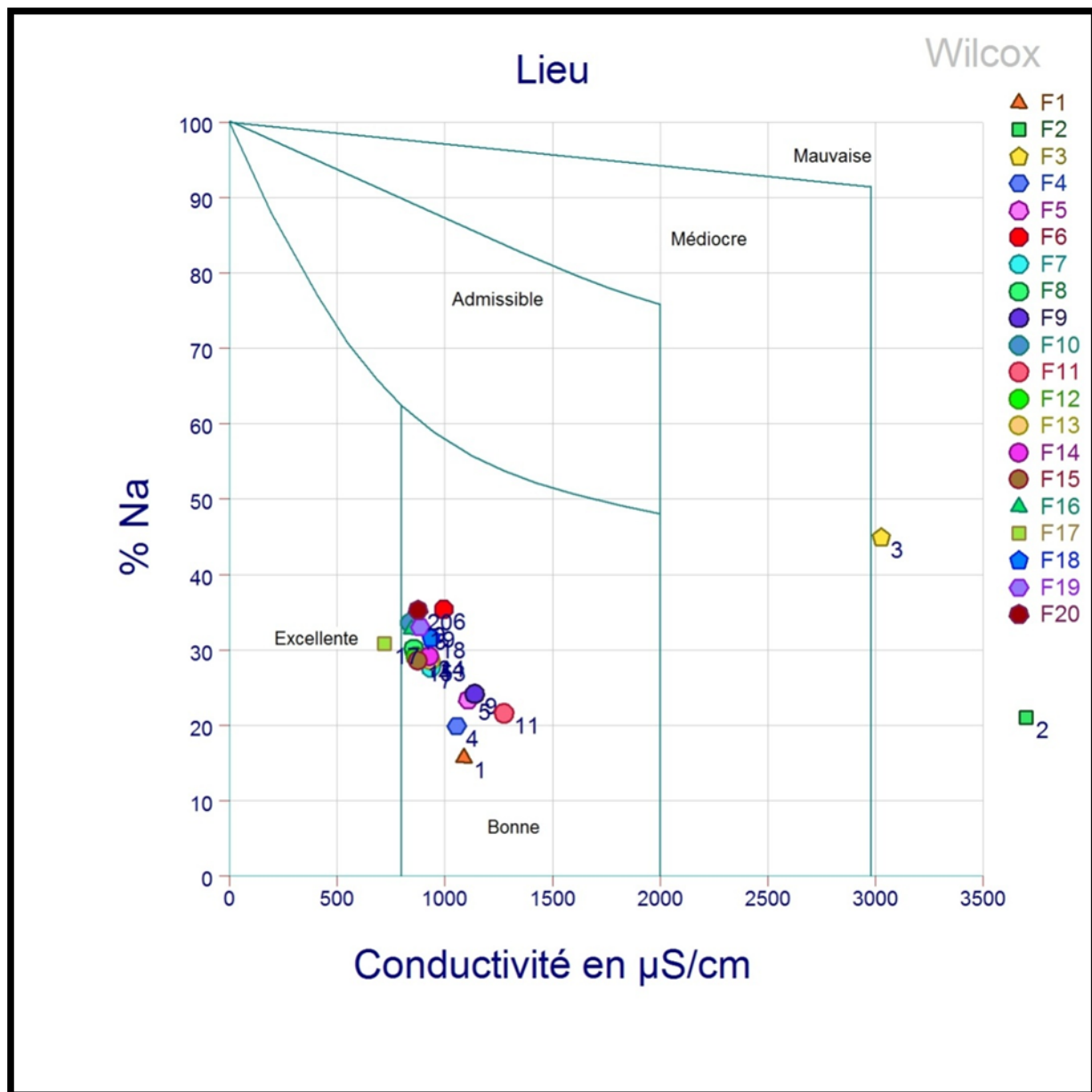


Fig.33 : Diagramme de Wilcox.

Le diagramme ci- dessus, montre que les eaux souterraines de la région de Béni Boussaid, appartiennent aux trois classes de qualité : excellente, bonne et mauvaise :

- ✓ **Excellente** : F17
- ✓ **Bonne** : tous les forages qui restent.
- ✓ **Mauvaise** : F3. Le F2 est hors classe avec une valeur de la conductivité supérieure à $3500\mu\text{S/cm}$.

3. ORIGINE DE LA MINERALISATION :

3.1-Etude statistique :

Pour tenter de préciser les relations entre les éléments chimiques (variables) et de regrouper les points d'eau (individus) ayant le même chimisme, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH).

3.1.1-Principe et méthode de l'analyse en composantes principales (A.C.P) :

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multi-variée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites corrélées en statistique). Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante (Travi et Mudry, 1997).

L'intérêt principal de cette matrice est la visualisation de l'ensemble des corrélations (positives ou négatives) ou de l'absence de corrélation des paramètres entre eux.

Matrice des corrélations et matrice des covariances :

Lorsque l'on dispose de la mesure de nombreux paramètres pour chaque individu, il est possible de calculer le coefficient de corrélation. Les résultats sont alors rangés en deux tableaux carrés de mêmes lignes sur une même colonne (pour même paramètres). En mathématique, ces objets s'appellent des matrices. La matrice des corrélations présente une diagonale principale constituée de 1 car toute variable est parfaitement corrélée à elle-même (Keddah K et Medjahdi N, 2018).

Interprétation des résultats :

Les corrélations sont synthétisées dans un cercle imaginaire à deux axes ou plus. Chaque axe représente une composante principale. On regarde la position des variables par rapport à cet axe.

-Si les variables sont proches de la direction positive de l'axe, alors elles sont corrélées ;

-Si les variables sont proches de la direction négative de l'axe, alors elles sont anti-corrélées, où il existe une proportionnalité inverse entre ces variables ;

-Si une variable est proche d'un axe et l'autre variable est proche d'un autre axe, on conclut que ces deux variables sont non corrélées.

3.1.2-Application :

Les résultats des analyses des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-) ont été traités à l'aide de logiciel XLSTAT.

Le but de l'ACP est de tirer la conclusion concernant l'association des éléments chimiques, géochimiques et de caractériser la répartition des individus.

Tableau.23 : Les individus et les variables.

Variables Individus	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-
F1	128	42	2	41	66	273	237	10
F2	644	76	12	228	209	1840	171	7
F3	191	103	16	327	447	788	203	11
F4	67	64	2	48	55	258	288	7
F5	77	62	5	60	64	208	373	5
F6	59	45	5	81	91	153	260	6
F7	67	46	4	60	77	160	239	5
F8	64	37	3	60	68	124	251	4
F9	55	77	4	64	64	238	352	4
F10	55	36	4	64	82	91	260	4
F11	131	44	4	62	215	168	217	4
F12	50	47	4	58	76	115	260	4
F13	63	47	4	62	76	152	260	4
F14	83	29	3	60	94	161	217	4
F15	42	54	4	58	70	133	250	6
F16	61	35	4	64	80	91	267	0
F17	60	26	3	51	54	97	218	5
F18	116	12	5	69	83	127	260	4
F19	27	58	4	67	76	126	260	3
F20	33	49	4	69	81	110	273	4

Tableau.24 : Paramètres statistiques des variables.

Variable	Moyenne	Ecart-type	coefficient de variation en %
HCO ₃ ⁻	4,193	0,749	17,86
Cl ⁻	3,001	2,574	85,78
NO ₃ ⁻	0,086	0,034	38,96
SO ₄ ⁻	5,635	8,308	147,43
Ca ⁺⁺	5,172	6,637	128,33
Mg ⁺⁺	4,070	1,672	41,08
Na ⁺	3,593	3,002	83,53
K ⁺	0,123	0,085	69,13

Les coefficients de variation pour les éléments (Mg²⁺, HCO₃⁻ et NO₃⁻) sont inférieurs à 50%. Ils indiquent une homogénéité due à une répartition régulière de ces paramètres dans l'espace aquifère. Les coefficients de variation pour les éléments (Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻ et SO₄²⁻) sont supérieurs à 50%, indiquant ainsi une hétérogénéité due à une répartition régulière de ces paramètres dans l'espace aquifère, et cela est dû à leur origine salifère et évaporitique, qui leur permet d'acquérir des concentrations élevées localement.

3.1.3-Matrice de corrélation :

Une matrice de corrélation est utilisée pour évaluer la dépendance entre plusieurs variables en même temps. Le résultat est une table contenant les coefficients de corrélation entre chaque variable et les autres.

Tableau.25 : Matrice de corrélation

Variables	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
HCO ₃ ⁻	1							
Cl ⁻	-0,491	1						
NO ₃ ⁻	-0,311	0,566	1					
SO ₄ ⁻	-0,466	0,558	0,458	1				
Ca ⁺⁺	-0,520	0,474	0,368	0,970	1			
Mg ⁺⁺	0,071	0,615	0,500	0,561	0,368	1		
Na ⁺	-0,456	0,910	0,600	0,756	0,643	0,696	1	
K ⁺	-0,393	0,889	0,536	0,751	0,649	0,678	0,985	1

La matrice de corrélation portée sur les éléments chimiques des eaux de la région d'étude nous a montré qu'il existe une très bonne corrélation entre (Ca²⁺/SO₄²⁻, Na⁺/Cl⁻, K⁺/Cl⁻, Na⁺/K⁺). Tandis que les éléments [Cl⁻/SO₄²⁻), (Cl⁻/Mg²⁺), (Cl⁻/NO₃⁻), (NO₃⁻/Na⁺), (NO₃⁻/K⁺), (SO₄²⁻/Mg²⁺), (Ca²⁺/Na⁺), (Ca²⁺/K⁺)] sont moyennement corrélés.

3.1.4-Analyse en Composantes Principales :

Les résultats analytiques portés sur les 20 échantillons ont généré huit variables. Seuls les deux premiers facteurs qui représentent 79.50% de la variance totale (tableau.26) peuvent interpréter d'une manière satisfaisante la minéralisation des eaux de ce système aquifère. F1 représente 64.60 % de la variance et il est déterminé positivement par (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , NO_3^- , et K^+) et témoigne de la dissolution des formations évaporitiques et salifères du Trias, et par les infiltrations des eaux d'irrigation, riches d'engrais minéraux. Tandis que l'axe F2 représente 14.90 % de la variance est témoin de la dissolution des formations carbonatées (HCO_3^-).

Tableau.26 : Pourcentages cumulés des facteurs intervenant dans la minéralisation des eaux de la région d'étude.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	5.168	1.192	0.797	0.561	0.197	0.075	0.008	0.000
Variabilité (%)	64.600	14.898	9.966	7.017	2.468	0.944	0.105	0.003
% cumulé	64.600	79.498	89.464	96.481	98.949	99.892	99.997	100.000

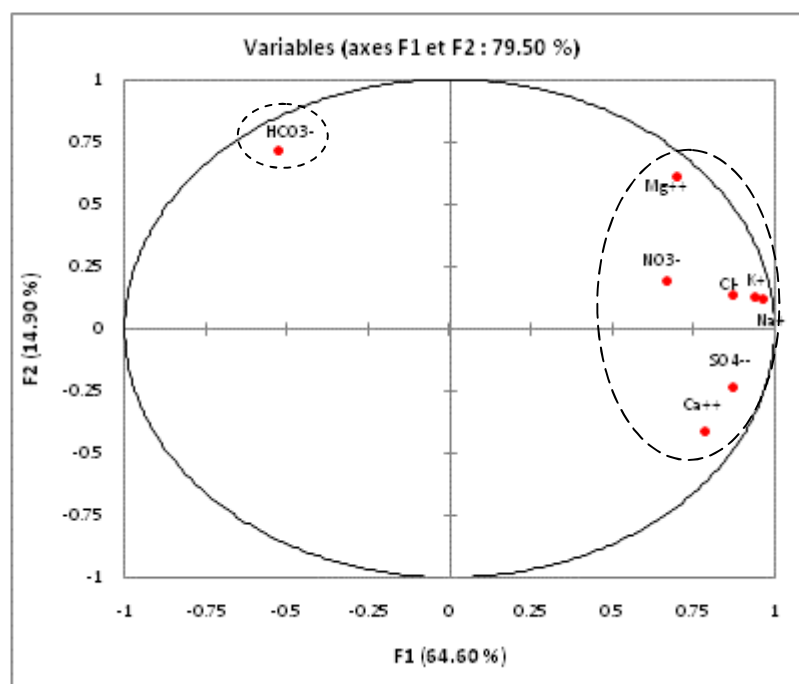


Fig.34 : Projection dans l'espace des variables en fonction des facteurs 1 et 2.

3.1.5-Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) :

Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner des données (individus, objets, etc...) en différentes classes. La classification ascendante hiérarchique (CAH) est l'une d'entre elles. On cherche à ce que les individus regroupés au sein d'une même classe (homogénéité intra-classe) soient le plus semblables possibles tandis que les classes soient le plus dissemblables (hétérogénéité interclasse). Dans notre cas, les individus sont représentés par les différents ions contenus dans les eaux étudiées.

Le principe de la CAH est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances, exprimant la distance existante entre chaque individu pris deux à deux. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les deux observations seront dissemblables, plus la distance sera importante. La CAH va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification. La classification est *ascendante* car elle part des observations individuelles ; elle est hiérarchique car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on produira la partition désirée. (LARMARANGE. J, et al, 17 juin 2020, *modifiée*).

Le but de l'utilisation de la classification ascendante hiérarchique dans notre étude est de répartir les ions présents dans les eaux étudiées dans un certain nombre de classes. Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel de XLSTAT.

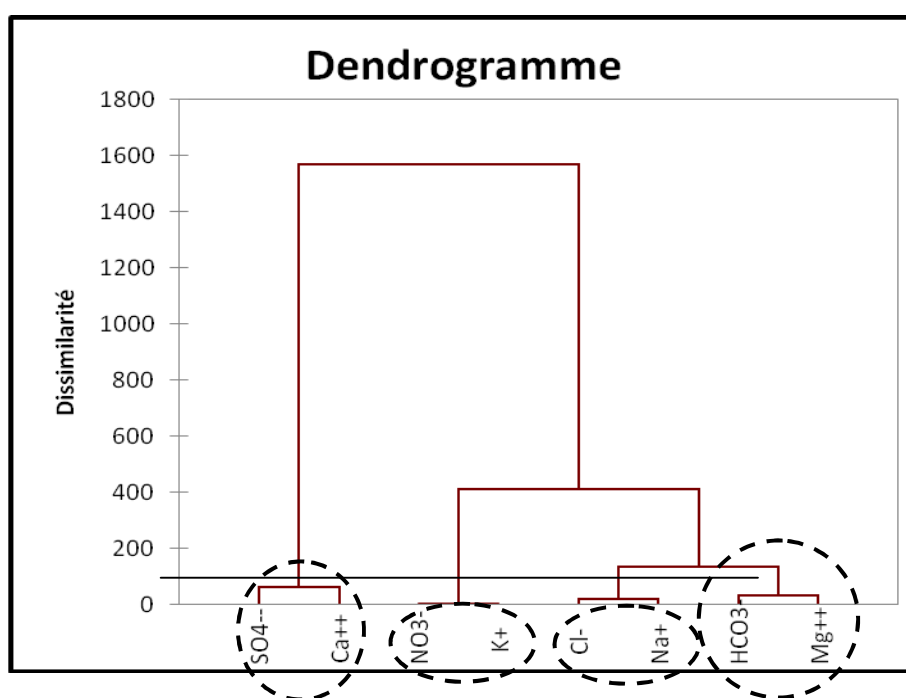


Fig.35 : Classification Hiérarchique des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées.

D'après le dendrogramme de CAH, on a quatre classes qui regroupent les paramètres chimiques de l'eau et qui sont :

- Classe 1 : regroupe le $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$.
- Classe 2 : regroupe le NO_3^-/K^+
- Classe 3 : regroupe le Cl^-/Na^+
- Classe 4 : regroupe le $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$

Cette analyse nous a permis de déduire la présence d'une similarité entre les $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ et Cl^-/Na^+ indiquant la dissolution des formations gypsifères et salifères. Aussi, la présence d'une similarité entre NO_3^-/K^+ , nous indique la présence d'une pollution entropique, due aux infiltrations des eaux d'irrigation.

Le groupe $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$ témoigne d'une minéralisation d'origine lithologique, due à la dissolution des formations carbonatées de l'aquifère.

4. Conclusion :

L'étude hydrogéochimie faite sur les eaux souterraines de Zouia a fait ressortir les résultats suivants :

- Selon les différents diagrammes de Scholler- Berkaloff, Stiff et Stabler, nous avons six types de faciès chimiques :
 - ❖ Sulfaté calcique.
 - ❖ Sulfaté sodique.
 - ❖ Bicarbonaté calcique.
 - ❖ Chloruré calcique.
 - ❖ Sulfaté magnésien.
 - ❖ Bicarbonaté magnésien.

Le diagramme de Piper a classé les eaux de la région de Zouia selon deux grandes familles de faciès chimiques :

- ❖ Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne,
- ❖ Bicarbonatée calcique et magnésienne.

🚧 Du point de vue potabilité, 90% des forages sont conformes aux normes de potabilité algériennes. Les 10% restante, représentés par les points d'eau F2 et F3 sont caractérisés par des teneurs élevées en Sodium, Calcium, Potassium et Sulfate qui dépassent les normes de potabilités algériennes est cela due à la circulation de ces eaux dans des formations évaporitiques et salifères.

🚧 Concernant l'irrigation, en utilisant des indices comme le pourcentage en Na^+ , et le Kr et des diagrammes :

-D'après les résultats du Kr, tous les forages sont de bonne qualité pour l'irrigation, à l'exception du F3 qui est de mauvaise qualité.


- Le % en Na^+ calculé a montré que F1 et F4 sont de très bonne qualité pour l'irrigation, F3 est de qualité admissible, tandis que les autres forages sont de bonne qualité.


-Selon le diagramme de Riverside, le forage F17 est dans la classe C2-S1 (classe bonne pour l'irrigation), F2 et F3 sont classés en C4-S1 et C4-S2 respectivement. Ils sont de qualité médiocre. Le reste des forages sont dans la classe C3-S1, ils sont de qualité admissible pour l'irrigation.

-Le diagramme de Wilcox a fait ressortir trois classifications :

- ✓ **Excellente** : F17
- ✓ **Bonne** : tous les points d'eau restant.
- ✓ **Mauvaise** : F3. Le F2 est hors classe.


L'étude statistique nous a permis de mieux comprendre la géochimie des eaux des forages captés par l'ADE (Algériennes Des Eaux) dans la zone de Zouia, en déterminant l'origine de leur minéralisation. Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel « XLSTAT » ; en trois étapes :

 **Etape 1** : Matrice de corrélation, Elle nous a permis de faire la corrélation entre les éléments chimiques. Les résultats obtenus ont permis de dire qu'il existe une très bonne corrélation entre les éléments chimiques ($\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2+}$, Na^+/Cl^- , K^+/Cl^- , Na^+/K^+), témoignant ainsi de la dissolution des formations évaporitiques et salifères.

 **Etape 2** : Elle s'est appuyée sur l'analyse en composante principale et a dévoilé la prédominance de deux facteurs qui influencent la minéralisation de l'eau :

- Le premier facteur (F1 : 64.60%) présente la dissolution des formations évaporitiques et salifères, aussi cette minéralisation influencée par une pollution probablement agricole et domestique.

- Le deuxième facteur (F2 : 14.90%) présente la dissolution des formations de l'aquifère carbonaté.

 **Etape 3** : L'utilisation de la méthode (statistique) de classification ascendante hiérarchique (CAH) nous a permis de mettre en exergue à travers le dendrogramme ci-dessus la proximité de certains individus (ions) et d'aboutir sur quatre classes dissemblables d'ions ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$, NO_3^-/K^+ , Cl^-/Na^+ , $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$) et ce qui montre l'existence de la dissolution des formations gypsifères, salifères et dolomitiques. Aussi, la présence une similarité entre NO_3^-/K^+ , nous indique la présence d'une pollution anthropique.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE :

L'objectif final de notre humble étude est l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines, captées par un certain nombre des forages de l'Algérienne Des Eaux (ADE) de Maghnia.

En premier lieu, l'étude climatologique nous a permis de déterminer le type du climat qui règne dans la région de Maghnia, et qui se caractérise par un climat semi-aride.

- ✚ Sur la période étudiée de 30 ans qui s'étale de 1990-2019, La moyenne annuelle des précipitations est de 309,4mm. Le mois de Janvier est le plus humide, avec 43.1mm de précipitations, tandis que celui de Juillet est le plus sec, avec 1.9mm.
- ✚ La température moyenne annuelle est de 18°C. Le mois de Janvier enregistre la température la plus basse, avec 10.5°C et le mois d'Août est le plus chaud, avec une température de 27.3°C. L'hiver étant la saison la plus humide et l'été est la saison la plus sèche.
- ✚ Le bilan calculé par la méthode de Thornthwaite, nous a montré que l'ETR est légèrement égal aux précipitations, avec un déficit agricole de 604,6 mm.

En second lieu, l'étude géologique et structurale des Monts de Ghar-Roubane a montré que :

- ✚ La zone d'étude est composée d'une part, par des formations paléozoïques et mésozoïques qui constituent les reliefs et d'autre part, par des terrains néogènes et quaternaires qui forme la plaine de Maghnia.
- ✚ L'étage inférieur hercynien est constitué des roches de l'ère primaire (Paléozoïque) qui est caractérisé par une phase compressive qui est à l'origine des structures tectoniques du Carbonifère inférieur.
- ✚ L'étage supérieur de l'ère secondaire (Mésozoïque) est fait de dépôts jurassiques peu déformés. La région a acquis sa structure en horsts et grabens après les phases tectoniques tertiaires qui ont repris les accidents hérités de l'orogénèse hercynienne, et les réajustements structuraux, c'est l'allure actuelle de la région.

L'analyse litho-stratigraphique a montré les différentes formations qui peuvent présenter un intérêt hydrogéologique dans la région d'étude.

Au vue de ce qui précède, nous pouvons conclure que les nappes du Jurassique dans la région de Béni Boussaid sont constituées par des formations aquifères fissurées et parfois karstifiées. L'aquifère carbonaté du Lias et du Dogger ont un intérêt hydrogéologique important. Leurs caractéristiques géométriques doivent être bien connues (Bensaoula.F, Adjim.M, 2006).

L'étude hydrogéochimique faite sur les eaux souterraines de Béni-Boussaid a fait ressortir les résultats suivants :

- Selon les différents diagrammes de Schoeller- Berkaloff, Stiff et Stabler, nous avons six types de faciès chimiques :
 - ❖ Sulfaté calcique.
 - ❖ Sulfaté sodique.
 - ❖ Bicarbonaté calcique.
 - ❖ Chloruré calcique.
 - ❖ Sulfaté magnésien.
 - ❖ Bicarbonaté magnésien.

Le diagramme de Piper a classé les eaux de la région d'étude selon deux grandes familles de faciès chimiques :

- ❖ Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne,
- ❖ Bicarbonatée calcique et magnésienne.

🚧 Du point de vue potabilité, 90% des forages sont conformes aux normes de potabilité algériennes. Les 10% restant, représentés par les points d'eau F2 et F3 sont caractérisés par des teneurs élevées en Sodium, Calcium, Potassium et Sulfate qui dépassent les normes de potabilités algériennes est cela est due à la circulation de ces eaux dans des formations évaporitiques et salifères.

🚧 Concernant l'irrigation, en utilisant des indices comme le pourcentage en Na^+ , le Kr et des diagrammes :

-D'après les résultats du Kr, tous les forages sont de bonne qualité pour l'irrigation, à l'exception du F3 qui est de mauvaise qualité.

- Le % en Na^+ calculé a montré que F1 et F4 sont de très bonne qualité pour l'irrigation, F3 est de qualité admissible, tandis que les autres forages sont de bonne qualité.

-Selon le diagramme de Riverside, le forage F17 est dans la classe C2-S1 (classe bonne pour l'irrigation), F2 et F3 sont classés en C4-S1 et C4-S2 respectivement. Ils sont de qualité médiocre. Le reste des forages sont dans la classe C3-S1, ils sont de qualité admissible pour l'irrigation.

-Le diagramme de Wilcox a fait ressortir trois classifications :

- ✓ **Excellente** : F17
- ✓ **Bonne** : Tous les points d'eau restant.
- ✓ **Mauvaise** : F3. Le F2 est hors classe.

L'étude statistique nous a permis de mieux comprendre la géochimie des eaux des forages captés par l'ADE (Algériennes Des Eaux) dans la région de Béni-Boussaid, en déterminant l'origine de leur minéralisation.

Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel « XLSTAT », en trois étapes :

✚ **Etape 1** : Matrice de corrélation, Elle nous a permis de faire la corrélation entre les éléments chimiques. Les résultats obtenus ont permis de dire qu'il existe une très bonne corrélation entre les éléments chimiques ($\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2+}$, Na^+/Cl^- , K^+/Cl^- , Na^+/K^+), témoignant ainsi de la dissolution des formations évaporitiques et salifères.

✚ **Etape 2** : Elle s'est appuyée sur l'analyse en composante principale et a dévoilé la prédominance de deux facteurs qui influencent la minéralisation de l'eau :

- Le premier facteur (F1 : 64.60%) présente la dissolution des formations évaporitiques et salifères, aussi cette minéralisation influencée par une pollution probablement agricole et domestique.
- Le deuxième facteur (F2 : 14.90%) présente la dissolution des formations de l'aquifère carbonaté.

✚ **Etape 3** : L'utilisation de la méthode (statistique) de classification ascendante hiérarchique (CAH) nous a permis de mettre en exergue à travers le dendrogramme ci-dessus la proximité de certains individus (ions) et d'aboutir sur quatre classes dissemblables d'ions ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$, NO_3^-/K^+ , Cl^-/Na^+ , $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$) et ce qui montre l'existence de la dissolution des formations gypsifères, salifères et dolomitiques. Aussi, la présence d'une similarité entre NO_3^-/K^+ , nous indique la présence d'une pollution anthropique.

RECOMMANDATIONS :

Les recommandations ci-dessous visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des solutions et interventions en conséquence :

- Il est nécessaire de protéger les abords des forages d'eau pour éviter les risques de contamination.
- De plus, il est fortement recommandé de faire le suivi régulier, tout au long de l'année. Ceci pour garantir la qualité de l'eau et protéger ces forages de toutes formes de pollution par la réalisation de nouvelles campagnes d'analyses physico-chimiques sur un plus grand nombre possible de points d'eau à différentes périodes de l'année, afin de mettre à jour les données physico- chimiques, dans le but de suivre l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines.
- Il est recommandé de mener une étude sur la recharge des eaux souterraines naturelles, afin de confirmer la méthode de minéralisation des eaux souterraines. Cela ne peut se produire qu'après avoir achevé des études approfondies de géologie et d'hydrogéologie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie :

BABA HAMED K., 2007. Hydrodynamique et modélisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche géostatistique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (NW algérien). Thèse de Doctorat. Univ. Tlemcen. pp21-22.

BENEST. M. (1985). Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse. Doct. Géol. Univ. Lyon. Fasc 1., 367p., 107 fig..

BENSAOULA F., ADJIM M., 2006. Synthèse sur les forages hydrauliques profonds de la zone frontalière algéro-marocaine. Algérie, Article Journal n° 05, juin 2006. pp33-39.

BONNET. M. (1965). Etude hydrogéologique de la plaine de Maghnia. Rapport S.E.S n°59/ GE. Oran. 45p.

KEDDAH K. ET MEDJAHDY N., 2018. Contribution à l'étude physico-chimique de quelques sources dans le groupement urbain de Tlemcen. Mémoire master. Univ. Tlemcen. p 106.

LARMARANGE J., (2020). Introduction à l'analyse d'enquêtes avec R et R.Studio, 17juin 2020. p601.

LUCAS G., 1942. Description géologique et pétrographique des monts de Ghar Roubane et de Sidi El-Abed, Bull. Ser. Car. Géol. Algérie 2^{ème} série N°16.

LUCAS G., 1952. Bordure nord des hautes plaines dans l'Algérie occidentale primaire. Jurassique. Analyse structurale, XIX^e congrès géologique international, monographie régionale 1^{ère} série Algérie N°21.

MAHBOUBI H., MIMOUNI D., 2014. Etude lithologique de l'indice de minéralisation : Djebel Deglen (partie sud des monts de Ghar Roubane, Tlemcen, Algérie). Mémoire master. Univ. Tlemcen. Algérie. p 66.

PALIWAL K.V., (1967). Effet de l'application de gypse sur la qualité des eaux d'irrigation. Madras Agric J, p 59:646-647.

RODIER J., LEGUBE B., MERLET N., et COLL. (2009). L'analyse de l'eau, 9^{ème} édition. Edition DUNOD, Paris, France. 1579 p.

TRAVI Y & MUDRY J, (1997). Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. Hydrogéologie, n°1, pp. 13- 21.

WILCOX L.V., (1948). La qualité de l'eau pour l'irrigation. Bulletin technique du Département américain de l'agriculture, 1962, Washington, DC.

LISTE DES FIGURES :

Figures	Titres	Pages
Fig.1	Situation géographique de la zone d'étude	12
Fig.2	Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Mouilah(Baba Hamed.K, 2007)	13
Fig.3	Variations des précipitations moyennes annuelles	17
Fig.4	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles	17
Fig.5	Histogramme des précipitations saisonnières	18
Fig.6	Variations des températures moyennes mensuelles	19
Fig.7	Diagramme pluviothermique de la station de Maghnia (1990/2019)	20
Fig.8	Indice d'aridité annuelle de DE Martonne	22
Fig.9	Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT)	26
Fig.10	Colonne lithologique du horst de GharRoubane (G. LUCAS, 1942 in.H.MAHBOUBI et D.MIMOUNI, 2014, <i>modifié</i>)	34
Fig.11	Carte géologique de la zone d'étude ; Extraite de la carte hydrogéologique de Tlemcen 1/200000. (ANRH)	35
Fig.12	Situation des forages ; Extraite de la carte hydrogéologique de Tlemcen 1/200000. (ANRH)	41
Fig.13	Coupes litho-stratigraphiques des forages (Bensaoula.F, 2006)	42
Fig.14	Coupe géologique et hydrogéologique synthétique établie à partir des données de forages (Bensaoula.F, Adjim.M, 2006)	42
Fig.15	Position des forages d'eau	45
Fig.16	Diagramme de Schoeller et Berkaloff. (Groupe1)	48
Fig.17	Diagramme de Schoeller et Berkaloff. (Groupe2)	49
Fig.18	Diagramme de Schoeller et Berkaloff. (Groupe3)	50
Fig.19	Diagramme de Piper	52
Fig.20	Diagramme de Stiff	53
Fig.21	Diagramme de Stabler	54
Fig.22	Histogramme des pH	55
Fig.23	Histogramme des conductivités	58
Fig.24	Histogramme des Calciums	58
Fig.25	Histogramme des Magnésiums	59
Fig.26	Histogramme des Potassiums	59
Fig.27	Histogramme des Sodiums	60
Fig.28	Histogramme des Chlorures	60
Fig.29	Histogramme des Sulfates	61
Fig.30	Histogramme des Bicarbonates	61
Fig.31	Histogramme des Nitrates	62
Fig.32	Diagramme de Riverside	66
Fig.33	Diagramme de Wilcox	69
Fig.34	Projection dans l'espace des variables en fonction des facteurs 1 et 2	73
Fig.35	Classification Hiérarchique des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées	74

LISTE DES TABLEAUX :

Tableaux	Titres	Pages
Tableau 1	Caractéristiques de la station	15
Tableau 2	Précipitations moyennes annuelles	16
Tableau 3	Précipitations moyennes mensuelles	17
Tableau 4	Précipitations saisonnières	18
Tableau 5	Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1990-2019)	19
Tableau 6	Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles	20
Tableau 7	Valeurs des indices d'aridité (i) mensuels	22
Tableau 8	Valeurs des indices d'aridité (I) mensuels	23
Tableau 9	Calcul de l'ETR par la méthode de TURC	24
Tableau 10	Valeur du déficit d'écoulement (Coutagne)	25
Tableau 11	Valeurs du déficit et du quotient d'écoulement	25
Tableau 12	Valeurs de l'ETP	26
Tableau 13	Eléments du bilan hydrologique calculés en mm pour la station de Maghnia	27
Tableau 14	Réservoirs et niveaux imperméables	39
Tableau 15	Résultats de la balance ionique des points d'eau de la région d'étude	46
Tableau 16	Faciès chimiques des points d'eau	51
Tableau 17	Relation entre la conductivité et la minéralisation (J. Rodier ,2009)	56
Tableau 18	Conductivités et minéralisations des sources étudiées	57
Tableau 19	Etat qualitatif de l'eau d'après les paramètres physico-chimiques	63
Tableau 20	Classification des eaux selon l'indice de KR	64
Tableau 21	Classification des eaux d'irrigation d'après Servant, 1975 (U.S laboratoire de salinité)	67
Tableau 22	Classification des eaux d'irrigation selon le % Na	68
Tableau 23	Les individus et les variables	71
Tableau 24	Paramètres statistiques des variables	72
Tableau 25	Matrice de corrélation	72
Tableau 26	Pourcentages cumulés des facteurs intervenant dans la minéralisation des eaux de la région d'étude	73

ANNEXES

ANNEXE 1: Précipitations moyennes mensuelles (C°) de la station de Maghnia.

Mois Années	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
1990/1991	40,7	10,9	35,8	52,8	18,9	68,2	107,6	9,5	10,1	1	0,9	1,5
1991/1992	47,5	30,2	14	17	5,9	9,6	96	97,7	68,3	43,3	13	0
1992/1993	0	11	20,3	23,5	5	50,7	30,9	67,2	37,3	0,2	0	0,2
1993/1994	12,5	13,6	55,8	11	59	63,4	5,2	18,8	28,5	0,4	2,4	0,5
1994/1995	12,1	19,5	18,3	18	9,8	66	100,1	13,7	2,1	3,2	0	0,6
1995/1996	22,1	19,8	1,1	40,9	108,6	69,9	44,7	66,8	35,1	107,5	17,1	15,1
1996/1997	30	20,1	0,3	38,3	109,5	5,4	14,7	81,5	15,6	1,8	0,7	36,7
1997/1998	67,4	12,7	62,8	77,9	43,6	39,9	30,1	22	69,9	0	0,3	3
1998/1999	8,6	2,3	39,7	10	58,8	36,8	63	0	0,3	1,3	0,3	0
1999/2000	25,5	17,2	47,1	54	0,5	0	6	0,7	49,1	0,5	0	0
2000/2001	16,2	71,4	50	26	31,5	20,6	9,1	4,1	3,3	0	0	8
2001/2002	15,1	27	173,7	24,7	1,8	3	8,3	60,5	36,8	0,5	0	17,4
2002/2003	0	10,3	68,5	14,3	95,5	66,4	20,2	37,7	20,4	3,5	1,8	1,3
2003/2004	4,6	35	32,8	39,2	29,8	17,7	100,5	20	54,8	2	0,3	4,1
2004/2005	0,3	24,5	15,3	35,2	15,7	51,3	23	11	0	0	0	0
2005/2006	7	12	26	16	52	37	18	19	47	0	13	0
2006/2007	27	21	10	24	7	18	34	87	7	0	0	0
2007/2008	9	35	66	19	31	31	7	6	17	3	0	0
2008/2009	33	89	68	102	94	18	16	18	5	3	1	1
2009/2010	81	6	28	23	80	36	59	64	9	16	1	27
2010/2011	6	60	17	12	13	19	22	38	68	11	0	21
2011/2012	2	50	84	24	12	1	1	0	13	33	1	14
2012/2013	42	24	25	13	37	29	44	16	33	0	0	8
2013/2014	5,3	0	24,4	85,4	41	43,7	31,7	12	15,8	12,7	0	0
2014/2015	29,2	9,6	46,5	71,4	28	33	17,3	11,4	185	6,1	0	9,6
2015/2016	0	17,3	3,3	0	8,9	27,7	36,3	13,7	42,2	8,38	0	0,7
2016/2017	14	3	38,9	39,6	107	29	15	21,1	3,5	0	0	5,3
2017/2018	3	17	25	29	110	25	15	21	7	2	0	5
2018/2019	9	59	24	3	40	27	95	94	21	8	3	4
2019/2020	10,2	74	73,5	39,5	39,5	7	12,7	23	17	1	1,5	4,6

ANNEXE 2: Températures moyennes mensuelles (C°) de la station de Maghnia.

Mois Années	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
1990/91	27.3	19.8	14.9	11	10.6	13.6	14.8	14.9	19.4	23.2	26.3	27.1
1991/92	25.5	17.9	14	11.2	9.7	10.3	13.2	14.3	17.1	22.6	26.7	28
1992/93	23.8	18.1	14.6	11.8	9.5	11.6	12.6	16	18.9	19.7	25.2	27.4
1993/94	21.4	18.1	14.6	11.6	9.5	10.7	14.6	15.8	17.8	21.9	25.4	26.5
1994/95	22.7	20.2	16.3	12.3	10.5	11.7	13.9	14.8	19.7	22.7	28.6	28.4
1995/96	22.1	20.7	17.5	14.7	11.6	13.7	14.2	15.4	20.4	22.1	25.7	26.7
1996/97	21.9	16.2	14.5	13.55	10.1	11.45	13.65	16.9	19.5	22.7	23.6	26.8
1997/98	22.45	19.2	12.55	10.25	11	12.35	13.5	14.15	18.5	23.05	25.6	26.6
1998/99	24.4	18.3	15	11.1	12	13.4	14.4	15.5	17.4	22.9	26.2	27.1
1999/00	23.8	21.3	13.6	11.3	11.7	10.5	13.5	15.7	20.2	23.4	26.1	27.3
2000/01	23.7	18.3	14.7	13.5	9.4	13	14	15.8	19.9	24.1	26.4	26.7
2001/02	23.8	22.3	13.8	11.7	12.5	12.1	16.4	15.9	18.5	24.1	26.2	27
2002/03	23.6	19.4	15.8	14.2	11.2	12.3	15.1	16.7	19.3	23.6	25.6	24.9
2003/04	23	19.2	14.2	10.9	8.5	9.8	14.5	14.7	18.7	25.3	28.2	27.8
2004/05	24.4	21	12.7	10	11.1	12.5	13.1	14.5	15.9	23.8	26.8	28.1
2005/06	22.3	20	13.7	10.5	7.6	7.7	13.2	15	20.7	24.2	27.2	27.1
2006/07	23.7	21.3	16.1	10.5	9.1	10.2	14.3	17.6	21.8	23.5	28.4	26.9
2007/08	23.3	18.8	13.2	10.3	10.7	13.2	12.6	14.3	18.7	22.5	26.6	27.3
2008/09	23.9	19.2	11.8	9.7	11	11.9	13.6	16.6	18.1	23.3	27.2	27.6
2009/10	22.6	20.6	17.2	13.7	10.2	10.5	13.5	14	20.2	24.8	28.5	26.6
2010/11	24.4	18.8	14.2	12.7	12.2	14.1	14.2	16.3	18.6	22.3	28.1	28.1
2011/12	24	19.2	14.5	10.3	10.8	10.3	13.3	17.8	20.2	23.8	27.2	28.1
2012/13	23.9	19.9	15.7	11.4	8.9	7.6	11.8	13.9	20.4	25.4	27	29.3
2013/14	23.5	21.2	12.9	10.5	10.6	10.1	13.7	15.6	17.2	21.1	25.7	26.9
2014/15	24.8	21.3	16.1	10.7	11.5	11.9	12.1	17.5	19.5	23.1	25.9	27
2015/16	0	0	14.6	12.4	9.7	9.9	12.5	17.3	20.8	23.4	28.9	28.5
2016/17	24.1	21.4	14.6	12.2	13.1	12.9	11.9	16.1	19.5	24.1	27.4	27
2017/18	23.5	20.2	14.2	10.9	8.7	13	14.1	16.8	21	26	28	28
2018/19	25.1	18.8	14.5	11.5	10	9.9	13.9	15.6	17.3	21.8	26.9	27.7
2019/20	24.3	19.7	14.1	12.5	10.7	11.3	13.1	15.3	19.4	22.9	27.5	28.3

ANNEXE 3: Températures minimales mensuelles (C°) de la station de Maghnia

Mois Années	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
1990/91	21.2	14.5	9.8	6.7	6.5	7.5	9.4	9.2	14.2	17.1	19.7	20.6
1991/92	19.7	12.9	8.6	6.5	4	5.7	8.9	8.4	10.7	16.1	19.8	20.4
1992/93	17.9	12.5	8	6.2	3.8	5.5	7.5	9.5	12.7	14.1	18.5	20.3
1993/94	15.1	12.4	10.8	6.3	2.6	4.8	8.7	9.6	12.1	16.4	19.1	19.9
1994/95	16.3	15.6	10.8	5.8	5.3	6.2	8.1	7.7	12.5	15.6	21	21.7
1995/96	16	15	11.9	10.2	5.7	7.1	8.8	9.2	14	16.7	19.1	20.6
1996/97	16	9.6	8.2	9.5	6.1	3.7	5.5	12	12.8	15.6	16.7	21.6
1997/98	14.6	12.7	8.7	6.8	4.9	6.5	5.6	7.5	11.8	15.9	17.5	18.6
1998/99	18.8	11.5	9.2	5	6.8	8.3	7.2	9.8	12.2	16	19.3	20.4
1999/00	17.5	16.2	8.5	7.1	6.4	5.5	8.5	8.6	13.7	17.3	19.6	21.4
2000/01	17.8	13.3	9.9	8.5	3.5	5.7	7.4	9.7	14.3	17.6	20.3	20.1
2001/02	18.1	16.2	9.6	6.8	7.8	6.2	10	8.3	12.1	16.9	18.8	21.3
2002/03	17.3	13.4	10.7	8.8	4.8	5.2	8.4	10	12.7	17.6	18.8	19.1
2003/04	15.8	13.9	8.4	5.3	3.2	4.7	8.6	8.4	10.9	16.9	19.9	19.6
2004/05	16.3	13.4	6.3	4.1	4	7.1	6.7	7.1	10	15.8	18.5	19.9
2005/06	14.9	12.4	7.9	4.5	-0.1	1.3	7.5	7.5	12.9	15.5	19.2	18.4
2006/07	16.7	13.9	9.8	5.3	4.3	5	6.7	10.5	15.2	16.3	19.8	19.1
2007/08	17	13.3	6.7	4.5	3	7.7	5.5	9.9	11.7	15.3	18.3	19.4
2008/09	17.6	14.2	6.6	5.2	4.7	5.9	6.7	8.1	12.5	15.3	19.7	19.5
2009/10	17.3	12.9	10.3	7.7	6.6	4.6	7.5	7.2	12.3	16.5	19.8	19.2
2010/11	17.7	12.3	8.1	6.7	7.4	9.1	8.8	10.1	11.8	15.4	20.3	20.4
2011/12	17.1	12.4	9.1	3.5	4.7	3.7	6.8	10.7	14.2	16.1	19.1	20.3
2012/13	16.1	13.5	11.3	4.8	1.7	1.6	5.3	7.4	11.9	17.6	19.3	20.4
2013/14	16.5	13.1	6.4	4.6	5.1	4.3	8.2	9.5	10.1	13	18.2	19.1
2014/15	17.6	13.6	10.6	4.7	6.3	6.4	5.6	9.4	11.9	15.2	17.7	18.5
2015/16	0	0	7.3	4.3	3.2	5.3	4.8	10.2	12.2	15.7	19.7	21.1
2016/17	16.6	14.1	8.7	7.3	6.9	7.3	5.4	9	12.4	15.8	19.5	19.2
2017/18	15.5	12	5.6	5.1	2.6	7.4	6.8	8.6	13.1	18.1	19	20.3
2018/19	18	12.4	8.4	3.7	5.2	4.6	9	9.7	10.5	14.4	18.5	19.1
2019/20	17.2	12.4	9.7	7	2.9	3.1	5.7	8.4	11.8	15	19.8	20.6

ANNEXE 4: Températures maximales mensuelles (C°) de la station de Maghnia.

Mois Années	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
1990/91	33.5	25.5	20.4	15.3	14.6	19.7	20.3	20.5	24.8	29.4	32.9	33.7
1991/92	31.1	23.2	20.1	16.2	15.6	15.2	17.8	20	23.7	29.2	33.7	35.6
1992/93	30	24	21.3	17.6	15.5	18.1	17.7	22.5	25.1	25.4	32.1	34.8
1993/94	27.6	24.2	18.6	17.1	16.7	16.8	20.8	22.1	23.5	27.6	31.9	33.1
1994/95	29	25	22	18.6	15.8	17.2	19.9	22.3	26.8	29.7	36.3	35.1
1995/96	28.8	26.4	23.5	19.6	17.8	20.5	19.6	21.7	26.7	27.7	32.3	33.3
1996/97	27.8	22.8	20.8	17.6	14.1	19.2	21.8	21.8	26.2	29.8	30.5	32
1997/98	30.3	25.7	16.4	13.7	17.1	18.2	21.4	20.8	25.2	30.2	33.7	34
1998/99	30	25	20.9	17.1	17.6	18.7	21.6	21.3	22.8	29.9	33	33.7
1999/00	29.3	26.9	19.2	16.1	17.1	15.6	18.7	22.8	26.9	29.6	32.5	33.3
2000/01	29.7	23.3	19.9	18.8	15.6	20.3	20.9	22.2	25.6	30.6	32.5	33.2
2001/02	29.2	28.6	18.5	16.7	17.6	17.9	23.2	23.7	25.5	31.7	33.9	33.6
2002/03	29.9	25.7	21	19.5	17.6	19.7	21.5	23.6	25.7	29.8	32.4	30.8
2003/04	30.4	24.5	19.9	16.7	14.2	15.3	20.4	21.3	26.3	33.6	36.4	35.6
2004/05	32.6	28.6	19.1	15.9	18.5	18.7	19.3	21.9	22.6	31.4	35.4	36.3
2005/06	29.8	27.9	19.5	16.4	14.6	14.3	18.8	22.4	28.5	32.8	35.1	35.9
2006/07	30.8	28.6	22.4	15.7	13.9	15.5	21.9	24.7	28	30.7	36.9	34.7
2007/08	30.1	24.4	19.8	16.2	18.4	18.7	19.8	18.7	25.7	29.6	35	35.1
2008/09	30.1	24.1	17.1	14.1	17.2	18	20.6	25.1	23.7	31.4	34.7	35.9
2009/10	27.9	28.3	24.2	19.8	13.8	16.4	19.4	20.9	28.2	33.2	37.2	34
2010/11	31	25.3	20.2	18.9	16.9	19.1	19.5	22.4	25.5	29.4	35.9	35.7
2011/12	30.9	25.9	20.1	16.9	16.9	17	19.8	25	26.3	31.6	35.2	35.8
2012/13	31.6	26.3	20	18	16.1	13.8	18.3	20.4	28.6	33.3	34.7	38.1
2013/14	30.5	29.2	19.4	16.3	16.3	15.9	19.3	21.6	24.3	29.23	33.3	34.8
2014/15	32	29	21.6	16.8	16.7	17.5	18.5	25.6	27	30.9	34.1	35.4
2015/16	0	0	21.9	20.5	16.2	14.6	20.2	24.4	29.4	31.1	38.1	35.7
2016/17	31.5	28.7	20.4	17	19.3	18.4	18.8	23	26.7	32.4	35.3	34.8
2017/18	31.5	28.4	22.1	15	14.5	18.7	21.6	24.9	29	33.9	37	35.7
2018/19	31.4	24.7	19.7	19	14.4	15.2	18.3	21.2	24.1	29.3	35	36.1
2019/20	31.5	27	18.5	17.9	16	18.4	20.2	22.1	26.7	30.7	35.2	36

ANNEXE 5 : Position des points d'eau du champ capté.

		Coordonnées UTM (m)		
Site	Ouvrages	X	Y	Z
Zouia	F1	607 180	3 833 284	640
	F2	606 889	3 832 710	647
	F3	607 696	3 834 176	617
	F4	606 712	3 832 473	648
	F5	608 252	3 834 667	599
Med Salah	F6	613 566	3 840 316	564
Zouia	F7	608 679	3 835 590	579
	F8	608 871	3 834 341	617
	F9	609 361	3 833 086	690
	F10	613 138	3 836 834	628
	F11	613 680	3 836 497	626
Med Salah	F12	613 288	3 839 083	574
	F13	613 350	3 837 997	589
	F14	612 412	3 838 004	605
	F15	612 654	3 839 288	597
	F16	611 974	3 838 468	603
Zouia	F17	610 137	3 835 011	612
Nakhela	F18	611 395	3 836 129	637
	F19	610 156	3 836 361	618
	F20	612 148	3 836 602	638

ANNEXE 6 : Concentrations des éléments chimiques en méq/L.

Points d'eau	HCO₃⁻	Cl⁻	NO₃⁻	SO₄⁻	Ca⁺⁺	Mg⁺⁺	Na⁺	K⁺
F1	3,88	1,86	0,16	5,68	6,39	3,46	1,78	0,05
F2	2,80	5,90	0,11	38,31	32,14	6,26	9,91	0,31
F3	3,33	12,61	0,18	16,41	9,53	8,48	14,22	0,41
F4	4,72	1,55	0,11	5,37	3,34	5,27	2,09	0,05
F5	6,11	1,81	0,08	4,33	3,84	5,10	2,61	0,13
F6	4,26	2,57	0,10	3,19	2,94	3,70	3,52	0,13
F7	3,92	2,17	0,08	3,33	3,34	3,79	2,61	0,10
F8	4,11	1,92	0,06	2,58	3,19	3,05	2,61	0,08
F9	5,77	1,81	0,06	4,96	2,74	6,34	2,78	0,10
F10	4,26	2,31	0,06	1,89	2,74	2,96	2,78	0,10
F11	3,56	6,06	0,06	3,50	6,54	3,62	2,70	0,10
F12	4,26	2,14	0,06	2,39	2,50	3,87	2,52	0,10
F13	4,26	2,14	0,06	3,16	3,14	3,87	2,70	0,10
F14	3,56	2,65	0,06	3,35	4,14	2,39	2,61	0,08
F15	4,10	1,97	0,10	2,77	2,10	4,44	2,52	0,10
F16	4,38	2,26	0,10	1,89	3,04	2,88	2,78	0,10
F17	3,57	1,52	0,08	2,02	2,99	2,14	2,22	0,08
F18	4,26	2,34	0,06	2,64	5,79	0,99	3,00	0,13
F19	4,26	2,14	0,05	2,62	1,35	4,77	2,91	0,10
F20	4,47	2,28	0,06	2,29	1,65	4,03	3,00	0,10

ANNEXE 7 : Normes algériennes de potabilités.

paramètres	Paramètres	Les normes algériennes		
		Unités	N.G	C.M.A
Physiques	pH	/	6,5 – 9	/
	Conductivité	μS/cm 20°C	/	2800
	T°	°C	/	25
Chimiques	Ca ²⁺	mg/L	75	200
	Mg ²⁺	mg/L	/	150
	K ⁺	mg/L	/	20
	Na ⁺	mg/L	/	200
	SO ₄ ²⁻	mg/L	200	400
	Cl ⁻	mg/L	200	500
	NO ₃ ⁻	mg/L	/	50
	HCO ₃ ⁻	mg/L	/	/

Source: JORA, 2011/2014.

C.M.A : Concentration Maximale Admissible.
N.G : Niveau Guide.

Contribution à l'étude hydrogéochimique des eaux souterraines de la zone frontalière sud-ouest de Maghnia (Nord-Ouest algérien).

Résumé

Notre modeste étude a pour objectif l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines captées par un certain nombre de forages de l'Algérienne Des Eaux (ADE) dans la commune frontalière de Béni-Boussaïd.

Cette étude a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines et de déterminer les facteurs naturels et anthropiques qui influent sur cette qualité. Le diagramme de Schoeller-Berkaloff montre que les faciès hydro- chimiques des eaux souterraines sont : Sulfaté calcique à sodique, Sulfaté magnésien, Bicarbonaté magnésien à calcique, Chloruré calcique. Le diagramme de Piper a classé les eaux de la région de Béni-Boussaïd selon deux grandes familles : Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne et Bicarbonatée calcique et magnésienne.

Du point de vue de la potabilité, 90% des forages sont conformes aux normes algériennes de potabilité. Les 10% restant sont caractérisés par des teneurs élevées en Sodium, Calcium et Sulfate qui dépassent les normes. Concernant l'irrigation, la plupart des points d'eaux sont convenables, à l'exception de quelques forages. Selon le calcul des indices (Kr et %Na⁺) et les diagrammes de Riverside et de Wilcox, la plupart des classes sont bonnes à médiocres pour l'irrigation.

Enfin, l'utilisation des deux méthodes statistiques (ACP, CAH) et outils d'interprétation (diagrammes) a montré que :

- Les faciès sont fortement liés à la nature lithologique de l'aquifère.
- La présence de ces faciès chimiques témoigne de l'hétérogénéité de la lithologie de l'aquifère.

Mots clés : Béni-Boussaïd, eaux souterraines, qualité, Diagrammes, statistique, ACP, CAH.

Contribution to the hydro- geochemical study of groundwater in the south-west border area of Maghnia (north-west Algeria).

Abstract

Our modest study aims to assess the physio-chemical quality of the groundwater captured by a number of boreholes from the algerian waters , in the border town of Beni-Boussaïd.

This study was carried out in order to characterize the quality of groundwater and to determine the natural and anthropogenic factors which influence this quality. The Schoeller-Berkaloff diagram shows that the hydro-chemical facies of groundwater are: Calcium to sodium sulphate, Magnesium sulphate, Magnesium to calcium bicarbonate, Calcium chloride. The Piper diagram classified the waters of the Beni-Boussaïd region according to two main families: Chloride and sulphate of calcium and magnesium, and Bicarbonate of calcium and magnesium.

From the point of view of potability, 90% of the boreholes comply with algerian standards for drinking water. The remaining 10% are characterized by high levels of Sodium, Calcium and Sulphate which exceed the standards.

Regarding irrigation, most of the water points are suitable, except for a few boreholes. According to the calculation of the indices (Kr and %Na⁺) and the Riverside and Wilcox diagram, most of the classes are good to mediocre for irrigation.

Finally, the use of two statistical methods (PCA, CAH) and interpretation tools (diagrams) showed that:

- The facies are strongly linked to the lithological nature of the aquifer.
- The presence of these chemical facies testifies to the heterogeneity of the lithology of the aquifer.

Keywords: Beni-Boussaïd, Groundwater, Quality, Diagrams, Statistics, PCA, CAH.

مساهمة في الدراسة الهيدروجيوكيميائية للمياه الجوفية في المنطقة الحدودية جنوب غرب مغنية (شمال غرب الجزائر).

نبذة مختصرة

تهدف دراستنا المتواضعة إلى تقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية التي تم استغلالها بواسطة عدد من الآبار من الجزائرية للمياه ، في مدينة بني بوسعيد الحدودية.

أجريت هذه الدراسة لتقييم نوعية المياه الجوفية وتحديد العوامل الطبيعية والبشرية التي تؤثر على هذه النوعية. يوضح مخطط Schoeller-Berkaloff أن السمات المائية الكيميائية للمياه الجوفية هي : الكالسيوم إلى كبريتات الصوديوم، كبريتات المغنيسيوم، المغنيسيوم إلى كبرونات الكالسيوم، كلوريد الكالسيوم. صنف مخطط باير مياه منطقة بني بوسعيد حسب عائلتين رئيسيتين : كلوريد وكبريتات الكالسيوم والمغنيسيا وكبرونات الكالسيوم والمغنيسيا. من وجهة نظر قابلية الشرب، 90% من الآبار تتوافق مع المعايير الجزائرية لمياه الشرب. أما نسبة الـ 10% المتبقية فتتميز بمستويات عالية من الصوديوم والكالسيوم والكبريتات تتجاوز المعايير.

فيما يتعلق بالري، فإن معظم نقاط المياه مناسبة، باستثناء عدد قليل من الآبار. وفقاً لحساب المؤشرات Kr و %Na⁺ ومخطط ريفرسايد و ويلكوكس، فإن معظم الفصول جيدة إلى المتوسط بالنسبة للري.

أخيراً، أظهر استخدام طريقتين إحصائيتين (PCA, CAH) وأدوات التفسير (الرسوم البيانية) ما يلي:

- * ترتبط السحنات ارتباطاً وثيقاً بالطبيعة الصخرية لطبقة المياه الجوفية.
- * يشهد وجود هذه النواحي الكيميائية على عدم تجانس الصخر في الخزان الجوفي.

الكلمات المفتاحية: بني بوسعيد، المياه الجوفية، الجودة، الرسوم البيانية، الإحصاء، PCA، CAH .