

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
ECOLE DOCTORALE INGENIERIE ET ENVIRONNEMENT

Option : Mines et Environnement

MEMOIRE

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

Par :

BEDJAOUI Ala Eddine

**«Pollution et environnement : Etat de la pollution des eaux du
district minier après l'arrêt de la mine de Chaabet el Hamra».**

Soutenu devant le jury le 30 Septembre 2012

Mr OMRACI Kamel	Maître Conférences A	ENP	Président
Mme CHABOU Salima	Maître Conférences A	ENP	Rapporteur
Mr OULD HAMOU Malek	Maître Conférences A	ENP	Examineur
Mr MOHAMED Aguid	Maître Conférences A	ENP	Examineur

DEDICACES

Je tiens à remercier Dieu qui m'a donné la santé et le courage
pour aboutir à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail à :

Mes parents ;

Mes frères et sœurs ;

Et à ma grande famille ;

A tous mes amis ;

A tous mes collègues.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

Madame CHABOU Salima, Directrice de ce mémoire, pour avoir accepté de diriger ce travail. Pour sa confiance, sa disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils qu'il a tenu à me prodiguer au cours de la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur SAADA Abd Elhafidh, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP), pour m'aider de réaliser les analyses nécessaires pour ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi aux membres du jury, de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire.

Je remercie Mademoiselle BELKHIRI Nabila, ingénieur en hydrogéologie au niveau de l'ANRH, pour m'avoir aidé.

Je tiens également à remercier Monsieur CHAABANE Lamara, Ingénieur géologue au niveau de Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction (CETIM), pour son aide.

Par la même occasion, j'exprime mes vifs remerciements et ma profonde gratitude aux Mesdemoiselles ARJOUN Yasmine, Ingénieur d'état au niveau de l'Agence Nationale du Patrimoine Minier (ANPM) et BENZAI Nassima, Ingénieur Géologue au niveau de la Sarl Générale des Mines (Société d'Etudes, de Suivi de réalisation et d'Expertise dans les domaines des Mines & Carrières), pour leurs aides.

Mes remerciements vont aussi à mon amie DJAZIRI Omar, ingénieur d'état en génie minier au niveau de l'Agence Nationale de la Géologie et du Contrôle Minier pour son aide, et pour l'ensemble des données qu'il a mis à ma disposition.

A tout le personnel de la Sarl Générale des Mines et de la Direction du Domaine Minier de l'ANPM,

Et à tous mes ami(e)s, je dis merci.

Je suis reconnaissant à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et à toute personne qui m'a appris une lettre ou une phrase, qu'ils trouvent ici un petit fruit de leurs sueurs.

ملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى معاينة وضعية المياه الجوفية على مستوى منشأة منهجية بعين أزال بعد 6 سنوات من التوقف، لقد تم أخذ عينات على مستوى 6 مناطق وتحليلها كيميائيا بغية معرفة نسب المعادن الثقيلة ذات السمية العالية، النتائج المتحصل عليها أثبتت أن نسب التحاليل المنجزة على مختلف المكونات تندرج ضمن الإطار المقبول لمختلف النظم المعمول بها.

لوحظ أيضا أن هذه النسب قد انخفضت قيمتها مقارنة بالدراسات المنجزة من قبل باستثناء نسبة الكبريتات على مستوى مركب المعالجة لخرزت يوسف وهذا راجع إلى ظاهرة الصرف المنجمي الحامض ، وفيما سوى ذلك فإن هذه المياه تندرج في إطار المياه القابلة للشرب بتصنيف النظم المعمول بها.

الكلمات المفتاحية : المنجم، شعبة الحمرة، خرزت يوسف، عين أزال، التلوث، الرصاص، الزنك، الكبريتات، الجيب المائي ، الماء، الصرف المنجمي الحامض

Résumé :

Le but de cette étude est l'analyse des eaux souterraines au niveau du district minier Kherzet Youcef /Chaabet El Hamra dans la région d'Ain Azel, après 6 années d'arrêt.

L'analyse des échantillons d'eau au niveau de six emplacements choisis pendant la période sèche et la période humide, a pu déterminer le taux des métaux lourds. Les résultats obtenus montrent que les données des différentes analyses effectuées sont inférieures aux teneurs des limites acceptées par les normes OMS et les normes algériennes.

Ces valeurs ont diminué par rapport aux résultats des études réalisées antérieurement à l'exception des teneurs des sulfates au niveau de la laverie de Kherzet Youcef, ce qui semble lié au phénomène de drainage minier acide.

Les eaux souterraines selon les exigences des normes OMS et Algériennes sont acceptées comme eaux potables.

Mots clés : mine, Chaabet El Hamra, Kherzet Youcef, Ain Azel, pollution, éléments en traces métalliques (ETM), Plomb, Zinc, Sulfates, nappe d'eau, l'eau, drainage minier acide.

Abstract:

The purpose of this study is oriented towards the analysis of groundwater at the mining structure located in Ain Azel, after six years off.

The analysis was performed by sampling at six zones during the dry season and the wet season to determine the rate of heavy metals in water. The results shows that data

from different analyzes are lower than levels accepted limits by the WHO standards and Algerian standards.

It is noted that these values are reduced compared with the results of previous studies with the exception of the contents of sulphates at the complex processing, this amounts to the phenomenon of acid mine drainage.

In conclusion, the groundwater is acceptable according to the WHO standards and Algerian requirements, as drinking waters.

Key words: mine, Chaabet El Hamra, Kherzet Youcef, Ain Azel, pollution, metallic trace elements (MTE), Lead, Zinc, Sulfate, groundwater, water, acid mine drainage.

Table de Matières

<i>DEDICACES</i>	<i>i</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>ii</i>
<i>RESUME</i>	<i>iii</i>
<i>TABLE DE MATIERES</i>	<i>v</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	<i>vii</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i>	<i>viii</i>
<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i>	<i>ix</i>
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	
<i>CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE</i>	
<i>I.1. HISTORIQUE DE LA MINE</i>	<i>2</i>
<i>I.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE</i>	<i>2</i>
<i>I.3. LA GEOLOGIE</i>	<i>4</i>
I.3.1. LITHO-STRATIGRAPHIQUE	<i>5</i>
I. 3.2. TECTONIQUE	<i>9</i>
<i>I.4. LA MINERALISATION</i>	<i>11</i>
I.4.1. LES SULFURES	<i>11</i>
I.4.2. MINERAUX DE GANGUE	<i>13</i>
<i>I.5. APERÇU HYDROGEOLOGIQUE</i>	<i>14</i>
I.5.1. LA NAPPE BARREMIENNE	<i>14</i>
I.5.2. LA NAPPE ALBO-APTIENNE	<i>15</i>
I.5.3 LA NAPPE MIO-PLIO-QUATERNAIRE	<i>16</i>
I.5.4. L'UNITE D2	<i>16</i>
<i>I.6. APERÇU HYDROCHIMIQUE</i>	<i>16</i>
I.6.1. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE BARREMIENNE (PUITS DE MINE)	<i>16</i>
I.6.2. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE MIO-PLIO-QUATERNAIRE	<i>18</i>
I.6.3. CONCLUSION	<i>19</i>
<i>I.7. METHODE D'EXPLOITATION (CHAMBRES ET PILIERS)</i>	<i>19</i>
<i>I.8. TRAITEMENT DU MINERAL</i>	<i>21</i>
<i>I.9. DESCRIPTION DE LA LAVERIE DE KHERZET-YOUCEF</i>	<i>21</i>
<i>CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA POLLUTION</i>	
<i>II.1. LA POLLUTION (BRGM, 2008)</i>	<i>25</i>
<i>II.2. LE POLLUANT (BRGM, 2008)</i>	<i>25</i>
II.2.1. PRINCIPAUX POLLUANTS	<i>25</i>
II.2.2. COMPORTEMENT DES POLLUANTS (LES METAUX ET METALLOÏDES LOURDS)	<i>26</i>
<i>II.3. LE SOL ET LE SOUS-SOL</i>	<i>28</i>
II.3.1. LE SOL	<i>28</i>
II.3.2 LE SOUS-SOL	<i>30</i>

II.4. PRINCIPAUX TYPES DE MILIEUX SOUTERRAINS	31
II.4.1. LA ZONE NON SATUREE	32
II.4.2. LA ZONE SATUREE	33
II.5. DEFINITION DE LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES	35
II.6. CAUSES DE POLLUTION DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINES	35
II.6.1 FACTEURS OCCASIONNANT LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES	36
II.6.2. PRODUITS PROVOQUANT LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES	37
II.7. LE DRAINAGE MINIER ACIDE (DMA)	38
II.7.1. FORMATION	38
II.7.2. LES PROBLEMES DE DMA SUR L'ECOLOGIQUE	40
II.7.3. ENTREPOSAGE DES RESIDUS MINIER (NORMES CANADIENNES, 2009)	42
CHAPITRE III : METHODE ET DISCUSSION DES RESULTATS	
III.1. PRESENTATION DES PRINCIPAUX ETM ETUDIES	43
III.2. METHODOLOGIE DU TRAVAIL	44
III.2.1. ELEMENTS ETUDIES	44
III.3. TECHNIQUE D'ECHANTILLONNAGE	44
III.3.1. CHOIX DES POINTS DE PRELEVEMENT	44
III.3.2. PRELEVEMENT DE L'EAU	45
III.4. PREPARATION PRELIMINAIRE A L'ANALYSE	46
III.4.1. ACIDIFICATION	46
III.4.2. CONSERVATION DES ECHANTILLONS	46
III.5. ANALYSE DES EAUX	47
III.5.1. MESURE DE POTENTIEL D'HYDROGENE (PH)	47
III.5.2. CHOIX DE LA METHODE D'ANALYSE	47
III.5.3. GENERALITES SUR LA METHODE D'ANALYSE	47
III.5.4. PRINCIPE ET DESCRIPTION DE LA METHODE	50
III.6. RESULTATS ET DISCUSSION	52
III.6.1. RESULTATS DES ANALYSES	52
III.6.2. ETUDE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION D'AIN AZEL	53
III.6.3. ETUDE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA MINE DE KHERZET YUCEF (NAPPE BARREMIENNE) .	54
III.6.3.1. Comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM aux normes	54
III.6.4. ETUDE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA MINE DE CHAABET EL HAMRA ET LA VILLE DE AIN AZEL (NAPPE MIO-PLIO-QUATERNAIRE)	58
III.6.4.1. Comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM aux normes	58
III.6.5. EVALUATION DE LA POLLUTION DES EAUX DANS LA REGION	68
CONCLUSION GENERALE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

Liste des Tableaux

Tableau n°1 : Résultat d'analyse des éléments majeurs de l'eau de la nappe barrémienne (A.N.R.H Constantine).....	25
Tableau n°2 : Résultats d'analyse des éléments majeurs de l'eau de la nappe mio-plio-quadernaire (A.N.R.H Constantine).....	26
Tableau n°3 : L'extraction de 1999 à 2006.....	28
Tableau n°4 : Polluants inorganiques et organominéraux.....	34
Tableau n°5 : Classification granulométrique des particules des sols.....	38
Tableau n°6 : Principaux effets sur la santé humaine des métaux observés dans le drainage minier.....	51
Tableau n°7 : Résultats des analyses d'eau obtenus en deux périodes (octobre 2011 et Avril 2012) dans la mine de Kherzet Youcef.....	66
Tableau n°8 : Résultats des analyses d'eau obtenus en deux périodes (octobre 2011 et Avril 2012) de la région d'Ain Azel (nappe mio-plio-quadernaire).....	70
Tableau n°9 : Les Teneurs des ETM obtenus en 2004 par ATTOUCHEIK L et moi-même en 2011.....	75
Tableau n°10 : Les Teneurs des ETM obtenus en 2004 par ATTOUCHEIK L, BELKHIRI L et moi-même en 2011.....	76
Tableau n°11 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la mine de Kherzet Youcef....	79
Tableau n°12 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la station de pompage de Ain Azel.....	79
Tableau n°13 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la piscine de Ain Azel.....	80
Tableau n°14 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la mine de Chaabet El Hamra...	80

Liste des Figures

Figure n°1 : Situation géographique de la zone d'étude.....	13
Figure n°2 : Situation géologique de la zone d'étude dans le Schéma structural des maghrébides	15
Figure n°3 : Schéma structural simplifié du Dj.Hadjar Labiod extrait de la carte de Ain Azel....	20
Figure n°4 : Coupe hydrogéologique Schématique de la région de Kherzet Youcef.....	25
Figure n°5 : Méthode des chambres et piliers abandonnés.....	30
Figure n°6 : schéma technologique montrant les procédures du traitement de Zinc.....	34
Figure n°7 : Métaux lourds dans la classification périodique des éléments chimiques.....	38
Figure n°8 : Exemple de l'évolution d'un panache de pollution à l'aval d'une décharge.....	43
Figure n°9 : Conséquence du DMA sur le site Aldermac en Abitibi (QC, Canada).....	51
Figure n°10 : Le site abandonné de Manitou dévasté par le DMA (Abitibi, QC,Canada).....	51
Figure n°11 : Projection des prélèvements d'eau.....	66
Figure n°12 : Projection des prélèvements d'eau réalisées par ATTOUCHEIK et BELKHIRI en 2004 et réalisées par moi-même en 2011.....	76

Liste des Abréviations

ORGM : Office de recherches géologiques et minières

CETIM : Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction.

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

PH : Potentiel hydrogène

ZNS : Zone non saturé

DMA : Drainage minier acide

SAA : Spectrométrie d'absorption atomique

UTM : Universal Transverse Mercator

ETM : Eléments Traces Métalliques

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

ENOF : Entreprise Nationale des Métaux non Ferreux

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

Introduction Générale

L'industrie minière génère, en raison de ses activités, des quantités importantes de rejets solides et liquides. En Algérie, l'extraction du plomb zinc au niveau de la mine de Chaabet El Hamra nécessite l'utilisation d'eau, ce qui est une source de pollution importante à cause du déversement de celle-ci dans la nature (sol et sous-sol).

En parallèle, le contexte législatif concernant l'organisation et l'exploitation des mines devient de plus en plus sévère vis-à-vis de la protection de l'environnement avec la loi minière n°01-10 du 3 juillet 2001 qui régit les activités minières.

Dans ce cadre, des travaux antérieurs (MEDKOUR., 1994, ANRH., 2004 et ATTOUCHEK., 2006 et BELKHIRI., 2010) ont été réalisés au niveau du district minier Kherzet Youcef / Chaabet El Hamra afin de déterminer l'impact sur l'environnement durant la période de fonctionnement du site minier, les résultats ont montré des incidences négatives sur l'environnement, connaissant les dangers induits par les métaux lourds ou éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux souterraines.

Notre travail consiste en l'étude de l'évolution de la pollution de la nappe d'eau de la région d'Ain Azel par les éléments en traces métalliques (Pb, Zn, Cu et Cd) après l'arrêt de la mine de Chaabet El Hamra (en 2006).

Nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres.

Le premier chapitre est une présentation de la zone d'étude en commençant par un historique de l'activité de la mine, suivi d'une description géologique de la région, de la méthode d'exploitation utilisée et des procédures de traitement du Pb-Zn.

Le deuxième chapitre traite de la pollution, avec des définitions et des clarifications sur la formation, le comportement des polluants et les différents types existants notamment le phénomène de drainage minier acide.

Le troisième chapitre qui présente la partie pratique fait un état des lieux en ce qui concerne la pollution liée à l'extraction du Pb-Zn et à son enrichissement. Il montre aussi le taux de pollution des eaux en 2012.

A la lumière des résultats obtenus, le quatrième chapitre forme une conclusion générale et quelques recommandations permettant l'enrichissement du travail réalisé.

CHAPITRE I

*Présentation de la zone
d'étude*

I.1. Historique de la mine

Le gisement de Chaabet El-Hamra est connu depuis longtemps, il a fait l'objet de l'exploitation des affleurements de calamines de 1910 à 1920 et de 1936 à 1941.

Après la nationalisation des mines en 1966, le gisement de Chaabet El-Hamra a été l'objet de premiers travaux de prospection géologique, de 1967 à 1988, suivis ensuite de travaux d'évaluation par sondages à maille de 50×100 et de 100×100m, de 1989 à 1991.

En 1991 **un coup d'eau** survenu le 02 juin 1990 à la mine de Kherzet Youcef située à 8 Km du gisement de Chaabet El-Hamra a mis fin à l'exploitation du gisement de Kherzet Youcef. Dès lors, l'ENOF a élaboré un premier dossier de recherche détaillée par ouvrages miniers sur le gisement de Chaabet El-Hamra.

Les travaux miniers ont démarré en janvier 1992 et les ouvrages d'accès ont été achevés en avril 1994.

La mine de Chaabet El-Hamra a démarré l'extraction du tout-venant en Avril 1994 dans la partie supérieure du gisement.

Actuellement, la mine est à l'arrêt depuis 2006 après l'épuisement de la partie supérieure du gisement de Chaabet El-Hamra.

I.2. Situation géographique

Le gisement de Zinc de Chaabet El Hamra est localisé dans le Nord-est de l'Algérie, dans la willaya de SETIF, commune de AIN AZEL et à 8 Km du complexe minier de Kherzet Youcef (usine de traitement du Pb-Zn) proche de la ville de AIN AZEL (à 45 Km de SETIF) (Fig. n°1).



Figure n°1 : Situation géographique de la zone d'étude.
(Extrait de la carte touristique de l'Algérie-Echelle : 1/1 000 000^e)

I.3. La géologie

La région de Kherzet Youcef est située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord. Elle appartient au domaine méridional des Hauts Plateaux et constitue la limite septentrionale des monts du Hodna (Fig.n°2), où on peut distinguer (SAVORNIN J., 1920 et GLACON J., 1967) :

- Au Sud, l'autochtone essentiellement carbonaté, d'âge jurassique et créacé, qui comporte les Djebel Boutaleb et Fournal d'allongement ENE – WSW.

- Un avant pays hodnéen autochtone à para-autochtone correspondant aux dépressions d'Ain Azel et Salah Bey à l'Ouest, séparées par Djebel Hadjar Labiod.

-Au Nord, le domaine des nappes de charriage avec l'ensemble allochtone sud sétifien représenté du Sud au Nord par :

- L'unité inférieure de Djebel Kalaoun,
- l'écaille de Djebel Sekrine,
- l'écaille d'Ain Lahdjar,
- l'écaille de Djebel Youcef.

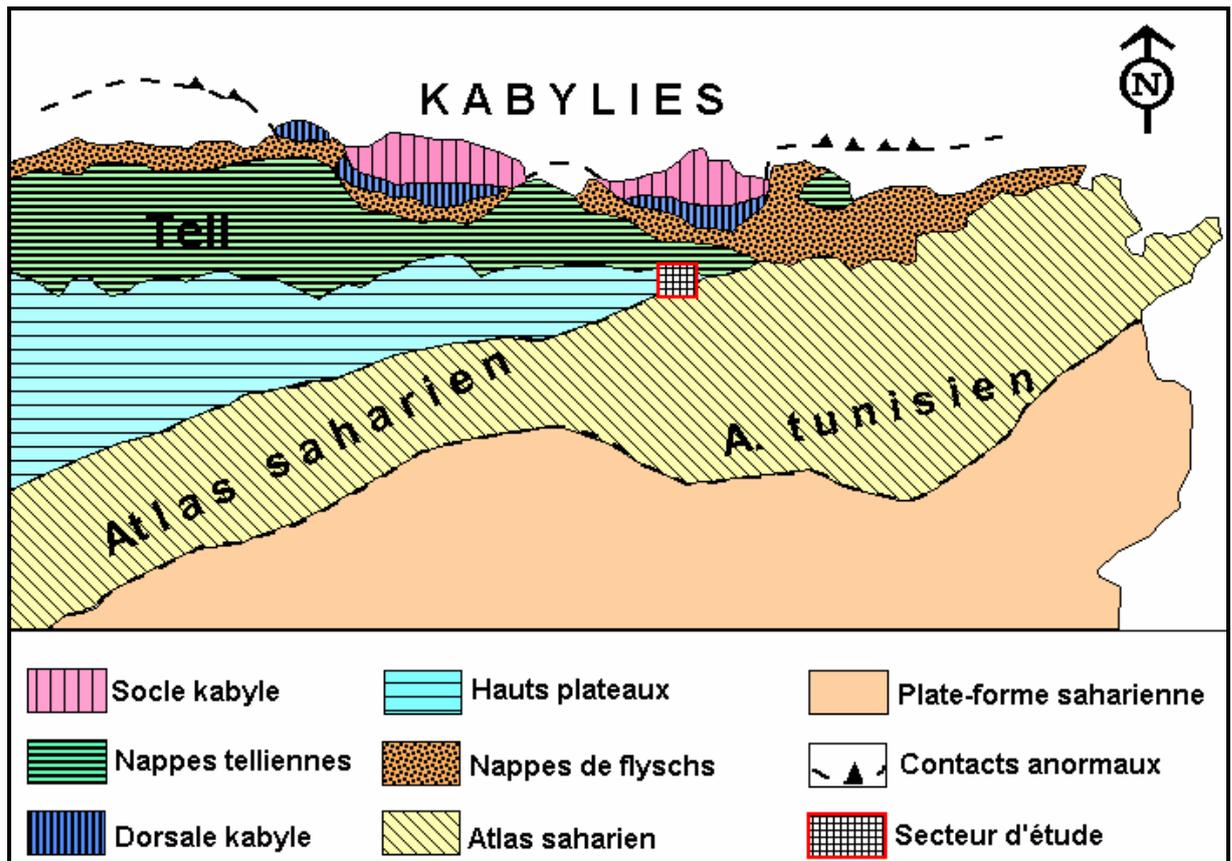


Figure n°2 : Situation géologique de la zone d'étude dans le Schéma structural des maghrébides avec (WILDI, 1983 in ATTOUCHEIK, 2006).

I.3.1. litho-stratigraphique

La région est formée de terrains allant du Trias au Miocène (BOUTALEB, 2001).

➤ Trias

Il affleure en pointements exotiques et chaotiques d'argiles à blocs carbonatés, de roches vertes et de lentilles de gypse.

En sondage (ORGM, 1984), le Trias montre de bas en haut : des grés, des évaporites à intercalations de roches vertes volcaniques et de marnes silteuses gris verdâtre.

➤ Infra Lias

Il est associé aux percements triasiques. Il est constitué de calcaires noirs, de dolomie fine, des brèches sédimentaires, des marnes gréseuses ou dolomitiques, et des oolites ferrugineuses.

➤ **Jurassique**

Il est essentiellement carbonaté :

a. Lias

Il est essentiellement calcaro-dolomitique en bancs massifs, mal lités à algues (*Thaumatoporella*). Au sommet il passe vers un faciès « Ammoniticorosso » lenticulaire.

b. Dogger

Il est formé de calcaires fins à « filaments » et de calcaires à silex plus au moins dolomités, à débris d'Ammonites et de Bélemnites et des calcaires oolitiques.

c. Malm

L'Oxfordien est caractérisé par un faciès « *ammonitico rosso* ». C'est un niveau calcaro-argileux à Ammonites mal conservées.

Ce niveau est surmonté par une série puissante de marnes à alternance de calcaires en bancs décimétriques fins gris-bleutés. Elle renferme des Radiolaires et des Ostracodes permettant de lui attribuer un âge oxfordien-kimméridgien.

Cette formation est suivie d'une formation calcaro-marneuse qui marque le passage du Jurassique au Crétacé. Elle est datée Tithonique inférieur-Berriasien moyen grâce aux Ammonites et aux Calpionelles

➤ **Crétacé**

a. Néocomien

Il représente un nouvel épisode argileux ou marneux.

Le Valanginien comprend essentiellement des marnes et des marnes silteuses gris-verdâtres à rares intercalations de calcaires à la base et gréseuses en bancs épais au sommet.

L'Hauterivien est formé de dolomies massives et rouges alternant avec des grès, des dolomies gréseuses et argiles. Ces dolomies montrent des minéralisations de Pb-Zn-Fe-Ba.

b. Barrémien

Il débute par des niveaux gréseux qui passent vers des passées calcaires. Le sommet du Barrémien est marqué par une sédimentation gréso-argileuse.

c. Aptien

Il commence par une barre massive calcaro-dolomitique surmontée par une alternance calcaires-argiles à lumachelles (Gastéropodes, Toucasia et Nérines).

d. Albien-Vraconien

Il est formé par des niveaux gréseux blanchâtres à grains moyens et stratifications obliques. Ces grés sont surmontés par des calcaires et des calcaires argileux.

e. Cénomano-Turonien

Il correspond à des niveaux dolomitiques ou par des biosparites à *Orbitolinaconica*. Elle se termine par des calcaires micritiques à facies de Foraminifères benthiques.

Le Turonien montre des facies récifaux ou à Rudistes isolés. Au Nord on trouve des marno-calcaires peu fossilifères à de rares céphalopodes et Echinides.

f. Sénonien

Le Sénonien inférieur est formé par des placages béchiques polygéniques à éléments carbonatés du Cénomano-Turonien.

Le Maastrichtien est transgressif. Il est formé de calcaires gris compacts avec des intercalations marneuses à faune abondante avec des oursins, des inocérames, des gastéropodes et de nombreux lamellibranches. Ces calcaires sont massifs, bioclastiques à débris de bryozoaires et échinides.

Le Coniacien et le Santonien sont marneux, ils deviennent ensuite calcaires

Le Campanien est marneux ou à calcaires crayeux à faune très abondante (Ammonites, Oursins, Huîtres, Plicatules), à l'Est il ne présente que des Foraminifères.

➤ **Paléocène-Eocène**

Ils affleurent sur des surfaces réduites autour des massifs occidentaux (Maadid et Ouled Tebben).

Le Paléocène est formé de marnes sombres qui peuvent s'intercaler de lumachelles à *Cardita beaumonti*, *Exogyra overwegi*

L'Eocène est constitué essentiellement par des calcaires à silex et des niveaux phosphatés. Ces niveaux sont d'aspect souvent conglomératique et peuvent renfermer d'abondants petits galets de silex. Ils livrent une abondante faune de vertébrés et surtout des sélaciens comme *Myliobatis dixonii* et *Lamna obliqua*.

Le Lutétien supérieur débute par des niveaux dolomitiques massifs surmontés par une série de calcaires grisâtres à jaunâtres lités, marneux ou gréseux, souvent plus ou moins dolomitisés, alternant avec des marnes grises ou verdâtres. Localement la série se poursuit par des couches lagunaires gypseuses avec parfois des galets.

➤ **Miocène**

Il commence par des poudingues rouges et des grès à Pectinidés et Lithothamniées qui remanient de gros blocs d'Eocène à silex et de Crétacé supérieur (calcaires à Orbitoïdes, Cunéolines et Laffitéines). Ces conglomérats sont surmontés de calcaires gréseux fauves ou roux à *Pecten convexior*, *P. josslingi* et *Ostrea crassissima* d'âge Burdigalien supérieur. Au-dessus se développe une puissante série marneuse, avec des intercalations gréseuses et calcareuses.

➤ **Plio-Quaternaire**

Le Pliocène est caractérisé par une sédimentation détritique qui commence par des facies deltaïques surmontés par des marnes et qui se termine par des apports conglomératiques.

Le Quaternaire est essentiellement représenté par des dépôts de pente à recouvrements détritiques et de terres arables au pied des reliefs. Ils peuvent se raccorder à des glaciers des hautes plaines et des terrasses anciennes et récentes étagées des basses plaines entre Ouled Tebbene et Djebel Boutaleb. (Fig. n°3)

a. Glacis des hautes plaines

Ces glacis sont représentés principalement par un matériel clastique anguleux et plus grossier au voisinage des montagnes. Il devient très fragmentaire vers le bas. Ce matériel est constitué de cailloux, de gravier et quelques bloc à remplissage limon-argileux.

b. Terrasses des basses plaines

Dans les basses plaines, c'est la fraction fine qui prédomine ; elle est composée d'argiles, de limons et de sables avec des graviers disséminés dans les différentes couches.

I. 3.2. Tectonique

Dans les Monts du Hodna, on distingue deux unités tectoniques séparées par le front sud sétifien (BOUTALEB, 2001) (Fig. n°3) :

- L'allochtone sud sétifien au Nord, constitué d'un vaste empilement d'écaillés limitées par des cisaillements.
- L'autochtone hodnéen au Sud qui est affecté essentiellement par une tectonique assez complexe liée à l'orogénèse alpine.

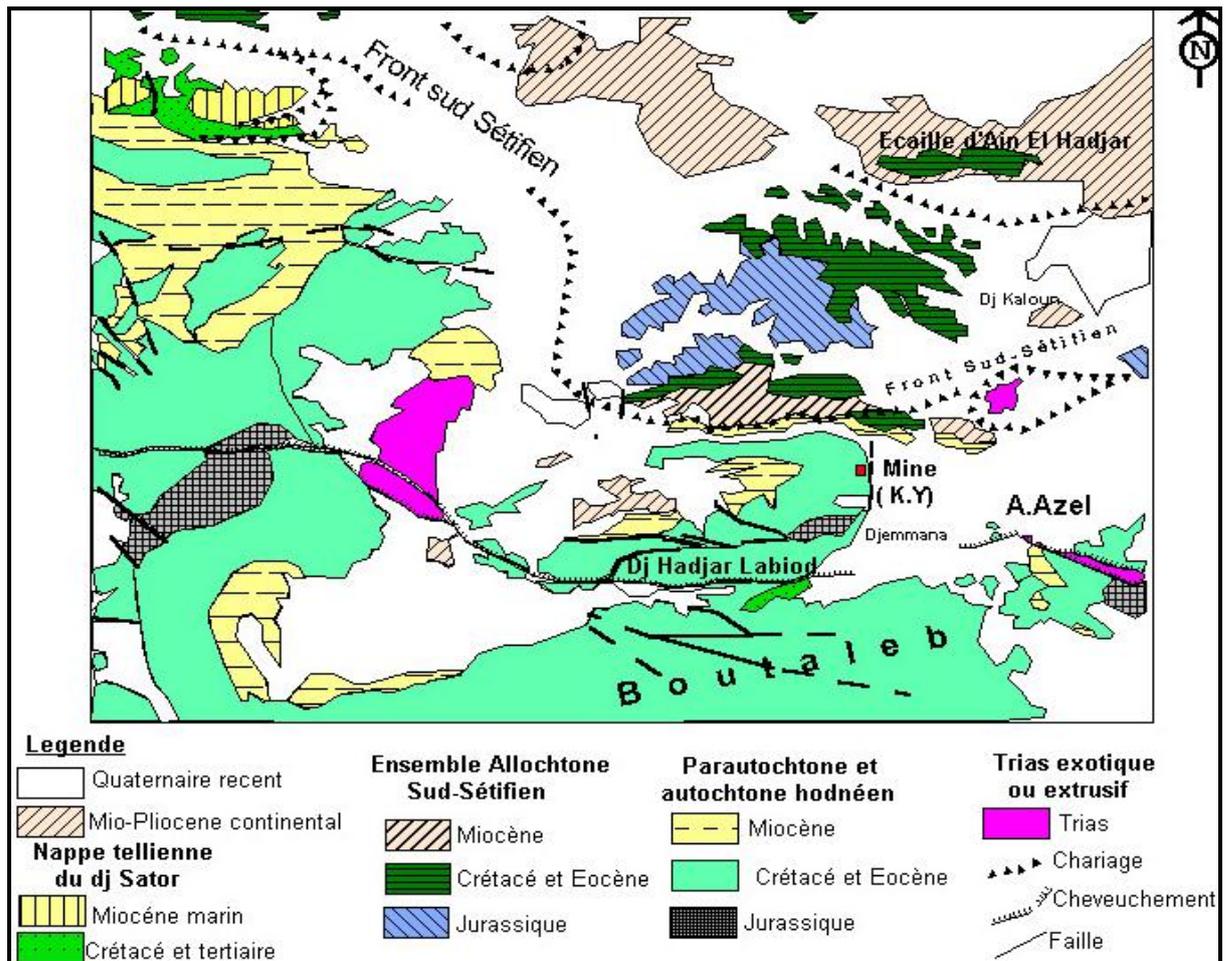


Figure n°3 : Schéma structural simplifié du Dj. Hadjar Labiod extrait de la carte de Ain Azel (VILA, 1973 in ATTOUCHEIK, 2006).

➤ Les failles

Elles affectent les terrains carbonatés du Jurassique et du Crétacé. On peut distinguer :

- Des failles de direction NE-SW et NW-SE.
- Des failles de direction EW de plus grande importance. Elles se sont formées lors du plissement du grand anticlinal du Hodna au cours de la phase emschérienne (BERTRAND, 1955 in ATTOUCHEIK, 2006).
- Une faille importante de direction N-S (faille de Kherzet Youcef) affecte le Crétacé du Djebel Hadjar Labiod sur son flanc Est

➤ Les plis

Ils ont généralement une orientation E-W à WSW-ENE. La direction WNW-ESE correspond à des synclinaux à larges rayons de courbure, représentant l'ensemble de hauts reliefs avec des axes de directions :

- NW-SE tels que ceux observés au niveau de Djebel Sekrine, Djebel Kalaoun, Djebel Gouzi et Djebel Fournal.

- NE-SW rencontrés au niveau de Djebel Hadjar Labiod et Djebel Boutaleb.

➤ **Les Structures diapiriques.**

Les affleurements du Trias diapirique se situent généralement dans la zone de convergence de deux directions de fractures (E-W et NW-SE ou NE-SW).

D'après GUIRAUD.R (1973), la mise en place du Trias est liée principalement à des contraintes compressives, liées à la phase priabonienne et la phase tortonienne.

I.4. La minéralisation

I.4.1. Les sulfures

La région est caractérisée par la présence d'une minéralisation riche en Pb et Zn notamment :

a. La blende (ZnS)

C'est le minéral le plus abondant, sa teneur minimale est de l'ordre de 10-15 % et atteint souvent les 40-60 % (HENNI A, 1984). En plus du zinc, l'étude de la composition chimique de la sphalérite a permis de déceler la présence du **cadmium** (0.09-1,45 %), fer (0.11-1.27 %), **cuivre** (0.06-0.03 %), germanium (0.03-0.08 %), manganèse (0.02- 0.026) (HENNI A, 1995).

L'étude microscopique détaillée du minerai (Pb-Zn) a mis en évidence l'existence de deux générations de blende (sphalérite) (HENNI A, 1998) :

- la première génération s'est développée en même temps que la minéralisation disséminée à marcasite. Elle forme une masse finement cristalline (0.1-0.8 mm), parfois, des agrégats ou des phénocristaux et des disséminations de densité variable d'un point à un autre. Elle corrode et remplace les minéraux de l'association précoce (pyrite et marcasite).

- la deuxième génération se rencontre sous forme de deux variétés : la première, de distribution irrégulière, constitue, la plupart du temps, des masses collomorphes et des couches rubanées et concentriques de différentes teintes (brun-foncée à jaune claire).

La partie centrale de ces structures est souvent occupée par de la dolomite ou de la marcasite. La deuxième variété est plus abondante dans les espaces vides (pores, cavités) de dolomie.

Signalons que l'analyse des données pour les deux générations de blende a montré que la première génération est relativement pauvre en cadmium et que celle de la génération tardive est riche en cadmium (HENNI A, 1998).

b. La galène (PbS)

La galène est le second minéral métallifère avec une teneur de 10 à 15% et atteignant les 25 à 30% et plus dans le minerai massif. La galène a été observée sous forme de deux générations I et II (HENNI A, 1998).

- la galène I développe de très fines inclusions et veinules recoupant la sphalérite, la dolomite, et la marcasite de génération précoce.

- la galène II est de distribution irrégulière. Elle forme des phénocristaux, des agrégats, des filonnets et des druses.

L'analyse spectrale quantitative de la galène a révélé la présence de : Ag (0.12-3 %), **Cu (0.003-0.0003 %)**, Bi (0.25-0.13 10⁻⁴), Cd et l'absence de l'antimoine.

L'analyse à la microsonde électronique montre la présence du **Plomb** (86,1 à 86,9%), du **Zinc** (0,02%) et du Fer (0,02 à 0,06%).

c. La marcasite (FeS₂)

C'est le sulfure le plus précoce. Il est abondant dans l'encaissant et souvent disséminé dans une dolomie riche en bitume (HENNI A, 1984).

La composition chimique de la marcasite est caractérisée par la présence d'éléments traces tels que : **Zn** (0.02-1.02 %), Ga (8- 8.7 10⁻⁴), Ge (0.04- 0.10 %), Ni (0.03-0.09 %), Co (0.01 %) et **As (0.013-0.51 %)** (HENNI A, 1984).

D'après (HENNI A, 1998), on distingue deux générations de marcasite :

- La marcasite I : Elle est plus abondante et forme de fines mouches de distribution irrégulière et de micro veinules différemment orientées. Elle montre des teneurs élevées, surtout, en Ni (0.09%), et As (0.51%).

- la marcasite II : associée surtout avec la sphalérite et la galène. Elle se distingue par des concentrations élevées en **Cd (0.036%)**, Sb (0.05%), Ge (0.1%).

d. Pyrite (FeS₂)

La pyrite est rare et constatée exceptionnellement dans la roche argilo-carbonatée sous forme d'individus microscopiques (1 à 5 microns). Elle se présente aussi en petits grains disséminés dans l'encaissant dolomitique (HENNI A, 1998).

I.4.2. Minéraux de gangue

a. Dolomite [Ca Mg (CO₃)₂]

La dolomite remplit les fissures. Elle se trouve aussi dispersée dans la blende et dans la galène. Elle forme trois générations I, II et III. La génération prédominante, avec laquelle s'est déposée la masse essentielle du minerai, est la dolomite II (HENNI A, 1998).

Les résultats de l'analyse spectrale, chimique et par microsonde des dolomites montrent que celles-ci contiennent les éléments suivants : **Pb (0,12 à 0,5%)**, **Cd (0,002 à 0,005%)**, **Cu (0,001 à 0,005%)**, **Zn (0,005 à 0,07%)**. Ainsi que la présence de petites quantités de FeO (0,017%-0,16%) et MnO (0,08%-0,18%) (HENNI A, 1998).

b. Calcite (CaCO₃)

La calcite est très répandue. Les grains sont très allongés et rhomboédriques. Ils remplissent de nombreuses fissures, des géodes et de cavités. Deux générations de calcite sont à distinguer (HENNI A, 1998) :

- la calcite I, associée à la dolomite, la barytine, les sulfures et le bitumes, remplit les espaces inter granulaires.

- la calcite II, elle se développe exclusivement dans les vides des cavités où elle forme des cristaux isolés ou des druses.

Les résultats de l'analyse spectrale, chimique et par microsonde des deux générations de calcite, ont démontré qu'elles présentent les impuretés suivantes : MgO (0,21% à 0,49%), MnO (0,01% à 0,15%), FeO (0,002% à 0,21%) Pb (0,002% à 0,1%), Cu (0,002% à 0,005%), Zn (0,01% à 0,05%), Sr (0,01% à 0,015%) , Cd (0,002%).

c. Barytine (Ba SO₄)

La barytine se rencontre rarement dans le gisement de Kherzet Youcef. Elle se trouve en association avec la calcite et la galène dans les géodes ou fractures.

L'analyse spectrale quantitative a démontré que la barytine contient de 0,01% à 0,07% de plomb, de 0,7% à 0,9% de strontium et de 0,3 à 0,7% de calcium.

d. Fluorite (Ca F₂)

Elle est moins fréquente et se rencontre en association avec de la barytine et de la calcite à l'intérieur des vides (HENNI A, 1998).

I.5. Aperçu hydrogéologique

L'étude hydrogéologique de la région permet d'identifier les différents horizons aquifères localisés dans la zone d'étude et de déterminer le comportement hydrodynamique et les relations hydrauliques existant entre les différentes nappes. Elle permet aussi de délimiter les structures tectoniques et leur impact sur la circulation des eaux souterraines chargées en ETM.

D'après l'étude géologique, géophysique et l'hydrogéologique, quatre niveaux aquifères sont dénombrés (Fig. n°4).

I.5.1. la nappe barrémienne

La nappe barrémienne est située à l'Ouest de la faille de Kherzet Youcef (Fig. n°4), où elle affleure à un niveau piézométrique estimé à 929 m d'après les piézomètres (H2, H3 et H7). L'ensemble du Barrémien fait 700 m d'épaisseur.

Le Barrémien est caractérisé par des formations sédimentaires constituées d'une alternance de calcaires, de marnes, de dolomies et de grés. Les corps minéralisés du gisement de Kherzet Youcef sont encaissés dans ces formations.

Le Barrémien est affecté par un réseau de failles et de fractures particulièrement développé au niveau du massif de Hadjar Labiod, permettant la circulation des eaux souterraines dans les formations calcaro-dolomitiques.

Les eaux de cette nappe sont employées pour l'irrigation et le lavage du minerai. Cette nappe a été désignée par le ministère de l'hydraulique en 1977 pour la

réalisation du projet « SETIF-HODNA» pour alimenter la région d’Ain Azel, Ain Oulmene voire même la région d’El Eulma en eau potable. Actuellement elle est utilisée pour l’irrigation.

I.5.2. La nappe albo-aptienne

La nappe albo-aptienne, située dans le compartiment oriental de la faille de Kherzet Youcef est caractérisée par des calcaires karstiques avec des intercalations gréseuses, des calcaires marneux. Une faille formant une barrière étanche isole hydrauliquement cette nappe de la nappe barrémienne. Cette nappe se trouve en charge sous un niveau argileux-sableux semi-perméable permettant de l’isoler hydrauliquement de la nappe mio-plio-quaternaire. (Fig. n°4).

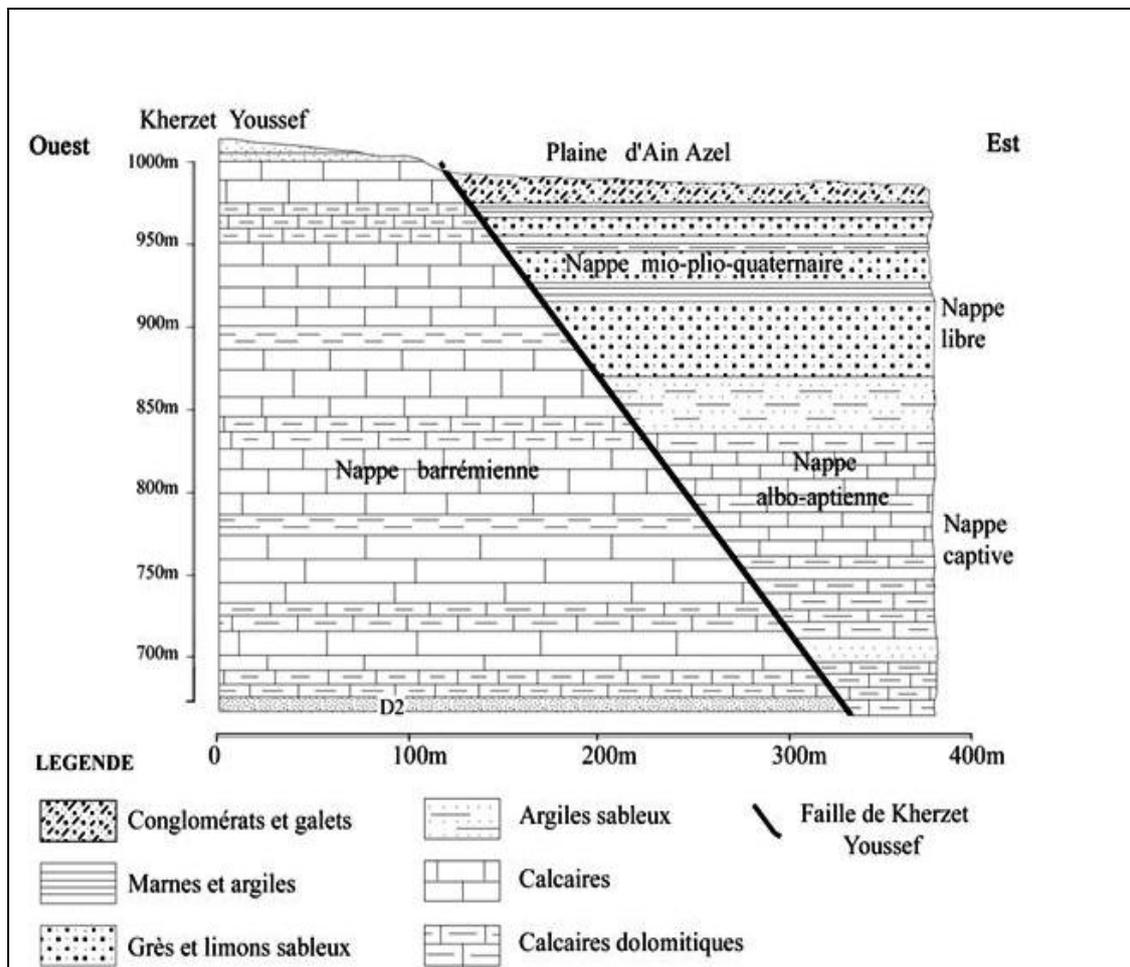


Figure n°4 : Coupe hydrogéologique Schématique de la région de Kherzet Youcef (ATTOUCHEIK, 2006).

I.5.3 La nappe mio-plio-quaternaire

La nappe mio-plio-quaternaire est située immédiatement à l'Est de la faille de Kherzet Youcef dans la plaine d'Ain Azel (Fig. n°4), son épaisseur peut atteindre 250 m.

Le Mio-Plio-Quaternaire est caractérisé par une sédimentation détritique continentale très hétérogène, représentée par des conglomérats qui s'intercalent avec des grès, argiles, marnes et calcaires lacustres et des galets avec des intercalations de limons sableux.

La nappe superficielle est alimentée directement par les précipitations et les eaux de ruissellement en provenance des différents reliefs entourant la dépression intra montagnaise d'Ain Azel. Ces principaux exutoires sont représentés par Sebket El Hamiet et Chott El Beida, ainsi que l'évaporation. Le niveau piézométrique de cette nappe était de l'ordre de + 930 m en 1982.

Les eaux de cette nappe sont utilisées par les agriculteurs à travers leurs puits domestiques pour l'irrigation et la consommation humaine.

I.5.4. L'unité D2

L'unité D2 correspond à une nappe aquifère dont l'âge n'est pas déterminé. Elle est située dans le compartiment ouest de la faille d'Ain Azel et elle constituée par des grès (Fig. n°4).

I.6. Aperçu hydrochimique

L'étude hydrochimique a été faite pour la nappe mio-plio-quaternaire et celle du Barrémien dans le but de définir le faciès chimique des eaux de la plaine d'Ain Azel.

Pour déterminer le faciès chimique de la nappe mio-plio-quaternaire, l'étude a été réalisée sur les eaux de la station de pompage (AEP d'Ain Azel), alors que pour la nappe barrémienne l'étude a concerné le puits de mine.

I.6.1. Composition chimique des eaux de la nappe barrémienne (Puits de mine)

a. Composante ionique majeure

Durant toute la période d'exploitation minière du gisement de Kherzet Youcef, un pompage des eaux souterraines s'effectuait continuellement afin de dénoyer la mine.

Cette eau est utilisée par les agriculteurs de la région pour l'irrigation de leurs terres agricoles.

Le tableau (Tab. n°1), représente les teneurs des éléments chimiques majeurs des eaux de la mine de Kherzet Youcef.

Tableau n°1 : Résultat d'analyse des éléments majeurs de l'eau de la nappe barrémienne (A.N.R.H Constantine).

N°	Date	Na ⁺ +K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	CO ³⁻ (mg/l)	HCO ³⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Résidu sec (g/l)
1	04/1982	25	27	46	0.3	33.3	123	51.2	4.8
2	01/1983	59	30	8.0	6.10	55	140	173	1.20
3	08/1987	36.8	85	83.8	0.00	365	434	128	1.40
4	02/1988	29.0	78	69.9	0.05	390	338	108	1.14
5	07/1990	65.0	124	31.0	0.00	250	106	198	0.00
6	10/2001	98.0	64	154.0	0.00	305	110	500	1.20
7	.03/2002	91.0	84	132.0	0.00	252	105	500	1.20
8	04/2002	94.0	162	103.0	0.00	259	186	538	14.2
9	07/2004	20.3	83	52.0	0.00	305	76	88	5.58

D'après les résultats obtenus, on remarque que les teneurs en sulfates, bicarbonates et chlorures sont très élevées alors que le calcium et le magnésium présentent des teneurs moyennes.

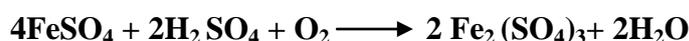
Les eaux de la nappe barrémienne sont caractérisées par deux faciès ; un faciès sulfato-magnésien et un faciès Chloro-calcique.

b. Origine des éléments chimiques majeurs des eaux de la nappe barrémienne

Les sulfates de la nappe barrémienne proviendraient de l'oxydation des sulfures (galène, blende, marcasite et pyrite) entraînant la libération des ions SO₄²⁻ avec production d'acide sulfurique qui attaquerait les carbonates (calcaires et dolomies) selon les réactions suivantes :



Sous l'action de l'acide sulfurique dissous et de l'oxygène (milieu aéré), les sulfates ferreux se transforment en sulfates ferriques :



En milieu calcaire:



La concentration des bicarbonates est due à la dissolution des calcaires par l'acide sulfurique, produit lors de l'oxydation des sulfures.

Les teneurs assez élevées de chlorures dans les eaux sont probablement liées à la dissolution des minéraux qui sont riches en Cl (par exemple : argile, gypse et halite) qui sont généralement trouvés dans les roches évaporitiques et carbonatés de la région.

Le calcium et le magnésium proviennent en général de la dissolution des formations calcaires et/ou dolomies.

I.6.2. Composition chimique des eaux de la nappe mio-plio-quadernaire

Les teneurs en éléments majeurs de la nappe mio-plio-quadernaire sont portées dans le tableau ci-dessous.

Tableau n°2 : Résultats d'analyse des éléments majeurs de l'eau de la nappe mio-plio-quadernaire (A.N.R.H Constantine)

N°	Date	Na ⁺ +K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	CO ³⁻ (mg/l)	HCO ³⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Résidu sec g/l
1	06/1982	70.0	164.0	103.0	0	384	105.0	52	1.40
2	07/1990	16.2	51.1	32.7	0	53.9	16.9	30	0.80
3	10/2001	24.0	37.0	70.0	0	311	25.0	92	5.40
4	03/2002	22.0	46.0	52.0	0	293	40.0	66	5.00
5	04/2002	38.0	107.0	59.0	0	262	146.0	99	7.56
6	09/2004	38.0	68.0	41.0	0	305	50.0	105	5.98

D'après le tableau n°2, on remarque que les eaux de la nappe mio-plio-quaternaire présentent des teneurs très élevées en chlorures, magnésium et bicarbonates et moyennement élevées en calcium et sulfates.

Ces eaux se caractérisent par deux faciès chimiques correspondant aux faciès bicarbonato - magnésien et chloro - calcique.

- Origine des éléments chimiques majeurs des eaux de la nappe mio-plio-quaternaire

Les bicarbonates de magnésium de la nappe mio-plio-quaternaire proviennent probablement de la dissolution des terrains salifères triasiques. Par contre, la présence des sulfates résulterait des réactifs chimiques utilisés dans le traitement du minerai et de l'utilisation probable d'engrais sulfatés dans la plaine d'Ain Azel.

Les teneurs assez élevées de chlorures dans les eaux sont probablement liées à la dissolution des minéraux qui sont riches Cl (par exemple : argile, gypse et halite) qui sont généralement trouvés dans les roches évaporitiques et carbonates de la région.

I.6.3. Conclusion

L'étude hydro-chimique a permis d'identifier deux faciès presque identiques marqués par la présence des anions (HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-}) et cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans les deux nappes (la nappe barrémienne et la nappe mio-plio-quaternaire). Les anions et les cations présents dans ces faciès permettent la fixation des ETM dans les eaux des deux nappes.

I.7. Méthode d'exploitation (chambres et piliers)

La méthode d'exploitation utilisée pour le gisement de Chaabet El Hamra est la méthode des chambres et piliers ; cette méthode consiste à creuser des chambres de 5m de large espacées entre elles de 3m. Une fois ces chambres réalisées on procède au dépilage partiel en abandonnant des piliers de 9 m² de section.

L'avantage de cette méthode consiste dans la récupération rapide du minerai et une meilleure sécurité, mais l'inconvénient est le volume important des pertes du minerai dues à l'abandon des piliers (Fig. n°5).

L'abattage du minerai se fait par explosif, en avançant sur plusieurs fronts et en formant des vides (chambres).

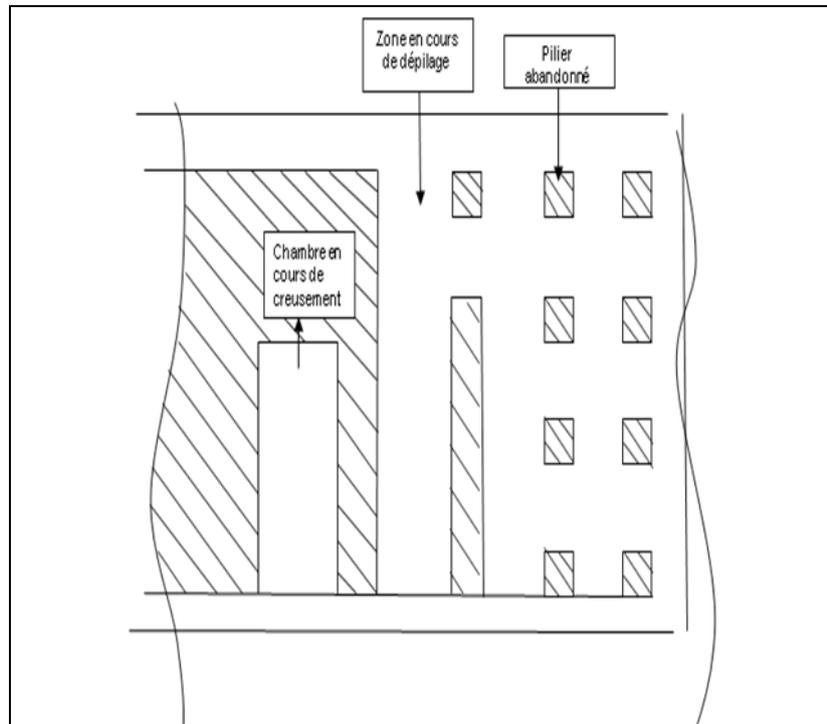


Figure n°5 : Méthode des chambres et piliers abandonnés.

Tableau n°3 : L'extraction de 1999 à 2006.

Phases	Années	TV Extrait	Teneur Zinc
Exploitation de la partie supérieure	1999	58 144	5,16 %
	2000	66 007	5,30 %
	2001	59 341	5,37 %
	2002	62 057	5,09 %
	2003	41 551	4,87 %
	2004	28 582	5,56 %
	2005	34 830	5,81 %
	2006	1 757	4,96 %
	Total	352 269	5,26 %

I.8. Traitement du minerai

L'usine d'enrichissement du complexe de Kherzet Youcef fut conçue pour le traitement du minerai de plomb/zinc de la mine de Kherzet Youcef, mais après le coup d'eau du 02-06-1990, causant l'inondation de la mine, l'usine risquait d'être fermée, l'ouverture de la mine de Chaabet el Hamra située à une dizaine de kilomètres, a permis la réouverture de l'usine.

De nos jours la laverie ne produit que le zinc, les essais de traitement à l'échelle industrielle ont montré que la flottabilité du minerai du gisement de Chaabet El-Hamra est assez simple tandis que son broyage est relativement lourd, car il est contenu dans une gangue dolomitique dure.

L'usine est composée de trois sections principales :

- **Section de concassage et de criblage**

L'installation de préparation du minerai est conçue pour fonctionner avec une cadence de l'ordre de 400 tonnes/jour.

- **Section de broyage et classification**

L'installation de broyage et de classification fonctionne avec une cadence de l'ordre de 11 à 17 tonnes/heure.

- **Section de flottation et de filtration :**

Les paramètres technologiques retenus pour ce projet sont :

- Taux de Récupération :85 % ;
- Teneur en zinc dans le concentré :53 %.

L'alimentation de l'usine d'enrichissement en tout-venant s'effectuera par camions à benne transportant le minerai de Chaabet El-Hamra à Kherzet-Youcef sur une distance de 12 Km.

I.9. Description de la laverie de Kherzet-Youcef

L'usine présentait initialement presque toute les méthodes d'enrichissement. De nos jours, la laverie ne produit que le Zn ; ce qui a entraîné les suspensions suivantes :

- De la section de séparation gravimétrique ;
- Du deuxième étage de broyage ;
- De pré-criblage de tout venant au niveau du concasseur à mâchoires ;
- Des hydro-cyclones ;
- De la séparation magnétique ;
- De la section flottation pour le Pb.

Ces modifications tiennent compte de la faible teneur de Pb dans le tout venant de Chaabet El-Hamra, et répondent au souci d'économie de l'énergie et des dépenses.

Le schéma technologique inclut le broyage humide, après le concassage en deux étapes, suivies de la flottation en trois étapes. La capacité de travail de la laverie maximale est de 100 000 tonnes de tout venant par an.

a. Section de concassage et criblage

L'installation de préparation du minerai est conçue pour fonctionner à une cadence de l'ordre de 400 t/j. La réduction du tout venant de 0-300 mm jusqu'à 0-20 mm s'effectue en deux étapes.

- Première étape

Le produit abattu est transporté dans des camions et déversé dans la trémie de récupération d'un volume de 30 m³. Le minerai est introduit dans un concasseur à mâchoires, et sort avec une dimension de 0-40 mm.

- Deuxième étape

Les produits issus du concasseur à mâchoires sont acheminés à l'aide d'un convoyeur à bande N°1, vers le crible vibrant de type (SIMONS) à maille (20*160 mm) ; la classe granulométrique supérieure à 20 mm est introduite dans le concasseur à cône, qui fonctionne en cycle fermé avec le crible vibrant.

La fraction qui passe par le crible (0-20 mm) est déversée dans deux trémies métalliques d'une capacité de 25 tonnes chacune. Le minerai, est acheminé par suite vers la section broyage à l'aide de la bande N° 2.

b. Section broyage

Le broyage et la classification visent à révéler les particules minérales, et optimiser les conditions de traitement. Le broyage se fait par voie humide, et se réalise en une seule étape avec deux broyeurs à boulets de capacité de 11 et 17 tonnes/h.

Les deux broyeurs travaillent en cercle fermé avec un classificateur mono-spiral qui ne laisse passer que les fines vers les cellules de flottation.

A noter qu'avant la bande N°3, qui transfère le produit concassé vers les broyeurs, existe deux trémies en béton de 100 tonnes de capacité chacune.

c. Section flottation

Le cycle de flottation de Zn, est précédé par une agitation avec du sulfate de cuivre à l'effet de permettre la libération des grains minéraux de Zn. Le cycle comprend :

- Flottation principale ou dégrossissage de Zinc ;
- Flottation de contrôle ou épuisage du Zinc ;
- Trois stades de flottation de relavage du concentré de Zinc.

Le drainage des concentrés vers les épaisseurs se fait par l'intermédiaire de pompes. Après épaisseur, les concentrés sont aspirés par des pompes à membranes et dans des filtres à tambour s'effectue la filtration.

Le concentré de Zn est expédié par camion vers le port de Bejaia puis par voie maritime à l'unité d'électrolyse de zinc de Ghazaouet qui reste le principal client.

d. Réactifs chimiques

Pour la flottation de Zinc, l'usine de traitement de minerai de Chaabet El Hamra utilise les réactifs suivant (les taux de consommation donnés sont ceux des normes pratiquées dans le monde):

- La chaux, comme régulateur, à raison de 1 à 2,5 kg/t ;
- Le sulfate de cuivre, comme activant, à raison de 250 à 500g/t ;
- L'isobuthylxanthate, comme collecteur à un taux de 50 à 150 g/t ;
- L'huile de pin, comme moussant, de 25 à 75 g/t.

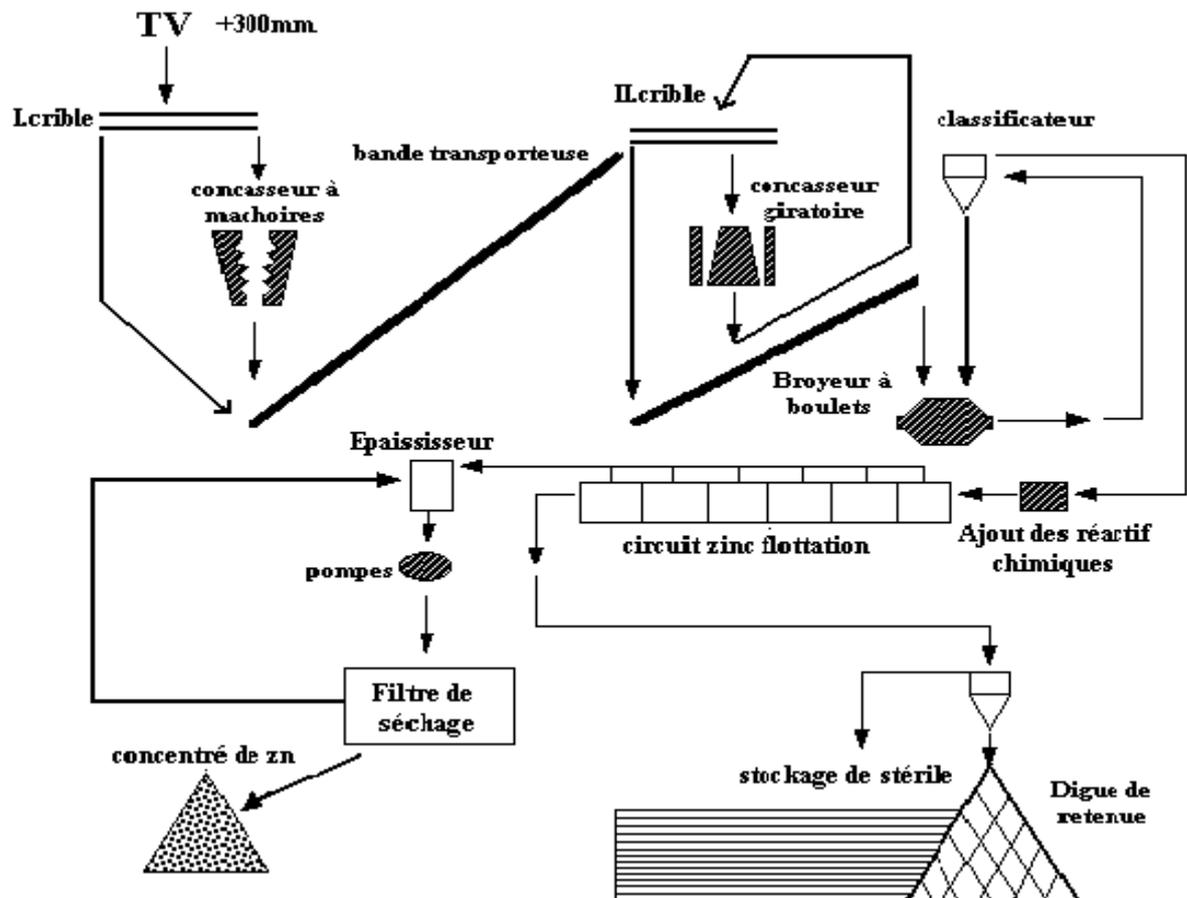


Figure n°6 : schéma technologique montrant les procédures de traitement du Zinc.

CHAPITRE II

*Généralités sur la
pollution*

II.1. La pollution (BRGM, 2008)

La pollution c'est l'introduction, directe ou indirecte, par l'activité humaine, de substances, préparations, de chaleur ou de bruit dans l'environnement, susceptibles de contribuer ou de causer :

- un danger pour la santé de l'homme ;
- des détériorations aux ressources biologiques, aux écosystèmes ou aux biens matériels ;
- une entrave à un usage légitime de l'environnement.

II.2. Le polluant (BRGM, 2008)

Le polluant est un produit, substance ou composé chimique responsable d'une pollution. On distingue :

- les polluants primaires, rejetés directement dans le milieu naturel ;
- Et les polluants secondaires qui proviennent de réactions sur les premiers ou entre eux.

II.2.1. Principaux polluants

Les polluants sont des substances chimiques organiques (hydrocarbures, solvants, phytosanitaires...), minéraux organiques ou inorganiques (métaux lourds, nitrates, ...), à l'exclusion de tout contaminant biologique. Le tableau n°4 récapitule les principales familles de produits considérées comme polluantes.

Tableau n°4 : Polluants inorganiques et minéraux organiques.

Produits	Polluants types
Métaux lourds	V Cr Mn Co Ni Cu Zn Ag Cd Sn Hg Tl Pb Bi
Non-métaux et métalloïdes associés	As Se Sb Te
Anioniques et autres	Nitrates, Sulfates, Nitrites Fluorures - Chlorures - Cyanures
Composés minéraux organiques	Plomb organiques, composés Organo stanniques, organo mercuriels , pigments « organiques » Industriels

Les métaux et métalloïdes lourds sont présents de façon naturelle dans les sols. Ils proviennent en grande partie de l'altération de la roche mère du sous-sol. Toutefois, les concentrations les plus importantes rencontrées dans les sols sont liées à l'activité humaine.

La plupart des polluants organiques sont générés par l'activité humaine. Parmi eux, certaines molécules ne sont pas synthétisées naturellement (substances dites « xénobiotiques »). Néanmoins, certains polluants peuvent avoir une origine naturelle. C'est le cas par exemple des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), présents dans les sols des forêts de sapins ou de hêtres autour des lacs, les suintements sous-marins, les zones constituant des champs pétrolifères. Certains sols, développés sur des formations riches en kérogènes (exemples des Marnes feuilletées du Toarcien), peuvent présenter des teneurs non négligeables en hydrocarbures (> 100 mg/kg hydrocarbures totaux Matières Sèches - MS).

II.2.2. Comportement des polluants (les métaux et métalloïdes lourds)

a) Définition : L'expression « *métal lourd* » désigne pour les chimistes des métaux de numéro atomique élevé, de densité supérieure à 5 et qui forment des sulfures insolubles. Le cadmium, le manganèse, le cobalt, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel et le zinc sont les métaux lourds les plus souvent rencontrés dans les sols.

Dans le domaine de l'environnement, on associe fréquemment aux métaux lourds l'arsenic, qui est un métalloïde lourd. L'arrêté du 2 février 1998, qui définit les éléments devant faire l'objet d'un contrôle pour les installations classées, prend en compte Cd, Hg, Ni, As, Co, Pb, Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Se, Te, Zn, Tl.

Certains de ces éléments peuvent être présents sous différents états de valence, avec de fortes variations associées de leurs propriétés géochimiques, et donc de leur toxicité potentielle. La caractérisation de leur comportement dans l'environnement nécessite dans ce cas des études de spéciation (ex: arsenic, chrome).

Le comportement des métaux dans l'environnement et dans les organismes, suite à une exposition, dépend par ailleurs de l'état dans lequel il se trouve dans la fraction solide du milieu : adsorbé sur les particules minérales ou organiques du sol, sous forme minéralogique propre (oxy hydroxydes, carbonates, sulfates, etc.), en substitution dans des réseaux cristallins d'autres espèces minérales. On parlera de spéciation minéralogique.

Élément																			
H														B	C	N	O	F	He
Li	Be													Al	Si	P	S	Cl	Ar
Na	Mg																		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Ce	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
			Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Métaux lourds
Non-métaux et métalloïdes associés

Figure n°7 : Métaux lourds dans la classification périodique des éléments chimiques.

b) Origine : Rappelons tout d'abord que les métaux et métalloïdes lourds sont présents de façon naturelle dans les sols. Ils proviennent en grande partie de l'altération de la roche mère du sous-sol. Toutefois, les teneurs les plus importantes de métaux lourds dans les sols, en dehors des zones d'affleurement et d'altération de terrains minéralisés naturels (« chapeaux de fer » des gisements polymétalliques filoniens, massifs, etc.), sont liées à l'activité humaine : stockage de déchets industriels et urbains (mines et fonderies de métaux non ferreux, décharges publiques), pratiques agricoles (pratique de la fertilisation à l'aide de compost urbain, de déjections animales ou de boues de station d'épuration), pollutions dues à des retombées atmosphériques (essence au plomb, poussières des industries métallurgiques, incinération des ordures ménagères...).

c) Principales propriétés physico-chimiques : La solubilité des métaux lourds dépend de l'élément concerné, du chimisme de la phase aqueuse (pH, potentiel redox, concentration) et des phases solides environnantes, qui interagissent avec la composition de cette phase. Le climat chimique contrôle la spéciation de l'élément, c'est-à-dire sa répartition entre différents états de valence.

La spéciation est un paramètre essentiel de la solubilité pour As et Cr :

- le chrome VI ou hexavalent est une forme beaucoup plus hydrosoluble que le chrome III et, par-là même, plus biodisponible et potentiellement toxique ;
- l'arsenic III, de même, est beaucoup plus hydrosoluble que l'arsenic V.

L'hydrosolubilité de nombre de métaux est fortement accrue par l'acidité. Les valeurs de pH inférieures à 6, rares dans les sols naturels, peuvent toutefois se rencontrer en présence d'autres contaminants.

Contrairement aux contaminants organiques, les métaux lourds sont indéfiniment stables en tant que tels. Leur stabilité en solution est liée à la durée nécessaire pour ce qu'ils rencontrent un piège chimique (phase précipitée) qui les fixe.

Contrairement aux polluants organiques, le K_d n'est pas un bon paramètre pour décrire l'interaction des polluants métalliques avec la phase solide du sous-sol. En effet, le K_d suppose un rapport toujours constant entre la concentration en solution et la concentration sur la phase solide, alors que ce rapport peut changer en fonction de la chimie des eaux (conditions de pH, d'Eh, ions en compétition pour les sites d'adsorption...).

Les métaux lourds sont à considérer comme non volatils, sauf le mercure métal dont le point d'ébullition est de 357°C à une pression de 101 kPa.

II.3. Le Sol et le sous-sol

II.3.1. Le Sol

a) Définition : Le sol est la couche la plus superficielle de la géosphère, il repose sur le sous-sol rocheux. Un sol est un milieu hétérogène, polyphasé, *dispersé* et poreux. C'est le substrat habituel de la croissance des plantes.

b) Principaux constituants : Les principales phases des sols sont les minéraux aluminosilicates issus de l'altération des roches, et la matière organique résultant de la dégradation des végétaux. Cette dernière est surtout présente dans les horizons supérieurs du sol, les horizons inférieurs passant graduellement à la roche altérée. Ces phases s'associent pour former un support mécaniquement stable aux végétaux.

On classe les particules des sols selon leur granulométrie (Tab. n°5 ci-dessous).

Tableau n°5 : Classification granulométrique des particules des sols.

Nom français	Nom anglais	Classification Internationale	Classification US De t. Agriculture
Argiles	Clay	< 0.002 mm	< 0.002 mm
Silts/Limons	Silt	0.002 - 0.02 mm	0.002 - 0.05 mm
Sables très fins	Very Fine Sand		0.05 - 0.10 mm
Sables fins	Fine Sand	0.02 - 0.20 mm	0.10 - 0.25 mm
Sables moyens	Medium Sand		0.25 - 0.50 mm
Sables grossiers	Coarse Sand	0.20 - 2.00 mm	0.50 - 1.00 mm
Sables très grossiers	Very Coarse		1.00 - 2.00 mm
Graviers	Gravel	> 2.00 mm	> 2.00 mm

Le sol contient une quantité variable d'eau, issue des précipitations, de l'infiltration et du ruissellement. Cette eau contient des sels minéraux dissous, qui sont indispensables à toute forme de vie végétale. Les plantes tirent presque tous leurs besoins en minéraux à partir de ces solutions.

L'objectif de l'irrigation et du drainage des sols est le maintien de l'équilibre eau-air. Un déficit d'oxygène entraîne des réactions anaérobies aux sous-produits potentiellement toxiques. Un déficit d'eau, outre ses conséquences sur le dessèchement des plantes, entraîne un déficit d'apports minéraux.

c) Propriétés : Les propriétés du sol influant sur le transfert des contaminants vers les nappes sont la porosité, la texture, la composition chimico-minéralogique, l'acidité, l'état redox et la teneur en matière organique.

Contrairement à celle d'un aquifère, la porosité du sol n'est pas saturée par l'eau, elle contient de l'air dont l'oxygène est utilisé par les racines et l'activité microbienne. L'objectif de l'irrigation et du drainage des sols est le maintien de l'équilibre eau-air. Un déficit d'oxygène entraîne des réactions anaérobies dégradant certaines substances en sous-produits potentiellement toxiques. Un déficit d'eau, outre ses conséquences sur le dessèchement des plantes, entraîne un déficit d'apports minéraux.

La texture du sol peut être décrite qualitativement, en fonction de son aspect (graveleux ou fin), ou quantitativement, à partir des proportions de particules minérales plus ou moins grossières, sans tenir compte de la matière organique. Les propriétés agricoles du sol dépendent largement de cette texture :

- un sol grossier et sableux sera peu compact, bien aéré et facile à cultiver, il sera bien drainé mais retiendra peu l'eau, qui y circulera rapidement,

- tandis qu'un sol fin ou argileux retiendra beaucoup d'eau, deviendra plastique et collant humide, puis compact et dur en séchant. On parle de sol « lourd » même si sa densité est en fait souvent moindre.

La composition chimico-minéralogique, et notamment la richesse relative en minéraux argileux, influe fortement sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants apportés par infiltration. Elle contribue aussi à déterminer son climat chimique et la disponibilité de colloïdes.

L'acidité du sol et son état redox sont les deux paramètres physico-chimiques qui influent le plus sur la spéciation des polluants. Ils influent donc indirectement sur la mobilité de ceux-ci.

La teneur en matière organique joue un rôle à la fois sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants, sur le climat chimique, la disponibilité de colloïdes et sur les réactions biochimiques amenant à leur dégradation.

II.3.2 Le sous-sol

a) Définition : Le sous-sol comprend les autres couches de la géosphère, mais on ne s'intéressera ici qu'au sous-sol rocheux contenant une nappe d'eau et au sous-sol rocheux compris entre les aquifères et le sol.

b) Principaux constituants du sous-sol :

Les types de roches : Les principaux types de roches se rencontrant dans les régions de bassins sédimentaires sont les sables, calcaires, argiles, marnes et craies. On rencontre parfois, mais rarement à faible profondeur, des roches évaporitiques (sel gemme, gypse).

Les régions volcaniques présentent des types de roches particuliers, dérivés des laves ou des projections aériennes des volcans (cendres, fragments). On citera les basaltes, andésites, rhyolites, trachytes, les tufs, brèches,...etc.

Dans les régions de massifs cristallins, on rencontre des granites et autres roches cristallines de profondeur (diorites, granodiorites, etc.), et des roches métamorphiques. Ces dernières sont des roches cristallines produites par la transformation de roches sédimentaires ou

volcaniques sous forte pression et/ou température. Citons les schistes, quartzites, amphibolites, gneiss, etc.

Les chaînes de montagnes sont constituées d'assemblages complexes et tectonisées de roches sédimentaires et cristallines. Les Alpes et les Pyrénées sont formées de noyaux cristallins entourés de roches sédimentaires plus ou moins transformées. Le Jura n'est formé que de roches sédimentaires plissées.

c) Propriétés : Les propriétés du sous-sol influant sur le transfert des contaminants vers les nappes sont la porosité, l'hétérogénéité, la fracturation et les discontinuités créant des voies de circulation préférentielle. Tous les types de roches ne sont pas susceptibles de recevoir des eaux souterraines et de constituer des aquifères où l'eau soit mobilisable. Cette propriété dépend de la porosité et de la perméabilité de la roche.

Les sables, calcaires et grès constituent la majorité des aquifères. Les roches peu poreuses ou perméables, telles que les argiles, les marnes et la plupart des roches cristallines, constituent rarement des aquifères.

Lorsque la plupart des roches constituant le sous-sol sont peu poreuses ou perméables, les eaux souterraines ne constituent pas des nappes homogènes, mais suivent le réseau de fracturation. On parle alors de milieu fracturé ou fissuré. C'est très souvent le cas dans les régions formées de roches cristallines. De ces propriétés intrinsèques dérivent les propriétés hydrauliques d'une roche : perméabilité, conductivité, gradient hydraulique.

II.4. Principaux types de milieux souterrains

Qu'il s'agisse d'une pollution diffuse de type agricole (nitrates par exemple) ou d'une pollution accidentelle (déversement d'hydrocarbures...), le schéma général de contamination des eaux est le même : le point de départ est la surface du sol puis le transit vertical dans la zone dite non saturée (ZNS) surplombant la nappe, l'arrivée à la nappe puis le cheminement subhorizontal du polluant dans celle-ci avec étalement progressif du panache de pollution (beaucoup plus prononcé suivant la direction de l'écoulement).

Ce schéma très général de contamination des eaux est illustré par la figure ci-après.

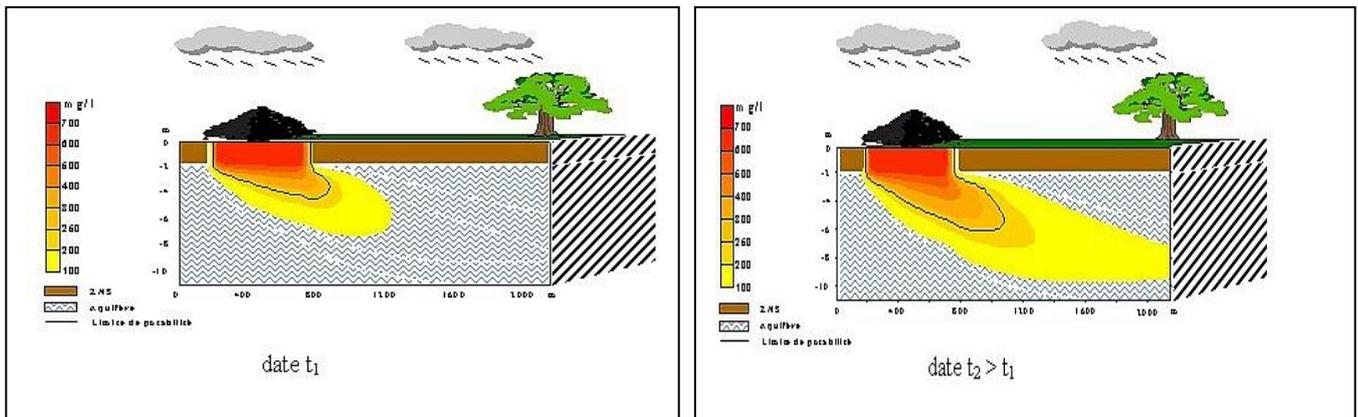


Figure n°8 : Exemple de l'évolution d'un panache de pollution à l'aval d'une décharge (Modélisation numérique en coupe verticale réalisée avec logiciel MARTHE du BRGM).

Sous la zone non saturée, on peut rencontrer trois grands types de milieux souterrains pouvant contenir des nappes, plus ou moins vulnérables à une pollution suivant leur profondeur et le degré de fissuration de la zone non saturée. Le cas des nappes captives, protégées par des couvertures très peu perméables (les épontes) qui les rendent moins vulnérables à la pollution, ne sera pas abordé dans ce guide. Dans tout ce qui suit, il ne sera donc question que de nappes libres. La nature même des milieux traversés déterminera le comportement à grande échelle du transport, en particulier les trajectoires suivies et les ordres de grandeur des vitesses de propagation suivant ces trajectoires. Les grands traits de ces différents milieux dicteront le comportement « en grand » des polluants.

En sus, des paramètres physiques du sol et du sous-sol interviennent dans le processus de transport. Ainsi, selon qu'il s'agisse de la zone non saturée, d'un milieu poreux saturé en eau, d'un milieu fissuré de socle ou d'un milieu karstique, les caractéristiques de la migration et les méthodes mises en œuvre pour décrire et prévoir le devenir de la migration seront différentes.

II.4.1. La zone non saturée

a) Définition : La zone non saturée comprend l'ensemble des niveaux du sous-sol et du sol situés au-dessus de la nappe. Ces niveaux sont dits « non saturés » car leur porosité ne contient pas seulement de l'eau, mais également des gaz du sol.

b) Propriétés : Première étape du parcours, elle est caractérisée par la grande **complexité des processus physico-chimiques** agissant sur le polluant en particulier dans la zone racinaire (les 30 à 40 premiers centimètres du sol) où se déroule une part importante des processus chimiques et biochimiques.

Dans cette zone, les mouvements de l'eau véhiculant le polluant (pour une pollution miscible) sont eux-mêmes complexes, dépendant de la teneur en eau. Celle-ci varie continûment au cours du temps sous l'influence des cycles pluviométriques et d'infiltration. Ils sont aussi affectés par le degré d'hétérogénéité et le degré de fissuration de la ZNS, ce qui déterminera la plus ou moins grande rapidité de la propagation du polluant jusqu'à la nappe.

II.4.2. La zone saturée

a) Définition : Sous la zone non saturée, on peut rencontrer trois grands types de milieux souterrains pouvant contenir des nappes, plus ou moins vulnérables à une pollution suivant leur profondeur et le degré de fissuration de la zone non saturée :

- les milieux poreux ;
- les milieux fissurés ;
- les milieux karstiques.

b) Les milieux poreux : A l'échelle macroscopique, le milieu poreux peut être considéré comme un milieu continu : on n'y distingue pas de cheminements individuels nettement différenciés. Les aquifères des grands bassins sédimentaires et les nappes alluviales se rattachent à cette catégorie. Par rapport aux deux autres milieux, fissurés et karstiques, c'est celui qui se prête le mieux à une modélisation. Néanmoins, les milieux poreux aquifères se caractérisent par la variabilité de leurs paramètres descriptifs (perméabilité, porosité...) et cette variabilité est plutôt la règle que l'exception. Comme pour la zone non saturée, le problème de la caractérisation à grande échelle des écoulements se pose à l'aide de paramètres moyens représentatifs.

c) Les milieux fissurés : Ces milieux sont constitués par un réseau de fractures non totalement interconnectées et dont l'organisation spatiale (densité, orientation, géométrie) caractérise le réservoir aquifère.

Leur étude est rendue difficile en raison du peu d'informations disponibles pour en restituer une image. La fracturation d'un massif rocheux est, en effet, appréhendée à partir de données ponctuelles de surface, de sondages ou de galeries.

Une pollution qui se développe dans un tel milieu sera difficile à suivre en termes de cheminement et de concentrations et ce, d'autant plus que le réseau de fractures se double d'une porosité de matrice, susceptible d'être elle-même envahie par le polluant.

d) Les milieux karstiques : Les aquifères karstiques sont des milieux très particuliers où l'eau circule dans des cavités laissées par la dissolution de la roche, variant depuis un ensemble de fractures à peine élargies (et donc hydrauliquement apparentés aux milieux fissurés) jusqu'à ceux caractérisés par un véritable réseau de drainage pouvant aller jusqu'à la rivière souterraine. Pour obtenir une information sur la structure du réseau karstique on utilise des traceurs artificiels, mais la prévision du devenir d'un polluant dans un tel milieu s'avère souvent difficile en raison de l'ignorance de la structure du réseau souterrain et des voies de cheminement. Le cas des réseaux karstiques nécessite une approche spécifique et ne sera pas envisagé dans le présent guide.

e) Notion de milieu poreux équivalent et limitations : La distinction entre milieu poreux et milieu fissuré est relative selon l'échelle à laquelle on se place.

Ainsi, à partir d'une certaine échelle, un milieu fissuré pourra se comporter hydrauliquement comme un milieu poreux, à condition que le nombre de fissures interconnectées soit suffisamment important : il est alors possible de modéliser un tel milieu comme s'il s'agissait d'un milieu poreux. On parle de milieu poreux équivalent.

Mais cette notion d'équivalence est relative aux flux d'eau échangés et pour des problèmes de pollution faisant intervenir la vitesse réelle de déplacement et les trajectoires bien individualisées, il sera nécessaire, en particulier dans une modélisation, de prendre en compte le caractère discontinu du milieu.

En effet, contrairement au milieu poreux où les directions d'écoulement sont déterminées par les conditions imposées aux frontières et par le champ de perméabilité, dans un milieu fissuré, les écoulements locaux sont d'abord contrôlés par le réseau de fractures, leur géométrie, leur degré d'interconnexion, et les trajectoires dans un tel milieu peuvent différer

notablement de celles prédites par un modèle traitant ce milieu comme un milieu poreux équivalent. (BRGM, 2008)

II.5. Définition de la pollution des eaux souterraines

" Une eau potable doit contenir sans excès un certain nombre d'éléments minéraux dont la présence lui confère une saveur agréable, à l'exclusion de ceux qui seraient l'indice d'une contamination, ainsi que toute substance toxique.

Elle doit être pauvre en matières organiques et en nitrates. Elle ne doit pas être agressive ni contenir des sulfates en quantités telles qu'elle serait capable d'attaquer les maçonneries, le ciment et les métaux dont sont constitués les ouvrages des réseaux de distribution.

En ce qui concerne les éléments chimiques pouvant être l'indice d'une contamination, l'attention se portera sur les taux de matières organiques, de nitrates, de nitrites, d'ammoniaque et de chlorures." (J.O, 1954).

L'eau potable possède donc des caractéristiques chimiques et à celles-ci correspondent des normes établissant les quantités de substances toxiques à ne pas dépasser.

L'eau potable a une constitution bien établie et on peut donc considérer comme pollution, tout apport étranger qui, provoquant l'augmentation de la teneur de tel ou tel corps contenu dans l'eau, modifie cette constitution et la transfère hors des normes prévues.

La plupart des pays possèdent leurs propres normes mais il existe tout de même des normes Européennes et Internationales.

La composition de l'eau potable étant bien définie, voyons maintenant les causes qui peuvent faire varier celle-ci à l'intérieur des nappes souterraines.

II.6. Causes de pollution des nappes d'eau souterraines

Les causes de pollution des nappes d'eau souterraines sont nombreuses et variées, ce qui constitue un handicap supplémentaire au problème.

Il est d'ailleurs assez difficile de faire une classification nette et tranchée, étant donné que beaucoup de facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres, bien au contraire même. Nous avons dégagé ici deux sortes de classification :

- la première ayant trait aux facteurs occasionnant la pollution,

- la deuxième aux produits provoquant la pollution.

II.6.1 Facteurs occasionnant la pollution des eaux souterraines

- **Pollution d'une nappe d'eau souterraine par une rivière**

En période normale, une rivière peut très bien alimenter une nappe d'eau souterraine par des infiltrations si celle-ci est sous-jacente et s'il n'existe pas de couche imperméable intercalaire. D'autre part, au cours de crues, cette même rivière peut arriver à polluer des nappes supérieures au niveau de son cours normal. (BRGM, 1963)

- **Pollution par les étangs et les lacs**

Le phénomène précédent peut se produire également dans ce cas. Il ne faut pas non plus oublier les barrages alimentés par une rivière polluée, le lac ainsi constitué peut permettre d'aboutir à la mauvaise qualité des eaux souterraines sous-jacentes.

- **Pollution d'une nappe d'eau souterraine par une autre**

Lorsque deux nappes d'eau souterraines sont séparées par un imperméable discontinu ou même lorsqu'il y a absence totale d'imperméable, la nappe polluée contamine la nappe saine plus ou moins rapidement.

- **Pollution d'une nappe souterraine par contact avec la mer**

Une nappe d'eau souterraine peut avoir un affleurement sous la mer. L'intrusion d'eau de mer constitue un danger particulièrement grave pour la nappe car ce phénomène est très difficilement réversible.

- **Pollution par infiltrations à partir de la surface du sol**

Nous englobons ici toutes les eaux résiduaires rejetées par les différentes industries et établissements publics ainsi que les déchets et dépôts de toutes sortes, y compris les engrais et pesticides utilisés en agriculture qui, par lessivage et percolation plus ou moins lente, arrivent à pénétrer dans les nappes d'eau souterraines.

- **Pollution d'une nappe d'eau souterraine à partir des gouffres et avens**

Ce genre de pollution est caractéristique des pays calcaires. En effet, les gouffres constituent des orifices naturels par où de nombreux déchets de toutes sortes peuvent être évacués.

- **Pollution par l'implantation de tout ouvrage souterrain**

Il faut citer ici, en premier lieu, la réalisation de forages, les pipe-lines ainsi que les conduites et canalisations souterraines, tous les travaux de terrassement sans oublier les puits perdus dans lesquels sont déversées des eaux usées et des quantités d'objets hétéroclites ; enfin les réservoirs quels qu'ils soient.

Enfin, nous devons signaler la part prépondérante de l'homme. Ce dernier, en effet, par toutes ses créations et ses négligences est toujours à l'origine d'une pollution. Aussi devons-nous le considérer comme un facteur important qui doit se surveiller.

II.6.2. Produits provoquant la pollution des eaux souterraines

Ces produits sont extrêmement nombreux et leur nombre est sans cesse croissant en raison des progrès et du développement des diverses industries.

- **Eaux salées**

Comme nous l'avons vu précédemment, les intrusions d'eau de mer dans les nappes d'eau souterraines sont dangereuses ainsi que les infiltrations à partir des forages pétroliers.

- **Hydrocarbures en général**

Ici, c'est l'homme qui reste le principal responsable de cette cause de pollution.

- **Engrais, insecticides, fongicides, herbicides**

Leur développement a pris une telle importance ce qu'il y a lieu, dès maintenant, de prendre des précautions, d'autant plus que leur effet exact est encore méconnu.

- **Les détergents**

Ici également, on observe une augmentation considérable de ces produits. Ce cas est d'ailleurs grave actuellement dans certains pays.

- **Les ordures ménagères**

Les dépôts d'ordures, fréquents en raison de leur commodité, constituent un mélange d'un grand nombre de produits variés d'origine végétale ou animale. Ces dépôts, exposés aux intempéries, sont le siège de véritables macérations qui occasionnent la formation de produits de décomposition pouvant pénétrer dans le sous-sol.

- **Dépôts divers et déchets industriels solides**

Fumiers, terrils et autres dépôts d'industries, à partir desquels se produisent des infiltrations nocives.

- **Les eaux usées de toutes les industries et les eaux usées en général**

Dont le rejet aboutit souvent, tôt ou tard, dans les nappes d'eau souterraines. L'homme a également une part prépondérante dans ce cas de pollution.

- **Résidus radioactifs**

Ceux-ci constituent un domaine nouveau qui est appelé à prendre, et qui prend, de plus en plus d'importance

- **Les fumées d'usine**

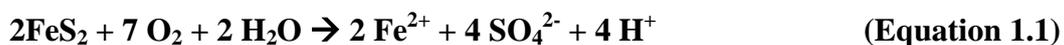
Celles-ci ont une importance moindre par rapport aux éléments précédents, mais le cas de pollution d'eau souterraine à partir de ces dernières peut se produire.

II.7. Le drainage minier acide (DMA)

II.7.1. Formation

Le drainage minier acide résulte de l'oxydation naturelle des minéraux sulfureux contenus dans les rejets miniers au contact de l'eau et de l'air. Ces minéraux sont appelés minéraux *acidogènes* (sulfures, sulfates, hydroxydes). Le principal minéral acidogène impliqué dans la formation du DMA est la pyrite (sulfure de fer, FeS₂). L'oxydation de la pyrite peut être directe et indirecte.

L'oxydation directe est présentée à l'équation 1.1.



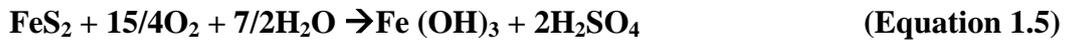
Cette réaction d'oxydation fait chuter le pH du milieu où sont déposés les rejets.

Lorsque le pH est assez faible (inférieur à 3), la pyrite peut s'oxyder indirectement par le fer ferrique Fe³⁺ produit lors des réactions intermédiaires présentées aux équations 1.2, 1.3 et 1.4.





La réaction globale présentée dans l'équation 1.5 résulte de l'oxydation directe et de l'oxydation indirecte de la pyrite. Cette réaction globale engendre la production d'acide sulfurique (H_2SO_4). Elle décrit le processus de formation du DMA (*OLIVIER A, 2006*).



La diminution du pH due à l'acide sulfurique entraîne aussi la solubilisation des métaux (cuivre, plomb, zinc etc.). La production de DMA peut être limitée par la quantité de minéraux sulfurés disponibles et par la présence de minéraux alcalins dans les rejets (carbonates, silicates, hydroxydes, phosphates), ayant un effet tampon sur la réaction d'oxydation. Ces minéraux sont dits *acidivores*. Au contact d'acide sulfurique, ces minéraux se dissolvent et réduisent l'acidité de lixiviation.

La production de DMA peut occasionner des conséquences dommageables sur l'environnement. Dans le pire des cas, la flore peut être dévastée, la faune aquatique détruite et les eaux de surface et souterraines polluées. La Figure n°9 présente une photographie qui illustre les conséquences du DMA au site abandonné Aldermac, en Abitibi (QC, Canada).



Figure n°9 : Conséquence du DMA sur le site Aldermac en Abitibi (QC, Canada).

La Figure n°10 présente un autre exemple de site contaminé au DMA. Le site Manitou est également abandonné et à ce jour, aucune mesure n'a été appliquée pour procéder à sa restauration.



Figure n°10 : Le site abandonné de Manitou dévasté par le DMA (Abitibi, QC, Canada).

II.7.2. Les problèmes de DMA sur l'écologie

➤ Dans les organismes aquatiques peuvent être plus affectés par des petites concentrations d'éléments lourds. Les organismes aquatiques peuvent supporter certaines valeurs déterminées de toxicité sans qu'ils meurent, mais ils développeraient une série de problèmes physiologiques et métaboliques. Il y a des organismes qui peuvent réguler les concentrations des métaux lourds dans leurs tissus.

➤ Dans l'eau il y a libération des cations Fe^{2+} ou Fe^{3+} et augmentation de l'acidité. Mais un autre phénomène plus grave pour la santé humaine qui consiste en les autres minéraux sulfurés qui sont présents dans les déchets des stériles, ils s'oxydent et livrent des métaux lourds solubles de très grande dangerosité dans les cours d'eau en surface et en souterrain (nappes).

➤ Dans le sol, la désertification est le principal problème de l'accumulation d'éléments métalliques toxiques dans les horizons prospectés par les racines des végétaux. La diversité

de la végétation s'appauvrit, les peuplements survivants se raréfient et disparaissent progressivement, laissant un sol nu et dégradé sans activité microbiologique.

Le drainage minier s'accompagne d'une mise en solution d'éléments plus ou moins néfastes pour la santé humaine, corrosifs pour les infrastructures et les canalisations. La solubilisation des métaux lourds accrue dans le cas d'un DMA représente le danger majeur pour la santé humaine du fait des possibles intoxications par voie indirecte (Tab. n°6).

Tableau n°6 : Principaux effets sur la santé humaine des métaux observés dans le drainage minier.

Elément	Effet sur la santé humaine
Arsenic - As	<ul style="list-style-type: none"> • <i>S</i> Aux faibles doses contenues dans l'eau : risques de cancers de la peau, affection des muqueuses (rhinites, gingivites, ...), atteintes sanguines (anémie, ...) et digestives (gastro-entérites, atteintes hépatiques, ...) • <i>S</i> Absorption quotidienne de 3 à 6 mg ou absorption d'une dose de 70 à 180 mg : poison mortel ;
Cadmium - Cd	• <i>S Exposition chronique : altérations de l'appareil digestif, des poumons et surtout des reins ;</i>
Chrome - Cr	<ul style="list-style-type: none"> • <i>S Cr (VI) : risque cancérogène important pour les embryons et fœtus ;</i> • <i>S Cr (III) : effets toxiques non démontrés ;</i> • <i>S Intoxications chroniques : altérations du tube gastro-intestinal ;</i>
Cobalt - Co	• <i>S Exposition chronique : ralentissement de l'activité de la glande thyroïde, et conséquences sur le système nerveux. Possibilités de cardiomyopathies ;</i>
Mercure - Hg	• <i>S Exposition chronique : altérations du système nerveux et des reins. Toxique pour les enfants et les fœtus ;</i>
Nickel - Ni	• <i>S Le Ni lui-même n'est pas toxique mais certains composés organiques le sont, comme le nickel tétracarboyle, et possèdent un fort potentiel allergène et mutagène ;</i>
Plomb- P b	• <i>S Exposition chronique : effets toxiques sur le système nerveux central et périphérique. Risque de développer le saturnisme chez les enfants. Troubles de la reproduction, insuffisances rénales et encéphalopathies chez l'adulte, à fortes doses ;</i>
Zinc - Zn	<ul style="list-style-type: none"> • <i>S Troubles digestifs et nausées ;</i> • <i>S L'ingestion de chlorure de zinc peut entraîner des lésions caustiques sérieuses du tube digestif ;</i>

Dans les régions constituées de terrains acides, l'acidité des eaux est conservée et les métaux sont transportés sous forme soluble à grande distance. Dans les régions constituées de terrains calcaires (basiques), en revanche, les eaux acides sont rapidement neutralisées par les roches carbonatées, et la plupart des métaux deviennent insolubles et précipitent. Lors des crues, les particules solides riches en métaux (fragments détritiques de minerai ou minéraux métalliques précipités) seront entraînées très loin en aval et peuvent parfois redevenir solubles si les caractéristiques des eaux changent.

Quant aux sulfates, présents en forte teneur, ils induisent une pression osmotique importante, qui va déshydrater les êtres vivants.

Enfin, les DMA ont également un impact visuel sur les paysages : les dépôts de couleur rouille, sur plusieurs kilomètres de cours d'eau, ou l'aspect dénudé des stocks de déchets miniers sont notables. (CHENINI N, 2010).

II.7.3. Entreposage des résidus miniers (normes canadiennes, 2009)

Lorsqu'on planifie l'entreposage des stériles et des résidus miniers, on peut prévoir les risques de lixiviation des métaux et de drainage acide et en tenir compte dans la conception des haldes de stériles et des parcs à résidus miniers.

S'il existe un risque de drainage acide, plusieurs méthodes peuvent être employées pour prévenir ou limiter ce phénomène. Le confinement subaquatique est la méthode la plus efficace pour prévenir le drainage acide. L'entreposage des stériles ou des résidus miniers sous l'eau a pour effet de réduire de manière importante l'exposition des matériaux à l'oxygène. Les réactions d'oxydation étant réduites, il en résulte donc une diminution quant au risque de drainage acide de même que du problème lié à la lixiviation des métaux.

S'il est impossible de prévenir le drainage acide, on peut employer plusieurs méthodes, seules ou combinées, pour le limiter :

- les couvertures sèches, qui limitent l'infiltration d'eau par l'alternance de couches de matériaux plus ou moins poreux ;
- les couvertures sèches faites de matériaux innovateurs, comme les boues d'épuration stabilisées à la chaux ou les boues d'usines de pâtes et papiers ;
- les géo-membranes imperméables qui empêchent l'infiltration du drainage acide dans les matériaux sous-jacents ;
- la congélation des stériles ou des résidus miniers en milieu pergélisol ;
- l'ajout direct de chaux ou d'une autre substance alcaline ;
- le relèvement de la nappe aquifère pour empêcher la production d'acide sous la nappe aquifère ;
- l'utilisation des résidus miniers comme matériaux de remblayage dans la mine ou leur entreposage dans les mines à ciel ouvert épuisées.

CHAPITRE III

*Méthode et discussion
des résultats*

III.1. Présentation des principaux ETM étudiés

Le plomb – Il est très souvent associé au zinc dans les minerais mais aussi à de nombreux autres éléments (Fe, Cu, Cd, As...) qui sont en grande partie récupérés lors des opérations métallurgiques.

Le principal minerai de plomb est la galène (PbS), très souvent associée à la blende (ZnS) et à la pyrite (FeS₂). Le seuil de toxicité du plomb inorganique en milieu aquatique apparaît à partir de 0,5 µg/L. De plus, les niveaux de bioaccumulation chez les organismes aquatiques engendrent, à terme, une plus forte toxicité pour l'homme (situé en bout de chaîne alimentaire). Absorbés par ce dernier, les ions Pb²⁺ entrent en compétition avec les ions Ca²⁺ pour la formation des os.

Le zinc – Il est très souvent associé au plomb et au cadmium dans les minerais naturels où il représente une teneur s'échelonnant de 4 à 20%. Le minerai principal est la blende (ZnS). L'apport en zinc dans le milieu aquatique est en partie dû à la métallurgie et à la combustion des énergies fossiles.

Dans les zones portuaires, le zinc est principalement introduit à partir de la dissolution d'anodes utilisées pour la protection des coques des navires. Les sels de zinc sont moins toxiques pour les organismes marins que ceux présents en eau douce étant donné l'action protectrice que jouent les ions calcium en mer. Enfin, le zinc est un oligo-élément vital pour l'homme, sa déficience entraîne le nanisme

Le cadmium – Il est également associé au minerai de zinc où il représente un faible pourcentage (0,01 à 0,05%). Il n'existe pas de minerai de Cd en quantité suffisamment grande pour être exploitable. Les activités métallurgiques, la combustion des produits pétroliers ainsi que la fabrication et l'épandage d'engrais phosphatés sont à l'origine de la contamination des différentes matrices, principalement l'eau, le sol et les sédiments. Pour des teneurs supérieures au µg/L, des inhibitions de croissances peuvent être observées chez le phytoplancton. Chez l'homme, même à de faibles concentrations, il peut provoquer des dysfonctionnements urinaires.

Le cuivre – Il est extrait d'une grande variété de minerais d'une teneur de 0,7% à 2%. Les minerais sulfurés [chalcopryrite (CuFeS₂), chalcosine (Cu₂S)] forment 80% de la production mondiale.

L'industrie électrique et les peintures antisalissure (cuivre sous forme d'oxyde) constituent les sources principales de pollution de l'environnement aquatique (rivière, port et océan). La toxicité de ce métal pour les organismes aquatiques dépend de la forme chimique (et notamment de son état d'oxydation) dans laquelle il se trouve. Néanmoins, la concentration létale apparaît pour certaines espèces à partir de 2µg/L (larve d'huître par exemple) alors que des retards de croissance sont observés chez le phytoplancton au-delà de 4µg/L.

III.2. Méthodologie du travail

III.2.1. Eléments étudiés

Pour évaluer la dispersion chimique des ETM (Zn, Pb, Cu et Cd) autour du complexe minier de Kherzet Youcef, six (06) échantillons d'eau (au niveau des forages) ont été prélevés.

L'échantillonnage a été fait en deux périodes successives, la première en Octobre 2011, alors que la deuxième a été faite en Avril 2012. Les deux prélèvements se sont déroulés dans des conditions météorologiques différentes.

III.3. Technique d'échantillonnage

III.3.1. Choix des points de prélèvement

Après recensement des points d'eaux existant autour de la zone d'étude, et pour voir l'impact de l'activité minière sur l'environnement et sur les eaux souterraines, la carte d'échantillonnage (Fig. n°11) ci-après montre les points de prélèvement des eaux souterraines (les points de prélèvements sont limités au niveau des forages compte tenu de l'arrêt du complexe et de l'extraction de la mine depuis 6 ans). On note l'absence des prélèvements des eaux résiduaires grâce à la pénurie d'eau dans l'oued d'Enza (oued temporaire).

Les échantillons ont été prélevés de la manière suivante :

- Un échantillon au niveau du complexe de Kherzet Youcef,
- Deux échantillons dans la ville d'Ain Azel ;
- Et trois autres échantillons au niveau de la mine de Chaabet El Hamra.

III.3.2. Prélèvement de l'eau

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, etc.).

Le matériel de prélèvement doit faire l'objet d'une attention particulière. L'emploi de flacons en verre borosilicaté de préférence bouchés. L'usage de flacons jetables en verre ou en matière plastique s'est largement répandu, en raison des facilités qu'ils présentent pour le transport et de la possibilité de leur usage unique étant donné leur prix compétitif. Leur nettoyage étant délicat, leur réemploi poserait des problèmes de contamination résiduelle.

Le mode de prélèvement variera suivant l'origine de l'eau :

- Dans le cas d'une rivière, d'une nappe ouverte, d'un réservoir, d'une citerne, la bouteille sera plongée à une certaine distance du fond (50 cm) et de la surface, assez loin des rives ou des bords ainsi que des obstacles naturels ou artificiels, en dehors des zones mortes ou des remous, et en évitant la remise en suspension des dépôts ;
- Dans le cas d'un lac ou d'une retenue d'eau, il y a lieu de choisir plusieurs points de prélèvements et, en chacun d'eux, de prélever plusieurs échantillons à différentes profondeurs pour tenir compte de l'hétérogénéité verticale et horizontale.
- Dans le cas d'une eau souterraine, deux cas très différents peuvent se présenter. S'il s'agit d'un captage ou d'un puits équipé d'une pompe, les prélèvements se situeront normalement au terme d'une épreuve de pompage ininterrompue d'une durée totale de l'ordre de 30 heures ou, tout au moins à la fin de la dernière journée d'une série de trois journées consécutives de pompage de 10 heures. S'il s'agit d'une source aménagée, effectuer le prélèvement au trop plein, sinon il convient de procéder à un aménagement provisoire.
- Dans le cas de prélèvement à un robinet, si le but est le contrôle de l'eau distribuée, il est indispensable d'attendre que l'eau en stagnation dans les canalisations soit éliminée. En pratique, il convient d'ouvrir le robinet à débit maximum pendant 5 à 10 secondes puis de le ramener à un débit moyen pendant 2 minutes.

Les éléments minéraux considérés comme toxiques ayant des concentrations maximales admissibles très faibles sont susceptibles d'erreurs de dosages significatives. En effet ces éléments peuvent exister à plusieurs degrés d'oxydation, sous forme soluble, insoluble, complexée, ou encore plus ou moins adsorbée sur les matières en suspension. (Rodier, 2005)

Dans le cas d'analyses de métaux lourds, deux cas peuvent se présenter :

- ✓ S'il s'agit du dosage total de l'élément soluble et insoluble, le prélèvement sera effectué en présence d'acide nitrique de très grande pureté ;
- ✓ S'il s'agit de doser le métal en solution, le prélèvement sera d'abord filtré avant l'addition d'acide nitrique.

Sur cette base nous avons effectué des prélèvements à partir des robinets au niveaux des forages à la mine de Chaabet el Hamra, la mine de Kherzet Youcef et à la ville d'Ain Azel. Et en utilisant des bouteilles en plastique afin d'éliminer toute interaction entre la matière et l'échantillon.

III.4. Préparation préliminaire à l'analyse

III.4.1. Acidification

Avant l'expédition de nos échantillons au laboratoire, on a procédé à leur acidification en ajoutant systématiquement deux millilitres d'acide nitrique (HNO_3). Cet acide permet de préserver les éléments en traces afin de mieux interpréter les résultats.

Cette méthode de l'acidification des échantillons est recommandée par la quasi-totalité des auteurs parmi lesquels on peut citer : Struempfer. A.W et al (1953) King. W.G et al (1954).

III.4.2. Conservation des échantillons

La conservation des échantillons dépend de la caractéristique ou de l'élément analysé, dans notre cas la conservation des échantillons a été faite dans des bouteilles en plastique.

III.5. Analyse des Eaux

III.5.1. Mesure de potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est l'une des mesures que l'on doit effectuer le plus fréquemment, il est relié à la teneur en ions H^+ et aussi à l'acidité et l'alcalinité de l'échantillon. Le pH-mètre est l'appareil le plus utilisé pour la mesure du pH.

Dans notre cas la mesure de pH est effectuée juste après le prélèvement d'eau par le pH-mètre.

III.5.2. Choix de la méthode d'analyse

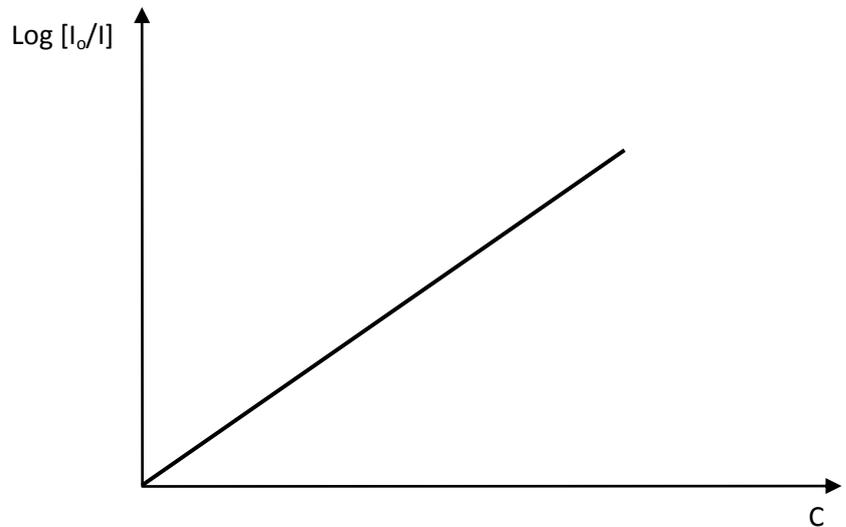
La spectrophotométrie d'absorption atomique est une méthode très utilisée en analyse chimique pour doser des métaux présents en solution. C'est une méthode de dosage rapide et précise qui permet la détection d'éléments à l'état de traces même en présence d'autres éléments en forte concentration. (Tahar-Cherif, 1994).

III.5.3. Généralités sur la méthode d'analyse

Comme toutes les méthodes d'analyse physico-chimique la spectrométrie d'absorption atomique est une méthode qui se base sur la comparaison des concentrations étalons-échantillons.

Elle consiste à déterminer la concentration d'une substance suivant l'absorption d'une radiation caractéristique de l'élément recherché et cela moyennant une courbe d'étalonnage.

$$F(C) = \text{Log} [I_0/I]$$



C: Concentration

I_0 : Intensité du flux incident.

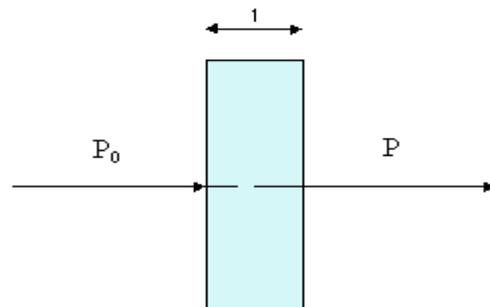
I : intensité du flux émergent.

Cette méthode ne convient pas à l'analyse qualitative, elle est apte à des analyses quantitatives de faibles concentrations à des prises d'essai inférieures à 1 gramme pour les éléments à analyser.

Loi de BEER-LAMBERT

Soit un faisceau de lumière monochromatique traversant une épaisseur "l" de solution d'un corps absorbant. Soit P_0 la puissance rayonnante à l'entrée de la solution et P la puissance rayonnante à la sortie, C la concentration du corps absorbant et "l" l'épaisseur de la cuve. La loi de Lambert-Beer s'écrit :

$$A = \log \left(\frac{P_0}{P} \right) = \epsilon \cdot l \cdot C$$



Le rapport $P / P_0 = T$ est appelé facteur de transmission ou transmittance.

A : est l'absorbance ou densité optique.

ϵ : est appelé coefficient d'absorption spécifique si la concentration est exprimée en mg.L^{-1} , ou coefficient d'absorption molaire si la concentration est exprimée en mol.L^{-1} .

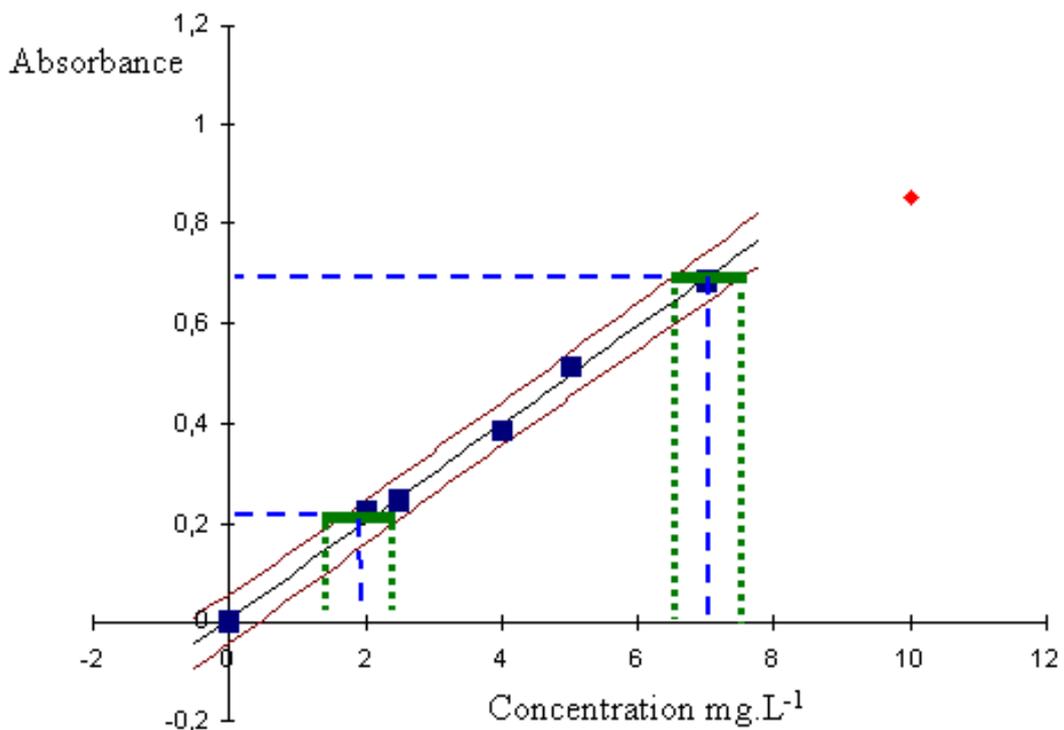
Le coefficient d'absorption dépend de la nature de la substance absorbante et de la longueur d'onde.

La valeur de ϵ à une longueur d'onde donnée peut être précisément déterminée par un étalonnage. On mesure pour cela l'absorbance A de solutions contenant des quantités croissantes et connues de substance. En portant les couples de valeurs (A , C) sur un graphique on obtient une droite, passant par l'origine, de pente $\epsilon.l$, on en déduit la valeur de ϵ .

Les mesures s'effectuent généralement à une longueur d'onde correspondant au sommet d'un maximum du spectre d'absorption de la substance. A cette longueur d'onde, la sensibilité est la plus grande (ϵ maximum) et les erreurs entraînées par un calage défectueux de la longueur d'onde se traduisent par une erreur minimum sur l'absorbance.

La loi de Lambert-Beer étant généralement vérifiée dans l'intervalle d'absorbance 0-1,3, les concentrations des solutions étalons (au moins 5 solutions) seront choisies de façon à couvrir tout cet intervalle.

De façon à avoir la précision la plus grande possible dans la détermination de la concentration de la solution inconnue, l'absorbance mesurée pour cette solution (éventuellement diluée) doit être comprise dans le tiers supérieur de la partie linéaire de la courbe d'étalonnage.



III.5.4. Principe et description de la méthode

A. Principe

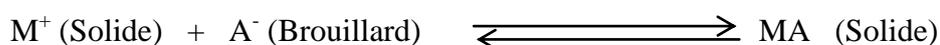
Un faisceau parallèle de lumière sensiblement monochromatique (raie d'émission d'une lampe à cathode creuse) traverse une flamme dans laquelle on introduit l'élément à étudier sous forme de fines gouttelettes pulvérisées. Une partie du flux énergétique est alors absorbé par la vapeur atomique produite par la flamme proportionnellement à la densité optique de cette vapeur.

L'absorption de l'énergie émise est proportionnelle à la concentration en élément recherché selon une loi linéaire dite « loi de BEER-LAMBERT »

B. Description de la méthode

Soit une solution saline pulvérisée dans une flamme, le sel est alors décomposé en ses atomes par énergie thermique en une succession de réactions suivant le mécanisme :

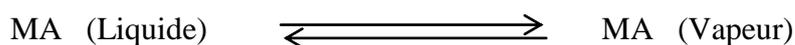
- Vaporisation de la solution : formation d'un nuage électronique sous l'effet thermique.
- Evaporation du solvant dans la flamme :



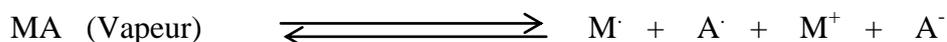
- *Fusion* :



- *Volatilisation* :



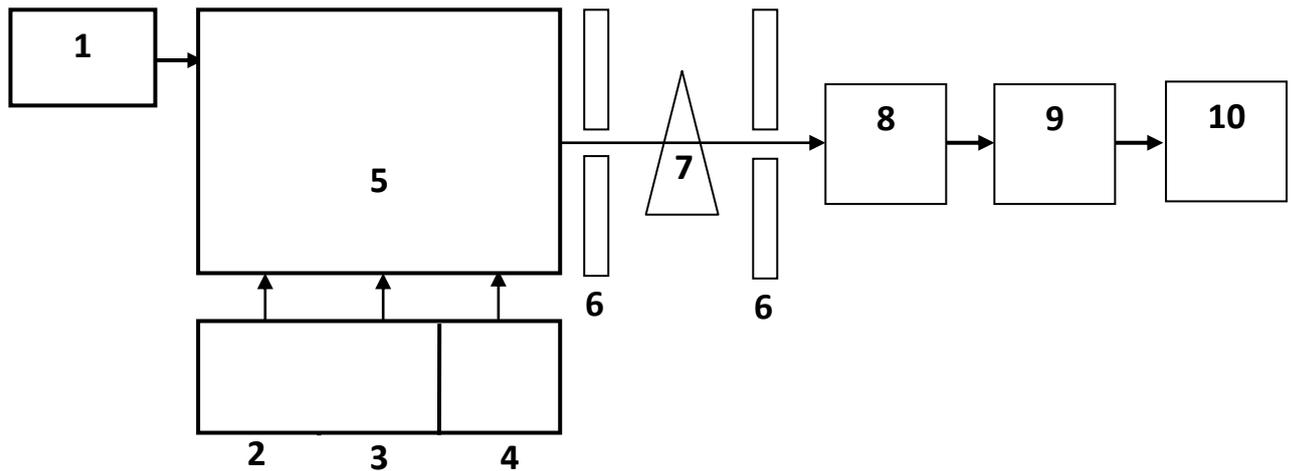
- *Atomisation et excitation* :



C. Appareillage

En général un spectromètre d'absorption atomique se compose des parties suivantes :

- ❖ D'une source lumineuse monochromatique ou système d'émission.
- ❖ D'un ensemble nébuliseur brûleur ou système d'absorption (flamme)
- ❖ D'un monochromateur à grande résolution.
- ❖ D'un détecteur de flux lumineux.



Légende

- | | | | |
|----|-------------------------|-----|--------------------------|
| 1. | Lampe à cathode creuse. | 6. | Fentes. |
| 2. | Gaz combustible. | 7. | Filtre ou prisme. |
| 3. | Gaz comburant. | 8. | Cellule photoélectrique. |
| 4. | Solution. | 9. | Amplificateur. |
| 5. | Atomiseur et brûleur. | 10. | Enregistreur. |

D. Autres méthodes

- ❖ Spectrophotométrie de flamme.
- ❖ Spectrophotométrie Infra Rouge.
- ❖ Spectrophotométrie UV-Visible.
- ❖ Spectroscopie de résonance Magnétique Nucléaire.
- ❖ Spectroscopie Paramagnétique Électronique.
- ❖ Spectroscopie de Masse.
- ❖ Spectroscopie Micro-ondes.

Dans notre cas l'analyse des ETM des échantillons a été faite par SAA (spectromètre d'absorption atomique).

III.6. Résultats et Discussion

Introduction

Les échantillons des eaux ont été prélevés en deux périodes successives, le premier en Octobre 2011 et le deuxième à été pris en Avril 2012.

L'échantillonnage a été effectué selon les points de prélèvements représentés sur la Figure n°11 ciblé les points d'activité minière et la ville d'Ain Azel et qui permet d'identifier l'environnement de la région d'Ain Azel.

Les résultats obtenus dans notre cas montrent des faibles teneurs en ETM dont la concentration est inférieure aux normes (OMS et Normes Algériennes) par contre les teneurs des sulfates au niveau de la mine de Kherzet Youcef montrent une valeur très élevée par rapport aux normes admissibles.

Plusieurs analyses d'eau ont été effectuées dans la région d'Ain Azel, que nous pouvons comparer avec les résultats obtenus et qui montrent une dégradation des ETM de 2004 à 2012.

Ce travail a été réalisé à l'aide des logiciels (Excel, Photoshop, Auto Cad et Programme de conversion des coordonnées " PCC ").

III.6.1. Résultats des analyses

Les résultats d'analyses des eaux prélevées dans la région d'Ain Azel au niveau des forages durant les deux périodes de prélèvement sont présentés sur les tableaux n°7 et 8.

La figure suivante (Fig. n°11) montre la projection des prélèvements de l'eau :

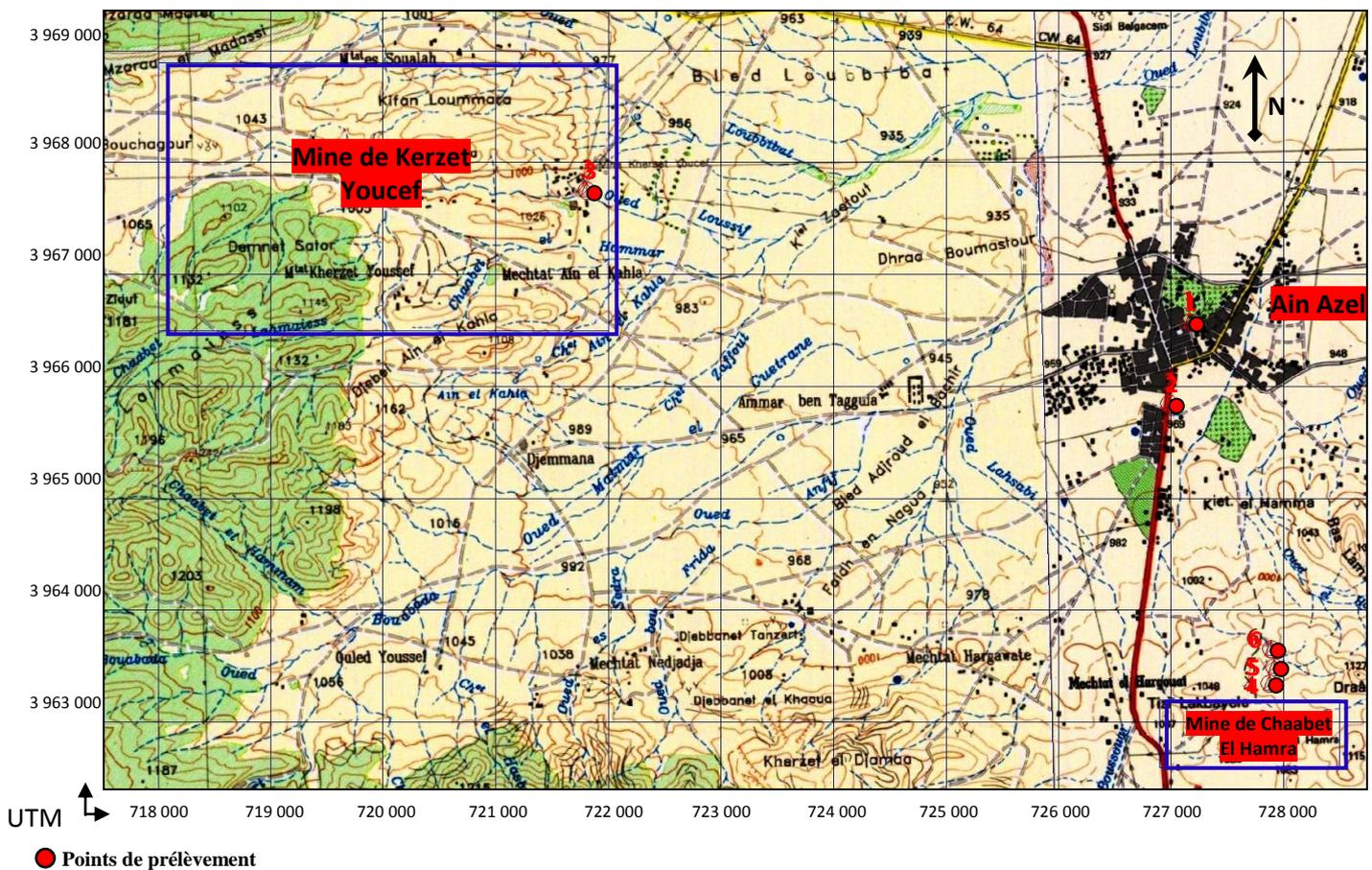


Figure n°11 : Projection des prélèvements d'eau (Echelle graphique).

(Extrait de l'assemblage des cartes topographiques Ras El Oued feuille NI-31-XXIV 1 EST et Ain Lahdjar feuille NI-31-XXIV 2 OUEST Echelle 1/50 000°)

III.6.2. Etude des eaux souterraines de la région d'Ain Azel

Afin de mieux suivre le parcours des ETM et voir l'impact des ouvrages miniers sur l'eau, nous nous sommes intéressés aux teneurs du plomb, du zinc, du cuivre et du cadmium dans les nappes d'eaux souterraines (barrémienne et mio-plio-quaternaire).

Les eaux de la nappe barrémienne proviennent du forage hydraulique de la mine de Kherzet Youcef, alors que celles de la nappe mio-plio-quaternaire proviennent des autres forages restants qui entourent la région d'étude.

Les prélèvements des eaux ont été effectués en Octobre 2011 et Avril 2012. La détermination des concentrations des éléments (Pb, Zn, Cu et Cd) a été effectuée par la spectrophotométrie d'absorption atomique au niveau de deux laboratoires (ORGM pour les analyses de la 1^{ère} période et CETIM pour la 2^{ème} période).

Les échantillons ont été prélevés comme suit :

- Un échantillon au niveau du complexe de Kherzet Youcef (nappe barrémienne) ;
- Deux échantillons au niveau de la ville d'Ain Azel (nappe mio-plio-quadernaire) ;
- Et trois autres échantillons au niveau de la mine de Chaabet El Hamra (nappe mio-plio-quadernaire).

Concernant les normes adoptées, nous avons axé nos conclusions sur des normes de l'organisation mondiale de la santé (O.M.S) et sur les normes algériennes relatives à la contamination des eaux potables.

III.6.3. Etude des eaux souterraines de la mine de Kherzet Youcef (nappe barrémienne)

La nappe d'eau barrémienne passant par la mine de Kherzet Youcef est située dans une zone fracturée caractérisée par des minéralisations plombo-zincifères. Ce contexte nous a incités à étudier particulièrement le zinc, le plomb, le cuivre et le cadmium qui pourraient exister dans cette nappe.

Dans les années précédentes les eaux de cette nappe ont été utilisées pour l'alimentation du complexe de Kherzet Youcef et l'irrigation des terres agricoles qui ceignent le complexe minier et des projets en cours pour alimenter en eau potable la région d'Ain Azel.

III.6.3.1. Comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM aux normes

Les résultats des analyses des eaux prélevées dans le forage de la mine de Kherzet Youcef en mg/l durant les deux périodes, ainsi que les normes de l'eau potable (OMS et Normes algériennes) sont illustrés dans le tableau suivant (Tab. n°7).

Tableau n°7 : Résultats des analyses d'eau obtenus en deux périodes (octobre 2011 et Avril 2012) dans la mine de Kherzet Youcef.

Echantillon N°3 (forge de K.Y)	PH	Ca	K	Na	Fe	Mg	Cl -	HCO ³⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Pb	Zn	Cu	Cd
Période sèche	7,65	225.85	10.572	10.521	< 0.05	14.733	145.55	329.45	0.00	673.90	<0.01	0.299	<0.04	<0.01
Période humide	7,62	201.62	10.96	111.70	< 0.03	98.26	32.94	328.18	< 0.01	671,30	<0.05	0.63	<0.05	<0.01
OMS	6,5 à 9,5	75	-	-	0,3	50	250	-	-	500	0,01	3	2	0,003
Normes Algériennes	6,5 à 8,5	75 à 200	20	200	0,3	150	200 à 500	-	-	200 à 400	0,05	5	1,5	0,01

➤ Interprétation des résultats des éléments majeurs

a. Calcium (Ca)

Cet élément est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères (CaSO₄ : 2H₂O), qui sont facilement solubles selon l'équation suivante :



La teneur en calcium des eaux souterraines de la nappe barrémienne varie entre 201,62 mg/l (période humide) et 225,85 mg/l (période sèche) (Tab. n°7). Ces teneurs ont dépassés les normes admissibles d'eaux potable (75 mg/l) (OMS, 2008) et (75 à 200 mg/l) (Normes Algériennes).

b. Potassium (K) et Sodium (Na)

Les teneurs en potassium et sodium dans la nappe barrémienne varient entre 10,572 mg/l (période sèche) et 10,96 mg/l (période humide) pour le potassium et entre 10,521 mg/l (période sèche) et 111.70 mg/l (période humide) pour le sodium (Tab. n°7) ce qui est inférieur aux normes de l'eau potable (20 mg/l pour K et 200 mg/l pour Na) (Normes Algériennes). Cette faible concentration est expliquée probablement par l'appauvrissement des sols et les terrains traversés par ces eaux.

c. Fer (Fe)

Les teneurs en fer enregistrées dans les deux périodes montrent des valeurs inférieures à 0,05 (période sèche) et 0,03 (période humide) (Tab. n°7). Ces valeurs sont assez inférieures aux normes (0,3 mg/l) (OMS, 2008 et Normes Algériennes).

d. Magnésium (Mg)

Cet élément provient de la dissolution des formations carbonatées. La teneur en magnésium dans les eaux de la nappe barrémienne varie entre 14,733 (période sèche) et 98,26 mg/l (période humide) (Tab. n°7). La teneur en Mg durant la période humide a dépassé les normes admissibles d'eau potable (50 mg/l) (OMS, 2008) mais elle ne dépasse pas les normes algériennes qui sont limitées à (150 mg/l). La concentration du Mg augmente le long du chemin d'écoulement souterrain.

e. Chlorure (Cl)

Les chlorures peuvent avoir une origine multiple. Ainsi, ils peuvent provenir d'une intrusion d'eau marine, ou suite à l'action humaine à partir du salage des routes ou par contamination par les eaux usées. Ils peuvent provenir également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels est très facile d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses.

La teneur en chlorures dans les eaux souterraines de la nappe barrémienne varie entre 145,55 mg/l (période sèche) et 32,94 mg/l (période humide) (Tab. n°7). Ces teneurs sont inférieures aux normes applicables à l'eau potable (250 mg/l) (OMS, 2008) et (200 à 500 mg/l) (Normes Algériennes). La diminution de la concentration des chlorures de la période sèche à la période humide peut être expliquée par la dilution et/ou la migration latérale et verticale des chlorures.

f. Bicarbonates

La présence de bicarbonate dans la nappe est le résultat de la dissolution de la calcite ou de la magnésite dans l'eau en présence de CO₂, Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées et gypsifère (Trias).

Les teneurs en bicarbonates dans la nappe barrémienne enregistrent une petite variation de 329,45 mg/l (période sèche) à 328 mg/l (période humide) (Tab. n°7) par ailleurs les teneurs en carbonates sont caractérisées par de très faibles teneurs 0,00 mg/l (période sèche) et une teneur inférieure à 0,01 mg/l.

g. Sulfates

Les sulfates peuvent provenir de la dissolution du gypse. Ce dernier peut être triasique, comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles du mio-plio-quaternaire ou de la dissolution des minéraux sulfatés d'une manière générale à l'exemple de la pyrite, la galène et la blende ;

La teneur des sulfates dans les eaux souterraines de la nappe barrémienne enregistre une valeur très élevée (673,90 mg/l durant la période sèche) (Tab. n°7) dépassant les normes admissibles de l'eau potable (500 mg/l) (OMS) et (200 à 400 mg/l) (Normes Algériennes). La concentration élevée des sulfates s'explique par la dissolution des minéraux sulfatés existant ce qu'on appelle le phénomène de DMA. On note que la teneur en sulfates pour la période humide n'existe pas à cause d'une erreur au niveau du laboratoire de CETIM.

➤ Interprétation des résultats des ETM

a. Plomb (Pb)

Les teneurs en plomb montrent des faibles valeurs inférieures à 0,01 mg/l durant la période sèche et inférieures à 0,05 mg/l durant la période humide (Tab. n°7) ; ces valeurs sont inférieures aux normes admissibles d'eau potable (0,01 mg/l) (OMS) et (0,05 mg/l) (Normes Algériennes).

b. Zinc (Zn)

La concentration du zinc des eaux souterraines de la nappe barrémienne varie entre 0,299 mg/l (période sèche) et 0,63 mg/l (période sèche) (Tab. n°7). La comparaison de la qualité de l'eau avec la norme d'eau potable (OMS et Normes Algériennes) montre bien que toutes les teneurs en zinc sont inférieures à la limite de la norme (3 mg/l) (OMS) et (5 mg/l) (Normes algériennes). La teneur en zinc montre une augmentation durant la période humide, cela peut être expliqué par la dissolution du Zn dans les sols.

c. Cuivre (Cu) et Cadmium (Cd)

Les teneurs en cuivre et cadmium montrent des concentrations inférieures aux normes algériennes (1,5 mg/l pour Cu et 0,01 mg/l pour Cd) (Tab. n°7).

En conclusion, et d'après le tableau comparatif des teneurs des éléments chimiques et les ETM pour les eaux de la mine de Kherzet Youcef aux normes applicables à l'eau potable (OMS et Normes Algériennes), nous pouvons déduire que les eaux souterraines de la mine se caractérisent par une faible contamination de sulfates et de calcium et non pas des ETM.

Les éléments traces métalliques dissouts dans l'eau de la nappe barrémienne ne comportent aucun risque pour la santé humaine à cause des leurs faibles teneurs.

D'autre part un nouveau risque est lié à la présence des sulfates avec des teneurs élevées au niveau des eaux souterraines de la mine de Kherzet Youcef.

III.6.4. Etude des eaux souterraines de la mine de Chaabet El Hamra et la ville de Ain Azel (nappe mio-plio-quaternaire)

La nappe d'eau mio-plio-quaternaire est située immédiatement à l'Est de la faille de Kherzet Youcef dans la plaine d'Ain Azel. Elle est alimentée directement par les précipitations et les eaux de ruissellement en provenance des différents reliefs entourant la dépression intra montagneuse d'Ain Azel.

Les eaux de cette nappe sont utilisées par les agriculteurs à travers leur puits domestiques pour l'irrigation et pour la consommation humaine, d'où l'importance de l'analyse de ces eaux particulièrement la composition en Zn, Pb, Cu et Cd, qui sont potentiellement toxiques pour la santé humaine.

III.6.4.1. Comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM aux normes

Les résultats d'analyses des eaux prélevées dans la mine de Chaabet El Hamra et la ville de Ain Azel (nappe mio-plio-quaternaire) en mg/l, durant les deux périodes ainsi que les normes de l'eau potable (OMS et Normes algériennes) sont présentés dans le tableau qui suit (Tab. n°8).

Tableau n°8 : Résultats des analyses d'eau obtenus en deux périodes (octobre 2011 et Avril 2012) de la région d'Ain Azel (nappe mio-plio-quadernaire).

	Echantillons	PH	Ca	K	Na	Fe	Mg	Cl ⁻	HCO ⁻³	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Pb	Zn	Cu	Cd
Période Sèche	ECH N° 1	7,46	120,17	5,03	35,44	< 0,05	12,49	99,40	115,91	0,00	103,67	< 0,01	< 0,01	< 0,04	< 0,01
	ECH N°2	7,83	76,65	3,77	24,27	< 0,05	8,44	51,47	341,05	0,00	139,47	< 0,01	0,034	< 0,04	< 0,01
	ECH N°4	7,62	69,71	6,99	23,56	< 0,05	8,80	46,15	353,85	0,00	82,69	< 0,01	0,033	< 0,04	< 0,01
	ECH N°5	7,46	75,38	4,089	26,937	< 0,05	8,267	53,25	341,85	0,00	68,70	< 0,01	0,0325	< 0,04	< 0,01
	ECH N°6	7,47	79,85	2,91	23,59	< 0,05	8,93	82,53	335,55	0,00	77,34	< 0,01	< 0,01	< 0,04	< 0,01
Période Humide	ECH N° 1	7,46	113,25	4,34	41,23	< 0,02	58,01	97,49	351,36	< 0,01	-	< 0,05	< 0,05	0,02	< 0,05
	ECH N°2	7,83	120,62	6,56	29,24	< 0,06	49,06	49,63	363,56	< 0,01	-	0,08	< 0,05	0,01	< 0,05
	ECH N°4	7,62	63,85	4,41	27,74	< 0,05	46,57	40,77	392,82	< 0,01	-	< 0,05	< 0,05	0,02	< 0,05
	ECH N°5	7,46	66,61	3,61	32,98	< 0,05	48,29	42,54	372,10	< 0,01	-	0,40	< 0,05	< 0,05	< 0,05
	ECH N°6	7,47	73,22	2,77	25,85	< 0,05	52,45	47,86	356,24	< 0,01	-	< 0,05	< 0,05	0,02	< 0,05
OMS (2008)	6,5 à 9,5	75	-	-	0,3	50	200	-	-	250	0,01	3	1	0,003	
Normes Algériennes	6,5 à 8,5	75 à 200	20	200	0,3	150	200 à 500	-	-	200 à 400	0,05	5	1,5	0,01	

➤ Interprétation des résultats des éléments majeurs

a. Calcium (Ca)

Les teneurs en calcium des eaux souterraines de la nappe mio-plio-quadernaire varient entre 63,85 mg/l et 120,17 mg/l durant les deux périodes (Tab. n°8). 80 % de ces teneurs ont dépassées les normes admissibles d'eaux potables durant la période sèche et 40% durant la période humide.

b. Potassium (K) et Sodium (Na)

Les teneurs en potassium et sodium dans la nappe mio-plio-quadernaire varient entre 2,77 mg/l et 6,99 mg/l pour le potassium et entre 23,56 mg/l et 41,23 mg/l durant les deux périodes (Tab. n°8) pour le Sodium. Ces teneurs montrent de faibles valeurs inférieures aux normes admissibles pour l'eau potable.

c. Fer (Fe)

Les teneurs en fer enregistrées durant les deux périodes montrent un minimum inférieur à 0,02 mg/l et un maximum de 0,06 mg/l. Ces valeurs sont assez inférieures à la norme fixée (0,3 mg/l) (OMS et Normes Algériennes).

d. Magnésium (Mg)

Les teneurs en magnésium dans les eaux de la nappe mio-plio-quaternaire varient entre 8,267 et 12,49 mg/l durant la période sèche et entre 46,57 mg/l et 58,01 mg/l durant la période humide. Une augmentation des teneurs caractérise la période humide jusqu'à ce que ces teneurs dépassent les normes admissibles d'eaux potables (50 mg/l) (OMS) (Tab. n°8).

e. Chlorure (Cl)

Les teneurs en chlorures dans les eaux souterraines de la nappe moi-plio-quaternaire varient durant les deux périodes entre 40,77 mg/l et 99,40 mg/l (Tab. n°8). Ces teneurs montrent des valeurs inférieures aux normes applicables à l'eau potable (250 mg/l) (OMS) et (200 à 500 mg/l) (Normes Algériennes).

f. Bicarbonates (HCO^{3-})

Les teneurs en bicarbonates dans la nappe mio-plio-quaternaire varient durant les deux périodes entre 115 mg/l et 392,82 mg/l, par contre les teneurs en carbonates montrent de très faibles teneurs 0,00 mg/l (période sèche) et une teneur inférieure à 0,01 mg/l (période humide). (Tab. n°8)

g. Sulfates

Les teneurs des sulfates dans les eaux souterraines de la nappe mio-plio-quaternaire enregistrées varient entre 68,70 mg/l et 139,47 mg/l durant la période sèche (Tab. n°8). Les teneurs en sulfates ne dépassent pas les normes admissibles de l'eau potable (500 mg/l) (OMS) et (200 à 400 mg/l) (Normes Algériennes). Les teneurs en sulfates durant la période humide ne sont pas données par le laboratoire.

➤ **Interprétation des résultats des ETM**

a. Plomb (Pb)

Les teneurs en plomb montrent de faibles valeurs inférieures à 0,01 mg/l durant la période sèche et varient entre 0,05 mg/l et 0,40 mg/l durant la période humide (Tab. n°8) ; les teneurs en plomb sont inférieures aux normes admissibles d'eau potable (0,01 mg/l) (OMS) et (0,05 mg/l) (Normes Algériennes) durant la période sèche par contre et durant la période humide les teneurs des échantillons n°2 et 5 (0,08 mg/l et 0,40) montrent des valeurs supérieures aux normes admissibles. L'élévation de la teneur de l'échantillon n°5 peut être expliquée par la présence de la matière en suspension (et cela est justifié par le prélèvement de l'échantillon N°5 à partir d'un forage situé entre deux autres forages (échantillons N°4 et 6) au niveau de la mine de Chaabet El Hamra).

b. Zinc (Zn)

La concentration du zinc des eaux souterraines de la nappe mio-plio-quadernaire durant les deux périodes varie entre 0,01 mg/l et 0,34 mg/l (Tab. n°8). Les teneurs en zinc sont inférieures aux normes admissibles de l'eau potable (3 mg/l) (OMS) et (5 mg/l) (Normes algériennes). Si on compare les teneurs en Zn obtenues durant la période sèche avec celles obtenues pendant la période humide, nous remarquons que les teneurs en zinc sont plus élevées en période sèche. Cela peut être expliqué par l'importante quantité d'eau caractérisant la nappe durant la période humide qui permet la dilution du zinc.

c. Cuivre (Cu) et Cadmium (Cd)

Les teneurs en cuivre et en cadmium de la nappe mio-plio-quadernaire montrent durant les deux périodes des concentrations variées entre 0,01 mg/l et 0,05 mg/l pour le cuivre et entre 0,01 mg/l et 0,05 mg/l pour le cadmium. Ces concentrations sont inférieures aux normes algériennes (1,5 mg/l pour Cu et 0,01 mg/l pour Cd) (Tab. n°8).

En conclusion, après la discussion des résultats du tableau ci-dessus qui montre que durant les deux périodes de prélèvement toutes les teneurs moyennes des éléments métalliques dosés (Zn, Pb, Cd et Cu) présentent des valeurs inférieures aux normes admises sauf pour le plomb de l'échantillon N°5 (situé au forage de la mine de Chaabet El Hamra) qui se

caractérise par une teneur en plomb assez élevée. L'explication de l'élévation de cette teneur trouve sa justification dans le fait que l'échantillon a été prélevé à partir d'un forage situé entre deux autres forages (échantillons N°4 et 6) au niveau de la mine de Chaabet El Hamra). Sachant que la mobilité du plomb est la plus faible, il est normal qu'il se trouve en quantités importantes dans l'entourage immédiat de la mine. D'autres analyses permettraient de mieux comprendre ce qui se passe réellement.

Les teneurs des éléments chimiques majeurs et le pH sont conformes aux normes applicables de l'eau potable sauf pour le calcium qui montrent de fortes teneurs dues essentiellement à la dissolution des roches carbonatées importantes dans la région.

On peut dire en règle générale, que la nappe mio-plio-quadernaire répond aux normes de potabilité.

III.6.4.2. Comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM avec des études antérieures

Plusieurs études antérieures ont été faites sur la région d'Ain Azel pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines et pour voir si les normes étaient respectées ou pas ; parmi ces études : ATTOUCHEIK en 2006 (résultats d'Octobre et Juin 2004) et BELKHIRI (résultats de juin, septembre et décembre 2004), la Figure n°12 montre le positionnement des échantillons dans la région. Les coordonnées en UTM des prélèvements sont montrées en Annexes (voir l'annexe n°1).

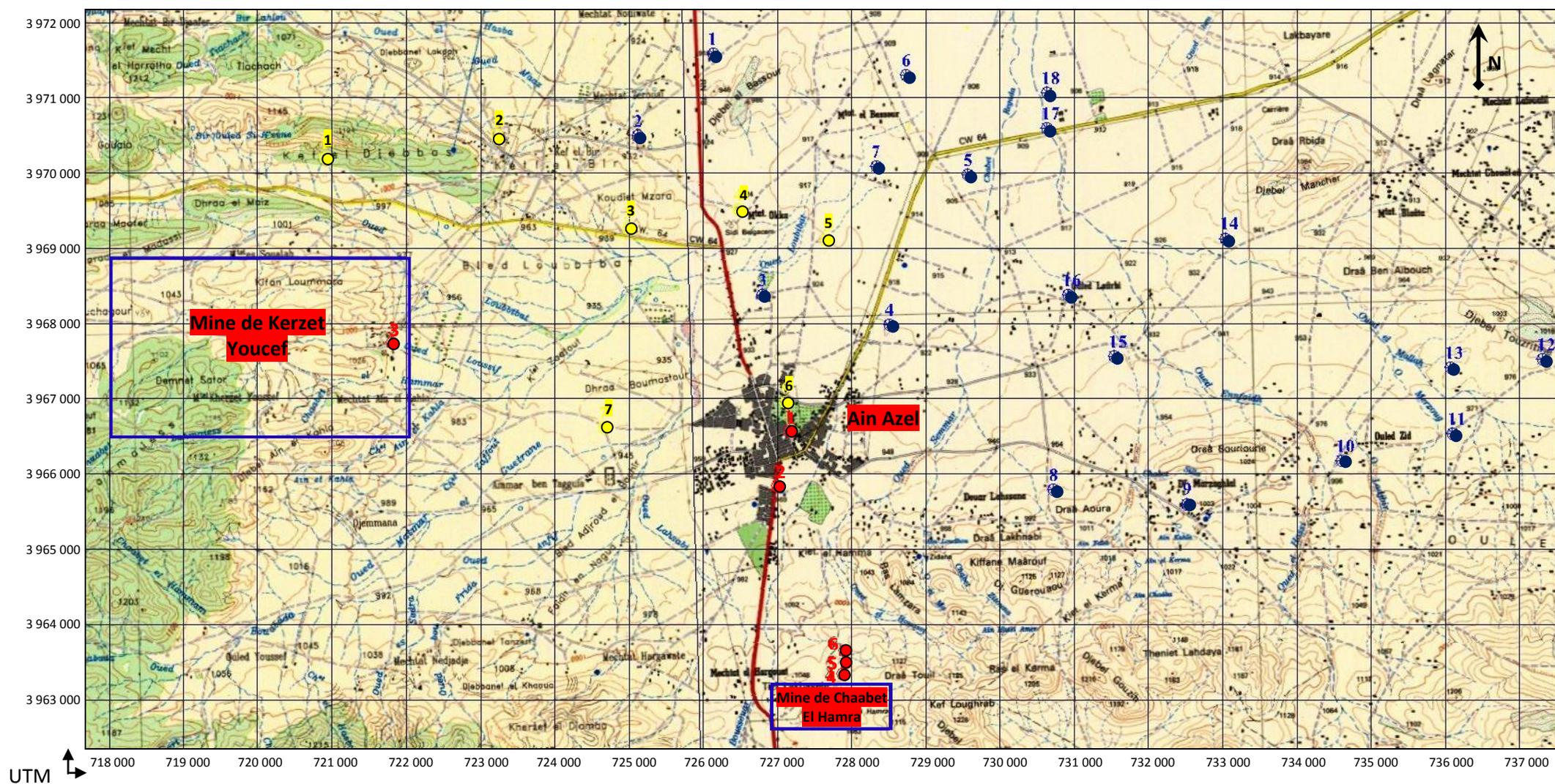


Figure n°12 : Projection des prélèvements d'eau réalisées par ATTOUCHEIK et BELKHIRI en 2004 et moi-même en 2011 (Echelle graphique)
 (Extrait de l'assemblage des cartes topographiques Ras El Oued feuille NI-31-XXIV 1 EST et Ain Lahdjar feuille NI-31-XXIV 2 OUEST ; Echelle 1/50 000e)

- Points de prélèvement réalisés par ATTOUCHEIK
- Points de prélèvement réalisés par BELKHIRI
- Points de prélèvement réalisés par moi-même

Le tableau comparatif ci-après montre les teneurs moyennes des ETM (Pb, Zn, Cu et Cd) pour les deux nappes obtenues par ATTOUCHEIK, 2006 (résultats d'Octobre et Juin 2004), BELKHIRI, 2011 (résultats de juin, septembre et décembre 2004) et les résultats obtenus dans le cadre de ce travail.

➤ **Au niveau de la nappe barrémienne (la mine de Kherzet Youcef)**

Tableau n°9 : Les Teneurs des ETM obtenus en 2004 par ATTOUCHEIK L et moi-même en 2011.

	ETM	Pb	Zn	Cu	Cd
Période sèche	Teneurs obtenus en juin 2004 en mg/l par ATTOUCHEIK L ,2006	0,450	5,800	0,060	0,030
	Teneurs obtenus par moi-même en mg/l	0,010	0,299	0,040	0,010
Période humide	Teneurs obtenus en 2004 en mg/l par ATTOUCHEIK L ,2006	0,320	4,400	0,040	0,020
	Teneurs obtenus par moi-même en 2011 en mg/l	0,050	0,630	0,010	0,050

Le tableau comparatif des ETM ci-dessus représente les résultats d'analyses obtenus des eaux de la nappe barrémienne durant l'année 2004 et durant l'année 2011 en deux périodes différentes.

a. Plomb

Durant les deux périodes de prélèvement pour l'année 2004, les teneurs en plomb présente une forte contamination, passant de 0.320 à 0.450 mg/l, par contre pour l'année 2011 la teneur de plomb ne représente aucune contamination dont des valeurs inférieures à 0.05 (période humide) et inférieure à 0.01 mg/l (période sèche).

b. Zinc

Les teneurs en zinc durant les deux périodes de prélèvement (humide et sèche) pour l'année 2004, passent respectivement de 4.40 à 5.80 mg/l, c'est-à-dire une pollution de la nappe barrémienne, tandis que les teneurs du zinc en 2011 caractérisent par des très faibles teneurs 0,630 mg/l (période humide) et 0.299 mg/l (période sèche).

c. Cuivre

Les teneurs en cuivre obtenues pendant les deux périodes de prélèvement durant l'année 2004, varient entre 0,04 et 0,06 mg/l, alors que durant l'année 2011, la valeur du cuivre

dans les deux périodes (humide à sèche) présentent respectivement des teneurs inférieures à 0,01 mg/l et à 0,04 mg/l et inférieures aux résultats obtenus en 2004 par ATTOUCHEIK L en 2006.

d. Cadmium

Les teneurs en cadmium obtenues en 2004 durant les deux périodes passent de 0,02 à 0,03 mg/l, alors que pendant les deux périodes de l'année 2011, les teneurs en cadmium sont inférieures à 0,05 mg/l (période humide) et à 0,01 mg/l (période sèche). Les teneurs en cadmium représentants des faibles valeurs pour les deux années d'analyses (2004 et 2011).

En conclusion et d'après l'interprétation des données obtenues, les teneurs des ETM montrent des faibles valeurs pour les deux périodes durant l'année 2011/2012, par contre les résultats obtenus en 2004 par ATTOUCHEIK L, 2006 montrent une forte contamination des eaux souterraines de la nappe barrémienne dans la mine de Kherzet Youcef. Cette diminution en teneur peut être due à l'arrêt de l'usine de traitement depuis l'année 2006 à ce jour. Les teneurs de Zinc dans le tableau n°9 présentent des fortes valeurs par rapport aux autres ETM et celui-ci due à la nature de la substance exploitée (transformation de la laverie de traitement de Pb-Zn au traitement de Zn).

➤ Au niveau de la nappe mio-plio-quadernaire

Tableau n°10 : Les Teneurs des ETM obtenus en 2004 par ATTOUCHEIK L, BELKHIRI L et moi-même en 2011.

	ETM	Pb	Zn	Cu	Cd
Période sèche	Teneurs moyennes obtenus en 2004 en mg/l par ATTOUCHEIK L ,2006	0,021	0,407	0,07	0,011
	Teneurs moyennes obtenus en 2004 en mg/l par BELKHIRI L ,2011	0,609	0,163	0,256	-
	Teneurs moyennes obtenus par moi-même en 2011 en mg/l	0,010	0,024	0,040	0,010
Période humide	Teneurs moyennes obtenus en 2004 en mg/l par ATTOUCHEIK L ,2006	0,023	0,346	0,010	0,004
	Teneurs moyennes obtenus en 2004 en mg/l par BELKHIRI L ,2011	0,500	0,156	0,246	-
	Teneurs moyennes obtenus par moi-même en 2012 en mg/l	0,126	0,050	0,024	0,050

Les résultats d'analyse obtenus lors des deux périodes durant l'année de 2004 et 2011 sont portés dans les tableaux en Annexes. (Voir les annexes n°2, 3 et 4)

Le tableau récapitulatif des teneurs en zinc, plomb, cuivre et cadmium montre ce qui suit :

a. Plomb

Durant les deux périodes de prélèvement pendant l'année 2004 (ATTOUCHEIK, 2006), les teneurs en plomb varient entre 0,021 (période sèche) et 0,023 mg/l (période humide). Pour les résultats de BELKHIRI en 2004, les teneurs moyennes de plomb varient entre 0,500 mg/l (période humide) et 0,609 mg/l (période sèche).

Pour le résultat de notre étude la teneur du plomb varie entre 0,010 mg/l (période sèche) et 0,126 mg/l.

b. Zinc

Les teneurs en zinc durant les deux périodes de prélèvement (humide et sèche) pour les eaux de la nappe mio-plio-quadernaire en 2004 (ATTOUCHEIK, 2006), passent respectivement de 0,346 à 0,407 mg/l, tandis que les teneurs du zinc dans de BELKHIRI en 2004 passent de 0,156 mg/l (période humide) et 0,163 mg/l (période sèche).

Les teneurs du zinc dans ce travail durant les deux périodes passent de 0,024 mg/l (période sèche) et 0,050 mg/l (période humide).

c. Cuivre

Les teneurs en cuivre obtenues pendant les deux périodes de prélèvement durant l'année 2004(ATTOUCHEIK, 2006), montrent des faibles teneurs 0,011 mg/l durant la période sèche et 0,010 mg/l durant la période humide, alors que dans l'étude BELKHIRI en 2004 la valeur du cuivre dans les deux périodes (humide à sèche) présente respectivement à 0,254 et 0,256 mg/l.

Les teneurs du cuivre dans ce travail durant les deux périodes passent de 0,022 mg/l (période humide) et 0,040 mg/l (période sèche).

d. Cadmium

Les teneurs en cadmium obtenues en 2004 (ATTOUCHEIK, 2006), durant les deux périodes passent de 0,007 (période humide) à 0,010 mg/l (période sèche), alors que pendant les deux périodes dans ce travail les teneurs en cadmium sont inférieures à 0,010 mg/l (période sèche) et inférieures à 0,050 mg/l (période humide).

D'après la comparaison des teneurs montrées sur le tableau n°10 des teneurs moyennes des ETM obtenues durant les deux périodes (humide et sèche) en 2004 et 2011, nous remarquons un abattement considérable des teneurs en ETM sauf pour le Pb durant la période humide (grâce au teneur élevée de l'échantillon N°5 comme déjà mentionné).

En conclusion, les eaux souterraines des deux nappes ne présentent pas une forte contamination en ETM actuellement. Ceci peut être expliqué du fait que l'échantillonnage a été effectué six ans après l'arrêt des activités du complexe minier. Mais l'étude de la piézométrie montre que la direction de l'écoulement des eaux souterraines est du Sud au Nord et d'Ouest à l'Est. Ce qui facilite la mobilité des ETM (le zinc et certaines formes du plomb sont relativement mobiles) pour cela, il serait néanmoins nécessaire de faire des investigations plus poussées en procédant à des prélèvements nombreux sur toute la région durant des périodes différentes pour mieux connaître la potabilité des eaux souterraines et de l'exploiter dans différents domaines.

III.6.5. Evaluation de la pollution des eaux dans la région

Plusieurs analyses chimiques d'eau et des ETM ont été effectuées sur les eaux souterraines de la région d'Ain Azel par l'ANRH et l'ANRH Antenne régionale EST-CONSTANTINE.

Les caractéristiques géologiques de la mine, les données disponibles et les remarques sur les tableaux des analyses nous ont permis d'évaluer la pollution de la mine par le Plomb, le Zinc, le cuivre, le cadmium et les sulfates dans l'eau.

Les résultats de ces analyses sont représentés dans les tableaux (n°11, 12,13 et 14).

➤ Au niveau de la mine de Kherzet Youcef

Tableau n°11 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la mine de Kherzet Youcef.

	Périodes	Pb	Zn	Cu	Cd	SO ₄ ⁻²
ANRH-Constantine (en Octobre 2001)	Humide	0,206	2,73	0,047	00	500
ANRH-Constantine (en Mars 2002)	Sèche	-	2,292	0,011	-	500
ANRH Alger (en juin 2004)	Sèche	0,077	0,079	N.D	-	-
Teneurs obtenues par moi-même en 2011	Sèche	<0,10	0,299	<0,040	<0,010	673,9
	Humide	< 0,05	0,63	0,01	< 0,05	-

➤ Au niveau de la Ville d'Ain Azel (station de pompage)

Tableau n°12 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la station de pompage d'Ain Azel.

	Périodes	Pb	Zn	Cu	Cd	SO ₄ ⁻²
ANRH-Constantine (en Octobre 2001)	Humide	0,061	0,159	00	00	92
ANRH-Constantine (en Mars 2002)	Sèche	-	0,029	0,004	-	66
ANRH Alger (en juin 2004)	Sèche	N.D	0,016	N.D	-	-
Teneurs obtenues par moi-même en 2011	Sèche	<0,100	0,034	<0,040	<0,010	139,47
	Humide	0,080	<0,050	0,010	<0,050	-

➤ **Au niveau de la ville d'Ain Azel (la piscine)**

Tableau n°13 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la piscine d'Ain Azel.

	Périodes	Pb	Zn	Cu	Cd	SO ₄ ⁻²
ANRH-Constantine (en Octobre 2001)	Humide	0,070	00	0,003	00	106
ANRH-Constantine (en Mars 2002)	Sèche	-	0,027	00	-	102
ANRH Alger (en juin 2004)	Sèche	N.D	N.D	N.D	-	-
Teneurs obtenues par moi-même en 2011	Sèche	<0,100	<0,010	<0,040	<0,010	103,67
	Humide	<0,050	<0,050	0,020	<0,050	-

➤ **Au niveau de la mine de Chaebet El Hamra**

Tableau n°14 : Les Teneurs des ETM obtenus au niveau de la mine de Chaabet El Hamra.

	Périodes	Pb	Zn	Cu	Cd	SO ₄ ⁻²
ANRH Alger (en juin 2004)	Sèche	N.D	0,722	N.D	-	-
Teneurs obtenues par moi-même en 2011	Sèche	<0,100	0,033	<0,040	<0,010	103,67
	Humide	<0,050	<0,050	0,020	<0,050	-

Les tableaux précédents montrent que :

- Les teneurs des ETM lors de l'exploitation du gisement du Pb-Zn au niveau des zones de l'activité minière présentent de fortes valeurs par contre les teneurs obtenues au niveau de la ville d'Ain Azel (station de pompage et la piscine) montrent des valeurs moyennement faibles ;
- Une décroissance des teneurs en ETM avec le temps grâce à la décroissance de la production de tout venant (de 2001 au 2004 voir le Tab. n°3 chapitre I) d'une part et l'arrêt de l'activité minière depuis 2006 d'autre part ;
- Les teneurs obtenues des ETM dans les périodes humides sont plus élevées que celles obtenues dans les périodes sèches ce qui s'explique par le phénomène de lixiviation de la roche ;
- Les teneurs obtenues au niveau de la mine de Kherzet Youcef présentent une forte contamination de l'eau par les sulfates contrairement aux autres points qui ont présenté

des teneurs admissibles, cette teneur excessive en sulfates s'explique par la présence de la digue proche de la mine et par le phénomène du drainage minier acide.

Conclusion Générale

Cette étude est réalisée sur la mine de Chaabet El Hamra (à l'arrêt depuis 2006) et la région d'Ain Azel. Les analyses chimiques sur l'eau souterraine sont réalisées durant les deux périodes de prélèvement (humide et sèche) au niveau de deux nappes qui caractérisent la région d'Ain Azel (la nappe barrémienne et la nappe mio-plio-quadernaire), par comparaison avec les études réalisées antérieurement nous arrivons aux conclusions suivantes :

- Au niveau la nappe barrémienne

- ❖ Les éléments traces métalliques dissouts dans l'eau ne comportent aucun risque pour la santé humaine à cause de leurs teneurs faibles par rapport aux limites admissibles par les normes OMS et les normes algériennes. Par contre, un nouveau risque s'impose par la présence de la teneur élevée des sulfates au niveau des eaux souterraines de la mine de Kherzet Youcef.

- Au niveau de la nappe mio-plio-quadernaire

- ❖ Les résultats montrent que durant les deux périodes de prélèvement toutes les teneurs moyennes d'éléments métalliques (Zn, Pb, Cd et Cu) présentent des valeurs inférieures aux normes admises sauf pour le plomb dans l'échantillon situé au niveau du forage de la mine de Chaabet El Hamra qui se caractérise par une teneur en plomb assez élevée. Cette anomalie pourrait s'expliquer par la présence de la matière en suspension.
- ❖ Les teneurs des éléments chimiques majeurs et le pH sont conformes aux normes applicables de l'eau potable sauf pour le calcium qui montre de fortes teneurs dues essentiellement à la dissolution des roches carbonatées caractérisant la région, ce qui implique que la nappe mio-plio-quadernaire répond aux normes de potabilité.

En comparaison avec les travaux effectués, les teneurs des ETM montrent de faibles valeurs pour les deux l'année 2011 et 2012, par contre les résultats obtenus en 2004 par ATTOUCHEIK L montrent une forte contamination des eaux souterraines de la nappe barrémienne dans la mine de Kherzet Youcef. Cette diminution en teneur est expliquée par l'arrêt de l'usine de traitement de 2006 à ce jour.

Recommandation

En conclusion, les eaux souterraines des deux nappes ne présentent pas une forte contamination en ETM actuellement. Ceci peut être expliqué du fait que l'échantillonnage a été effectué six ans après l'arrêt des activités du complexe minier. Mais l'étude de la piézométrie montre que la direction de l'écoulement des eaux souterraines est du Sud au Nord et d'Ouest vers l'Est, ce qui facilite la mobilité des ETM (le zinc et certaines formes du plomb sont relativement mobiles). Pour cela, il serait néanmoins nécessaire de faire des investigations plus poussées en procédant à des prélèvements nombreux sur toute la région durant des périodes différentes pour mieux connaître la potabilité des eaux souterraines.

Références bibliographiques

ANRH, 2004 .Résultat d'analyse de l'eau, Qualité de la ressource hydrique de la mine de Kherzet Yousef.

ATHAMENA M., 2006. Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone Sud sétifien, Magister en mobilisation des ressources hydriques, Université de Batna, 130 p.

ATTOUCHEK L., 2006, Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youcef (Sétif) et son impact sur l'environnement, Magister en géologie minière, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie, 83 p.

BELKHIRI L., 2004. Étude hydrogéologique et problème de La qualité des eaux souterraines de la Plaine d'Ain Azel "wilaya de Sétif est algérien". Mémoire de Magister université Hadj Lakhdar Batna, 157 p.

BELKHIR N et BERDJA F., 1990. Contribution à l'étude hydrogéologique du gisement poly métallique (Pb-Zn) de Kherzet Youcef (Sétif). (Cause de l'inondation du 02/06/1990). PFE. IST. USTHB. Alger.

BOUSDIRA D., 2009. Etude des impacts des activités d'exploitation des mines polymétallique (Pb-Zn) sur l'environnement de la région de Kherzet Yousef (wilaya de Sétif) .Mémoire de Magister ENP, 120 p.

BOUTALEB A., 2001. Les minéralisations à PB-Zn du domaine Sétifien-Hodna : Gîtologie, pétrographie des dolomies, micro thermométrie et implications métallogénique. Thèse de Doctorat. D'Etat. USTHB. Alger, 350 p.

BRGM, 2008. Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes, Applications dans un contexte de gestion des impacts sur les eaux souterraines, Documents du BRGM 300. 103 p.

BRGM, 1963. La pollution des eaux souterraines. Etude documentaire par ALBINET M,71 p.

BRGM, 1991. Influence des terrils et des anciennes activités sur la pollution des eaux de la nappe de la craie, 44 p.

CHENINI N., 2010. Impact des activités minières sur l'environnement en Algérie (plan d'action de remise en état des lieux). Magister, option mine et environnement, 103 p.

ENOF, 2003. Projet de développement de la partie inférieure de gisement de Chaabet El Hamra.

ENOF, 2010. Exploitation de la partie inférieure Du gisement de Chaabet-El-Hamra, 97 p.

ENOF, 2011. Historique de la mine de Kherzet Youcef, 107 p.

HENNI A., 1984. La minéralogie, les particularités géochimiques et la genèse du gisement de Kherzet Youcef. Résumé de Th. de 3ème cycle Université. Leningrad, URSS, pp 329-336.

HENNI A., 1995. Caractérisation minéralogique et géochimique des sphalérites de l'Algérie. Bull .Service Géologie d'Algérie, vol.6, n°2, (ORGM, Boumerdès), pp 225-237.

HENNI A., 1998. Minéralogie, géochimie et métallogénie du gisement Pb-Zn de Kherzet Youcef. Mémoire du Service Géologique d'Algérie, n°9, (ORGM, Boumerdès), pp 77-114.

JOURNAL OFFICIEL, 1954. (de la république française).

KHENNICHE M., 2009. Projet d'exploitation de la partie inférieure du gisement de zinc de Chaabet-El-Hamra (Ain-Azel- Sétif).Mémoire de fin d'études. ENP, 86 p.

MEDKOUR N., 1994. Influence des eaux minières sur les sols et contamination par le plomb et le zinc dans la région d'Ain Azel (wilaya de Sétif). Thèse de Magister INA. Alger. 162 p.

RODIER J., 2005. L'analyse de l'eau 8^e édition Paris.

SARL GENERALE DES MINES, 2011. Exploitation de la partie inférieure du gisement de Chaabet El Hamra-Kherzet Youcef, (bureau d'étude spécialisé dans les Etudes et le Suivi de réalisation dans le domaine des Mines, Boumerdes), 54p.

VILA J.M., 1977. Notice explicative de la carte géologique d'Ain Azel au 1/50 000, SONATRACH, Division Hydrocarbures, Direction exploration.

TAHAR-CHERIF Z., 1994. Méthodes spectroscopiques d'analyses chimiques, édition OPU.

Sites web :

Normes de l'OMS sur l'eau potable (mise à jour en 2006) :

www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm

Documents BRGM : www.brgm.com

ANNEXES

Annexe n°1 : Les coordonnées des prélèvements en UTM réalisées par ATTOUCHEIK, 2004 ; BELKHIRI, 2004 et moi-même en 2011.

Pour moi-même

N° Echantillons	Lieu dit	Coordonnées	
		X	Y
1	La piscine d'Ain Azel	727 166	3 966 592
2	La commune d'Ain Azel	726 985	3 965 856
3	Forage (Kherzet Youcef)	721 798	3 967 770
4	Forage n°2 (Chaabet El Hamra)	727 876	3 963 346
5	Forage n°4 (Chaabet El Hamra)	727 917	3 963 497
6	Forage n°5 (Chaabet El Hamra)	727 892	3 963 657

Pour ATTOUCHEIK

N° Echantillons	Coordonnées	
	X	Y
1	720 899,61	3 970 224,82
2	723 208,83	3 970 543,90
3	724 985,93	3 969 292,41
4	726 473,28	3 969 545,14
5	727 659,69	3 969 135,88
6	727 103,45	3 966 969,85
7	724 648,58	3 966 638,79
8	721 810	3 967 780

Pour BELKHIRI

N° Echantillons	Coordonnées	
	X	Y
1	726 136	3 971 618
2	725 114	3 970 523
3	726 792	3 968 405
4	728 504	3 968 001
5	729 566	3 970 008
6	728 729	3 971 330
7	728 326	3 970 114
8	730 715	3 965 803
9	732 516	3 965 615
10	734 599	3 966 192
11	736 098	3 966 556
12	737 308	3 967 544
13	736 068	3 967 433
14	733 036	3 969 154
15	731 534	3 967 587
16	730 914	3 968 399
17	730 626	3 970 626
18	730 630	3 971 100

**Annexe n° 2 : Résultats des analyses obtenus par ATTOUCHEIK et moi-même
(Période Humide)**

	N° Echantillons	Coordonnées en UTM		Eléments en mg/l				
		X	Y	Pb	Zn	Cu	Cd	
Analyses réalisées par ATTOUCHEIK	1	720 899,61	3 970 224,82	0,040	0,620	0,030	0,010	
	2	723 208,83	3 970 543,90	0,030	0,480	0,010	0,010	
	3	724 985,93	3 969 292,41	0,020	0,270	0,010	0,000	
	4	726 473,28	3 969 545,14	0,020	0,300	0,000	0,010	
	5	727 659,69	3 969 135,88	0,020	0,200	0,000	0,000	
	6	727 103,45	3 966 969,85	0,030	0,320	0,010	0,000	
	7	724 648,58	3 966 638,79	0,000	0,230	0,010	0,000	
	Puits de Kherzet Youcef	721 810	3 967 780	0,320	4,400	0,020	0,040	
	Teneurs moyennes mg/l				0,060	0,853	0,011	0,009
	Teneurs moyennes nappe mio-plio- quaternaire en mg/l sans puits de Kherzet Youcef				0,023	0,346	0,010	0,004
Analyses réalisées par moi-même	1	727 166	3 966 592	0,050	0,050	0,020	0,050	
	2	726 985	3 965 856	0,080	0,050	0,010	0,050	
	3 (Kherzet Youcef)	721 798	3 967 770	0,050	0,630	0,010	0,050	
	4	727 876	3 963 346	0,050	0,050	0,020	0,050	
	5	727 917	3 963 497	0,400	0,050	0,050	0,050	
	6	727 892	3 963 657	0,050	0,050	0,020	0,050	
	Teneurs moyennes mg/l				0,113	0,147	0,022	0,050
Teneurs moyennes nappe mio-plio- quaternaire en mg/l sans puits de Kherzet Youcef				0,126	0,050	0,024	0,050	

**Annexe n°3 : Résultats des analyses obtenus par ATTOUCHEIK et moi-même
(Période Sèche)**

	N° Echantillons	Coordonnées en UTM		Eléments en mg/l				
		X	Y	Pb	Zn	Cu	Cd	
Analyses réalisées par ATTOUCHEIK	1	720 899,61	3 970 224,82	0,030	0,690	0,010	0,010	
	2	723 208,83	3 970 543,90	0,020	0,530	0,020	0,010	
	3	724 985,93	3 969 292,41	0,010	0,300	0,000	0,000	
	4	726 473,28	3 969 545,14	0,030	0,350	0,000	0,010	
	5	727 659,69	3 969 135,88	0,020	0,200	0,010	0,000	
	6	727 103,45	3 966 969,85	0,030	0,480	0,020	0,010	
	7	724 648,58	3 966 638,79	0,010	0,300	0,020	0,010	
	Puits de Kherzet Youcef	721 810	3 967 780	0,450	5,800	0,030	0,060	
	Teneurs moyennes mg/l				0,075	1,081	0,014	0,014
	Teneurs moyennes nappe mio-plio- quaternaire en mg/l sans puits de Kherzet Youcef				0,021	0,407	0,011	0,007
Analyses réalisées par moi-même	1	727 166	3 966 592	0,100	0,010	0,040	0,010	
	2	726 985	3 965 856	0,100	0,034	0,040	0,010	
	3 (Kherzet Youcef)	721 798	3 967 770	0,100	0,299	0,040	0,010	
	4	727 876	3 963 346	0,100	0,033	0,040	0,010	
	5	727 917	3 963 497	0,100	0,033	0,040	0,010	
	6	727 892	3 963 657	0,100	0,010	0,040	0,010	
	Valeurs moyennes mg/l				0,100	0,070	0,040	0,010
Teneurs moyennes nappe mio-plio- quaternaire en mg/l sans puits de Kherzet Youcef				0,100	0,024	0,040	0,010	

Annexe n° 4 : Résultats des analyses obtenus par BELKHIRI (Période Sèche et humide)

	Juin 2004			Septembre 2004			Décembre 2004		
	(n= 18)			(n= 18)			(n= 18)		
	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy
pH	6,7	7,9	7,1	6,8	7,6	7,2	6,8	7,9	7,1
T°	14	18	16,1	14	18	15,6	11	16	13,5
Ca²⁺	64,13	232,46	134,1	64,12	256,5	132,84	62,52	250,1	128,5
Mg²⁺	35,88	181,2	84,2	35,88	184,2	87,42	35,45	192,2	83,96
Na⁺	18,5	143,7	61,73	16,7	145,3	58,36	12,8	109,1	52,95
K⁺	6,14	148,7	20,31	5,14	149,2	19,57	4,2	132,3	18,66
Cl⁻	56,8	337,25	166,7	10,65	330,2	149,3	63,9	337,3	171
SO₄²⁻	14	309	114	18	312	118	37	368	134
HCO₃⁻	131,8	1348,1	392,7	176,9	1342	421,58	183	1336	433,3
NO₃²⁻	0,3	98	36,9	0,2	94	7	0,3	75	13,9
NO₂	0,011	85,75	6,311	0,016	67,030	4,521	0,018	48,41	4,027
Pb²⁺	0,03	1,83	0,609	0,29	1,79	0,913	0,017	0,292	0,087
Fe²⁺	0,023	0,338	0,149	0,067	0,789	0,41	0,089	0,645	0,325
Zn²⁺	0,081	0,304	0,163	0,076	0,302	0,163	0,045	0,276	0,148
Cu²⁺	0,068	0,431	0,256	0,067	0,431	0,256	0,089	0,43	0,251