

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Mémoire de Master Académique

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME

**ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA NAPPE DU DEVONIEN
INFERIEUR DANS LA VILLE D'ILLIZI**

Présenté par

M. BAKELLI Omar & M. CHALIALI Moussa

Soutenu publiquement le 23/06/2018

Devant le jury :

Président : FENNAZI Bilal

Promoteur : ZEDDOURI Aziz

Examineur : BELLAOUER Aziz

M. A. A Univ. Ouargla

Pr. Univ. Ouargla

M. C. B Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2017/2018

A decorative border of pink flowers, including large and small blossoms, frames the text. The flowers are scattered along the top, bottom, and sides of the page.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à l'esprit de mon
Très cher père et grand-père,
Qui m'ont toujours encouragé, leur mémoires restent toujours dans nos
Cœurs, que dieu les accueille dans son vaste paradis.*

A ma très chère mère à ma grand-mère, et à mon épouse les sources

De mon courage et mon inspiration.

A tous mes frères et sœurs, à qui je souhaite le bonheur,

À toute ma famille de proche et de loin,

Je tiens à le dédier aussi à mes amis sans exception,

Et à tous ceux qui me connaissent.

A tous

Je dédie ce travail

Omar Bakelli

A decorative border of pink flowers, including large five-petaled blossoms and smaller buds, is arranged around the perimeter of the page. The flowers are rendered in shades of pink and purple with gold centers, set against a black border.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à l'esprit de mon

Très cher père et grand-père, ma grand-mère

Qui m'ont toujours encouragé, leur mémoires restent toujours dans nos

Cœurs, que dieu les accueille dans son vaste paradis.

A ma très chère mère les sources

De mon courage et mon inspiration.

A tous mon frère et mes sœurs, à qui je souhaite le bonheur,

À toute ma famille de proche et de loin,

Je tiens à le dédier aussi à mes amis sans exception,

Et à tous ceux qui me connaissent.

A tous

Je dédie ce travail

Moussa CHALIALI

Remerciements

Tout d'abord nous remercions le bon Dieu de nous avoir donné le courage pour réaliser ce modeste travail.

Au terme de ce travail. Il est très agréable de remercier :

Professeur ZEDDOURI Aziz, notre promoteur pour son suivi pas à pas de notre travail, ainsi que pour ses apports de critiques et remarques qui nous ont servis de bons guides pour la réalisation de ce mémoire.

Monsieur MEZIZANE Zahir pour ses conseils, son encouragement et son aide précieuse dans le choix du sujet traité. Il nous a fait bénéficier de sa richesse en connaissances géologiques sur le secteur étudié.

Toute l'équipe de l'exploration (Sonatrach) et en particulier à : Mr.Kidari, Mr.Laissaoui, Mr.Themina pour leur soutien, leur patience et leurs conseils.

Tout le corps enseignant du département science de la terre et de l'univers à qui nous devons le grand respect pour leur modestie et leur richesse en connaissance et qui nous ont fait bénéficier de leur expérience.

Docteur Benferdjallah et Monsieur Omar pour leur aide et leurs conseils.

Nos collègues, Hamza, Houssam, Mohammed et Ilyes pour leurs encouragements et le soutien moral dans toute situation.

Merci à tous

Merci pour tout

Omar BAKELLI & Moussa CHALIALI

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Sommaire..... | I |
| Liste des figures..... | II |
| Liste des tableaux..... | II |
| Liste des abréviations..... | III |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

| | |
|---|----|
| I.1. Situation géographique et découpage administratif..... | 2 |
| I.2. Le climat..... | 4 |
| I.3. La végétation..... | 8 |
| I.4. Le relief et l'hydrographie..... | 9 |
| I. 5.1. Le Relief..... | 9 |
| I.5.2. Le réseau hydrographique..... | 9 |
| I.5. Contexte géologique..... | 9 |
| I.5.1. Les formations du socle..... | 9 |
| I.5.2. Les formations sédimentaires | 9 |
| I.6. Lithostratigraphie du bassin d'ILLIZI | 9 |
| I.7. Contexte tectonique..... | 14 |
| I.8. Contexte hydrogéologique..... | 19 |

Chapitre II : Matérielles et Méthodes

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 21 |
| II.2. Partie de travaux au terrain..... | 21 |
| II.2.1. Conditions et mode d'échantillonnage..... | 21 |
| II.2.2. Matériels utilisées..... | 22 |
| II.3. Partie de travaux de laboratoire..... | 24 |

| | |
|--|----|
| II.3.1. Mesure des paramètres physiques..... | 24 |
| II.3.2 Mesure et analyses des paramètres chimiques..... | 25 |
| II.4 Outils informatiques..... | 29 |
| II.4 .1 Surfer..... | 29 |
| II.4 .2 Statistica.v6.1 (Stat Soft France, 2003)..... | 29 |
| II.4 .3 PhreeqC v 2.18 (Parkhurst and Appelo, 1990)..... | 29 |
| II.4 .4 Le Diagramme de Piper..... | 30 |
| II.4 .5 Diagramme (Simler, 2009)..... | 30 |

Chapitre III : Résultats et discussions

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction..... | 31 |
| III.2. Piézométrie..... | 31 |
| III.3. Hydrochimie..... | 31 |
| III.3.1 Etudes des paramètres physico-chimiques..... | 32 |
| III.3.2 Les éléments indésirables..... | 35 |
| III.4. Interprétation des résultats des analyses chimiques des éléments majeurs..... | 35 |
| III. 4.1. Identification des faciès chimiques des eaux..... | 36 |
| III.4.1.1. Diagramme de Piper..... | 36 |
| III. 4.1.2. Diagramme de Schoeler Berkaloff..... | 37 |
| III. 5. Origine de chimisme des eaux..... | 38 |
| III. 5.1 Etude des relations inter-éléments..... | 38 |
| III. 5.1.a Le couple Ca-Cl..... | 39 |
| III. 5.1.b Le couple Ca -SO4..... | 40 |
| III. 5.1.c Le couple Mg-SO4..... | 40 |
| III.5 .1.d Le couple Na-SO4..... | 41 |
| III.5 .1.e Le couple K-SO4..... | 42 |
| III.5 .1.f Le couple Mg-Cl..... | 42 |
| III.5 .1.g Le couple Na-Cl..... | 43 |

| | |
|--|----|
| III.5 .1.h Le couple Cl-SO ₄ | 43 |
| III.6 Indice d'échange de base (i e b)..... | 44 |
| III.7.Aptitude des eaux à l'irrigation..... | 44 |
| III.7.1 Diagramme de REVERSIDE..... | 44 |
| III. 7. 2 Le pourcentage de sodium (classification de WILCOX)..... | 46 |
| III.8. Potabilité chimique des eaux..... | 47 |
| III.8.1 Les normes de potabilité..... | 47 |
| III.8.2 Application sur la zone d'étude..... | 48 |
| III.9 Conclusion..... | 49 |
| Conclusions générales | 51 |
| Références bibliographiques | 53 |
| Résumé | PC |

LISTE DES FIGURES :

| N° | Liste des figures | Page |
|-----------|--|-------------|
| I.01 | Situation du bassin d'ILLIZI à l'échelle régionale (Sonatrach, 2003) | 2 |
| I.02 | Situation géographique du secteur d'étude (ANRH Ouargla) | 3 |
| I.03 | Températures (moyennes, minimales, maximales) mensuelles (2008_2017) | 5 |
| I.04 | Moyennes mensuelles de l'évaporation (2008_2017) | 5 |
| I.05 | Précipitation moyennes mensuelles (2008_2017) | 6 |
| I.06 | Vitesse du vent moyen mensuel (2008_2017) | 7 |
| I.07 | Valeurs moyennes mensuelles de l'insolation (2008_2017) | 8 |
| I.08 | Coupe géologique de bassin d'illizi (Sonatrach /exploration) | 10 |
| I.09 | Colonne lithologique du bassin d'illizi (Sonatrach /exploration) | 13 |
| I.10 | Esquisse structurale schématique de la synéclyse (Sonatrach /exploration) | 15 |
| I.11 | Schéma structural du bassin d'illizi. (Sonatrach /exploration) | 17 |
| II.01 | Plan de situation des puits | 22 |
| II.02 | Sonde électrique sonore | 22 |
| II.03 | Multi-paramètres IDS 3510 pour mesure la conductivité (C.E) et pH | 23 |
| II.04 | Mesurer la conductivité (C.E) et pH au le Multi-paramètres HI 9829 | 24 |
| II.05 | Dosage de Calcium Ca^{2+} et dureté de l'eau TH | 25 |
| II.06 | Spectrophotomètre à flamme | 26 |
| II.07 | Titrino 848 de marque Metrohm II | 26 |
| II.08 | Dosage de sulfate par le spectrophotomètre atomique | 28 |
| III.01 | Carte piézométrique de la nappe du dévonien inférieur de la ville d'illizi | 32 |
| III.02 | Diagramme de Piper | 37 |

| | | |
|--------|----------------------------------|----|
| III.03 | Diagramme de Schöeller-Berkaloff | 38 |
| III.04 | Le couple Ca –Cl | 39 |
| III.05 | Le couple Ca –SO ₄ | 40 |
| III.06 | Le couple Mg-SO ₄ | 41 |
| III.07 | Le couple Na-SO ₄ | 41 |
| III.08 | Le couple K-SO ₄ | 42 |
| III.09 | Le couple Mg - Cl | 42 |
| III.10 | Le couple Na-Cl | 43 |
| III.11 | Le couple Cl-SO ₄ | 43 |
| III.12 | Diagramme de Riverside | 45 |
| III.13 | Diagramme de Wilcox | 46 |

LISTE DES TABLES :

| N° | Liste des tables | Page |
|-----------|--|-------------|
| I.01 | Température Moyennes mensuelles (2008_2017). (Station d'Illizi) | 4 |
| I.02 | Moyennes mensuelles de l'évaporation (2008_2017). (La station d'Illizi) | 5 |
| I.03 | Moyennes mensuelles de la pluviométrie (2008_2017). (La station d'Illizi) | 6 |
| I.04 | La vitesse du vent moyen mensuel (2008_2017). (La station d'Illizi) | 7 |
| I.05 | Valeurs Moyennes mensuelles de l'insolation (2008-2017). (Stat d'Illizi) | 8 |
| I.06 | Phases tectoniques majeures. (D'après Boujemaa ; 1987) | 18 |
| I.07 | Les principales ressources en eau exploitées à W.Illizi (ANRH d'Ouargla) | 20 |
| III.01 | Paramètres statistiques des variables physico-chimiques des eaux de la nappe | 33 |
| III.02 | Matrice de corrélation entre les éléments physicochimiques | 39 |
| III.03 | Les cinq classes des eaux d'après Wilcox | 47 |
| III.04 | Normes Algériennes de potabilité | 48 |
| III.05 | Classification la potabilité des eaux d'après la norme algérienne | 48 |

LISTE DES ABREVIATIONS :

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

A.E.P : Alimentation en eau potable.

AGS : Argilo-gréseux supérieur

AFNOR : Association française de normalisation

C.T : Complexe Terminal.

C.I : Continental Intercalaire.

Evap : Evaporation en (mm).

P : Précipitation en (mm)

V : Vitesse des vents en m/s

Ins : Insolation en heure (h)

hr : l'humidité relative (%).

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

pH : Potentiel d'Hydrogène

SAR: Sodium Absorption Ratio

CE: Conductivité électrique

REPSOL : Compagnie pétrolier espagnol

TA : Titre Alcalimétrique

TAC : Titre Alcalimétrique Complet

T°C : Température en (°C).

TH : Titre Hydrotimétrique.

T.F.T : Tin Fouyé Tabankort

LRSPGA: Laboratoire des réservoirs souterrains : pétrolier, gazier et aquifère

UKMO : Université KASDI Merbah Ouargla

CMA : Concentration Maximale Admissible

Introduction Générale

L'eau est un élément naturel d'une importance primordial, indispensable à toute forme de vie, l'eau est une richesse nécessaire à toutes activités humaines, c'est un facteur de production déterminant dans le développement durable Il devient de plus en plus au centre des intérêts stratégiques. La ville d'Illizi comme la plupart des régions de Sahara utilise les eaux des nappes souterraines comme principale source pour l'alimentation (AEP) et l'irrigation. Ce qui donne une forte importance à l'étude quantitative et qualitative de ces eaux de la nappe souterraine, L'objectif de cette étude est de :

- 1) Regrouper et exploiter les données des différents études géologiques et hydrogéologiques réalisés à l'échelle de la région
- 2) Faire une description initiale sur le modèle hydrogéologique de la nappe du dévonien inférieur sur la ville d'Illizi,
- 3) Déterminer et interpréter les caractéristiques physicochimiques de la nappe et les faciès dominantes,
- 4) Qualifiée les eaux de la nappe pour la potabilité et pour l'irrigation.

Pour aborder cette thématique, ce travail est subdivisé en trois chapitres :

Chapitre I : où nous exposons la zone d'étude situation géographique géomorphologique, géologique, hydro climatologique, et hydrogéologique.

Chapitre II : où on fait une présentation des différents matériels et méthodes utilisées dans ce projet de mémoire.

Chapitre III : Résultats et discussions dans cette partie nous avons réalisé une carte piézométrique de la nappe afin de reconnaître l'hydrodynamisme de l'aquifère selon les caractéristiques géométriques et lithologiques de la formation aquifère, ensuite et sur la base des analyses physicochimiques réalisées sur les échantillons d'eau prélevés sur le terrain et analysés au laboratoire du centre de recherche scientifiques de l'université Kasdi Merbah Ouargla UKMO Pole 3, nous avons mené une étude hydrochimique en faisant le lien entre l'évolution du faciès chimique des eaux de nappe dévonien inférieur dans la région d'Illizi et le sens d'écoulement des eaux. Par ailleurs, nous réalisons des tests d'aptitude de ces eaux à l'AEP et à l'irrigation.

Et enfin, une conclusion générale qui résume les travaux réalisée.

I.1 Situation géographique et découpage administrative :

a) Situation géographique régionale (Bassin d'Illizi):

Le bassin d'illizi est situé dans la partie Sud-est du Sahara Algérien, il couvre une superficie d'environ 110000 km², il est compris entre 26° et 29° de latitude Nord et entre 6° et 10° de longitude Est. Ce bassin est positionné entre les moles d'Amguid et Tihemboka, il est bordé par le Hoggar au Sud et par la dépression mésozoïque de Berkine au Nord (Figure I.01).

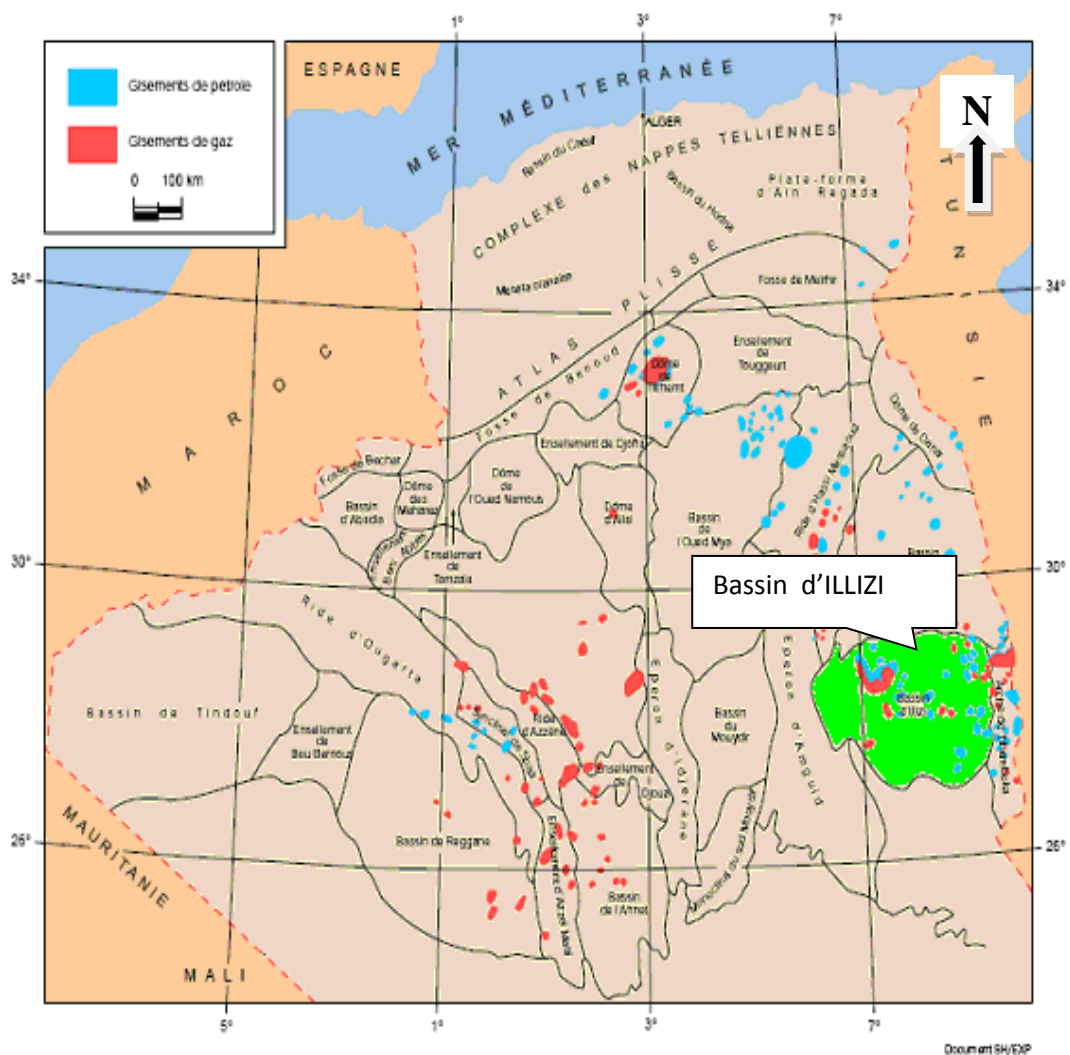


Figure I.01: Situation du bassin d'ILLIZI à l'échelle régionale (Sonatrach, 2003)

b) Situation géographique de la ville d'Illizi :

Le secteur d'étude se situe dans la ville d'Illizi qui se trouve au Sud – est de l'Algérie, elle couvre pratiquement la partie centrale de la wilaya et se prolonge au-delà des frontières algériennes vers le territoire Libyen (fig. I.02) Il est limité :

-Au Nord par la région de In amenas et bordj Omar Driss.

-Au Sud par les environs de Djanet et Bordj El Houes.

-A l'Ouest par la wilaya Tamanrasset.

-A l'Est par la frontière de la Libye.

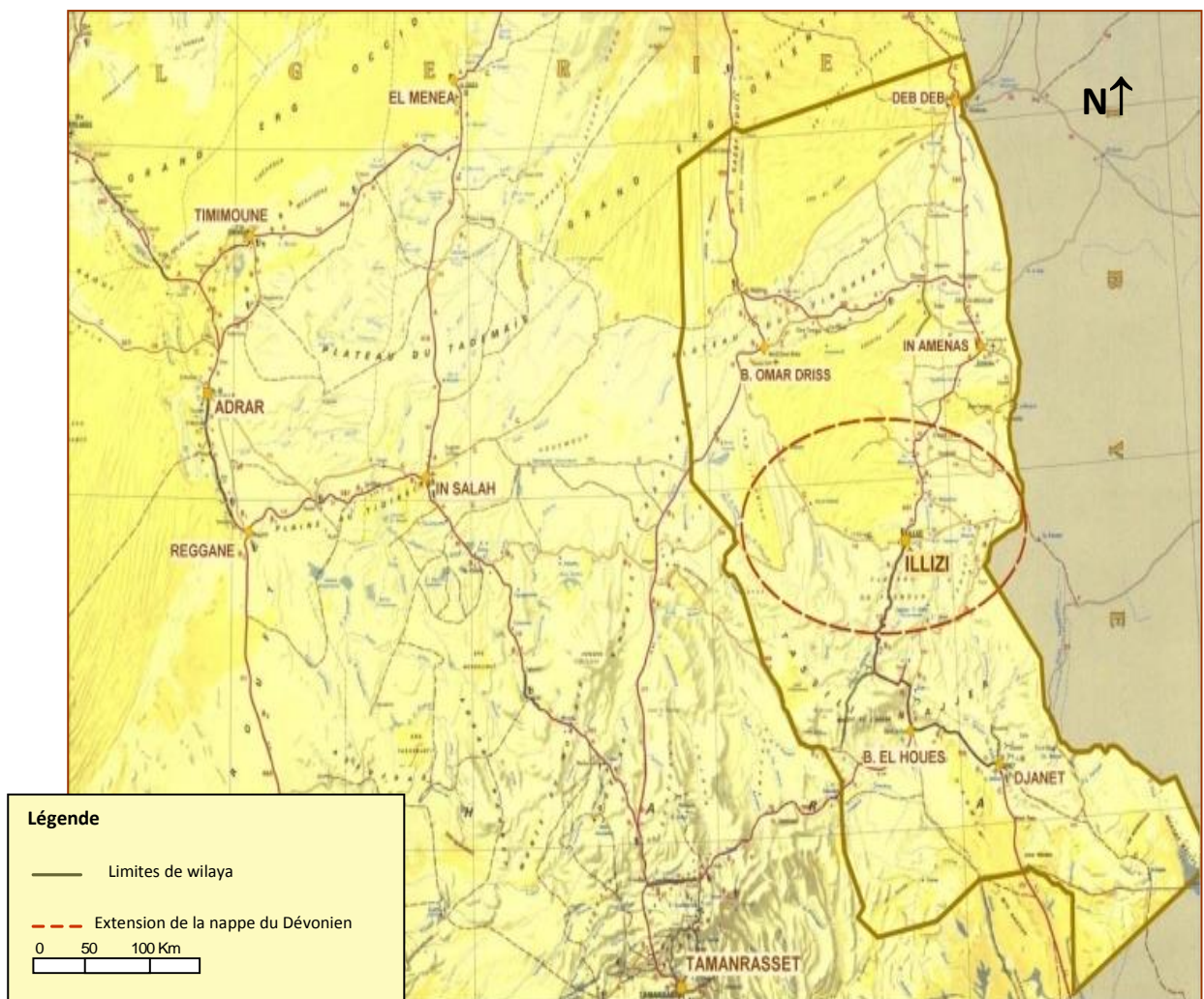


Figure I .02: Situation géographique de la ville d'Illizi (ANRH Ouargla)

I.2 Climat :

La région d'Illizi est située dans une zone appartenant à l'étage bioclimatique saharien désertique chaud. D'après les données climatiques de la station d'Illizi. Ces données indiquent que le climat est rigoureux et caractérisé par l'écart de températures entre le jour et la nuit essentiellement durant la période allant d'Octobre à Avril.

Cette sévérité du climat et en plus de la pluviosité quasi négligeable pendant l'année ajoutée en plus au relief très varié, entraîne des répercussions sur la biodiversité du milieu. Il y a lieu de relever quelques particularités :

I.2.1 La Température :

La température est un facteur important quand il est en interaction avec d'autres facteurs climatiques.

Tableau I.01 : Température Moyennes mensuelles (2008_2017). (Station d'Illizi)

| | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tmax (°C) | 39,53 | 33,98 | 27,44 | 21,75 | 20,95 | 24,10 | 28,59 | 33,51 | 38,65 | 41,67 | 42,16 | 41,26 |
| Tmin (°C) | 24,16 | 18,97 | 12,10 | 6,67 | 5,20 | 7,85 | 12,21 | 17,28 | 22,87 | 26,25 | 26,47 | 25,71 |
| Tmoy (°C) | 31,85 | 26,48 | 19,77 | 14,21 | 13,08 | 15,97 | 20,40 | 25,40 | 30,76 | 33,96 | 34,31 | 33,48 |

C'est un facteur qui détermine le climat d'une région. Pour notre étude, il existe deux périodes distinctes allant de Novembre à Avril pour la période froide et de Juin à Septembre pour la saison chaude. (Tableau I.01).

La température minimale est de 5 °C tandis que la température maximale est de + 26°C. Les nuits sont glaciales (froid sec) et les jours sont chauds avec des vents de sable particulièrement durant la période Février-Mars. Le reste de l'année, c'est-à-dire de Mai à Septembre, c'est la période des grandes chaleurs avec une moyenne maximale de température de +42°C et des pics allant jusqu'à +47°C (Figure I.01).

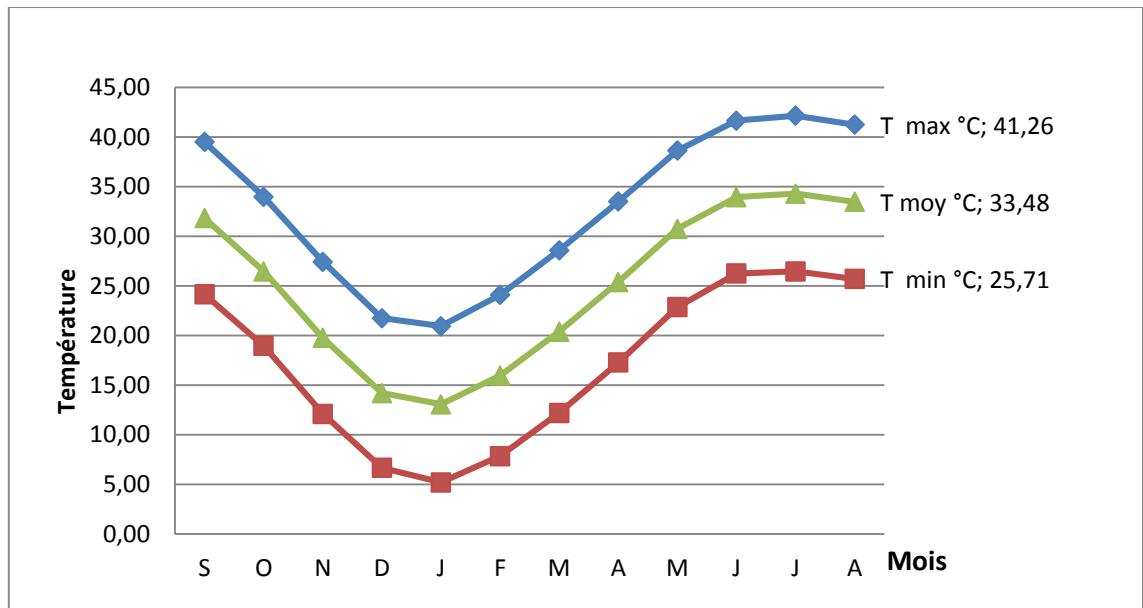


Figure I.03: Températures (moyennes, minimales, maximales) mensuelles (2008_2017)

I.2.2 Evaporation :

On dispose d'une série des évaporations moyennes mensuelles qui englobe la période (2008_2017) avec une valeur min de 195.6mm en Janvier et max de 646.6mm en Juillet, en générale la région est caractérisée par des valeurs évaporations très élevées (Tableau I.02).

Tableau I.02 : Moyennes mensuelles de l'évaporation (2008_2017). (La station météorique d'Illizi)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Evap mm | 544.6 | 392.2 | 281.2 | 222.4 | 195.6 | 236.4 | 290.2 | 387.8 | 537.8 | 590.6 | 646.6 | 595.2 |

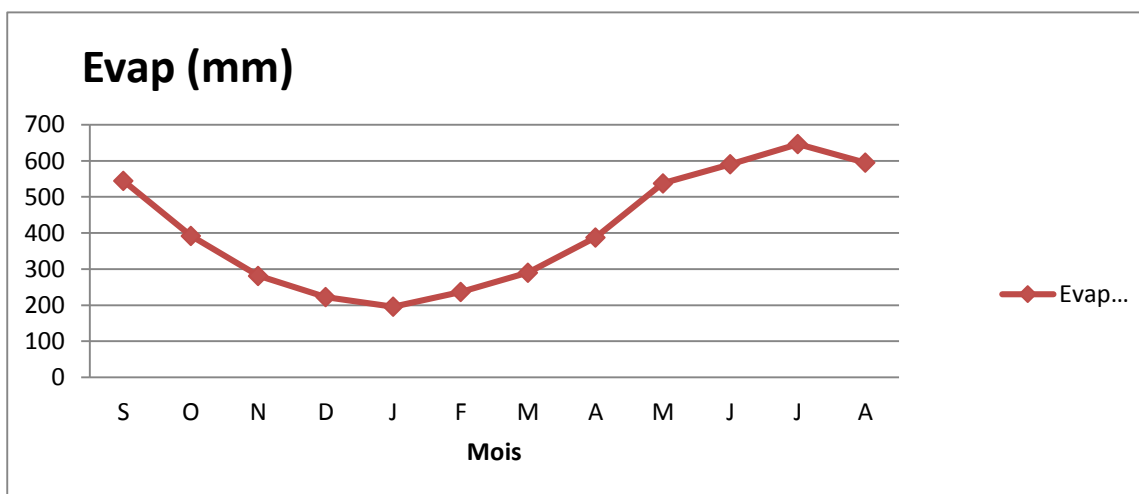
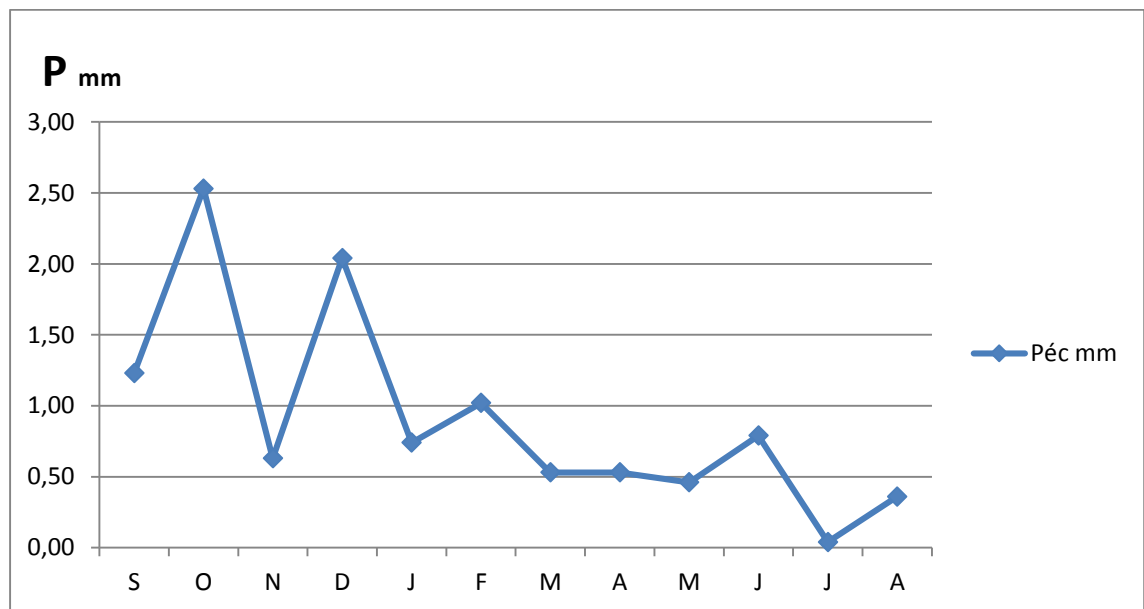


Figure I.04: Moyennes mensuelles de l'évaporation (2008_2017)

I.2.3 Précipitation :**Tableau I.03 :** Moyennes mensuelles de la pluviométrie (2008_2017). (La station d'Ilizi)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Total |
|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| P mm | 1,3 | 2,53 | 0,63 | 2,04 | 0,74 | 1,02 | 0,53 | 0,53 | 0,46 | 0,79 | 0,04 | 0,36 | 10.9 |

On dispose d'une série d'observations mensuelles qui englobe la période (2008_2017) tableau I.03 et figure I.05, Elles sont faibles et irrégulières sur toutes les saisons, et la sécheresse prédomine. Sur des données récoltées sur 30 années, Les précipitations moyennes sont de respectivement 1 mm pour la saison froide et moins de 1mm pendant la saison chaude (Juillet, Aout). Exceptionnellement, la région a connu quelques pluies importantes et averses torrentielles en 1976 (156.8mm), en 1994 (66.8mm) :

**Figure I.05:** Précipitation moyennes mensuelles (2008_2017)**I.2.4 L'écoulement :**

Les pluies de forte intensité tombant sur la région provoquent des écoulements sur les reliefs engendrant des crues plus ou moins importantes soumissent la région a d'important écoulements et parfois particulièrement violents, occasionnant d'importants dégâts lors de leur passage comme celui de février 2006.

I.2.5 Les vents :

Tableau I.04 : la vitesse du vent moyen mensuel (2008_2017). (La station d'Ilizi)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| V m/s | 9,34 | 8,94 | 7,87 | 7,49 | 7,88 | 8,81 | 9,75 | 10,12 | 11,16 | 11,16 | 10,20 | 9,92 |

Les vents sont très variables et les vitesses moyennes sont inférieures à 7m/s. Les vents calmes représentent 15% .les vents dominants sont orientés Nord-est .Ces vents sont souvent chargés de particules agressives (dépôts) qui exercent une érosion caractéristique des régions désertiques sahariennes. Les vents violents de type sirocco (Nord, Sud et Est) se situent généralement en période sèche avec un gradient de 11 m/s en moyenne. Pendant la période froide ou humide, c'est prédominance des vents calmes de direction Ouest et Nord-Ouest.

Les autres phénomènes associés aux vents sont les tempêtes de sable qui sont des particules soulevées par les vents forts et transportées très loin au Nord et au Sud et occasionnant une diminution de la visibilité et rendant l'air irrespirable et en paralysant les activités notamment le transport terrestre et aérien. L'autre phénomène s'appelle la brume de sable qui attient 6 jours en moyenne par an et la chasse de sable avec une moyenne de 4 jours par ans.

Le tableau I.04 représente les moyennes mensuelles de la vitesse du vent durant la période (2008_2017).

La période de la plus venteuse est Mars /Juin avec une vitesse de 9-11 m/s. (figure I.06)

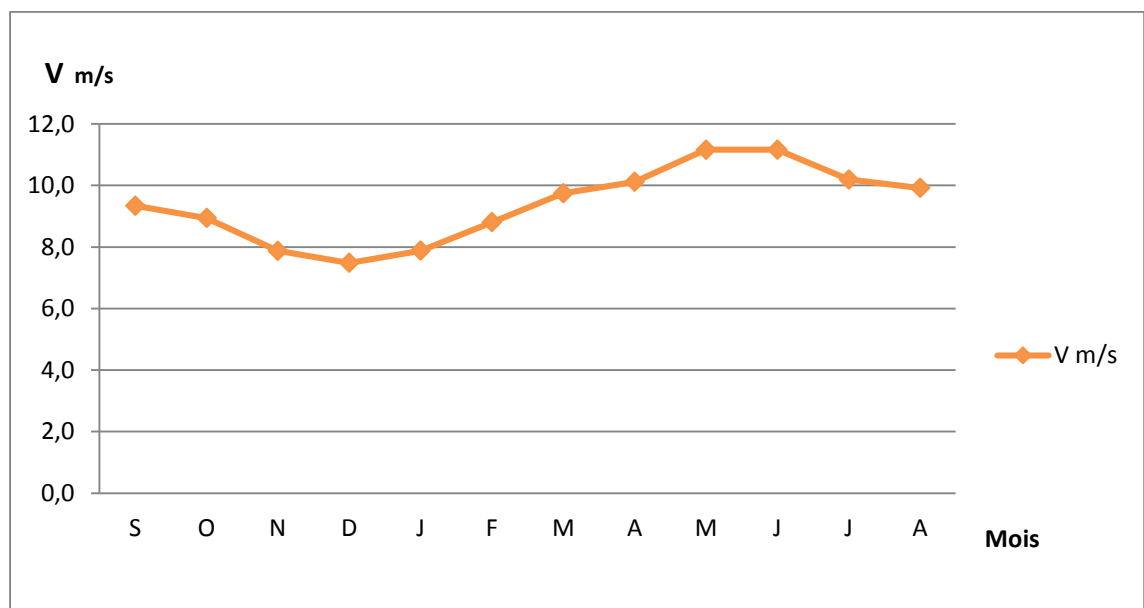


Figure I.06: vitesse du vent moyen mensuel (2008_2017)

I.2.6 Insolation :

Des périodes d'insolation trop élevée sont enregistrées sur la région d'Ilizi variant entre une valeur minimale de 232h au mois de Mai et une valeur maximale de 356h au mois de Juillet, voir tableau I.05,

Tableau I.05 : Valeurs Moyennes mensuelles de l'insolation (2008-2017). (Stat d'Ilizi)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ins :h | 284,1 | 270,4 | 258,7 | 268,2 | 264,8 | 252,0 | 263,1 | 232,3 | 289,4 | 301,1 | 356,1 | 346,1 |

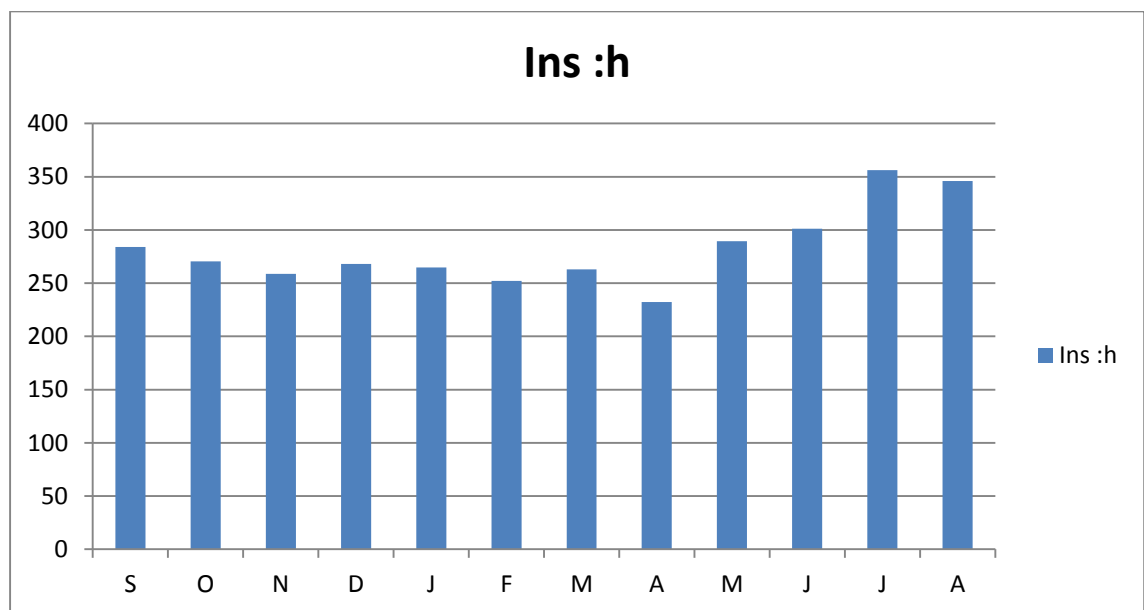


Figure I.07: Valeurs moyennes mensuelles de l'insolation (2008_2017)

I.3 Végétation:

Les conditions naturelles (structure du sol, climat aride, faiblesse des eaux de surfaces) ne permettent pas l'existence d'une couverture végétale importante à l'exception des oueds et aux alentours des gueltas.

La flore du Tassili a été bien étudiée, on trouve de nombreuses espèces arbustives dans les vallées en particulier des peuplements d'acacias. L'espèce la plus connue est celle du Cyprès de Duprez (*Cupressus du preziana*) dont il reste un peu plus d'une centaine d'exemplaires (B.R.L, 1998).

I.4 Le Relief et Hydrographie :

I.4.1 Le Relief :

Quatre principales formes géomorphologiques caractérisant la wilaya sont:

- Le relief dunaire présenté par le grand erg oriental au Nord, il couvre la majeure partie des communes d'In amenas (erg Issaouene) et Deb Deb (erg Bourahreht). Au centre, le grand erg oriental domine particulièrement la commune d'illizi (erg Admer) et le Sud d'In Amenas (erg Tihodane). Au Sud, il chevauche sur la commune de Bordj el houes et de Djanet.
- Le relief de plateau s'observe au Nord par la hamada de Tinhert et le plateau des Tassilis au Sud.
- Le relief de montagne s'allonge et localisé notamment au centre au Sud dans la direction NO/SE
- Le relief de plaine couvre une faible portion et principalement celle la plaine d'Admer entre les communes de Djanet et Bordj el Houes.

I.4.2 Le Réseau Hydrographique :

Les eaux de surface sont négligeables en raison de la rareté, l'irrégularité et la faiblesse des précipitations qui conditionnent en grande partie l'écoulement de surface naturellement endoréique. La région est sillonnée par un nombre important d'Oueds principalement ceux d'Illizi, Djanet, Imihrou, Afra, Oued Samen, Tassat etc..., dont l'écoulement reste temporaire résultant de pluie intense.

I.5 Contexte Géologique :

I.5.1 Les Formations du Socle :

D'âge Précambrien qui affleure à Djanet et Bordj Omar Driss; Celui-ci se subdivise en deux grandes séries métamorphiques séparées par une importante discordance. Il s'agit de :

- Le Suggarien : Schiste très métamorphosé.
- Pharusien : Conglomérats, quartzites, schistes et méca-shistes.

I.5.2 Les Formations Sédimentaires :

Cette couverture est représentée essentiellement du bas en haut par : le paléozoïque (dont le Combro-Ordovicien, le Gothlandien, le Dévonien et le Carbonifère) et le mésozoïque (dont le Trias, le Jurassique et le Crétacé). Dans les régions d'In Aménas et Stah, l'ensemble (Jurasso-Triasique) est appelé série de Zarzaitine, tandis qu'à Ohanet et Stah, (le Malm,

le Barrémien et l'Albien) sont groupés sous le nom de la série de Taouratine. Par ailleurs, les deux séries forment localement ce qu'on appelle le Continental Intercalaire.

1.6 Lithostratigraphie du bassin d'ILLIZI :

La couverture sédimentaire du bassin d'illizi repose en discordance majeure sur la surface Infra-tassilienne qui nivelle un socle plissé constitué de roches sédimentaires métamorphiques, cristallophylliennes et volcanique (figure I.08).

La coupe lithologique type du bassin d'illizi est constituée d'une série sédimentaire globalement détritique allant du Cambrien au Paléogène dans laquelle les terrains Paléozoïques occupent les deux tiers de l'épaisseur totale de la série. La lithostratigraphie des séries Paléozoïques Tassilienne a été établie grâce aux études réalisées sur les affleurements par Beuf et Al, (1963, 1971), Dubois (1967) et Biju-Duval et Al (1968).

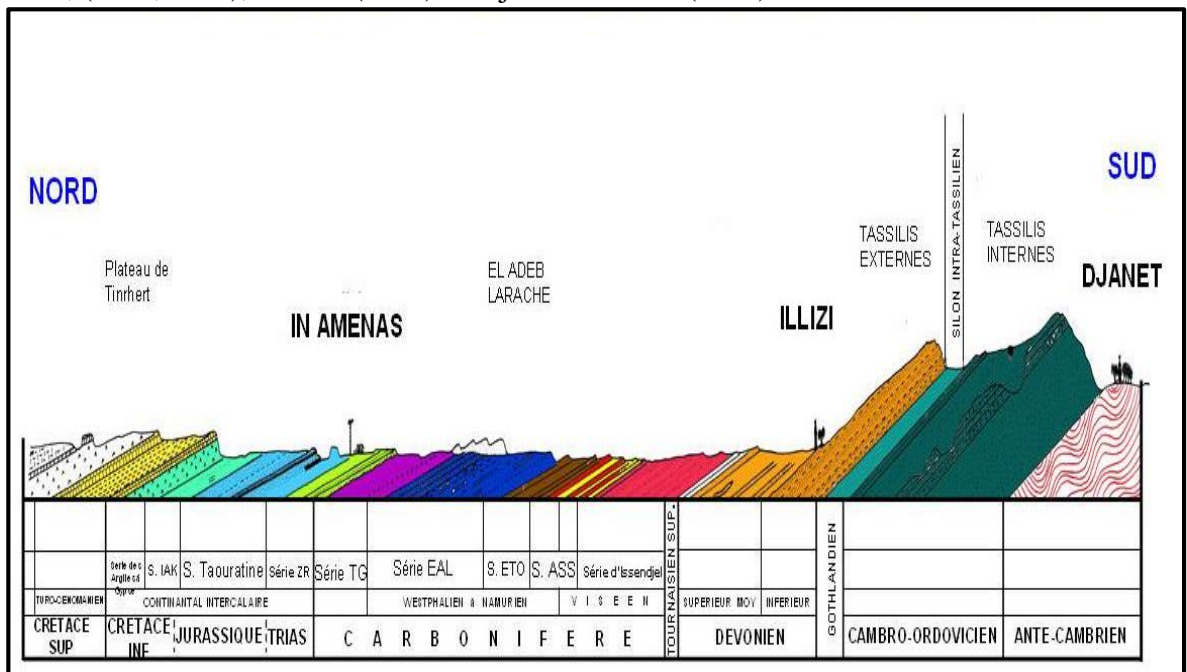


Figure I .08 : Coupe géologique de bassin d'illizi (Sonatrach /exploration)

Le découpage litho-stratigraphique est principalement basé sur une description morphologique des séries sédimentaires (Figure I.09).

La série stratigraphique type du bassin d'illizi épaisse de plus de 3 000 m est la suivante :

❖ **Le Cambrien :**

Il est constitué par une succession de formation détritique, essentiellement gréseuse.

- **L'unité I:**(conglomérats d'EI Moungar) épaisse de 300m, est principalement formée de lentilles de grés conglomératiques, c'est une série très localisée et représente les derniers termes de démantèlement de la chaîne panafricaine.

➤ **L'unité II:** sa puissance est de l'ordre de 200 à 300m. Les dépôts de base sont essentiellement des grès moyens à grossiers à stratifications obliques avec quelques graviers et galets de quartz. La partie supérieure de cette unité est représentée par des grès fins à ciment siliceux et épaisse de plusieurs mètres avec des intercalations de minces bancs argilo-silteux ; Ces bancs montrent des traces de bioturbation (Tigillites). L'âge présumé de cette unité est Cambrien.

❖ **Ordovicien :**

A l'échelle du bassin d'Illizi, l'Ordovicien est subdivisé en quatre unités.

➤ **L'unité III-1:** son épaisseur est variable, d'âge Trémadoc, elle est représentée par une alternance de grès fins à stratification oblique et de galets d'argile avec des intercalations de niveaux silteux. Elle contient des traces de bioturbations essentiellement des Tigillites.

➤ **L'unité III-2:** elle est formée essentiellement de grès fins à grossiers à ciment siliceux. Le développement du ciment peut donner naissance à de véritables quartzites, avec la présence fréquente de joints stylolitiques et de Tigillites. Ce dépôt s'est effectué dans un milieu marin de faible profondeur.

➤ **L'unité III-3:** son épaisseur peut atteindre 40 à 200 mètres en moyenne constituée de grès micacés fins à ciment argileux ou siliceux à Scolithos alternant avec de rares passées d'argilite ; Cette série passe vers le sommet à des grès grossiers à fins à Scolithos et à stratifications obliques qui s'enrichit en argile vers le sommet.

➤ **L'unité IV:** son épaisseur est de 100 à 300 mètres en moyenne. Elle est composée de grès et d'argile d'origine glaciaire. Cette formation repose en discordance sur l'unité III-3; elle comprend:

1. **L'unité IV-2** qui est une série de comblement des paléotopographies façonnées par l'avancement des glaciers est constituée de dépôts variés.

2. **L'unité IV-3** appelée dalle terminale est essentiellement gréseuse.

❖ **Le Silurien :**

Le Silurien est composé de bas en haut par les formations suivantes :

✓ Formation de l'Oued Imirhou formée d'argiles à graptolites d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 300 m avec de rares intercalations silteuses; caractérisée par une série condensée appelée argiles radioactives très fossilifère et très riche en matière organique d'une épaisseur de plus de 30 m.

✓ Zone de passage (unité M) formant le réservoir basal du F6 épais d'environ 100m. Cette unité est constituée d'alternance de grés, d'argile et de silt ; les grés sont fins à moyens à stratifications obliques.

✓ Barre inférieure (unité A) du réservoir F6 ; il s'agit de grés fins à moyens à stratifications obliques d'une épaisseur moyenne de 30 m.

✓ Talus à Tigillites (unité B) du réservoir F6 ; son épaisseur varie de 40 à 50 m. Cette unité est formée d'alternances d'argiles silteuses et de grés fins argileux associés à des terriers. Les argiles à graptolites s'étendent globalement à l'échelle de toute la plateforme saharienne et fournissent l'une des plus importantes roches mères.

❖ **Le Dévonien :**

A l'échelle du bassin d'Illizi il est représenté en général par le Dévonien inférieur d'une puissance de l'ordre de plus de 200 m et sa stratigraphie est comme suit :

✓ La barre moyenne (unité C1) au réservoir F6 d'âge Gédidinien, présente une épaisseur d'environ 50 m. Elle est constituée de grés fins à grossiers à stratifications obliques à entrecroisées.

✓ Les trottoirs (unité C2) du réservoir F6 d'âge Gédidinien, son épaisseur varie entre 20 et 30m. Elle est représentée par des alternances de grés et d'argile silteuses soulignant un environnement fluvio estuarien.

✓ La barre supérieure (unité C3); d'âge Siégénien, elle est essentiellement gréseuse, son épaisseur varie de 80 à 100m. Elle est assez caractéristique sur le gamma ray, sa configuration est cylindrique.

Le Dévonien moyen et supérieur qui correspondent aux séries de Tin-Meras et de Gara Mas Melouki ne sont représentés d'une manière générale que par le réservoir F2 appelée formation d'Irheme d'âge Strunien. Ce sont de grés fins à moyens passant latéralement à des silts et des argiles de l'ordre 40 à 70 m.

❖ **Le Carbonifère :**

Dans le bassin d'Illizi le Carbonifère est représenté par une épaisse formation argilo-gréseux (de 100m environ) qui renferme des roches carbonatées et se termine par des sédiments continentaux. Cette série englobe :

- Le Tournaisien argilo-gréseux.
- Le Viséen argilo-gréseux caractérisé par l'existence des deux chenaux régionaux B₂, B₁₂.

○ Le Westphalien représenté à la base par un chenal et une série argilo-calcaire avec une zone à gypse, des dolomies et des bancs oolitiques. La série de Tiguentourine, constituée par des argiles rouges à gypse.

Les affleurements, les études des carottes et les nombreux travaux réalisés sur la plateforme saharienne nous permettent de donner un aperçu sur le milieu et la paléogéographie de la région d'étude :

| COUPE STRATIGRAPHIQUE TYPE | | | | |
|--------------------------------------|------------------------|------------|------------|---|
| AGE | ETAGES | Profondeur | LITHOLOGIE | DESCRIPTION LITHOLOGIQUE |
| C R E T A C E | Turonien | | | Calcaire Marne |
| | Cénomanién | | | Argile Avec passée de calcaire et de gypse |
| | Albien | | | Grés, sable, argile |
| | Aptien | | | Sable avec passée d'argile et de calcaire |
| | Barrémien | 500 | | Intercalation de sable et d'argile Traces de lignite |
| | Neocomien + Malm | | | Sable, silt, grés, argile Présence de lignite |
| | Dogger | 1000 | | Alternance de sable et de grés Présence de dolomie |
| | Lias | | | Argile, grés |
| | Viseen+Tourn | | | Argile, grés |
| | Réservoir F2 | | | Argile, grés |
| D E V O N I E N | Serie Argileuse | | | Argile avec présence de silt |
| | Unité C3-I | 1500 | | Grés, argile |
| | Unité C2-II | | | Grés, argile, silt |
| | Unité C1-III | | | Grés, argile |
| | Unité B2-IV-V | | | Grés, argile |
| | Unité B2-VI | | | Grés, argile |
| | Unité B1-VII | | | Grés, argile |
| | Unité A-VIII | | | Grés, silt |
| | Unité M2-IX | | | Argile, grés |
| | Unité M1-X | | | Grés, argile |
| Gothlandien argileux | 2000 | | | Argile avec passées de grés au sommet |
| O R D | Unité IV-3 | | | Grés hétérométrique |
| | Unité IV-2 | | | Argilo-gréseux |

Figure I.09 : colonne lithologique du bassin d'Ilizi (Sonatrach /exploration).

- **Au Cambrien** : les dépôts sont attribués à un milieu fluviatile en tresses ayant permis la mise en place d'épandages sableux sur la surface infra tassilienne.
- **A l'Ordovicien** : milieu est marin, car la transgression Trémadocienne, dure jusqu'au Caradoc. A La fin de cette période il y a installation de la calotte glaciaire.
- **Au Silurien** : après la fonte des glaciers, une transgression glacio-eustatique diachrone précoce vers le Sud-Est et tardive vers le Nord-Ouest a marqué cette période du Paléozoïque.

La fin du Silurien est marquée par les mouvements épigénétiques calédoniens qui ont conduits à l'émersion de vastes régions dont l'érosion constitue la source d'apport des séries détritiques du Dévonien inférieur.

- **Le Dévonien inférieur gréseux** : il est rattaché à un réseau fluviatile méandrique.
- **Le Dévonien inférieur argileux gréseux (Emsien)**: marqué par le début d'une transgression marine qui se poursuit jusqu'au Dévonien supérieur.
- **Au Dévonien moyen et supérieur** : la sédimentation est essentiellement argileuse à intercalations de niveaux carbonates fossilifères témoignant l'installation d'un milieu marin à la fin du Dévonien.
- **Au Carbonifère** : dès le début du Tournaisien, une sédimentation argilo-sableuse entrecoupée de niveaux d'oolithes ferrugineux indique une régression marine et l'installation d'un milieu de transition.
- **Au Mésozoïque** : les sédiments rattachés à cet ensemble sont de type continental à lagunaire. L'installation respective d'un milieu continental puis lagunaire s'est manifestée durant tout le Mésozoïque.
- **Le Cénozoïque** : marqué par la reprise d'une sédimentation détritique témoignant d'une régression généralisée sur toute la plateforme saharienne

I.7 Contexte Tectonique :

Le bassin d'Illizi ne représente qu'une entité de la plateforme saharienne. Il se range dans la catégorie des bassins intracratoniques stables de type synclise qui se sont formés dans la partie Nord du Gondwana, et comprenant d'Est en Ouest : les bassins de Kufra et de Murzuk (Libye), du Mouydir, de l'Ahnet, de Sbaa, de Reggane et de Tindouf (Algérie). L'image structurale actuelle est reliée aux différentes phases tectoniques ayant affecté la région depuis le Cambrien jusqu'au Quaternaire. L'individualisation du bassin s'est faite à la fin du Silurien et au cours du Dévonien inférieur.

Le bassin d'Illizi est traversé par des accidents subméridiens pour la plupart panafricains (600 Ma). Au Nord, cette région est recouverte par le plateau Crétacé supérieur de Tinherth. A son extrême sud, les formations paléozoïques offrent des affleurements d'une qualité exceptionnelle sur la bordure septentrionale du Hoggar. (Figure I.10).

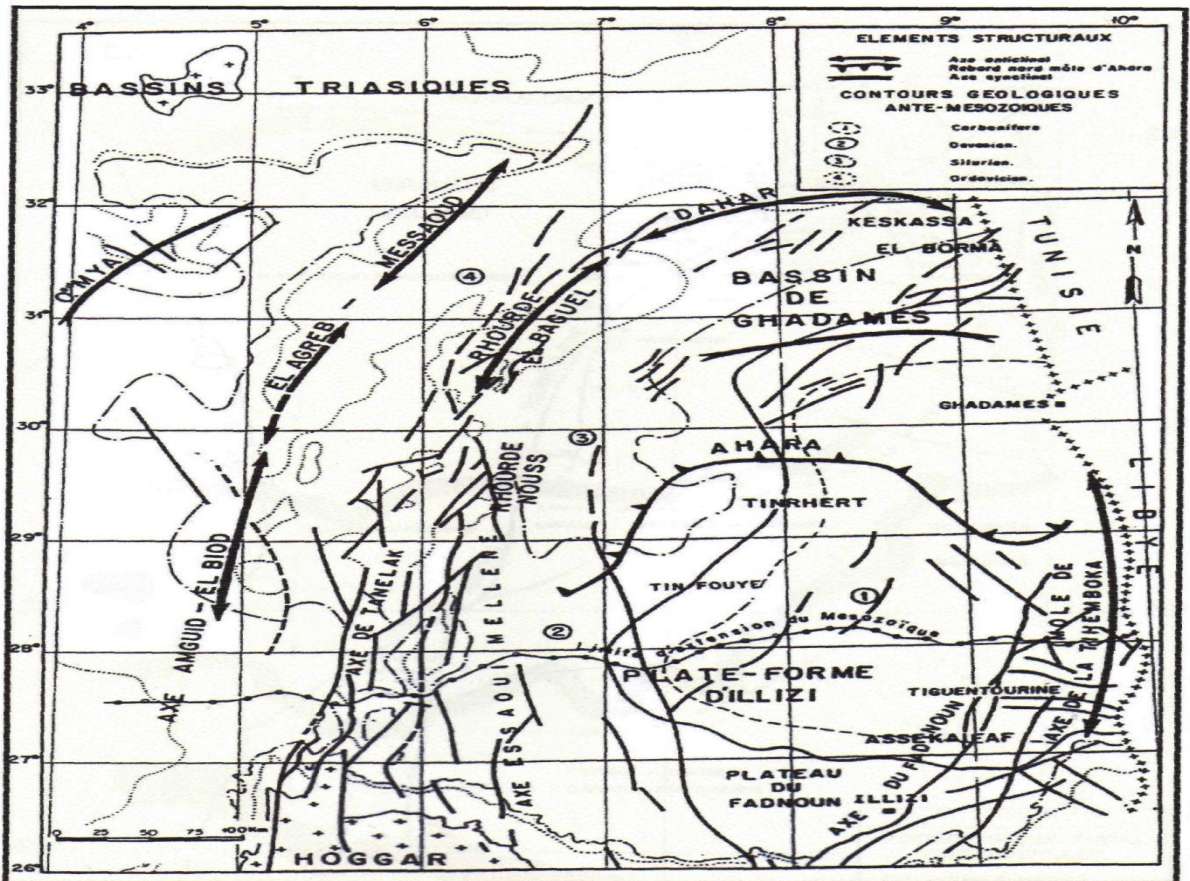


Figure I.10 : Esquisse structurale schématique de la synéclyse. (Sonatrach /exploration)

I.7.1 Les principaux éléments structuraux du bassin d'Illizi :

Le bassin d'Illizi est constitué d'éléments géotectoniques à grand rayon de courbure (bombement de Tin Fouyé, haut fond de Tihamboka, Monoclinial d'Illizi), il est divisé en une succession de dépressions ou de sillons par une série d'axes majeurs qui sont d'Ouest en Est :

✓ L'axe d'Amguid El Biod qui forme la bordure occidentale du bassin et qui le sépare du bassin de Mouydir à l'Est.

✓ L'axe de Tan Elak.

✓ L'axe d'Essaoui Méllene.

✓ L'axe passant par Maouar Tin Tayart.

✓ L'axe de Fadnoun.

✓ L'axe de la Tihamboka.

Les directions de tous ces axes sont proches de la direction N-S. Ils sont accompagnés de failles importantes dues au rejet de failles profondes du socle. Celles-ci sont le prolongement des accidents panafricains qui affectent le socle du Hoggar sur des centaines de kilomètres et qui le divisent en plusieurs compartiments. Ces failles majeures accompagnées de faisceaux de failles secondaires, ont joué au cours des temps géologiques lors des phases tectoniques successives en affectant la couverture sédimentaire du bassin.

En fonction des directions des failles et de celles des contraintes tectoniques, il y a eu des phases de compression, de distension et de décrochement. La plupart des structures anticlinales de la région sont en relation avec des failles. Un examen rapide du schéma structural du bassin montre l'individualisation structurale de trois régions en raison des orientations majeures des accidents, de leur densité et de leur continuité :

- ✓ A l'ouest, la région **d'Amguid El Biod** comprise entre les dépressions Oued Miya - Mouydir (sa bordure Ouest) et le trend englobant le périclinal de Tin Tayart, les anticlinaux de Elssaouane (Est et Ouest) et celui de Maouar.
- ✓ Au centre, le bassin **d'Illizi** proprement dit (nettement moins structuré) où se trouve l'ancien môle d'Ahara orienté approximativement E.W, celui-ci est compris entre le trend précédent et la grande zone d'accidents correspondant au trend de Fadnoun.
- ✓ A l'Est, le môle de **Tihamboka** s'étendant entre le trend du Fadnoun et la frontière Algéro-Libyenne (cette région montre un style structural différent de la précédente) est caractérisé par trois directions de failles :
 - Méridienne à subméridienne pour les accidents majeurs.
 - NW-SE à WNW-ESE.
 - NE.SW pour les accidents secondaires.

C'est dans le contexte particulier de cette région que se place notre zone d'étude puisqu'elle se situe dans le permis In Amenas qui correspond en gros au môle de Tihamboka, Les épaisseurs de toutes les séries paléozoïques diminuent sur sa partie centrale la plus haute.

Du Sud au Nord on a les structures locales de : Dômes à Collenias, Tan Amellel, Edjeleh, Tihalatine et Zarzaïtine (figure I.11).

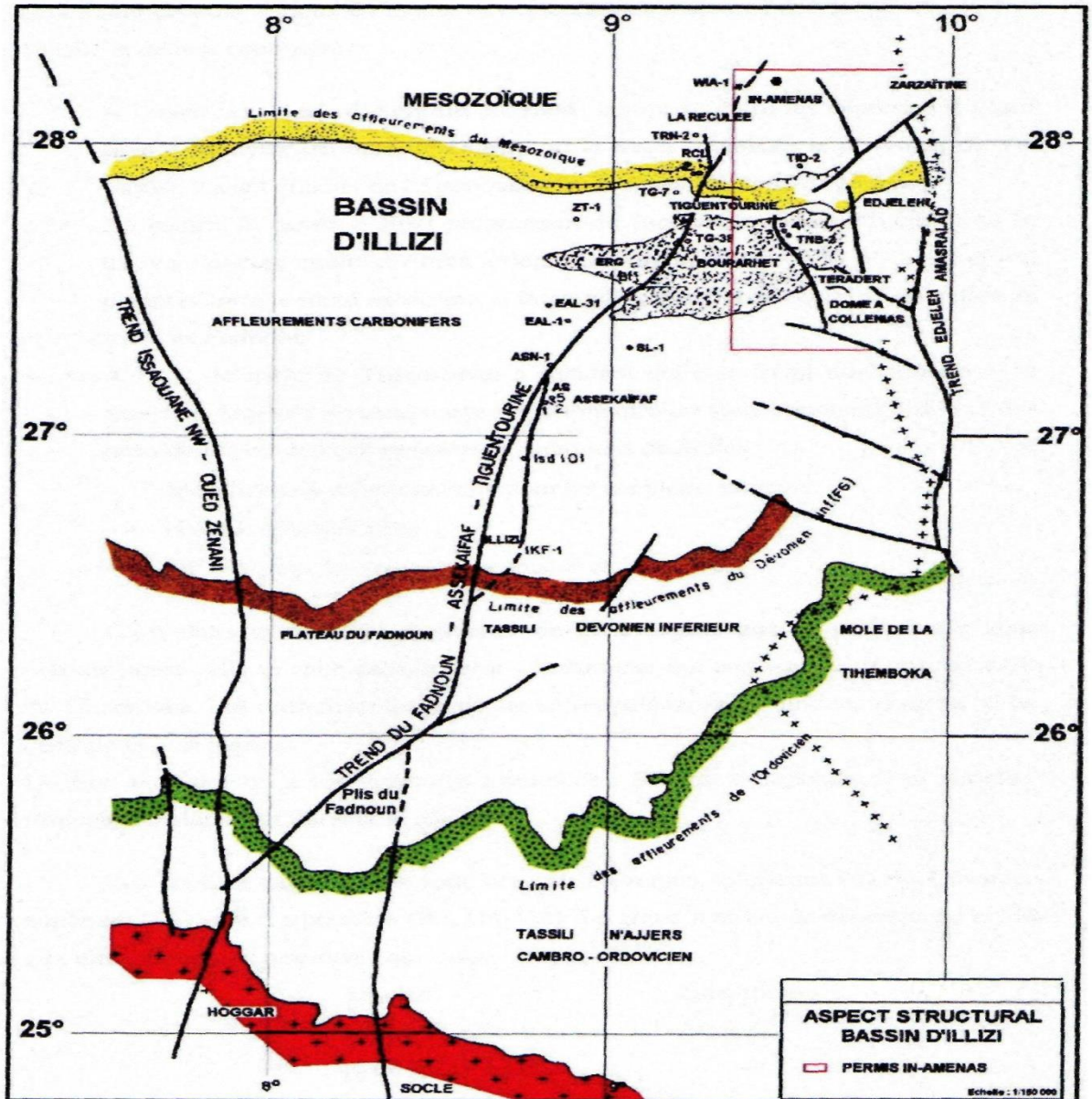


Figure I. 11: Schéma structural du bassin d'illizi. (Sonatrach /exploration).













I.7.2 Evolution géodynamique du bassin d'illizi :

Les principaux événements tectoniques qui ont affecté le bassin d'illizi se sont déroulés :

- ✓ Du Précambrien terminal-Cambrien inférieur : événement panafricain.
- ✓ A l'Ordovicien supérieur : phase taconique du Silurien supérieur.
- ✓ Au Dévonien inférieur : phase calédonienne.
- ✓ Au Dévonien supérieur : phase frasinienne.
- ✓ Au Carbonifère - Permien : phase hercynienne.
- ✓ Au Crétacé inférieur (Aptien) : phase autrichienne.
- ✓ Au Tertiaire (Eocène à Oligocène) : phase pyrenienne. (voir tableau I.06).

Ces différentes phases tectoniques, (compressives et distensives) se traduisent sur la sédimentation du bassin par des discordances ou des discontinuités sédimentaires. (Aiouna A., 1995; Aliev et al. 1971 ; Boudjemaa A., 1987; Echikh K., 1998 ; Skender M.S. et Arab M., 1996, Becipe 1975, H.Boumaghar 1998).

Tableau I.06 : Phases tectoniques majeures. (D'après Boujemaa ; 1987).

| PERIODE MAX D'ACTIVITE | DIRECTION DE LA CONTRAINTE | EFFET SUR LE SYSTEM FAILLES | EFFET SUR LA SEDIMENTATION |
|--|---|---|---|
| PANAFRICAINE | E-W  | Tectonique cassante créant des failles et des fractures conjuguées NW-SE & NE-SW. | Compartimentage du Craton du Sahara central. |
| CAMBRO-ORDOVICIENNE | NW-SE  | Mouvement normal le long des failles N-S. | Les variations de l'épaisseur sont contrôlées par la faille. Basculement NW de la plate-forme saharienne volcanisme. |
| TACONIQUE (Caradoc-Ashgilien) | E-W  | Mouvement inverse le long des failles N-S résultant. Formation des structures N-S. | Soulèvement des boucliers, Reguibat et Touareg. |
| CALEDONIENNE (Silur-Devonien) | E-W  | Mouvement inverse ou décrochant le long des failles N-S. | <u>Erosion le long des zones hautes d'orientation N-S & E-W (Tihemboka, Ahara).</u> |
| FRASNIEN | NW-SE  | Mouvement normal le long des failles NE-SW. | <u>Non-dépôt et érosion locale (Mole d'Ahara).</u> Volcanisme. |
| WISEEN (Hercynienne précoce) | N 40°  | Mouvement inverse ou décrochant le long des failles N-S. Début de formation de la chaîne varisque. | <u>Erosion sur Tihemboka</u> et soulèvement de l'Ouhgarta. |
| CARBONIFERE SUP A PERMIEN (Hercynienne principale) | N 120°  | Mouvement inverse ou décrochant le long des failles NE-SW (résultat de la formation de la Pangée). | Erosion sur les axes NE-SW. |
| RIFTING TRIAS-LIAS (Dislocation de la pangée) | NW-SE  | Réactivation des failles NE-SW se terminant au TAGS et S4. | Contrôle de la sédimentation par les failles entraînant une variation rapide d'épaisseur le long des failles NE-SW. |
| CRETACE INFERIEUR (Autrichienne) | E-W  | Réactivation des décrochements des failles N-S & NE-SW résultant du mouvement différentiel de la plaque européenne et de la plaque africaine. | <u>Erosion des sédiments du Crétacé sous l'Aptien (l'Arche d'El Biod & Illizi).</u> Effet léger sur le bassin de Berkine. |
| EOCENE (pyrénéenne) | N-S & NW-SE  | Début de chevauchement au nord résultant de la convergence de la plaque européenne. Décrochement de la faille S. Atlas. | |
| MIOCENE | NW-SE & N-S  | Episode de compression majeur dans le domaine atlasique. | Sédimentation prédominante de flyshs au Nord. |
| POST-VILLAFRANCHIEN (Alpine) | N-S  | Basculement et inversions de blocs. Période finale de compression dans le domaine atlasique. Evénement majeur de collision. | Soulèvement du Hoggar. Basculement du bloc d'El Borma. |

I.8 Contexte Hydrogéologique :

I.8.1 Les Systèmes Aquifères du Sédimentaire ancien :

I.8.1.a : La nappe du Cambro-ordovicien :

Les formations gréseuses Cambro-ordoviciennes du Tassili présentent une très faible porosité, elles sont parcourues par un système de fissuration et de failles. Ces caractéristiques leurs facilitent les circulations des eaux, d'où les grès du Tassili présentent une bonne perméabilité. La nappe est exploitée à Djanet par 18 forages (y compris la source de Djanet), d'une profondeur de 140 à 400m avec un débit mobilisé de 10 à 35 l/s.

I. 8.1.b : La nappe du Dévonien (à Illizi) :

Reconnue à Illizi et ses environs, notamment au Nord, par des ouvrages de captages de 250 à 1450m, respectivement dans les régions d'Illizi et à Adeb Larach. Le niveau statique varie d'une région à l'autre : Il est de quelques centimètres à quelques mètres dans les zones élevées, par contre l'eau est jaillissante au Nord et à l'est d'Illizi ; les forages sont exploités à des débits variant entre 5 et 32 l/s. Le nombre total de forages inventoriés est de 36 dont 17 sont en service et 12 à l'arrêt.

I.8.1.c : La nappe Carbonifère :

Cette nappe est exploitée à des profondeurs allant de 800 à 1100m dans la région d'In Aménas. Cette nappe à usage industriel (injection), leur niveau statique varie entre 200 et 300m, tandis qu'au Sud-Est de Bordj Omar Driss et d'après un forage réalisé par REPSOL cette nappe ne se trouve qu'à 190m avec un résidu sec de 2.8 mg/l.

I.8.1.d : Le système aquifère du Continental Intercalaire (CI) :

La nappe est captée par 162 forages dont 103, seulement sont exploités à des profondeurs moyennes (400 à 500m) à T.F.T, Ohanet et B.O.D, ou (de 800 à 1200m) à Rhourd Nouss et au Nord de Deb Deb.

Les eaux de la nappe sont jaillissantes (pression en tête 18 bars) à Rhourd Nouss, Bordj Omar Driss, Tabankort Zemelet Mederba et au Nord de Deb Deb tandis qu'elles sont exploitées par pompage à Tinfouyé, Ohanet, Sud de Deb Deb et Stah.

I.8.1.e : La nappe d'Inféro-Flux d'Oued Illizi :

Cette nappe entaillé dans les formations du Dévonien moyen est caractérisé par : Une superficie relativement importante, d'une épaisseur moyenne de 25m, avec une profondeur allant de 40 à 50m en moyenne. Son niveau statique varie entre 2 à 10m, alors que son débit oscille entre 2 à 16 l/s. On compte 01 seul forage (Ville d'Illizi).

I.8.1.f : La nappe d'Inféro-Flux de Bordj El Haoues :

L'inventaire a fait ressorti 05 puits à usage mixte (agglomération d'Ahrir) et 02 forages destinés pour l'A.E.P de Bordj El Haoues.

Le débit d'exploitation oscille entre 1 et 6 l/s, l'eau qui est de bonne qualité est caractérisée par un résidu sec variant de 320 à 860 mg/l.

* une synthèse de la répartition locale les principales ressources en eau exploitées à travers la wilaya sont portées dans le tableau I.07 :

Tableau I.07 : Les principales ressources en eau exploitées à W.Illizi (ANRH d'Ouargla)

| N° | Nom de nappe | Localisation | Profondeur (m) |
|----|--------------------------------|--|----------------|
| 01 | Cambro - Ordovicien | Tin Alkoum, Djanet, Tarat | 100-600 |
| 02 | Dévonien Inférieur | Illizi, Issendjel, Lahdeb Laarach | 350-1450 |
| 03 | Des formations Carbonifères | In Aménas – Ohanet | 800-1100 |
| 04 | Du continental Intercalaire | Deb Deb - Bordj Omar Driss | 400-1000 |
| 05 | Du Complexe Terminal | Rhourd Nouss - El Hamra | 250-400 |
| 06 | Inféro - Flux | Les remplissages alluvionnaires des oueds | 15-70 |

II. 1 Introduction:

Avant de traiter et discuter les différents résultats des mesures et d'analyse des eaux de la nappe du dévonien inférieur, il est essentiel de présenter les méthodes suivies et les matériels utilisés en se basant sur les conditions et le mode d'échantillonnage, les techniques de mesure et d'analyse des échantillons ainsi que les outils informatiques (Surfer, PhreeqC, Statistica, Diagramme).

II. 2. Partie de travaux au terrain :

Afin de mieux mener cette étude, une campagne de terrain d'une semaine a été faite vers la zone d'étude, elle a été pour objectif la reconnaissance de la région d'étude, faire un inventaire des points de sondage de la nappe étudiée et faire des mesures in situ par la sonde piézométrique et par le kit multi paramètres qui fonctionne avec la méthode potentiométrique: La température, le pH, la conductivité et la résistivité électrique et totale des solides dissous TDS.

Des échantillons ont été prélevés pour les analyses au laboratoire.

II.2.1 Conditions et mode d'échantillonnage :

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension...). En outre, Le matériel de prélèvement doit faire l'objet d'une attention particulière. L'emploi de flacons neufs en polyéthylène haute densité (bouteille en plastique) rincés avec de l'eau distillée puis séchés, est recommandé. Ces flacons sont susceptibles de réutilisation après un lavage adéquat si l'échantillon n'est pas excessivement pollué. Les flacons destinés au prélèvement pour l'analyse des éléments minéraux.

Nous avons prélevé quatorze (14) échantillons d'eau dans des bouteilles en plastique à partir des puits. Ces bouteilles ont été rincées par l'eau distillée et égouttées avant de les remplir, après, on a fait le prélèvement des échantillons pour les analyses au laboratoire.

Le choix du lieu de prélèvement des (14) échantillons est basé sur la répartition spatiale des différents points d'eau de façon à couvrir tout le secteur étudié (variation horizontale) (voir figure II.01).

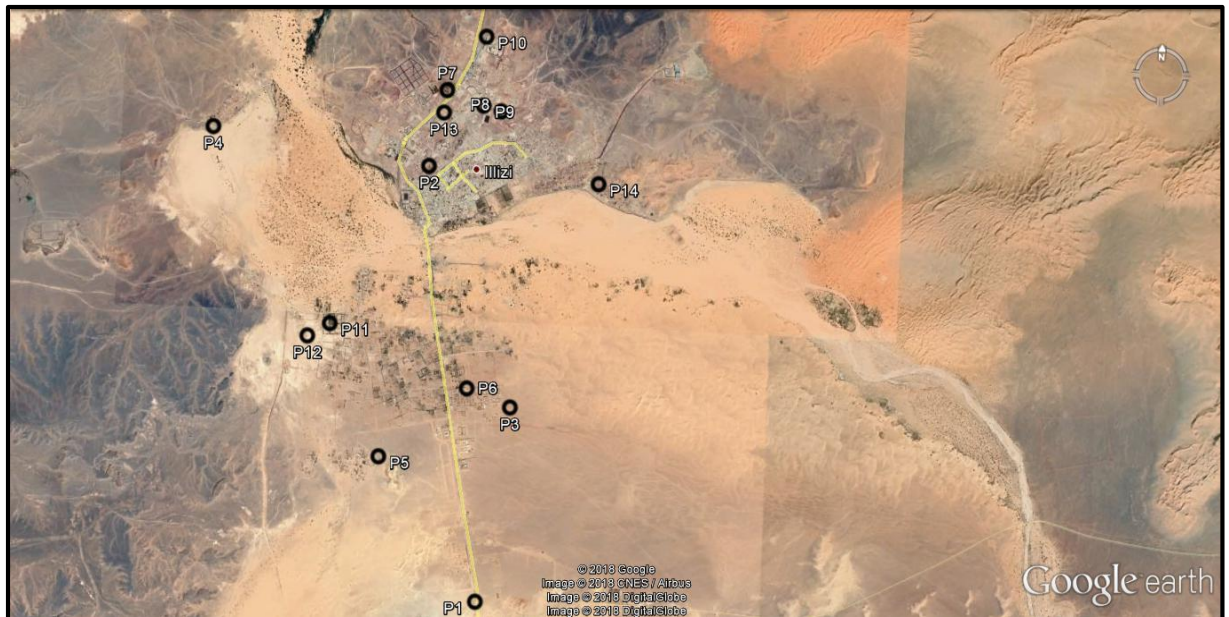


Figure II.01 : Plan de situation des puits.

II.2.2 Matériels utilisés:

II.2.2.1 Niveau piézométrique :

Le niveau piézométrique c'est le niveau libre de l'eau observé dans un puits ou forage rapporté à un niveau de référence. D'une certaine façon, il correspond à la hauteur d'une colonne d'eau. On à mesurer le niveau d'eau à l'aide d'une sonde électrique sonore, elle permet la mesure en plus du niveau d'eau, la conductivité électrique et de la température d'eau. Cette sonde est équipée d'un écran digital à lecture aisée. La vérification de charge des piles se fait par bouton poussoir, Figure II.02



Figure II.02 : Sondé électrique sonore

II.2.2.2 Conductivité électrique

Définition et principe :

La conductivité électrique d'une eau (γ) est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique (ρ).

$$\gamma = 1/\rho = (1/R). (L/S)$$

γ : conductivité (S/m ou bien $\Omega^{-1}.m^{-1}$).

ρ : résistivité (en $\Omega. m$).

R : résistance (en Ω).

L : distance entre les deux électrodes (en m).

S : surface de chaque électrode (en m²).

Matériel spécial :

– Conductimètre. Quel que soit l'appareil employé, utiliser de préférence le courant alternatif.

II.2.2.3 Les pH :

Le pH est en relation avec la concentration des ions hydrogène [H⁺] présent dans l'eau ou les solutions.

La différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence (Calomel - KCl saturé). Plongeant dans une même solution, est une fonction linéaire du pH de celle-ci. Le potentiel de l'électrode est lié à l'activité des ions [H⁺].

Appareil : pH Mètre

Electrode : Electrode de pH combinée

Réactifs : Tampon pH = 9, Tampon pH = 7, Tampon pH = 4

Sur notre étude, nous avons effectué les analyses des paramètres physico-chimiques (là CE (mS/m) et le pH) par Multi-paramètres (IDS 3510).



Figure II.03 : Multi-paramètres IDS 3510 pour mesure la conductivité (C.E) et pH

II.3 Partie de travaux de laboratoire :

Les paramètres physico-chimiques caractéristiques ont été mesurés pour tous les prélèvements, et les analyses ont été faites au sein des deux Laboratoires : laboratoire de géologie du Sahara et laboratoire des réservoirs souterraines (LRSPGA) au Centre de Recherche du Pôle Universitaire -03- UKMO,

Les résultats des analyses chimiques de l'eau sont portés dans les tableaux et représentés sur les différents diagrammes à l'utilisation d'outil informatique tel (Surfer, PhreeqC, Statistica, Diagramme).

Le mode opératoire suivi est conforme aux normes standards (Rodier, 2005), Nous allons présenter dans cette partie les méthodes de différentes analyses effectuées :

II.3.1 Mesures et Analyses des eaux :

II.3.1.1 Mesure des paramètres physiques :

a. Degré de salinité:

Permet de mesurer la conductivité (C.E) à 25°C. Il a été déterminé selon les protocoles de l'AFNOR (° NF T 90- 008 et NF EN 27888) en utilisant un Multi-paramètres (HANNA INSTRUMENT HI 9829).

b. pH : mesuré par un Multi-paramètres (HANNA INSTRUMENT HI 9829).



Figure II.04: Mesurer la conductivité (C.E) et pH au Multi-paramètres HI 9829

II.3.1.2 Mesure et analyses des paramètres chimiques:

Les analyses ont été effectuées au laboratoire selon les techniques standard (Rodier, 1984). Le faciès chimique déterminé par le bilan ionique cationique (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) et anionique (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}).

II.3.1.2.1 Bilan cationique :**1. Dosage de Mg^{2+} et Ca^{2+} :**

Pour Mg^{2+} et Ca^{2+} , on a utilisé la méthode de titrage molaire des ions de calcium et de dureté totale de l'eau TH avec une solution de sel dé-sodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA) à pH10. Pour le TH on ajoute une solution tampon de pH=10 (NH_4Cl), en présence de l'indicateur coloré est le NET (Noir d'Eriochrome T), et le Ca^{2+} Ajouter 2ml de NaOH en présence de l'indicateur coloré (mirexide Ca) qui donne une couleur rouge foncée ou violette, Le magnésium est déterminé, Le magnésium peut être estimé par la différence entre la dureté totale et la dureté calcique, ($\text{Mg}^{+2} = \text{TH} - \text{Ca}^{+2}$).



Figure II.05 : Dosage de Calcium Ca^{2+} et dureté de l'eau TH

2. Dosage de Na^+ , K^+ :

Pour les cations (Na^+ , K^+) : les dosages sont réalisés par spectrophotomètre d'émission atomique (photomètre à flamme 410 – Dr LANGE).



Figure II.06 : Spectrophotomètre à flamme

II.3.1.2.2 Le bilan anionique :

a) Dosage des Chlorures :

- Titrimètre 848 de marque Metrohm II.
- Une électrode combinée de type argent massif.
- Un réactif (AgNO_3) de concentration 0.1 mol L^{-1} selon la teneur en ion Cl^- .



Figure II.07 : Titrimètre 848 de marque Metrohm II.

Mode opératoire :

On met dans un bécher de 100 ml :

- 20 ml de solution.
- 1 ml d'acide nitrique 2M

On provoque la réaction entre AgNO_3 et la solution.

Le potentiomètre s'arrête au point d'équivalence qui correspond au taux des Ag nécessaire à neutraliser les Cl. Et la lecture se fait directement sur le potentiomètre.

Réactifs :

- Acide nitrique (HNO₃) à 65 % massique.
- AgNO₃.

b) Dosage des carbonates et bicarbonates :

Détermination des volumes successifs d'acide fort en solution diluée nécessaire pour neutraliser, aux niveaux de pH = 8.3 et 4.3, le volume d'eau à analyser. La première détermination sert à calculer le titre alcalimétrique (TA), la seconde à calculer le titre alcalimétrique complet (TAC). En présence d'indicateurs, la fin de la réaction est indiquée par un changement de couleur, soit un virage.

c) Dosage des sulfates :

Les sulfates sont dosés par méthode gravimétrique au BaCl₂ qui consiste à précipiter les ions SO₄⁻ sous forme de sulfate de Baryum (BaSO₄) en présence de BaCl₂ à 10%.

Matériel :

- Filtres sans cendres.
- Entonnoirs.
- Etuve de séchage.
- Bêchers de 250 ml.
- Bain-marie.
- Appareil de filtration sous vide
- Pipette jaugé

Mode opératoire :

- Prélever 10 à 50 ml de l'eau analyser et le transférer dans un bêcher de 250 ml.



Figure II.08 : Dosage de sulfate par le spectrophotomètre atomique

- Faire précipiter les sulfates à chaud en ajoutant aux gouttes à gouttes à la pipette de la solution de chlorure de baryum. Quand il ne se forme plus de précipités, ajouter quelques gouttes de chlorure de baryum en excès.
- Laisser les béchers dans le bain-marie à 70-80 °C jusqu'à ce que les sulfates soient complètement déposés.
- Filtrer le surnageant en utilisant du papier filtre sans cendre.
- Laver le précipité à l'eau bouillante jusqu'à l'élimination complète des
- Transférer le filtre contenant le précipité dans une capsule tarée.
- Faire sécher à l'étuve à 105 °C pendant 5 heures.
- Ensuite dans un dessiccateur. Peser après refroidissement.

Calculs :

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ (en még/l)} = B.8,56.1000.A/V$$

Avec :

B = poids de BaSO_4 précipité.

V = volume de la prise d'essai.

A = inverse du facteur de dilution.h

II.4 Outils informatique :

II.4.1 Surfer :

Le logiciel Surfer, conçu par Golden Software, nous a permis de réaliser des cartes à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) en Lambert 93. Ce logiciel permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points x , y , z afin de les ordonner.

Les grilles peuvent être importées depuis plusieurs sources pour produire différents types des cartes, incluant des contours, des vecteurs, des images ainsi que des cartes superficielles. Surfer contient plusieurs options cartographiques qui permettent de produire une carte représentant le mieux possible les données utilisées. La carte peut être améliorée en affichant les points de données, en combinant plusieurs cartes ou en ajoutant des dessins ou des annotations.

Nous nous sommes servis de ce logiciel afin d'établir la carte piézométrique, et déterminer le sens d'écoulement.

Pour la préparation des données, la visualisation, et la mise en forme, on a suivi ces étapes:

- Mettre en forme le fichier Excel :
- Afficher les données sous surfer
- Créer une grille X, Y, Z
- Créer différents types de cartes et les superposer.
- Mettre en forme les cartes.

II.4.2 Statistica.v6.1 (Stat Soft France, 2003) :

Nous nous sommes servis de ce logiciel afin de déterminer les paramètres statistiques de nos données physicochimiques. Il s'agit de coefficient de corrélation, les valeurs max, min, ainsi que l'écart type. Une méthode de classification hiérarchique ascendante (CHA), a été réalisée par ce programme qui consiste à classer " p " variables, " n " observations, par construction d'une matrice de distances entre les variables et les observations. On définit ensuite une règle de calcul de distances entre les groupements disjoints de variables ou d'observations. Les deux groupements dont la distance est la plus faible (selon ce critère) se réunissent et on réitère le processus jusqu'au regroupement complet de classes (Saporta, 1990). On peut représenter la classification ascendante hiérarchique par un dendrogramme ou arbre de classification.

II.4.3. PhreeqC v2.18 (Parkhurst and Appelo, 1990):

En utilisant ce logiciel pour l'étude hydrochimique de nos échantillons, il permet le traitement des données hydrochimiques et la représentation graphique des résultats.

II.4.4 Le Diagramme de Piper :

Permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles témoignant les teneurs relatives en chacun des ions par rapport au total des ions. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle.

II.4.5 Diagramme (Simler, 2009)

À l'aide de ce logiciel, on peut réaliser des diagrammes comme : Piper, Schoeller, et Riverside pour tester le faciès chimique des eaux, leurs aptitudes à l'alimentation en eau potable, et à l'irrigation.

II.5 Conclusion :

Quatre moyens ont été utilisés pour étudier l'hydrogéologie du bassin : une première étape du travail consiste en (1) une étude bibliographique pour analyser les travaux réalisés sur la région, (2) une campagne de terrain qui a permis l'acquisition des données piézométriques, chimiques et conductivités électriques in situ, (3) des analyses chimiques des ions majeurs ont permis de déterminer les faciès traversés par les circulations souterraines et (4) des méthodes de représentations graphique des résultats pour mieux établir une interprétation sur les faciès chimiques et l'origine de ses eaux.

Des analyses ont été effectuées in situ par la sonde électrique et le kit multi paramètres : La température, le pH, la conductivité et la résistivité électrique et totale des solides dissouts TDS, d'autre analyses ont été effectué au laboratoire par :

1. la titrimétrie pour Le TH, le calcium (Ca^{+2}), le magnésium (Mg^{+2}) les bicarbonates (HCO_3^-) et les chlorures (Cl^-),
2. Spectrophotomètre a flamme pour le sodium (Na^+) et le potassium (K^+).
3. Spectrophotomètre atomique : les sulfates (SO_4^{2-}).

Les résultats obtenus ont été traité par des outils informatiques : Surfer, PhreeqC, Statistica et Diagramme.

III.1. Introduction :

Les caractéristiques chimiques des eaux souterraines sont presque toujours influencées par la nature physico-chimique du terrain constituant leurs aquifères. De plus la vitesse de circulation dans l'aquifère est un facteur important, suivant lequel les contacts eaux et sol peuvent être court ou long, diminuant ou augmentant l'importance des échanges ioniques entre les eaux et le terrain qui les contient, par ailleurs on sait que la perméabilité d'un aquifère est un facteur important agissant sur la vitesse de circulation de la nappe contenue suivant sa pente.

C'est la raison pour laquelle les rapports entre les caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère et sa perméabilité d'une part et les caractéristiques chimiques de l'eau contenue d'autre part sont très étroites. Nous exposons dans ce chapitre les caractéristiques physico-chimiques de la nappe aquifère dévonienne inférieure dans la ville d'Illizi et nous allons faire une interprétation des résultats des compositions chimiques. On commençant au premier lieu par l'établissement de la carte piézométrique avec le calcul de gradient hydraulique de cette dernière

III.2. Piézométrie :

La carte piézométrique (figure III.01) de la zone d'étude a été établie et réalisées à partir des données des forages fournies par l'A.D.E d'Illizi (années 2017), Cette carte a été établie à l'aide du logiciel Surfer (v11) dans le but de définir le sens de l'écoulement des eaux souterraines. Ainsi que les zones de convergences.

A travers cette carte, on peut tirer deux sens principaux d'écoulement dans la région d'étude :

1. Le premier s'écoule dans le sens N-SE à partir des zones de Tin-Tourha, Centre-ville et Ain El Kours vers la zone de Sidi Bouslah au sud de la ville d'Illizi. Les courbes isopièzes sont relativement serrées. Avec un gradient hydraulique assez fort de l'ordre 2.03% indique une perméabilité assez faible, ce qui défavorise le déplacement des eaux dans la nappe du Dévonien inférieur, ceci peut être liée à la présence des formations hétérogènes imperméable.

2. Le deuxième s'écoule dans le sens SE-NO à partir de l'oued d'Innatén vers la zone de Sidi Bouslah. Les courbes isopièzes un peu plus espacé d'où un gradient hydraulique de l'ordre de 0.47%, en rencontrant une forte perméabilité qui peut être liée à l'homogénéité des formations traversée.

Les valeurs des débits théorique montre l'existence des zone de fort débits de pompage de valeurs comprises entre 20 à 25 l/s dans les régions de Belbachir et Sidi Bouslah coïncident avec les points d'accumulation des eaux de la nappes dans la carte piézométrique.

Avec la présence d'un cône de dépression au niveau de Sidi Bouslah lié à une exploitation intense justifié par une densité des forages dans cette zone.

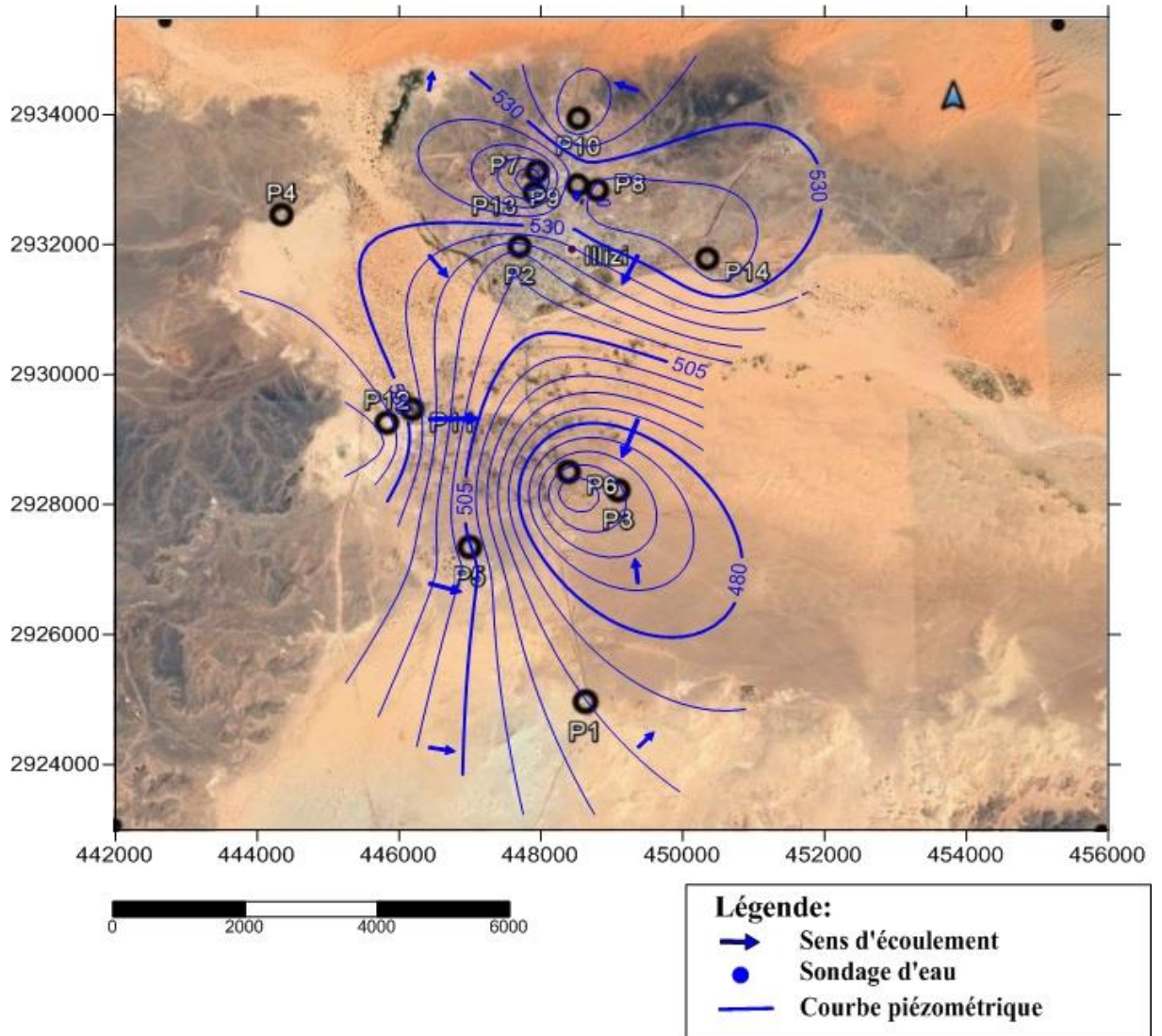


Figure III.01 Carte piézométrique de la nappe du dévonien inférieur de la ville d'Illizi

III.3. Hydrochimie

III.3.1. Etudes des paramètres physico-chimiques :

Dans le tableau, ci-après, nous avons synthétisé la variation des paramètres physicochimiques afin d'avoir une vue d'ensemble sur les caractéristiques hydrochimiques de la nappe étudiée. Nous avons remarqué que les conductivités (Tableau III.01) des eaux du Dévonien inférieur répondent aux normes de potabilité de l'OMS, inférieur à $2500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, et indiquant une minéralisation acceptable. Le pH des eaux des forages d'AEP analysées de la région d'Illizi varie entre 8.2 comme maximum et 6.82 comme minimum avec un écart type très faible de l'ordre 0,49, ces résultats montrent que presque la totalité des eaux analysées n'excédant pas la concentration maximale admissible donnée par l'OMS et fixé à 8.5. Ainsi que des valeurs

admissibles pour les sulfates et les chlorures comprennent entre (252 mg/l pour les Chlorures et 32.51 mg/l pour les Sulfates).

Il est recommandé de rappeler que la température joue un rôle très important dans la mobilité des sels et des gaz, donc sur la conductivité électrique, elle permet de différencier les eaux qui circulent en profondeur ou en surface. L'augmentation de la température est en fonction de la profondeur (1°C pour 33m). En effet de ce fait, et comme la profondeur de la nappe du Dévonien inférieur à la ville d'Illizi est comprise entre (250 et 440m), les valeurs de température enregistrées lors de la campagne de terrain, varient entre 27°C en hiver et 34°C en été.

Tableau III.01: Paramètres statistiques des variables physico-chimiques des eaux de la nappe étudié

| Variable | Unité | N | Moy | Min | Max | Ecarte type |
|-------------------------------|-------|----|--------|--------|---------|-------------|
| Ca ⁺⁺ | mg/l | 12 | 62,11 | 44,74 | 141,36 | 25,86 |
| Mg ⁺⁺ | mg/l | 12 | 24,93 | 16,80 | 40,00 | 7,32 |
| Na ⁺ | mg/l | 12 | 31,60 | 21,65 | 49,21 | 9,13 |
| K ⁺ | mg/l | 12 | 1,79 | 0,00 | 3,59 | 0,84 |
| Cl ⁻ | mg/l | 12 | 89,65 | 53,20 | 252,50 | 56,15 |
| SO ₄ ⁻ | mg/l | 12 | 20,46 | 18,23 | 32,61 | 3,92 |
| HCO ₃ ⁻ | mg/l | 12 | 139,75 | 100,00 | 171,00 | 25,48 |
| NO ₃ ⁻ | mg/l | 11 | 0,73 | 0,00 | 4,00 | 1,15 |
| pH | - | 12 | 7,23 | 6,82 | 8,20 | 0,49 |
| CE | µS/cm | 12 | 808,42 | 473,00 | 2230,00 | 468,38 |
| TH | °F | 12 | 25,58 | 19,00 | 52,00 | 8,89 |

A. Dureté (Titre Hydrométrique TH) :

Les résultats des analyses des forages d'AEP dans la ville d'Illizi montrent qu'environ la totalité de ces eaux possèdent une dureté inférieure à 50°F, par contre, une seule analyse donne une dureté supérieure à 50°F. Il est à signaler qu'une faible dureté ne permet pas l'élaboration de couche carbonatée assurant le plus souvent une protection des canalisations contre certains risques de corrosion ; par contre, une dureté élevée constitue un risque important d'entartrage des canalisations. Ces eaux marquent une oscillation entre 19°F comme minimum et 52°F comme maximum avec un écart type relativement faible de l'ordre

8.89°F, le forte teneur de TH a été remarqué spécialement dans la région de Sidi Belbachir et Tintourha.

B. Le Sodium (Na⁺)

La teneur de l'ion Sodium est inférieur à la concentration maximale admissible CMA (200 mg/l) dans la totalité des eaux analysées donc sa concentration comprise entre 22 et 49 mg/l avec un écart type faible de l'ordre 9.12 mg/l.

C. Le Calcium (Ca²⁺)

Les résultats des analyses des eaux de la ville d'Illizi ont montré que la présence des ions Ca²⁺ dans les eaux des nappes est liée principalement à la dissolution des formations Carbonatées (CaCO₃). Les teneurs de Ca²⁺ de la nappe de dévonien inférieur sont comprises entre 44 mg/l comme valeur minimale comme elles vont atteindre la valeur maximale 141 mg/l avec un écart type significative de l'ordre 26 mg/l, la totalité des eaux ont une teneur inférieur à la concentration maximale admissible CMA (200 mg/l).

D. Magnésium (Mg²⁺)

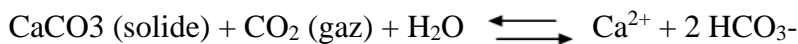
Identique en tous points au Calcium, les normes fixent sa concentration maximale à 150 mg/l valeur au-delà de laquelle il confère à l'eau une saveur désagréable .dans notre étude la teneur de cette élément est comprise entre 17 et 40 mg/l avec un écart type de l'ordre 7 mg/l.

E. Le Potassium (K⁺)

Malgré son abondance dans certain roche magmatique et sédimentaire (argile –grés) le Potassium est généralement peut concentrer dans les eaux souterraine Sa teneur dans l'eau naturelle est constante et ne dépasse pas habituellement le 15mg/l, Les normes fixent sa concentration maximale à 20 mg/l. comme en ce cas-là on voir que les valeurs de cette élément ne dépasse pas les normes admissible par le CMA. Sa teneur est comprise entre quelque trace et 4 mg/l avec un écart type égal à 0.8 mg/l.

F. Les Bicarbonates (HCO₃⁻)

Se forme à partir de la dissolution des minéraux Carbonaté par des eaux météorique qui se charge en CO₂ libre lord de leur percolation à travers le sol.



Dans les eaux de la nappe de la région d'Illizi les concentrations moyennes en Bicarbonates observées dépassent la valeur guide (30 mg/l) sont de l'ordre 140 mg/l.

G. Les Chlorures (Cl^-)

Quel que soit la lithologie, la teneur en (Cl^-) est généralement faible. Dans les aquifères libre la concentration en Cl^- est directement lié à la teneur en Chlorure des précipitations, les normes fixent sa concentration maximale à niveau guide 200 mg/l. Dans les eaux de la nappe de la ville d'Illizi les concentrations en chlorure observées sont comprise entre 53 et 252 mg/l avec un écart type très remarquable de l'ordre 56 mg/l.

H. Les Sulfates (SO_4^{-2})

La concentration en ion Sulfates des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 100 à 200 mg/l, mais ce chiffre peut être largement dépassé (jusqu'à 1000 mg/l) dans les zones contenant du Gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé. Les normes fixent 400 mg/l comme niveau guide donc leur teneur dans la ville d'Illizi sont de l'ordre de 20 mg/l (Tableau III.01).

I. La Silice (SiO_2)

Il est quasi inexistant dans les roches Carbonatés, il est en revanche très abondant dans les roches magmatiques, les grés et les argiles. Les eaux de la ville d'étude ayant des faibles concentrations de Silice sont de l'ordre 18 mg/l et 33 mg/l.

III.3.2. Les éléments indésirables

A. Les Nitrates (NO_3^-)

Les Nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'Azote, et c'est la forme la plus soluble de ce dernier. Les teneurs en Nitrates observées (Tableau N°09), ne dépassant pas 4 mg/l Cependant, elles sont inférieurs aux normes (50 mg/l).

B. Les Nitrites (NO_2^-)

Les teneurs en Nitrites observées, sont relativement très faibles, voire nulles dans les eaux de l'Albien. Cependant, elles sont inférieures aux normes (0,2 mg/l). Elles sont inférieures à 0,02 mg/l en cette région.

III.4. Interprétation des résultats des analyses des éléments majeurs:

Les échantillons ont été prélevés lors de notre compagnie de terrain et les mesures des paramètres physico chimiques ont été effectuées sur 12 échantillons (forage), dans le laboratoire de center de recherche scientifique au sein de notre université UKMO-POLE 3.

Le dosage a porté sur les éléments majeurs suivants:

- Cation : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+
- Anions: Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- ,

III.4.1. Identification des faciès chimiques des eaux:

Il existe plusieurs classifications des faciès des eaux naturelles ; on distingue deux critères fondamentaux de classification :

- La composition chimique.
- L'origine et le gisement des eaux.

Les principales classifications basées sur la composition chimique des eaux naturelles sont celles de Stabler-Sauline, Alkenine, Schöeller, Palmer et Piper mais les plus utilisées sont celles de Stabler, Piper et Schöeller.

III.4.1.1. Diagramme de Piper:

Le diagramme de Piper permet de représenter graphiquement le faciès hydrochimique. Il est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celles des cations, respectivement, et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs. Dans ce losange, le pôle haut correspond à 100 % de sulfates et chlorures et 100 % de calcium et magnésium, le pôle bas représentant 100 % de carbonate et bicarbonate et 100% de sodium et potassium. Ainsi, dans ce diagramme, une eau bicarbonatée calcique serait située au pôle gauche du losange alors qu'une eau chlorurée sodique serait située au pôle droit. La superposition de plusieurs analyses sur un même diagramme permet de comparer leur faciès hydrochimique, La représentation des éléments chimiques des différents échantillons sur le diagramme de Piper (Figure III.02) montre que la majorité des échantillons se coïncident sur les pôles caractérisant les faciès Chloruré calcique et bicarbonaté calcique.

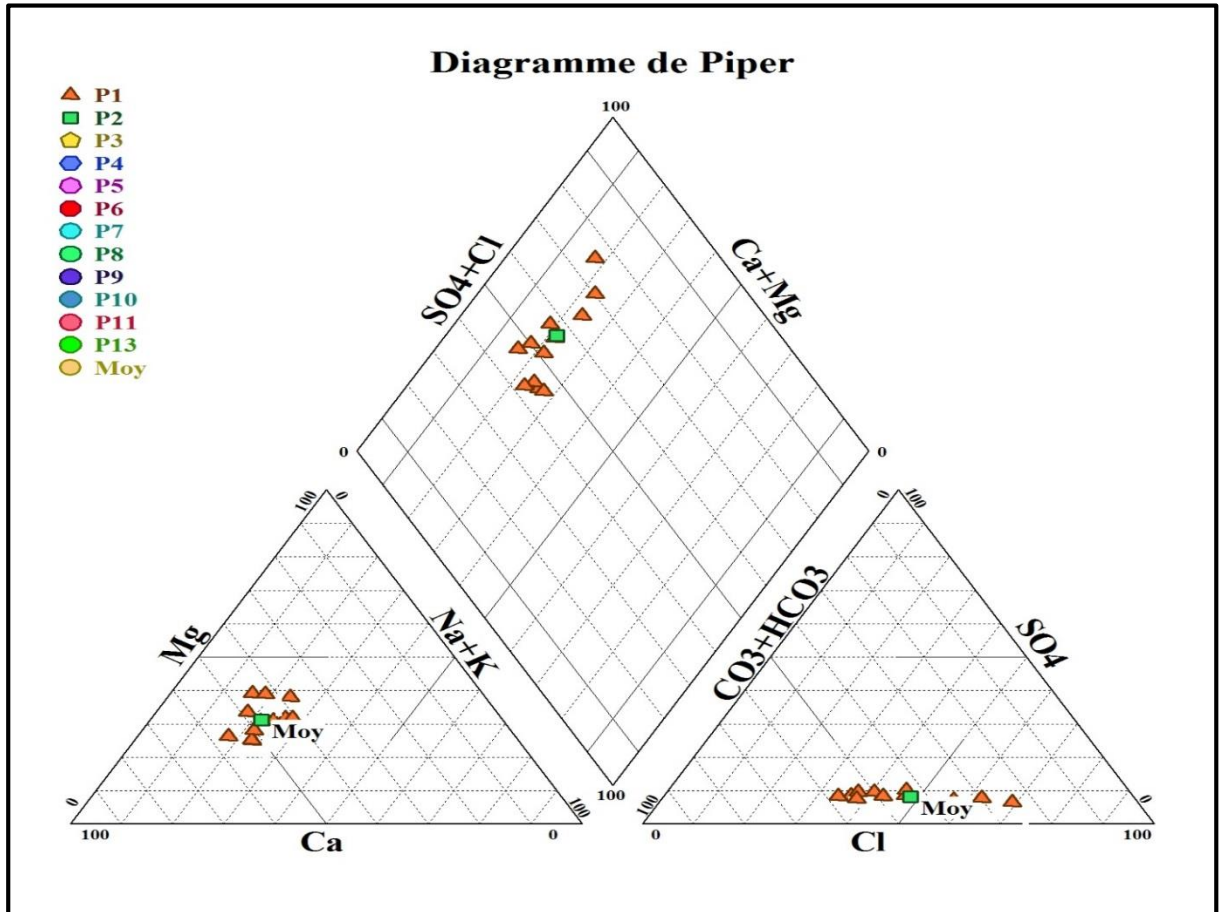


Figure.III.02 Diagramme de Piper

III.4.1.2. Diagramme de Schöeller-Berkaloff

C'est un diagramme semi logarithmique Schöeller–Berkaloff utilisé pour la représentation graphique des analyses chimiques des eaux, la classification tient compte de l'importance des principaux anions et cations et détermine le type de faciès des eaux. Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs points des eaux sur un même diagramme.

La représentation des éléments chimiques des différents échantillons sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (Figure III.03) montre que la majorité des échantillons se coïncident sur les pôles caractérisant les faciès Chloruré calcique et bicarbonaté calcique

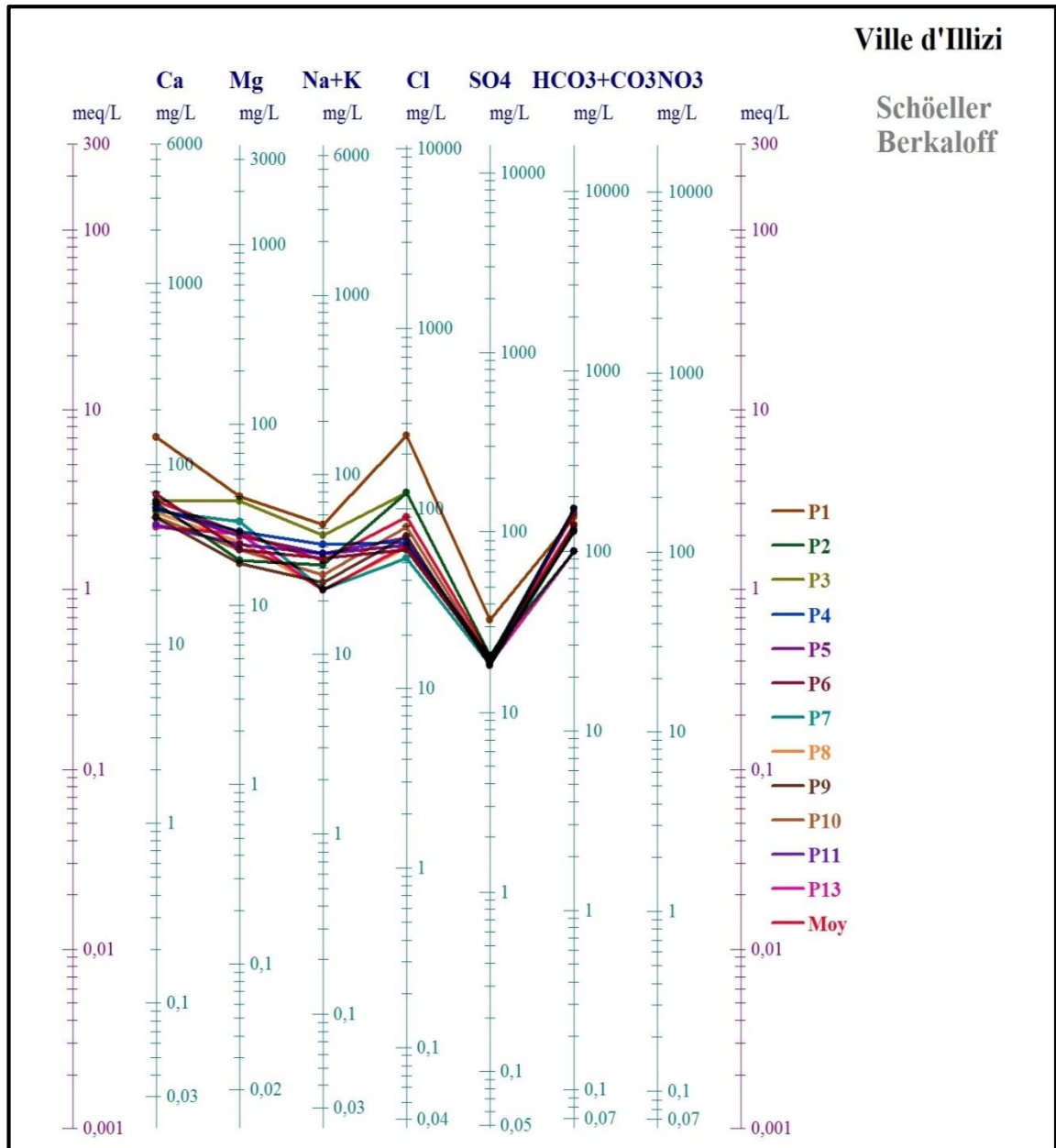


Figure III.3 Diagramme de Schöeller-Berkaloff

A travers ces deux diagrammes on observe que la qualité de la majorité des eaux est bonne.

On peut distinguer aussi deux types de faciès :

- Faciès Chloruré Calcique,
- Faciès Bicarbonaté Calcique,

III.5 Origine de chimisme des eaux :

III.5.1 Etude des relations inter-éléments :

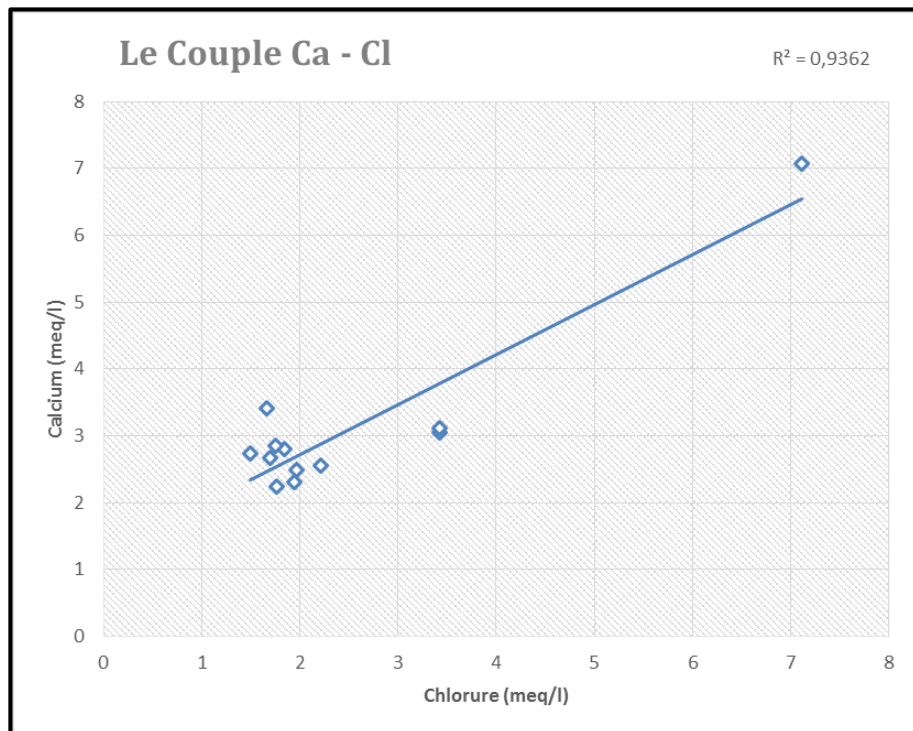
A partir les résultats de tableau ci-dessous on peut montrer que la majorité des éléments sont bien corrélés entre eux, voire mieux avec la conductivité.

Tableau III.02 : Matrice de corrélation entre les éléments physicochimiques

| | Ca | Mg | Na | K | Cl | SO4 | HCO3 | NO3 | CE |
|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|
| Ca | 1,00 | | | | | | | | |
| Mg | 0,66 | 1,00 | | | | | | | |
| Na | 0,69 | 0,66 | 1,00 | | | | | | |
| K | 1,00 | 0,66 | 0,69 | 1,00 | | | | | |
| Cl | 0,94 | 0,80 | 0,72 | 0,94 | 1,00 | | | | |
| SO4 | 0,98 | 0,68 | 0,71 | 0,98 | 0,97 | 1,00 | | | |
| HCO3 | 0,23 | 0,10 | 0,54 | 0,23 | 0,08 | 0,16 | 1,00 | | |
| NO3 | 0,00 | -0,29 | -0,04 | 0,00 | -0,23 | -0,17 | 0,34 | 1,00 | |
| CE | 0,91 | 0,48 | 0,53 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,11 | -0,10 | 1,00 |

III.5.1.a. Le couple Ca- Cl :

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle des chlorures et du calcium (Figure III.04). Cette relation confirme l'existence du faciès chloruré calcique. Notons que ce faciès 'anormal' est le résultat d'un signe de pollution et / ou d'un mélange des eaux de l'aquifère superficiel et profond.

**Figure III.04:** Le couple Ca –Cl

III.5.1.b Le couple Ca - SO₄:

Le graphe ci-dessous (figure III.05) montre qu'il y a une grande corrélation entre les deux éléments (Ca²⁺ - SO₄⁻) cette corrélation traduit l'alignement des points presque en même ligne, indiquant probablement une origine commune qui est par exemple l'Anhydrite (CaSO₄), Gypse (CaSO₄ : 2H₂O) et le Pentahydrate (MgCl₂ : 6H₂O)

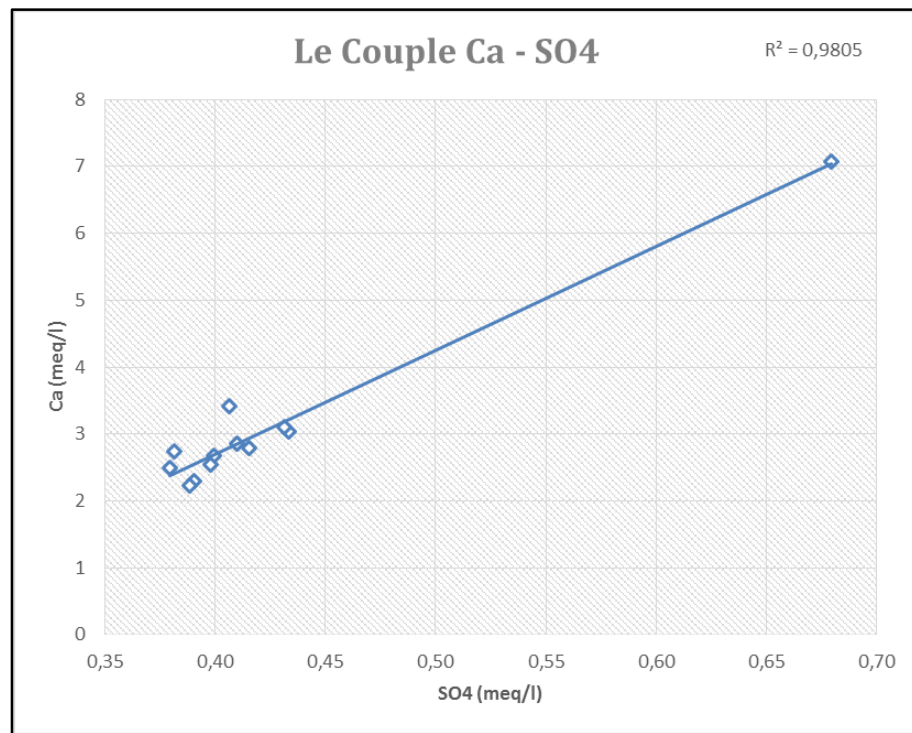


Figure III.05: Le couple Ca –SO₄

III.5.1.c Le couple Mg-SO₄

Le Magnésium effectue un alignement suivant les Sulfates, selon deux droites (nuages des points) de différentes pentes (Figure III.06), ce qui traduit par le fait que ces deux éléments ont la même origine. Epsomite (MgSO₄ : 6H₂O), Kieserite (MgSO₂ : H₂O)etc

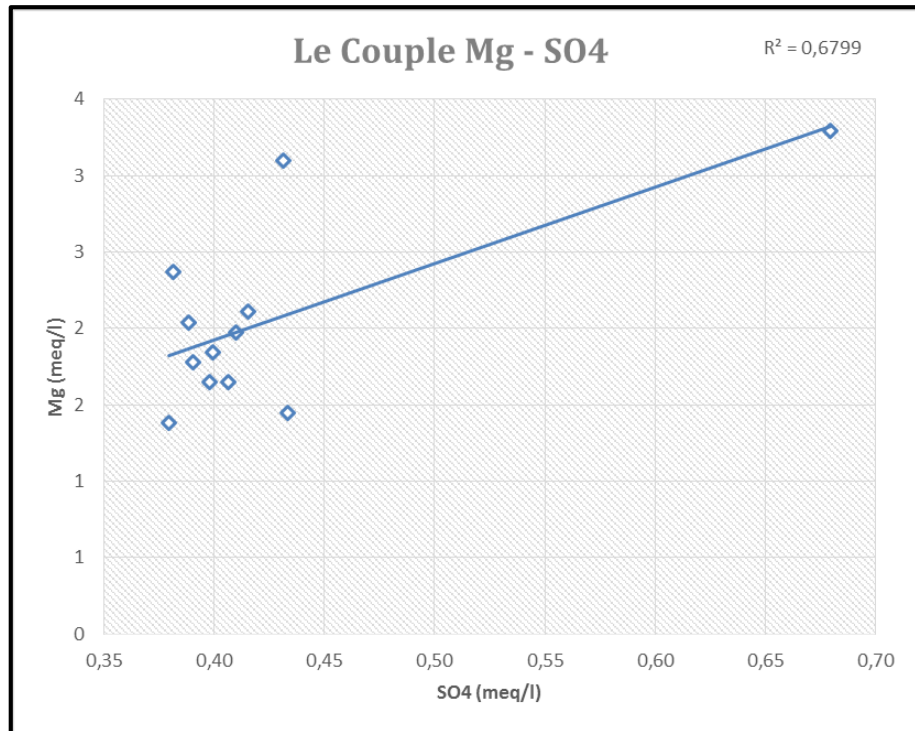


Figure III.06: Le couple Mg-SO₄

III.5.1.d Le couple Na-SO₄:

Le graphe ci – dessous (figure III.07) montre qu’il y a une grande corrélation entre les deux éléments (Na - SO₄) cette corrélation traduit l’uniformité d’alignement des points, indiquant probablement une origine commune l’exemple de la Mirabilite (Na₂SO₄ :10H₂O).

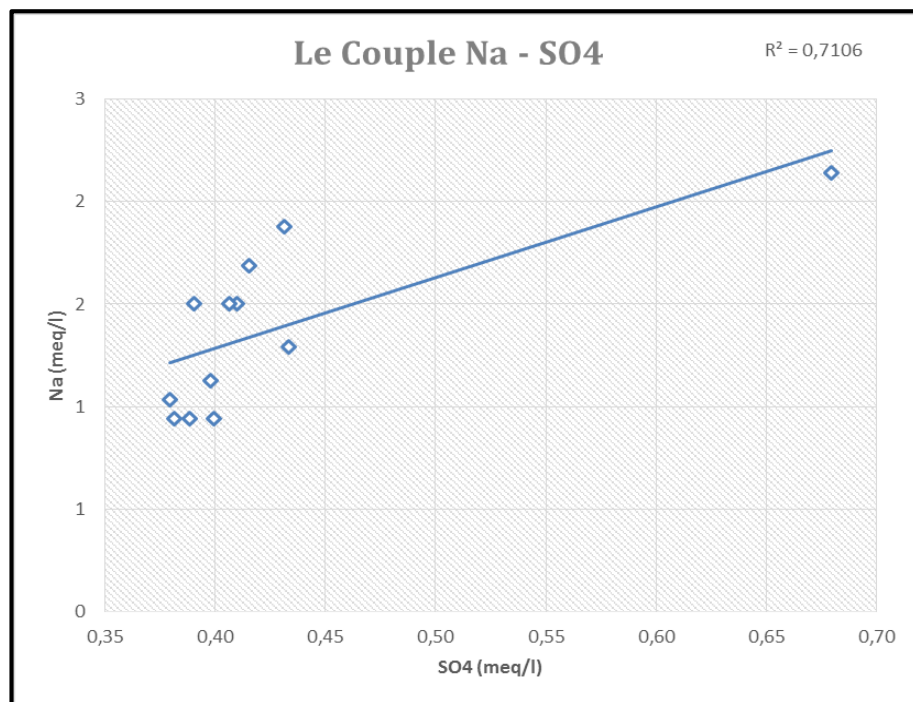


Figure III.07: Le couple Na-SO₄

III.5.1.e Le couple K-SO₄ :

La comparaison de variation des éléments (K et SO₄) (Figure. 28), montre qu'il y a forte corrélation entre ces deux éléments présentant l'homogénéité d'origine de ces deux éléments sont donc d'origine Arcanite (K₂SO₄) par exemple.

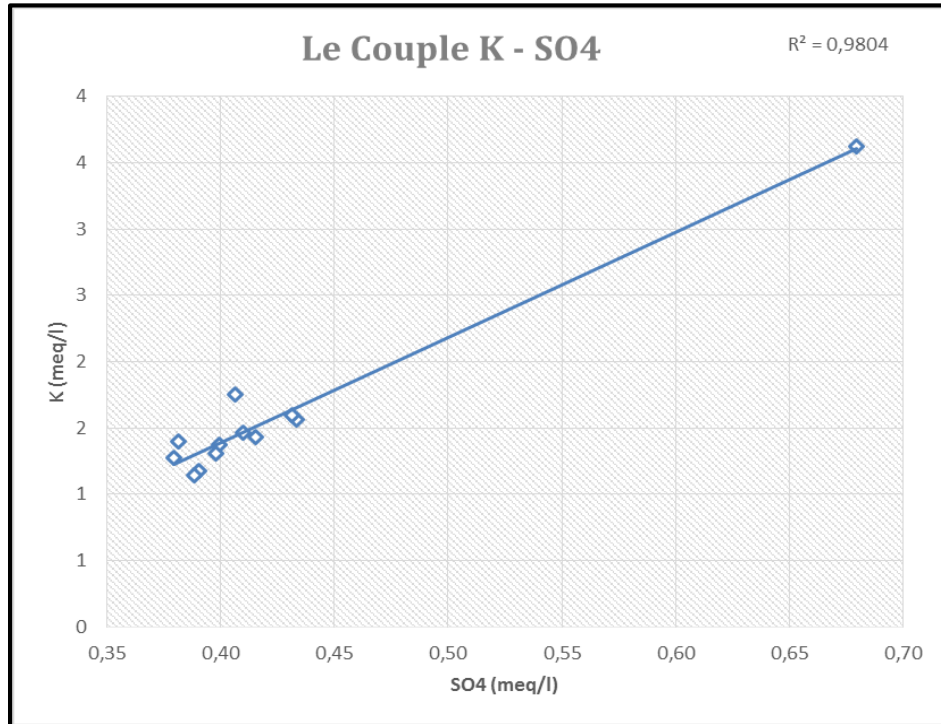


Figure III.08: Le couple K-SO₄

III.5.1.f Le couple Mg-Cl :

Le graphe (Figure III.09) montre qu'il y a une corrélation entre ces deux éléments indiquant la même origine de ces dernière le Bischofite (Mg Cl₂ :6H₂O) par exemple.

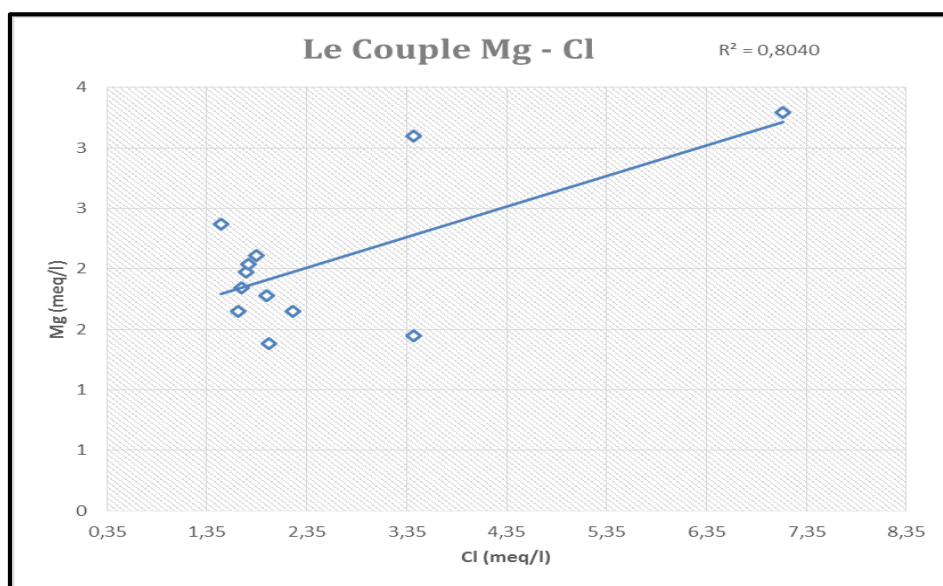


Figure III.09: Le couple Mg - Cl

III.5.1.g Le couple Na-Cl : Le graphe ci – dessous (figure III.10) montre qu'il y a une très grande corrélation entre les deux éléments (**Na-Cl**) cette corrélation traduit l'uniformité d'alignement des points, indiquant une origine commune qui est l'Halite (Na Cl)

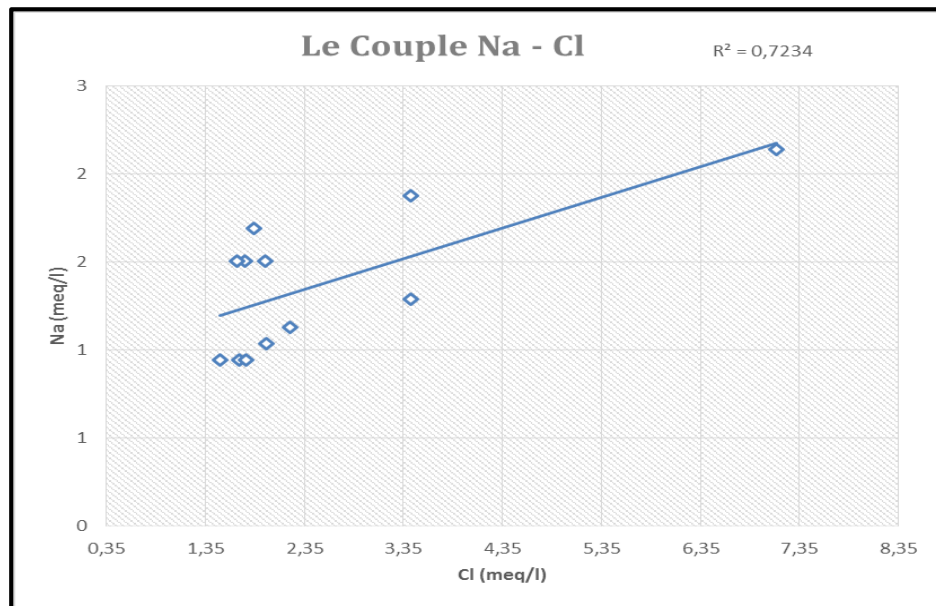


Figure III.10: Le couple Na-Cl

III.5.1.h Le couple Cl_ SO₄ :

Le graphe (Figure III.11) montre une tendance à l'alignement des points, L'importance de l'excès de l'un ou de l'autre élément détermine la dominance du faciès de cet élément sur l'autre.

Tenant compte de la dominance des faciès chloruré, il est important de vérifier la relation entre ces deux éléments. Le graphe montre une dispersion des points indiquant une évolution proportionnelle des deux éléments ayant donc une origine salifère commune (Figure III.11).

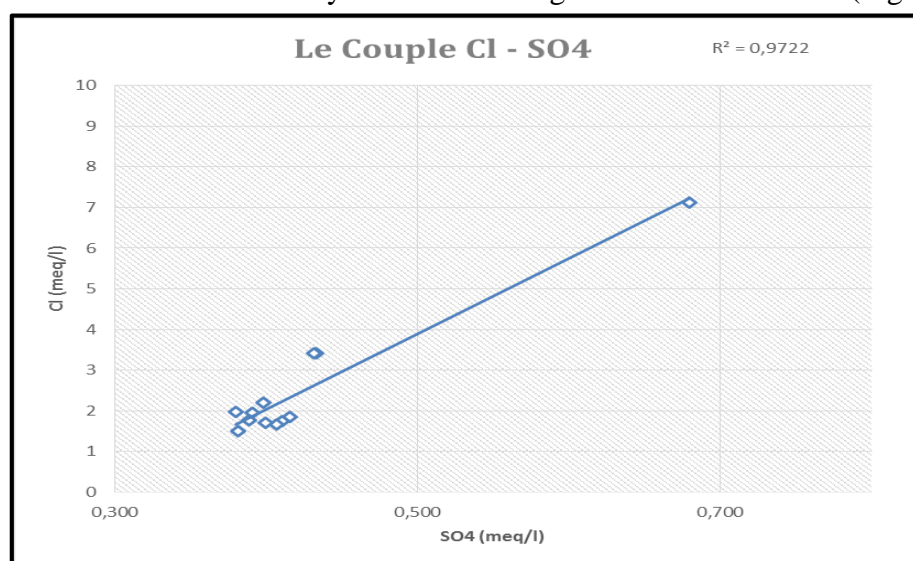


Figure III.11: Le couple Cl-SO₄

III.6 Indice d'échange de base (i e b) :

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants. L'eau au cours de son séjour souterrain entre une relation avec différentes substances ayant la propriété d'échanger les ions contre ceux contenues dans les eaux parmi ces substances nous avons (minéraux, l'hydroxyde ferriqueetc.)

D'après Schöeller (1943), l'indice d'échange de base est exprimé par la formule suivante :

$$ieb = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Si $i e b > 0 \Rightarrow$ les eaux échangent des ions de Na^{++} et K^+ contre les ions de Ca^{+2} et Mg^{+2} du terrain encaissant.

Si $i e b = 0 \Rightarrow$ il y a un équilibre entre les compositions chimique de l'eau et l'encaissant.

Si $i e b < 0 \Rightarrow$ l'encaissant libère les ions de Na^{++} et K^+ et fixe les ions de Ca^{+2} , Mg^{+2} de l'eau.

L'indice d'échange de base calculé dans le cas présent varie de 0.06 à 0.69 On remarque que tous les échantillons d'eaux analysés ont un ($i e b$) supérieur à zéro, donc les eaux échangent des ions de Na^+ et K^+ contre les ions de Ca^{+2} et Mg^{+2} du terrain encaissant.

III.7. Aptitude des eaux à l'irrigation :

L'aptitude des eaux à être utilisées pour l'irrigation, peut être évaluée par un certain nombre de coefficients plus ou moins fiables parmi lesquels :

* Le pourcentage en sodium (% Na).

* Sodium adsorption ratio (S.A.R).

III.7.1 Diagramme de REVERSIDE :

Le sodium est un élément des bases alcalines et alcalino-terreuses, joue un rôle important dans le maintien de la perméabilité des sols pour l'irrigation.

Pour déterminer ce risque, Riverside a créé une classification qui considère le rapport du sodium absorbé par la minéralisation totale.

Le S.A.R est un indice qui mesure le danger que représente l'existence d'une teneur donnée en sodium dans l'eau. Il se calcule par la formule suivante

$$S.A.R = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{[rCa^{++} + rMg^{++}]}{2}}}$$

Le diagramme de Riverside (Fig.32) qui comporte les subdivisions suivantes :

1. S.A.R < 10 : eaux utilisées avec peu de danger d'alcalinisation des sols.
2. 10 < S.A.R < 18 : eaux utilisées avec un danger appréciable d'alcalinisation
3. 18 < S.A.R < 26 : eaux pouvant provoquer un danger d'alcalinisation.
4. S.A.R > 26 : eaux présentant un danger d'alcalinisation très fort.

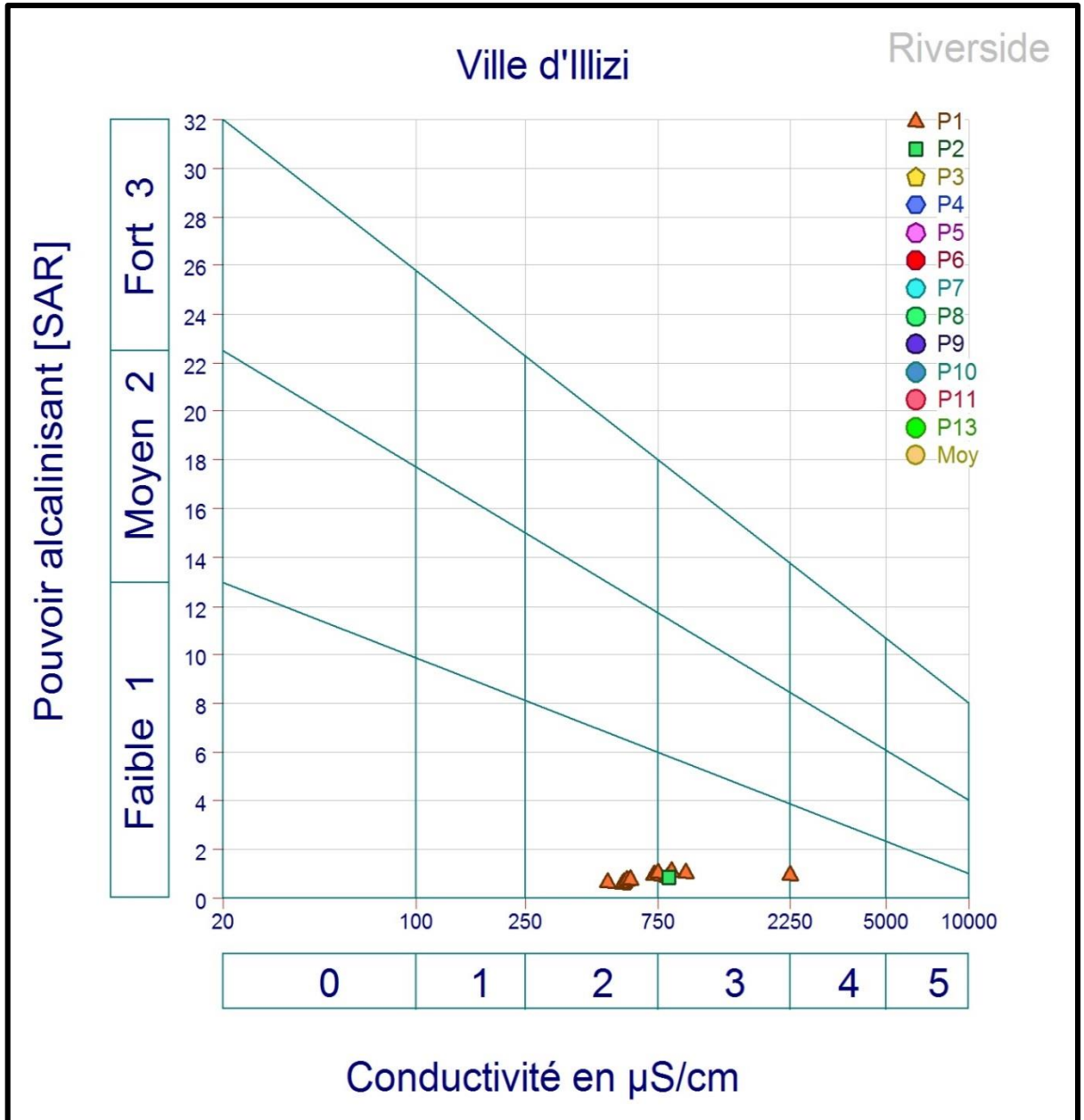


Figure III.12 : diagramme de Riverside

On peut tirer de ce diagramme que la totalité des points d'eaux sont des eaux peuvent être utilisées avec peu de danger d'alcalinisation des sols parce que la valeur de S.A.R baisse (S.A.R < 2).

III.7.2 Le pourcentage de sodium (classification de WILCOX)

Il est connu que le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturés en sodium. Les études menées par Wilcox sur cette question ont abouti au diagramme de la (figure III.13),

Nous avons jugé intéressant d'utiliser la classification de « Wilcox », fondée sur la conductivité électrique et le pourcentage du sodium soluble dans l'eau (Louvrier 1976), pour examiner ce problème. Le pourcentage du sodium peut être défini comme suit :

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

Les éléments sont exprimés en meq/l

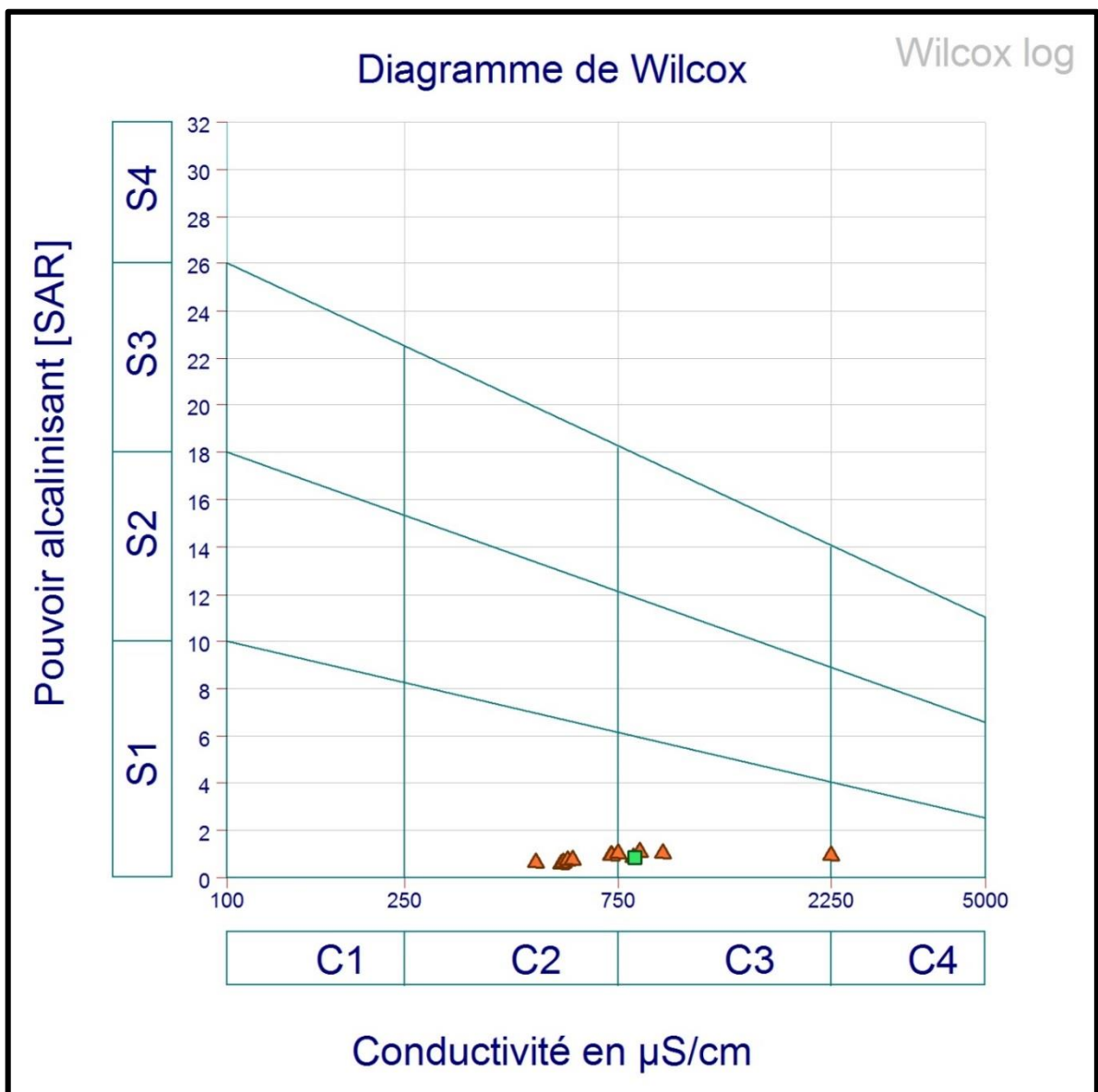


Figure III.13 Diagramme de Wilcox

Tableau III.03 : Les cinq classes des eaux d'après Wilcox

| Degré | Qualité | Classe | L'état d'utilisation |
|-------|------------|--|---|
| 1 | Excellente | <i>C1-S2</i> | Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart du sol. |
| 2 | Bonne | <i>C2-S1</i> <i>C2-S2</i> | En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité |
| 3 | Admissible | <i>C3-S1</i> <i>C3-S2</i> | En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée |
| 4 | Médiocre | <i>C4-S1</i> <i>C4-S2</i> <i>C3-S3</i> | 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 | <i>C3-S4</i> <i>C4-S3</i> <i>C4-S4</i> | Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions. Sol très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel. |

On peut donc tirer deux classes :

1. C2-S1 : En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel sur sols ayant une bonne perméabilité
2. C3-S1: En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.

III.8. Potabilité chimique des eaux :

III.8.1 Les normes de potabilité :

On a examinée dans cette partie la qualité chimique des eaux, en le comparant aux normes Algériennes de potabilité qui correspondent aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S).

Tableau III.04 : Normes Algériennes de potabilité

| Paramètre | Valeur | Unité |
|-------------------------------------|---------|-------|
| PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES | | |
| Température | 25 | °C |
| pH | 6.5-8.5 | - |
| Conductivité | 2500 | μS/cm |
| Résidu sec (180°C) | 2000 | mg/l |
| Calcium | 200 | mg/l |
| Magnésium | 150 | mg/l |
| Sodium | 250 | mg/l |
| Potassium | 15 | mg/l |
| Chlorure | 600 | mg/l |
| Sulfates | 400 | mg/l |
| SUBSTANCES INDÉSIRABLES | | |
| Nitrates | 50 | mg/l |
| Nitrites | 0,1 | mg/l |

III.8.2. Application sur la zone d'étude :**Tableau III.05** : Classification la potabilité des eaux d'après la norme algérienne

| NOM | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻⁻ | pH | Cd | remarque |
|------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|---------|------|----------|
| NORME | 200 | 150 | 250 | 15 | 500 | 400 | 6,5-8,5 | 2500 | |
| Station de service | 141,36 | 40 | 49,21 | 3,59 | 252,5 | 32,61 | 6,9 | 2230 | Mauvais |
| ZHUN 101 | 60,89 | 17,6 | 29,65 | 2 | 121,5 | 20,8 | 6,98 | 783 | Potable |
| ZHUN 102 | 49,71 | 16,8 | 23,8 | 1,5 | 70 | 18,23 | 6,92 | 568 | Potable |
| ZHUN 103 | 53,44 | 22,4 | 21,65 | 1,5 | 60,2 | 19,17 | 7 | 555 | Potable |
| ZHUN 104 | 50,95 | 20 | 25,95 | 1,6 | 78,4 | 19,1 | 8,18 | 581 | Potable |
| Pépinierie siège foré | 46 | 21,6 | 34,55 | 1,9 | 69,2 | 18,75 | 6,82 | 732 | Potable |
| Zone d'activité Illizi | 54,68 | 28,8 | 21,65 | 1,5 | 53,2 | 18,32 | 6,9 | 552 | Potable |
| Centrale électrique | 44,74 | 24,8 | 21,65 | 1,3 | 62,6 | 18,66 | 8,2 | 473 | Potable |
| Tin Tourha 101 | 55,92 | 25,6 | 38,86 | 2 | 65,5 | 19,94 | 7,38 | 839 | Potable |
| Tin Emri | 62,14 | 37,6 | 43,16 | 2,6 | 121,5 | 20,71 | 7,53 | 943 | Potable |
| Takbalt 101 | 57,17 | 24 | 34,56 | 2 | 62,1 | 19,69 | 7,07 | 721 | Potable |
| Siège foré | 68,35 | 20 | 34,56 | 0 | 59,1 | 19,52 | 6,91 | 724 | Potable |

Donc le tableau ci-dessus il montre que :

- Dans la ville d'Illizi on a des eaux potables de bonne qualité dans presque la totalité des forages.
- Dans le forage de station de service Belbachir les eaux signalent comme de mauvaise qualité due à la forte conductivité atteignant la valeur max désigné par la norme (2500 μ S) ce qui fait appel à l'utilisation des méthodes de traitements de ces eaux avant qu'ils sont consommés par les êtres humains.

III. 9 CONCLUSION :

A partir de la carte piézométrique réalisée on peut dire que les eaux de la nappe du dévonien inférieur de la ville d'Illizi tiennent comme amont les zones Tin Tourha, Centre-ville et Ain EL Cours, et convergent en aval vers la zone de Sidi Bouslah au centre sud, comme sens d'écoulement principal avec un gradient hydraulique relativement fort de l'ordre de 2.03%. Cependant, des sens écoulements secondaires peuvent apparaître comme celui du Sud-ouest de l'oued d'Innaten vers la zone de Sidi Bouslah au centre nord avec un gradient hydraulique faible de l'ordre de 0.47%, Avec la présence d'un cône de dépression au niveau de Sidi Bouslah lié à une exploitation intense justifié par une densité des forages dans cette zone.

Les résultats d'analyses physicochimiques montrent que les eaux de la nappe du dévonien inférieur dans la ville d'Illizi sont caractérisées par des bonnes valeurs de pH et de conductivité avec de bonne concentration en éléments chimiques tels que : (Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^- et NO_3^-). Et d'autres éléments presque nuls tels que (NH_4^- , NO_2^- et PO_4^-).

Deux faciès chimiques y prédominent:

- Un faciès Chlorurés Calcique avec un taux de 58,33%
- Un faciès bicarbonaté calcique avec un taux de 41,67%

Donc à partir tous les classifications utilisés dans notre étude (*Piper, Schöeller –Berkaloff, Stabler, Wilcox, Riverside*) On peut conclure dans les limite de notre étude le type des eaux de cette région.

L'utilisation de ces eaux pour l'AEP est admissible sans un traitement préalable, du point de vue agricole, les eaux de la région conviennent généralement pour l'irrigation et pouvant être utilisé sans conditions, pour la majorité des cultures dans certains sols.

Donc, on conclut que cette nappe peut être exploité du point de vue hydrochimique, dans la plus part des zones mais en plus au Sud de la ville surtout dans la zone de Sidi Bouslah ou se trouve des bonnes qualités et des bonnes débits de pompage,

On doit noter que d'autres éléments chimiques ont été pas couverts par notre étude vu les limitations de nos moyens d'analyses, on cite principalement le fer total qui a de forte concentration au niveau de la ville d'Illizi, et qui a nécessité l'installation d'une station de déferrisation, qui traite les eaux des forages avant d'être destinées à l'AEP, ici on fait appel à des études plus avancées afin de mieux comprendre ses fortes concentrations en fer totale.

Conclusion générale :

L'objectif de cette étude hydrogéologique et hydrochimique était de la reconnaissance des ressources en eaux souterraines et leur qualité dans la région d'Illizi.

En effet, notre contribution à aboutir selon les données qui nous ont été disponibles, que le climat aride avec de faibles précipitations (10.9 mm/an), et de températures élevées (34 °C), et une évapotranspiration potentielle de plus de 4920 mm /an, ce qui se traduit par un déficit hydrique le long de l'année.

L'étude hydrogéologique a mis en évidence l'existence d'une nappe du dévonien inférieur, d'un intérêt hydrogéologique important. L'exploitation de la nappe du dévonien inférieur dans la ville d'Illizi est rationnelle selon nos observations sur terrain lors de la campagne de terrain où nous avons constaté les sondages existant contribuent énormément dans la protection de cette richesse souterraine. Dans un stade ultime, l'étude hydrochimique, basée sur les résultats d'analyses effectuées au laboratoire, nous a permis de caractériser les eaux de la nappe du dévonien inférieur par l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines, ainsi que les différentes classifications utilisés dans notre étude tel que (Wilcox, Reverside, Piper, Schoeller–Berkaloff) Montre que ces eaux sont d'un seul type dominant:

- Une eau de bonne qualité de potabilité et d'irrigation.

Il est notable, que la concentration en fer totale est trop élevée dans cette nappe dans la ville d'Illizi, ce qui a mené à l'installation d'une station de déferrisation (la seul en Algérie) opérationnel qui traite les eaux de cette nappe avant de la mise en exploitation.

Cependant, notre étude à mener à l'identification d'un sondage contaminé remarqué par sa conductivité élevé qui nécessite un certain traitement avant de le maitre en exploitation.

Ainsi que les eaux sont caractérisées par une bonne caractéristique physicochimique. L'étude Hydrochimique montre deux types de familles d'eau :

- Un faciès Chlorurés Calcique avec un taux de 58,33%
- Un faciès bicarbonaté calcique avec un taux de 41,67%

La limitation des méthodes utilisées et des points de sondage disponible dans notre étude, fait fortement appel à une étude plus approfondis et plus élargis pour mieux reconnaître et caractérisées cette nappe.

Recommandation :

D'après les résultats obtenus dans notre approche nous pouvons émettre quelques recommandations :

- Approfondir la compréhension de la nappe du dévonien inférieur par le développement des études plus poussées.
- Le contrôle et le suivi des sondages existant pour mieux contribuer dans l'exploitation et la protection de cette richesse souterraine.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Ahmed KHEDRAOUI, 2016, Etude Hydrogéologique de la région d'Illizi, Mémoire Master, UKMO.
- [2] ANRH, 2016, Rapport des forages de reconnaissance sur la nappe du Dévonien inférieur, Rapport technique, ANRH Illizi.
- [3] Alain FOUCAULT, Jean François RAOULT, 2001, Dictionnaire de Géologie, Dunod, Paris.
- [4] BEKKOUCHE Saaida, 2016, Qualité et cartes d'état de facies des eaux souterraines de la région de Bordj Omar Idriss wilaya d'Illizi, Mémoire Master, UKMO.
- [5] HANNI A et DAOUD Y, 2010, Contribution des diagraphies pour l'étude hydrogéologique de la région d'Illizi (Sud-Est de l'Algérie). Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Géologie, Université d'Oran.
- [6] Jean FABRE, 2005, Géologie du Sahara occidental et central, Musée royal de l'Afrique centrale, Belgique.
- [7] J. RODIER, 2009, L'analyse de l'eau, 9ème édition, DUNOD.
- [8] Richard C SELLY et al, 2005, Encyclopaedia of geology, Elsevier.
- [9] ROBERTSON/SONATRACH, 2000, Etude sédimentologique, diagénétique et modélisation sismique des niveaux réservoirs du Bassin d'Illizi, Algérie. Rapport Sonatrach Exploration.
- [10] SELMAN Kelthoum, 2016, L'impact des forages pétroliers sur le Continental Intercalaire dans la région d'Illizi, Mémoire Master, UKMO.
- [11] SONATRACH- SCHLUMBERGER, 2007, Well Evaluation Conference, Algeria.

الملخص

تعتبر المياه الجوفية المصدر الاساسي للمياه في الصحراء الجزائرية، مناخ مدينة إليزي الصحراوي الجاف المتميز بنسب تساقط منخفضة و درجة حرارة عالية تسبب في ندرة الى انعدام المياه السطحية، والحاجة إلى استغلال المياه جوفية. عملنا يتمحور حول الدراسة الهيدروجيولوجية للمياه الجوفية لطبقة الديفونية التحتية في مدينة إليزي، قمنا بمرحلة ميدانية لتحديد المستويات الجوفية للمياه واتجاهات تدفقها. من خلال انجازنا ودراستنا لخريطة المستويات الجوفية تبين لنا اتجاهين اساسيين لصرف المياه، من الشمال نحو الجنوب الشرقي و من الجنوب الشرقي نحو الشمال الغربي. الدراسة الهيدروكيميائية بينت الخصائص الجيدة لهذه المياه التي تتكون من صنفين كيميائيين وهما: صنف كلوريد الكالسيوم بنسبة 58.33 % و صنف بيكاربونات الكالسيوم بنسبة 41.67 % .

كلمات المفتاح: إليزي، المياه الجوفية، الديفوني التحتي، هيدروجيولوجيا، اتجاه الصرف، هيدروكيميا، الصنف الكيميائي.

RESUMÉ :

Les nappes souterraines sont la source principale des eaux dans le Sahara algérien, Le climat de la ville d'Ilizi hyperaride avec des faibles précipitations, et des températures très élevées est à l'origine de la rareté des eaux superficielles, d'où la nécessité à exploiter les eaux des nappes souterraine. Notre travail consiste à l'étude hydrogéologique de la nappe du dévonien inférieur de la ville d'Ilizi, une compagnie de terrain a été effectuée pour déterminer les niveaux piézométriques et les sens d'écoulements de cette nappe La réalisation et l'étude de la carte piézométrique montre deux sens d'écoulement qui sont N-SE et SE-NO. L'étude hydrochimique montre des bonnes caractéristiques, la nappe est composé de deux facies chimiques qui sont: faciès Chlorurés calcique avec un taux de 58,33% et faciès bicarbonaté calcique avec un taux de 41,67%.

Mots-Clés : Illizi, eaux souterraine, dévonien inférieur, hydrogéologie, sens d'écoulement, hydrochimie, facies chimique.

ABSTRACT

Groundwater is the main source of water in the Algerian Sahara, The climate of the state of Illizi is hyper arid with low precipitations and very high temperatures which are at the origin of the scarcity of surface water, hence the need to exploit groundwater. Our work consists in the hydrogeological study of the lower Devonian groundwater of the state of Illizi, a land company was carried out to determine the piezometric levels and the flow directions of this groundwater. The realization and study of the piezometric map shows two flow directions N-SE and SE-NO. The hydrochemistry study shows good characteristics and groundwater is composed of two chemical facies that are: Chlorinated calcium facies with a rate of 58.33% and Bicarbonate calcium facies at 41.67%.

Keywords: Illizi, groundwater, lower Devonian, hydrogeology, flow direction, hydrochemistry, chemical facies.