



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

DAHMOUH Moussa

TABOUCHE Jugurta

Thème

Caractérisation hydrochimique des eaux de surface et souterraine aux périphéries de la mine de fer de Timezrit, Bejaia.

Soutenu le 04 / 06 /2017 devant le jury composé de :

Présidente :	M ^{me} BOUZIDI Nadjima	M.C.A	U.A.M. B
Promoteur :	Mr. MAZA Mustapha	Pr.	U.A.M. B
Examineur :	Mr. SAOU Abdelhamid	M.C.B	U.A.M. B
Invité :	Mr. ATMANI Farid	Doctorant	U.A.M.B

Année Universitaire : 2016-2017

Remerciements

Nous rendons grâce à dieu le Tout-puissant qui nous a donné tout le courage, la sagesse et la patience pour terminer ce travail.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre promoteur, le **Pr. Maza Mustapha**, pour l'aide compétente qu'il nous a apporté, pour sa patience, sa confiance, son encouragement, et Son œil critique qui nous a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections de notre mémoire.

Nous remercions chaleureusement **D^r. SAOU Abdelhamid**, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont également au **D^r. BOUZIDI Nedjima**, pour l'honneur qu'elle nous fait de présider ce jury.

Nous remercions également **Mr. ATMANI Farid**, Doctorant qui nous a assisté et conseillé tout le long de notre travail.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A Mon Père et à Ma Mère qui ont su m'encourager me soutenir mais aussi me pousser à aller de l'avant et ne pas laisser tomber, les mots ne pourront exprimer ma gratitude envers vous.

A Mes sœurs Numidia et Thilelli, je vous dédie ce petit travail en sachant que vous allez faire mieux quand votre tour sera venu.

Aux frères et sœurs que la vie m'a offertes : Nabil Bouchou, Ilhem Hales, Souad Mahmoudi, Locif Bouskine, Ghiles Tighilt, Ahmed Ibersiene, Fateh Igrali, Fateh Zeroual et Lamia Hamani, à toi qui est loin de nous Ahmed Baleh ; le hasard l'a fait **un jour** notre fraternité le gardera pour **toujours**.

A toi DADA, Amirouche El Beniane.

A toute la famille **Tabouche**, et à la famille **Dahmouh**.

A toi Farid Atmani, à qui on a trop cassé la tête, sans toi ce travail ne sera pas fini, je te souhaite bon courage dans le monde de la recherche.

A vous, Rachad.L, Yacine.G, Khaled.B, Hocine.K, Yazid.D, hacène.B, et Takfa.I, Ferroudja.F, Hannane.A

A toute l'équipe de l'Association culturelle Iagachene n'Ath Jennad
À tous ceux qui ont marqué leur présence.

A la mémoire de nos camarades Amine.Z et Makhoulf.A

JUGURTA TABOUCHE.

DÉDICACES

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :

A Mon père et à ma mère pour leur exprimer tout le respect que j'ai pour eux et pour leur témoigner ma reconnaissance pour tous les efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de me voir réussir ainsi de m'avoir légué la plus chère des vertus qui est l'éducation.

A Mes frères, Hamza, Saïd, Brahim. A mes deux sœurs, Nacera et Nadia. A ma belle-sœur et ces deux filles Sara et Meriem.

A ma Grand-Mère Titeme Nathe Tahar.

A la mémoire de mon Grand-Père.

A ma tante Nana Zhore et sa famille.

A ma tante Fatima et toutes sa famille.

A ma bien aimée CYLIA.

A toute la famille Dahmouh.

A toute la famille Tabouche.

A toi ATMANI Farid qui nous a supporté durant toute cette période, bonne courage pour la suite de ta carrière.

Tous mes amis : Adel, Salim, Bob, Si-RED El-Hadje, Yanis, Mamou, Ferhat, Dacdac, Slimane, Mokrane, Kamel KOTIAS, les 3 F, LOUOU21, Moumouh, Karim, Hend, Bilou, Fatheh, et tous mes autres amis de longue date.

Dahmouh moussa.

Liste des abréviations

DMA : Drainage minier acide.

ETM : Eléments trace métalliques.

GPS : Global positioning system.

HAB : Habitants

SAR : Sodium adsorption ratio.

SIG : Système informatique géographique.

SAA : Spectrométrie d'absorption atomique.

NW : Nord-West

SE : Sud-est

SW : Sud-West

ONM : Organisation National Météorologique

°C : Degré Celsius

Cu : Cuivre

Zn : Zinc

Mn : Magnésium

Hg : Mercure

Pb : Plomb

Fe : Fer

Cd : Cadmium

Ar : Arsenic

T : Alcalinité

V_{tm} : Volume moyen titré

N : Normalité

Ag NO₃ : Nitrate d'argent

nm : Nano mètre

A_p : Alcalinité phénolphtaléine

A_t : Alcalinité totale

Na : Sodium

K : Potassium

Ca : Calcium

HCO₃⁻ : Bicarbonate ou bien hydrogénocarbonate

µm : Micromètre

CE : Conductivité électrique

µS : micro siemens

S01 : échantillon n°01

SAR : Sodium Adsorption Ratio

Liste des figures

Chapitre I : Généralités

Figure I.1 : Carte géographique de la wilaya de Bejaia.....	3
Figure I.2 : Répartitions de la production.....	4
Figure I.3 : Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (modifié d'après Durant Delga, 1969).....	6
Figure I.4 : Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébines.(Charaf, 2000).....	7
Figure I.5 : Coupe géologique du massif de Timezrit (Duplan, 1952).....	9
Figure I.6 : Extraite de la carte géologique de Sidi Aich (1/50 000).....	10
Figure I.7 : Représentation graphique des précipitations.....	12
Figure I.8 : Carte des réseaux hydriques de la zone d'étude.....	14
Figure I.9 : Sources, transferts, impacts et risques des éléments traces sur l'environnement (d'après Camille Dumas).....	17

Chapitre II : Matériels et Méthodes

Figure II.1 : Localisation des points d'échantillonnages.....	22
Figure II.2 : pH mètre.....	22
Figure II.3 : Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA).....	25
Figure II.4 : Echantillon acidifié et filtre à seringue et tubes à essais utilisés pour la préparation des échantillons.....	26
Figure II.5 : Interface de logiciel Diagrammes.....	27

Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III.1 : Valeurs des pH des échantillons.....	30
Figure III.2 : Conductivité dans les points d'échantillonnages.....	31
Figure III.3 : Alcalinité des différents échantillons.....	31
Figure III.4 : Concentration de Cuivre dans les points d'échantillonnages.....	32
Figure III.5 : Concentration du Zn dans les points d'échantillonnages.....	32
Figure III.6 : Concentration du Fe dans les points d'échantillonnages.....	33
Figure III.7 : Source du point d'échantillonnage S 14.....	33
Figure III.8 : Concentrations de Pb dans les points d'échantillonnage.....	34

Figure III.9 : Diagramme de Piper.....	35
Figure III.10 : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF.....	36
Figure III.11 : Diagramme Riverside des échantillons.....	37
Figure III.12 : Diagramme de wilcox des échantillons.....	39

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Présentation de la région de Timezrit.....	3
Tableau I.2 : Production annuelle de 1963 jusqu'à 1970(Benhamou, 1971).....	4
Tableau I.3 : Données climatiques de la région de 2010 jusqu'à 2016(ONM).....	12
Tableau II.1: les coordonnées et nature des points échantillonnés.....	22
Tableau II.2: Concentrations des différentes gammes d'étalons de chaque élément analysé.....	26
Tableau III.1 : Résultats des paramètres physiques, éléments majeurs et éléments traces.....	29

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités

I. Présentation de la zone d'étude.....	3
I.1. Historique de la mine.....	4
I.2. Géologie régionale :	5
I.2.1. Zone interne.....	5
I.2.1. Zones externes.....	7
I.3. Géologie du site d'étude.....	8
I.3.1. La stratigraphie locale.....	9
I.3.2. Nature du minerai.....	11
I.4. Climat de la région étudiée.....	12
I.5. Hydrographie.....	13
I.6. Hydrogéologie régionale.....	14
I.6.1. Rôle hydrogéologique des fissures.....	15
I.6.2. Circulation des eaux souterraines.....	15
I.7. Notion d'Elément Trace Métallique (ETM).....	15
I.7.1. Les origines des éléments traces métalliques dans le sol.....	17
I.7.1.1. Origine naturelle.....	17
I.7.1.2. L'origine anthropique.....	17
I.7.2. Cycle des ETM dans le milieu eau/roches.....	17
I.7.3. Le comportement des ETM dans la ressource eau/sol.....	18
I.7.3.1. La Spéciation	18
I.7.3.2. Mobilité.....	19
I.8. Etat de l'art.....	19

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1. Echantillonnage.....	21
II.1.1.Introduction.....	21
II.1.2. Inspection de la région étudiée.....	21
II.2. Protocole échantillonnage.....	22
II.3. Analyse chimique et paramètres physiques	22
II.3.1. Mesure de pH, et le potentiel redox.....	22
II.3.2. L'alcalinité.....	22
II.3.2.1. Définition.....	22
II.3.2.2. Détermination de l'alcalinité.....	23
II.3.3. Dosage des éléments majeurs.....	23
II.3.4. Dosage des éléments traces métallique par la Spectrométrie d'absorption atomique...24	
II.3.4.1. Principe.....	24
II.3.4.2. Etalonnage.....	25
II.3.4.3 Préparation des échantillons.....	26
II.3.5. Modélisation hydrochimique.....	27

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1. Resultats et discussions.....	28
III.2. Discussions et interprétations des résultats.....	30
III.2.1. Paramètres physiques	30
III.2.2. Représentation graphique des faciès hydrochimiques.....	34
III.2.2.1. Diagramme de Piper.....	34
III.2.2.2. Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF.....	35
III.2.3. Pouvoir alcalinisant.....	37
III.2.3.1. Diagramme Riverside.....	37
III.2.3.2. Diagramme de Wilcox.....	38
Conclusion.....	40

Introduction générale

Introduction générale

Plusieurs facteurs interviennent dans le développement économique et social du pays, et l'eau est l'élément clé de ce développement, cependant cette ressource est soumise à d'innombrables menaces, ce qui rend la situation de plus en plus critique surtout pour les régions où elle se raréfie.

A l'heure actuelle, la protection des ressources hydriques, spécifiquement les eaux souterraines, a acquis une importance primordiale et cela en raison de leur rareté et du grand nombre des sources polluantes qui peuvent les affecter.

Connue par sa très bonne qualité de minerai depuis le royaume des Hammadites, la mine de fer de Timezrit occupe une place importante dans l'histoire de Bejaia depuis des lustres, mais les activités minières du point de vue environnementale sont les plus néfastes et destructibles pour l'environnement et ses composantes (eau, sol, air, vivant...), comme la plupart des mines abandonnées pour des difficultés d'exploitation, ou épuisées et fermées, est ce que la mine de fer de Timezrit affecte son milieu environnementale ?

Le but de notre travail est de montrer ou non si la mine en question affecte son milieu et pour cela on va se focaliser sur la composante eau et on déterminera, par sa caractérisation, si l'activité minière, dans son contexte hydrogéologique et à travers les échanges qui ont pu se produire, a pu atteindre la qualité de l'eau et déduire, par la suite, son impact à la périphérie de la mine.

Pour ce faire, en premier lieu, on va étudier la zone de la mine en détaillant son milieu qui est probablement sujet d'une contamination et d'une diffusion d'éléments pouvant nuire à la composante eau dans sa périphérie. En second lieu, on va définir la nature des éléments qui peuvent être générés par cette activité minière et leurs comportements, une fois diffusés, à travers la matrice eau, en tenant compte de la nature du minerai et des formations géologique et hydrogéologique de la région environnante.

Ainsi, on procédera à l'analyse, par spectrométrie d'absorption atomique, ceci nous permettra de déterminer l'existence ou non d'une éventuelle contamination.

Ce mémoire s'articule principalement sur trois chapitres :

- Le premier chapitre est essentiellement bibliographique et est consacré à la présentation de la zone d'étude, la géologie, l'hydrogéologie, les éléments traces métalliques et l'absorbance atomique.
- Le deuxième chapitre présente les techniques expérimentales de prélèvement, de conservation, de traitement des échantillons ainsi que la mise en œuvre du dosage.
- Le troisième chapitre traite les résultats obtenus et leurs interprétations.

Chapitre I

Généralités sur la

zone d'étude

I. Présentation de la zone d'étude

L'ancienne mine de fer de Timezrit est située à quelque centaines de mètres du chef-lieu de la daïra de Timezrit, à 40 kilomètres au Sud-Ouest de la ville de Bejaia et à environ 200 Km à l'Est de la capitale d'Alger. La mine se trouve sur le massif montagneux du Djebel Beni Yemel avec à son piedmont se développe une importante population. On trouve des champs importants d'agriculture notamment la culture des agrumes le long de la plaine d'Oued Soummam.

Tableau I.1 : Présentation de la région de Timezrit (ANIREF 2011)

Administration	Démographie	Localisation	Superficie
Wilaya : Bejaia	Population : 25 853 hab	Coordonnée : L'attitude 36° 39 Nord	38.09 km ²
Chef-lieu : Timezrit	Densité : 678.7 hab/km²	Longitude 4° 46 Est	

La mine se situe plus exactement sur le flanc Nord-Ouest de l'anticlinal de Timezrit qui surplombe la vallée de la Soummam d'environ 500 mètres d'altitude.

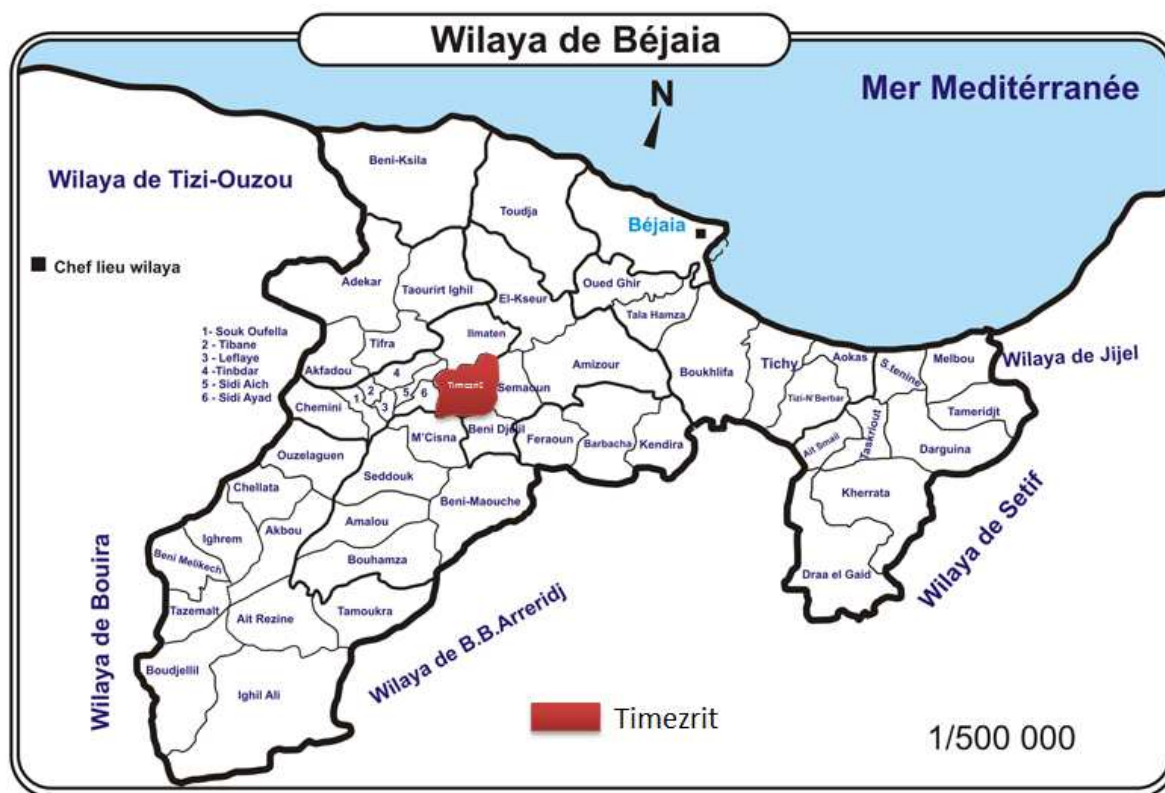


Figure I.1 : carte géographique de la wilaya de Bejaia (réalisé par SIG)

I.1. Historique de la mine

La concession a été établie le 6 septembre 1902, l'exploitation a vite démarré avec une exploitation à ciel ouvert terminée vers 1911. Depuis 1911 jusqu'en 1962 une exploitation par tranches montantes remblayées a permis d'exploiter 5 120 000 tonnes d'hématite et de sidérite (Benhamou, 1971).

Tableau I.2 : Production annuelle de 1963 à 1970 (Benhamou, 1971)

Années	Production (tonnes)
1963-1964	50 000
1964-1965	105 000
1965-1966	108 000
1966-1967	142 000
1967-1968	137 000
1968-1969	135 000
1969-1970	146 000

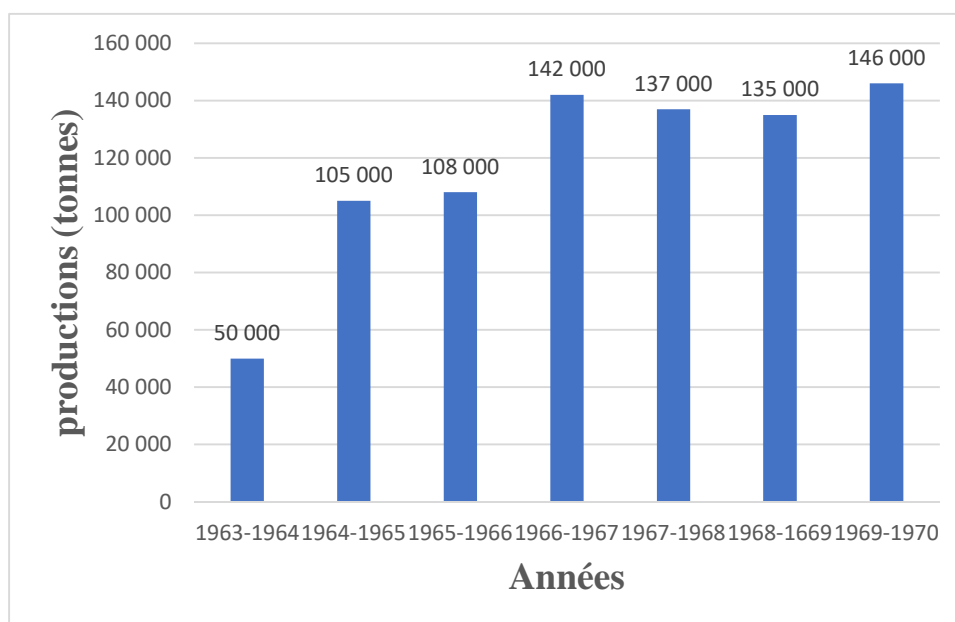


Figure I.2 : Histogramme de répartition de la production (Benhamou, 1971)

I.2. Géologie régionale

La région de Timezrit est située sur la chaîne des Maghrébides. Cette chaîne est divisée en deux zones :

- Zone interne au nord
- Zone externe au sud

Ces deux zones sont séparées par le sillon des flyschs :

I.2.1. Zone interne

Elle constitue le socle kabyle ainsi qu'une étroite bande de terrains situés plus au sud - la dorsale kabyle - (Durant Delga, 1969) ou chaîne calcaire « Glangeaud, 1932 ».

❖ La grande Kabylie

Est une région dont sa bordure au Nord est limitée par la mer, à l'Est et au Sud par la vallée de la Soummam, et à l'Ouest par Isser (Bennabi, 1985).

❖ La petite Kabylie

Constituée par les massifs cristallins, les Babors, massif de Collo, et de l'Edough. La limite au Sud est imprécise (zone de transition), la limite Ouest est une zone de dépression de la Soummam (Bennabi, 1985).

✓ Socle kabyle

Composé de massifs cristallophylliens (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (ordovicien et carbonifère) peu métamorphique. Ce socle affleure d'Ouest en Est : les massifs de Chenoua (à l'Ouest d'Alger), de grande Kabylie et petite Kabylie (entre Jijel et Skikda). Ce dernier avec 120 km de long et de 30 km de large, constitue le plus grand affleurement du socle kabyle en Algérie. Le socle est par endroit recouvert en discordance par des dépôts détritiques (principalement des molasses conglomératiques) d'âge oligocène supérieur-miocène inférieur, appelés Oligo-Miocène kabyle (Charaf, 2000).

✓ La dorsale kabyle

C'est une chaîne calcaire à cause de l'importance jurassique inférieur calcaire (Glangeaud, 1932), une étroite zone ne dépassant pas quelque km de largeur, elle se trouve dans les zones suivantes : cap de Ténès, dans le massif de Chenoua, au Sud Est d'Alger (massif de Larbaa, de Bou-Zegza, et de Djurdjura), est au Nord de Constantine jusqu'au Sud de Annaba, la dorsale se présente sous forme d'écailles d'âge Permo-Triasique à Eocène, des dolomies de Trias au Lias inférieur et des grès de Permo-Trias (Durand Delga, 1969).

Cette dorsale est subdivisée du Nord au Sud en trois unités selon le faciès et l'épaisseur de calcaires : dorsale interne, médianes, et externe (Charaf, 2000).

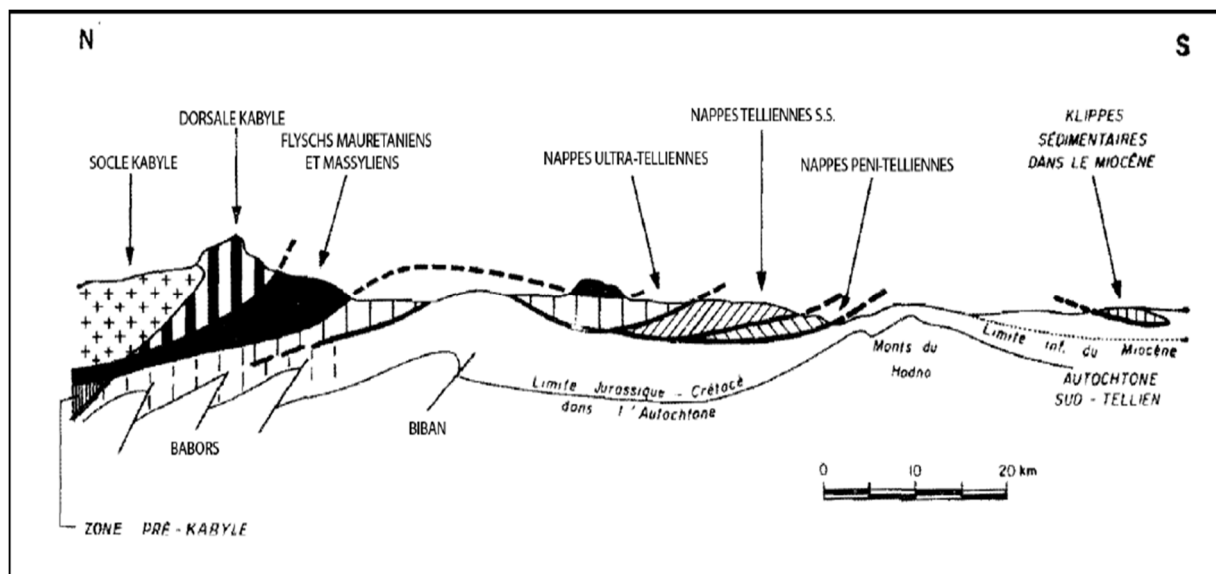


Figure I.3 : Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (modifié d'après Durant Delga, 1969)

✓ Les flyschs Kabyles

se présentent en trois types :

- En situation interne, superposés tectoniquement aux massifs Kabyles, flyschs nord Kabyles.
- En situation relativement externe, à la bordure Sud de la dorsale, flyschs Sud Kabyles.
- En situation très externe sous forme de masses isolées flottant sur le Tell.

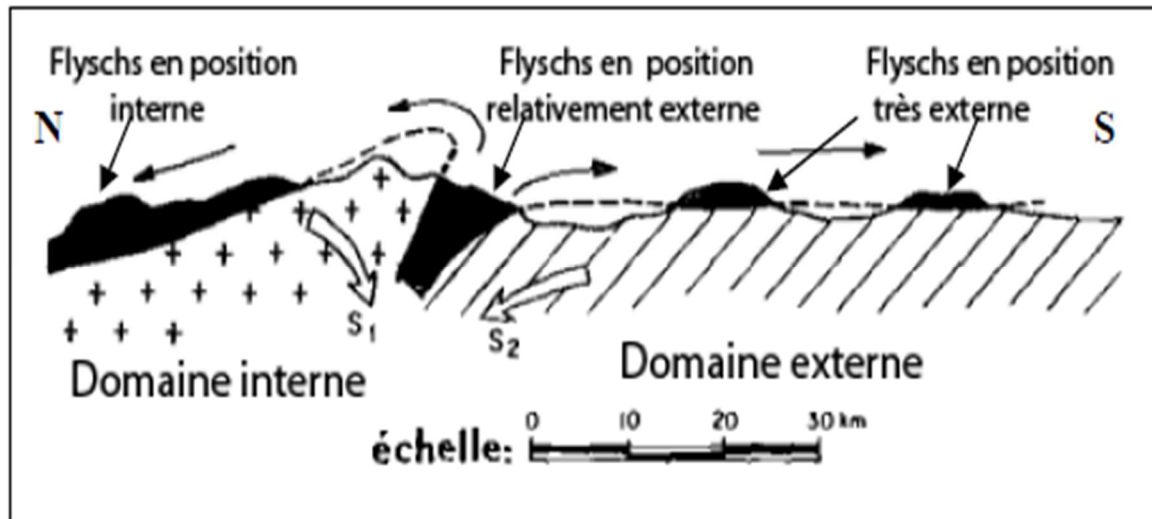


Figure I.4 : Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébines (Charaf, 2000)

On distingue du Nord au Sud deux grands groupes de flyschs :

- Les flyschs maurétaniens : ils sont relativement épais et occupent une position interne dans le domaine des flyschs.
- Les flyschs massyliens : ils occupent une position externe dans le domaine des flyschs et comportent une série pélito-quartzitique et pélito-micro-bréchique d'âge crétacé supérieur.

Le troisième groupe de flyschs plus récent :

- Les flyschs numidiens : ils sont constitués de niveaux gréseux d'âge oligocène terminal-aquitainien épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites versicolores oligocènes. Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.

I.2.1. Zone externe

les zones telliennes forment un empilement complexe surmontant au Sud l'autochtone présaharien des hautes plaines.

- Le tell autochtone : ces unités sont du Nord au Sud
 - Les écaillés pré kabyles du Nord constantinois.
- Les nappes telliennes :

- Les unités ultra telliennes : elles sont définies par un faciès homogène essentiellement marneux du crétacé à l'éocène avec quelques intercalations de bancs de calcaires à silex noir.
- Les nappes telliennes sensu-stricto : formées de lias de plate forme surmonté par du jurassique plus marneux, puis par le crétacé qui, détritique devient marneux à argilo-calcaire, et enfin de l'éocène, il est représenté par des marnes épaisses (Bennabi, 1985).

Elles peuvent se rassembler en cinq groupes :

- Les nappes baboriennes (Obert, 1981)
 - Les unités Bibaniques (Caire, 1957)
 - Les nappes de Djemila, Beni Abdellah, Barbacha Draa el Arba Erragrène.
 - Les unités Gouraya-Arbalou-Brek.
 - Les nappes sétifiennes à matériel éocène (Leikine, 1971 ; Obert, 1981).
-
- Les nappes peni-telliennes : elles sont formées par une alternance de faciès telliens et de faciès rappelant ceux des domaines néritiques sétifiens ou constantinois. Ces séries assureraient le transit entre les faciès néritique et septentrionaux plus profonds d'affinité Bibanique, (Kazitani, 1986).

I.3. Géologie du site d'étude

La région représente un anticlinal suivant la direction NO-SE. L'érosion fut elle que cette structure a pris une forme synclinale accentuée par l'enfouissement triasique rendu meuble par le niveau aquifère existant à leurs bases.

Les roches triasiques constituent en effet le cœur de cette structure et représente une sorte de pilier sur lequel viennent s'appuyer les roches calcaire-dolomitiques du Lias.

Le clivage de flux se manifeste également suivant des plans sub-verticaux, ce qui indique que les roches calcaires liasiques ont subi des déformations par plissement très intenses (Bennabi, 1985).

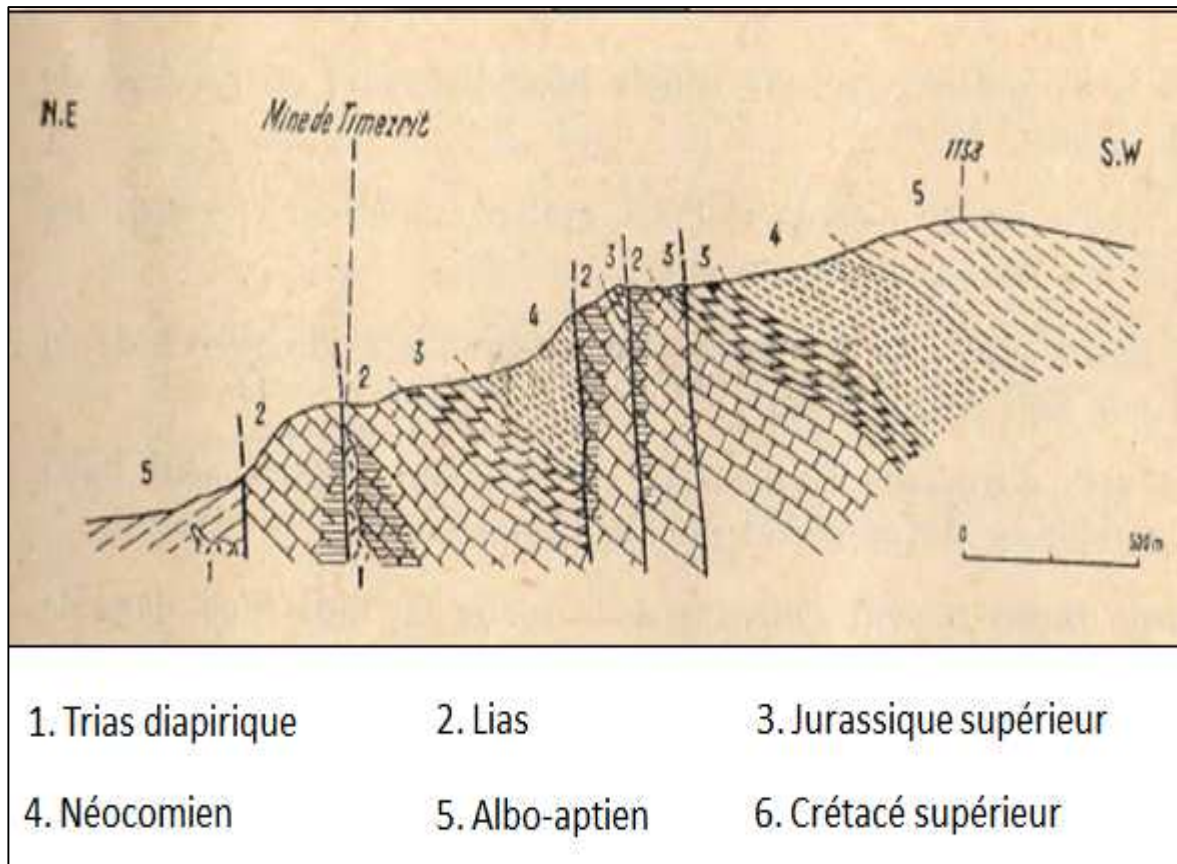


Figure I.5 : Coupe géologique du massif de Tamezrit (Duplan, 1952)

I.3.1. La stratigraphie locale

La stratigraphie de la région d'étude est caractérisée par l'affleurement de plusieurs formations. Une carte géologique de la région d'étude est réalisée avec le logiciel SIG « QGIS » à partir de la carte géologique de Sidi Aich (Louis Duplan, 1951) (figure I.6).

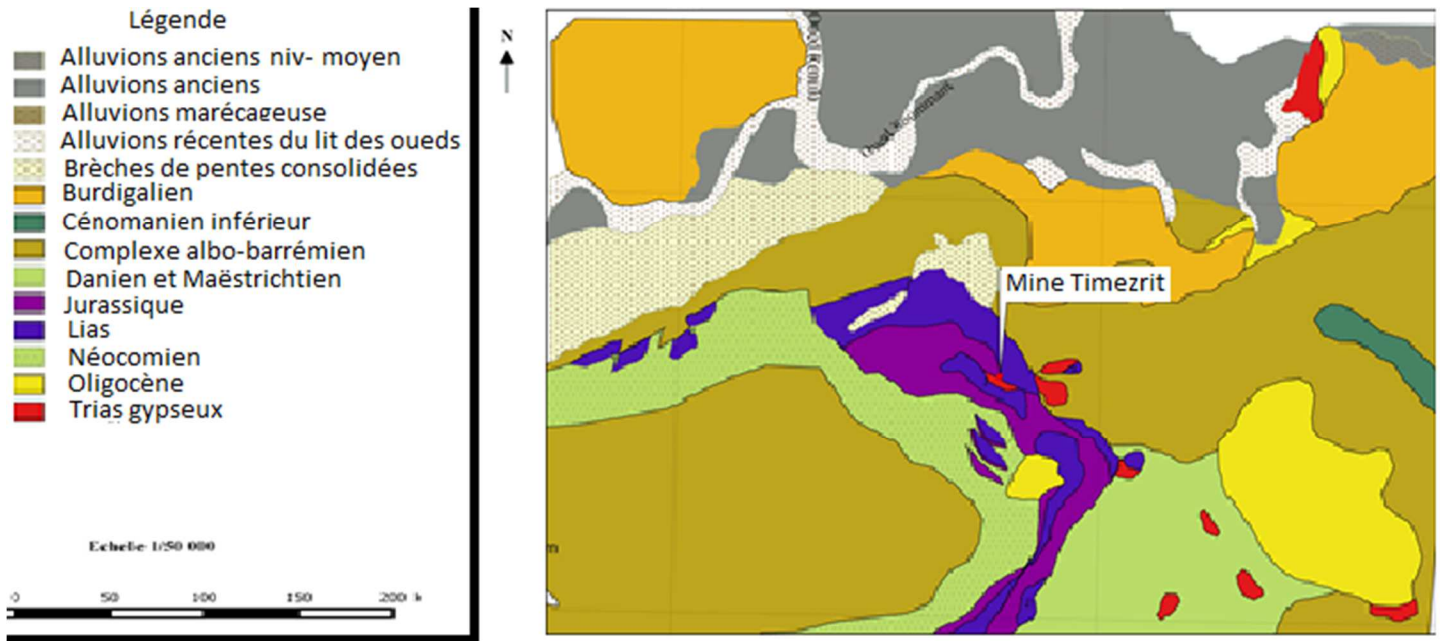


Figure 1.6 : Extraite de la carte géologique de Sidi Aich (1/50000)

➤ **Complexe albo-barrémien**

Le complexe Albo-Barrémien est formé de schistes noirs esquilleux, avec quelques rares lentilles de calcaire. Faciès monotone de 400 à 500 m d'épaisseur, surmonté au SW de Sedouk par le cénomanién inférieur et repose à Timezrit sur le Néocomien

➤ **Néocomien**

Représenté seulement dans le massif du Timezrit (100-150 m d'épaisseur), débute : à la bordure Sud, par des marno-calcaires concordant avec le Jurassique supérieur, et renfermant des Ammonites pyriteuses très mal conservées, sur le revers Nord, par un conglomérat de base à éléments surtout jurassique supérieur. Le sommet du Néocomien est représenté dans tout le massif par des schistes noirs très esquilleux.

➤ **Jurassique supérieur et moyen**

Ils sont caractérisés par des schistes rouges à la base, vert au sommet, avec bancs de calcaires oolithiques silicifiés et de marno-calcaire noirs. Au sommet, on trouve des calcaires fins verts, à calpionelles non déterminables spécifiquement (60-80 m).

➤ **Lias**

Dans le massif de Timezrit le Lias est caractérisé par des calcaires sublithographiques blancs, jaune-chamois dans la partie inférieure minéralisée (amas de substitution de sidérose très épigénisée en hématite) (lias inférieur), des calcaires finement lités à silex (lias supérieur).

➤ **Trias**

Faciès classiques du Trias gypso-salin en pointements diapirs.

➤ **Oligocène** : Présente deux faciès différents.

- **Faciès kabyle**

Localisé en bordure du massif de Chellata. Sur la bordure Nord, il est formé par des conglomérats dont les éléments appartiennent, pour la plupart, aux calcaires du Lutétien supérieur. Mais on rencontre aussi quelques galets empruntés aux calcaires du Trias, aux grès du Trias et aux lydiennes et quartzites du Houiller.

Sur la bordure S, il est caractérisé par l'intrication de faciès secondaires : calcaires à Nummulites remaniées, alternant avec des marnes et argiles verts et rouges.

- **Faciès numidien**

Caractérisé par un faciès argileux et un faciès gréseux. Les argiles, à la base de la série, sont vertes et rouges, avec parfois de petits bancs de quartzites ou de marnes schisteuses noires. Les grès sont jaunes, ferrugineux, souvent grossiers.

I.3.2. Nature du minerai

Dans le gisement de fer de Timezrit, on distingue deux types de minerais :

- Un minerai oxydé : Hématite, Hématito-Goethite.
- Un minerai carbonaté : Sidérite.

➤ **Premier type : minerai oxydé**

- Hématite : ce type de minerai constitue 5 à 7 % de toutes les réserves connues. Il est présent dans tous les amas mais avec des proportions variables. C'est un minerai à structure massive, sa teinte est rouge sombre.
- Hématito-goethite : ce type de minerai constitue 90% des réserves du gisement. Il est constitué de Goethite, Hématite, Limonite ainsi qu'une petite quantité de sidérite, de calcite et de produits de décompositions des silicates. C'est un minerai à structure massive fibreuse, parfois caverneuse, la teinte est brune (Benhamou, 1971).

➤ **Deuxièmes types : carbonaté**

- Sidérite : elle est présente dans la partie sud de l'amas, et représente 1% des réserves totales.

I.4. Climat de la région étudiée

La région étudiée est soumise à un climat méditerranéen typique, caractérisé par l'alternance très régulière d'une saison relativement froide et humide avec une saison chaude et sèche.

Tableau I.3 : Données climatiques de la région de 2010 jusqu'à 2016 (ONM)

Année	Températures moyenne (C°)	Précipitations moyenne (mm)	Temps de pluies (jours)
2010	18.00	773.71	101.00
2011	18.10	788.91	99.00
2012	18.00	1373.41	93.00
2013	17.70	917.13	120.00
2014	18.60	729.98	79.00
2015	18.30	509.49	75.00
2016	18.70	679.45	85.00

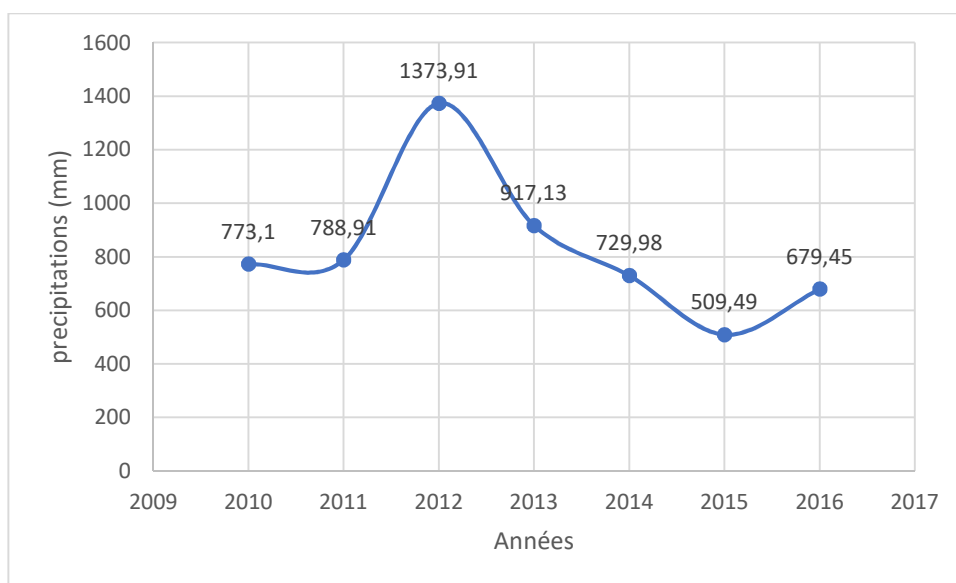


Figure I.7 : Représentation graphique des précipitations (ONM)

Les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été, la température moyenne annuelle est de 18.2 C⁰, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 824.58 mm.

On remarque que les précipitations sont beaucoup plus importantes de 2010 à 2012, et que l'année 2012 a enregistré un seuil de 1373.91mm ; puis à partir de 2012 jusqu'à 2015 une chute remarquable de précipitation, pour atteindre une valeur minimale en 2015 avec 509.49mm. L'année 2016 a enregistré une légère remontée de précipitation.

I.5. Hydrographie

La mine de Timezrit se situe dans le bassin versant de la Soummam, qui est drainé par Oued Soummam. Oued Soummam est formé de la confluence de l'oued Sahel qui prend naissance des montagnes du Djurdjura et du plateau de Bouira, et de l'oued Bou Sellam qui prend naissance du plateau Sétifien. Notre étude se limite à la région de Sidi Aich-Timezrit, à la périphérie de la mine le réseau hydrographique est marqué par des cours d'eau temporaires qui coule dans la période hivernale, sur le côté Est de la mine on trouve Oued Amassine un affluent d'Oued Soummam qui prend naissance des hauteurs Sétifiennes et de côté Nord-Ouest on trouve Oued Remila un affluent d'Oued Soummam qui prend naissance des hauteurs D'Akfadou.

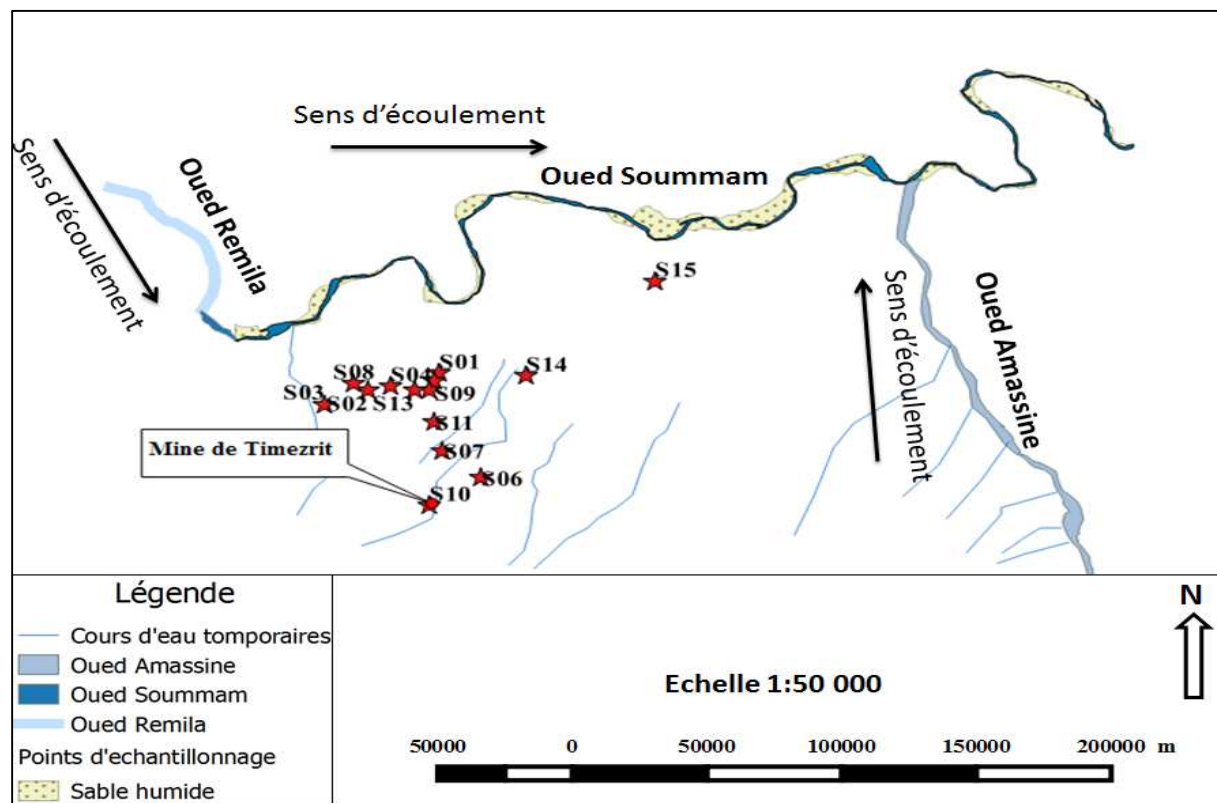


Figure I.8 : Carte des réseaux hydrographiques de la zone d'étude (réalisée par SIG)

I.6. Hydrogéologie régionale

Le gisement de fer de Timezrit se trouve dans les roches calcaires d'âges différents, trias (première période de mésozoïque, s'étend de -251 à -201,6 millions d'années) et le lias (époque de la période du jurassique, s'étend de -200 à -176 millions d'années).

Les roches encaissantes du gisement représentent une masse calcaire karstique puissante, à stratification subverticale très fissurée. La surface étant arrosée, l'eau pénètre dans le sol et s'écoule subverticalement sous l'action des forces de gravité.

La perméabilité en grand des fissures, associées à la porosité efficace des calcaires est estimée à 20% permettent ainsi à l'eau d'atteindre la zone noyée. Cependant une grande partie de cette eau n'atteint pas la zone noyée, elle sert à alimenter les bassins des sources situées au-dessus du niveau hydrostatique, ou bien s'accumule dans les cavités fermées existant dans les roches encaissantes du gisement.

Les eaux d'infiltration atteignent donc en partie la zone noyée, remplissant tous les vides quel que soit leurs dimensions.

On distingue dans les roches encaissantes du gisement deux zones :

- Une zone noyée.
- Une zone dénoyée.

Ces deux zones sont séparées par une zone intermédiaire. La zone noyée est limitée supérieurement par une surface libre plane à échelle régionale, et qui correspond à la surface hydrostatique des terrains meubles, elle est discontinue à échelle locale.

➤ **Zone noyée**

La zone noyée est la tranche horizontale inférieure du matériau, saturée en eau contient la partie inférieure du gisement. Le creusement de la descente a permis de connaître la cote supérieure de cette zone, elle se situe à 308 m. Cependant, le niveau d'eau se stabilise dans le l'ouvrage à une cote qui est lui propre. En d'autres termes, sur des points isolés le matériau de la zone noyée apparaît comme aquifère à des niveaux variables et la surface libre n'est pas toujours mise en évidence (Benhamou, 1971).

➤ **Zone dénoyée**

La zone dénoyée est la partie de roche encaissante située au-dessus de la surface libre. C'est dans cette zone dénoyée qu'existent les cavités karstiques servant de réservoirs aux eaux d'infiltration.

Dans cette zone l'écoulement s'effectue par les fissures ouvertes qui joignent la surface libre et par la même occasion l'alimentation. En réalité les phénomènes sont complexes et liés à la structure souterraine. Cette zone dénoyée soit limitée inférieurement par une surface hydrostatique (Benhamou, 1971).

➤ **Zone intermédiaire**

Le creusement de la descente a mis en évidence cette zone. Elle se situe entre les niveaux 312 et 308 m. Le matériau qui constitue cette zone est représenté par un banc de grès qui remplace les calcaires dolomitiques blancs du Trias (Benhamou, 1971).

I.6.1. Rôle hydrogéologique des fissures

L'alimentation de la zone noyée se fait grâce aux diaclases existant dans la zone dénoyée et joignant la surface libre. Les joints de stratification ont un rôle très faible. Les failles peuvent être considérées comme drain ou barrage suivant le cas.

Les failles de contacts entre le Lias et le Trias servent comme drains aux eaux de pluies et ne sont pas qu'en périodes de pluies. En résumé, seules les fissures d'origine tectoniques seraient favorables à la circulation souterraine (Bennabi, 1985).

I.6.2. Circulation des eaux souterraines

L'alimentation de la zone noyée se fait essentiellement grâce aux diaclases obliques existant dans la zone dénoyée. Les autres accidents n'ont qu'un rôle secondaire. Les diaclases constituent des drains à l'eau provenant des bassins des sources qui sont situés dans le Jurassique supérieur.

Les roches du crétacé qui encerclent ce bassin constituent une sorte de barrage aux eaux de ce dernier.

I.7. Notion d'Elément Trace Métallique (ETM)

La convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance (1979, ONU/CEE) désigne par le terme de « métaux lourds » tout métal ou métalloïde

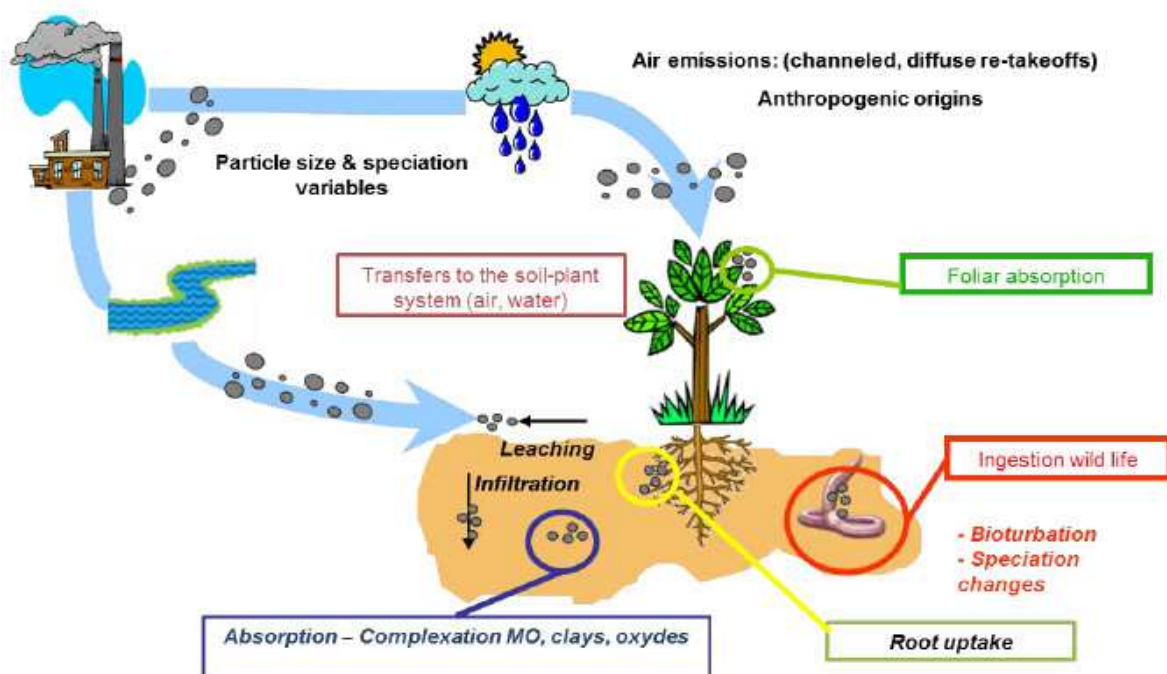
qui a une masse volumique supérieure ou égale à 4.5 g/cm^3 , et qui présente des risques de toxicité pour les organismes vivants

Cependant cette définition englobe un nombre important d'éléments chimiques ($N=65$) qui parfois peuvent être non nocifs dans leur milieu naturel, et ce sens large n'a pas de réel fondement scientifique, ni juridique, et certains de ces éléments à faibles doses sont essentiels au développement des organismes (ex : Cu, Zn, Fe, Mn...), par ailleurs, suite à l'augmentation de leurs concentrations, associée à leurs capacités d'accumulation, ils induisent des risques de toxicité (1979, ONU/CEE)

D'autres éléments sont en revanche toxiques à de très faibles doses (ex : Cd, Hg, Pb).

Ainsi, l'appellation « métaux lourds » a été progressivement abandonnée au profit du terme d'éléments traces métalliques (ETM), qui peuvent être définis comme des métaux (ou métalloïdes) dont la concentration est inférieure à 1g/kg de matière sèche dans la croûte terrestre, ou inférieure à 0.1g/kg de matière sèche chez les organismes vivants (Pourrelier et Berthelin, 1998).

Les ETM ne sont pas biodégradables et peuvent se répandre dans tous les compartiments environnementaux (Erwan Tessier, 2008)



*Figure I.9 : Sources, transferts, impacts et risques des éléments traces sur l'environnement
(d'après Camille Dumas)*

I.7.1. Les origines des éléments traces métalliques dans le sol

I.7.1.1. Origine naturelle

Les ETM sont naturellement présents dans les sols et les eaux en faibles quantités, ils peuvent être libérés lors de l'altération de la roche mère (roches magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires) par l'altération des minéraux primaires et secondaires comme les argiles, oxydes et carbonates.

Ils constituent l'ensemble endogène appelé fond pédo-géochimique : concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique, (Alloway, 1995) (Denis et Baize, 2002)

I.7.1.2. L'origine anthropique

➤ Les activités industrielles

Les activités industrielles sont des sources importantes d'ETM, pour l'environnement en général et pour les écosystèmes terrestres en particulier, Les sources de contaminations industrielles sont la production de batteries ou d'accumulateurs, de matières plastiques, de vernis, de pigments, de produits phytosanitaires et d'engrais.

Les rejets industriels, notamment composés de métaux lourds, sont les plus toxiques pour les eaux même en faibles quantités, et causent des problèmes de phytotoxicité sur la surface et polluent les eaux souterraines (Stepniewska et Bucior, 2001).

➤ Les activités minières

Avec la révolution industrielle, en particulier depuis le début du 20^{ème} siècle, l'exploitation des mines métallifères en vue de la production de produits manufacturés a augmenté de façon considérable les sources de pollutions.

La métallurgie (mines, fonderies) participe de façon importante à la contamination des sols et des eaux *via* les rejets atmosphériques et le stockage des déchets (Nriagu, 1990)

I.7.2. Cycle des ETM dans le milieu eau/roches

Les ETM qui arrivent dans le compartiment aquatique ont diverses origines, qui peuvent être regroupées en deux catégories : naturelles et anthropiques comme cité précédemment.

Les sources naturelles proviennent principalement de l'altération physique et chimique des roches, et des émissions volcaniques, les sources anthropiques sont multiples, les principales proviennent de l'exploitation des minerais (extraction), de l'industrie métallurgique (fonderies), de l'agriculture (pesticides, engrais), de la combustion des hydrocarbures, des incinérateurs, etc.

Ces différentes sources participent à l'enrichissement du milieu aquatique par les retombées atmosphériques, par les apports fluviaux, par les eaux de ruissellement sur les surfaces imperméabilisées, par les exutoires urbains et industriels, et par les rejets des stations d'épuration.

Une fois arrivés dans le compartiment aquatique, sous formes de particules, dissoutes ou colloïdales, les ETM (principalement des cations métalliques) subissent diverses réactions physico-chimiques et biologiques qui influencent leur spéciation (Michael et kennish, 2002) (Werner et al, 1996).

Ainsi selon les constantes cinétiques et thermodynamiques réactionnelles, les ETM sont présents dans la colonne d'eau sous différentes formes dissoutes {ions libres, hydroxydes, complexes inorganiques, et organiques} (Buffle, 1989).

Les paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau (tels que le pH, la teneur en oxygène, la salinité, la dureté, la teneur en carbone organique) ont une forte influence sur la spéciation et par conséquent sur la mobilité des ETM.

Par exemple, il a été démontré que le métal ionique libre (Mn^{+2}) était une des formes les plus réactives, avec les espèces neutres, puisque facilement assimilables par les organismes vivants (Vasconcelos et Leal, 2001).

I.7.3. Le comportement des ETM dans la ressource eau/sol

Les ETM sont liés à différents constituants du sol et sont présents sous différentes formes chimiques (Buffle, 1989).

Ils peuvent changer de forme ou migrer vers d'autres constituants du sol ou vers/ à travers la phase liquide selon les conditions physico-chimiques.

Ces changements rendent les ETM mobiles répandant ainsi la pollution.

I.7.3.1. La Spéciation

Le terme de spéciation est utilisé dans la chimie des sols et des sédiments et désigne la forme chimique et structurale sous laquelle se trouve un élément métallique. La spéciation a été définie comme étant la détermination d'une forme spécifique (monoatomique ou moléculaire) ou bien la configuration selon laquelle un élément peut être présent dans un groupe d'atomes correspondant à différentes matrices, exemple : spéciation de Cd (Hetland et al., 1991).

I.7.3.2. Mobilité

La mobilité d'un élément est caractérisée par son aptitude à passer dans les compartiments du sol à l'aide de la phase liquide, qui le libère en coulant, et le rendant ainsi de moins en moins énergiquement retenu, les ETM sont associés aux constituants du sol qui contrôlent leur mobilité, ils peuvent être :

- Adsorbés sur les phases hydroxyde du fer, de l'aluminium et du manganèse (adhésion à la surface par des liaisons ioniques ou covalentes)
- Inclus dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et des constituants secondaires.
- Adsorbés sur les matières organiques. (McLaughlin et al, 2000).

La répartition des métaux et métalloïdes dans ces différents compartiments du sol/eau en toutes les formes disponibles ne présentent pas forcément des risques environnementaux.

Les variations des conditions physico-chimiques (pH, température, force ionique.... etc.) peuvent jouer directement sur la mobilité des éléments en faisant passer les métaux présents dans un sol d'une forme à une autre (Baize, 1997).

I.8. Etat de l'art

L'exposition des ouvrages miniers, les rejets d'enrichissements et stériles aux différents facteurs climatiques permet la migration des polluants aux différents compartiments de l'environnement, sol, air et eau. Le climat de la région ainsi que les activités anthropiques jouent un rôle très important sur la migration des polluants. L'une des problématiques environnementales des mines métalliques est le drainage minier acide (DMA). Le DMA est généré lorsque des minerais sulfurés sont exposés à l'eau et à l'oxygène (Jeffrey et Skousen, 2000) (Kirby & Cravotta, 2005). La génération des DMA dépend principalement de la géologie, de l'hydrologie et de la méthode d'exploitation adoptée pour le site minier. Il est formé par une série de complexes géochimiques et réactions microbiennes qui surviennent lorsque l'eau entre en contact avec des minéraux sulfurés en présence d'oxygène (Tom Ridge,

2000). Les DMA sont caractérisés par des pH acides ce qui conduit à la dissolution des métaux lourds et leurs mobilisations à de grandes distances.

L'impact des mines abandonnées sur les différents compartiments de l'environnement ainsi que les différents paramètres influençant le mécanisme de diffusion des différents polluants a été intensivement étudié à travers le monde. Zabowski et al., 2001 ont étudié l'impact d'une mine de fer (magnétite) et une mine d'or sur les eaux d'une rivière à la périphérie des deux mines, les résultats montrent qu'à des pH élevés (alcalins) les concentrations en métaux lourds dans l'eau restent faibles, Navarro et al., 2015 ont montré qu'un pH neutre (7-8), les concentrations des métaux lourds sont toujours faibles malgré la présence de fortes concentrations dans le sol. L'étude réalisée par (Jahanshahi & Zare, 2015) montre que la présence de faibles quantités de sulfures et l'abondance des calcaires dans les régions d'une mine de fer jouent un rôle important pour la prévention des DMA et la migration des métaux lourds dans les eaux souterraines à l'exception d'aluminium, manganèse et l'arsenic où les résultats montrent des teneurs élevées en ces éléments. (Heikkinen et al, 2009) a montré à l'aide d'une modélisation géochimique que l'augmentation de pH conduit à l'adsorption des métaux lourds sur le fer et se précipitent à des pH alcalins.

Chapitre II

Méthodes et Matériels

II.1. Echantillonnage

II.1.1. Introduction

L'échantillonnage est une étape très importante lors de la caractérisation d'un site. En effet, une bonne planification et l'utilisation d'un matériel approprié conduit à minimiser les erreurs dû à l'échantillonnage. Lors d'une campagne d'échantillonnage, un certain nombre de mesures doit être pris en considération tels que, le prélèvement d'un échantillon représentatif, l'utilisation d'un matériel stérilisé afin d'éviter la contamination de l'échantillon, le transport et la conservation des échantillons d'une manière adéquate (**Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementale**, CEAE Quebec 2008).

II.1.2. Inspection de la région étudiée

Une campagne d'inspection de la région a été faite en deux jours, afin de repérer les sources d'eaux accessibles pour un échantillonnage ultérieur. A l'aide d'un GPS (Global positioning system), on a procédé à la localisation des différentes sources d'eau souterraine susceptibles d'être échantillonné.

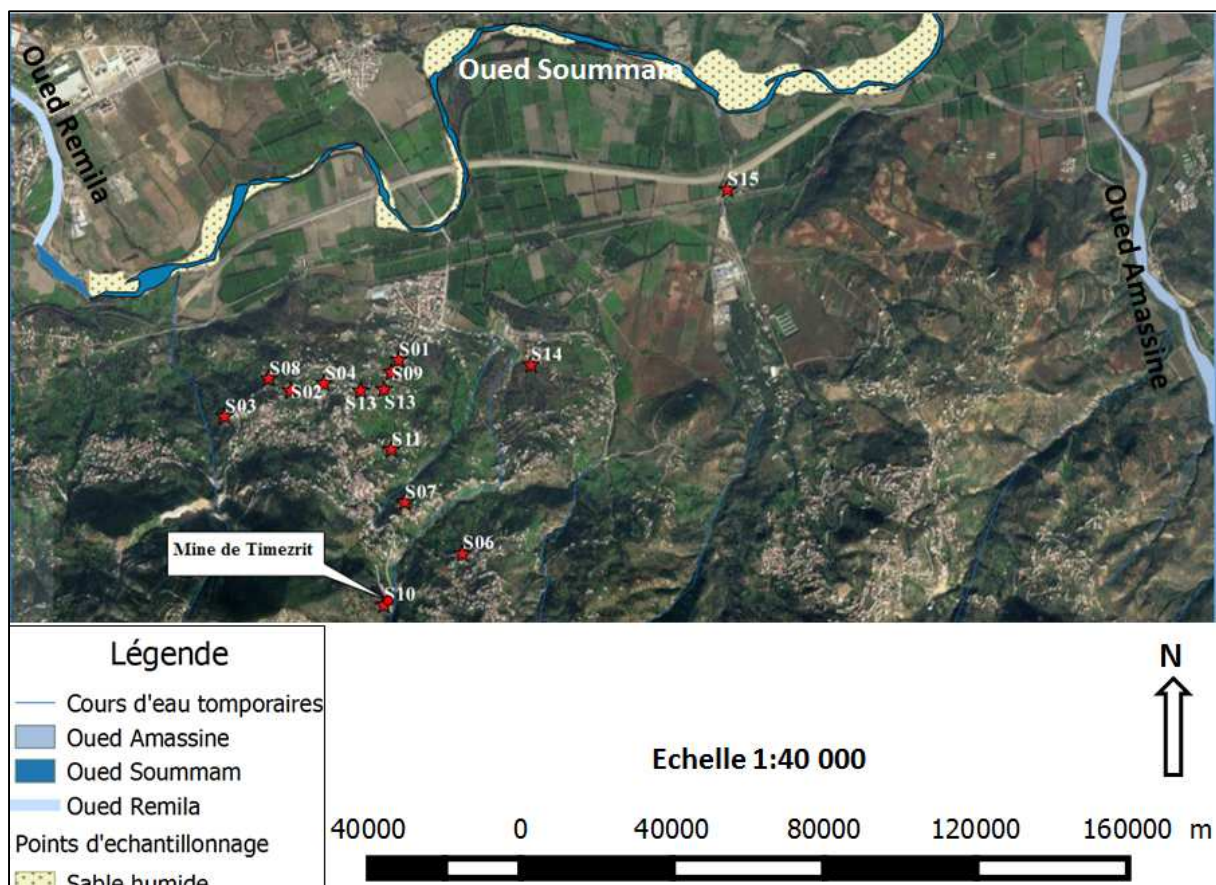


Figure II.1 : Localisation des points d'échantillonnages

Tableau II.1 : les coordonnées et nature des points échantillonnés.

Coordonnées X	Coordonnées Y	Coordonnées Z	Points d'échantillonnage	Nature de point d'échantillonnage
658867.9893	4052817.23	531.765808	S10	Bassin de la mine
659023.0094	4053655.33	349.887451	S07	Forage
659506.3102	4053250.338	405.539124	S06	Forage
658952.4531	4054818.201	149.402603	S01	Forage
658895.1607	4054714.151	170.692307	S09	Forage
658838.719	4054573.717	212.493698	S13	Forage
658647.6978	4054560.973	251.505203	S13	Source
658349.4041	4054612.066	273.804779	S04	Forage
658072.6378	4054548.479	273.248352	S02	Source
657894.1276	4054643.411	245.168488	S08	Forage
657537.529	4054328.339	267.900085	S03	Source
658906.8664	4054081.673	307.510986	S11	Source
660035	4054797	72.247665	S14	Source salée
661615.9663	4056257.202	87	S15	Forage

II.2. Protocole d'échantillonnage

Une campagne d'échantillonnage a été effectuée le 21/04/2017 où nous avons procédé au prélèvement des échantillons de 500ml dans des flacons en polyéthylène LABOMODERNE stérilisé par les rayons gamma avec anneau interne et capuchon en PE rouge scellés par une étiquette de sécurité garantissant la stérilité de flacon par le fabricant. A l'aide d'un multimètre, la conductivité électrique et la température ont été mesurées in situ. Dans le cas où les points d'échantillonnage sont des forages d'eau, on laisse l'eau couler environ 10 minutes avant de prélever les échantillons afin d'éliminer l'eau stagnante dans la tuyauterie.

Les échantillons ont été transportés au laboratoire de recherche en hydraulique appliquée et environnement dans des glacières à moins 5 °C afin de minimiser toute réaction possible où ils ont été stockés à 4 °C jusqu'au jour de leurs analyses (Rodier et al., 2009).

II.3. Analyse chimique et paramètres physiques

II.3.1. Mesure de pH, et le potentiel redox de l'eau

Le pH et le potentiel redox sont mesurés dans le laboratoire à l'aide d'un pH mètre de laboratoire (figure II.2) étalonné, en rinçant la sonde avec l'eau distillée et en l'essuie bien, puis on la plonge dans une solution tampon de pH=4

**Figure II.2 : pH mètre HANNA HI2209**

II.3.2. L'alcalinité**II.3.2.1. Définition**

Les eaux naturelles ont souvent un pH supérieur à 4.4, l'alcalinité totale d'une eau est mesurée par la quantité d'acide nécessaire pour abaisser son pH jusqu'à 4.4 qui est aussi le premier point de virage de rouge de méthyle (Tardat-henry, 2003).

II.3.2.2. Détermination de l'alcalinité

L'alcalinité est attribuable essentiellement aux bicarbonates contenus dans l'eau, l'unité de mesure de l'alcalinité est donc mg/l de CaCO_3 (Tardat-Henry, 1992).

Par l'expression suivante on peut déterminer le taux d'alcalinité de nos échantillons :

$$\text{Alcalinité } T = \frac{N * V_{tm} * 50000 \text{ mg}}{V} \frac{1}{l} \text{ de } \text{CaCO}_3$$

Avec : T : Alcalinité

$V_{tm} = (v_{t1} + v_{t2})/2$: volume moyen titré de l'acide

V = volume de l'échantillon (20ml)

N = normalité de l'acide HCl (0.02N)

II.3.3. Dosage des éléments majeurs**➤ Dosage des chlorures par la méthode de Mohr**

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution traitée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent (Rodier et al. 2009).

Expression des résultats :

$$[\text{Cl}^-] = \frac{V_t * C_t * 35.453 * 1000}{V_e} \text{ (mg/l)}$$

C_t : Normalité d'Ag NO_3 (0,1N)

V_t : Volume d'Ag NO_3 titré

V_e : volume d'échantillon d'eau analysée

➤ Dosage des Nitrate

Principe en présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage spectrométrique (Rodier et al. 2009).

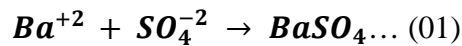
✓ Mode opératoire

On introduit 10 ml d'eau dans un Erlenmeyer de 100 ml (pour des teneurs en azote nitrique supérieures à 10 mg/l, opérer une dilution). On alcalinise faiblement avec la solution d'hydroxyde de sodium 0.1 N. On poursuit le dosage comme pour la courbe d'étalonnage. On

prépare de la même façon un témoin avec 10 ml d'eau déionisée. On effectue les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 415 nm (Rodier et al. 2009).

➤ **Dosage des sulfates (la méthode de turbidimétrie)**

Cette méthode est utilisée pour la détermination des ions sulfates. L'ion sulfate (SO_4^{2-}) est précipité en présence d'acide acétique avec du chlorure de baryum (BaCl_2) d'une manière à former des cristaux de sulfate de baryum (BaSO_4) de taille uniforme. La réaction impliquée est donnée ci-dessous (Gautam et al. 2011)



✓ **Mode opératoire**

Dans un Becher de 250 ml on verse 100 ml d'échantillon ou de solution étalon. On ajoute avec une pipette 5 ml de la solution stabilisante. On procède à l'agitation ; la vitesse d'agitation devra être maintenue constante pendant toute la durée de l'expérience. On ajoute environ 0,4 g de BaCl_2 et on agite une minute, puis on verse la suspension dans la cellule de mesure. On attend 3 ou 4 minutes pour que la turbidité se développe, puis on fait la lecture sur spectrophotomètre UV-visible (Gautam et al. 2011).

➤ **Dosage des bicarbonates**

Le dosage de bicarbonates a été effectué en utilisant l'alcalinité phénolphtaléine (A_p) et alcalinité totale (A_t). L'alcalinité phénolphtaléine et alcalinité totale ont été déterminé par titrimétrie. La concentration en bicarbonate est déterminée avec l'équation suivante (American Public Health Association American Water Works Association Water Environment Federation, 1999) :

$$\text{HCO}_3^- = A_t - 2A_p + [\text{OH}^-] \dots (2)$$

II.3.4. Dosage des éléments traces métallique par la Spectrométrie d'absorption atomique

La détermination des concentrations des échantillons en éléments traces et les éléments majeurs (Ca^{+2} , Na^+ , K^+ et Mg^{+2}) a été réalisé avec la Spectroscopie d'adsorption atomique au niveau de laboratoire pédagogique de département génie des procédés et au niveau de laboratoire de recherche en hydraulique appliqué et environnement.

II.3.4.1. Principe

Le principe consiste à aspirer l'échantillon sous forme liquide, puis l'échantillon est transformé en vapeur d'atome à l'aide d'un atomiseur puis à l'aide d'une flamme. Les atomes

sont emmenés à l'état excité. On irradie ces atomes excités par des rayons qui ont la longueur d'onde caractéristique de l'élément à doser généré par une lampe spectrale à cathode creuse.

La formation des atomes neutres est réalisée par la vaporisation et l'atomisation dans une flamme air-acétylène.



Figure II.3 : Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)

II.3.4.2. Etalonnage

➤ Préparation des étalons

Pour chaque élément à doser on prépare une gamme d'étalons à différentes concentrations à partir d'une solution mère ayant une concentration de 1g/l de chaque élément.

La solution mère est diluée dans des fioles de 100 ml en complétant le volume avec la solution de dilution d'un mélange d'eau distillé et d'acide Nitrique d'un $\text{pH} \leq 2$ afin d'éviter la précipitation de l'élément.

Les gammes de concentration d'étalons sont représentées dans le tableau ci-dessus :

Tableau II.1 : les concentrations des différentes gammes d'étalons de chaque élément analysé

Métal	Concentration 01	Concentration 02	Concentration 03	Concentration 04	Concentration 05
Fe (mg/l)	0.1	0.6	0.8	1.4	2
Pb(mg/l)	0.01	0.04	0.1	0.5	1
Zn(mg/l)	0.1	0.6	0.8	1.4	2
Cu(mg/l)	0.01	0.04	0.1	0.5	1
Cd(mg/l)	0.01	0.04	0.1	0.5	1

II.3.4.3. Préparation des échantillons

➤ Acidification des échantillons

Une acidification des échantillons a été réalisée avant qu'on procède à la filtration des échantillons afin de doser les éléments traces adsorbés aux particules en suspension en ajoutant des gouttes d'acide nitrique à 1N, jusqu'à un pH inférieur à 2.

➤ Filtration des échantillons

Une fois l'échantillon acidifié, on procède à une filtration à l'aide d'un filtre à seringue d'un diamètre de 0.45µm.

On récolte notre échantillon filtré et acidifié dans des tubes à essai de 10ml prêt pour l'analyse de la SAA.



Figure II.4 : Echantillon acidifié et filtre à seringue et tubes à essais utilisés pour la préparation des échantillons

II.3.5. Modélisation hydrochimique

Nous avons utilisé le logiciel d'hydrochimie Diagrammes pour déterminer les différents faciès hydrochimiques à travers les diagrammes de piper, de Schoeller-Berkaloff et de Riverside. Cette modélisation nous permet de classer les eaux selon leurs compositions chimiques en éléments majeurs.

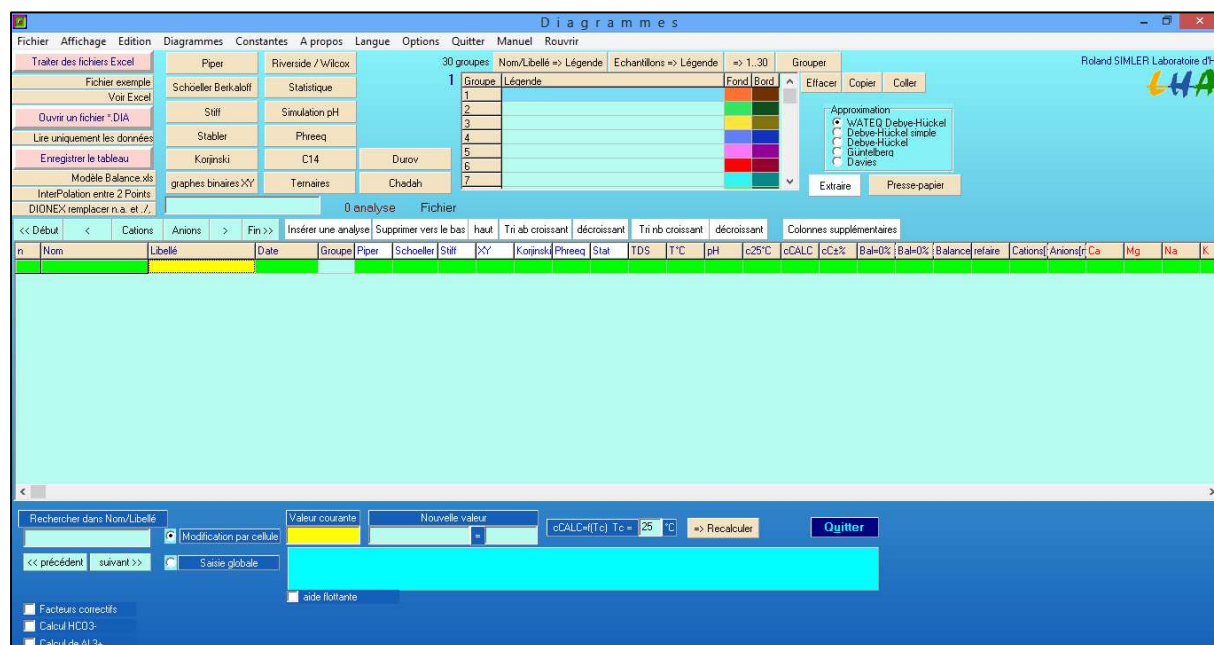


Figure II.5 : Interface de logiciel Diagrammes

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Résultats et discussions

Les résultats des paramètres physico-chimiques, des concentrations en éléments majeurs et en éléments traces des échantillons d'eau sont présentés dans le tableau III.1.

Les résultats montrent que les échantillons ont des teneurs élevées en chlorures (136.35 – 2608.76 mg/l), sulfates (149.35 – 1270.98 mg/l), calcium (178.5 – 789.18 mg/l), sodium (76.22 – 1355.4 mg/l), et bicarbonates (306.32 – 587.01 mg/l). Les concentrations en éléments traces sont faibles pour le zinc, le cuivre, le fer et le cadmium et répond aux normes d'eau potable à l'exception des échantillons S07 et S14 où des concentrations élevées en fer ont été observées. Le plomb présente des concentrations dépassant légèrement la norme d'eau potable (Conseil de l'Union Européenne, 1998) pour la plupart des échantillons à l'exception des échantillons S01 et S03 où des concentrations élevées ont été observées sachant que pour ces deux échantillons les propriétaires des forages utilisent l'ancienne plomberie.

Le pH de tous les échantillons est de neutre à faiblement basique, allant de 6.6 jusqu'à 8.04 qui sont admissible pour la qualité d'eau potable. Le potentiel d'oxydo-réduction pour la majorité des échantillons est négatif indiquant un milieu réducteur. La conductivité électrique (CE) présente des valeurs élevées allant de 925 – 5730 μ S/cm. Les valeurs de la moitié des échantillons répondent aux normes d'eau potable (Conseil de l'Union Européenne, 1998) tandis que l'autre moitié, les valeurs observées dépassent légèrement à fortement la norme allant de 2620 -5730 μ S indiquant une forte minéralisation des eaux.

Tableau III.1 : Résultats des paramètres physiques, éléments majeurs et éléments traces

N°	Mesures terrain				Mesures laboratoire													
	T (°C)	pH	Ep (mV)	CE (μS/cm)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cu (mg/l)	Cd (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Pb (mg/l)
S01	18,2	7.73	-42.8	1395	519,89	433,67	0,092	60,57	256,79	248,68	61,24	241,80	0,35	0.0498	0.00	0.00	0.1419	0.1900
S02	19,1	7.24	-9.60	2080	544,30	171,62	0,132	14,06	199,38	186,34	42,18	127,13	0,75	0.00	0.00	0.00	0.1664	0.0140
S03	18,6	8.04	-5.58	925	422,26	302,08	0,09	0,00	578,39	289,61	75,89	169,75	2,80	0.00	0.00	0.00	0.1208	0.1025
S04	20,5	7.35	-14.8	2290	587,01	136,55	0,146	4,42	149,35	193,80	49,15	76,22	0,42	0.00	0.00	0.038	0.1082	0.0232
S05	21,1	7.46	-6.26	1038	306,32	452,12	0,083	9,29	396,36	206,59	69,07	247,39	1,62	0.0034	0.00	0.00	0.1030	0.0111
S06	20,5	7.11	-2.40	1850	373,44	280,52	0,137	18,24	228,14	178,50	51,01	150,16	1,91	0.00	0.00	3.7863	0.4228	0.0168
S07	20,1	6.80	6.70	5730	355,14	1453,95	0,069	28,08	690,00	445,72	163,34	751,94	5,16	0.0524	0.00	1.7665	2.2942	0.0301
S08	20,1	7.52	-26.70	3040	306,32	1582,93	0,107	16,32	861,36	525,58	191,29	746,24	6,58	0.00	0.00	0.0646	0.0022	0.0297
S09	20,5	7.53	-26.30	1919	361,24	481,35	0,056	3,56	378,82	190,08	56,47	318,94	2,54	0.00	0.00	0.0802	0.0936	0.0245
S10	21,8	7.27	-11.10	1240	330,73	1299,09	0,107	20,47	642,22	427,91	126,15	689,57	3,80	0.00	0.00	0.00	0.1046	0.0211
S11	20,6	7.57	-28.2	2620	379,54	1399,40	0,064	14,17	1197,39	578,63	211,80	761,72	3,47	0.0052	0.00	0.00	0.0872	0.0255
S12	17,8	7.59	-30.00	2720	312,42	1178,07	0,14	87,34	909,29	515,10	158,19	572,73	1,87	0.00	0.00	0.00	0.0207	0.0296
S13	19	7.35	-15.90	2650	324,63	611,03	0,085	8,68	368,66	227,37	70,27	317,79	2,35	0.00	0.00	0.00	0.0854	0.0310
S14	20,4	6.60	27.20	4500	458,87	1475,01	0,095	82,41	882,80	555,05	205,01	759,02	4,46	0.00	0.00	0.0748	5.0460	0.0172
S15	18,1	7.51	-25.50	4000	391,75	2608,76	0,117	79,94	1270,98	789,18	280,85	1355,40	6,84	0.00	0.00	0.00	0.1653	0.0364

III.2. Discussions et interprétations des résultats

III.2.1. Paramètres physiques

➤ Potentiel hydrogène (pH)

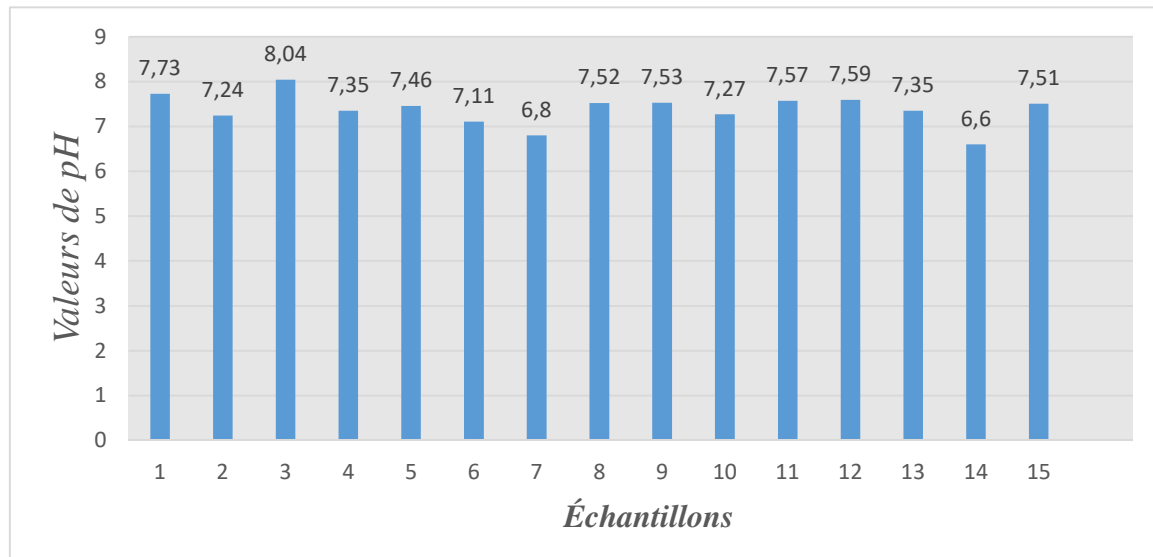


Figure III.1 : Valeurs des pH des échantillons

Le pH des eaux échantillonnées dans la région de Timezrit, provenant des puits et forages varie entre 6,6 pour S14 et 8,40 pour S03.

La majorité des pH mesurés sont légèrement neutres donc les eaux ont un pH acceptable pour l'eau potable.

La neutralité des échantillons est probablement due à l'équilibre des acides carboniques, et des hydroxydes contenus dans l'eau, les hydroxydes sont ceux issus de l'altération chimique sous l'effet de l'eau des minerais oxydés de la zone du gisement, et les carbonates sont issus de l'altération des minerais carbonatés sous l'effet de l'eau et des hydroxydes (Tardat-Henry, 1992).

➤ Conductivité électrique

La majorité des valeurs des conductivités obtenues est relativement élevée à trop élevée, sauf pour les points (S03, S05 et S10), qui ont des valeurs relativement faibles (Annexe I).

Les valeurs élevées indiquent de forte concentration d'ions ce qui est confirmé par le dosage des éléments majeurs.

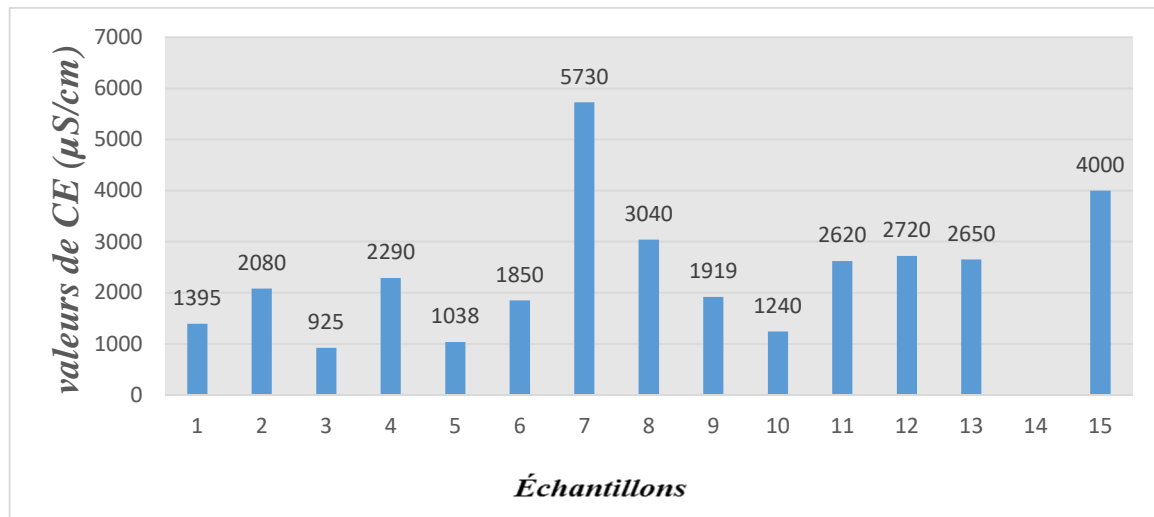


Figure III.2 : Conductivité dans les points d'échantillonnages

➤ **Alcalinité**

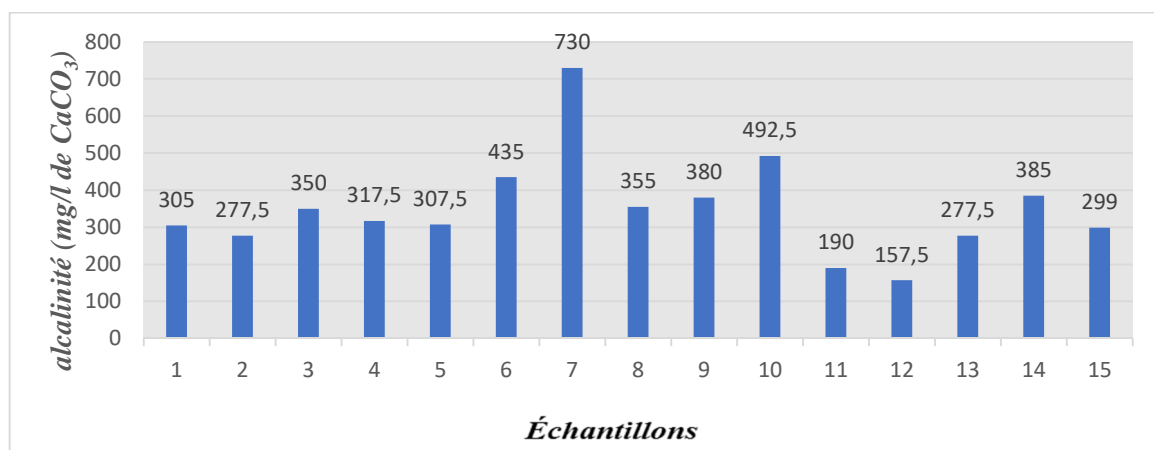


Figure III.3 : Alcalinité des différents échantillons

La majorité des valeurs de l'alcalinité est moyennement élevée, mais reste admissible pour l'eau potable (Conseil de l'Union Européenne, 1998), sauf pour le point S07. Ces résultats peuvent être traduits par la forte présence de bicarbonates, de carbonates et d'hydroxydes, issues de l'altération des roches carbonatées qui caractérisent la région (Millot et al, 1977).

➤ **Cuivre (Cu)**

Les teneurs du cuivre se trouvent sous forme de traces très faibles dans les points (S01, S05, S07, S11), et dans le reste des points sont inférieurs à 0.01 mg/l. Les faibles concentrations de cuivre sont expliquées par la composition minéralogique du minerai de fer de Timezrit.

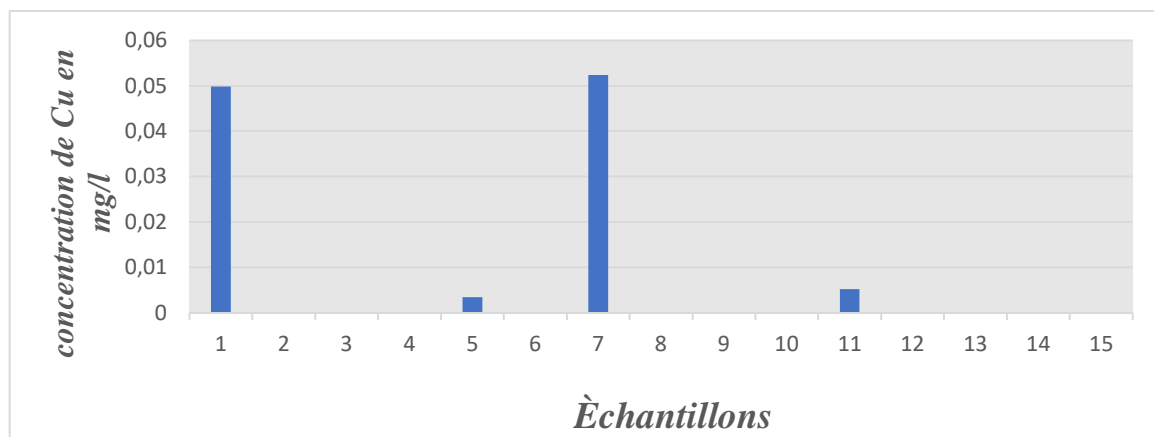


Figure III.4 : Concentration de Cuivre dans les points d'échantillonnages

➤ **Cadmium (Cd)**

Tous les échantillons ont une concentration $<0.01\text{mg/l}$, qui n'est pas détectable par la SAA flamme. Ces teneurs sont détectables seulement par la SAA four. Toutefois les teneurs sont probablement faibles voir même nulles en tenant compte de la nature du contexte géologique.

➤ **Zinc (Zn)**

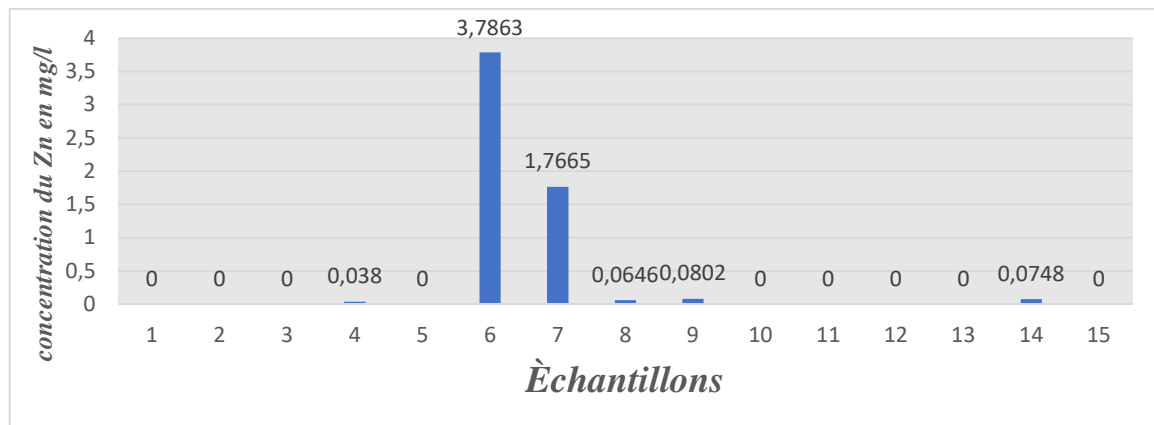


Figure III.5 : Concentration du Zn dans les points d'échantillonnages

Les concentrations du zinc sont très faibles dans la majorité des points, sauf dans les points (S06, S07), où on trouve des concentrations assez considérables qui sont probablement dus à la plomberie utilisée par les propriétaires des forages.

Les faibles concentrations de zinc sont expliquées par la composition minéralogique de minerai de fer de Timezrit où les minéraux contenant de zinc sont très rares.

➤ **Fer (Fe)**

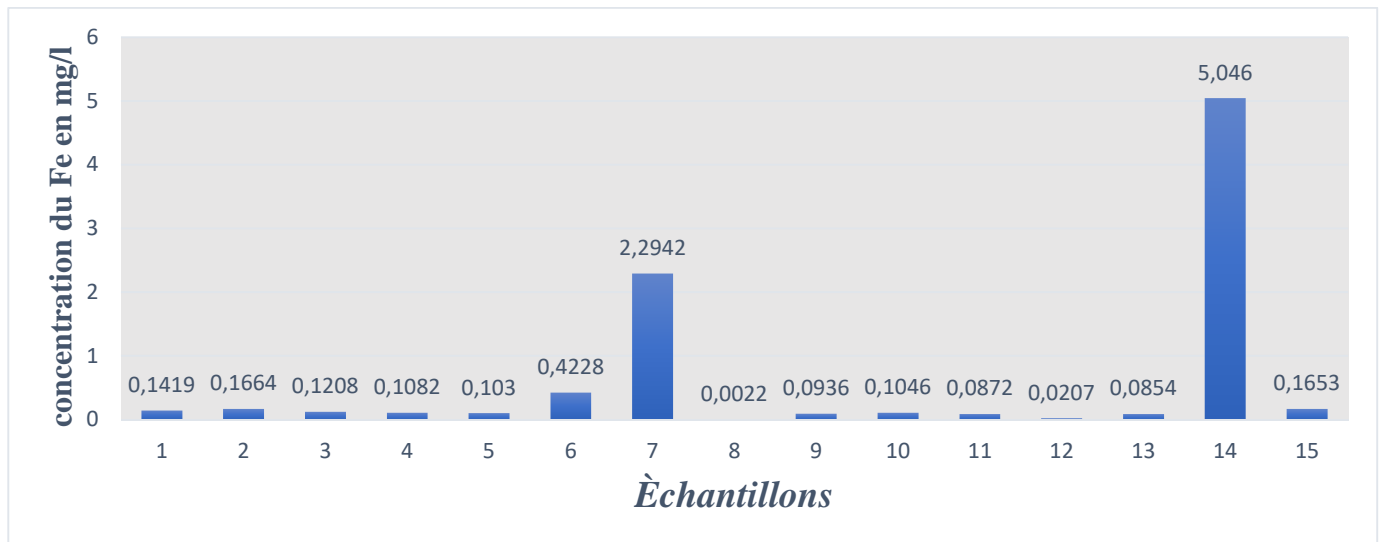


Figure III.6 : Concentration du Fe dans les points d'échantillonnages

Les résultats montrent des concentrations moyennes de fer qui est due à l'altération de minerais du fer (hématites et sidérite) de la mine de Timezrit.

Ces teneurs sont admissibles dans tous les d'échantillons, qui se trouve dans le front N-W de la mine sauf l'échantillon S14, les faibles concentrations sont dues à la qualité des eaux qui ont un pH neutre et des concentrations élevées en bicarbonate qui favorise la précipitation des métaux sous forme d'hydroxydes (Jahanshahi & Zare, 2015).

L'analyse de l'échantillon S14 montre une très forte concentration en fer, et les caractéristiques observées sur les lieux de la source (Figure III.7) sont probablement liées à une concentration isolée de fer.



Figure III.7 : Source du point d'échantillonnage S 14

➤ **Plomb (Pb)**

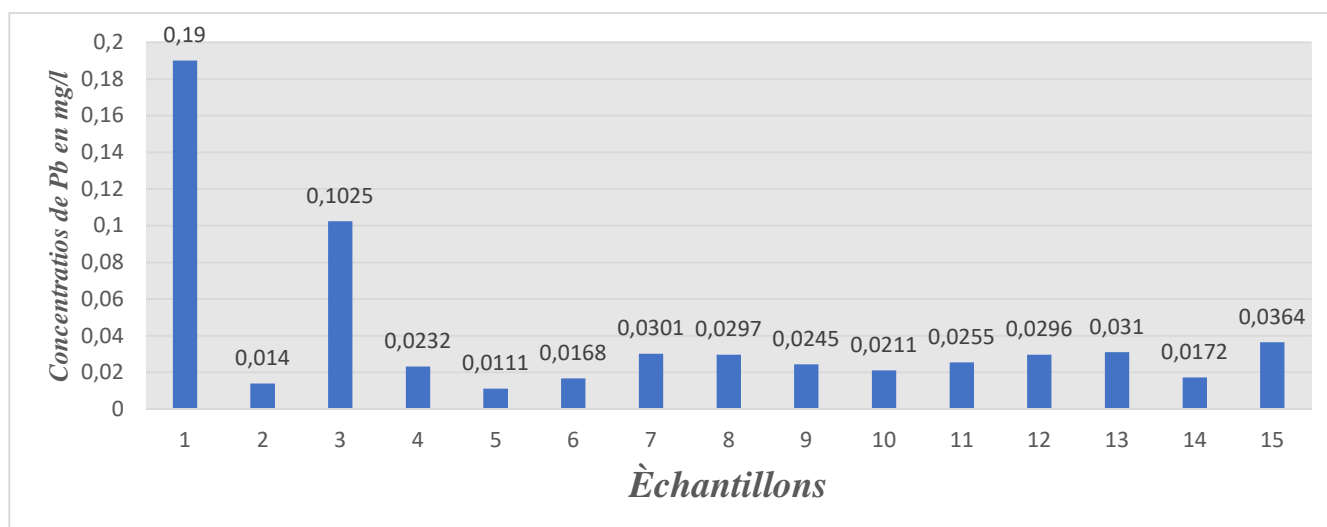


Figure III.8 : Concentrations de Pb dans les points d'échantillonnage

Les concentrations du Pb sont faibles dans la majorité des points et répondent aux normes d'eau potable (Conseil de l'Union Européenne, 1998), sauf dans les points (S01, S03), où des concentrations élevées et qui dépassent la norme d'eau potable ont été observées. Ceci est probablement dû à la contamination par la plomberie ancienne utilisée par les propriétaires des forages.

III.2.2. Représentation graphique des faciès hydrochimiques

Afin de bien illustrer les résultats obtenus ainsi la classification des eaux souterraines à la périphérie de la mine de Timezrit, nous avons procédé à la représentation graphique des résultats obtenus à partir de l'analyse des échantillons d'eau. Le logiciel Diagramme d'Avignon a été utilisé afin de réaliser le diagramme de Piper, Schoeller-Berkaloff et le pouvoir alcalinisant.

III.2.2.1. Diagramme de Piper

Ce diagramme permet la représentation de plusieurs échantillons et les classer selon le faciès dominant de l'échantillon. Le diagramme est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations respectivement, et d'un losange représentant la répartition des cations et anions majeurs.

Le diagramme de Piper des eaux souterraines à la périphérie de la mine de Timezrit est représenté par la figure III.9.

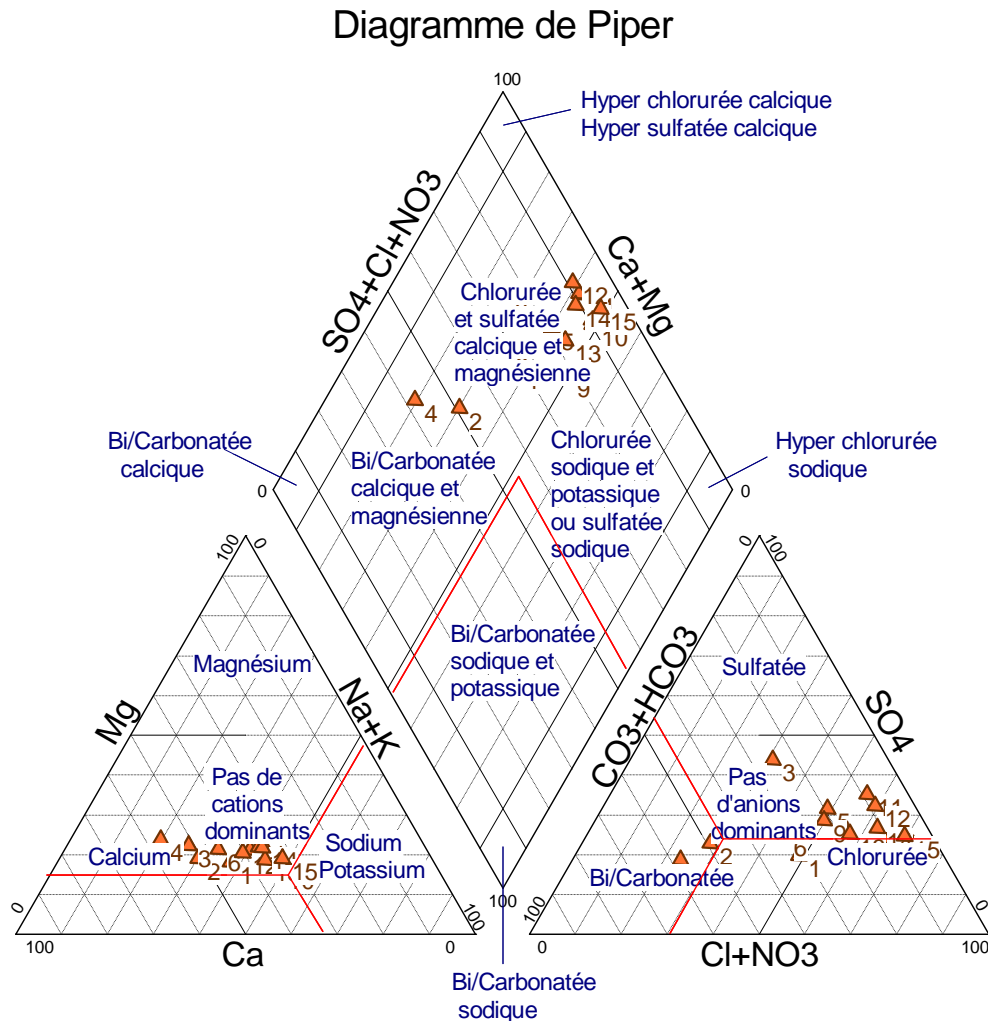


Figure III.9 : Diagramme de Piper

La chimie des eaux analysées est caractérisée par le faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne à une tendance à migrer vers le faciès hyper chloruré sodique pour tous les échantillons sauf l'échantillon S02 et S04 qui ont une tendance de migration vers le faciès bi/carbonaté calcique et magnésien, la représentation montre qu'il n'y a pas de cation dominant.

Le chlorure est l'anion dominant pour la majorité des échantillons. L'anion dominant pour l'échantillon S02 et S04 est le bi/carbonate et il n'y a pas d'anion dominant pour les échantillons S03.

III.2.2.2. Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet de représenter les différents faciès chimiques de plusieurs échantillons d'eau. Chaque échantillon est représenté par une ligne

brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques.

Le diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF des eaux souterraines à la périphérie de la mine de Timezrit est représenté par la figure III.10.

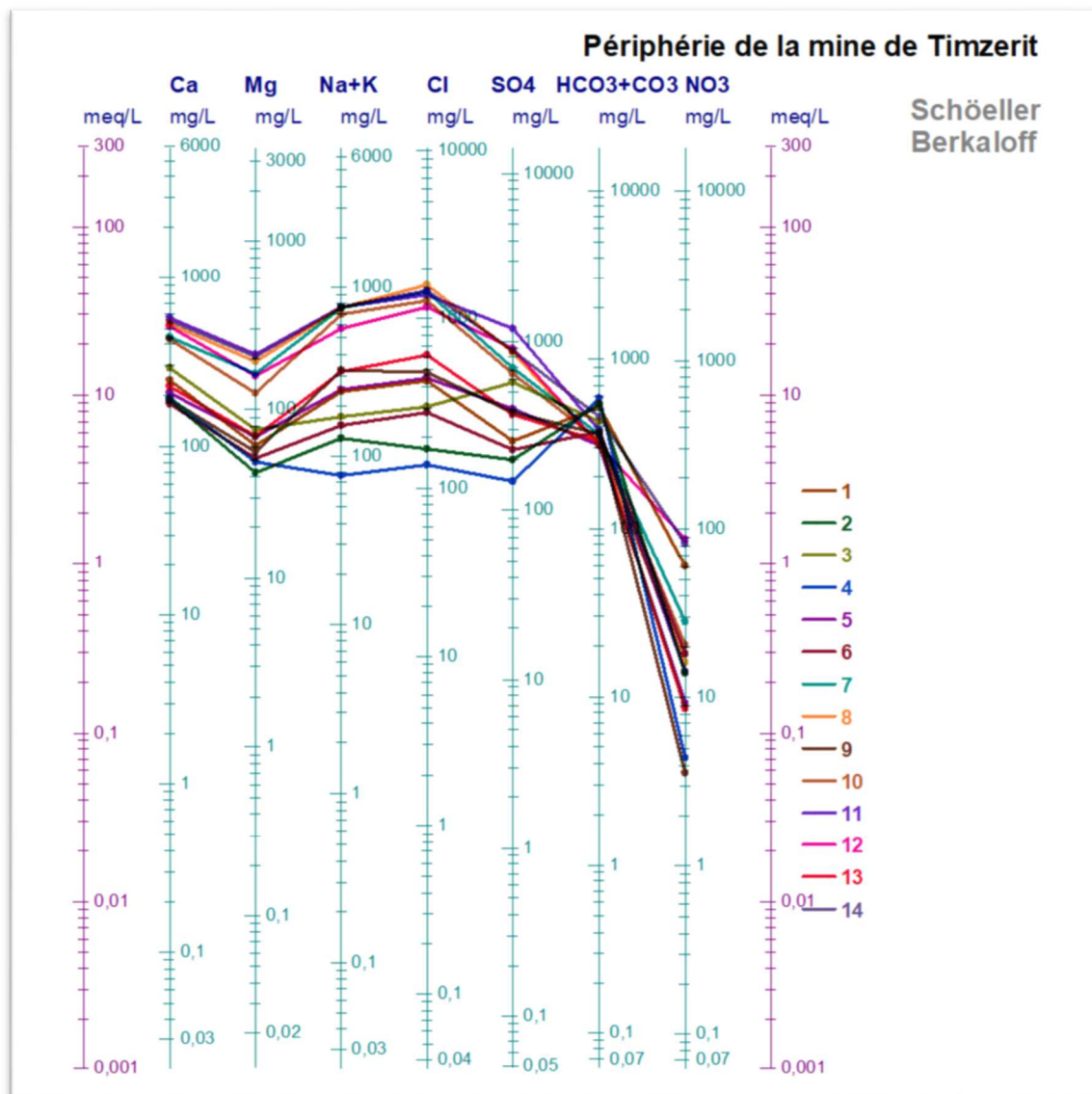


Figure III.10 : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF

Les résultats montrent la dominance de faciès chloruré sodique et chloruré calcique, confirmant les résultats de diagramme de Piper. On conclut que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl^- , Na^+ et Ca^{2+} dû au lessivage des formations évaporitiques et carbonatées.

III.2.3. Pouvoir alcalinisant

III.2.3.1. Diagramme Riverside

Le diagramme de Riverside permet d'évaluer la qualité des eaux par une première classification des eaux selon leur aptitude à l'irrigation. Cette classification de (Wilcox, 1955) permet de classer les eaux par leurs pouvoir alcalinisant en utilisant la conductivité électrique ainsi que le taux d'adsorption de sodium (Sodium Adsorption Ratio, SAR). Le SAR est défini par l'équation suivante (Wilcox, 1955).

$$SAR = \frac{[Na^+]}{[Ca^{+2}] + [Mg^{+2}]}$$

Où les concentrations sont exprimées en meq/l.

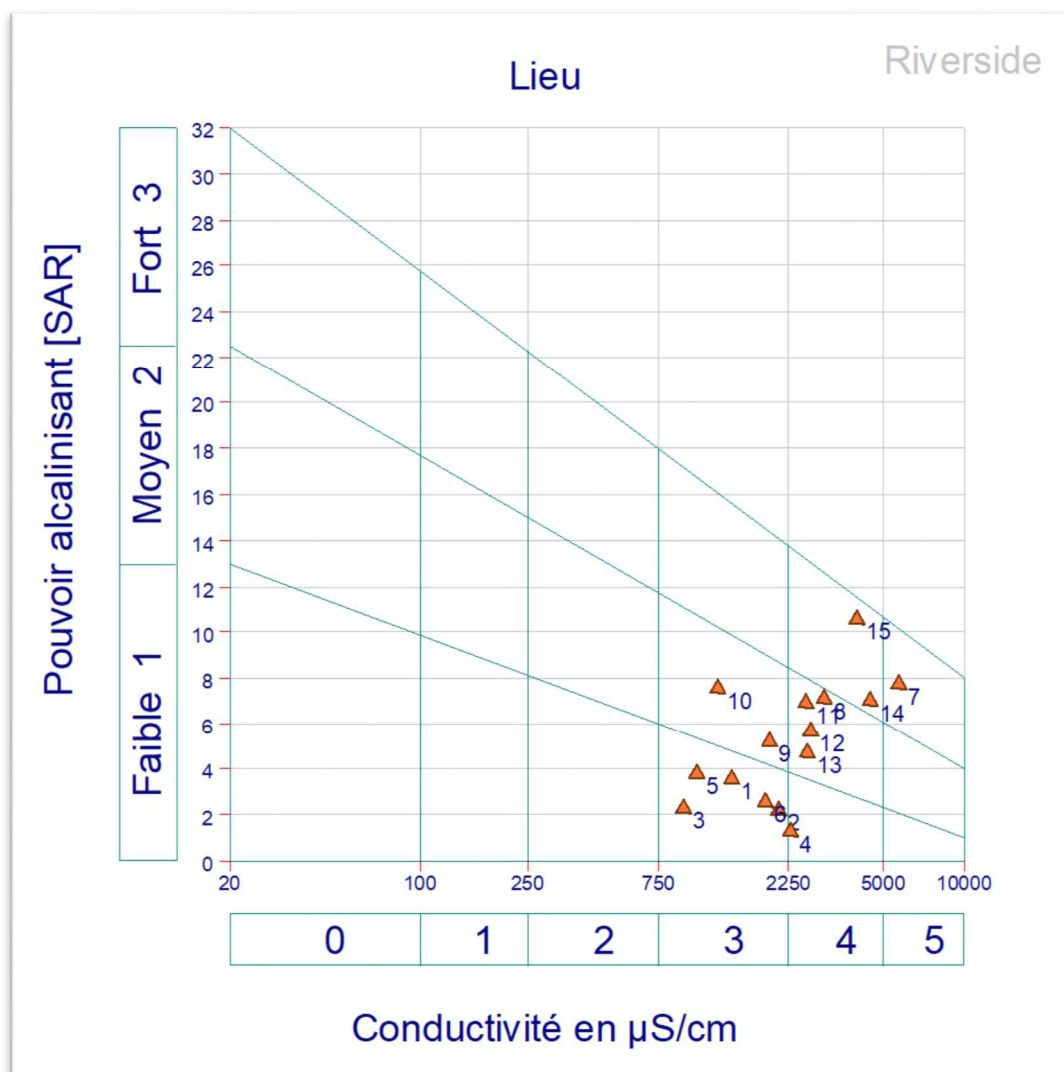


Figure III.11 : Diagramme Riverside des échantillons

Le diagramme Riverside montre que les eaux des échantillons S01, S02, S03, S04, S05 et S06 ont des SAR inférieurs à 12 et des conductivités entre 750 et 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ donc ces échantillons peuvent être classés dans la catégorie eau à sodium moyenne (S2), les échantillons S08, S09, S10, S11, S12 et S13 ont des SAR entre 13 et 22 et des conductivités entre 2250 et 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ qui nous permet de les classer dans la catégorie eau à sodium élevé (S3) tandis que les échantillons S07, S14 et S15 ont des SAR très élevés allant de 23 jusqu'à 32 et des conductivités électriques plus de 5000 qui nous permet de conclure que les eaux de ces échantillons sont de très mauvaise qualité pour l'irrigation.

III.2.3.2. Diagramme de Wilcox

Le diagramme de Wilcox permet d'évaluer la qualité d'eau pour l'irrigation. Le diagramme est réalisé par Wilcox qui permet de classer les eaux en quatre classes par rapport au pourcentage de sodium (Na) qui est calculé à partir des concentrations de calcium, magnésium et potassium (Wilcox, 1955).

Le diagramme de Wilcox pour les eaux souterraines à la périphérie de la mine de Timezrit est présenté dans la figure III.12.

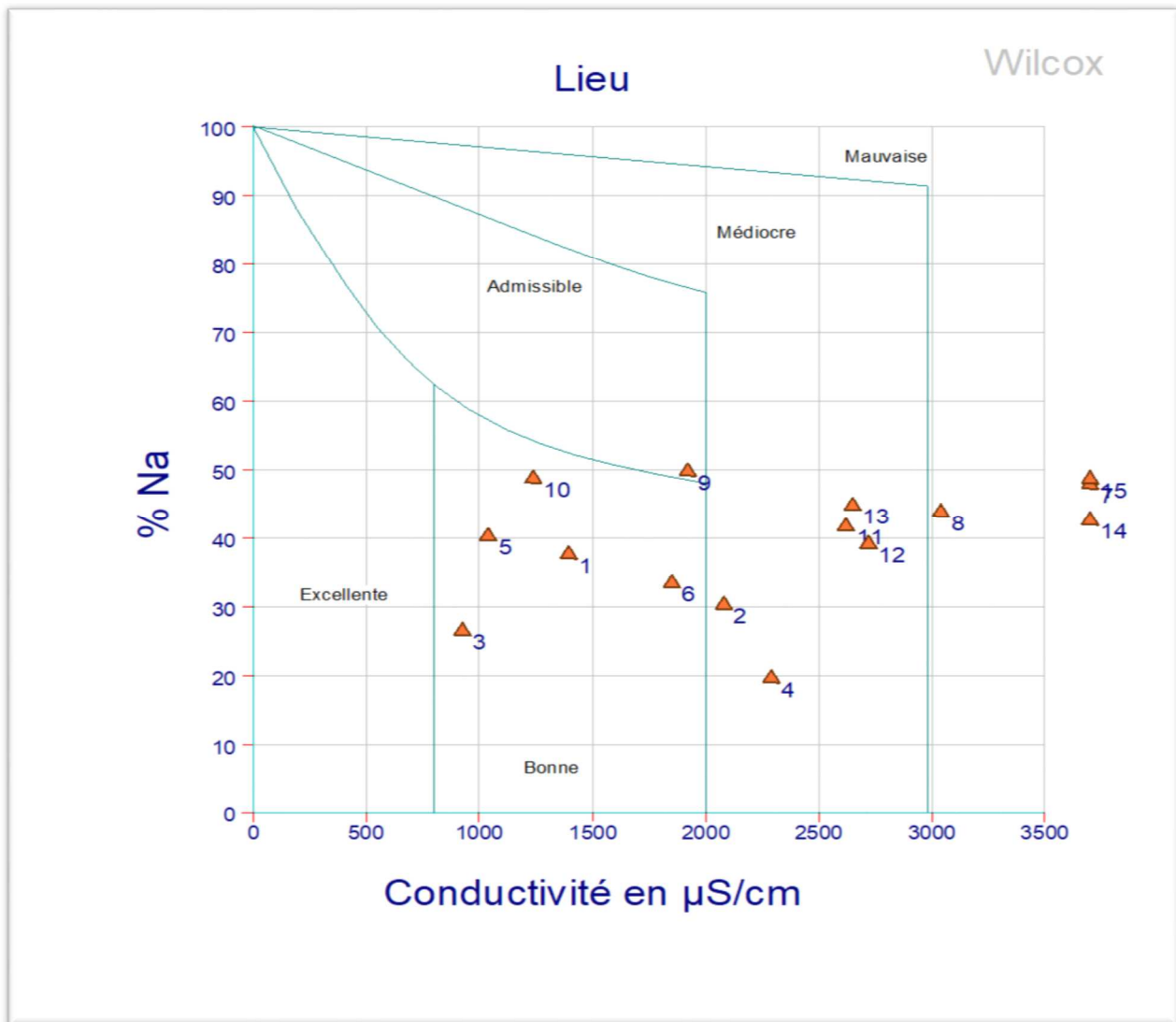


Figure III.12 : Diagramme de Wilcox des échantillons

Le diagramme montre que les eaux des échantillons S01, S03, S05, S06, S09 et S10 sont de bonne qualité pour l'irrigation, les échantillons S02, S04, S11, S12 et S13 sont médiocres pour l'irrigation tandis que les échantillons S07, S08, S14 et S15 sont mauvaises pour l'irrigation.

Conclusion générale

Conclusion

L'objectif de notre travail est de répondre à la problématique sur la possibilité d'une contamination issue de l'exploitation minière de l'ancienne mine de Timezrit tout en se basant sur la matrice eau. Pour cela on a procédé à l'étude de la région de la mine par une caractérisation hydrochimique et une modélisation géochimique des eaux souterraines de la périphérie de la mine.

Après avoir bien situé la problématique en étudiant le contexte géologique, hydrogéologique, hydrographique et climatique de la région d'étude et en analysant les résultats de la caractérisation hydrochimique des eaux échantillonnées, une modélisation géochimique des résultats a été réalisée.

Les résultats des analyses hydrochimiques montrent :

- De faibles concentrations en éléments traces métalliques et des concentrations élevées en éléments majeurs des eaux à la périphérie de la mine.
- Les faibles concentrations en éléments traces sont dues au contexte carbonaté qui joue un rôle tampon et limite leurs migration.
- Les fortes concentrations en éléments majeurs sont dues au lessivage des formations carbonatées et évaporitiques qui affleurent dans la région.

Les résultats de la modélisation géochimique montrent que les eaux ont un faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne à une tendance à migrer vers le faciès hyper chloruré sodique et un pouvoir alcalinisant moyen à fort pour la plupart des échantillons indiquant une qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Glangeaud, 1932** : Étude géologique du nord de la province d'Alger, Note : Gouvernement général de l'Algérie. Bulletin du Service de la carte géologique de l'Algérie. Edition Bordeaux, 608 p.
2. **Durant Delga, 1969** : La recherche géologique française en Algérie du Nord après 1962, Publ. Serv. Géol. Algérie, n° 39, 89-131.
3. **Méthodes SAA** : Guide analyse et caractérisation. Axe " Génie des Procédés", Centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne. 43p.
4. Contribution à l'étude de la variation hydro-climatologique du grand BSV. Cas des trois sous- bassin (El-kseur, Akbou, Bouira), thèse doctorat Bouldjedri.M. Université de Jijel 2013.
5. **Dr Mouley Charaf Chabou**, la chaînes des Maghrébines, Géologie Algérienne. Université de Ferhat Abbas de Setif. Revue scientifique.
6. **Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementale**, Edition juillet 2008 : centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, p 13.
7. **Mohamed-Said Bennabi** : Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée de l'Oued Sahel-Soummam (Algérie). Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1985. Français. <Tel-00759401>
8. **Dubigeon Olivier, 2002**, mettre en pratique le développement durable, Paris ; Edition village mondiale.
9. **Benhamou, 1971** : étude hydrogéologique de la mine de fer de Timezrit ; étude scientifique université d'Alger en collaboration avec la SONAREM.
10. **Guide d'échantillonnage** : analyses environnementale, p 13. Québec. centre d'expertise en analyse environnementale du Québec.
11. **BROKAERT, 2005** José A. C. Analytical Atomic Spectrometry with Flames and Plasmas. Deuxième édition revue et augmentée. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (Federal Republic of Germany). 414p. ISBN : 978-3-527-31282-5.
12. **Skoog, Holler, Nieman**. Principe d'analyse instrumentale. Edition de Boeck université. Paris, 2003. 938p. ISBN : 2-7445-0112-3.
13. **Marcel Lecomte**, Fiche technique rouge de méthyl, guide en ligne (Cercle Mycologique de Namur & Cercle des M.L.B.).
14. **(1979, ONU/CEE)** : La convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance ; document public en ligne.

- 15. P.Bourrelrier, J Berthelin, 1998** : contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion ; editeur LAVOISIER / TEC ET DOC.
- 16. Erwan Tessier, 2008** : Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité, thèse doctorat Université de Toulon.
- 17. B.j Alloway, 1995**: heavy metals in sols; Editor springer Holland.
- 18. Denis Baize, 2002** : les éléments traces métallique dans le sol : approches fonctionnelles et spatiales ; editeur INRA ; ISBN : 978-2-7380-0993-7.
- 19. Stepniewska et Bucior, 2001**: Advances in agronomy; Swedish University of agricultural sciences; Department of plant breeding and biotechnology; ISBN: 978-0-12-407686-0.
- 20. Nriagu, 1990**: physiology and biochemistry of metal toxicity and tolerance in plants. University central and south America, USA, ISBN: 1-020-0-4680
- 21. Michael j.kennish, 2002** estuarine research, monitoring, and resource protection, ISBN: 378-94-017-8802-1.
- 22. W. Stumm et J. Morgan, 1996** aquatic chemistry; ISBN: 1-56670-633-5.
- 23. Fergusson, J.E., 1990**. The heavy elements:chemistry, environmental impact and health effets, 1. Pergamon Press, Oxford, 614 pp.
- 24. Alloway, B.J. et Ayres, D.C., 1997**. Chemical Principles of Environmental Pollution. Blackie Academic and Profesional, an imprint of Chapman and Hall, London, 394 pp.
- 25. Callender, E., 2003**. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. In : B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry. Elservier-Pergamon, Oxford, pp. 67-105.
- 26. Runnells, 1992**. Metals in water, determining natural background concentrations in mineralized areas. Environmental Science and Technology, 26(12) : 2316-2323.
- 27. Mahan, B.H., 1987**. Chimie. Cours de l'Université. Inter S. A. Fonds d'éducation.
- 28. Hurlbut Jr., C.S. et Klein, C., 1982**. Manual de Mineralogía de Dana. Editorial Reverté, Barcelona.
- 29. Wedepohl, K.H., 1995**. La composition de la croûte continentale ; étude présentée lors de la conférence gold schmidt à Edimbourg.
- 30. Faculté des sciences de l'université du Maine**, Résumé de chimie descriptive du fer document archive en ligne :
http://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/chimie/01/04-Chimie_descriptive/res/Chimie_descriptive-fer.pdf
- 31. Société chimique de France 2016**, anaales ; document en ligne.

32. Agence de la santé et des services sociaux de Chaudière-Appalaches, 2011, document en ligne :
http://www.cisss-bsl.gouv.qc.ca/sites/default/files/fichier/fer_et_manganese.pdf
33. MDDELCC, 2017. Le plomb dans l'eau potable, Document en ligne de ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec.
34. Piscator, M. 1995, Dietary exposure to cadmium and health effects : impact of changes ; Environ Health Perspect.
35. (Tardat-Henry, 1992). Chimie des eaux, édition le griffon d'argile, Québec.
36. (G. Millot et al, 1977). L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroutements carbonatés en pays subaride Anti-Atlas, Maroc ; thèse doctorat université de Strasbourg ; Sci, Géol, Bull, 30, 3, p129, 152 Strasbourg.
37. Duplan, L. Service de la carte géologique d'Algérie, Carte géologique détaillée Sidi Aich (1951).
38. Duplan, L. (1952). Monographie régionales, région de bougie (1er série, Algérie N°17). In *XIX congrès géologique international* (pp. 26–27).
39. Heikkinen, P. M., Räisänen, M. L., & Johnson, R. H. (2009). Geochemical characterisation of seepage and drainage water quality from two sulphide mine tailings impoundments: Acid mine drainage versus neutral mine drainage. *Mine Water and the Environment*, 28(1), 30–49. <http://doi.org/10.1007/s10230-008-0056-2>
40. Jahanshahi, R., & Zare, M. (2015). Assessment of heavy metals pollution in groundwater of Golgohar iron ore mine area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 505–520. <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4057-8>
41. Jeffrey G. Skousen, A. S. and P. F. Z. (2000). Acid mine drainage control and treatment, (41), 1–42.
42. Kirby, C. S., & Cravotta, C. A. (2005). Net alkalinity and net acidity 2: Practical considerations. *Applied Geochemistry*, 20(10), 1941–1964. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.07.003>
43. Navarro, A., Font, X., & Viladevall, M. (2015). Metal Mobilization and Zinc-Rich Circumneutral Mine Drainage from the Abandoned Mining Area of Osor (Girona, NE Spain). *Mine Water and the Environment*, 34(3), 329–342. <http://doi.org/10.1007/s10230-015-0344-6>.
44. Tom Ridge, G. J. (2000). The Science of Acid Mine Drainage and Passive Treatment.

45. Zabowski, D., Henry, C. L., Zheng, Z., & Zhang, X. (2001). Mining impacts on trace metal content of water, soil, and stream sediments in the Hei River basin, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 131(1–4), 261–273. <http://doi.org/10.1023/A:1011964912221>
46. American Public Health Association American Water Works Association Water Environment Federation, 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,
47. Gautam, S.P. et al., 2011. Guide manual water & wastewater analysis. *Hydrology Project -II. Development and proper use*, p.183.
48. Rodier, J., Legube, B. & Merlet, N., 2009. Analyse de l'eau Rodier. 9ème edition,
49. States, U., Survey, G. & Co, D., Direction régional et departement des affaires sanitaires et sociaux. , pp.175–188.
50. Conseil de l'Union Européenne. (1998). Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. *Journal Officiel Des Communautés Européennes Du 5.12.1998 (JOCE L 330/32)*, 23 p
51. Jahanshahi, R., & Zare, M. (2015). Assessment of heavy metals pollution in groundwater of Golgohar iron ore mine area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 505–520. <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4057-8>.
52. Conseil de l'Union Européenne. (1998). Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. *Journal Officiel Des Communautés Européennes Du 5.12.1998 (JOCE L 330/32)*, 23 p.
53. Jahanshahi, R., & Zare, M. (2015). Assessment of heavy metals pollution in groundwater of Golgohar iron ore mine area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 505–520. <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4057-8>
54. Wilcox, L. V. (1955). Classification and Use of Irrigation Waters, (1969), 1–19. <http://doi.org/USDA Circular No. 969>.
55. agence nationale d'intermédiation et de régulation fonciere, Rubrique Monographie Wilaya de Bejaia, ANIREF 29/07/2011

Annexes

Annexe I

Directive 98/83/CE, 1998 : journal officiel des Communautés européennes.32p.

Paramètres indicateurs de conformité d'eau potable

Paramètres	Valeur	Unité
Aluminium	200	$\mu\text{g/l}$
Ammonium	0,50	mg/l
Chlorures	250	mg/l
Clostridium perfringens (y compris les spores)	0	Nombre/100 ml
Couleur	Acceptable pour les consommateurs	
Conductivité	2 500	$\mu\text{S cm}^{-1}$ à 20 °C
Concentration en ions	> 6,5 et < 9,5	unités pH
Fer	200	$\mu\text{g/l}$
Manganèse	50	$\mu\text{g/l}$
Odeur	Acceptable pour les consommateurs	
Oxydabilité	5,0	mg/l O ₂
Sulfates	250	mg/l
Sodium	200	mg/l
Saveur	Acceptable pour les consommateurs	
Teneur en colonies à 22 °C	Aucun changement anormal	
Bactéries coliformes	0	Nombre/100 ml
Carbone organique total (COT)	Aucun changement anormal	
Turbidité	Acceptable pour les consommateurs	

Paramètres chimiques

Paramètres	Valeur	Unité
Acrylamide	0,10	$\mu\text{g/l}$
Antimoine	5,0	$\mu\text{g/l}$
Arsenic	10	$\mu\text{g/l}$
Benzène	1,0	$\mu\text{g/l}$
Benzo(a)pyrène	0,010	$\mu\text{g/l}$
Bore	1,0	mg/l
Bromates	10	$\mu\text{g/l}$
Cadmium	5,0	$\mu\text{g/l}$
Chrome	50	$\mu\text{g/l}$
Cuivre	2,0	mg/l
Cyanures	50	$\mu\text{g/l}$
1,2-dichloroéthane	3,0	$\mu\text{g/l}$
Épichlorhydrine	0,10	$\mu\text{g/l}$
Fluorures	1,5	mg/l
Plomb	10	$\mu\text{g/l}$
Mercure	1,0	$\mu\text{g/l}$
Nickel	20	$\mu\text{g/l}$
Nitrates	50	mg/l
Nitrites	0,50	mg/l
Pesticides	0,10	$\mu\text{g/l}$
Total pesticides	0,50	$\mu\text{g/l}$
Hydrocarbures aromatiques poly- cycliques	0,10	$\mu\text{g/l}$
Sélénium	10	$\mu\text{g/l}$
Tétrachloroéthylène et trichloro-éthylène	10	$\mu\text{g/l}$
Total trihalométhanes (THM)	100	$\mu\text{g/l}$

Résumé :

L'étude consiste à une caractérisation hydrochimique des eaux de la périphérie de l'ancienne mine de fer de Timezrit, Bejaia. On a procédé aux dosages des éléments traces métalliques et éléments majeurs de ces eaux, puis une modélisation géochimique a été réalisée à l'aide de logiciel diagramme de laboratoire de l'hydrogéologie d'Avignon. Les résultats obtenus montrent des fortes concentrations en éléments majeurs indiquant une forte minéralisation des eaux et des faibles concentrations en éléments traces métalliques dues à l'effet tampon des formations carbonatées de la zone étudiée. La modélisation géochimique a montré que les eaux ont un faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne à une tendance à migrer vers le faciès hyper chloruré sodique et sont d'une qualité médiocre à mauvaise pour l'eau d'irrigation.

Mots clés : Éléments traces métalliques, Mine de Timezrit, géochimie, modélisation

Abstract

An hydrochemical characterization of waters in the near area of the abandoned iron mine of Timezrit, Bejaia. An analysis of traces metals, major elements and geochemical modelling using laboratory diagramme of the hydrogeology of Avignon were carried out. The results show high concentrations of major elements indicating a strong mineralization of the water and low concentrations of traces elements metals because of the buffering effect of the carbonates formations of this region. Geochemical modelling showed that the waters have a chlorinate and sulphate calcic and magnesian which tend to a hyper chlorinated sodium facies and are of poor quality for irrigation.

Key words: Metallic traces elements, Timezrit mine, Geochemical, modelling