



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE ABBES LAGHROUR – KHENCHELA

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

DEPARTEMENT : Ecologie & Environnement

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

FILIERE : Ecologie et Environnement

OPTION : Ecologie et Environnement

Thème

**L'usage de l'hydrochimie et des isotopes stables de la
molécule d'eau, ^2H et ^{18}O , a la caractérisation de
l'aquifères des Aurès**

Présenté par :

- Latreche Meriem
- Malkia Sabrina

Encadré par :

Dr. Houha Belgacem

Soutenu le : 14 Juin 2015

Jury de soutenance :

-Président : Ziouch Omar Ramzi

MCB . Univ. Khenchela

-Examinateur : Boulabeiz Mahrez

MAA. Univ. Khenchela

Promotion : Juin 2015

Laboratoire a été réalisé : Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (LHA).

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mon père :

Mr Latreche Tahar en signe de reconnaissance de l'immense bien que vous avez fait pour moi concernant mon éducation qui aboutit aujourd'hui à la réalisation de cette étude. Recevez à travers ce travail, toute ma gratitude et mes profonds sentiments. Que Dieu le tout puissant soit à vos côtés et vous accorde une meilleure santé.

A ma mère :

Mme Latreche Ouarda pour m'avoir donnée la vie et la joie de vivre.

Ta bonne éducation, tes conseils et tes bénédictions n'ont jamais fait défaut, que Dieu le tout puissant t'accorde son paradis éternel.

- ❖ *A mes frères. Malek, Mourad et Djamel, Lazher.*
- ❖ *A Mes sœurs : Karima, Hayat, Alima, Samira et Nadia, Pour votre soutien et encouragements, vous occupez une place particulière dans mon cœur. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux, plein de bonheur et de succès.*
- ❖ *A mes belles sœurs.*
- ❖ *A mes beaux-frères.*
- ❖ *A tous les membres de ma famille, grands et petits.*
- ❖ *A mes nièces : Wided, Marwa, Soumia, Serine, Chahd, Layane, Loujayne et Lina.*
- ❖ *A mes neveux : Amine, Wail, Anwar, Youssef, Iyad et Islam.*
- ❖ *A mes chers amis : Louza, Zahra, Darine, Rahma, Aida, Asma, Hadjer.*
- ❖ *A toute la famille Latreche.*

A tous les étudiants de ma promotion pour leur sympathie et leur soutien durant les années d'étude, à qui je souhaite beaucoup de succès.

- ❖ *A tous ceux qui me sont chers.*

LATRECHE MERIEM

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mon père :

Mrs Malkia Lazher qui ma indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes.

A ma mère :

Mme Malkia Fatima qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation.

- *A mes sœurs : pour votre soutient et encouragements, vous occupez une place particulière dans mon cœur.*
- *A mes frères*
- *A mon beau frère*
- *A mes tantes et oncles*

A toute la famille Malkia.

A tous mes amies :

Vous qui êtes toujours là pour aider, cette dédicace est là pour remercier votre patience et pour m'avoir aidé, chaque jour à avancer.

MALKIA SABRINA

Remerciements

Tout d'abord je remercie infiniment le bon Dieu puissant de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il me donnée tout le long de mon étude.

*Je présente mes sincères remerciements avec mes profonds respects à mon encadreur Mr Le Docteur **Houha Belgacem** ; Directeur de mémoire qui a accepté de diriger ce travail, j'exprime ici toute ma gratitude pour ses conseils, ses remarques et le temps qu'il m'a consacré.*

Je tiens exprimer mes plus vifs remerciements à mes Mrs Ziouche Omar Ramzi et Mrs Boulabeiz Mahrez qui a bien voulu accepter la présidence de ce jury de thèse.

La recherche est un travail de groupe. De ce fait, je ne saurais jamais oublier de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce mémoire, en particulier :

- *Je remercie Mmes Rima. Kabeche et Mounia. Weljawi qui m'ont aidé à la réalisation de la cartographie de mon travail de recherche.*
- *Je tiens à remercier Mme Leila. L pour son aide durant cette l'année universitaire.*

Je remercie infiniment mes amis les plus proches pour le soutien et les encouragements et les conseils.

- *Je remercie ma collègue Farida Dekhouche pour ces encouragements et son aide.*
- *Je remercie Mrs Hichem Chenaker pour sa documentation*

Un grand merci, empreint d'une infinie reconnaissance, pour toutes celles et ceux qui, De près ou de loin, ont participé à l'achèvement de ce formidable et grand parcours « mon Mémoire ».

Enfin, je termine par ces mots, d'une citation, qui s'imposent à nous comme une vérité Incontournable : « Cherchons comme cherchent ceux qui doivent trouver, et trouvons Comme trouvent ceux qui doivent chercher encore, car il est écrit : « celui qui arrive au but Ne fait que commencer. » Paul Valéry.

MERIEM ET SABRINA

Résumé

De nos jours, l'environnement est menacé par la salinité des eaux et des sols, qui se présentent comme une forme de pollution naturelle accentuées beaucoup plus par l'activité anthropiques, à savoir l'utilisation des engrais chimiques, l'irrigation et l'infiltration des eaux usées.

L'aquifère principal est contenu dans le remplissage Mio-Plio-quaternaire en système de nappes multicouches superficielles et profondes. L'approche hydrochimique a mis en évidence un faciès mixte; à savoir, bicarbonaté calcique dans les affleurements qui a évolué vers des eaux chlorurées sodiques. L'analyse statistique multivariée a pu définir l'origine de la salinité des eaux par dissolution des roches évaporitiques, gypsifères et salifères ainsi que, à la pollution des eaux.

Enfin l'apport des isotopes stables de la molécule d'eau, deutérium et oxygène¹⁸, ont mis en évidence l'origine météorique de la recharge.

Les mots clés : L'hydrochimie, l'origine de la salinité des eaux, les isotopes stables, l'origine météorique de la recharge.

Abstract

Nowdays the environment is threatened by the salinity of the water and the soil, which presents itself as a form of natural pollution much more accentuated by anthropogenic activity, namely the use of chemical fertilizers, irrigation and sewage infiltration.

The main aquifer is contained in the Mio-Pliocene-Quaternary filling multilayer system of superficial and deep layers. The hydrochemical approach revealed a mixed facies; namely, calcium bicarbonate in outcrops that evolved into the chlorinated sodic waters. Multivariate statistical analysis was able to identify the origin of the salinity of the water by dissolution of evaporite rocks gypsiferous and licks as well as water pollution.

Finally the contribution of stable isotopes of the water molecule, deuterium and ^{18}O Oxygen, have highlighted the meteoric recharge origin.

Key words

The hydrochemical, the origin of the salinity of the water; the stable isotopes, the meteoric recharge origin.

الملخص

البيئة مهددة اليوم من قبل ملوحة المياه والتربة، والتي تمثل شكل من أشكال التلوث الطبيعي و تكون أكثر حدة من طرف النشاط البشري، وهي استخدام الأسمدة الكيميائية والري و تسرب مياه الصرف

طبقة المياه الجوفية الرئيسية في نظام تعبئة العصر الحديث-الرباعي من متعددة الطبقات السطحية والطبقات العميقة. و النهج الهيدروكيميائي يبرز سحنة كيميائية مختلطة، وهي بركونات الكالسيوم في النتوءات التي تطورت في المياه الصودية المكثورة. كان التحليل الإحصائي متعدد المتغيرات قادر على تحديد منشأ ملوحة المياه من خلال حل الصخور المتبخرة، الجبسية والصخور الحاملة للملح فضلا عن تلوث المياه.

أخيرا مساهمة النظائر المستقرة لجزيء الماء، الديوتيريوم و الأوكسجين 18، أبرزت تعبئة التغذية نيزكي.

الكلمات المفتاحية

النهج الهيدروكيميائي ، تحديد منشأ ملوحة المياه , النظائر المستقرة , تعبئة التغذية نيزكي,

Table des matières :

Introduction générale	01
Chapitre -I- Cadre Géologique	
I.1. Présentation de la wilaya de Khenchela	02
I.1.1 Situation géographique	02
I.1.2. Cadre administratif	02
I.1.3. Le milieu physique	02
I.2. géologie générale	03
I.2.1. Litho- stratigraphie	04
• I.2.1.1. Trias	05
• I.2.1.2. Crétacé inférieur	05
• I.2.1.3. Albo- Aptien	05
• I.2.1.4. Albien	06
• I.2.1.5. Le Miocène	06
• I.2.1.6. Quaternaire	06
I.3. Conclusion	07
Chapitre -II- : cadre hydroclimatologie	
II.1. Introduction	08
II.2. Analyse des données climatiques	08
II.2.1. Répartition mensuelle des précipitations	08
II.2.2. Présentation et analyse des températures	09
II.2.3. Relation précipitations-températures	10
II.3. Indice de De. Martonne	11
II.4. Evapotranspiration	11
II.4.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)	11
II.4.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)	13
a) Méthode de Turc	14
b) Méthode de Thornthwaite	14
II.5. Conclusion	15
Chapitre -III- : Hydrochimie	
III.1. Introduction	16
III.2. Interprétation des résultats	17
III.2.1. Evolution spatiale des paramètres physico-chimiques	17

Table des matières

III.2.1.1. Les paramètres physiques	17
a) La température	17
b) Le pH	18
c) La conductivité électrique	20
III.2.1.2. Les paramètres chimiques	21
III.2.1.2.1. Les cations	21
a) Le calcium	21
b) IV.3.1.2. Le magnésium	22
c) IV.3.1.3. Le Sodium	23
III.2.1.2.2. Les anions	24
a) Les chlorures	24
b) Les Sulfates	25
c) Les Bicarbonates	26
III.3. Identification de l'origine de la minéralisation des eaux	26
III.3.1. Relation Conductivités électriques-chlorures	27
III.3.2. Relation $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$	27
III.3.3. Relation $\text{Ca}^{++} - \text{Cl}^-$	28
III.3.4. Relation $\text{SO}_4^{--} - \text{Cl}^-$	29
III.3.5. Relation $\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$	30
III.4. Représentation graphique des résultats	30
III.4.1. Diagramme de Piper	30
III.4.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff	32
III.5. Analyse statistique des données	35
III.5.1. Introduction	35
III.5.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)	35
III.5.3. Matrice de corrélation	35
III.6. Analyse de l'espace des variables	36
III.7. Analyse de l'espace des individus	37
III.8. Conclusion	39
Chapitre -IV- : Géochimie isotopique	
IV.1. Historique	40
IV.2. Que ce qu'un isotope	40
IV.3. hydrologie isotopique : Isotope stable et isotope radioactif	41
IV.4. Isotopes de la molécule d'eau	41

Table des matières

IV.4.1. Exemples de proportions isotopiques terrestres	42
IV.4.2. Mise en évidence expérimentale de l'effet isotopique	42
IV.4.3. Outils de mesure des valeurs isotopiques	43
IV.4.4. Oxygène-18 et deutérium, les isotopes stables de la molécule d'eau	43
IV.5. Composition isotopique des molécules d'eau	44
IV.6. Unités de mesure	44
IV.7. La notation delta pour mille	45
IV.8. Standards	45
IV.9. Fractionnement isotopique	46
IV.10. Ligne isotopique météorique	47
IV.11. Effet de température	48
IV.12. Effet d'altitude	49
IV.13. Effet de quantité	49
IV.14. Effet de continentalité	50
IV.15. Effet paléoclimatique	50
IV.16. Les isotopes stables utilisés	50
IV.17. Relation ^{18}O vs ^2H	50
IV.18. Conclusion	52
Conclusion générale	53
Références bibliographiques	
Annexe	
Résumé	
Abstract	
المخلص	

Liste des Cartes

Cartes	Pages
Carte 01 : Carte géologique et schéma structural de Khenchela	04
Carte 02 : Coupe géologique des affleurements des Aurès dans la région de Khenchela	07
Carte 03 : Carte géologique et d'inventaire des points de prélèvements	17
Carte 04 : Carte de la température	18
Carte 05 : Carte du PH	19
Carte 06 : Carte de la conductivité électrique	20
Carte 07 : Carte de calcium	21
Carte 08 : Carte de magnésium	22
Carte 09 : Carte de sodium	23
Carte 10 : Carte de chlorure	24
Carte 11 : Carte de sulfates	25
Carte 12 : Carte de bicarbonates	26

Liste des figures

Liste des figures

Figure	Pages
Figure 01: Histogramme de variation des précipitations moyennes mensuelles de la Station d'ElHamma (2004-2014).....	09
Figure 02: Diagramme des Variation moyenne de la température mensuelle de la station d'ElHamma (2004-2014).....	10
Figure 03 : Diagramme Ombrothérmiq ue de la station d'ElHamma (2004-2014).....	10
Figure 04 : Relations ions-chlorures.....	27
Figure 05 : Relation $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$	28
Figure 06 : Relation $\text{Ca}^{++} - \text{Cl}^-$	29
Figure 07 : Relation $\text{SO}_4^{--} - \text{Cl}^-$	29
Figure 08 : Relation $\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$	30
Figure 09 : Diagramme de Piper.....	31
Figure 10 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des forages.....	32
Figure 11 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des forages.....	33
Figure 12 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des sources.....	34
Figure 13 : Espace des variables de l'ACP.....	37
Figure 14 : Espace des individus.....	38
Figure 15 : Effet des isotopes lourds et légers dans un glaçon.....	42
Figure 16: Spectromètre de masse pour les mesures isotopiques : Le système en vogue : l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometer).....	43
Figure 17 : Relation $\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ vs $\delta^2\text{H} \text{ ‰}$ dans les eaux naturelles (Fontes, 1976).....	44
Figure 18 : phénomène du fractionnement isotopique.....	47
Figure 19 : Diagramme $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ pour les cinq points d'eau dans le bassin des Aurès.....	51

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau	pages
Tableau 1 : La station climatique de ElHamma –Khenchela.....	08
Tableau 2 : Pluviométrie mensuelle enregistré à la station d’ElHamma (2004-2014).....	09
Tableau 3 : Température enregistrée à la station d’ElHamma (2004-2014).....	09
Tableau 4 : Le calcul de l’ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d’ElHamma (2004-2014).....	13
Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les variables.....	36
Tableau 6 : Les principaux isotopes du milieu utilisés en hydrologie isotopique.....	42

Liste des Abréviations

- **A** : Indice d'aridité.
- **CEA** : Centre de l'énergie atomique.
- **DA** : Déficit agricole.
- **ETP** : Evapotranspiration Potentielle.
- **ETR** : Evapotranspiration Réelle.
- **E_x** : Excédant.
- **I** : Infiltration.
- **Km** : kilomètre.
- **LHA** : laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon.
- **M** : masse atomique.
- **m** : mètre.
- **mm** : millimètre.
- **n** : neutron.
- **P** : Précipitation.
- **P** : proton.
- **R** : Ruissellement.
- **RFU** : Réserve Facilement Utilisable.
- **SMOW**: Standard MeanOcean Water.
- **Z**: numéro atomique.

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale.

Le présent mémoire se situe dans le cadre de l'investigation et de l'identification des processus et des mécanismes qui régissent l'alimentation, la circulation et la minéralisation des eaux souterraines du massif des Aurès. Il s'appuie sur la synthèse des caractéristiques géologiques, hydroclimatologique, hydrogéochimiques et isotopiques. Par ailleurs, il apporte une contribution à la caractérisation de l'origine de la recharge des eaux et à la connaissance de l'origine de la minéralisation de l'aquifère des Aurès, fortement fracturé à cause du contexte structural.

Approche méthodologique

Le mémoire est composé de quatre chapitres. La méthodologie utilisée dans le développement de ce mémoire consiste au couplage des approches hydrogéochimiques et isotopiques associé à l'analyse statistique variée afin de :

- Définir les grands structures géologique et structurales de l'aquifère souterrain des Aurès et de délimiter les zones d'émergences;
- Définir et expliquer l'hydrochimie des eaux souterraines, à savoir : la minéralisation, le faciès chimiques des eaux et l'origine de la salinité;
- Définir l'origine de l'alimentation des eaux grâce à l'apport de la géochimie isotopique par couplage du deutérium en fonction de l'oxygène 18 (^2H vs ^{18}O).

I.1. Présentation de la wilaya de Khenchela.**I.1.1 Situation géographique**

La région de Khenchela est située au Nord de l'Algérie, au Sud-est du constantinois ; et au contrefort du mont des Aurès entre 34° 06' 36'' et 35° 41' 21'' latitudes Nord ; et entre 06° 34' 12'' et 07° 35' 56 '' de longitudes Est. Sa superficie est de 9715,6 km². Elle est limitée géographiquement au :

- Nord : par la Wilaya d'Oum El Bouaghi
- Sud : par la wilaya d'El Oued
- Est : par la wilaya de Tébessa
- Ouest : par la wilaya de Batna
- Sud- Ouest : par la wilaya de Biskra.

De par, sa position géographique ; la wilaya de Khenchela qui non seulement est limitée ; par cinq (05) Wilayats ; dont les liens demeurent très étroits dans tous les domaines de l'activité économique et sociale ; elle constitue également ; un trait d'union ; non moins appréciable entre le Nord/ Est et le Sud du pays. Elle se trouve ainsi, située aux portes des grandes villes du sud, et non éloignée des villes métropoles du nord. [1]

I.1.2. Cadre administratif.

La Wilaya de Khenchela est issue de la refonte territoriale de 1984. Elle était rattachée entre 1977 et 1984 à trois Wilayats différentes :

- Oum El Bouaghi pour l'EX Daïra de Khenchela.
- Tébessa pour la Daïra de Chechar.
- Batna pour la Daïra de Kais.

Sur le plan administratif et structurel, la wilaya de Khenchela, regroupe 21 communes, rattachées administrativement à 8 daïras (dont 05 Daïras créent en 1990). [1]

I.1.3. Le milieu physique

- le relief

Le relief de la wilaya de Khenchela, est composé de quatre (04) grands ensembles géographiques.

- Les montagnes

On les rencontre essentiellement dans la zone Ouest de la wilaya (les Aurès) ; dans la zone centrale (les monts des Nememchas) et au Nord - Est (Ain -Touila)

- Les plateaux

Ils sont situés au Nord /Est (plateau de O.Rechache) et s'étendent sur les communes de Mahmel et de Ouled Rechache.

- Les plaines

Situées au Nord et Nord /Ouest de la wilaya, elles comprennent Remila, Bouhmama et M'toussa. Il est à noter que ces deux derniers ensembles sont parfois appelés les hautes plaines.

- les parcours steppiques et les dépressions

Ils sont situés dans la partie méridionale de la wilaya. Ils se caractérisent par des terres sablonneuses et par la présence de chotts. Ces derniers constituent ainsi le point de convergence exutoire des oueds drainant le Sud de la wilaya. [1]

I.2. Géologie générale.

La région de Khenchela est caractérisée par trois (03) zones naturelles qui peuvent être distinguées comme suit :

- Au Nord : c'est le bassin miocène de Timgad et de Douffana. C'est une zone plate, steppique qui correspond à la bordure méridionale de la grande dépression de Garat El Taref.

- les parties occidentales et centrales constituent la terminaison périclinale Nord/Est de la chaîne des Aurès, région caractérisée par les Diapirs triasiques.

- La zone méridionale au Sud constitue les monts des Nememchas, et plus au Sud, c'est la zone plate qui correspond à la bordure septentrionale du pays des chotts.

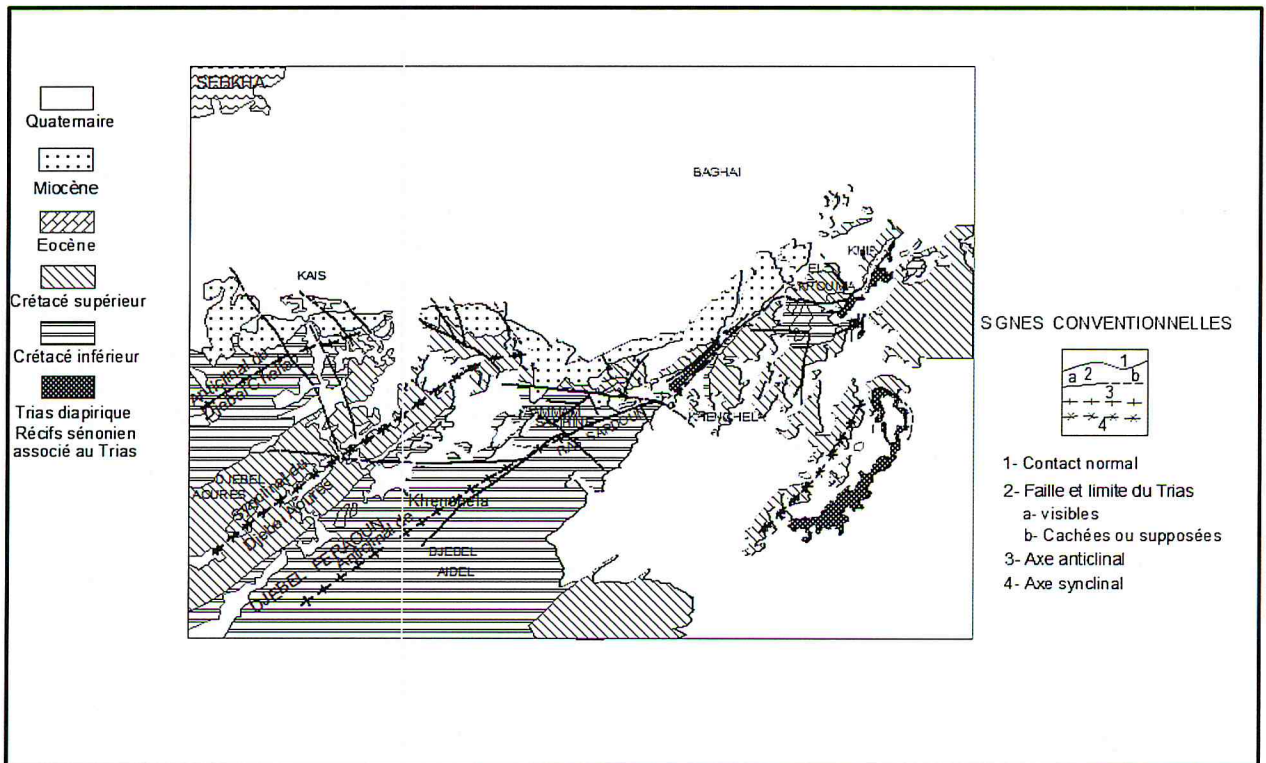
Du point de vue tectonique, le territoire de la Wilaya de Khenchela est situé au Nord de la flexure sud atlasique. Les reliefs montagneux sont très accidentés par des failles. On rencontre deux principales familles :

- La première correspond aux plus grande failles de direction Est/Ouest à Nord-est/ Sud-ouest.
- La seconde celle des plus petites et dont la direction est de Nord-Ouest/Sud –Est.

Ces deux types de failles sont verticaux.

Il est à noter que les Diapirs ou dômes triasiques, qui se rencontrent dans la partie orientale, empruntent généralement les zones de failles et de faible résistance pour remonter à la surface du sol et affleurer.

Du point de vue lithologie et pétrographie, on rencontre des calcaires, des marnes, des argiles, dugypse, des sables, des grès et des conglomérats. [1]



Carte 01 : carte géologique et schéma structural de Khenchela (Vila, 1977) [2]

I.2.1. Litho- stratigraphie

D'après l'inventaire stratigraphique dressé par plusieurs géologues et en particulier par R.Laffite, les terrains les plus anciens sont attribués au Trias et les plus récents au quaternaire. [2]

I.2.1.1. Trias

Dans les régions qui entourent la dépression de Remila, les affleurements triasiques sont assez nombreux et très localisés à proximité de Khenchela (figure 02), où il isole le Miocène du Crétacé, suivant une bande de 4 à 5 km de long et de 300 à 400 m de large et, sur Djebels El Kourma et Kniffe en contact anormal avec l'albien, le Cénomaniens et le Sénonien.

La série triasique comportait probablement à l'origine, de la base vers le sommet : une formation évaporitique épaisse, en particulier sous la forme d'amalgames intensément replissés, représentent les indices les plus sûrs de la présence du Trias (figure 02). Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux.

Les argiles et marnes bariolées, de couleur verdâtre, rougeâtre à violacée, constituent les roches les plus abondantes à l'affleurement. [2]

I.2.1.2. Crétacé inférieur

Dans le vaste massif de l'Aurès, le Crétacé inférieur constitue l'essentiel des reliefs les plus élevés : Djebel Chelia et Djebel El-Aide.

On notera dans l'Aurès le développement important des dépôts gréseux aux dépens des dépôts carbonatés. [2]

I.2.1.3. Albo- Aptien

Dans le sud-ouest du massif de l'Aurès, l'Aptien est représenté par un faciès continental net (Figure 02): grès à dragées, marnes rouges, montant jusque dans l'Aptien. Lorsque l'on se déplace vers le Nord-Ouest, les couches passent à des quartzites sans fossiles à la base (Barrémien) et à des marnes fossilifères (Aptien inférieur) au sommet. Dans le Nord, ces quartzites sans fossiles présentent, surtout à la base de l'étage, des intercalations de calcaires marins (Djebel Aidel et Bou Arif), l'épaisseur de l'étage varie de 400 m environ (Sud) à 250 m (Nord). [2]

I.2.1.4. Albien

L'Albien débute dans l'Aurès (figure 02), selon la description de R. Laffitte, par des alternances de grès et de marnes atteignant le plus souvent 150 à 200 m d'épaisseur.

Puis les calcaires, assez rares jusque-là, tendent à se substituer aux grès, sur une cinquantaine de mètres environ. Au-dessus de ces assises viennent des alternances de calcaires et de marnes (40 m environ) [2]

I.2.1.5. Le Miocène

Le Néogène est assez bien conservé au Nord de l'Aurès dans un bassin qui s'étend approximativement de Batna à Khenchela (figure 02)

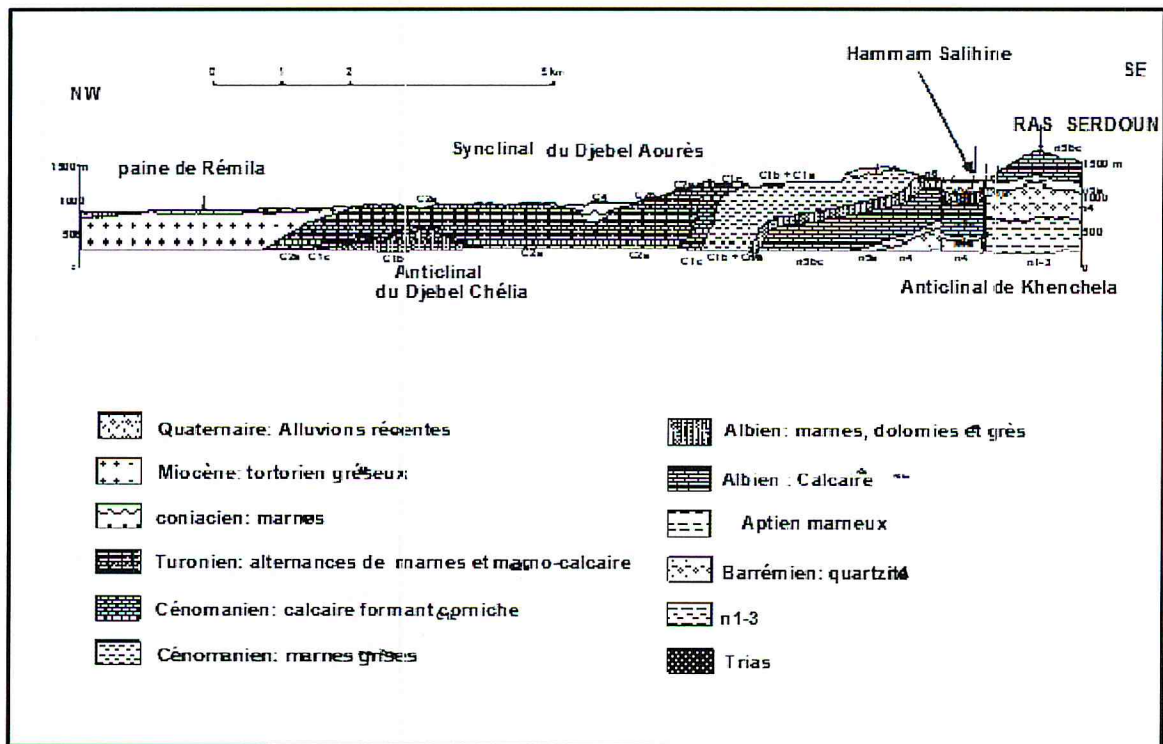
Reposant en discordance sur le Crétacé inférieur on observe généralement à la base de la série des conglomérats et calcaires à Algues, dont la puissance dépasse rarement une vingtaine de mètres. Au-dessus viennent des alternances de marnes gréseuses gris-brun et de grès calcareux qui, d'après R. Laffitte (1939), peuvent se poursuivre aux environs 250 m entre Lambèse et Timgad et 300 m entre Khenchela et Kais sur la bordure Sud du bassin de Remila, où elles sont surmontées par 150 m de marnes gréseuses grises. La série comporte ensuite des marnes argileuses rouges gypseuses continentales qui sont discordante sur le Crétacé (300 à 400 m) admettant encore à leur base quelques récurrences grises ou vertes. [2]

I.2.1.6. Quaternaire

Le Quaternaire ne comporte, dans le bassin de Remila, que des formations continentales généralement épaisses par endroits, souvent en présence de croûtes calcaires.

Les piémonts sont ici généralement modelés en glacis à couverture détritique peu épaisse, dont le plus visible est situé au sud de Baghai et Kais, à matériel grossier. Lorsqu'on s'éloigne du piémont l'épaisseur des couvertures de glacis diminue rapidement. Les formations anciennes sont constituées par des alternances de conglomérats, de gravier et de sables surmontés par des sédiments fins sables et argiles rouge du Pontien au sommet desquels apparaît une croûte calcaire blanche

Des alluvions récentes constituent la plaine de Remila ainsi que les bas-fonds des principales vallées provenant des reliefs environnants. [2]



Carte 02 : coupe géologique des affleurements des Aurès dans la région de Khenchela [2]

I.3. Conclusion.

Les formations prédominantes sont celle du Quaternaire au sommet, avec une épaisseur assez limitée en largeur et illimitée et non prospectées en profondeur à défaut de logs stratigraphiques des forages et des sondages électriques profonds. Le secondaire et le tertiaire sont représentés par les grès Miocène au sommet d'une longueur de 25 à 30 km qui reposent en discordance sur le Crétacé est inférieur avec des calcaires de l'Albo-Aptien. Cet ensemble est traversé par le Trias qui a formé des aréoles de contact sur une longueur de 13 km qui se prolonge depuis Hammam Jaarir à l'ouest, Hammam Essalihine au centre vers hammam Elknif à l'Est.

Chapitre II : Hydroclimatologie

II.1. Introduction.

La climatologie constitue un facteur important pour la connaissance du devenir des précipitations et la gestion des aquifères. Elle repose sur l'interprétation des paramètres climatiques relevés sur plusieurs décennies, permettant ainsi, d'estimer les différentes composantes du bilan hydrique, ce dernier est nécessaire pour comprendre le fonctionnement d'un système hydraulique de surface, impliquant la connaissance des paramètres suivants : (les précipitations, la température, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement), qui conditionnent ce bilan.

La connaissance des caractéristiques climatiques de la région étudiée est indispensable aussi, pour évaluer l'alimentation des réserves souterraines que pour leur renouvellement.

L'étude de ces paramètres est basée sur les données d'une décennie, 2004-2014, mesurées à la station pluviométrique d'El Hamma. [3]

II.2. Analyse des données climatiques.

En raison de l'absence des stations météorologiques dans la zone d'étude, on a choisi la station la plus proche du site celle d'ElHamma (Tableau 01)

Tableau 01 : La station climatique de ElHamma –Khenchela.

Dénomination	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période d'observation
ElHamma	35°-28°N	07°-05°E	987.40	2004-2014

[Source station climatologique d'ElHamma]

II.2.1. Répartition mensuelle et interannuelle des précipitations.

Les données pluviométriques (tableau 02), montrent que la moyenne interannuelle est environ de 509mm avec une pluviométrie mensuelle moyenne de 466 mm. Le mois le plus pluvieux est Mai avec une moyenne mensuelle de 75 mm, tandis que le mois le plus sec étant Juillet avec 19 mm, cependant, l'amplitude des précipitations est de 56 mm, elle serait attribuée à la nature du relief imposant des Aurès, qui serait une source d'hétérogénéité des mesures par effet orogénique.

Tableau 02 : Pluviométrie mensuelle enregistré à la station d’ElHamma (2004-2014).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
P (mm)	64	37	33	48	43	33	43	53	75	29	19	32

[Source station climatologique d’ElHamma]

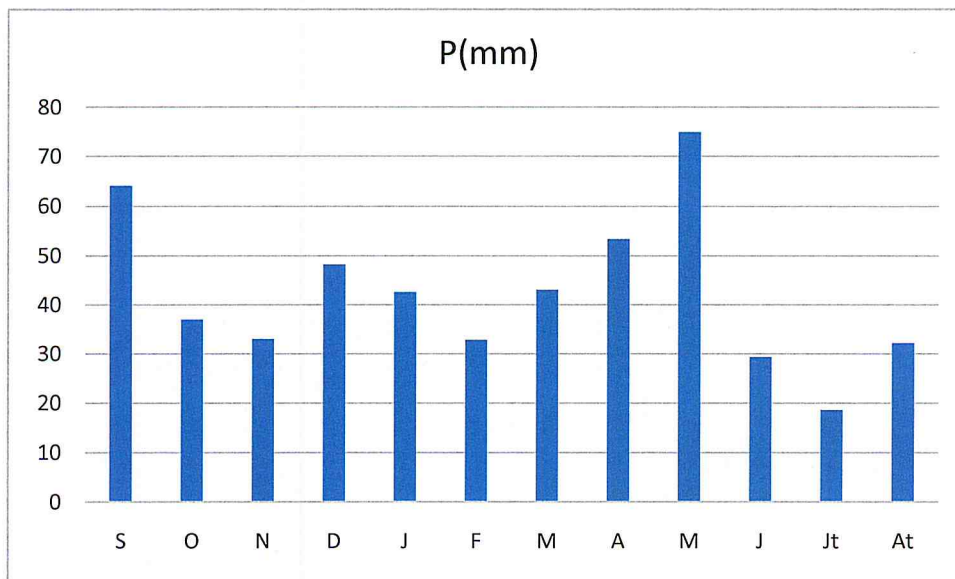


Figure 01 : Histogramme de variation des précipitations moyennes mensuelles de la Station d’ElHamma (2004-2014).

II.2.2.Présentation et analyse des températures.

L’examen des valeurs (tableau 03) montre que le mois le plus froids est Janvier avec 6°C, tandis que le mois le plus chaud est Juillet avec 27°C, et une température moyenne de l’ordre de 16°.L’amplitude de température est de 21°C traduisant ainsi une variabilité spatiale des valeurs, notamment que la région est exposée au conflit des courants, chaud et sec du Sahara au sud et froid et humide de la méditerranée au nord.

Tableau 03 : Température enregistrée à la station d’ElHamma (2004-2014).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
T (°C)	21	16	11	7	6	7	10	14	18	23	27	26

[Source station climatologique d’ElHamma]

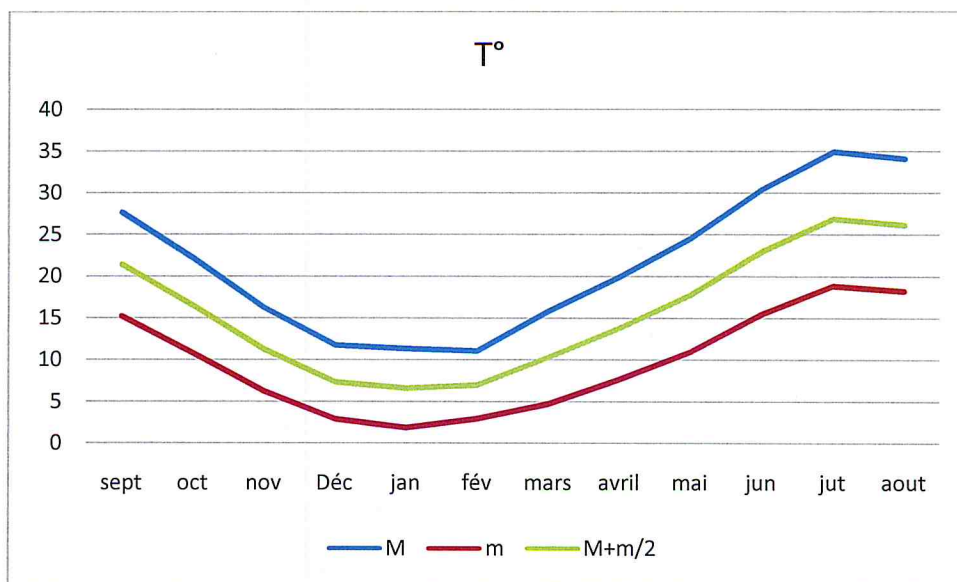


Figure 02 : Diagramme des Variation moyenne de la température mensuelle de la station d'ElHamma (2004-2014).

II.2.3. Relation précipitations-températures.

Le diagramme Ombrothermique est établi selon la méthode de Gaussen et Bagnouls et où les précipitations sont rapportées à l'échelle double des températures.

Cela permet de déterminer la période sèche, durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations des mois est inférieure ou égale au double de la température ($P \leq 2T$).

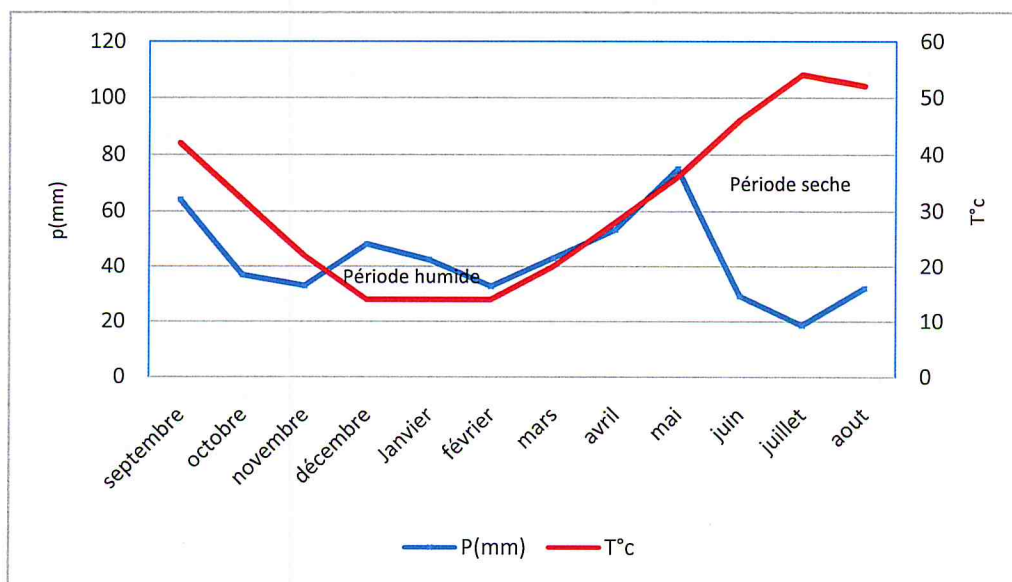


Figure 03 : Diagramme Ombrothermique de la station d'ElHamma (2004-2014).

II.3. Indice de De. Martonne.

Le géographe De. Martonne a défini l'indice de l'aridité (A) en se basant sur les températures et les précipitations selon la formule suivante : $A=P/(T +10)$ avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : températures moyennes mensuelles (°C)

De. Martonne a proposé la classification suivante :

- $A < 5$: climat hyper-aride
- $5 < A < 7.5$: climat désertique
- $7.5 < A < 10$: climat steppique
- $10 < A < 20$: climat semi-aride
- $20 < A < 30$: climat tempéré [3]

D'après les classifications précédentes, notre zone d'étude a un climat semi-aride ($A=19,57$).

II.4. Evapotranspiration.

C'est la restitution de l'eau à l'atmosphère à partir d'une surface quel que soit sa nature : sol, végétation, surface d'eau libre, neige ou glace, par transformation de l'eau en vapeur, ce processus est le résultat de deux phénomènes :

- ◇ l'évaporation (E) : s'effectue à partir des surfaces évaporantes, surface d'eau libre et des sols humides.
- ◇ la transpiration (T) ou évaporation physiologique : est l'évaporation biologique des plantes. [3]

II.4.1. Evapotranspiration potentielle (ETP).

Elle représente la température d'un couvert végétal en pleine croissance, alimentée en eau continuellement. Cette grandeur correspond donc à un concept théorique et représente les possibilités maximales d'évaporation dans les conditions climatiques données.

Pour le calcul de ce paramètre .Thornthwaite a proposé la formule :

$ETP=16[10T/I]^a K$ (mm), Où :

ETP : l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle corrigée (mm).

T : température moyenne mensuelle en C°.

I : l'indice annuel de chaleur. ($i=\sum_{i=1}^{12}$).

i : l'indice mensuel de chaleur. ($i=()$ ^{1.514}).

a : l'exposant climatique ($a= 0.016I+0.5$).

K : facteur de correction fonction de la durée d'ensoleillement. [3]

Tableau 04 : Le calcul de l'ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d'El Hamma (2004-2014).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	total
T°c	21	16	11	7	7	7	10	14	18	23	27	26	
I	9	6	3	2	2	2	3	5	7	10	13	12	74
K	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
ETP (mm)	99	60	28	14	12	13	29	50	85	131	173	156	850
P mm	64	37	33	48	43	33	43	53	75	29	19	32	509
BH (mm)	-35	-23	5	34	31	20	14	3	-10	-102	-155	-124	-342
RFU (mm)	0	0	5	39	70	90	100	100	90	0	0	0	
ETR (mm)	64	37	28	14	12	13	29	50	85	29	19	32	502
DA (mm)	35	23	0	0	0	0	0	0	0	102	154	124	438
EXC (mm)	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	0	0	11

II.4.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la quantité d'eau évaporée par le sol et la végétation, elle tient compte de la lame d'eau de la surface évaporante. Celle-ci est inférieure ou égale à l'ETP qui correspond à une restitution hydrique maximale à l'atmosphère.

Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes, parmi lesquelles nous pouvons citer :

a) Méthode de Turc

Elle est valable pour tous types du climat, elle en fonction de la précipitation et de la température. $ETR = P / [0.9 + (P^2/L^2)]^{1/2}$

Où :

ETR : l'évapotranspiration réelle en (mm) ;

P : la précipitation annuelle en (mm) ;

L : un paramètre calculé en fonction de la température selon la formule :

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

T : température moyenne annuelle en C°.

$$P = 509 \text{ mm}, T = 16 \text{ C}^\circ, L = 890.96.$$

On a donc un ETR de 454.71 mm, [3]

b) Méthode de Thornthwaite

Pour établir le bilan hydrique, il faut d'abord calculer la RFU qui est la réserve facilement utilisable. Cette RFU est nécessaire pour le bon fonctionnement physiologique des plantes.

Nous admettons une RFU saturée à 100 mm d'eau comme préconisé par Thornthwaite :

$$RFU = 100 \text{ mm}$$

A partir des données des pluies mensuelles et l'ETP, calculés par la formule de Thornthwaite, plusieurs cas peuvent être envisagés :

Si : $P > ETP$, $ETR = ETP$, $RFU = (P - ETP) + RFU$ du mois précédent, il y'aura de l'excédent de l'eau ($EX = P - ETR$) ;

Si : $P=ETP$, les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU , $RFU=0$;

Si : $P<ETP$, $ETR= P+RFU$ il y aura épuisement des réserves, dans ce cas, on aura un déficit du bilan

($DA=ETP-ETR$).

Si on examine l'évolution de l'ETP à l'échelle mensuelle, on constate l'existence de deux saisons bien distincte : l'une pendant laquelle les précipitations sont supérieures à l'ETP (Novembre-Avril) et la seconde, on a l'inverse (Mai-Octobre).

Pendant la saison froide, le bilan hydrique est positif où les précipitations couvrent les besoins de l'ETP et permettent la formation d'une réserve facilement utilisable RFU.

Dès le mois de Mai, il apparait un déficit agricole avec un maximum en moi de Juillet (169.1mm) qui montre une période sèche et qui se poursuit jusqu'à l'épuisement de la RFU.

L'ETR est égale à 502mm. (Tableau 04). [3]

II.5. Conclusion

-Le climat de Khenchela est de type semi-aride avec un hiver froid et un été chaud et sec.

-La pluviométrie interannuelle moyenne est de 509 mm, et mensuelle moyenne est de 466 mm, la température moyenne de l'aire est de 16°C, l'évapotranspiration (ETP) calculée selon la méthode de Thornthwaite est de 850 mm, l'ETR est de 502 mm et un déficit agricole de 438 mm.

Chapitre III : Hydrochimie

III.1. Introduction.

Toute étude hydrogéologique doit être complétée par une étude chimique qui permet de connaître :

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

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

L'échantillonnage a été effectué sur 8 sources et 15 forages dans la région d'étude. Les analyses chimiques et isotopiques ont été effectuées au laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (LHA).

Les paramètres physico-chimiques sont mesurés in situ à l'aide d'un multi paramètre de type (Consort C900), il s'agit de la température, du pH et de la conductivité électrique.

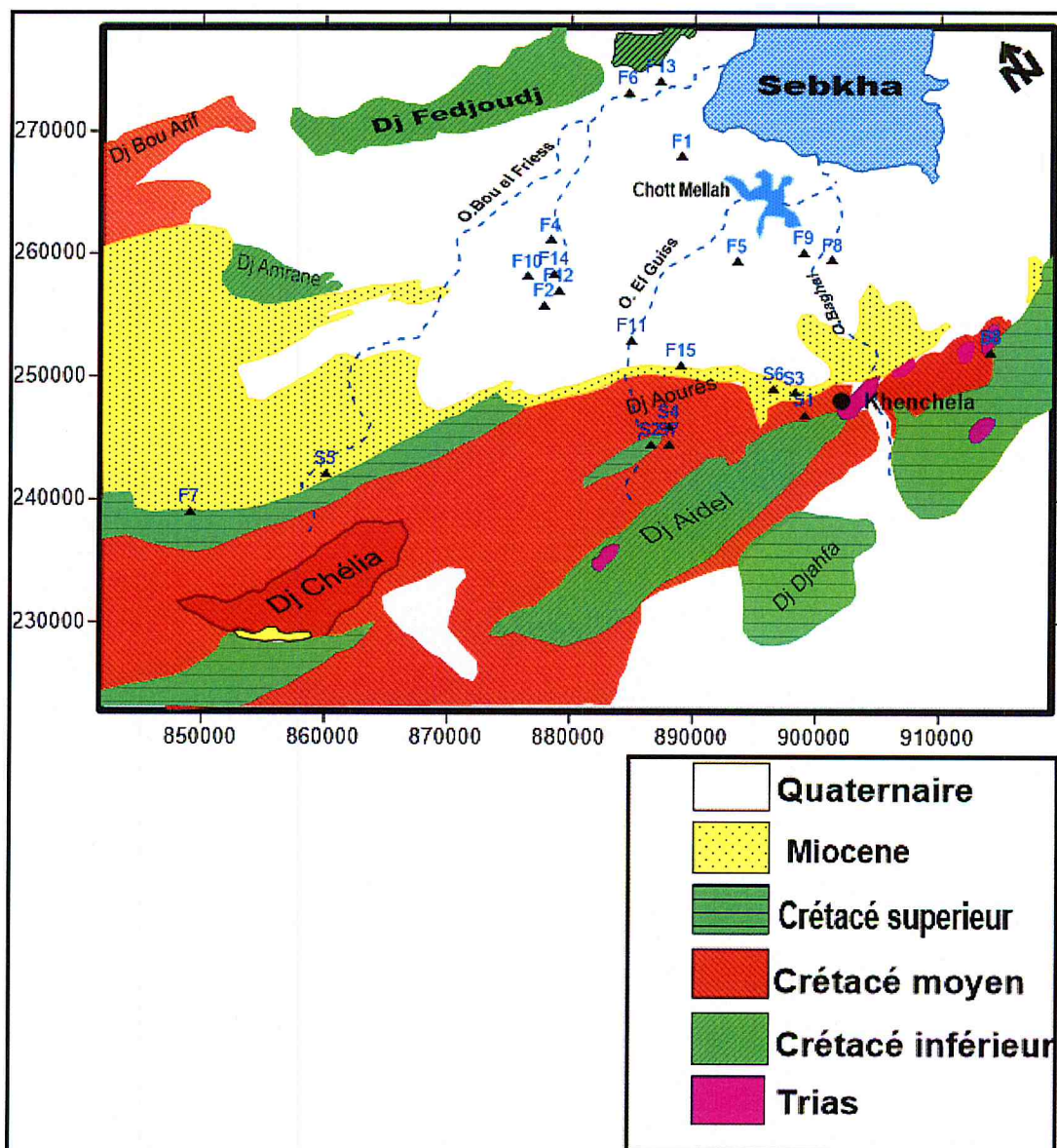
-Les éléments chimiques majeurs sont mesurés par chromatographie et spectrométrie à absorption atomique, il s'agit en l'occurrence des cations et anions de la molécule d'eau :

- ✓ Les cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ .
- ✓ Les anions: HCO_3^- , SO_4^- , Cl^- , NO_3^-

La fiabilité des analyses chimiques a été contrôlée à l'aide de la balance ionique (BI) exprimée

par la formule de la manière suivante :
$$BI = \frac{\sum \text{anions} - \sum \text{cations}}{\sum \text{anions} + \sum \text{cations}} \times 100\%$$

Les analyses pour lesquelles la balance ionique est supérieure à 10% seront éliminées lors de l'interprétation [4].



Carte 03 : Carte géologique et d'inventaire des points de prélèvements

III.2. Interprétation des résultats.

III.2.1. Evolution spatiale des paramètres physico-chimiques.

III.2.1.1. Les paramètres physiques

a) La température.

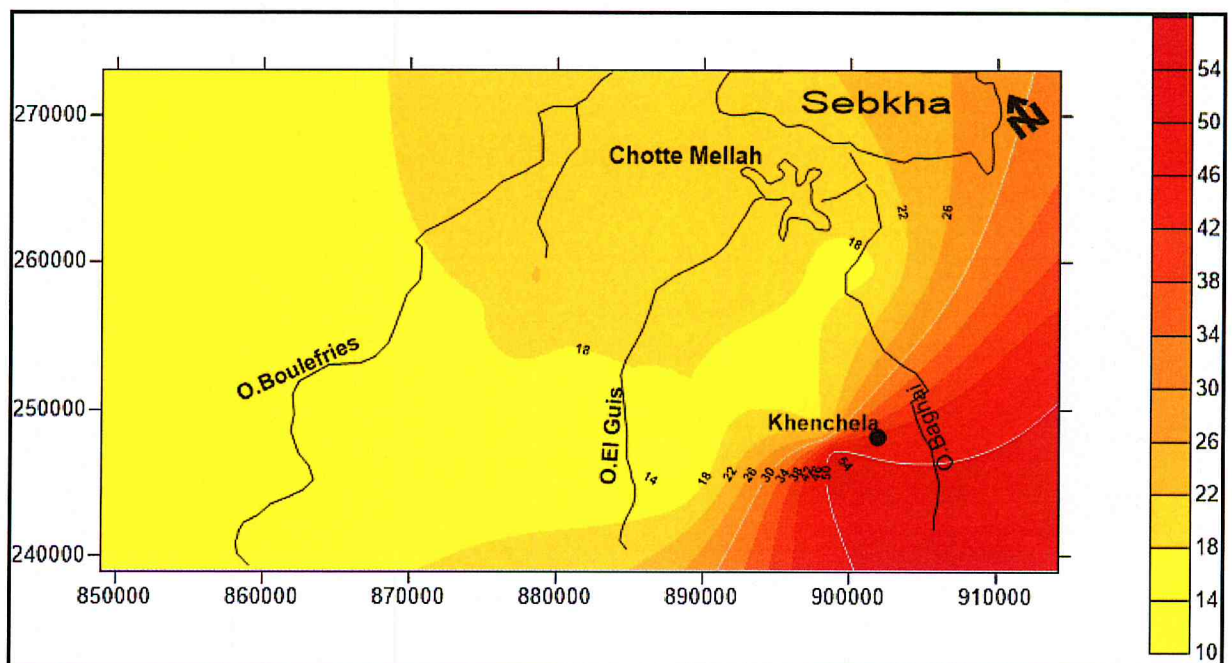
La température joue un rôle important dans la solubilité et la dissolution des sels et des gaz, sur la conductibilité électrique et dans la détermination du pH.

La température permet parfois d'obtenir des indications sur l'origine de l'écoulement de l'eau.

Les normes de potabilités des eaux souterraines fixées par l'OMS (1994), déterminent les critères suivants :

- Excellente lorsque la température varie entre 20 et 22°C (eaux souterraines) ;
- De 9 à 15°C., valeurs admissibles pour les eaux de surface

Les températures mesurées sur les eaux des forages varient de 17°C à 49°C. Celles des eaux de sources oscillent entre 11°C à 18°C et de 55°C pour la source thermale.



Carte 04 : Carte de la température

Nous constatons que les fortes températures sont mesurées au sud du bassin sur les affleurements carbonatés dans les sources thermales et les forages très profonds, les faibles températures sont mesurées dans les eaux souterraines peu profondes qui sont situées au nord du bassin et dans les zones d'émergences. En dehors des eaux thermales, la température des eaux souterraines est sensiblement en équilibre avec la température de l'air qui est en moyenne de 16°C.

b) Le pH.

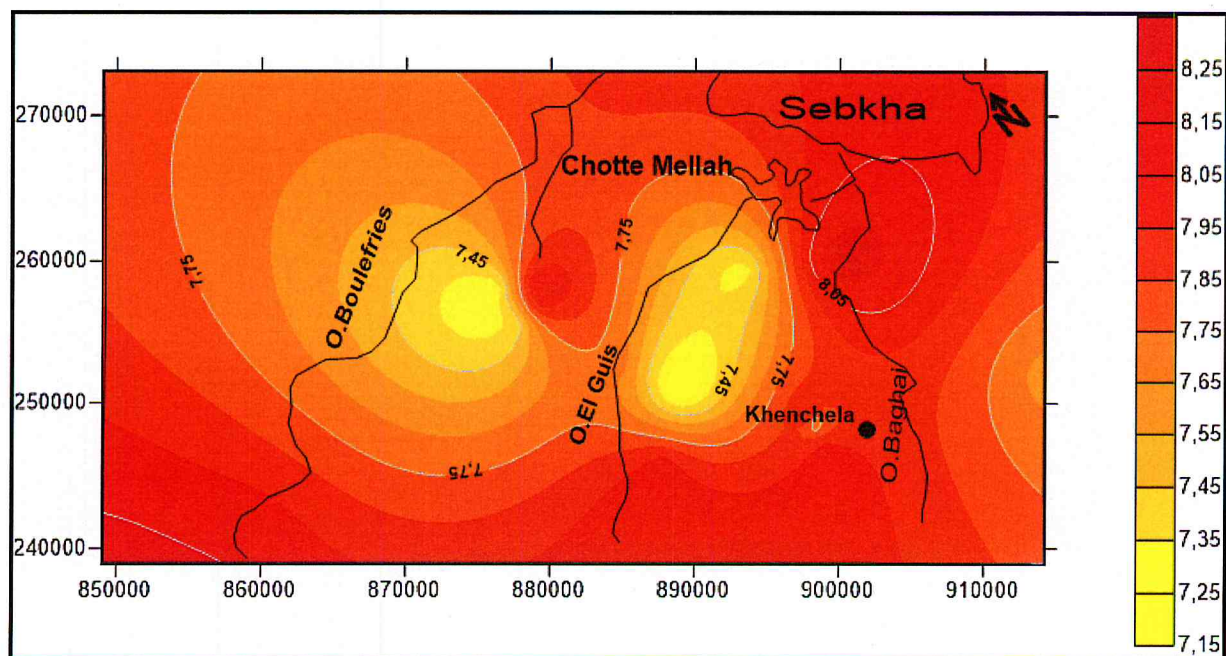
Il mesure l'activité des ions H^+ dans une solution, c'est-à-dire l'alcalinité ou l'acidité d'une eau.

Par définition le pH est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration H^+ :

$$pH = -\log [H^+].$$

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

En général, la modification du pH dans l'eau est liée à la perte du gaz carbonique. Il convient aussi de signaler que la valeur du pH est fonction de la matière organique dissoute ou colloïdale dans l'eau. Le pH mesuré sur tous les points de captage varie de 7.12 à 8.2 pour les forages, et de 7.6 à 8 pour les sources.



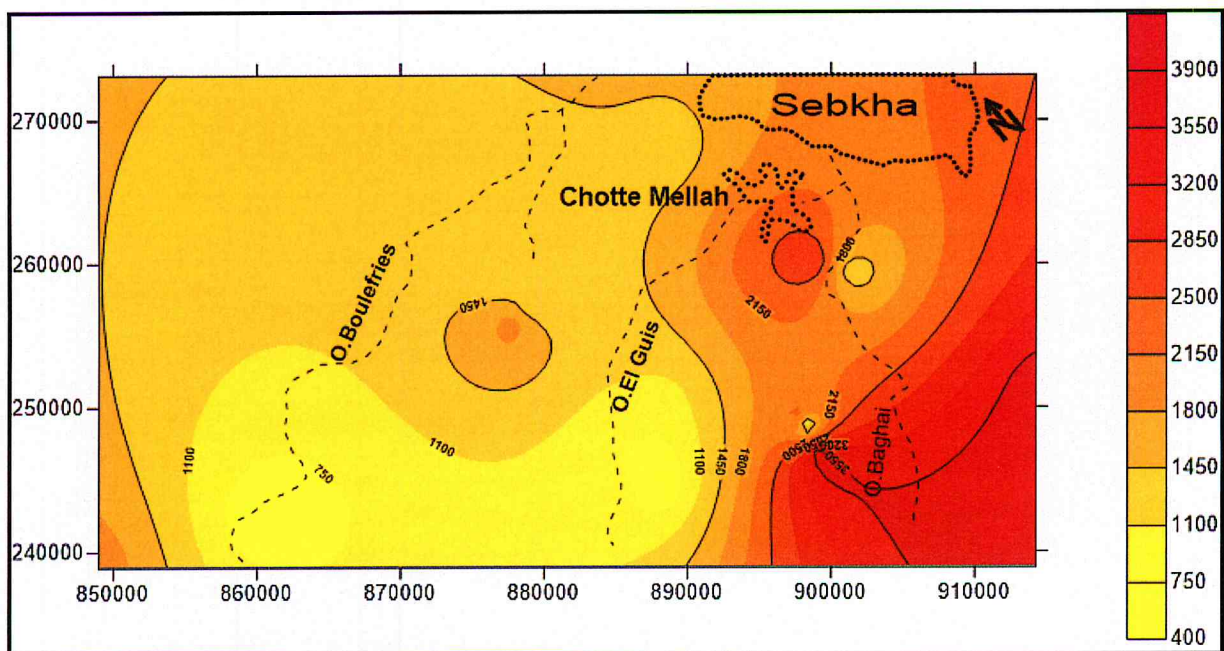
Carte 05 : Carte du pH

Il est plus facile de remarquer que toutes les eaux sont à pH basique

c) La conductivité électrique.

La conductivité électrique est la conductance d'une colonne d'eau de 1 cm^2 de surface séparées l'une de l'autre de 1 cm. C'est une mesure indirecte de la minéralisation des eaux. [4]

L'observation de la carte de variation spatiale de la conductivité électrique montre que les valeurs les plus faibles, inférieures à $1000 \mu\text{s}/\text{cm}$ sont mesurées dans les zones d'émergences (eaux de sources), dans les affleurements calcaires. Les fortes valeurs de conductivité, supérieures à $1000 \mu\text{s}/\text{cm}$ sont mesurées au sud-est du bassin dans les eaux thermales et dans quelques forages profonds. Il s'avère ainsi, que les eaux circulant dans le remplissage Mio-Plio-quaternaire sont minéralisées à forte minéralisation, alors que les eaux circulant dans les circuits carbonatés fracturés sont diluées.



Carte 06 : Carte de la conductivité électrique

Il semblerait que les fortes valeurs de conductivité électrique soient influencées par les terrains triasiques salifères riches en sels, tels que : NaCl , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4 , KCl , Mg_2SO_4 et SiO_2 .

III.2.1.2. Les paramètres chimiques.

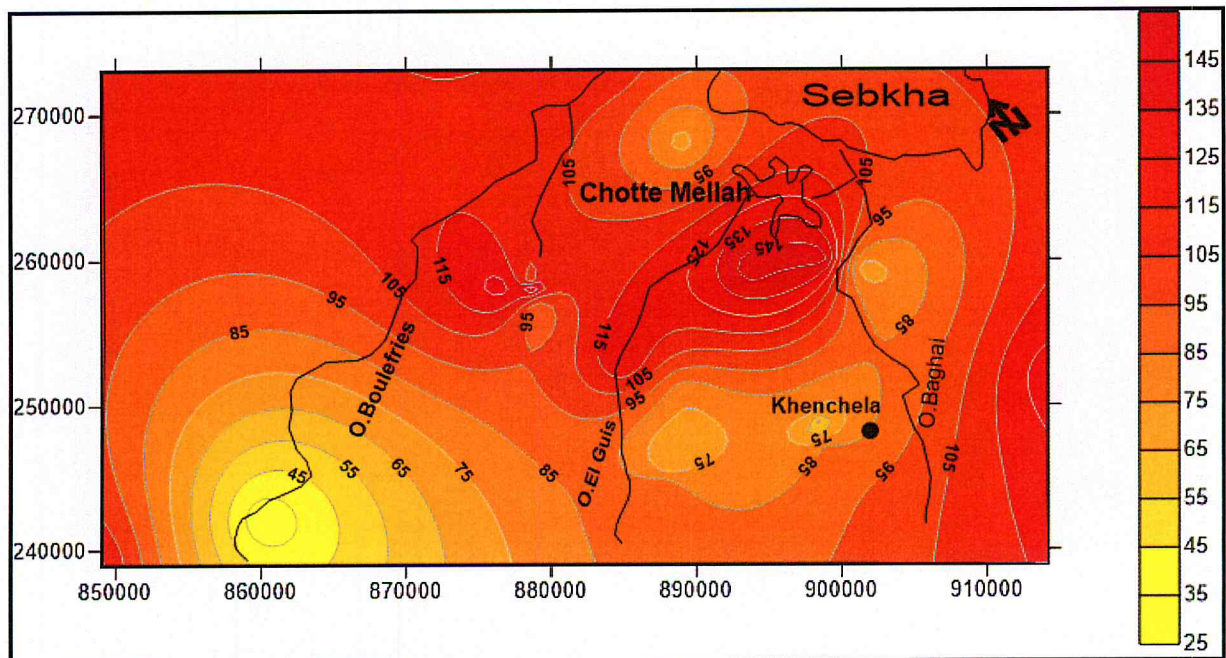
III.2.1.2.1. Les cations.

a) Le calcium.

C'est un élément de la dureté totale. Son origine naturelle provient essentiellement de l'attaque des formations carbonatées par le gaz carbonique. Les ions Ca^{2+} proviennent de la dissolution de la calcite (CaCO_3) et du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). [4]

Les eaux des forages ont des concentrations en Ca^{+2} qui varient de 70(F1) à 152 mg/l(F14). Les sources montrent une valeur minimale de 26mg/l et une valeur maximale de 132mg/l.

La variation spatiale des valeurs de calcium montre qu'au sud du bassin le calcium présente des teneurs faibles (inférieures à 85 mg /l) par contre sur le reste du bassin, les fortes concentrations dépassent les 100 mg/l. Notons que le calcium présente une moyenne de 100 mg/l et que ces valeurs restent dans les normes de potabilité.



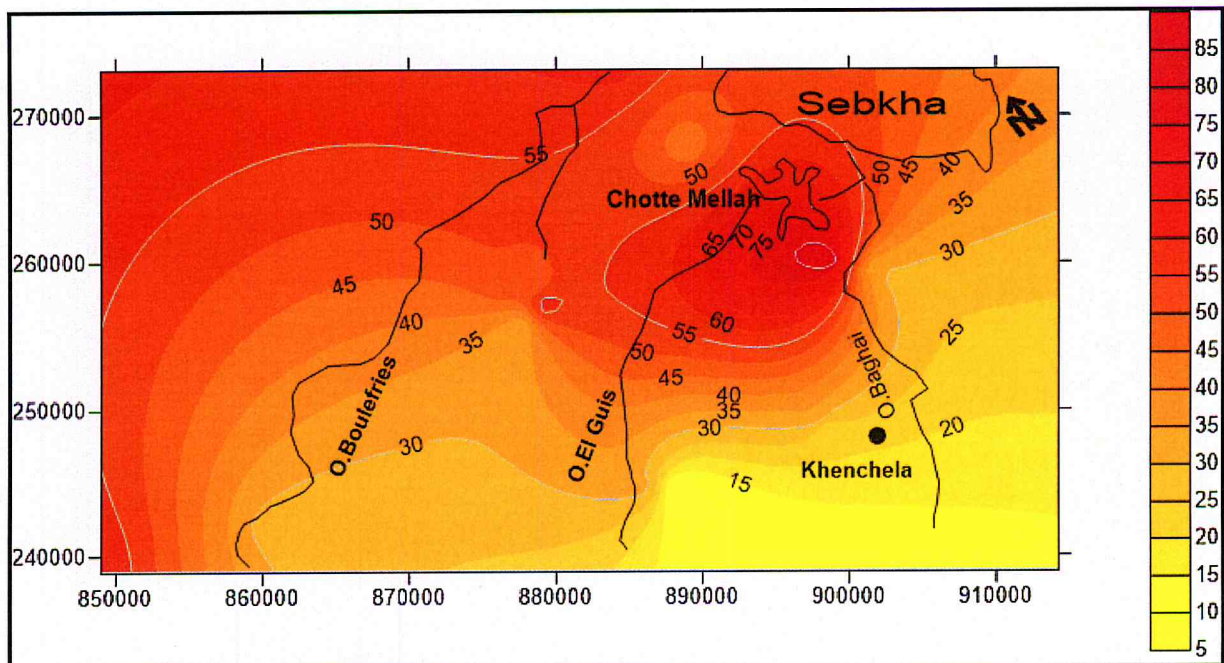
Carte 07 : Carte du calcium.

b) Le magnésium.

C'est aussi, un élément de la dureté totale, La mise en solution de cet ion prend beaucoup de temps, c'est un marqueur de temps. Il provient de la dissolution des calcaires dolomitique ($MgCO_3$), de la magnésite ($CaMg, 2H_2O$) et du Mg_2SO_4 dans les terrains gypseux entraînant le magnésium et aussi des minéraux ferromagnésiens. [4]

Les valeurs de magnésium dosées au niveau des forages varient entre 22 (F3) et 85 mg/l (F9). Les eaux des sources montrent des valeurs qui varient de 5 à 32 mg/l.

Sur la carte de magnésium, nous constatons que les teneurs les plus faibles sont localisées au sud et à l'est du bassin. Le magnésium est retenu par adsorption par la capacité d'échange cationique, entre les alcalins et les alcalino-terreux, par contre les concentrations les plus fortes sont mesurées au nord avec une valeur moyenne de 41 mg/l. ; Il semblerait que ces fortes valeurs sont attribuées à la dissolution de la dolomie et des calcaires dolomitique contenus dans les formations carbonatées de Djebel Aidel et Dj. Lourasse.



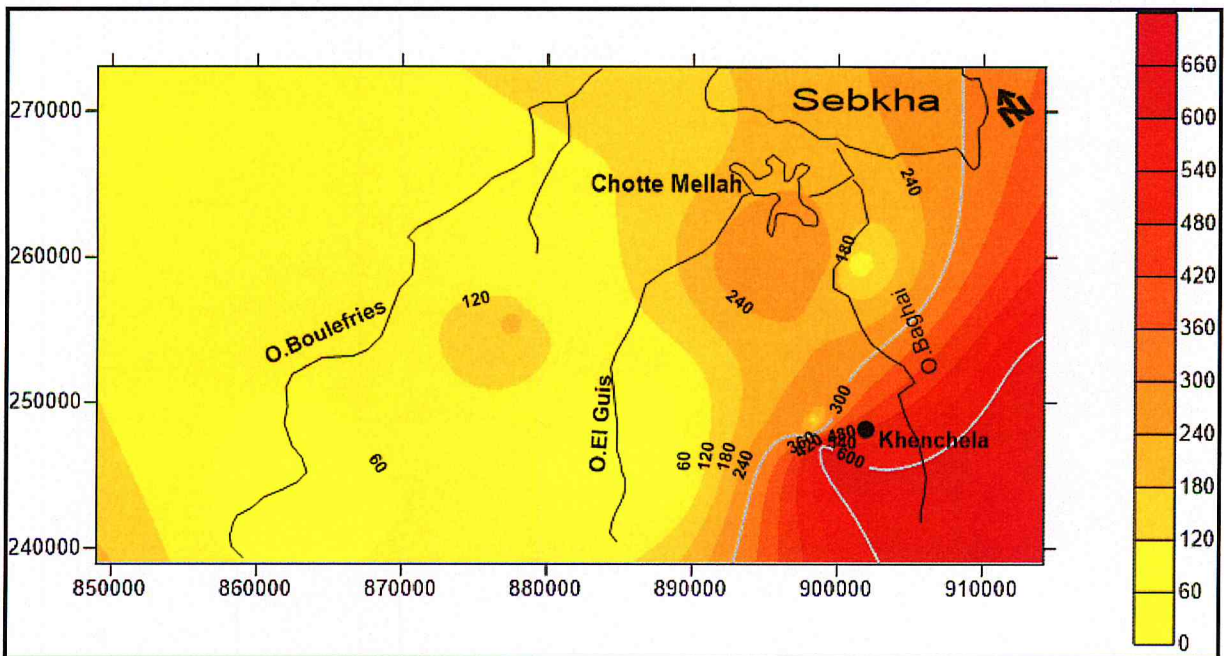
Carte 08 : Carte du magnésium

c) Le Sodium.

Le sodium est beaucoup plus abondant que le potassium. Il est toujours présent dans les eaux naturelles avec des teneurs variables. Il provient du lessivage des formations riches en NaCl, cristallins et feldspathiques, et des eaux usées d'origine industrielle et domestique. [4]

La majorité des points d'eau ont des valeurs basses en (Na^+), la valeur la plus élevée est de 670mg/l observée au forage (F2) et la plus faible est de 64mg/l au puits (F12, F15). Pour les sources la teneur est comprise entre 4 et 670mg/l.

La carte de sodium montre deux zones de teneurs bien distinctes. Au Sud et au Sud-est, c'est la zone qui présente les concentrations les plus fortes en sodium (supérieure à 250 mg) ; elles sont attribuées aux échanges de base entre les alcalins qui sont libérés dans l'eau et les alcalino-terreux qui sont adsorbés. Au nord du bassin les eaux présentent des teneurs en sodium inférieures à 200 mg/l.



Carte 09 : Carte du Sodium

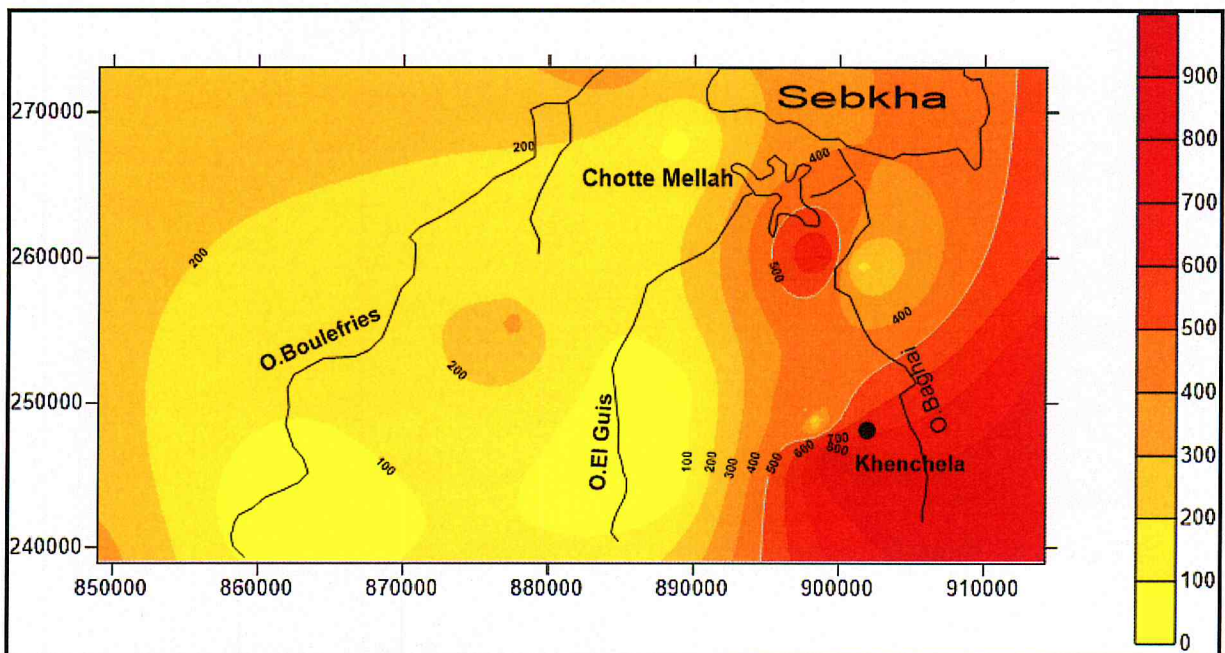
III.2.1.2.2. Les anions :

a) Les chlorure.

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles mais à des proportions variables. Ils proviennent essentiellement de la dissolution des sels naturels par lessivage des terrains salifères ; des rejets des eaux usées d'origine domestique et industrielle. [4]

Les teneurs en chlorures dans les forages sont extrêmement élevés dépassant les normes limites (250mg/l). Les valeurs varient de 60 (F15) à 826 mg/l (F3). Les sources aussi, notamment les eaux thermales, montrent des valeurs très élevées, de 20 à 890 mg/l. Les fortes concentrations sont due à l'influence des eaux de la Sebkhah et L'utilisation des engrais chimique et le retour des eaux d'irrigation.

La carte des chlorures présente des similitudes avec celle du sodium. Ainsi, la carte de variation des chlorures montre une zone à forte concentration située au Sud du bassin. Les mesures sont supérieures à 200 mg/l et pouvant atteindre les 900 mg/l de chlorure. Ces eaux sont influencées par la présence du Trias riche en Halite (NaCl), en sylvite (KCl), CaCl₂. Au nord du bassin les eaux présentent des teneurs en chlorure inférieures à 200 mg/l.

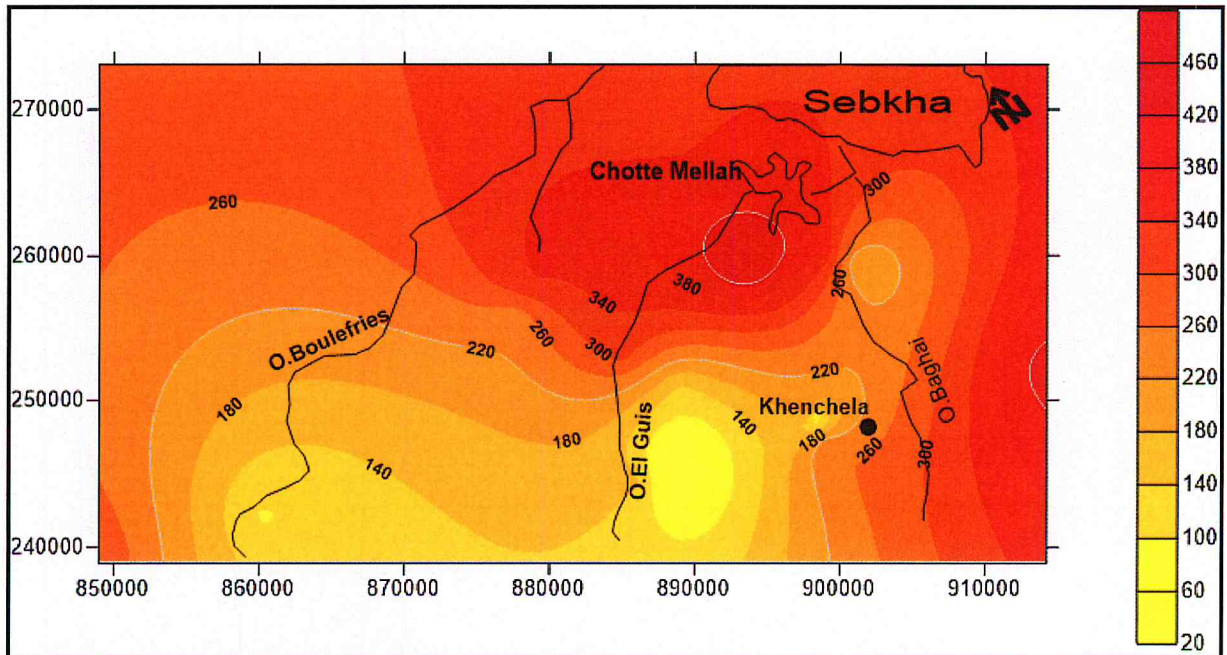


Carte 10 : Carte du chlorure.

b) Les Sulfates.

La concentration des eaux naturelles en sulfates est très variable. Ils résultent de la dissolution des gypses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite (CaSO_4) et BaSO_4 ; l'utilisation des engrais chimiques, des eaux de pluie où le soufre présent dans l'atmosphère subit une oxydation, et du lessivage des terrains argileux et marneux. [4]

Les teneurs en sulfate dépassent largement les normes admissibles (250mg/l) pour 13 points d'eau. Les sources montrent des valeurs comprises entre 32 et 445 mg/l. Ces fortes teneurs sont dues, à la dissolution du sulfate de baryum transporté par Oued Boulfreiss depuis la mine d'Ain-Mimoun, à l'utilisation des engrais chimiques ainsi que aux échanges hydrauliques avec oued Baghai et Oued Elgueiss qui charrient des eaux usées domestiques. Les faibles teneurs en sulfates sont localisées dans les affleurements gréseux et carbonatés.

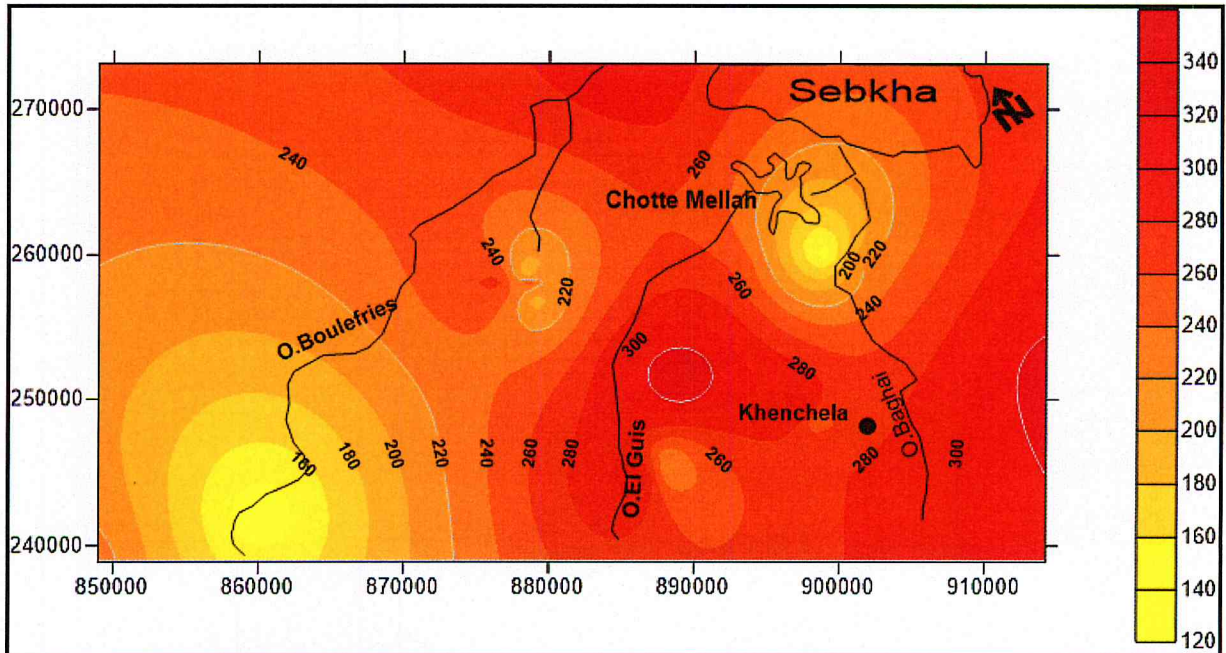


Carte 11 : Carte du Sulfate.

c) Les Bicarbonates.

Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées, ainsi leur concentration dans l'eau est fonction de la nature des terrains traversés ; la température de l'eau ; et la pression du CO₂ dissout. [4]

Les teneurs sont généralement comprise entre 168 et 348 mg/l. Passant aux sources, ils sont marqués par des concentrations variant de 123 à 333mg/l. Les fortes teneurs en Bicarbonates dépendent de la dissolution des carbonates de calcium (CaCO₃).



Carte 12 : Carte du Bicarbonates.

III.3. Identification de l'origine de la minéralisation des eaux.

Dans ce chapitre, nous allons identifier l'origine et les sources potentielles qui contribuent à la minéralisation des eaux souterraines par l'adoption de l'approche hydrogéochimique en s'aidant d'outils pour l'analyse et l'interprétation de ces processus.

La variation spatiale de la minéralité des eaux et la complexité des phénomènes, responsables de leur salinisation font intervenir plusieurs facteurs dont ; l'interaction eau-roche, comme une source de minéralisation, l'évaporation des eaux induite par des changements climatiques caractérisé par des périodes de sécheresse longues et prolongées, les pompages intensifs suscités par la satisfaction des besoins en eau conduisant par-à-coup à la surexploitation des nappes et son corolaire intrusion saline (Chotts et Sebka), peuvent aggraver tous ces processus et induire une salinisation, le plus souvent difficile à résorber.

La synergie de tous ces facteurs est une salinisation des eaux souterraines, devenue un écueil au développement socio-économique et hypothéquant ainsi, le développement durable. [6]

III.3.1. Relation Conductivités électriques-chlorures.

Le chlore est un élément conservatif, puisqu'il n'est ni influencé par le processus d'oxydoréduction, ni contrôlé par les minéraux de faible solubilité

La forte corrélation entre les conductivités électriques des eaux et les ions chlorures (figure 16) suppose que ces derniers contrôlent la minéralisation des eaux et que les chlorures sont des éléments caractérisant la salinité des eaux.

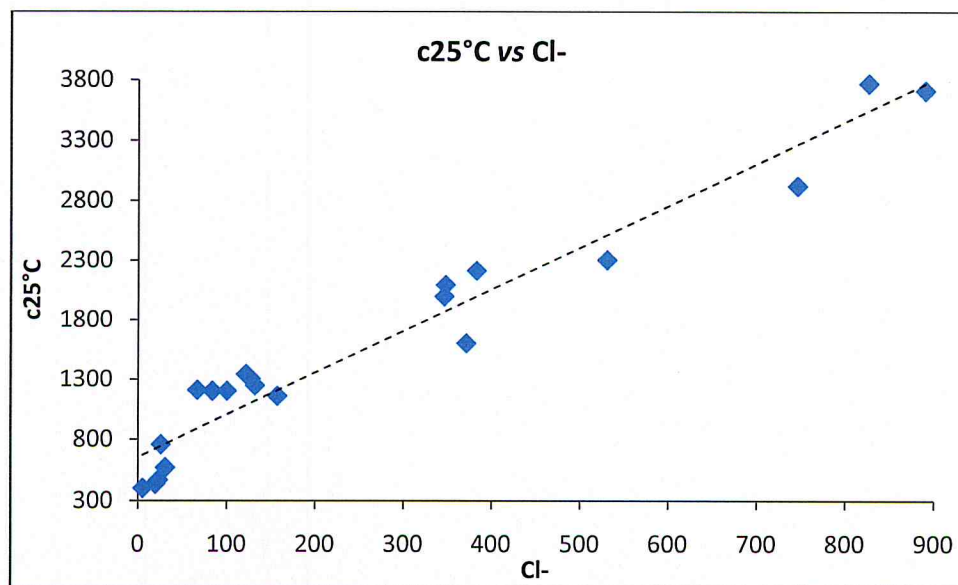


Figure 04 : Relations ions-chlorures.

III.3.2. Relation Na^+ - Cl^-

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et peu influencé par l'intervention des bactéries [6]

Le sodium et les chlorures présentent un coefficient de corrélation élevé (0.90) et l'alignement des points suivant la droite de corrélation montre que le Na^+ est majoritairement lié aux Cl^- . Ceci implique la même origine des deux éléments chimiques qui est la dissolution de l'halite. Cette

relation confirme la contribution des ions sodium à la minéralisation des eaux et se confirme par l'existence du faciès chloruré-sodique.

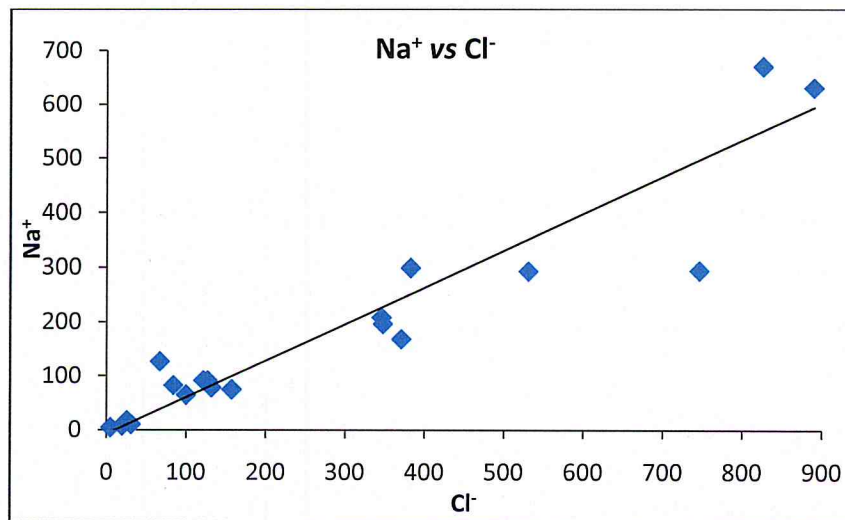


Figure 05 : Relation Na^+ - Cl^-

La figure de la corrélation Na^+ vs. Cl^- montre un premier groupe, dont les points sont alignés sur la droite de pente 1, cette tendance suggère une dissolution de l'halite influencée par des teneurs en chlorure ne dépassant pas les 150 mg/l. Un deuxième groupe, dont les teneurs en chlorures est en moyenne de 300 mg/l et présente des rapports molaires Na^+/Cl^- inférieurs à 1 ; ces échantillons sont prélevés dans les périmètres irrigués où nous assistons à un retour des eaux d'irrigation chargées d'intrants chimiques caractérisées par des teneur en nitrates qui peuvent atteindre 100 mg/l, de surcroit à la dissolution de l'halite. Le troisième groupe dépassent 700mg/l de chlorures, présente des rapports molaires Na^+/Cl^- très inférieurs à 1 (Figure 17). Ce sont des eaux thermales très influencées par la présence du Trias riche en sylvite et halite. Ces eaux circulent dans des circuits souterrains très profonds avec des échange de base en faveur des alcalins.

III.3.3. Relation Ca^{++} - Cl^-

L'évolution de Ca^{++} est étudiée en fonction des teneurs en chlorure (figure 18), la distribution du nuage des points est aléatoire avec un enrichissement en calcium, la corrélation est faible dans les eaux diluées influencées par la dissolution simultanée, des carbonates et du gypse qui indiquent que les deux ions, à savoir, calcium et chlorure, n'ont pas une origine commune. Le reste des points s'alignent sur la droite de dissolution avec une corrélation significative. Ceci, traduit la part du calcium dans la salinité des eaux par dissolution des chlorures de calcium (CaCl_2) dans un milieu acide.

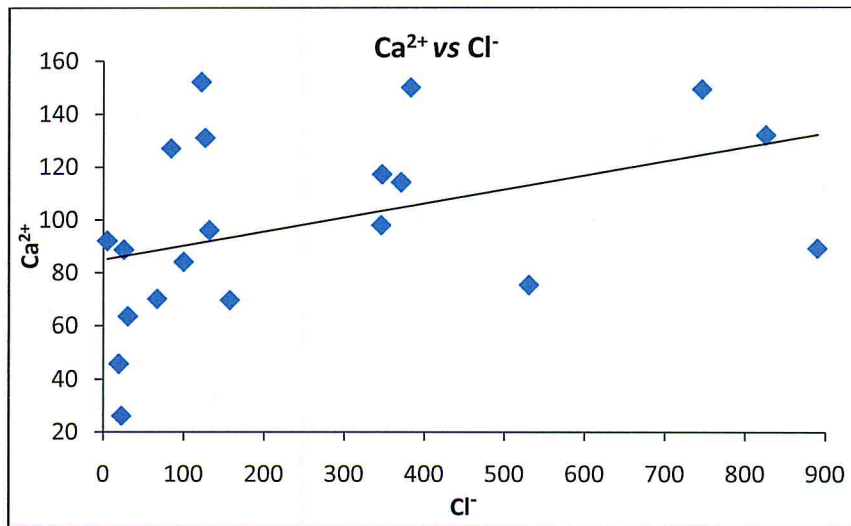


Figure 06 : Relation Ca⁺⁺ - Cl⁻

III.3.4. Relation SO₄²⁻ - Cl⁻

La distribution du nuage des points dans la relation Sulfate en fonction des chlorures présente des similitudes avec le diagramme Ca-Cl (figure 18). Ainsi le premier groupe de point enrichi en sulfates et appauvri en ions chlorure traduit la dissolution du gypse avec un apport en ions SO₄²⁻ et Ca²⁺. Le deuxième groupe de points s'aligne sur la droite de corrélation et laisse supposer que les ions sulfates chlorures proviennent de la pollution par irrigation et contribuent à la minéralisation des eaux.

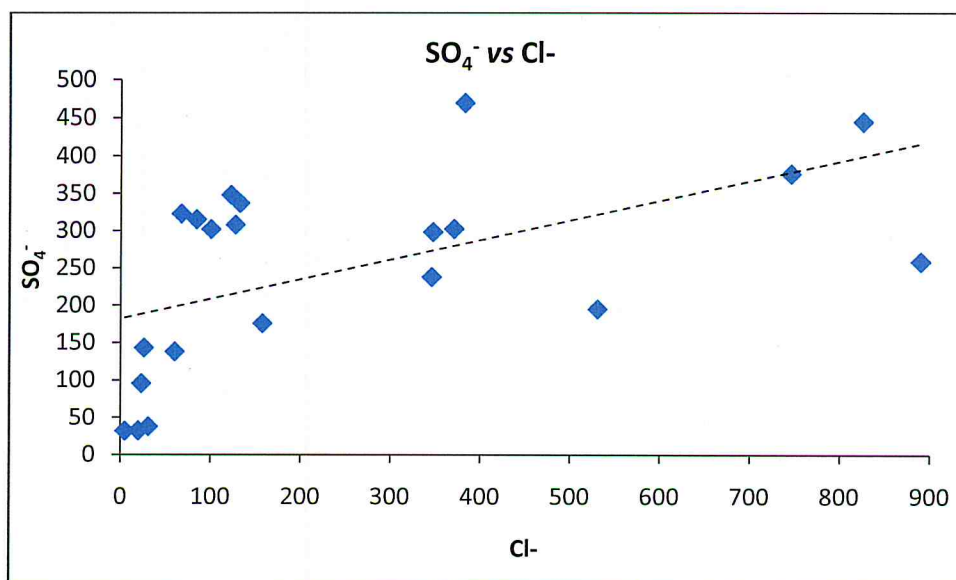


Figure 07: Relation SO₄²⁻ - Cl⁻

III.3.5. Relation Mg^{2+} - Cl^-

La relation Mg^{2+} - Cl^- se fait selon une droite de distribution aléatoire (figure 20), les eaux sont riches en magnésium au détriment du chlorure. Cette tendance laisse supposer que les eaux riches en magnésium proviennent de la dissolution de la dolomie, la magnésite et des sulfates de magnésium rencontrés dans les formations géologiques carbonatées et salifères des Djebel Aidel et djebel Aourés.

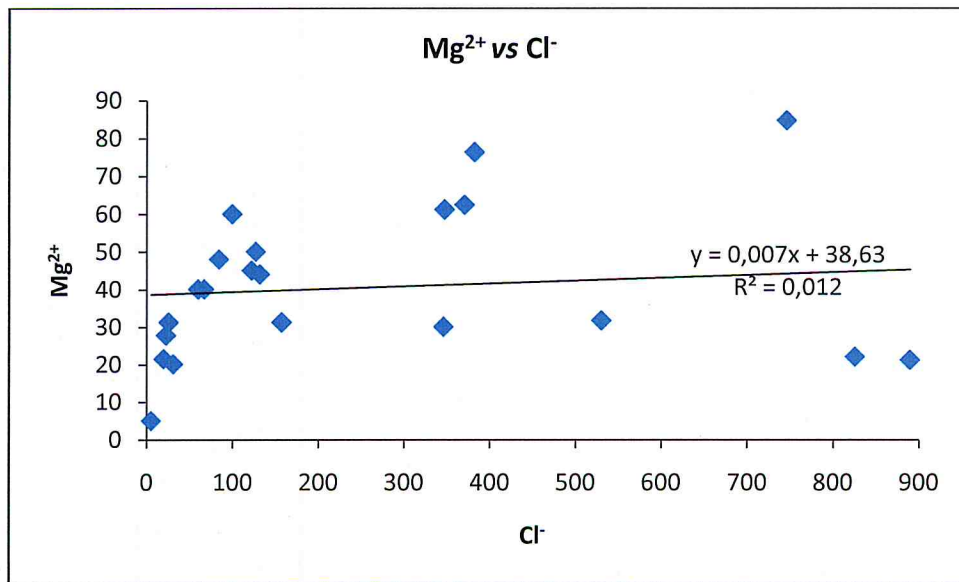


Figure 08 : Relation Mg^{2+} - Cl^-

III.4. Représentation graphique des résultats :

III.4.1. Diagramme de Piper.

La représentation graphique des résultats des analyse chimiques sur le diagramme de Piper (figure 21) montre une évolution du faciès chimique depuis des eaux bicarbonatées calciques vers un faciès chloruré sodiques dans le remplissage Mio-Plioquaternaire en passant par un faciès intermédiaire sulfaté calcique. Ainsi, les eaux de sources captées dans influencé par les formations calcaires sont bicarbonatées calciques, lors de l'écoulement des eaux dans les formations alluvionnaires, leur temps de séjour est long, la surface de contact est grande et les eaux se chargent en sels pour donner des faciès sulfatées calciques par dissolution du gypse et chloruré sodique par dissolution de l'halite.

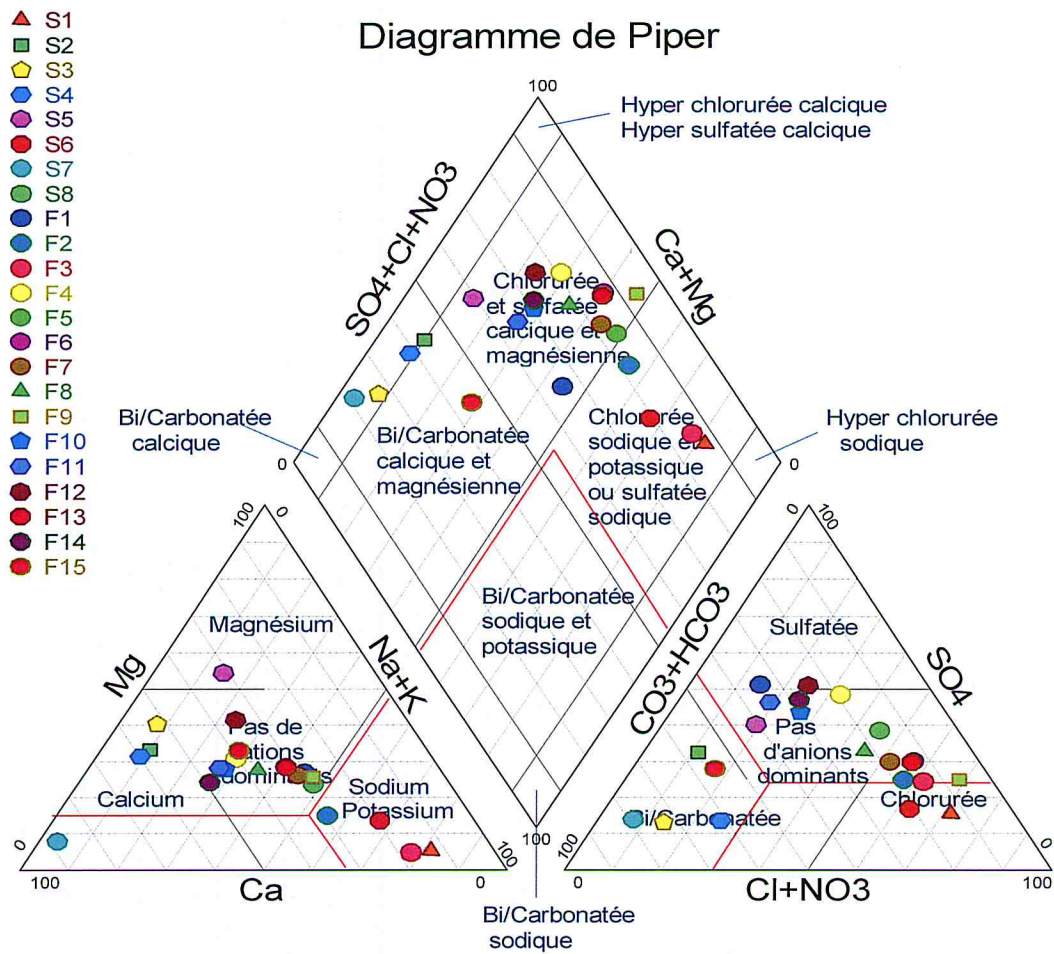


Figure 09 : Diagramme de Piper.

III.4.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff.

Le diagramme de Scholler montre que les eaux de source ont un faciès bicarbonatés calcique sauf pour les eaux thermales où le faciès est chloruré sodique. Ces eaux sont influencées par la lithologie représentée par la Trias riche en Halite et en gypse.

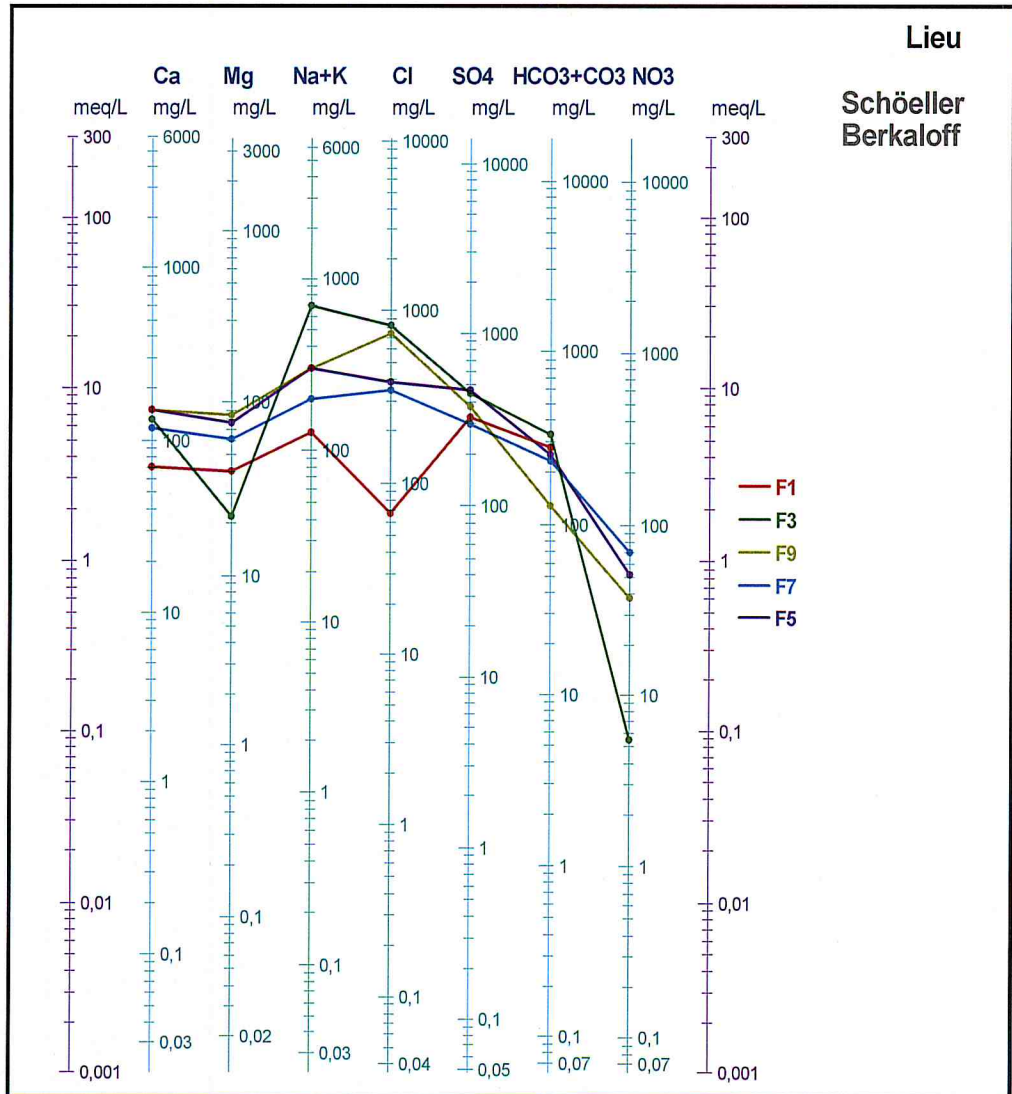


Figure 10 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des forages.

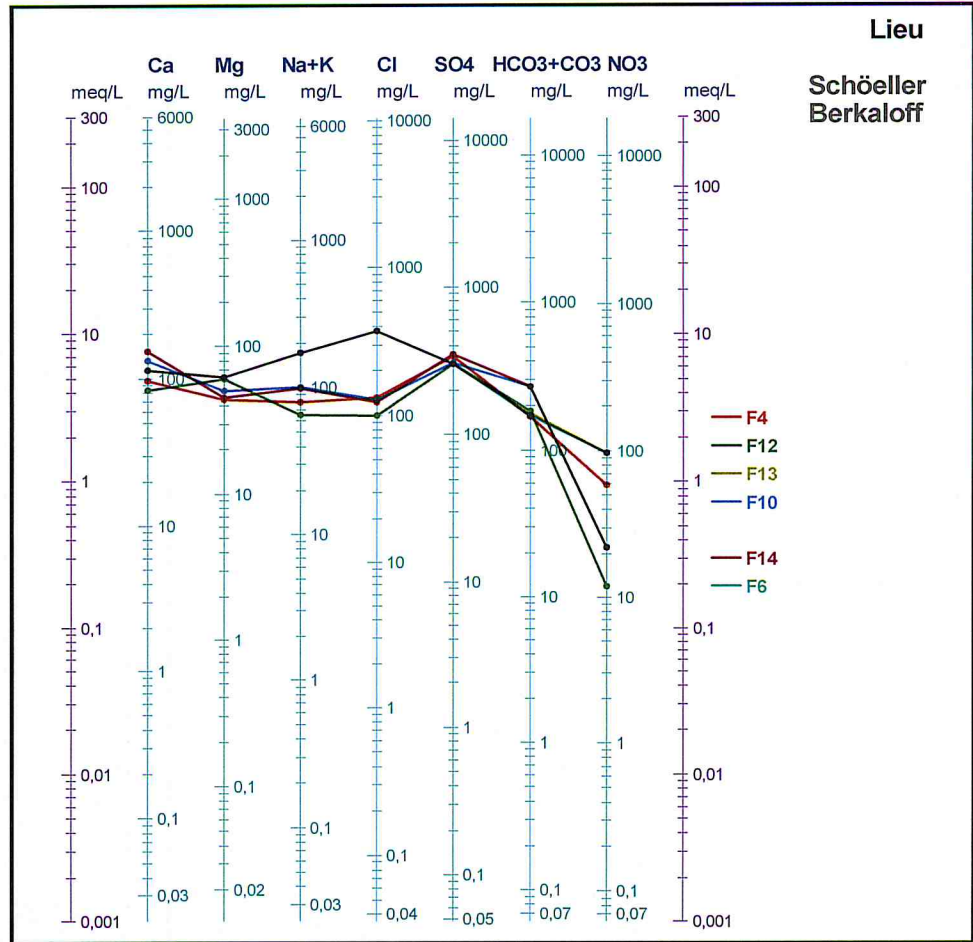


Figure 11 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des forages.

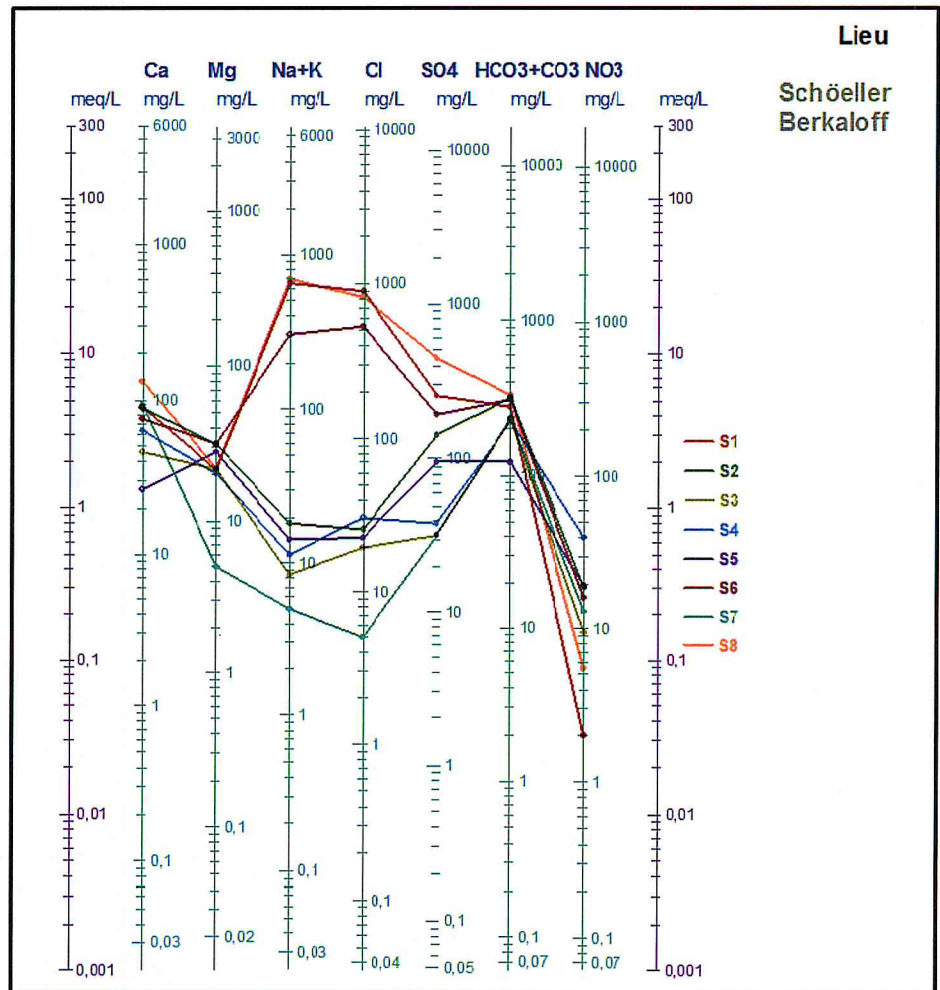


Figure 12 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des sources.

III.5. Analyse statistique des données.

III.5.1. Introduction.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse de données.

Elle cherche à synthétiser l'information contenue dans un tableau croisant des individus et des variables quantitatives. Produire un résumé d'information au sens de l'ACP c'est d'établir une similarité entre les individus, chercher des groupes d'individus homogènes, mettre en évidence une typologie d'individus. Quant aux variables c'est mettre en évidence des bilans de liaisons entre elles, moyennant des variables synthétiques et mettre en évidence une typologie de variables. L'ACP cherche d'une façon générale à établir des liaisons entre ces deux typologies (Analyse en composantes principales : Une méthode factorielle pour traiter les données didactiques Ali Kouani) [7]

III.5.2. Analyse en Composantes Principales (ACP).

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

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

Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée sur des variables centrées réduites à l'aide du logiciel SPAD. Les données portent sur l'ensemble des 11 paramètres physico-chimiques mesurés sur les eaux souterraines et 25 individus (points d'eau).

11 variables ont été traitées, à savoir les paramètres physico-chimiques (CE, T °C, pH) et les ions majeurs (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻). [7]

III.5.3. Matrice de corrélation :

La matrice de corrélations (tableau 05) donne les coefficients de corrélations entre les différentes variables, deux à deux.

Toutes les variables sont corrélées positivement donc, elles varient dans le même sens. L'analyse du tableau 06 montre que tous les ions majeurs sont bien corrélés avec la conductivité électrique. De très fortes corrélations existent entre le calcium : le magnésium et les sulfates d'une part et le sodium ; le potassium, chlorures et les sulfates d'autre part. La température est très bien corrélée aux alcalin et aux halogènes. Les nitrates et les bicarbonates ne sont corrélés à aucun ion.

Tableau 05 : Matrice de corrélation entre les variables.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	T	CE	pH
Ca	1,000										
Mg	0,535	1,000									
Na	0,426	-0,067	1,000								
K	0,385	-0,263	0,889	1,000							
Cl	0,464	0,107	0,946	0,802	1,000						
SO4	0,792	0,565	0,610	0,462	0,586	1,000					
HCO3	0,254	0,206	0,363	0,459	0,221	0,185	1,000				
NO3	0,221	0,429	-0,132	-0,301	0,033	0,144	-0,170	1,000			
T	0,270	0,276	0,910	0,887	0,783	0,487	0,390	0,284	1,000		
CE	0,536	0,119	0,970	0,840	0,974	0,694	0,280	0,023	0,826	1,000	
pH	-0,206	-0,096	-0,110	-0,108	-0,008	-0,198	-0,485	0,136	0,098	0,061	1,000

III.6. Analyse de l'espace des variables.

Le plan factoriel F1-F2 (figure 25) représente 70,45% de la variance totale du nuage de points exprimée. Le facteur F1 est le plus dominant, il exprime à lui seul 49,49 % de la variance exprimée. Il est défini par la conductivité, le potassium, les chlorures, le sodium, la température et à un degré moindre par le calcium et les sulfates. Cet axe peut correspondre à une minéralisation issue en bonne partie de l'interaction eau-roche. La présence de température suggère aussi, que ce facteur pourrait-être lié aux phénomènes géothermiques. Le facteur F2 exprime 20,95% de l'inertie totale du nuage, il est bien représenté par le magnésium, le calcium, les sulfates et les nitrates. Cet axe définit la dissolution du gypse et l'infiltration de la pollution de la surface vers les eaux profondes. La présence du magnésium, marqueur du temps de séjour, traduit un lent et profond voyage des eaux souterraines.

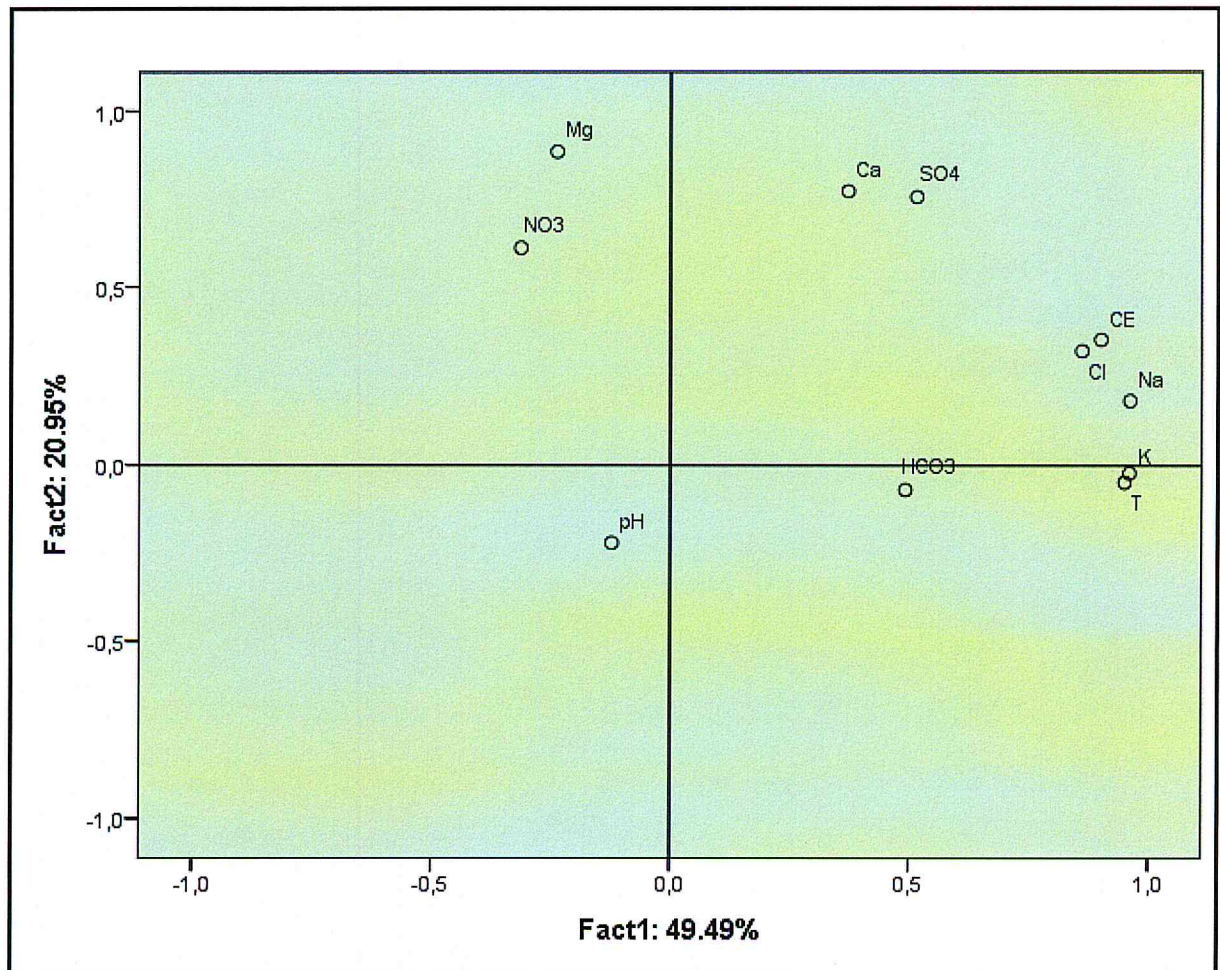


Figure 13 : Espace des variables de l'ACP.

III.7. Analyse de l'espace des individus :

L'analyse de la projection des individus dans le plan factoriel F1-F2 montre qu'on peut subdiviser les points de mesure en trois groupes (figure 26) :

- ✓ Premier groupe (S1, S8 et F 2)

Ce sont les eaux les plus minéralisés par rapport aux autres, avec des conductivités très élevées et varient entre (station 3710 et 3770) et avec des températures à l'émergence qui oscillent entre 49 et 55°C traduisant des eaux thermales très influencées par les formations triasiques.

- ✓ Un deuxième groupe : (S3, S4, S5 et S7) ;

Il regroupe les eaux de sources les moins minéralisées, très faibles par rapport au premier groupe, avec des conductivités électriques qui varient de 400 à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et des températures moyennes de 15°C .

- ✓ Le troisième groupe : F12, F14, F15, F20 et F21.

Regroupe des eaux minéralisées et polluées

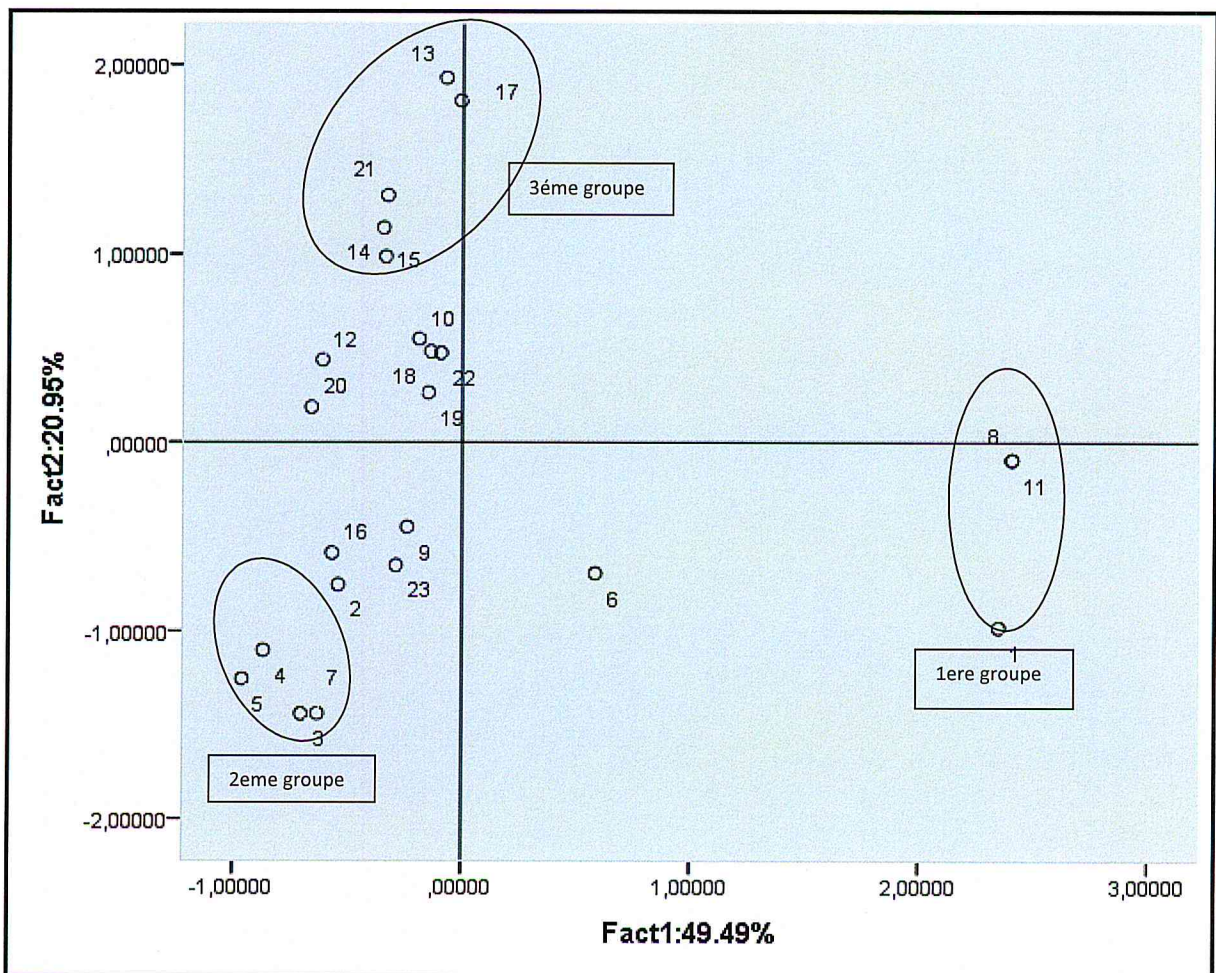


Figure 14 : Espace des individus.

III.8. Conclusion.

Les résultats des analyses physico-chimiques montrent que :

- Les eaux de fortes températures sont mesurées dans des forages très profonds, et les faibles températures sont mesurées dans les eaux de sources et les souterrains peu profonds en rapport avec la température de l'air.
- La température des eaux profondes varie de 17 à 55°C et celles des sources est en moyenne de 15°C qui est en équilibre avec la température de l'air. Les faibles valeurs de conductivité électrique, en moyennes de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sont mesurées dans les zones d'émergence et les fortes valeurs de conductivité, en moyennes de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sont mesurées dans les eaux thermales et les eaux profondes. Le diagramme de Piper a permis d'identifier le faciès chimique général des eaux souterraines : dans les affleurements calcaires, les eaux circulent dans des circuits souterrains fracturés ; le faciès est bicarbonaté calcique, au contact des alluvions les eaux sont sulfatées calciques et chlorurées calciques, au fil de l'interaction eau-roche et du temps de séjour des eaux le faciès est chloruré sodique.
- les fortes concentrations de sodium et des chlorures sont dues à la dissolution de l'halite (NaCl), présente dans les formations salifères du Trias et à l'utilisation des engrais chimiques et aux échanges de base qui enrichissent les eaux en alcalins (Na et K) au détriment des alcalino-terreux (Ca et Mg).
- Les fortes teneurs en sulfates sont dues à la dissolution du gypse et de l'anhydrite fréquente dans les formations gypsifères et à la pollution par les intrants organiques et inorganiques.
- L'utilisation des diagrammes binaires des ions majeurs contre un élément conservé caractérisant la salinité et de l'analyse statistique multi variée en composantes principales (ACP) qui a montré que la majorité des éléments sont corrélés positivement à la conductivité électrique ont conduit à l'identification de l'origine de la salinité des eaux. En effet, les chlorures, le sodium, les sulfates et le calcium et à un degré moindre, magnésium et nitrates seraient la source de minéralisation des eaux souterraines par dissolutions des sels suivants ; halite, calcite gypse, dolomite et sans oublier l'apport de la pollution par les nitrates.

Chapitre IV : Géochimie Isotopique

IV.1. Historique.

Un des pionniers de l'hydrologie isotopique dans les années 50, est Harmon Craig de l'Ecole de Chicago dirigée par Urey. En France les premières installations d'analyse isotopique ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et ^3H) ont été montées, dans une perspective d'hydrologie isotopique, à Paris et à Thonon au début des années 60 par R. Létolle, J.C. Fontes et Ph. Olive, ainsi qu'au (Centre de l'énergie atomique) CEA de Saclay. En Roumanie citons les travaux d'A. Tenu. [8]

IV.2. Que ce qu'un isotope ?

La matière est constituée d'éléments chimiques tous bâtis sur le même modèle. L'atome est constitué d'un noyau composé de protons (chargés positivement), et de neutrons (électriquement neutres). Des électrons (chargés négativement) gravitent autour de ce noyau. Chaque atome se distingue donc par son nombre de protons (ou d'électrons), également appelé numéro atomique Z , le nombre de neutrons n et le nombre de nucléons (protons + neutrons) M . Le nombre de protons est égal au nombre d'électrons, ce qui assure la neutralité de l'atome. [9]

Le mot « Isotope » est composé du grec isos "égal, le même" et topos "lieu, place", proprement "qui occupe la même place, faisant référence à la classification chimique de la table de Mendeleïev. En effet pour un même élément chimique, il peut exister différents noyaux :

Si le nombre de protons est toujours égal à Z , le nombre de neutrons peut varier et on parle alors d'isotopes de l'élément chimique.

Les isotopes d'un même élément chimique ont le même numéro atomique ($Z=p$), ils portent le même nom et occupent la même place dans la table de Mendeleïev, ils diffèrent par leur masse atomique ($M=p+n$). Ainsi, le noyau de l'atome d'oxygène est composé de 8 protons (p) pouvant être accompagnés de 8,9 ou 10 neutrons (n) pour former respectivement les isotopes stables oxygène-16 (^{16}O), ^{17}O et ^{18}O . On parle alors d'isotope léger pour l' ^{16}O et d'isotope lourd pour l' ^{18}O . [8]

IV.3. hydrologie isotopique : Isotope stable et isotope radioactif.

Les isotopes d'un même élément (même nombre de protons, nombre différent de neutrons) ne se distinguent entre eux que par un comportement physique et chimique légèrement différent. Présents naturellement dans l'environnement ou apportés artificiellement, ils peuvent être utilisés comme marqueurs de l'eau et des substances dissoutes.

L'étude de la distribution isotopique ne porte, en général, que sur les isotopes stables car l'abondance naturelle des isotopes radioactifs est très inférieure. Même si les propriétés chimiques des isotopes stables d'un même élément sont équivalentes, on observe des différences de comportement d'un isotope à l'autre, ce que la précision des mesures (notamment par spectrométrie de masse) permet d'identifier.

L'origine de ces différences résulte du fractionnement isotopique qui intervient lors des changements d'état physique (condensation, évaporation, passage phase liquide-phase solide) : c'est ainsi qu'on peut identifier ou reconstituer l'histoire de l'eau ou des composés dissous au sein des aquifères. [10]

IV.4. Isotopes de la molécule d'eau.

L'eau (océan, vapeur, pluie, glace, gelée etc.) est constituée essentiellement à partir de l'isotope 16 de l'oxygène qui est le plus répandu.

Le rapport $^2\text{H}^{18}\text{O}/^2\text{H}^{16}\text{O}$ dans l'eau est de l'ordre de 1/500.

Ce rapport est mesuré par spectrométrie de masse (explication de la spectrométrie de masse sur le site de l'académie de Nancy) et a permis de montrer des variations extrêmement faibles de ce rapport dans les océans (de l'ordre de $\pm 0,1\%$) et un peu plus important dans les précipitations, pluie et neige (de l'ordre de $\pm 3\%$). [10]

Tableau 06: Les principaux isotopes du milieu utilisés en hydrologie isotopique. [10]

Isotope léger et abondant	Isotope lourd et rare	Abondance moyenne (ppm)	Formes habituellement analysées en hydrologie isotopique
Hydrogène = ^1_1H	Deutérium = $^2_1\text{H}=\text{D}$ tritium = $^3_1\text{H}=\text{T}$	200 10^{-11}	$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$
Oxygène = $^{16}_8\text{O}$	Oxygène-18 = $^{18}_8\text{O}$	2000	$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$, $\text{CO}_2_{(g)}$, $\text{HCO}_3^-_{(aq)}$, $\text{CaCO}_3_{(s)}$, $\text{SO}_4_{(aq)}^-$, $^2, \text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}_{(s)}$

IV.4.1. Exemples de proportions isotopiques terrestres

- ✓ Oxygène : ^{16}O : 99,76%; ^{17}O : 0,038%; ^{18}O : 0,205%
- ✓ Carbone : ^{12}C : 98,9%; ^{13}C : 0,011%
- ✓ Hydrogène : ^1H : 99,985%; ^2H : 0,00015% [11]

IV.4.2. Mise en évidence expérimentale de l'effet isotopique

Un effet isotopique observé. Plongé dans l'eau légère :

- ✓ Le glaçon d'eau légère H_2O (oxygène 16 et hydrogène : $d = 0,91$) flotte.
- ✓ Le glaçon d'eau lourde D_2O (oxygène 18 et deutérium : $d = 1,01$) coule. [11]

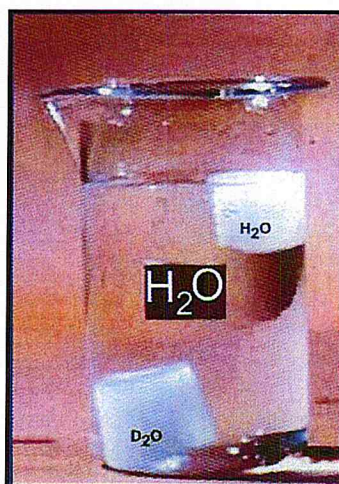


Figure 27. Effet des isotopes lourds et légers dans un glaçon [11].

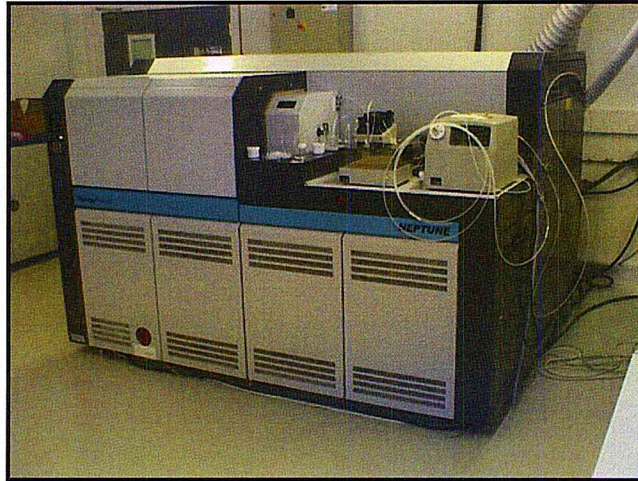
IV.4.3. Outils de mesure des valeurs isotopiques.

Figure 28. Spectromètre de masse pour les mesures isotopiques : Le système en vogue : l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometer) [11]

IV.4.4. Oxygène-18 et deutérium, les isotopes stables de la molécule d'eau.

L'oxygène-18 et le deutérium sont des isotopes constitutifs de la molécule d'eau. Pour un même élément, le rapport de la quantité d'isotope lourd sur la quantité d'isotope commun (léger) peut être modifié au cours de changements de phase comme la condensation de l'eau des nuages, ou l'évaporation de l'eau des océans ; c'est le fractionnement isotopique, ce phénomène étant à la base des méthodes utilisant les isotopes stables en hydrogéologie. [12]

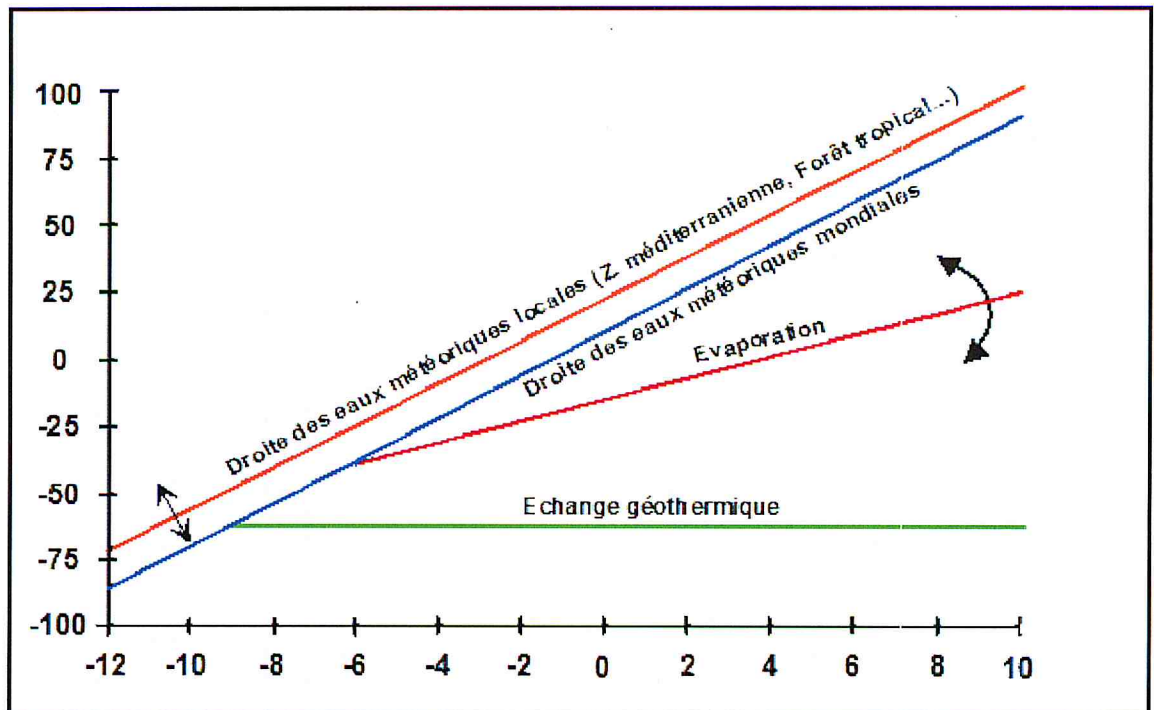


Figure 29 : Relation $\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ vs $\delta^2\text{H} \text{ ‰}$ dans les eaux naturelles (Fontes, 1976). [15]

IV.5. Composition isotopique des molécules d'eau.

Si l'on combine les isotopes stables de l'oxygène (^{16}O , ^{17}O et ^{18}O) et de l'hydrogène (^1H et ^2H), sans tenir compte du tritium instable, on obtient six espèces différentes de molécules. Toutes ces espèces sont présentes dans les eaux naturelles, mais leurs proportions relatives varient fortement en fonction du fractionnement subi par l'eau considérée. L'eau de mer par exemple contient plus de molécules lourdes (constituées principalement d'isotopes à nombre de masse élevé) que l'eau douce. [14]

IV.6. Unités de mesure.

La mesure absolue des concentrations en isotopes est généralement très coûteuse, et n'est la plupart du temps pas nécessaire. C'est pourquoi on mesure le plus souvent la différence relative entre la teneur en isotope de l'échantillon et la teneur en isotope d'un étalon ou «standard» (la teneur étant le rapport atomique entre l'isotope lourd et l'isotope léger). Cette déviation par rapport à un standard, notée δ , est très faible et s'exprime en ‰. $[^2\text{H}]$ et $[^1\text{H}]$ étant les concentrations en deutérium et en hydrogène-1, on aura pour le deutérium:

$$\delta^2\text{H} = \frac{\left(\frac{[^2\text{H}]}{[^1\text{H}]}\right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{[^2\text{H}]}{[^1\text{H}]}\right)_{\text{standard}}}{\left(\frac{[^2\text{H}]}{[^1\text{H}]}\right)_{\text{standard}}} \times 1000$$

$[^{18}\text{O}]$ et $[^{16}\text{O}]$ étant les concentrations en oxygène-18 et en oxygène-16, on aura pour l'oxygène-18 :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\left(\frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}\right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}\right)_{\text{standard}}}{\left(\frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}\right)_{\text{standard}}} \times 1000$$

On calcule de la même façon les δ de tous les isotopes stables, en utilisant bien sûr les standards correspondants. Un échantillon dont la déviation δ est négative sera donc appauvri en isotope lourd, alors qu'une déviation positive indiquera un enrichissement par rapport au standard. Si l'on connaît la quantité d'oxygène-18 dans le standard, on peut en déduire la quantité d'oxygène-18 contenue dans l'échantillon.

Une propriété intéressante des valeurs en δ est qu'elles sont additives sur une large gamme de valeurs. Si deux échantillons d'eau présentent des déviations δ_1 et δ_2 par rapport au même standard, alors la déviation isotopique δ_{1-2} du premier échantillon par rapport au deuxième sera :

$$\delta_{1-2} = \delta_1 - \delta_2 \left(\frac{1000 + \delta_1}{1000 + \delta_2} \right) \quad [12]$$

IV.7. La notation delta pour mille.

Les rapports isotopiques de la molécule d'eau sont généralement comparés au rapport isotopique d'une eau standard de rapport isotopique connu. Le «Standard Mean Ocean Water» (Vienna-SMOW, VSMOW) est le standard le plus largement utilisé. Ainsi, les abondances en ^{18}O et ^2H s'expriment comme un rapport en notation delta pour mille (parts pour mille ‰), différence relative au standard. Les nombres obtenus sont entiers et utilisables avec des opérations mathématiques simples. La teneur isotopique de l'eau est mesurée à l'aide d'un spectromètre de masse. [15]

IV.8. Standards.

Un des gros problèmes de géochimie isotopique (et de la géochimie) est la comparaison des résultats obtenus par différents laboratoires. Certains laboratoires déclarent en effet atteindre actuellement des précisions de 0,02‰ ou mieux pour les analyses de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$, alors que les analyses des mêmes échantillons dans des laboratoires différents donnent des résultats qui varient parfois de 0,3‰ (EOS, 1996). L'utilisation des mêmes références est donc impérative. Jusqu'à récemment, le standard adopté universellement comme référence pour les isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène dans les eaux naturelles était le SMOW (Standard

MeanOcean Water). Ce standard correspond à une eau hypothétique ayant des rapports isotopiques en oxygène-18 et en deutérium identiques à ceux d'une eau océanique «moyenne». Malheureusement, ce standard n'existe pas actuellement en tant qu'échantillon et ne peut donc pas être utilisé par les laboratoires pour calibrer leurs appareils de mesure. On utilise actuellement le standard VIENNA-SMOW (V-SMOW), qui lui est disponible sous forme d'échantillons. Dans la pratique, on considérera que les standards SMOW et V-SMOW sont identiques. Des mesures successives par différents auteurs à différentes dates ont donné les rapports isotopiques absolus du V-SMOW suivants (IAEA, 1981):

- $[^2\text{H}]/[^1\text{H}] = (155,76 \pm 0,05) \times 10^{-6}$
- $[^2\text{H}]/[^1\text{H}] = (155,95 \pm 0,08) \times 10^{-6}$
- $[^2\text{H}]/[^1\text{H}] = (155,60 \pm 0,12) \times 10^{-6}$
- $[^{18}\text{O}]/[^{16}\text{O}] = (2005,20 \pm 0,45) \times 10^{-6}$ [12]

IV.9. Fractionnement isotopique.

L'évaporation est un processus physique au cours duquel l'énergie emmagasinée par les molécules d'eau est transférée de la phase liquide à la phase vapeur (Mazor 1991). La pression de vapeur d'une eau constituée principalement d'isotopes légers est plus haute que celle d'une eau constituée d'isotopes lourds. En d'autres termes, les molécules légères passent plus facilement dans la phase vapeur que les molécules lourdes. Il y a donc fractionnement isotopique (ou séparation) au cours de l'évaporation partielle de l'eau: la vapeur s'enrichit en molécules légères (les δ diminuent). Au contraire, la phase liquide résiduelle s'enrichit en isotopes lourds et les δ augmentent. [12]

Le fractionnement isotopique pendant l'évaporation est responsable du fractionnement qui a lieu au cours de la formation des masses nuageuses: la vapeur des nuages est appauvrie en isotopes lourds par rapport aux océans dont provient l'eau. De la même façon, au cours de la condensation des nuages, les molécules lourdes passent plus facilement dans la phase liquide. L'eau de pluie sera donc enrichie en isotopes lourds par rapport aux nuages qui lui ont donné naissance. [16]

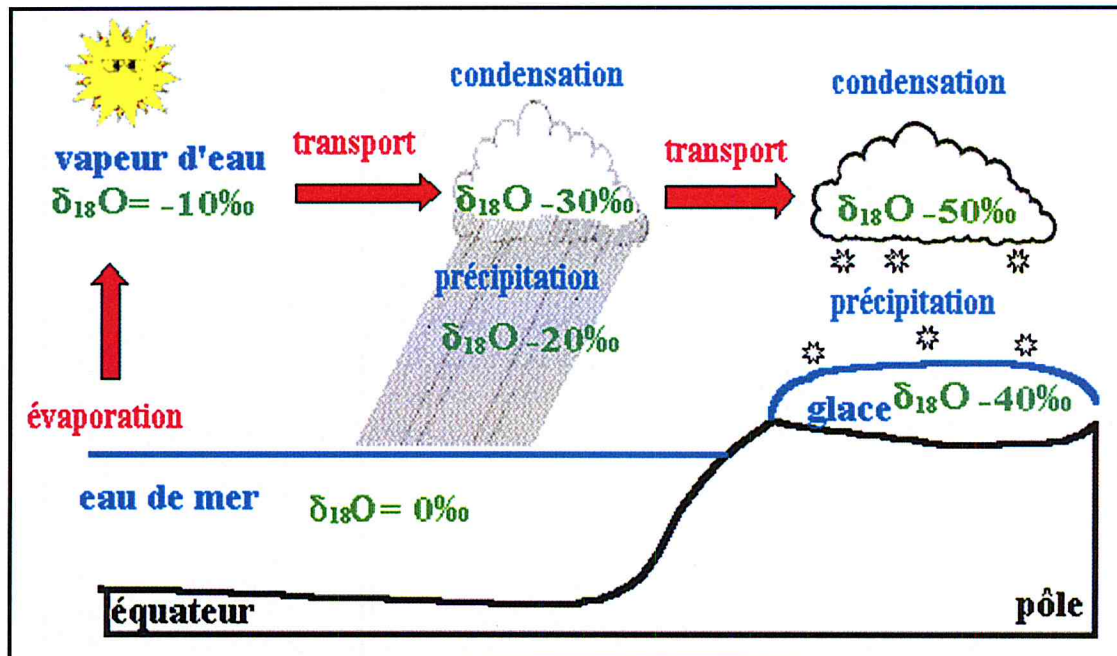


Figure 30: phénomène du fractionnement isotopique [16]

Lorsque l'eau de mer s'évapore, la molécule $^2\text{H}^{16}\text{O}$ légère passe plus rapidement dans la phase vapeur que la molécule lourde $^2\text{H}^{18}\text{O}$. La vapeur d'eau s'évapore essentiellement dans les régions tropicales les plus chaudes. Dès le processus d'évaporation, la vapeur d'eau contient environ 1% d' ^{18}O en moins par rapport à l'eau des océans. Ce déficit est exprimé en référence à une composition standard proche de celle de l'océan mondial, c'est le ^{18}O . Cette masse d'air humide est ensuite transportée vers les plus hautes latitudes.

Deux phénomènes interviennent alors:

Lors de chaque condensation de la vapeur d'eau, les molécules $^2\text{H}^{18}\text{O}$ se condensent préférentiellement par rapport aux molécules $^2\text{H}^{16}\text{O}$. La vapeur d'eau s'appauvrit alors en ^{18}O . Au cours de sa migration vers les pôles (et de son refroidissement), la masse d'air subit des condensations successives qui l'appauvrissent en isotope lourd. Les précipitations se fabriquent à partir de vapeur d'eau de plus en plus appauvrie en isotope lourd. L' ^{18}O des précipitations diminue (-10, -20, -30, -40 pour mil)

Le refroidissement de la masse d'air accentue le fractionnement isotopique. Pour deux masses d'air de composition isotopique identique, les précipitations seront plus riches en ^{18}O si la condensation s'effectue à des températures les plus basses. Les différences sont faibles. Le fractionnement isotopique est de 10 à 25°C, de 14 à -20°C.

Ces deux phénomènes existent en même temps dans la nature et semblent se contrecarrer si l'on raisonne sur les précipitations. Si on parle des masses d'air, il n'en est rien. Ils jouent dans le même sens pour accentuer l'appauvrissement de la masse d'air en ^{18}O .

Lors de la migration vers les pôles, le phénomène d'appauvrissement de la vapeur d'eau en isotope lourd par condensations successives l'emporte largement sur le phénomène d'enrichissement des précipitations lié à la baisse de température (effet trois fois plus faible que le précédent). [16]

IV.10. Ligne isotopique météorique.

Si l'on trace la relation $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ d'eaux de précipitations échantillonnées sur toute la surface de la planète, on remarque que ces points définissent une relation linéaire. Quels que soient les points considérés, on retrouve toujours une relation proche de la ligne météorique globale mise en évidence par Craig (1961):

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$$

Cette droite est toujours considérée en première approximation comme la norme, les points s'écartant de cette droite étant «atypiques». Les lignes météoriques locales sont des références très utiles pour la compréhension et le traçage de l'origine des eaux souterraines locales et de leurs déplacements, comme nous allons le voir tout au long de cette étude. Ces droites sont influencées par les points de mesure considérés et surtout par la région du globe pour laquelle elles sont établies.

Pratiquement chaque application des isotopes stables fait appel à une droite de ce type. Cependant, il est préférable d'établir une ligne météorique locale à partir d'échantillons de pluie sur le site même de l'étude. Comme nous allons le voir, on doit aussi tenir compte des variations en fonction de la température et de l'altitude. [12]

IV.11. Effet de température.

La température est le paramètre qui influence le plus la composition isotopique des précipitations. Cette composition isotopique dépend de la température à laquelle l'eau océanique s'est évaporée dans l'atmosphère, et surtout de la température à laquelle les précipitations sont condensées dans les nuages. La ligne météorique est donc le résultat de la dépendance combinée du $\delta^2\text{H}$ et du $\delta^{18}\text{O}$ à la température. L'effet de température est bien visible dans les variations

saisonniers. La dépendance de la composition isotopique des précipitations en fonction de la température est responsable pour une grande part des variations de composition isotopique des eaux souterraines, ce qui constitue pour l'hydrogéologue un outil très efficace. Dans les régions où il pleut à la fois en été et en hiver, les différences de composition des eaux de précipitation sont des traceurs des fronts de recharge hivernaux et estivaux. Ces fronts permettent d'estimer les vitesses d'infiltration et d'identifier les mécanismes d'écoulement. [12]

IV.12. Effet d'altitude.

Quand un nuage s'élève aux abords d'un relief, la température diminue du fait de l'altitude, ce qui donne des précipitations de plus en plus pauvres en isotopes lourds. Les pluies s'appauvrissent également par épuisement de la masse nuageuse. D'autres processus physiques interviennent au cours de la formation des précipitations en région montagneuse (comme l'évaporation des gouttes de pluie au cours de leur chute) pour donner finalement une relation linéaire entre l'altitude de prélèvement de la pluie et sa composition isotopique. Cet effet est un outil précieux de traçage de la recharge des eaux souterraines puisqu'il permet de déterminer l'altitude moyenne d'un bassin d'alimentation par simple mesure de la composition isotopique de l'eau d'une source. [12]

IV.13. Effet de quantité.

Plus un événement pluvieux est important, ou plus les précipitations mensuelles sont abondantes, plus l'eau est pauvre en isotopes lourds. C'est ce que l'on désigne par l'effet de quantité. On peut interpréter ce phénomène de deux façons différentes:

- Des températures basses sont responsables de la formation de nuages appauvris, et engendrent des pluies relativement abondantes.
- Plus la distance entre le nuage et le sol est grande, plus la goutte d'eau qui tombe a le temps de s'évaporer et de s'enrichir en isotopes lourds. Cet effet est moins intense quand la température ambiante est basse et quand la pluie est abondante (quand l'air est fortement saturé en eau). [12]

IV.14. Effet de continentalité.

De nombreuses études ont montré que la composition isotopique moyenne des précipitations tend vers des valeurs négatives quand on se déplace de la côte océanique vers l'intérieur des terres. Quand la pluie se déplace vers l'intérieur des terres, elle précipite progressivement par condensation, pendant que les molécules légères ont tendance à rester dans la phase vapeur. L'humidité de l'air est donc de plus en plus pauvre en isotopes lourds par rapport à l'océan (qui est d'ailleurs le standard). Cet effet de continentalité est souvent masqué par les variations saisonnières ou l'effet d'altitude par exemple. [12]

IV.15. Effet paléoclimatique.

Il est possible que des eaux infiltrées lors d'une période plus froide que la période actuelle (dernière période glaciaire par exemple) enregistre un appauvrissement des teneurs en isotopes lourds du fait de la baisse générale des températures.

Il peut être la cause de résultats d'analyse troublants pour des eaux anciennes, si l'on ne sait pas que l'eau s'est infiltrée au cours d'une période climatique différente de l'actuelle. [12]

IV.16. Les isotopes stables utilisés

Les isotopes naturels les plus utilisés sont les isotopes stables : hydrogène lourd ou deutérium (^2H) et l'oxygène 18 (^{18}O) qui sont des constituants de l'eau naturelle et sont de ce fait de bons éléments pour l'analyse du cheminement de l'eau et de l'origine de la recharge. Principalement, les méthodes de traçages isotopiques se basent sur le fait que la composition isotopique de l'eau contenue dans les aquifères est différente de celle de l'eau de pluie. On considère alors que l'eau contenue dans les sols est de l'eau "ancienne" tandis que l'eau de pluie est dénommée eau "nouvelle". Il est alors possible de déterminer les contributions d'eau ancienne et d'eau nouvelle à la recharge des aquifères. [17]

IV.17. Relation ^{18}O vs ^2H

L'analyse de la relation entre oxygène 18 et deutérium a porté sur 5 échantillons d'eau. Elle permet de mettre en évidence les eaux qui ont subi un processus de fractionnement isotopique, par condensation ou évaporation. L'intersection de cette droite avec la droite des eaux météoriques mondiale donne ainsi la possibilité de déterminer la composition isotopique de l'eau avant son évaporation [17]

Nous avons reporté nos résultats sur un diagramme deutérium versus oxygène 18 (figure 31). Dans ce diagramme, nous avons positionné la droite des eaux météoriques mondiale (DMM) définie par Craig en 1961 (World Météorique Water Line), qui s'établit comme suit :

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

L'ensemble des points échantillonnés se trouvent alignés sur la DMM suivant l'équation de droite de régression qui s'établit comme suit : $\delta^2\text{H} = 8.29\delta^{18}\text{O} + 11.9$ avec un $R^2 = 0.98$

Cette tendance de points situés sur la DMM traduit que les eaux n'ont subi aucun fractionnement isotopique, ce sont des eaux d'origine météorique qui se sont infiltrées lors de la période froide humide car les valeurs moyenne de $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ ayant rechargées ces aquifères sont plus négative. [17]

Un seul point se trouve légèrement décalé de la droite météorique mondiale dans le sens d'une faible évaporation. Ceci, indique que cette eau s'est évaporée dans la zone non saturée lors de son infiltration qui s'est faite d'une manière très rapide dans des circuits carbonatés très fracturés [17].

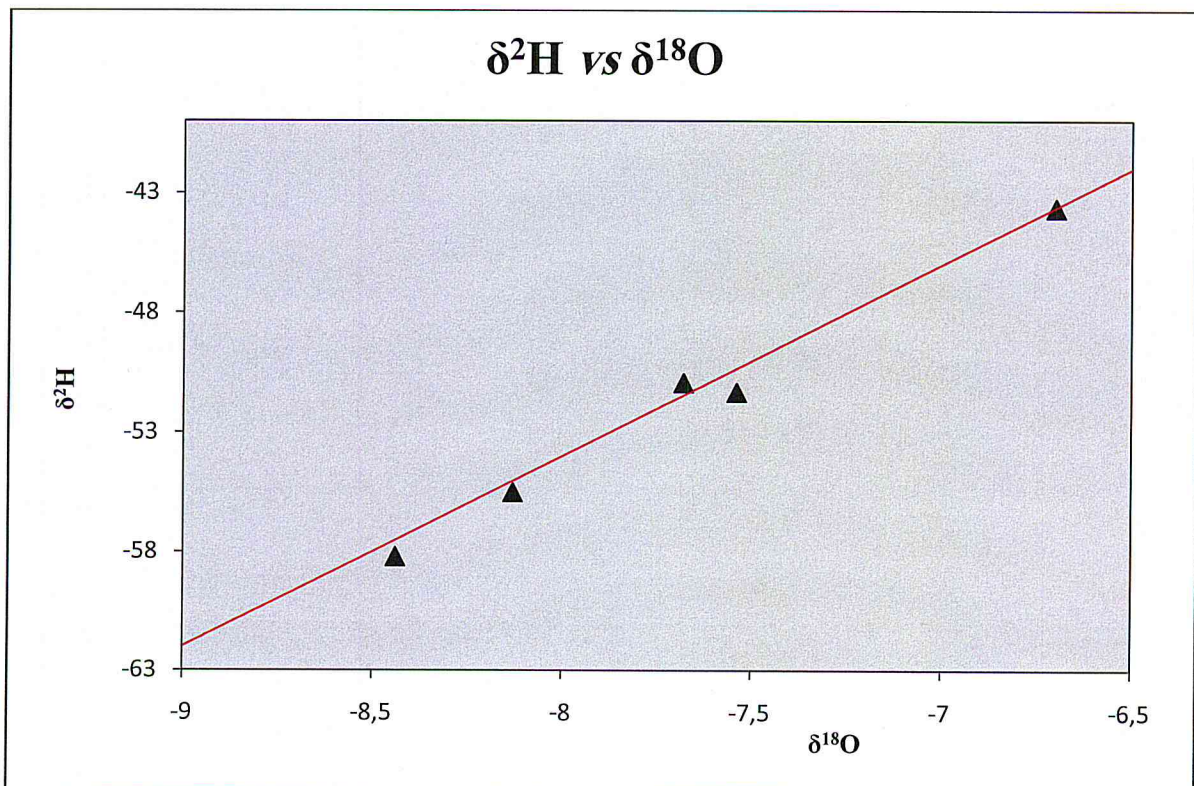


Figure 31 : Diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ pour les 5 points d'eau de bassin d'Aurès [17]

IV.18. Conclusion :

Les eaux de notre région n'ont subi aucun fractionnement isotopique, ce sont des eaux de pluies d'origine océanique qui se sont infiltrées lors de la période froide humide

Le seul point se trouve légèrement décalé de la droite météorique mondiale dans le sens d'une faible évaporation. Ceci, indique que cette eau s'est évaporée dans la zone non saturée lors de son infiltration.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les analyses physico chimique indique que:

- Notre zone d'étude à un climat semi-aride ($A=19,57$).
- Le faciès chimique général des eaux souterraines bu bassin d'Aurès montre une évolution depuis bicarbonatées calciques vers un faciès chloruré sodiques en passant par un faciès intermédiaire sulfaté calcique.

Les techniques isotopiques qui ont été appliqué en Algérie surtout durant les 15 dernières années ont contribué principalement à différencier plusieurs types d'eaux.

Au niveau du bassin d'Aurès, ces outils ont permis en outre, de mettre en évidence globalement et localement les informations suivantes:

- Les eaux de notre région n'ont subi aucun fractionnement isotopique.
- ce sont des eaux de pluies d'origine océanique (qui ce sont infiltrées lors de la période froide humide).

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : **Ould Ammar H, Chouarfia M, 2011-2012**, Activité Agricole et Qualité des Eaux du périmètre de Bouzouamel –Plaine de Mellagou- Bouhmama- Khenchela, Mémoire, Khenchela
- [2] : **Houha. B, 2007**, thèse de doctorat, Annaba
- [3] : **Osmani S, 2012**, Etude biogéochimique et isotopique de quelques sources du versant Nord du massif des Aurès (W.de Khenchela), Magistère, Khenchela
- [4] : **Bouballi S, 2009**, identification et mise en évidence des formations hydrogéologiques a la wilaya de Khenchela (nord –West) analyse et synthèse de données, magistère, Annaba
- [5] : **Debbakh A, 25/04/2012**, Qualité et dynamique des eaux des systèmes Lacustres en amont de l'Oued Righ, Mémoire, Ouargla
- [6] : **Debièche, 2002**, thèse de doctorat
- [7] : **Gouaidia L, 2008**, identification de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physique chimique des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est algérien, Thèse, Annaba
- [8] : **Philip O, 1996**, introduction à la géochimie des eaux continentales, Pris
- [9] : **L. Gourcy, E. Petelet-Giraud (BRGM), 2011**, Utilisation des outils isotopiques pour la délimitation des aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable, Document public, Paris.
- [10] : **Dakoure D, Septembre 1999**, composition isotopique des précipitations a Bobo-Dioulasso et relation avec les eaux souterraine des différentes unités de la formation sédimentaire et du socle du sud-ouest du Burkina Faso, paris
- [11] : **Cyril L, 26-29 octobre 2007**, Les proportions d'isotopes stables, outils de recherche aux multiples usages Journ_ee UdPPC, 2007, Université Bordeaux 1.
- [12] : **David E, 2002**, Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène, Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
- [13] : **Azzaz Isotope, 2002**, Etude isotopique.
- [14] : **Jean ndembo L, le 02 Décembre 2009**, apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques a la gestion de l'aquifère du mont amba, thèse, Congo

[15] : **Frédéric H, 22 Sep 2008**, fonctionnement hydrogéologique et archive paléoclimatique d'un aquifère profond méditerranéen, Etude géochimique et isotopique du bassin miocène de Valréas (Sud-est de la France), Thèse, Pays de Vaucluse

[16] : **J-M Greffion, Lycée A. Thierry, 2005**, Blois et T.Lhuillier, Lycée Claude de France, Romorantin.

[17] : **Houha. B. 2013** : apport de l'hydrochimie et de la géochimie isotopique a la connaissance des aquifère de l'Aurès (Cas de Khenchela) : Séminaire international des géosciences de l'université de Tébessa.

Annexes

Annexes

Tableau des précipitations.

Moi	sep	oct	nov	dés	jan	fév	mars	avril	mai	jun	jut	aout
2004	24,6	15	112,5	110,6	29	3,9	41,8	53,6	141,7	66,2	5,2	14,5
2005	42,2	43,2	24,8	46,1	5	43	35,9	36,4	14,9	46,1	10,8	19,9
2006	22,2	36,6	11,8	76,2	88,7	43,1	10,5	46,4	148,7	11	41,1	47
2007	122,4	16,8	13,4	49,1	8,1	17,4	10,3	76,7	30,4	38,1	12	20,7
2008	93,7	96,2	15,2	48,5	23,1	7,7	24,8	14,5	102,7	5,6	26,8	57,8
2009	72,7	17,9	3,6	23	145,3	17,8	74,9	149,6	53,4	6,3	20,7	29,7
2010	70,6	36,7	73,2	31,6	30,1	15	15,5	84	87,4	25,3	17	42,7
2011	18,1	64,9	13,2	42,3	26,9	86,2	98,8	46,3	128,5	57,6	28,1	15,4
2012	73,2	25,9	27,1	5	26,7	66,1	31,5	42,4	46,4	16,2	3,4	24,4
2013	134,8	37,4	31,7	28,6	37,4	22,3	50	37,2	38,1	0,4	39,8	57,4
2014	30	15,6	36,6	68,5	47,4	38	79,1	0,1	32,3	49,3	0	24
P(mm)	64	37	33	48	43	33	43	53	75	29	19	32

Tableau de température.

M	sept	oct	nov	dec	janv	févr	mars	avril	mai	jun	jut	aot
2004	27,5	26,9	13,2	10	11,3	14,9	16,9	18,3	20,7	28,4	33,5	34,9
2005	22,9	23,2	16,3	9,9	8,8	7,8	15,9	18,9	27,6	30,1	36	33
2006	27,1	25,3	17,2	11,1	7,9	11,1	17,6	22,6	26,4	31	33,4	32,2
2007	28	21,9	15,1	10,6	13,8	13,5	13,3	17,7	24,3	32	34,6	33,8
2008	27,5	21,3	13,6	10,2	12,6	14,2	15,8	21,6	24,8	29,5	35,9	33,9
2009	25,3	20,9	18,7	15,4	10,2	10,2	14,7	15,4	23,7	31,4	36,6	33,6
2010	27,7	22,5	16	14,3	12,3	14,8	18,2	21	22,7	30,4	34,4	34,2
2011	30,5	20,6	16	11,8	13,1	10,4	14,4	20,5	22,8	28	34,4	34,5
2012	28,4	24,8	18,6	13,4	10,2	-1	15,9	19,8	26,2	34,4	36,3	36,7
2013	27,4	11,4	14,3	11,1	11,4	10,8	17,8	22	24,8	29,9	34,2	32,2
2014	31,2	24,8	19	10,7	12,3	14,4	13	20,7	25,4	29,7	34,6	35,6
T°Max	28	22	16	12	11	11	16	20	24	30	35	34

m	sept	oct	nov	dec	janv	févr	mars	avril	mai	jun	jut	aot
2004	14,1	13,1	5	3,7	2,2	3,7	5,8	6,6	9,1	13,9	17,4	19,8
2005	13,7	11,2	6,3	2,3	-0,4	0,9	5,7	7,6	12	16,3	19,8	12,4
2006	13,6	12,7	6,7	3,2	0,6	1,7	4,7	9,1	13,7	17,2	17,6	17,6
2007	14,8	11,6	5	2,6	2,7	4,2	3,6	7,9	11,2	17,9	17,9	18,8
2008	15,8	11,3	4,7	1,4	1,8	2	4,5	7,8	12,5	14,9	20,1	19
2009	14,6	10	6,3	5,1	2,1	1,5	3,6	5	9,9	14	19,6	18,3
2010	14,8	10,4	6,2	3,3	2,5	4,6	5,6	8,9	9,7	15	18,3	18,5
2011	16,3	10	7	3,1	2,5	1,5	4,1	7,9	9,9	14,1	19,2	18,6
2012	15,4	12,6	7,7	2,2	1,2	7,6	4,1	7,7	11	17,7	19,8	20,4
2013	16,1	2,6	5,6	2,1	2,6	1,1	6,3	8,2	10,5	13,3	18,5	17,3
2014	17,7	12,8	8,1	2,8	2,6	3,2	3,7	7,1	10,6	15,4	18,7	19,5
T°min	15	11	6	3	2	3	5	8	11	15	19	18

M+m/2	Sept	Oct	Nov	Déc	janv	févr	mars	avril	Mai	jun	jut	Aout
2004	20,8	20	9,1	6,85	6,75	9,3	11,35	12,45	14,9	21,15	25,45	27,35
2005	18,3	17,2	11,3	6,1	4,2	4,35	10,8	13,25	19,8	23,2	27,9	22,7
2006	20,35	19	11,95	7,15	4,25	6,4	11,15	15,85	20,05	24,1	25,5	24,9
2007	21,4	16,75	10,05	6,6	8,25	8,85	8,45	12,8	17,75	24,95	26,25	26,3
2008	21,65	16,3	9,15	5,8	7,2	8,1	10,15	14,7	18,65	22,2	28	26,45
2009	19,95	15,45	12,5	10,25	6,15	5,85	9,15	10,2	16,8	22,7	28,1	25,95
2010	21,25	16,45	11,1	8,8	7,4	9,7	11,9	14,95	16,2	22,7	26,35	26,35
2011	23,4	15,3	11,5	7,45	7,8	5,95	9,25	14,2	16,35	21,05	26,8	26,55
2012	21,9	18,7	13,15	7,8	5,7	3,3	10	13,75	18,6	26,05	28,05	28,55
2013	21,75	7	9,95	6,6	7	5,95	12,05	15,1	17,65	21,6	26,35	24,75
2014	24,45	18,8	13,55	6,75	7,45	8,8	8,35	13,9	18	22,55	26,65	27,55
T°Moy	21	16	11	7	7	7	10	14	18	23	27	26

Mois	sept	oct	nov	Déc	jan	fév	mars	avril	mai	jun	jut	aout
M	27,6	22,14	16,18	11,68	11,26	11	15,77	19,86	24,49	30,43	34,9	34,05
m	15,17	10,75	6,24	2,89	1,85	2,91	4,7	7,62	10,92	15,43	18,81	18,2
M-m	12,43	11,39	9,94	8,79	9,41	8,09	11,07	12,24	13,57	15	16,09	15,85
M+m/2	21,385	16,445	11,21	7,285	6,555	6,955	10,235	13,74	17,705	22,93	26,855	26,125