

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

Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Minier



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie minier

Thème

Evolution de la pollution de l'eau de la mine de Chaabet el-Hamra

Présenté par :

TOUMIAT Yassine Abdeljalil

HABIB Tarek

Soutenu le **25 juin 2013** devant le jury :

Présidente	Mme BOUMBAR Nadia	Maitre Conférences A, ENP
Encadreur	Mme CHABOU Salima	Maitre Conférences A, ENP
Examineur	Mr OULD HAMOU Malek	Maitre Conférences A, ENP

Promotion 2013

ENP, 10 Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger

Remerciements

Nous remercions Dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études.

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promotrice **DR CHABOU Salima** pour son encadrement durant notre projet de fin d'études et ses conseils tout au long de notre travail.*

Qu'il nous soit permis de remercier tous nos enseignants du département de génie minier, de nous avoir fait profiter de leur expérience scientifique et pour les précieux enseignements et conseils qu'il nous ont prodigués tout au long de notre scolarité.

Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir examiné notre projet de fin d'études.

On remercie également tout le personnel de la mine de Chaabet El-Hamra et du complexe de Kherzet Youssef.

*On remercie l'ingénieur hydrogéologue **Mr OUZOUAZ Said** pour les explications qu'il nous a données, pour les visites effectuées au niveau de la mine, ainsi que pour l'intérêt qu'il n'a cessé de porter à notre travail.*

*Nos plus grands remerciements vont à l'ingénieur en chimie **Mr AZRI Aimen**, laboratoire de l'ORGM, et aussi l'ingénieur hydrogéologue **Mr KHALIDE Souhil**, de l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH) Constantine.*

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos parents, car nuls autres qu'eux ne se sont plus sacrifiés pour notre bien et l'accomplissement de nos projets. Ils ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Nos dernières pensées, et non les moindres, vont à toutes les personnes qui à titres divers, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail

ملخص : تطورات تلوثالمياه في منجم الشعبة الحمراء

النشاطات المنجمية تخلف انعكسات سلبية على البيئة وهذا ما سوف نتطرق اليه في دراستنا حول مشاكل التلوث المترتبة عن انتاج المعندين الرصاص والزنك المستخرجة من المنجمين (مركب خرزت يوسف ومنجم الشعبة الحمراء) الواقعين في بلدية عن ازال ولاية سطيف. الاعمال المنجزة من طرف باحثين بينت نسبة عالية من التلوث بتلك المنطقة وهذا إستنادا على المعايير المقبولة (300 ppm بالنسبة للزنك و 100 ppm بالنسبة للرصاص).

بعد مرور 7 سنوات كاملة من توقف النشاط المنجمي في المنطقة , نتابع الدراسة على المياه الجوفية الماخوذة من منابع مختلفة لاجراء التحاليل عليها بواسطة عدة طرق لمعرفة تراكيز اثار العناصر المعدنية (الرصاص. لزنك...) والعناصر الغالبة (الكالسيوم الصوديوم البوتاسيوم).هدف هذه الدراسة من اجل معرفة صلاحية الشرب استنادا على المعايير العالمية والجزائرية. تاتي هذه الدراسة لتأكيد نقص التلوث المستمر اعتمادا على التحاليل السابقة للمياه الجوفية في المنطقة. **الكلمات المفتاحية:** النشاطات المنجمية، التلوث، الزنك، الرصاص، الانتقال، التربة، الرواسب.

Résumé : Evolution de la pollution de l'eau de la mine de Chaabet el Hamra

Les activités minières ont des répercussions négatives sur l'environnement. Notre étude concerne les problèmes de pollution résultant de la production des métaux (Pb, Zn) extraits des deux mines (complexe de Kherzet Youcef et mine de Chaabet el Hamra) situées dans commune d'Ain Azel, wilaya de Sétif.

Les études antérieures ont montré un taux élevé de pollution dans cette région selon les normes admises (300 ppm pour le zinc et 100 ppm pour le plomb).

Après 7 ans d'arrêt des activités minières dans le site, on poursuit l'étude sur les eaux souterraines prélevées de différentes sources en utilisant des méthodes d'analyses pour déterminer les concentrations des éléments traces métalliques ETM (Pb, Zn, Cd, Cu) et les éléments majeurs (Na, Ca, K...). Cette étude a pour but de déterminer la potabilité selon les normes internationales et algériennes. L'étude vient confirmer la tendance à la dépollution par rapport aux analyses antérieures des eaux souterraines de la région.

Mots clés : Activités minières, Pollution, ETM, Zinc, Plomb, Transfert, Sol, Sédiment.

Abstract: Evolution of the water's pollution of Chaabet el Hamra's mine

Mining activities have negative repercussions on the environment. We will carry out a study on the pollution problems resulting from the production of metals (Pb, Zn) extracted from two mines (complex Kherzet Youcef and mine Chaabet el Hamra) located in town of Ain Azel Wilaya of Setif. The work already carried out by researchers showed a high level of pollution in the region in compare of the acceptable standards (300 ppm zinc and 100 ppm for lead).

After seven years of cessation of mining activities at the site, we continue the study on the groundwater taken from different sources using different methods and analysis devices, in order to determine the concentrations of trace elements TEM metal (Pb, Zn, Cd, Cu) and major elements (Na, Ca, K...). This study aims to determine the potability according to international and Algerian standards. The study completes the previous work on the evolution of the degree of pollution of groundwater in the region.

Key words: Mining activities, Pollution, MTEs, Zinc, Lead, Transfer, Soil, Sediment.

SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DU DISTRICT MINIER DE CHABET EL HAMRA-KHERZET YOUCEF ET DE LA POLLUTION	3
CHAPITRE II : ANALYSES D'ECHANTILLONS D'EAU – APPAREILLAGES ET DISCUSSION DES RESULTATS.....	40
CONCLUSION GENERALE.....	72
BIBLIOGRAPHIE.....	71
ANNEXES I.....	73
ANNEXES II.....	78
ANNEXES III.....	81
ANNEXES IV.....	82

TABLE DES MATIERES

DEDICACES

REMERCIEMENTS

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE	1
I.1. Localisation géographique du gisement de Chaabet El-Hamra	3
I.2. Historique	5
I.3. Contexte géologique	6
I.3.1.Géologie et structure du gisement	6
I.3.2.Tectonique	7
I.4. La minéralisation	8
I.5. Hydrogéologie	12
I.6. Exploitation	20
I.6.1.Conditions minières du gisement	20
I.6.2.Méthodes d'exploitation choisies.....	21
I.6.2.1. Choix de la méthode d'exploitation	21
I.7. Traitement de minerai	23
I.8. La pollution	27
I.8.1. Principaux éléments présents dans l'eau	27
1. Cations majeurs	27
2. Anions majeurs.....	28
I.8.2. Les métaux et les éléments traces	28
1. Généralités sur les métaux et les éléments traces.....	28
2. Principaux métaux étudiés (ANNEXE II)	30
I.8.3. Les polluants	30
a. Les principaux types de polluants.....	30
b. Les principales sources de pollution	31
I.8.4. Le transfert des ETM de la surface du sol vers les nappes souterraines	32

I.8.5. L'impact environnemental suite à l'exploitation du gisement	33
I.8.6. Impacts sur l'environnement.....	34
1. Impact sur les eaux souterraines	34
2. Impact sur le sol	37
3. Impact sur les sédiments des cours d'eau	38
II.1. Méthodologie du travail	39
II.2. Technique d'échantillonnage (ANNEXE IV)	39
II.2.1. Analyse des eaux.....	39
II.3. méthodes d'analyses	40
II.3.1. Analyse par spectrophotométrie UV visible.....	40
II.3.2. Analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)	46
II.3.4. Analyse des éléments chimiques majeurs (Na, K, Ca) par le photomètre a Flamme.....	51
II.3.5. Comparaison entre les deux méthodes	55
II.4. Les analyses des échantillons au niveau de la mine de Chaabet el Hamra	56
II.4.1. Interprétation et comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM aux normes (OMS, Algériennes)	56
II.4.1.1. Interprétation du résultat des éléments majeurs.....	57
II.4.1.2. Interprétation des résultats des ETM.....	59
II.4.1.3. Conclusion	59
II.5.1. Comparaison des teneurs des éléments chimique et les ETM avec les études antérieures sur la mine de chaabet el hamra (nappe hauterivienne).....	60
II.5.1.1. Conclusion	64
II.5.1.2. Evaluation de la pollution des eaux dans la région.....	64
II.6. Les analyses des échantillons au niveau de la mine de Kherzet Youcef	65
II.6.1. Interprétation et comparaison des teneurs des éléments majeurs (Ca, Na, K) aux normes (OMS, Algériennes)	65
II.6.1.2. Interprétation des résultats	66
II.6.1.3. Comparaison des teneurs des éléments majeurs avec les études antérieures	67
CONCLUSION GENERALE.....	72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	71
ANNEXE I.....	73
ANNEXE II.....	78
ANNEXE III	81
ANNEXE IV	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Carte de situation de la région d’Ain Azel (OUZOUAZ, 2013)	3
Figure 2 Localisation de la mine et la commune d’Ain Azel (OUZOUAZ, 2013)	4
Figure 3 Carte montrant les lieux d’échantillonnage de l’eau et la géologie de la zone étudiée.	4
Figure 4 La minéralisation du gisement (faisceau supérieur et inférieur)	9
Figure 5 Log stratigraphique de gisement Chaabet El-Hamra (d’après ENOF 1993)	14
Figure 6 Coupe hydrogéologique Profil 0 – Profil 15(d’après ENOF 2003)	14
Figure 7 Situation des ouvrages (Forages et Piézomètres).	15
Figure 8 Cartes situations des niveaux d’eau en décembre 2005	17
Figure 9 Plan coupe des travaux d’ouverture de la mine de Chaabet el-Hamra	20
Figure 10 Figure 1.10 : Méthode des chambres et piliers abandonnés.....	21
Figure 11 Schéma de la laverie.....	26
Figure 12 Fonction de quelques éléments dans l'organisme.	29
Figure 13 Photo montrant le complexe minier de Kherzet Yousef (REZIGAT ; IMCHAL. 2006)	35
Figure 15 Le spectrophotomètre UV visible au niveau du laboratoire de génie minier	40
Figure 16 l’écran de Menu Principal de la spectrophotométrie a UV-Visible	41
Figure 17 Les produits et le matériel utilisé pour les préparations des solutions standards au niveau du laboratoire de génie minier	43
Figure 18 La longueur d’onde de Pb détecté par l’UV-Visible (laboratoire génie minier)	44
Figure 19 Le Photomètre A Flamme au niveau du laboratoire de génie minier	51
Figure 20 Calibrage du photomètre par des solutions standards	54
Figure 21 Distribution des épaisseurs des corps minéralisées (OUZOUAZ S).....	62
Figure 22 Distribution des teneurs en Zn des corps minéralisées (OUZOUAZ S)	63
Figure 14 Exemple de drainage acide (eaux à pH de 3 riches en ions ferriques), eaux d'exhaure de l'ancienne mine de W d'Enguialès (Aveyron).(BRGM, 2003)	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Récapitulatif des réserves récupérables au 31 Décembre 2002 (ENOF, Rapport Géologique du Gisement de Zincifère de CHAABET EL HAMRA)	12
Tableau 2 Caractéristiques des forages.....	19
Tableau 3 Caractéristiques des piézomètres	19
Tableau 4 Pourcentage des éléments majeurs dans la croute terrestre	29
Tableau 7 Comparaison des teneurs en ETM des eaux de la nappe barrémienne aux normes (OMS et AFNOR) (ATTOUCHEK, 2006)	34
Tableau 9 Limite de détection des ETM.....	48
Tableau 10 Comparaison entre [SAA et UV visible].....	55
Tableau 11 Concentrations des ETM et éléments majeurs dans les six forages de la mine en mg/l	57
Tableau 12 Répartition des normes [OMS et algériennes] sur les ETM et E-majeurs	57
Tableau 13 Teneurs moyennes des ETM en 2012 par BEDJAOUI et notre analyse en 2013 au niveau des forages (F04, F05, F06) en mg/l.....	60
Tableau 14 Teneurs des ETM obtenues en 2012 par BEDJAOUI et notre analyses en 2013 au niveau des forages (F04, F05, F06) en mg/l.....	61
Tableau 15 Teneurs des éléments majeurs obtenues au niveau de la mine de Chaabet el-Hamra par l'ANRH de CONSTANTINE 25 Février 2010 en mg/l	64
Tableau 16 Teneurs des ETM obtenu au niveau de la mine de Chaabet el-Hamra	65
Tableau 18 Concentrations des éléments majeurs (K, Ca, Na) dans le puits de la mine de Kherzet Youcef .66	
Tableau 19 Teneurs des éléments majeurs (Ca, K, Na) obtenues en 2012 par BEDJAOUI et les analyses en 2013 au niveau de puits de Kherzet Youcef	67
Tableau 20 Teneurs des éléments majeurs (Ca, K, Na) obtenues en 2004 par ANRH et les analyses en 2013 au niveau de puits de Kherzet Youcef	67
Tableau 5 Principales propriétés physico-chimiques du plomb.....	78
Tableau 6 Principales propriétés physico-chimiques du Zinc.....	79
Tableau 8 Mécanismes et réactions du drainage minier acide (DMA)	81

LISTE DES ABREVIATIONS

DMA : Drainage Minier Acide

ENOF : Entreprise Nationale des produits Miniers Non Ferreux et des Substances Utiles

ETM : Eléments Traces Métalliques

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PPM : Parties par millions

PPB :Parties par billion

SAA : Spectrophotométrie d'Absorption Atomique

ADE : Algérienne des eaux

MES : Matière en suspension

EREM : Entreprise Nationale de la Recherche Minière

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

AEP : Alimentation en eau potable

TL₅₀ : Temps léthal 50

Abs : Absorbance

Ech : Echantillon

Conc : Concentration

X : Latitude

Y : Longitude

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément primordial dans la vie humaine et dans le développement des sociétés, il occupe environ deux tiers de la surface de la Terre. Au-delà de ses utilisations dans notre vie courante, agricole et industrielle, il représente le milieu dans lequel s'effectuent de multiples réactions métaboliques chez les organismes vivants terrestres ou aquatiques.

Le sol et l'eau risquent des accumulations excessives de déchets chargés en éléments traces métalliques (ETM), provenant des activités agricoles, minières et industrielles. Ces déchets contaminent le « système eau » par mobilité et par migration des ETM vers les nappes phréatiques.

Des études réalisées par l'organisation mondiale de la santé (OMS) en 2001 ont démontré que l'accumulation des métaux toxiques comme le cadmium, le plomb, le mercure et l'arsenic dans l'organisme humain accroît le nombre de maladies notamment de plusieurs types de cancer.

L'activité minière porte sur les travaux d'exploration et d'exploitation des gisements. Au cours de sa réalisation, un projet minier peut générer une grande variété d'éléments traces métalliques (ETM), comme la laverie du complexe minier (Pb-Zn) de Kherzet Youcef (Sétif). L'arrêt de la mine de Kherzet Youcef suite à un accident en 1990, a accéléré l'ouverture de la mine de Chaabet el Hamra non loin de là pour fournir le minerai à l'usine de traitement de Kherzet Youcef. Les travaux d'enrichissement du minerai de Pb-Zn de cette unité mettent en circulation des quantités importantes d'ETM dans la région générant ainsi une contamination en ETM des eaux, des sols ce qui représente un risque pour la santé humaine et animale et pour l'agriculture.

L'objectif du présent travail est d'étudier le degré de pollution des eaux souterraines par les ETM après l'arrêt de la mine de Chaabet el-Hamra en 2006. Au cours de notre étude on effectue des prélèvements d'eau sur le terrain et on procède à leur analyse dans deux laboratoires avec deux appareillages différents.

Notre mémoire est constitué d'une introduction, de deux chapitres suivis d'une conclusion générale.

Le premier chapitre : porte sur la présentation du district minier Chaabet el Hamra -Kherzet Youcef (géologie, caractérisation du minerai, travaux miniers (exploitation, traitement), activité hydrogéologique et différents types de pollution) .

Le deuxième chapitre : présente la partie pratique qui consiste en un prélèvement d'échantillons d'eau sur le site, en leur analyse par l'utilisation de différentes méthodes (appareillages) et leur

description après quoi les interprétations des résultats sont proposées avec la comparaison avec ceux des études antérieures.

Le mémoire s'achève par une conclusion générale sur la qualité des eaux et de l'appareillage, suivie de la liste de références bibliographiques et des annexes.

I.1. Localisation géographique du gisement de Chaabet El-Hamra

La zone d'étude se trouve dans la commune d'Ain Azel (Sétif), dans l'Est de l'Algérie.

Cette région est limitée au Nord par Ain Lahdjar et Sétif, à l'Est par Beida Bordj, au Sud par Ras el Aioun et à l'Ouest par Ain Oulmène et Salah Bey, et couvre une superficie d'environ 252 km². La plus grande partie de la population est concentrée au niveau de la ville d'Ain Azel (42 000hab). L'agriculture constitue la principale ressource de la région, la principale activité est l'agriculture des céréales (orge, blé). Cette région est représentée par un ensemble de chaînons, dont certains culminent à plus de 1500 m, tel que Djebel Boutaleb (1886 m), qui relayent pour former une barrière topographique et climatique entre l'Algérie septentrionale et le domaine saharien.

Le gisement de Chaabet el Hamra est situé à 50 km au Sud de Sétif, à 3,5 km au Sud-est du village d'Ain Azel et à 7,5 km de la mine de Kherzet Youcef (actuellement abandonné suite à la catastrophe du 02 Juin 1990) **Figure 1**.

Le climat de la région est semi-aride, froid en hiver et chaud en été. Les précipitations annuelles moyennes sont de 322 mm et dépassent rarement les 500 mm La température moyenne annuelle est de 15 °C



Figure 1 Carte de situation de la région d'Ain Azel (OUZOUAZ, 2013)

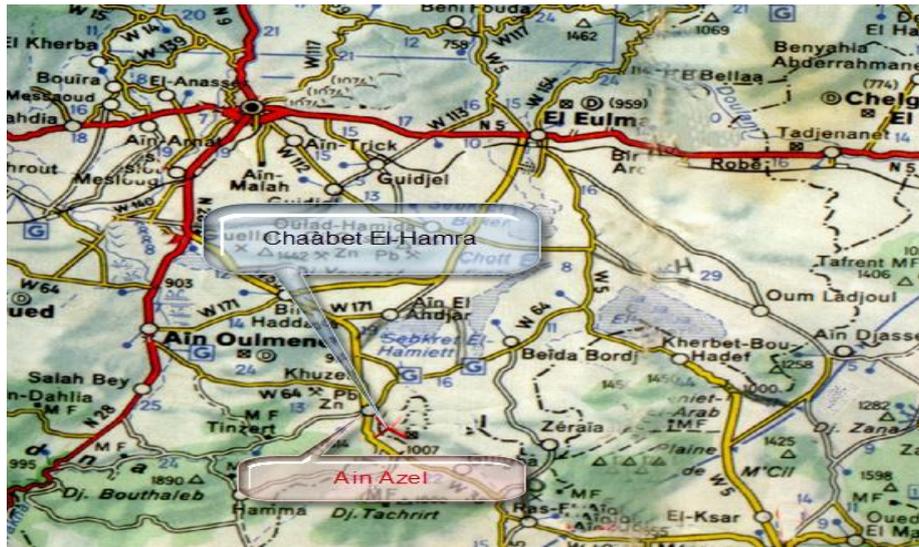


Figure 2 Localisation de la mine et la commune d'Ain Azel (OUZOUAZ, 2013)

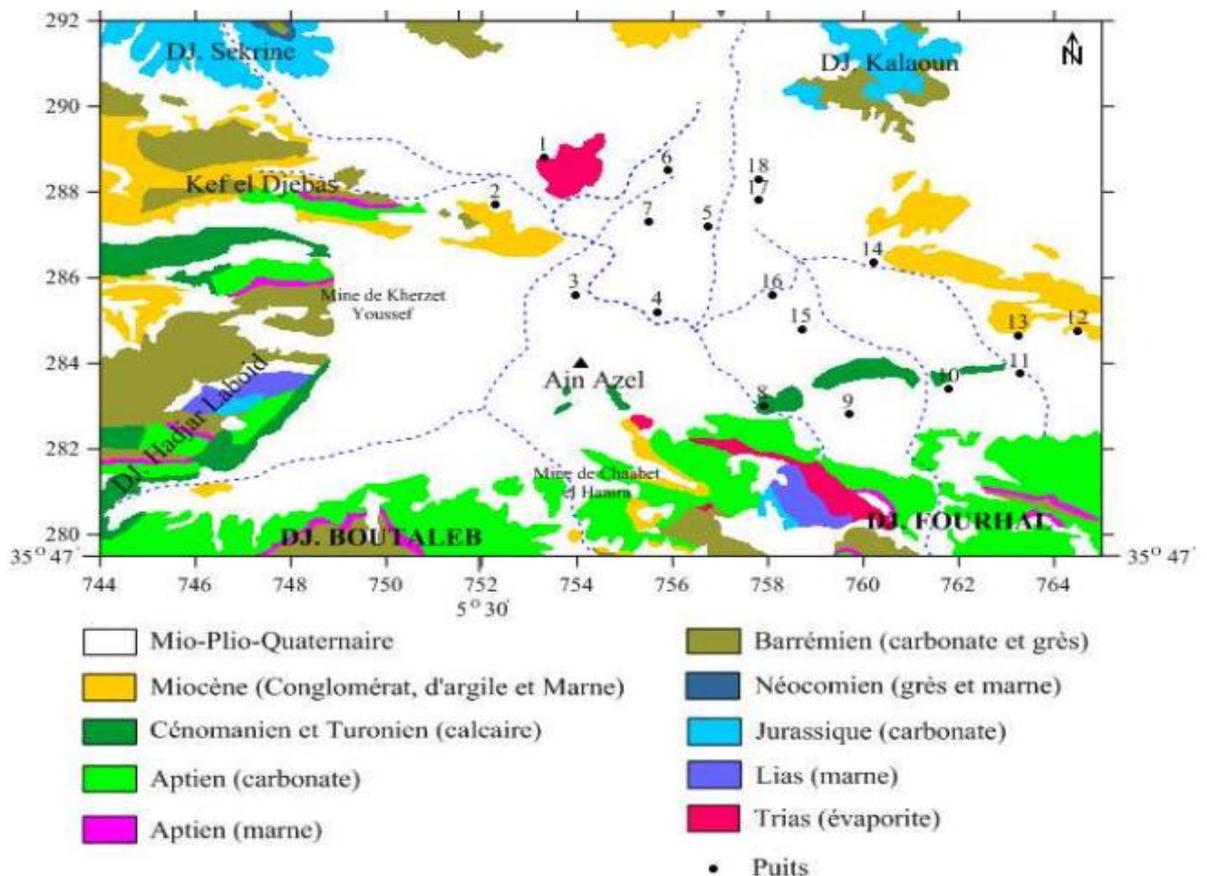


Figure 3 Carte montrant les lieux d'échantillonnage de l'eau et la géologie de la zone étudiée.

I.2. Historique

Le gisement de Chaabet-el-Hamra est connu depuis le début du 20^{ème} siècle. La partie sud-est du gisement a fait l'objet d'une exploitation artisanale des affleurements de calamines (Oxydés) de 1910 à 1920 et de 1936 à 1943.

Plus tard, entre 1987 et 1991, l'EREM a entrepris des travaux d'exploration, dans la partie nord-ouest du gisement, qui confirmera l'existence d'une minéralisation susceptible de faire l'objet d'une exploitation dans le cadre de cette exploration, 242 sondages de mailles différentes, 70x50 dans la partie centrale et 100x100 dans la partie nord-ouest, totalisant environ 53 927 m et répartis sur 31 profils, ont été réalisés. Ces sondages ont défini l'allure générale du gisement et permis le calcul des réserves.

Au lendemain de l'accident du 02/06/1990, afin de préserver l'emploi et éviter la fermeture brutale de Kherzet-Youcef avec toutes ses conséquences sociales et économiques, l'ENOF succéda à l'EREM, à Chaabet el Hamra, pour continuer l'activité minière dans la région.

A cet effet, une étude intitulée : "Avant-projet de recherches détaillées par ouvrages miniers sur le gisement de Chaabet-El-Hamra" fut élaborée et soutenue, en Mars 1991, par l'ENOF. Dans cette étude préliminaire, dans laquelle l'ENOF est désignée "prestataire" et le Ministère de l'énergie et des mines "maître de l'ouvrage", l'ENOF a réalisé plus de 1200 m de travaux d'infrastructure constituant les ouvrages d'infrastructure ci-après (coupe et plan ci-dessous) :

- Une tranchée d'accès au niveau 1 025, de 113 mètres de long,
- Une descenderie d'une section moyenne de 20.60m² et une longueur de 650m,
- Une galerie intermédiaire, de même section, de 166m de long,
- Un travers-banc, au niveau 960, également de même section, de 289m de long,
- Un puits d'aérage, entièrement bétonné, ayant 9.60 m² de section et 117 mètres de profondeur dont 10 m de puisard. Le puits part du niveau 950 et débouchant au jour à la côte 1 066.74.

I.3. Contexte géologique

I.3.1. Géologie et structure du gisement

a) Structure du gisement

Le minerai zincifère du gisement de Chaabet El-Hamra est composé de deux corps Principaux supérieur (corps n° 1) et inférieur (corps n°2).

Ces corps sont allongés en bande sur une longueur de 2700 m en direction et 100 à 400 mètre en pendage. Les corps de minerai plongent d'un pendage de 10° Nord-Ouest. Ce pendage devient plus important à partir du profil 14 (19° à 20°).

Le minerai est encaissé dans une dolomie poreuse ou béchique située dans la partie inférieure de l'étage hauterivien (Crétacé inférieur). Le toit du corps n°1 est une dolomie à lits marneux tandis que le mur du corps n°2 est une dolomie massive à concrétions (dolomie tachetée) (Figure 4).

Les deux corps de minerai sont stratiformes, subparallèles et séparés l'un de l'autre par un niveau intercalaire constitué d'une dolomie à minéralisation pauvre et parfois stérile de puissance variable. Ce niveau peut être absent, de telle sorte que les deux corps se confondent en un seul corps de minerai continu.

La puissance moyenne du corps n°1 est de 5 mètres et celle du corps n°2 est de 4 mètres. Il n'existe aucune corrélation entre les épaisseurs et les teneurs et on constate une distribution contrastée dans les corps de minerai.

La minéralisation du gisement de Chaabet El-Hamra a une structure pluri étagée, de forme lenticulaire. La zone métallifère globale constituée de lentilles se présente sous forme d'une large bande de direction nord-ouest (300 à 320°), d'environ 2700 m de longueur et de 300 à 600 m de largeur et à une profondeur allant de 100 à 400 m. La puissance de ces lentilles est variable. Elle atteint parfois 15 m.

b) Géologie du gisement

D'après de nombreux auteurs (Savornin, 1920; Galcon, 1967; Guiraud, 1973; Vila, 1980) deux ensembles sont à distinguer :

- Au Sud, l'autochtone essentiellement carbonaté, d'âge jurassique et crétacé, représenté dans la partie des monts du Hodna par les Djebel Boutaleb et Fourhal d'allongement ENE-WSW.

- 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 et l'écaille de Djebel Sekrine.

Les différentes séries constituant les monts du Hodna peuvent être définies du Trias au Miocène (Annexe I)

I.3.2. Tectonique

Le gisement de Chaabet-El-Hamra appartient au Horst anticlinal de Rahbat et occupe la partie extrême ouest de son flanc Sud-ouest. Il se caractérise par une structure complexe. Le gisement se subdivise en trois blocs

a. Le Bloc Est

Trois (3) côtés de ce bloc sont limités par des failles, tandis que le côté Sud est ouvert et se trouve en contact avec les calcaires du Néogène. Sur le plan structural, le bloc représente un brachyanticlinal et le pendage des flancs du pli est : 10° à 15° NE et 15° à 20° SO. Sur le fond général du pli, il existe des complications locales sous forme de dômes, gradins, etc.

Le pli est compliqué par des accidents cassants :

- **La faille sud** : de direction latitudinale dans le flanc Sud-est du brachyanticlinal, c'est une faille normale à rejet vertical de 100 à 120 m avec un pendage au Nord inférieur à 65-75°.
- **La faille diagonale** : elle s'étend vers le Nord-est sub-parallèlement au plan axial.

b. Le bloc central

Il a la forme d'un coin, dont l'angle aigu est formé par le raccordement des failles centrale et latitudinale dans la partie Est. La partie opposée du coin s'en va en s'élargissant à l'Ouest du gisement. Sur le plan structural, le bloc Central est plus compliqué. Dans son ensemble, le coin représente un Graben à amplitude d'affaissement de 15 à 20 m.

c. Le Bloc Ouest

Il est localisé au Nord-Ouest de la faille normale et se trouve limité par des dislocations cassantes Est, Ouest, latitudinale et centrale.

- **La faille centrale** : c'est une faille normale qui s'étend de l'extrémité Nord jusqu'à l'extrémité Sud, avec un pendage au Sud-est inférieur à 70-75° et un rejet vertical de 10 à 15 m dans sa partie Nord-est, elle coupe un chevauchement à pente douce.

- **La faille latitudinale** : c'est une faille normale dérivée de la faille centrale. Elle se prolonge à l'Ouest au-delà du gisement, avec un pendage au Nord de 75 à 80° et un rejet vertical de 10 à 20m
- **La faille Est** : dérivée aussi de la faille centrale, cette faille normale est orientée vers l'Est, de direction subméridienne, avec une amplitude verticale du rejet de 80 m, voire de 100 m suivant le plan de faille, et un pendage Sud-ouest inférieur à 65-70°.
- **La faille Ouest** : cette faille normale se dégage du dessous du dépôt quaternaire, bordant le flanc Sud-est du brachyanticlinal du bloc Est, et change de direction jusqu'à 300°, se faisant couper par la faille latitudinale ; c'est une faille en escalier formant des plaques, des coins, dans une zone d'environ 70 m de large, et le pendage est à l'Est inférieur à 70-85° tandis que les rejets verticaux atteignent 10 m.

La partie inférieure (profil 10-15) est affectée par deux accidents tectoniques majeurs subparallèles de direction Nord-est/Sud-ouest à savoir : la faille diagonale et la faille latitudinale. La première est située entre le profil 13 est d'un rejet de 4 mètres avec un pendage d'environ 50 degrés vers le Sud-est. Par contre la faille latitudinale est située entre les profils 15 et 16. Son rejet est de 10 mètres avec un pendage d'environ 60 degrés vers le Nord-Ouest.

I.4. La minéralisation

La minéralisation du gisement de Chaabet El-Hamra est observée en faisceaux sous forme de lentilles minéralisées de composition tantôt monominérale, tantôt mixte.

Elle est représentée essentiellement par la sphalérite, la pyrite, la marcassite, la galène rencontrée rarement et donc sans importance industrielle.

Dans cette composition, les principaux minéraux sont la sphalérite, la pyrite et la marcassite. Les minéraux secondaires sont la galène, l'hématite. Les minéraux de gangue sont la calcite, la barytine, la dolomie et plus rarement le quartz et le gypse (rare). Les minéraux d'oxydation sont principalement la smithsonite, la cérusite et la limonite.

La minéralisation de pyrite, marcassite, blende et rarement galène est intimement liée aux roches dolomitiques hauteriviennes, en se localisant indépendamment aux structures tectoniques affectant ce niveau porteur de la minéralisation.

La minéralisation zincifère se présente en couches lenticulaires, regroupées dans deux faisceaux stratiformes, séparés par le banc de dolomie blanchâtre stérile, de 6 m de puissance.

La galène est très rare, et se développe généralement aux extrémités des lentilles, limitant la zone zincifère de celle baryto-pyritifère.

La sphalérite se présente sous plusieurs types : massif, en tache de recristallisation, fissure, et bréchique ce qui constitue l'essentiel du minerai industriel.

LA SERIE MINERALISEE DE

CHAABET ELHAMRA

Echelle 1/100

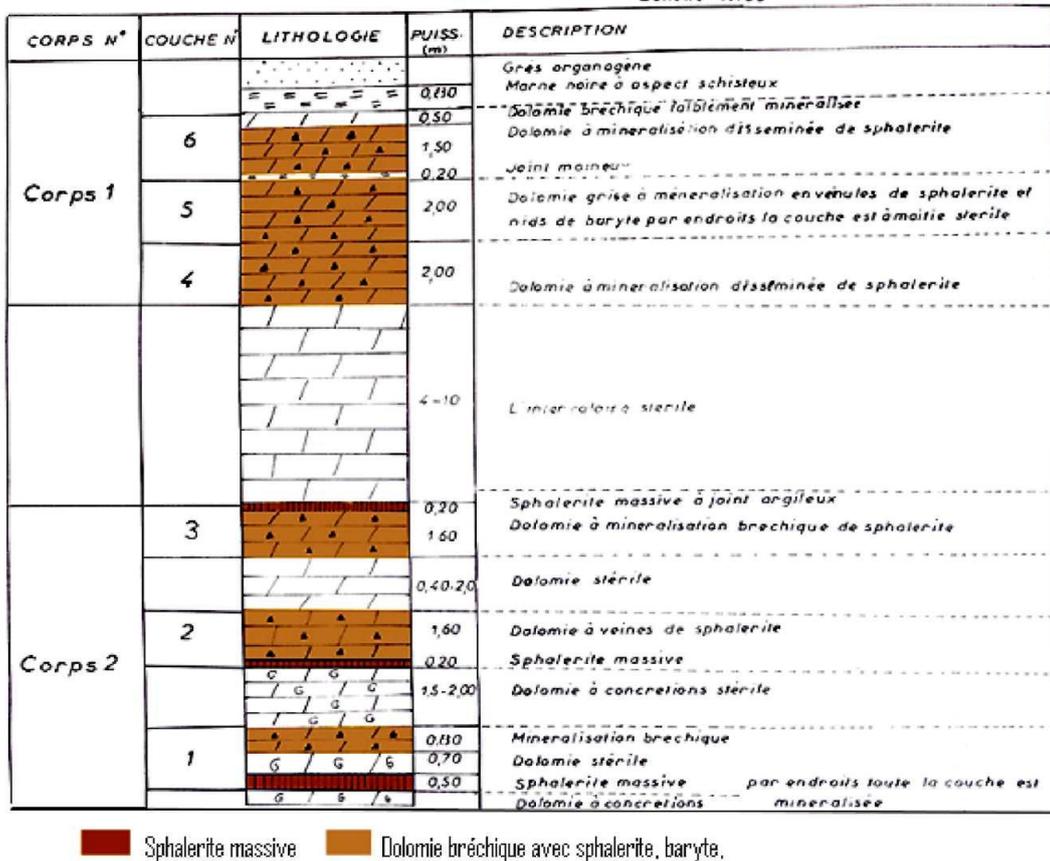


Figure 4 La minéralisation du gisement (faisceau supérieur et inférieur)

I.4.1. Caractéristiques des minéraux

I.4.1.1. Sulfures

➤ Sphalérite (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, 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, 1995). L'étude microscopique détaillée du minerai (Pb-Zn) a mis en évidence l'existence de deux générations de Sphalérite (Henni, 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 est corrodée 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 plus part du temps, des masses Collo-morphes et des couches rubanées et concentriques de différentes teintes (brun-foncée à jaune claire).

La partie centrale de ces structures est souvent occupée par la dolomite ou 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 sphalérite a montré que la première génération est relativement plus pauvre en cadmium que celle de la génération tardive qui est riche en cadmium (Henni, 1998).

➤ **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, 1998).

La galène I: développe de très fines inclusions et veinules recoupant la sphalérite, la dolomie, et la marcasite de génération précoce.

La galène II: est de distribution irrégulière. Elle forme des phénocristaux, des agrégats, des félons 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%), Cd et l'absence de l'antimoine. L'analyse à la microsonde électrique montre la présence du plomb (86,1 à 86,9%), du zinc (0,02%) et du fer (0,02 à 0,06%).

➤ **Marcasite (FeS₂)**

C'est le sulfure le plus précoce. Il est abondant dans l'encaissant est souvent disséminé dans une dolomie riche en bitume (Henni, 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, 1984). D'après (Henni, 1984), on distingue deux générations de marcasite:

La marcasite I: elle est plus abondante et forme de fines couches de distribution irrégulière et de micro veinules différemment orientées. Elle montre des teneurs élevées, surtout en Ni (0,09%) et en 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%) et en Ge (0,1%).

➤ **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, 1998).

I.4.1.2. Minéraux de gangue

➤ **Dolomite (CaMg (CO₃)₂)**

La dolomite remplit les fissures. Elle se trouve aussi dispersée dans la sphalérite 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, 1998). Les résultats de l'analyse spectrale, chimique et par microsonde des dolomites montrent que celles-ci contiennent les éléments suivants: Pb (0,12-0,5%), Cd (0,002-0,005%), Cu (0,001-0,005%) et Zn (0,005-0,07%). Ainsi que la présence de petites quantités du FeO (0,017-0,16%) et du MnO (0,080,18%) (Henni, 1998).

➤ **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, 1998).

La calcite I: associée à la dolomie, la barytine, les sulfures et les 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 (0,21-0,049%) MnO (0,01-0,15%), FeO (0,002-0,21%), Pb (0,002-0,1%), Cu (0,002-0,005%), Zn (0,01-0,05%), Sr (0,01-0,015%) et Cd (0,002%).

➤ **Barytine (BaSO₄)**

La barytine se rencontre rarement dans le gisement de Chaabet el-Hamra. 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% du plomb, de 0,7 à 0,9% du strontium et de 0,3 à 0,7% du calcium.

➤ **Fluorite (CaF₂)**

Elle est moins fréquente et se rencontre en association avec la barytine et la calcite à l'intérieur des vides.

I.5. Hydrogéologie

I.5.1. Objectif et consistance des travaux

Actuellement la majeure partie des réserves récupérables de Chaabet El Hamra est située sous le niveau hydrodynamique.

La préparation et la mise en exploitation des réserves situées sous le niveau d'eau nécessitent au préalable l'assèchement des zones de travail.

L'étude hydrogéologique fait ressortir que pour parvenir à assécher la zone de travail, il y a lieu de forer et équiper 5 forages (actuellement 6 forages en 2013) d'exhaure et 3 piézomètres pour la surveillance du niveau des eaux

I.5.2. Géologie et réserves récupérables

Le gisement est de type stratiforme situé à une profondeur de 100m au profil 0 passe à une profondeur de 200m au profil 15. (Figure 6)

Le niveau hydrostatique situé à 92 m au niveau du profil 10 permet de distinguer 2 zones :

La zone supérieure (Profil 0 – Profil 10) avec 121.764 tonnes de réserves récupérables restante au 31/12/2002 et une teneur moyenne de 5,28% en Zinc est pratiquement hors de l'eau. Cette zone est actuellement en cours d'exploitation sans difficulté liées à l'eau. La partie inférieure avec 700.000 tonnes de réserves récupérables et une teneur moyenne de 5,16% en Zinc est entièrement sous le niveau hydrodynamique

Tableau 1 Récapitulatif des réserves récupérables au 31 Décembre 2002 (ENOF, Rapport Géologique du Gisement de Zincifère de CHAABET EL HAMRA)

Réserves	Réserves récupérables	Teneur	Durée d'activité
Restante de la partie supérieure	121 764	05.28%	2.5 ans
La partie inférieure sous le niveau d'eau	700 000	05.16%	7 ans
Total	821 764	10.44%	9.5 ans

a) Planification Des Travaux

Les travaux préparatoires ne pourront être entamés qu'une fois la zone asséchée.

L'ordre chronologique suivant, montre les différentes étapes jusqu'à l'entrée en production :

- Réalisation des forages d'exhaure et piézomètres.
- Installation des équipements électromécaniques.
- Mise en marche des pompes.
- Pompage (assèchement de la zone de travail)
- Réalisation des travaux d'infrastructure
- Réalisation de travaux de recherches et préparatoires.
- Entrée en production.

b) Aspects scientifiques et théoriques

Travaux réalisés par L'ORGM et L'ENOF

Tenant compte des conditions hydrogéologiques de la région du Gisement de Chaabet El Hamra et des connaissances géologiques, des travaux hydrogéologiques ont été réalisés :

- Prospection hydrogéologique préliminaire.
- Observations de régime.
- Prises de niveaux d'eau dans les sondages de prospections géologiques.
- Forages de sondages hydrogéologiques et piézométriques.
- Diagraphie.
- Prélèvement d'échantillons de terrain pour analyse géo mécanique.
- Prélèvement d'échantillons d'eau pour analyse fondamentale.
- Essais de développement.
- Essais de pompage.

c) Résultats préliminaires

Les études géologiques hydrogéologiques sus cités permettent de dire que :

- ❖ Dans la partie centrale du gisement, existe une nappe contenue dans la formation Hauterivienne carbonatée à perméabilité de fissure.
- ❖ Dans la partie N.O du gisement, une nappe aquifère est reconnue dans les formations barrémienne. Cet aquifère est associé aux grés dolomitiques gréseux. Cette partie n'est pas concernée actuellement par les travaux d'exploitation minière donc l'étude hydrogéologique détaillée de cette partie du gisement est différée à une date ultérieure.

Evolution de la pollution de l'eau de la mine de Chaabet el-Hamra

- ❖ Dans la partie Est du gisement une absence de venues d'eau a été notée. Les travaux miniers réalisés par l'ENOF ont confirmé qu'il n'y a pas de niveau aquifère dans la partie Est.

ETAGE	LOG	Conséquence Hydrogéologique	
Miocène 30 m			Non étudié
Aptien 60 m		Perméable	Inexistant dans la partie centrale du gisement Exploité par les fellahs
Barrémien 200 m		Semi-Perméable	Etudié sommairement Situé au dessus du Niveau Statique dans la partie centrale du gisement exploité par les fellahs
		Perméable	
Hauterivien Supérieur 120 m		Perméable	Etudié
		Semi-Perméable	
Hauterivien Inférieur 120		Perméable	
Valanginien		Imperméable	Etudié

Figure 5 Log stratigraphique de gisement Chaabet El-Hamra (d'après ENOF 1993)

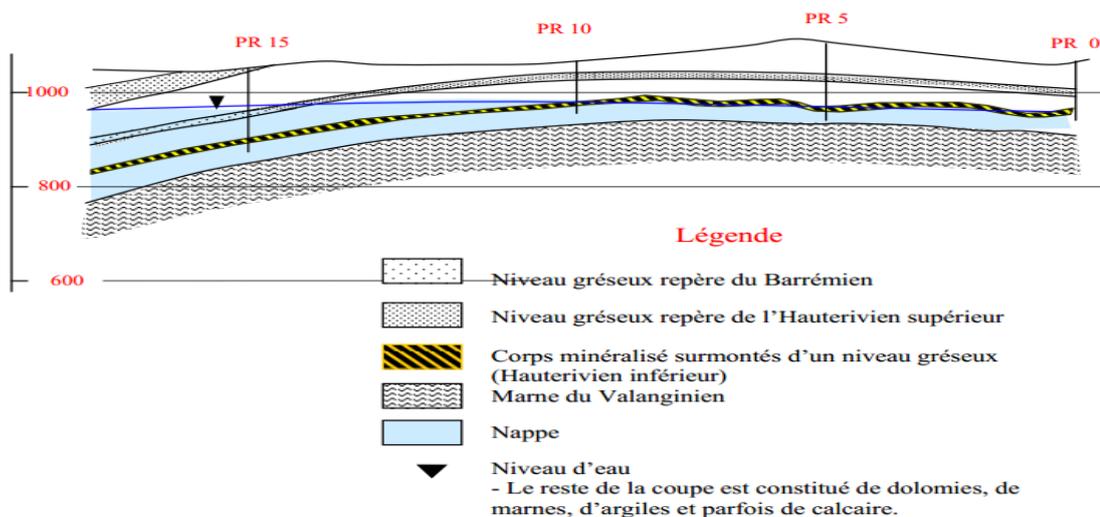


Figure 6 Coupe hydrogéologique Profil 0 – Profil 15(d'après ENOF 2003)

I.5.2. L'exhaure

La possibilité de prolonger et de maintenir l'activité de cette mine pendant au moins 10 dix ans existe, mais elle nécessite au préalable le rabattement du niveau d'eau de 30 m sous le niveau à exploiter. La préparation et la mise en exploitation des réserves situées sous le niveau exigent la réalisation d'un système d'exhaure (5 forages (6 actuellement) et 3 piézomètres de 250 m de profondeur pour chacun) pour permettre un rabattement du niveau hydrodynamique au-dessous des niveaux prévus pour l'exploitation des minerais.

Le système d'exhaure proposé est situé en dehors des travaux miniers et l'eau est puisée directement de l'aquifère sans passage dans les travaux minier.

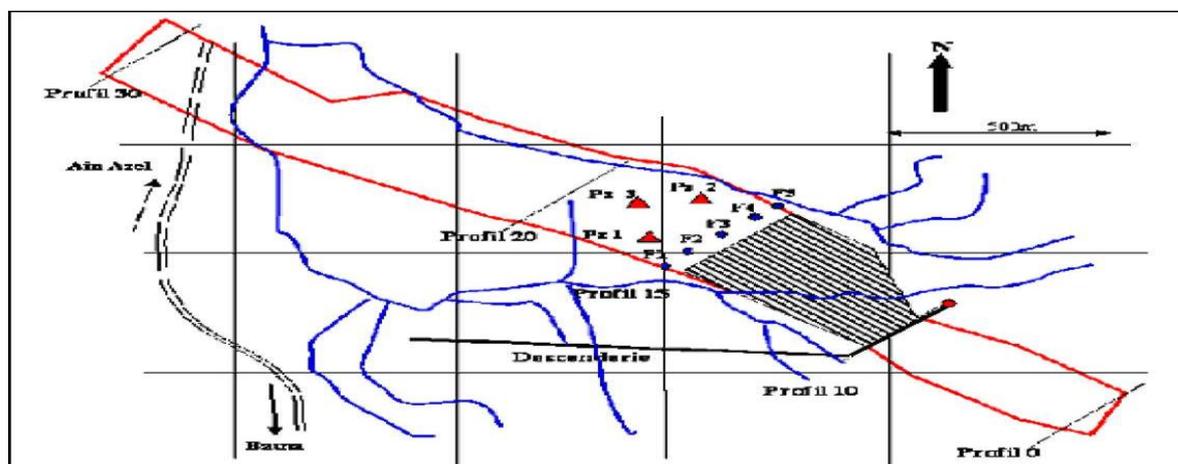


Figure 7 Situation des ouvrages (Forages et Piézomètres).

a) Confirmation de la présence d'eau

Les données inhérentes à l'hydrogéologie confirment que:

- L'aquifère est localisé dans les roches carbonatées ;
- et que l'aquifère est développé au voisinage des failles et des zones fissurées.

Cet aquifère est de (type fissural). Il est considéré comme nappe libre avec une formation valanginienne (marne) comme substratum.

1. Nappe Hauterivienne

Elle est connue partiellement dans la partie centrale du gisement, localisée dans les formations carbonatées des dolomies fissurées hématitisées et parfois cavernueuses.

Elle est bien développée à proximité des failles. Les côtes de venue d'eau sont d'environ 968,87 m dans la partie centrale, 969,27 m au niveau de la descenderie et 969,79 m dans le puits de la mine.

La charge des eaux est de direction Est-Ouest et Sud-ouest, mais, dans le côté Nord de la faille centrale, la décharge passe en directions Est-Ouest et Nord-Ouest vers la dépression d'Ain-Azel.

Donc, au niveau de cette faille, la partie centrale du gisement n'est pas influencée par une éventuelle venue d'eau, ce qui n'est pas le cas de la zone de la faille Ouest qui pourrait causer des éventuelles venues d'eau.

La nappe a été étudiée en mars 1993 et un essai de pompage a donné les résultats suivants

- Transmissivité : $4,4.10^{-4}$ m²/s ;
- Perméabilité : 7.10^{-6} m/s ;
- Débit : 203 m³/h.

2. Nappe Barrémienne

Elle est connue particulièrement dans la partie Nord-Ouest du gisement et elle est associée aux grès et dolomies gréseuses ayant pour côte piézométrique 959,48m à 967,93m.

La charge des eaux souterraines est en général de directions Est-ouest et Nord-Ouest : les venues d'eau ont une vitesse de $1,2.10^{-4}$ m/s et la pente de la surface piézométrique est de 5%.

Les caractéristiques hydrogéologiques de cette nappe ne sont pas connues et il est nécessaire de les étudier.

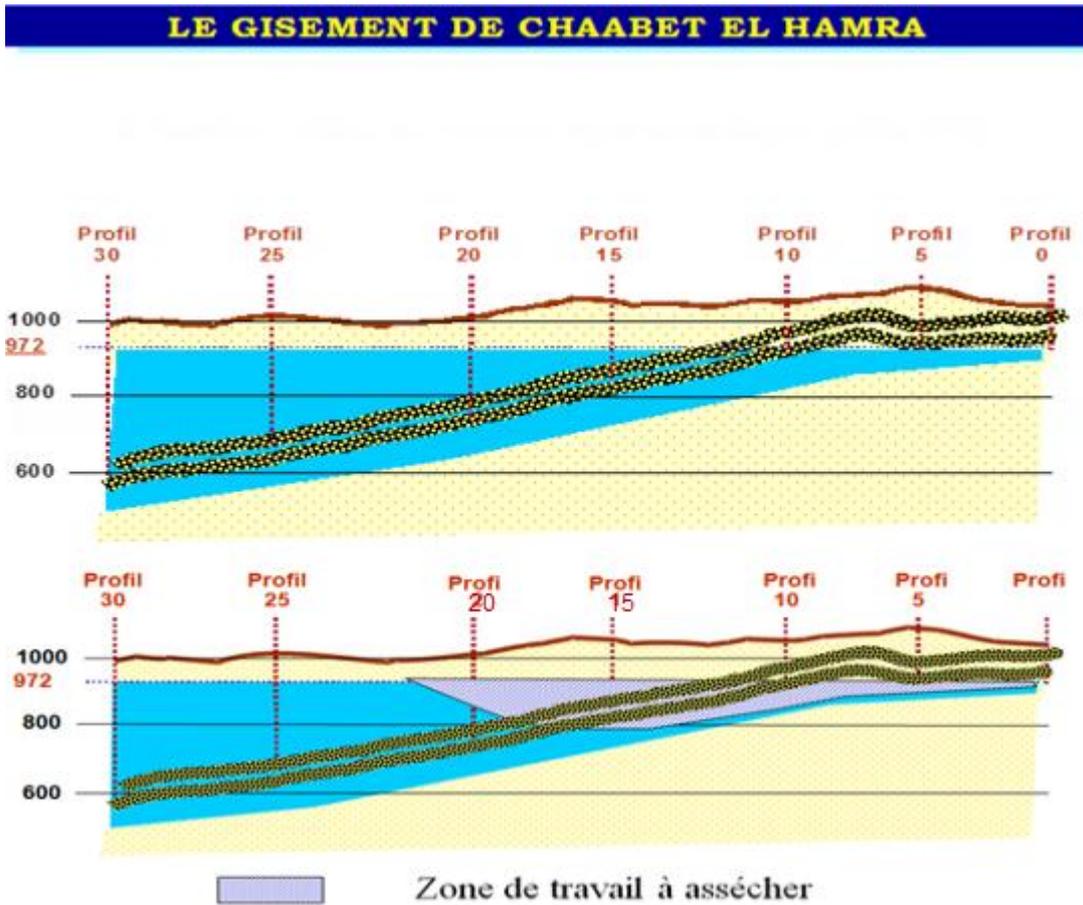


Figure 8 Cartes situations des niveaux d'eau en décembre 2005

b) Essais de pompages

Des essais de pompages par paliers ont été réalisés par compresseur puis par pompe (32 heures pour 5 paliers) avec des débits de 27 m³/h à 43,2 m³/h.

- Essai de pompage définitif de longue durée (70 h : 30 mn) avec un débit moyen de 61 à 65m³/h.
- Les niveaux d'eau ont été suivis systématiquement dans le piézomètre situé à 80 m de forage.
- Le rabattement enregistré après 70 h 30 mn est de 0,28 m.

$$X = \frac{30.70}{0,28} = 7500h \sim 11 \text{ mois.} \quad \begin{array}{l} 0.28m \longrightarrow 70h \\ 30 m \longrightarrow X \end{array}$$

Dans ces conditions le pompage sera efficace et le niveau de la nappe va atteindre la profondeur prévue (c.à.d. 30 m de rabattement).

Le volume d'eau qui serait éventuellement pompé est de l'ordre de 2 millions de mètres cubes par an. Les besoins de la mine en eau industrielle sont de l'ordre 100 000 mètres cubes par an.

Le débit prévu pour le projet est de 68 m³/h par forage, toutefois ce débit sera amélioré par la mise en place d'un système de pompage plus performant que celui utilisé lors de l'essai.

La profondeur prévue pour l'installation de la pompe était de 240 m puis corrigée en fonction de la lithologie du terrain à 220 m mais actuellement cette profondeur ne peut être atteinte à cause du double problème :

- Coincement du tubage à 216 m de profondeur donc une diminution de 15 m de la profondeur.
- Remontée du gravier dans le tubage de 10 m

c) Le piézomètre

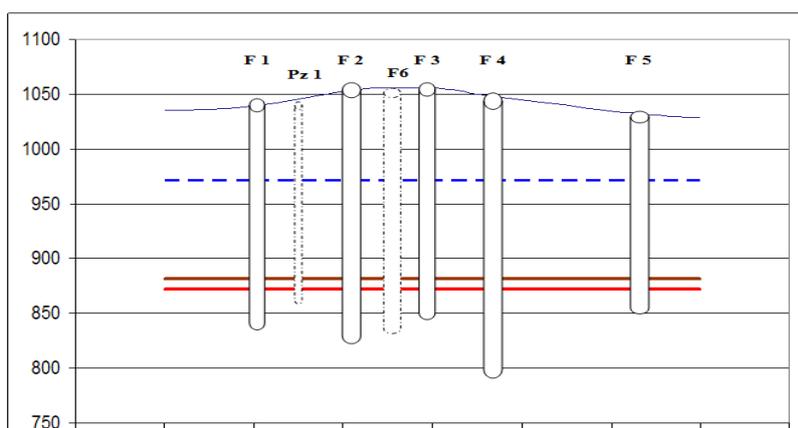
Ce dernier n'a pas encore subi des opérations conformes de développement et de nettoyage car le dernier contrôle de l'ingénieur hydrogéologue d'ANRH a révélé une décantation de 100 m de boue

- Profondeur équipée : 240 m.
- Niveau statique : 80 m.
- Niveau de boue : 150m

d) Situation Actuelle Du Système De Pompage

A fin Octobre 2010, la situation du système d'exhaure se présente comme suit :

- ❖ 01 forage et 01 piézomètre sont réalisés par l'ENOF
- ❖ 04 forages et 01 piézomètre (transformé en forage d'exploitation) sont réalisés par l'ANRH.
- ❖ L'équipement des forages est pris en charge par la direction de l'hydraulique de Sétif.
- ❖ L'exploitation est confiée sûrement à l'ADE



Coupe transversale des forages et des piézomètres aux environs profil 15 -16

1. Niveau du terrain naturel
2. Niveau statique

3. Niveau du mur de la minéralisation
4. Niveau Dynamique (rabattement prévu)

La cote finale des forages est inférieure au niveau dynamique prévu. Les travaux seront sécurisés au cours de l'exploitation minière. Les côtes de calage des pompes 1 - 3 et 5 doivent être vérifiées et revues en cas d'intervention sur ces forages.

Tableau 2 Caractéristiques des forages

N° forage	Coordonnées			Prof. prévue	Prof. réalisée
	X	Y	Z		
F01*	35 31 15	35 47 22	1 039	250	206
F02	05 31 16	35 47 25	1 054	250	233
F03	05 31 17	35 47 28	1 056	250	215
F04	05 31 18	35 47 30	1 048	250	260
F05	05 30 55	35 47 35	1 026	250	190
F06	05 31 08	35 47 08	1 044	250	220

Tableau 3 Caractéristiques des piézomètres

N° forage	Coordonnées			Prof. prévue	Prof. Réalisée	Observation
	X (°)	Y(°)	Z(m)			
Pz01	05 31 14	35 47 24	1 053	250	250	Réalisé par l'ENOF
Pz02	05 31 15	35 47 27	1 053	250	40	Abandonné *
Pz03	05 31 08	35 47 08	1 044	250	220	Transformé en forage F06

* Le rapport en cours d'élaboration par la commission qui supervise les essais de pompages de 30 jours, déterminera l'utilité du réseau piézométrique, s'il est nécessaire de réaliser le Pz 2 et éventuellement un complément de piézomètre.

Conclusion

Les objectifs du système de pompage des eaux sont les suivants :

- Rabattre efficacement le gisement ;
- Créer des conditions de sécurité d'exploitation minière souterraine ;
- Minimiser la dégradation de la qualité et de la quantité
- Assurer une alimentation en eau sûre et durable la ville d'Ain Azel en AEP

- Assurer les besoins en eau de la mine
- Baser les méthodes de gestion sur les concepts suivants : réduction, réutilisation, recyclage
- Eviter d'évacuer hors du site des eaux dont la qualité ne répond pas à la législation environnementale algérienne.

I.6. Exploitation

I.6.1. Conditions minières du gisement

a) Caractéristiques morphologiques et géométriques du corps minéralisé

La minéralisation du gisement de Chaabet El-Hamra a une structure pluri étagée, de forme lenticulaire. La zone métallifère globale constituée de lentilles se présente sous forme d'une large bande de direction Nord-Ouest (300 à 320°), d'environ 2700 m de longueur et de 300 à 600 m de largeur et à une profondeur allant de 100 à 400 m.

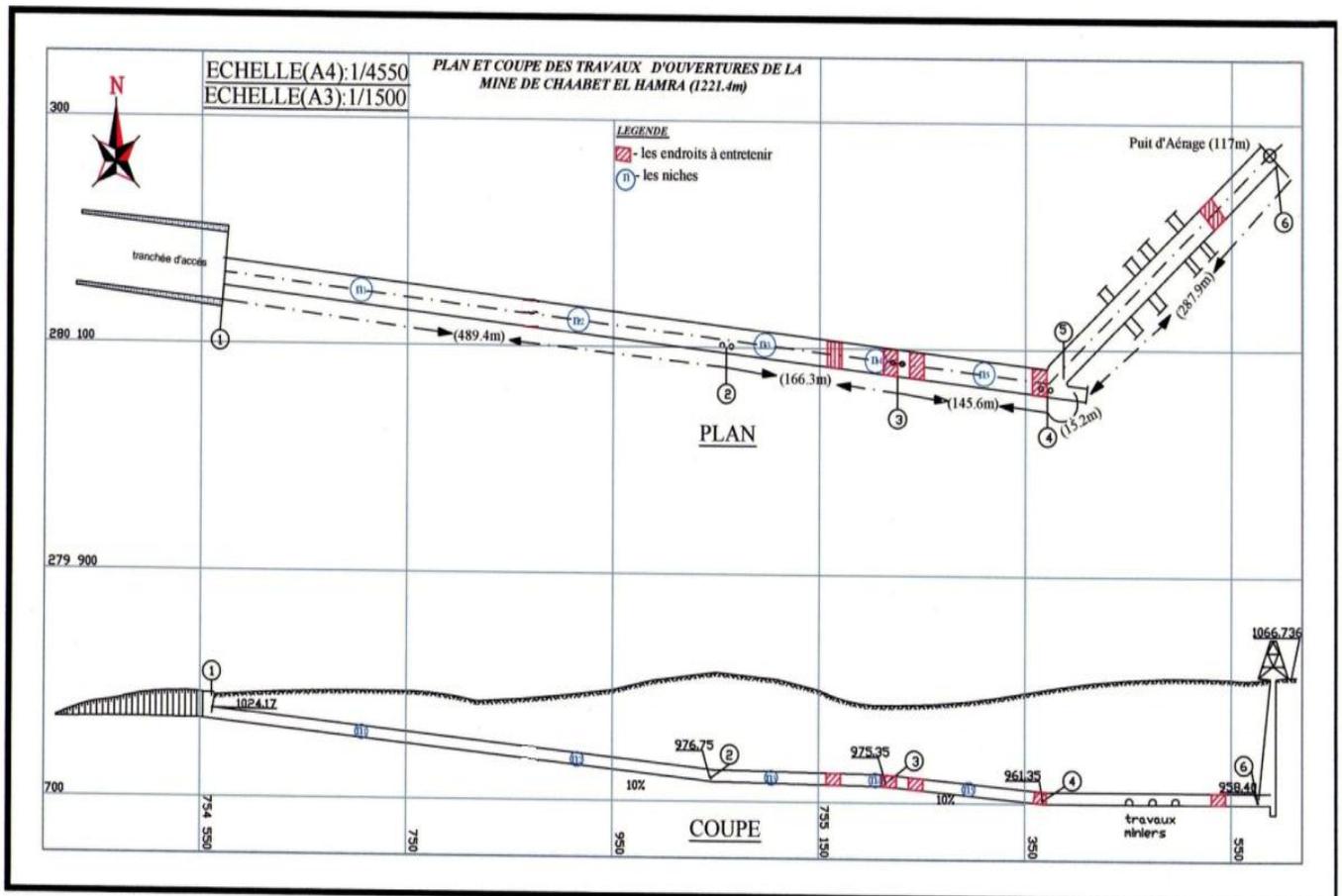


Figure 9 Plan et coupe des travaux d'ouverture de la mine de Chaabet el-Hamra

I.6.2. Méthodes d'exploitation choisies

I.6.2.1. Choix de la méthode d'exploitation

Selon la puissance, le pendage, la qualité du minerai et les épontes, les méthodes d'exploitations retenues sont :

- Des chambres et piliers abandonnés (pour les épaisseurs > 5 m).
- Traçage, dépilage et foudroyage (pour les épaisseurs < 5 m).
- Sous niveau foudroyé (pour les épaisseurs > 5 m).

Les méthodes choisies (chambres et piliers, traçage et dépilage, sous niveaux abattus, suivis d'un foudroyage) n'ont pas été éprouvées, sauf pour la méthode des chambres et piliers abandonnés (et non foudroyés) qui a été pratiquée dans le passé par les mineurs de la mine de Kherzet Youssef.

a) Méthode des chambres et piliers abandonnés (> 5 m)

C'est la méthode qui est utilisée et maîtrisée par les mineurs de Chaabet El-Hamra pour l'avoir déjà pratiquée durant plusieurs années à la mine de Kherzet Youssef.

Cette méthode consiste dans un premier temps, à tracer des chambres de 4 m de largeur, en chassant, laissant entre elle des piliers de 4 m de largeur et de 12 m de longueur, et dans un deuxième temps, de récupérer en rabattant une partie des piliers par creusement de refont de 4 m on abandonne des piliers de 16 m² de section pour une section de chambre abattue de 40 m².

Cette méthode nécessite une bonne connaissance, ainsi qu'un suivi du comportement des piliers abandonnés, du fait de leur hauteur relativement importante (10 à 12 m d'épaisseur de lentille), et se caractérise par un taux élevé de perte minerai de l'ordre de 25 %

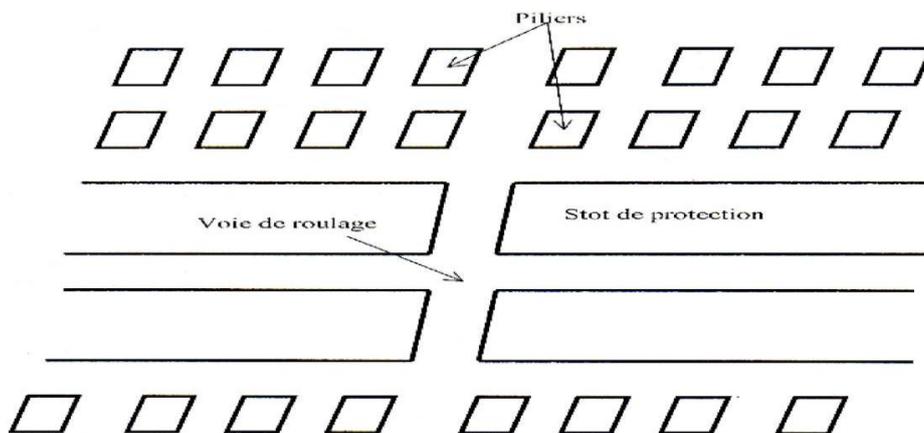


Figure 10 Méthode des chambres et piliers abandonnés.

❖ **Méthode d'exploitation pratiquée à Chaabet El-Hamra**

La méthode d'exploitation utilisée par la mine de Chaabet El-Hamra est une combinaison des méthodes citées ci-dessus qu'on pourrait appeler "**méthode par chambres et piliers résiduels**".

- L'ouverture des chantiers d'abattage se fait par traçage, à raison de chaque 4 m, pour une moyenne de 20 m de longueur (selon la longueur de la lentille).
- La configuration des chantiers d'abattage est celle des chambres et piliers surdimensionnés, jusqu'à 12 m de longueur et 4 m de largeur, avec la création des galeries de jonction entre les traçages.
- La réduction des piliers surdimensionnés se fait en se rabattant et en créant des refontes-galeries (en laissant des piliers de section 4m x 4m).
- La réduction des dimensions des piliers se fait jusqu'à 2m x 2m (piliers résiduels).
- -Les piliers résiduels sont laissés tels quels, et non torpillés, à cause des charges supplémentaires qu'aurait entraîné une telle opération.

b) L'exhaure

Au cours de creusement en aval pendage les venues d'eau accumulées au niveau des fronts de taille seront évacuées à l'aide de pompes de chantier vers le travers-banc puis gravitaire-ment vers le puisard ou il est installé une pompe immergée qui refoule de l'eau au jour.

c) Le soutènement

Dans certaines zones où la pression des terrains est élevée, le soutènement par les cintres métalliques ne peut pas supporter ces contraintes, dans ce cas le soutènement utilisé est celui de charpentes métalliques assemblées par boulonnage, le garnissage se fait en bois.

Au niveau des roches friables, les excavations sont soutenues par des cintres métalliques, espacés l'une de l'autre d'environ 0,8 à 1,5 m, le garnissage est fait par des plaques métalliques ou par dalles en béton ou parfois en bois.

Le soutènement provisoire n'existe pas dans la mine Chaabet El-Hamra.

d) Le marinage et le transport

Le tout venant abattu sera évacué du front de taille au jour comme suit :

- ❖ Par un chargeur transporteur sur distance de 50m, du font de taille vers le lieu de chargement,

- ❖ Par camions navettes du lieu de chargement jusqu'au jour sur une distance de 1 500m.

e) L'aération de la mine

L'aération de la mine doit être tenu constamment. Il sera assuré par un aération principal au moyen d'un ventilateur, installé en surface, à l'embouchure du puits d'aération.

Il sera aussi assuré par un système de ventilation secondaire au moyen de ventilateurs installés le long des galeries.

Ce système combiné permettra

Le refoulement de l'air frais aux fronts de taille, et l'aspiration de l'air vicié des fronts de taille.

Pour éviter le mélange de l'air frais et de l'air vicié, des cloisons seront installées au milieu des galeries de jonction.

I.7. Traitement de minerai

I.7.1. Traitement du minerai

L'usine de traitement du complexe minier de Kherzet-Youssef, qui a servi à l'enrichissement du minerai de Plomb et de Zinc de l'ancienne exploitations, s'adapte convenablement pour le traitement du minerai de Zinc provenant de Chaabet El-Hamra.

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 :

I.7.2. 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.

I.7.3. 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.

I.7.4. 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 % (ENOF 2013)

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-Youssef sur une distance de 12 Km.

I.7.5. Description de la laverie de Kherzet-Youssef

L'usine est conçue pour le traitement de minerai plomb/zinc de la mine de Kherzet-Youssef, mais après le coup d'eau de 2 juin 1990, qui a causé l'inondation de la mine, l'usine a continué à fonctionner avec l'ouverture de la mine de Chaabet El-Hamra distante d'une dizaine de kilomètres. L'usine présentait initialement presque toutes 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 T V 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 T V de Chaabet El-Hamra, et répondent au souci d'économie de l'énergie et de 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 400t/j. la réduction de T V de 0-300 mm jusqu'à 0-20 mm s'effectue en deux étapes.

- **Première partie**

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 N⁰2.

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 N⁰3, 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 de libérer les grains minéraux de Zn. Le cycle comprend une opération principale : une de contrôle et trois opérations d'épuration.

Le drainage des concentrés vers les épaisseurs se fait par l'intermédiaire de pompes. Après épauissage, 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 marin à l'unité d'électrolyse de zinc de Ghazaouet le principal client.

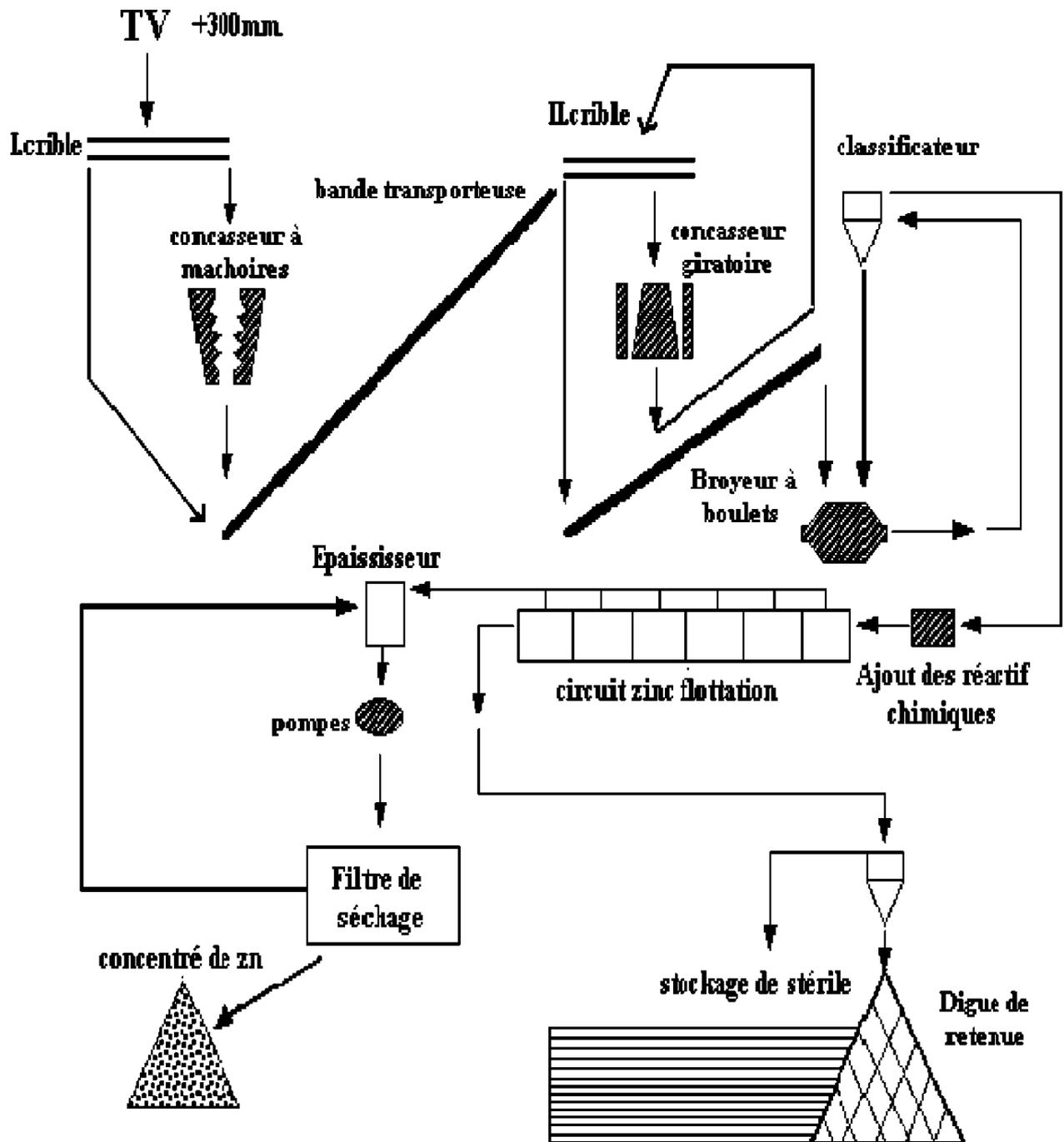


Figure 11 Schéma de la laverie

I.8. La pollution

Par définition, le mot « pollution » désigne la dégradation d'un milieu qui se produit par l'introduction, directe ou indirecte, de substances nocives pour l'environnement ou par la modification de ses caractéristiques biologiques, chimiques ou physiques (O.Q.L.F. 2004), et aussi par l'activité humaine de substances, de chaleur ou de bruit dans l'environnement, susceptibles de contribuer ou de causer :

- Un danger pour la santé de l'homme ;
- Des détériorations des ressources biologiques, des écosystèmes ou, des biens matériels ;
- Une entrave à un usage légitime de l'environnement. (BRGM. 2008) ;

I.8.1. Principaux éléments présents dans l'eau

1. Cations majeurs

1.1. Calcium

Le calcium est un élément (métal) alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates surtout à l'état d'hydrogène-carbonaté et en quantité moindre sous forme de sulfate et de chlorure. Il est le composant majeur de la dureté de l'eau, et l'élément dominant des eaux naturelles. Lorsque sa teneur dans l'eau dépasse la norme, l'organisation mondiale de la santé (OMS, 2008) recommande pour l'eau destinée à la consommation humaine une valeur limite de 75 mg/l et 75-200 mg/l aux normes Algériennes. (Belkhiri, 2011)

1.2. Magnésium

C'est un élément dominant dans l'eau, le 7^{ème} élément le plus abondant à l'état naturel, il constitue un élément significatif de sa dureté, sa teneur dépend du terrain traversé, il dépasse rarement 15 mg/l dans les eaux naturelles, par contre dans les eaux minérales il peut largement dépasser cette valeur. (Belkhiri, 2011)

1.3. Sodium

C'est le 6^{ème} élément le plus abondant à l'état naturel, il est toujours présent dans l'eau en proportion très variable. Aucune norme ne limite la concentration en sodium dans les eaux potables. Le sodium joue un rôle important dans l'agriculture, pour l'irrigation à cause du fait de son action sur la perméabilité des sols, mais il peut présenter des inconvénients pour certains malades en grandes quantités. (Belkhiri, 2011)

1.4. Potassium

C'est le 7^{ème} élément le plus abondant à l'état naturel, beaucoup moins abondant que le sodium, et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l. il ne représente aucun inconvénient particulier. (Belkhiri, 2011)

2. Anions majeurs

Outre les bicarbonates HCO₃, les deux autres anions majeurs des eaux naturelles sont les chlorures et les sulfates.

2.1. Chlorure

L'eau contient toujours des chlorures en proportion très variable, les eaux provenant des régions granitiques sont pauvres en chlorure alors que les eaux des régions sédimentaires en contiennent davantage. La teneur en chlorures augmente généralement avec le degré de minéralisation d'une eau. Dans l'eau potable, la concentration maximale acceptable est de 200 mg/l (OMS, 2008). Si la teneur est supérieure à cette valeur, elle affecte le goût de l'eau. (Belkhiri, 2011)

2.2. Sulfate

Les eaux naturelles contiennent pratiquement toujours des sulfates, en proportion très variables. Leur présence résulte de la légère solubilité du sulfate de calcium des roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches (la pyrite). Elles proviennent également des eaux usées industrielles. De plus l'oxydation de H₂S et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère entraîne lors de précipitations l'acidification des lacs et des rivières ainsi qu'une augmentation de la teneur en sulfates. (Belkhiri, 2011)

I.8.2. Les métaux et les éléments traces

1. Généralités sur les métaux et les éléments traces

Les métaux sont les éléments du tableau de classification périodique des éléments situés à gauche de la diagonale définie par le bore, le silicium, le germanium, l'antimoine, et le polonium (Figure. 2.1), à l'exception de l'hydrogène. Ils ont en commun les propriétés suivantes :

- ✓ Structure cristalline à température ambiante, à l'exception du mercure qui est liquide
- ✓ Aspect brillant,
- ✓ Ductilité, malléabilité,
- ✓ Électrons de conduction faiblement liés, d'où une propension à former des Cations et des liaisons ioniques,
- ✓ Bonne, voire excellente conductivité thermique et électrique.

Parmi ces éléments, ceux que l'on désigne sous le terme de *métaux lourds* sont ceux dont la masse volumique est supérieure à 5-6 g/cm³. On appelle également parfois « métaux lourds » les métaux situés à partir de la quatrième période du tableau périodique — c'est-à-dire à partir du potassium. Néanmoins l'usage courant fait que cette dénomination assez floue implique une notion négative de toxicité, ce qui n'est pas anodin puisque la majorité des métaux lourds sont toxiques.

Dans la suite nous parlerons indifféremment de métaux lourds, de métaux traces ou d'éléments traces métalliques (ETM). En effet, sauf en cas de pollution très importante, les métaux toxiques sont présents en faible ou très faible concentration dans le sol et l'eau. De manière générale, on qualifie d'élément trace tout élément dont la concentration moyenne dans la croûte terrestre est inférieure à 0.1 % (ou 1000 ppm). Symétriquement, on définira les éléments majeurs comme étant ceux dont la concentration est supérieure à 0.1 %. Dans la nature, la majorité des éléments sont des éléments traces ; on ne dénombre que 12 éléments majeurs représentant plus de 99 % de la composition de la lithosphère. (PASCAL. 2000)

Tableau 4 Pourcentage des éléments majeurs dans la croûte terrestre

O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	Ti	H	P	Mn
46.6 %	27.7 %	8.1 %	5.0 %	3.63 %	2.80 %	2.50 %	2.00 %	0.44 %	0.14 %	0.11 %	0.1 %

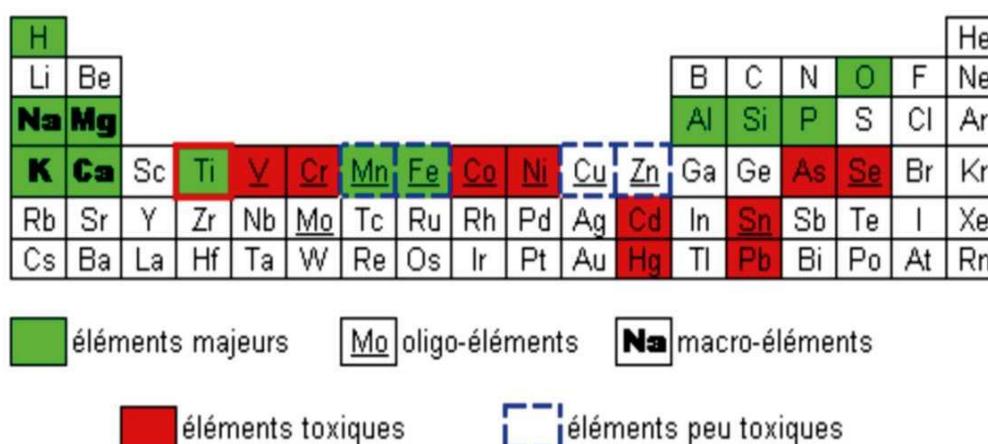


Figure 12 Fonction de quelques éléments dans l'organisme.

2. Principaux métaux étudiés (ANNEXE II)

Les principaux métaux étudiés sont le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium.

I.8.3. Les polluants

a. Les principaux types de polluants

A l'échelle de la planète, le nombre de polluants est considérable. En 1977, la société américaine de chimie en dénombre 4 millions 70 000 suspects d'action cancérigène (Castany, 1982).

L'origine des polluants est multiple: domestique, urbaine, industrielle et agricole. Tout en distinguant les polluants miscibles des non-miscibles, on les classe en polluants physiques, chimiques et biologiques.

1. Les polluants physiques

Au nombre de trois, les principaux agents physiques de la pollution sont: la chaleur, le transport des matières solides en suspension et la radioactivité.

1.1 La chaleur

L'élévation de la température de l'eau surtout de surface a un impact écologique sur la faune et la flore aquatique (prolifération des microorganismes et développement des algues). Elle diminue la solubilité de l'oxygène, déficit qui sera renforcé par l'accroissement de l'activité biologique qui en consomme.

1.2 Les matières solides en suspension

Elles sont introduites par les précipitations et les eaux de surface. Certaines très petites particules de l'ordre du micron peuvent ainsi transiter et atteindre parfois les nappes profondes surtout quand il s'agit des calcaires fissurés ou d'autres formations dont la porosité est élevée.

1.3 La radioactivité

C'est potentiellement le plus dangereux des polluants physiques, aussi tous les rejets doivent être interdits, sinon sévèrement réglementés et contrôlés.

2. Les polluants chimiques

Parmi les polluants chimiques, les composés d'azote, nitrites et nitrates sont très importants. Responsables de la dégradation de l'hémoglobine, ils peuvent être à l'origine de nitrosamines cancérigènes. Les composés de l'azote ne sont pas présents dans les roches; ils proviennent principalement des engrais utilisés en agriculture et quelquefois d'intenses activités bactériennes liées à l'azote de l'air (zone aride).

3. Les polluants organiques et les microorganismes

L'eau souterraine est le vecteur des microorganismes pathogènes ou pas. Le pouvoir auto-épurateur du sol est très efficace. Une pollution organique diminue avec la profondeur et se dissipe généralement avant d'atteindre la nappe souterraine, de ce fait l'eau souterraine en est pratiquement dépourvue dans les conditions naturelles. Un problème particulier peut se poser précisément pour les aquifères karstiques dont le pouvoir auto-épurateur naturel est faible ou quasiment nul. Il faut leur assurer une minutieuse protection et il en est de même pour les aquifères superficiels surtout quaternaires de grande perméabilité qui sont les plus exposés aux eaux de surface trop polluées.

b. Les principales sources de pollution

La pollution des eaux de surface et des eaux souterraines est provoquée généralement par les rejets des activités domestiques, urbaines, agricoles et industrielles pour lesquelles l'eau constitue le vecteur de transport et de dissémination idéale. On peut classer les différentes sources de pollution en trois grandes catégories: les pollutions domestiques et urbaines, les pollutions agricoles et les pollutions industrielles.

1. La pollution d'origine domestique et urbaine

Elle englobe les rejets (eau usées domestiques et urbaines), les eaux pluviales qui lessivent les rues et les grandes voies de communication, et les eaux utilisées pour la climatisation des immeubles etc. Les rejets solides des décharges publiques en majorité non contrôlées et sauvages contribuent à la pollution de l'environnement urbain d'une manière générale et à la pollution des eaux superficielles et des nappes phréatiques d'une manière particulière suite à leur lessivage par les eaux météoriques. La matière organique se décompose (la matière inorganique est parfois insoluble), percole et s'infiltré pour atteindre les nappes phréatiques. Enfin les eaux usées qu'elles soient urbaines, domestiques ou des rejets industriels, sont directement évacuées dans les oueds sans aucun traitement préalable. Elles menacent les aquifères telles que les nappes des alluvions quaternaires ou les aquifères qui sont très vulnérables.

2. La pollution d'origine industrielle

Elle est la plus importante et générée principalement par les industries minières, par les transformations des métaux et par les installations de traitement des minerais métalliques (l'activité métallurgique). Cette dernière libère une grande variété de substances métalliques qui contribue de façon décisive à la mise en circulation des ETM (Zn, Pb, Cd, Cu) et à leur distribution dans les sols, les sédiments, les nappes d'eaux et les végétaux

I.8.4. Le transfert des ETM de la surface du sol vers les nappes souterraines

Les milieux traversés par les ETM, de la surface du sol vers les nappes d'eaux souterraines sont:

1. La zone non saturée

La zone non saturée est comprise entre le sol et la surface de la nappe d'eau souterraine. Cette zone est de nature très diverse suivant le type de roche et son épaisseur variable conditionne en grande partie les temps de transfert des polluants vers la nappe d'eau souterraine. Dans ce milieu, les transferts des ETM se fait sous l'influence de la gravité.

Les propriétés du sol influant sur le transfert des ETM vers les nappes d'eaux sont la porosité, la texture, la composition chimique et minéralogique, l'acidité, l'état d'oxyde réduction et la teneur en matière organique.

- **La porosité du sol** : 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.

- **La texture du sol** : 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 au moins grossières, sans tenir compte de la matière organique présente. La texture du sol influe beaucoup sur le transfert des ETM vers les nappes d'eaux souterraines. Un sol grossier et sableux est peu compact, bien aéré et bien drainé, retient peu d'eau chargée en ETM qui va circuler rapidement vers les nappes d'eaux souterraines. Tandis qu'un sol fin ou argileux retient beaucoup d'eau chargée en ETM et devient plastique et humide.

- **La composition chimique et minéralogique** : notamment la richesse relative en minéraux argileux, influe fortement sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les EMT apportés par infiltration.

- **La teneur en matière organique** : elle joue un rôle à la fois sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les ETM et sur les réactions biochimiques amenant à leur dégradation.

2. La zone saturée

La zone saturée est située dans le sous-sol dont elle constitue l'aquifère. Dans cette zone, les transferts des polluants sont essentiellement latéraux selon la direction générale de l'écoulement de la nappe. Les propriétés du sous-sol qui influent sur le transfert des ETM vers les nappes d'eaux souterraines sont: la porosité et la perméabilité, la fracturation et les discontinuités créant des voies de circulation préférentielle.

- **La porosité et la perméabilité** : la porosité et la perméabilité de la roche permettent de constituer des réservoirs pour les eaux souterraines chargées en ETM. Les sables, les calcaires et les grès constituent la majorité des aquifères.

- **Le réseau de fracturation** : lorsque la plupart des roches constituant le sous-sol sont peu poreuses ou imperméables, les eaux chargées en ETM suivent le réseau de fracturation pour rejoindre les nappes d'eaux souterraines.

I.8.5. L'impact environnemental suite à l'exploitation du gisement

En raison de l'absence des installations de traitement et d'élimination des déchets dans notre pays, les usines de traitement des minerais ont été contraintes depuis plusieurs années à stocker les rejets les plus toxiques au sein des sites industriels qui les produisaient. Ces rejets stockés dans de mauvaises conditions occasionnent une importante pollution des sols environnants, de l'atmosphère, et des nappes d'eaux, ce qui a causé de graves maladies à la population contrainte, malgré elle à respirer et à inhaler tout genre de poussières toxiques, ce qui est le cas de la région de Ain Azel.

L'impact environnemental suite à l'exploitation du gisement de Chaabet El-Hamra est celui de la digue des stériles stockés à l'air libre dans le complexe minier de Kherzet-Youssef près d'une nappe d'eau. Les dépôts de stériles rejetés par l'usine de traitement, sont saturés de produits toxiques tels que *cyanure*, xanthate, et sulfate de cuivre, En effet l'utilisation des produits chimiques à base de cyanure est très répandue dans l'industrie minière pour l'enrichissement des minerais sulfurés. De façon typique, le tout venant de la mine est finement broyé puis agité pendant des heures dans une solution contenant une quantité du cyanure (xanthate), après la récupération du zinc. Une solution contenant une quantité importante de cyanures libres est obtenue, elle est dite (solution stérile), cette dernière est déposée à l'air libre, sur des terrains vagues, subissant ainsi des aléa climatiques et est souvent lessivée par des pluies.

Les lixiviats ainsi formés sont riches en cyanure, pénètrent en profondeur provoquant la pollution du sol et des nappes d'eaux souterraines peu profondes, ce qui présente un très grand danger pour la santé des habitants du village et pour la flore et la faune.

L'eau de l'exhaure est rejetée directement dans l'oued le plus proche de la mine ; ces eaux polluées ont été toujours utilisées pour l'irrigation des terres par les paysans depuis l'ouverture de la mine.

De plus le climat de la région de Ain-Azel est caractérisé par des vents forts qui entraînent ainsi une pollution de l'atmosphère marquée par un grand brouillard blanc de poussières toxiques qui proviennent de la digue des stériles du complexe minier de Kherzet Youssef.

Pendant l'exploitation de la mine de Chaabet El- Hamra, les activités d'extraction ont un effet direct sur la morphologie des lieux en créant des fosses d'exploitation, des piles de roche stérile et de minerai ou des orifices à flanc de coteau servant d'entrée de mine. Ces infrastructures engendrent des modifications sur les configurations hydrographiques et peuvent même parfois affecter les micro-climats. L'activité sur les sites génère de la poussière, du bruit et nécessite l'utilisation d'eau et d'énergie pour les forages. La détérioration de la qualité des eaux de surface, la perte d'habitats autant pour la faune que pour la flore, le sur pompage des nappes d'eau souterraine, les risques d'érosion, d'éboulis ou affaissement, de déversement d'hydrocarbures sont des impacts potentiels à considérer. (Imchal et Rezigat, 2008).

I.8.6. Impacts sur l'environnement

1. Impact sur les eaux souterraines

Le creusement des galeries modifie profondément les voies naturelles de circulation des eaux souterraines et crée des exhaures à flanc de collines (Bril et Floc'h, 2001).

L'étude réalisée par Attouchek, montre que les eaux provenant de la nappe mio-plio-quaternaire n'ont pas été contaminées par les ETM (Pb, Zn, Cd et Cu) dont les teneurs sont inférieures aux normes admises.

L'analyse des eaux de la nappe barrémienne traversée par la mine de Kherzet Yousef et qui représente le puits de mine, montre que les ETM qui font l'objet de l'étude d'Attouchek, à savoir le zinc et le plomb, se trouvent sous forme particulière et dissoute dont les quantités sont supérieures aux précédentes. Plus de 90% du zinc se retrouve dans la fraction dissoute de l'eau Attouchek, le plomb se présente également sous forme dissoute avec une fraction pouvant dépasser 70%.

L'analyse des eaux provenant de la nappe barrémienne révèle une contamination par les ETM mise en évidence par des valeurs supérieures aux normes définissant les limites de qualité de consommation (**Tableau 5**).

Tableau 5 Comparaison des teneurs en ETM des eaux de la nappe barrémienne aux normes (OMS et AFNOR) (ATTOUCHEK, 2006)

Element métallique	Teneurs en mg.L ⁻¹		Norme OMS (mg.L ⁻¹)	Norme AFNOR (mg.L ⁻¹)
	Période sèche	Période humide		
Pb	0,10 - 0,38	0,15 - 0,50	0,1	0,5
Zn	2,40 - 5,75	2,80 - 8,25	3	5

Les données précédemment citées concernant les eaux provenant de la nappe barrémienne, nous amènent à penser à une forte contamination des cultures, de la végétation et de toute la plaine d'Ain Azel. En effet, comme vu précédemment, ces eaux sont utilisées pour l'irrigation des terres agricoles situées à proximité du complexe minier de Kherzet Yousef.

2. Rejet des eaux résiduaires

La laverie du complexe minier de Kherzet Yousef et la digue de stérile sont situées à proximité de l'Oued Ennza (figure 13) qui est un cours d'eau dont l'écoulement est à caractère temporaire, donc généralement à sec la majeure partie de l'année à l'exception des périodes de grandes pluies.



Figure 13 Complexe minier de Kherzet Yousef (REZIGAT ; IMCHAL. 2006)

Les eaux résiduaires qui résultent des activités de traitement des minerais polymétalliques sont les suivantes :

- Les eaux des processus de traitement de minerai au niveau de la laverie. Ces eaux moyennant un réseau de canalisations aménagées à cet effet, sont acheminées vers l'aire de stockage du stérile. Elles sont par la suite rejetées dans l'Oued Ennza ;
- Les eaux usées domestiques et de refroidissement des machines, sont également rejetés dans le cours d'eau précédemment cité.

3. Contamination par les métaux lourds

Les déchets miniers sont rassemblés en terrils ou en bassins de décantation qui contiennent plusieurs centaines de milliers à quelques millions de tonnes de stériles riches en ETM. De plus, le broyage du minerai, préalable nécessaire au traitement du minerai, les a réduits en une poudre fine qui augmente la surface spécifique totale et donc les possibilités de contact entre les eaux et les phases solides porteuses des éléments traces métalliques.

L'étude des eaux résiduaires contenues dans la digue et celles se trouvant déversées dans l'Oued Ennza effectuée par Attouchek. Révèle une contamination par le plomb, le zinc et le cadmium. Les teneurs de ces polluants avaient tendance à baisser pendant la période humide comparativement à celles obtenues pendant la saison sèche, ce qui peut être expliqué par l'effet de dilution pouvant avoir lieu en raison des précipitations.

La fraction retenue sous forme dissoute représente moins de la moitié des ETM ; le reste est sous forme particulaire où les polluants métalliques sont fixés par les matières en suspension. En effet, l'étude réalisée par Attouchek, montre ce qui suit :

- La fraction de zinc fixée par les MES (matières en suspension) dans l'Oued Ennza peut dépasser 60% alors que dans la digue elle est de l'ordre de 57% ;
- Dans l'Oued Ennza et la digue, les proportions de plomb sous forme particulaire dépassent respectivement 50 et 60% ;
- La fraction particulaire du cadmium dans les eaux présentes dans l'Oued Ennza et dans la digue peut dépasser respectivement 60 et 50%.

Les complexes organo-métalliques sont constitués des MES, responsables de la rétention des ETM présents dans les eaux résiduaires. Ils sont des colloïdes représentés par des micelles argileuses et des bactéries responsables de la complexation des métaux lourds.

4. Autres contaminants

Le traitement des minerais polymétalliques fait appel à l'usage de réactifs cyanurés. Dans le cas de l'étude d'Attouchek, il s'agit du cyanure de sodium (NaCN) utilisé comme agent déprimant.

Les cyanures, complexes inorganiques, se forment avec le fer, le cuivre et le zinc et aboutissent à la formation de complexes persistants dans l'environnement ; ils se lient également avec les composés soufrés pour former des thiocyanates.

Le cyanure libre est la forme la plus toxique de ce contaminant. Il résulte de la dissociation du cyanure simple en milieu aqueux.

Il est peu probable de constater un empoisonnement de l'être humain par les cyanures contenues dans les eaux usées minières (**Guide canadien d'évaluation des incidences sur la santé. 1999**).

Néanmoins, ce polluant peut être dégradé dans l'eau sous l'effet des rayonnements solaires (les rayonnements UV) observés durant une longue période annuelle. Ce type de traitement naturel nécessite la rétention des eaux contaminées dans des bassins ayant de grandes surfaces. Mais en période de gel pendant l'hiver, cette dégradation ne peut avoir lieu, ce qui aggrave la pollution du

milieu récepteur qui se fera sentir pendant la période printanière. De ce fait, il devient nécessaire de récupérer toutes les eaux polluées rejetées de novembre à avril et de prévoir un traitement adapté ainsi qu'une gestion des boues contaminées.

La contamination hydrique du site de Kherzet Youcef peut également provenir des boues et des eaux de traitement du minerai qui contiennent différents réactifs ayant servi lors de la flottation pour l'enrichissement du minerai ainsi que des traces de graisse et d'huile provenant de l'entretien des équipements (Potvin, 2004 in Attouchek, 2006). Ces eaux résiduelles sont acheminées vers la digue avec les résidus de traitement.

La composition des rejets est la suivante :

- La partie liquide est constituée d'eau, de solides dissous et de faibles quantités de réactifs non consommés lors du processus de flottation ;
- La partie solide est constituée des résidus.

Potvin cite que les concentrations des réactifs de flottation qui entraînent la mort de 50% des individus d'espèces de poissons et des organismes aquatiques varient entre 0,05 et 10 000 ppm (TL_{50}). Les réactifs ont été classés suivant un ordre de toxicité décroissant comme suit :

- Le cyanure de sodium (TL_{50} de **0,05 à 10 ppm**) ;
- Les xanthates (TL_{50} de **0,18 à 1,8 ppm** pour Na isopropyl xanthate chez la truite arc-en-ciel) ;
- Dithiophosphates (TL_{50} de **0,1 à 1,0 ppm** pour le Na di-isopropyl Dithiophosphates chez *Daphnia magna*). Par ailleurs, l'analyse environnementale de la toxicité de ces composés doit tenir compte des conditions de l'exploitation minière (dosage et concentrations résiduelles). Sachant que les concentrations rencontrées sont généralement inférieures à 2 mg.L^{-1} et ne dépassent que rarement 4 mg.L^{-1} , les études réalisées s'intéressent aux composés toxiques dont les teneurs engendrent des impacts écologiques notoires. Parmi ces composés, elle cite les xanthates et certains agents moussants tels que le pentanol, le propylène glycol, l'huile de pin et l'acide cérylique.

5. Drainage minier acide (DMA) (ANNEXE III)

Le drainage minier est important mais ne fait pas l'objet de notre travail.

2. Impact sur le sol

L'utilisation des explosifs fragilise les zones riches en éléments traces métalliques, en multipliant les réseaux de microfissures. Il en résulte une augmentation importante de la perméabilité des zones

exploitées, même si les anciennes galeries sont parfois remblayées avec les résidus du traitement (Bril et Floch, 2001, *in* Bousdira).

Les travaux d'ATTOUCHEK, ont révélé qu'en 2004, durant la période d'activité du site minier, une pollution élevée en Pb et Zn a été observée aussi bien dans les eaux, que dans le sol et le sédiment de la région d'Ain Azel, bien supérieure aux normes maximales admises.

Cependant, les travaux de Medkour, 1994, montrent qu'en 1988 dix ans après la reprise de l'exploitation du gisement de Kherzet Youcef, les teneurs étaient inférieures à celles obtenues par Attouchek, 26 ans après l'exploitation du gisement.

Les travaux de Medkour et d'Attouchek prouvent que l'accumulation des métaux lourds au niveau du sol de Kherzet Youcef est fortement liée à la durée de fonctionnement et à l'activité de la laverie.

Ceci est en accord avec les résultats expérimentaux de Bousdira, qui, après 3 ans d'arrêt d'activités du complexe minier, montrent des teneurs en Zn et en Pb, dans la partie superficielle (30cm) des sols et des sédiments, inférieures aux normes admises.

Les résultats obtenus peuvent s'expliquer en partie par le lessivage des polluants et ceux des minerais en place, car les prélèvements sont effectués au niveau d'un sol alluvionnaire constitué de sables, marnes, grès et de limons. De plus, la nature perméable du sol favorise la migration des polluants parmi lesquels on retrouve le zinc caractérisé par une grande mobilité.

3. Impact sur les sédiments des cours d'eau

L'impact le plus évident (mais le moins connu) des travaux miniers sur les sédiments est l'augmentation dans des proportions considérables des surfaces spécifiques des matériaux concernés. Ceci résulte du fait de la fragmentation des roches lors des tirs à l'explosif nécessaires à l'abattage du minerai et lors du broyage qui précède le traitement.

A chaque période pluvieuse, les stériles et les anciennes galeries sont soumis à une forte érosion. En effet, à chaque fois, plusieurs tonnes de déchets miniers, c'est à dire plusieurs dizaines de kilogrammes d'ETM sont transportés vers le réseau hydrographique sous forme de MES. Il s'agit du mode principal d'exportation de ces éléments (Bril et Floch, 2001).

Les ETM se retrouvent dans le sol, le sédiment et les eaux à partir des affleurements du gisement polymétallique de Kherzet Youcef en chapeau de fer qui constituent des lieux d'oxydation où on retrouve des minerais polymétalliques de fer, plomb, zinc et autres éléments métalliques.

II.1.Méthodologie du travail

Le but de notre travail est d'analyser les éléments traces et majeurs dans l'eau prélevée au niveau de la mine de Chaabet el-Hamra (région de Ain Azel), par des méthodes différentes au spectrophotomètre à UV-Visible et à l'absorption atomique.

On a prélevé 30 échantillons d'eau au niveau des forages de la mine de Chaabet el Hamra et dans la commune d'Ain Azel (Forage ADE, piscine, restaurant) et au niveau du puits de la mine de Kherzet Youcef en Avril 2013. Dans ce travail on a utilisé six échantillons au niveau des forages de la mine de Chaabet el-Hamra et un échantillon au niveau du puits de Kherzet Youcef.(Figure A)

II.2.Technique d'échantillonnage (ANNEXE IV)

II.2.1. Analyse des eaux

a. Mesure de potentiel d'hydrogène (PH)

1) Principe

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.

2) Réactif et appareil

- Solution tampon.
- pH-mètre.
- Becher de 250 ml.

a. Mode opératoire

- Brancher le pH-mètre, le laisser se stabiliser pendant quelques minutes, installer les électrodes aux entrées correspondantes sur l'appareil.
- Etalonner l'appareil à l'aide d'une solution tampon. Ensuite rincer l'électrode avec de l'eau distillée et avec l'échantillon à analyser.
- Amener l'échantillon d'eau à analyser à la température désirée.
- Plonger l'électrode dans l'échantillon à analyser et lire la valeur de pH directement.
- Après chaque détermination de pH, on retire l'électrode, on la rince et à la fin de l'expérience on la laisse tremper dans l'eau distillée, ou dans la solution tampon ou dans une solution de K Cl saturée (Rodier, 1984).

C'est ce que nous avons fait au niveau du laboratoire du département génie minier.

II.3.Méthodes d'analyses

Dans notre travail ont été utilisées des méthodes différentes pour choisir la meilleure méthode d'analyse des éléments traces métalliques (ETM). La première expérience d'analyse sera effectuée au niveau de notre laboratoire avec l'appareil de Spectrophotométrie UV-visible et la deuxième expérience a été réalisée au niveau du laboratoire de **P'ORGM** avec l'appareil de spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA).

II.3.1. Analyse par spectrophotométrie UV visible



Figure 14 Le spectrophotomètre UV visible au niveau du laboratoire de génie minier

La spectrophotométrie UV-visible est une méthode d'analyse quantitative et qualitative qui présente un grand intérêt pour le dosage de cations et d'anions. Elle est fondée sur la mesure de la quantité d'énergie absorbée par les molécules traversées par un faisceau de lumière monochromatique. L'énergie absorbée correspond à une transition électronique d'un niveau fondamental à un niveau excité (Tahar-Cherif, 1994).

Le modèle utilisé dans notre étude est la spectrophotométrie UV-Visible 6705, série 67, ce modèle a récemment été acquis par le laboratoire du département.

✓ Description de l'appareil

Ces appareils présentent une interface utilisateur basée sur un écran LCD TFT couleurs de qualité supérieure à technologie d'écran tactile et support QWheel™ apportant une facilité d'utilisation pour toutes les opérations, du paramétrage aux mesures et à la manipulation des données.

Cinq modes de mesure principaux sont disponibles : Photométrie, Spectre, Cinétique, Quantification et Multi-Longueurs d'onde. Dans notre étude nous allons utiliser la photométrie et le spectre voir la Figure 15

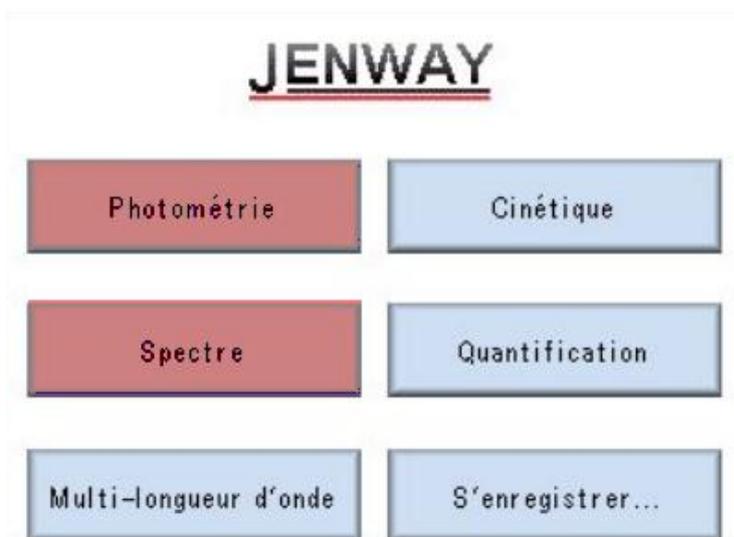


Figure 15 l'écran de Menu Principal de la spectrophotométrie a UV-Visible

✓ **Caractéristiques de l'appareil**

Le modèle disponible dans notre laboratoire est le spectrophotomètre UV-Visible 6705

➤ **Caractéristiques techniques**

- Source lumineuse : Xénon
- Lumière parasite : 4 nm
- Lumière parasite : < 0,05% à 220 nm
- Gamme de longueurs d'onde : 190-1100 nm

Caractéristiques communes pour tous les modèles :

Résolution de longueur d'onde	0,1 nm
Précision de longueur d'onde	± 1,0 nm
Reproductibilité longueur d'onde	± 0,2 nm
Gammes photométriques	- 0,300 à 3,000 A & 0 à 199,9% T
Précision photométrique	± 0,005 à 1 A
Stabilité photométrique	< 0,001 A par heure
Nombre d'étalons	20 avec jusqu'à 5 répliqués de chaque
Multi-longueurs d'onde simultanées	Jusqu'à 4 longueurs d'onde
Vitesse de balayage de spectre	1500 nm/minute par pas de 0,1 nm
Stockage des résultats	> 1000 (sur mémoire flash interne ou Support amovible)
Logiciel PC	Livré sur CD-ROM avec câble interface USB
Alimentation	100 à 230 V (50 ou 60 Hz)
Taille	490 x 390 x 220 mm
Poids	7,5 Kg

✓ **Principe**

Le principe de l'appareillage est basé schématiquement sur un ensemble formé d'une source lumineuse, d'un système optique dispersif et d'un détecteur.

Cet ensemble nous permet d'obtenir un spectre UV visible sous forme de courbe d'absorbance A en fonction de la longueur d'onde et de réaliser un dosage en faisant varier l'absorbance en fonction de la concentration. La limite peut atteindre parfois une valeur en concentration estimée à quelque ppm seulement.

L'intensité de cette absorption est en fonction de la concentration de l'espèce absorbant, elle est exprimée par la loi de Beer-Lambert (Tahar-Cherif, 1994): $A = \log I_0/I = s.l.C$

A : absorbance. I : intensité transmise.

I_0 : intensité initiale. l : épaisseur de la cellule de mesure.

s : coefficient d'extinction ou d'absorptivité des particules dissoutes.

C : concentration de la solution en particules considérées.

La diminution de l'intensité lumineuse d'une radiation monochromatique est proportionnelle au nombre de particules qui absorbent la lumière.

✓ **Validité de la loi de Beer-Lambert**

- La lumière utilisée doit être monochromatique.
- Domaine de concentration doit être faible ($< 10^{-3}$ M).
- La solution ne doit pas être hétérogène ou fluorescente.

$$A_x < A_{\max} \text{ ou } C_x < C_{\max}$$

Cette analyse dépend de la construction d'une courbe d'étalonnage, qui doit être linéaire dans le domaine des concentrations choisies, à partir des solutions de concentrations connues des composés à doser. Cette courbe est une droite d'équation $A = a C + b$ qui permet de déduire la concentration de la solution inconnue.

1. Préparations des solutions standards



Figure 16 Produits et Matériel utilisés pour les préparations des solutions standards au niveau du laboratoire de génie minier

L'appareil utilisé dans cette méthode est disponible dans notre laboratoire de Génie Minier mais le manque de solutions standards, nous a conduit à préparer ces solutions car c'est un appareil neuf que nous sommes les premiers à utiliser. Les moyennes nécessaires à cette étape sont évaluées car les formules chimiques sont complexes (mélange de plusieurs éléments), en calculant le pourcentage de notre métal dans ce complexe ensuite la passe correspondant de ce pourcentage est calculée ainsi :

On prend l'exemple du $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$:

$$\begin{array}{l} 207.21 \text{ gr/mol} \longrightarrow 1\text{gr} \qquad \qquad \qquad M_{\text{Pb}} = 207.21 \text{ gr/mol} \\ 331.21 \text{ gr/mol} \longrightarrow X \qquad \qquad \qquad M_{\text{Pb}(\text{NO}_3)_2} = 331.21 \text{ gr/mol} \end{array}$$

$$X = \frac{1 \times 331.21}{207.2} = 1.59 \text{ gr}$$

Après les calculs on pèse 1.59 gr de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ dans un litre d'eau distillée, alors on obtient une solution de Pb de concentration 1g/l. Ensuite on dilue cette solution plusieurs fois jusqu'à atteindre l'intervalle optimal pour tracer la courbe d'étalonnage. Là on effectue la même opération. La méthode de préparation des solutions standards à partir de la solution mère est la même que celle décrite précédemment.

Principe de la manipulation :

On prend une quantité de solution mère dans une fiole et on ajoute un volume d'eau distillée on obtient une solution diluée par rapport à la solution mère.

Dans notre cas on a choisi les concentrations 0.5, 1 et 2.5 ppm, pour préparer ces concentrations on utilise la loi suivante (la loi de dilution)

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

C_1 : Concentration initiale, C_2 : Concentration finale

Exemple

On prend 1 ml de la solution mère de concentration 1g/l à l'aide d'une pipette et on la met dans une fiole de 100 ml, la solution obtenue est calculée de la manière suivante :

$$1.1 = 100 \cdot C \quad C = 1.1/100 = 0.01 \text{ g/l}$$

$$C = \frac{1 \times 1}{100} = 0.01 \text{ g/l}$$

2. Réglage de l'appareil

L'appareil de UV-Visible se base sur les longueurs d'ondes des éléments, d'abord on détecte la longueur d'onde de chaque élément avec leur solution standard (d'absorbance <1).

Les données nécessaires pour analyser un élément sont :

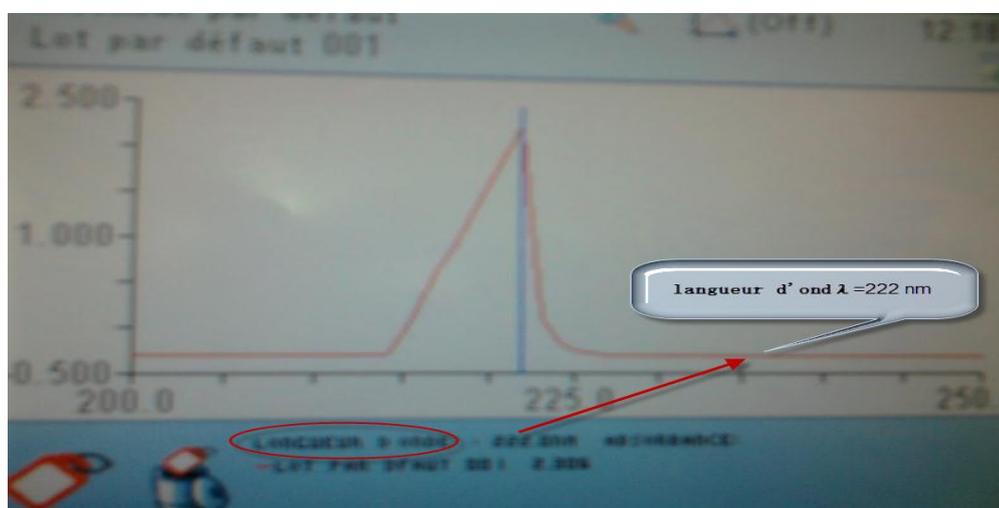
- La méthode (absorbance / transmittance) dans notre cas c'est l'absorbance.
- La longueur d'onde de l'élément.
- L'intervalle des longueurs d'ondes.

Exemple (de notre cas) :

Pour le Pb, la longueur d'onde détectée par l'appareil dans la solution standard est :

$$\lambda = 222 \text{ nm (Figure 17)}$$

Figure 17 La longueur d'onde de Pb détecté par l'UV-Visible (laboratoire génie minier)



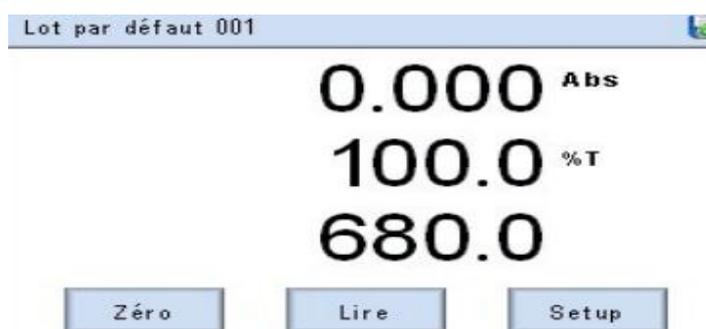
3. Traçage des courbes d'étalonnages de chaque élément

Après le réglage de l'appareil et des données nécessaires pour chaque élément on détermine les absorbances de chaque solution standard d'une concentration connue pour tracer la courbe d'étalonnage (absorbances en fonction des concentrations).

La manipulation est la suivante

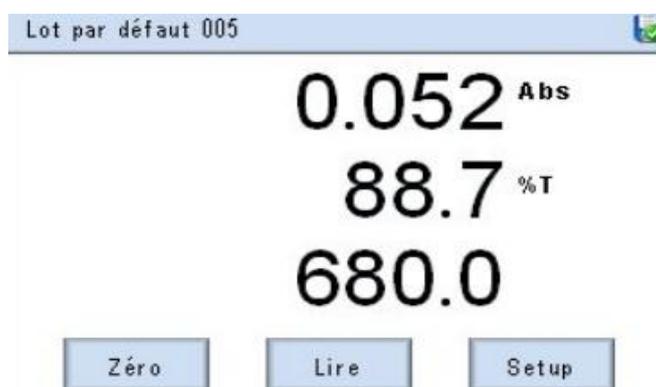
○ Mise à zéro de l'appareil

Insérer une cuve contenant une solution de blanc (terme utilisé pour une solution d'eau distillé) dans le support d'échantillon et fermer le couvercle du compartiment de mesure (utiliser des tubes à essai ou d'autres récipients pour échantillon suivant le support d'échantillon accessoire installé) Appuyer sur la touche Zéro. Les messages 'Calibrating Dark Level...' (Étalonnage du niveau noir) et 'Calibrating Light Level...' (Étalonnage du niveau clair) apparaissent brièvement. Lorsque la mesure est terminée, l'écran passe à l'affichage suivant :



○ Mesure d'un échantillon

Retirer la cuve contenant la solution de blanc et insérer le premier échantillon dans le support d'échantillon, puis fermer le couvercle du compartiment de mesure. Appuyer sur la touche Read (mesurer). L'écran affiche brièvement 'Taking reading. Please wait...' (Mesure en cours. Veuillez patienter.). Une fois la mesure terminée, l'écran indique la valeur mesurée.



4. Lecture de l'absorbance de chaque élément et détermination de leur concentration

L'Absorbance de chaque élément dans l'échantillon correspond à une concentration dans la courbe d'étalonnage (par une projection simple).

II.3.2. Analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

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 précis qui permet la détection d'éléments à l'état de traces même en présence d'autres éléments en forte concentration (Tahar-Cherif, 1994).

✓ Principe de la méthode de l'analyse

Le principe de base de la méthode d'analyse chimique repose sur des mesures d'absorption d'une radiation lumineuse réalisées sur une substance ramenée à l'état d'atomes libres dans une flamme produite par la combustion d'un carburant tel que l'acétylène. Cette radiation est partiellement absorbée par l'élément et son intensité diminue d'autant que la concentration de cet élément est plus grande. Cette absorption est proportionnelle à la concentration en métaux contenus dans l'échantillon suivant la loi de Beer-Lambert: $A = \log I_0/I = K.L.C$

A: absorbance.

I_0 : intensité du faisceau incident 'initial'.

I: intensité du faisceau lumineux après absorption 'transmise'.

K: coefficient d'extinction ou d'absorptivité de l'espèce à doser (les particules dissoutes) son unité est $l.mol^{-1}.cm^{-1}$.

L: longueur de la source d'atomisation maintenue constante.

C: concentration de l'espèce à doser la solution en particules considérées.

✓ Les caractéristiques de la méthode

- Température d'analyse (2000 à 3000°C) appelée température de flamme.
- Toutes les liaisons chimiques sont rompues.
- L'échantillon est analysé à l'état de vapeur atomique.
- Concerne les variations de l'énergie des transitions électroniques entre le niveau fondamental et le niveau excité supérieur.

Cette méthode est rapide et sensible, la grande spécificité de l'élément à doser rend cette technique encore plus précise. Elle est fondée sur la construction d'une courbe d'étalonnage, d'équation:

$A = K_i C + b_0$ d'où on déduit la concentration inconnue de la solution.

1. Préparations des solutions standards

Pour déterminer la concentration d'un élément par l'(AAS) il faut d'abord étalonner l'appareil par des solutions standards bien préparés à un intervalle des concentrations connu c'est à dire la concentration de notre élément appartient à l'intervalle des concentrations préparés. Dans cette méthode les solutions standards étaient disponibles au laboratoire de l'ORGM, car les analyses se fait en routine.

2. Allumage de l'appareil et de l'ordinateur connecté

Après la préparation des solutions standards on passe à l'étape d'analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique. On allume l'appareil et l'ordinateur ensuite on règle l'appareil à des données idéals de chaque élément par exemple : le Plomb(Pb) a une mesure idéale de 5 mg/l correspondant à une Absorbance 0.2, alors on utilise une solution de Pb à 5mg/l (standard) pour calibrer l'appareil à 0.2 Abs, ce qui permet d'étalonner l'appareil.

3. Choix des lampes utilisées pour chaque métal

Pour les analyses d'ETM par l'SAA chaque élément a une lampe d'absorption spéciale (selon leur longueur d'onde) ces lampes pour absorber les émissions des électrons à l'état excité, dans l'appareil il y a 4 supports de lampes pour les éléments et une lampe à cathode creuse pour la filtration des parasites, en fonction de l'emplacement de la lampe choisie on passe à l'analyse de l'élément correspondant à cette lampe.

4. Courbe d'étalonnage

Une série de solutions dans laquelle la teneur en élément dosé double d'un étalon à l'autre dans une gamme de concentrations bien définie , permet de tracer une courbe d'absorbances en fonction des concentrations en (mg/l) ; il suffit ensuite de porter l'absorption de la solution inconnue sur la courbe pour déduire la concentration cherchée.

5. Etalonnage de l'appareil et traçage des courbes d'étalonnages de chaque élément

Dans cette étape pour détecter la concentration de chaque élément il faut d'abord tracer la courbe d'étalonnage (les absorbances en fonction des concentrations), dans notre cas on utilise les

concentrations suivantes (0.5, 1, 2.5) en (ppm) avec la solution de blanc, on passe les solutions standards avec des concentrations connues et on lit leurs absorbances ; on trace ensuite les courbes d'étalonnages de chaque élément étudié (3 points suffisent pour tracer une courbe d'étalonnage),

6. Mesure la concentration de chaque élément en (mg/l)

Finalement on passe notre échantillon dans l'appareil et on lit son absorbance et sa concentration en (mg/l) ; l'opération est très simple comme on l'a dit précédemment ,la projection de l'absorbance de l'échantillon sur la courbe d'étalonnage donne directement la concentration de l'élément, dont fait la lecture.

Les conditions de mesures sont portées sur le tableau suivant :

Tableau 6 Limite de détection des ETM

ELEMENT	LONGUEUR D'ONDE (nm)	FLAMME	LIMITE DE DETECTION (mg/l)	BANDE PASSANTE (nm)
Pb	217.0	Air-acétylène	0.1	0.4 – 0.5
Zn	213.9	Air-acétylène	0.01	0.4 – 0.5
Cu	324.8	Air-acétylène	0.03	0.4 – 0.5
Ag	328.1	Air-acétylène	0.03	0.4 – 0.5
Cd	228.8	Air-acétylène	0.01	0.4 – 0.5

7. Contrôle des résultats obtenus par l'AAS

Pour que notre analyse révèle de bons résultats, on répète les essais sur les 2 ou les 3 premiers échantillons afin d'éviter les erreurs provenant d'un mauvais fonctionnement des appareils; cette étape s'appelle le contrôle.

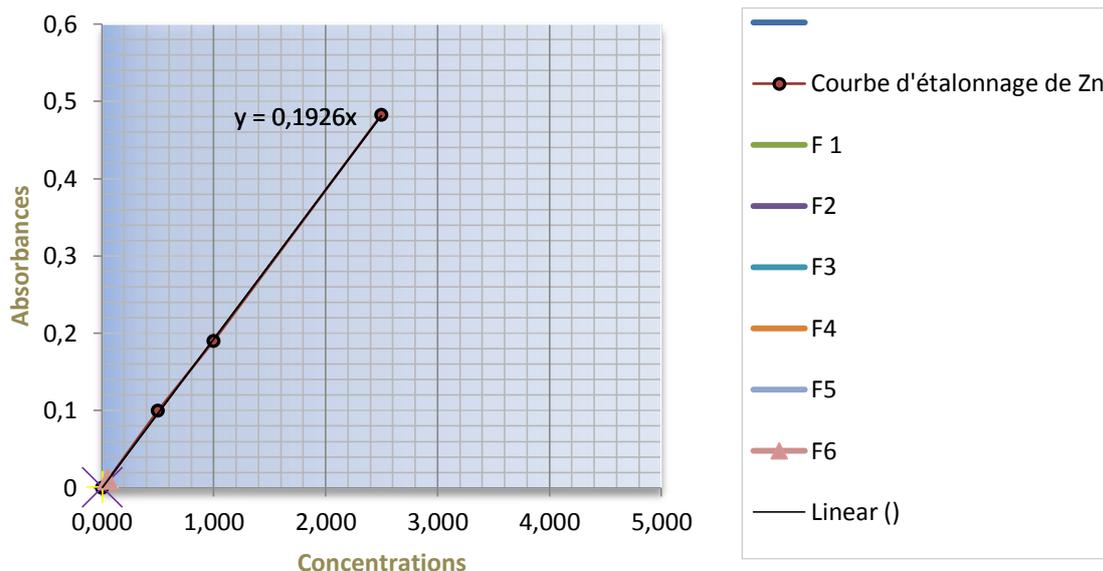
8. Présentation des courbes d'étalonnages des ETM [Concentration (conc.) en fonction de l'absorbance (abs.)]

❖ **Courbe d'étalonnage du Zinc (Zn)**

Echantillon	Conc. mg/l	Abs . mg/l
1	0,0059	0,0012
2	0,0171	0,0034
3	0,04462	0,0092
4	0,0448	0,0089
5	0,0031	0,0006
6	0,0549	0,0109

Zinc (Zn)		
Les étalons	Conc. mg/l	Abs. mg/l
Zero Calibré	0,000	0,000
Etalon N1	0,500	0,099
Etalon N2	1,000	0,190
Etalon N3	2,500	0,482

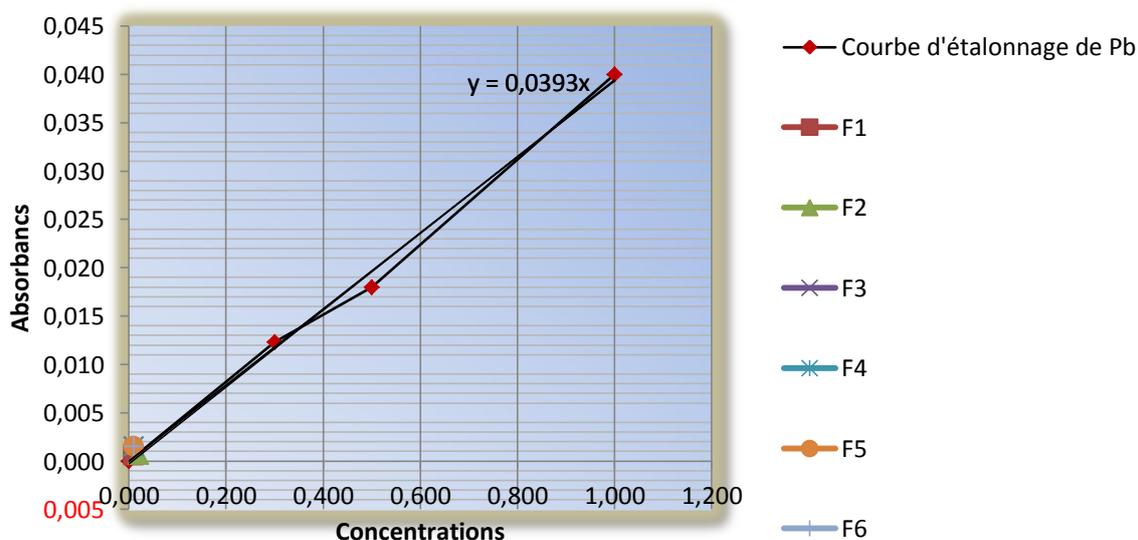
Evolution de la pollution de l'eau de la mine de Chaabet el-Hamra



❖ Courbe d'étalonnage de Plomb (Pb)

Echantillons	Conc. mg/l	Abs. mg/l
1	0,01	0,0006
2	0,02	0,0007
3	0,01	0,0015
4	0,01	0,0015
5	0,01	0,0015
6	0,01	0,0015

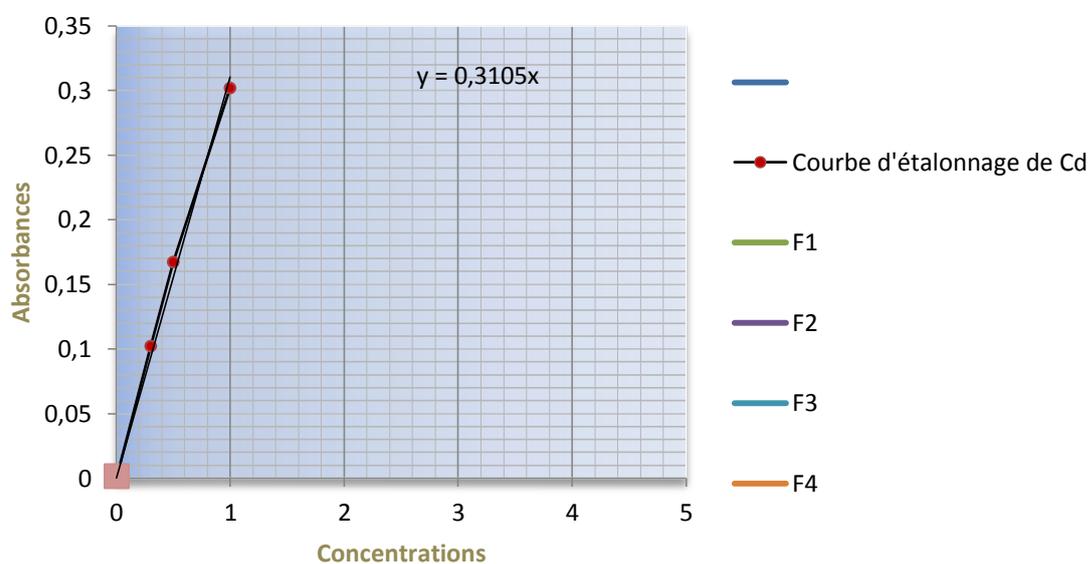
Plomb (Pb)		
Les Etalons	Conc. mg/l	Abs. mg/l
Zero Cal	0,000	0,000
Etalon N1	0,300	0,012
Etalon N2	0,500	0,018
Etalon N3	1,000	0,040



❖ **Courbe d'étalonnage de Cadmium (Cd)**

Echantillons	Conc. mg/l	Abs.. mg/l
1	0,002	0,005
2	0,001	0,004
3	0,004	0,0013
4	0,003	0,001
5	0,002	0,0008
6	0,004	0,0013

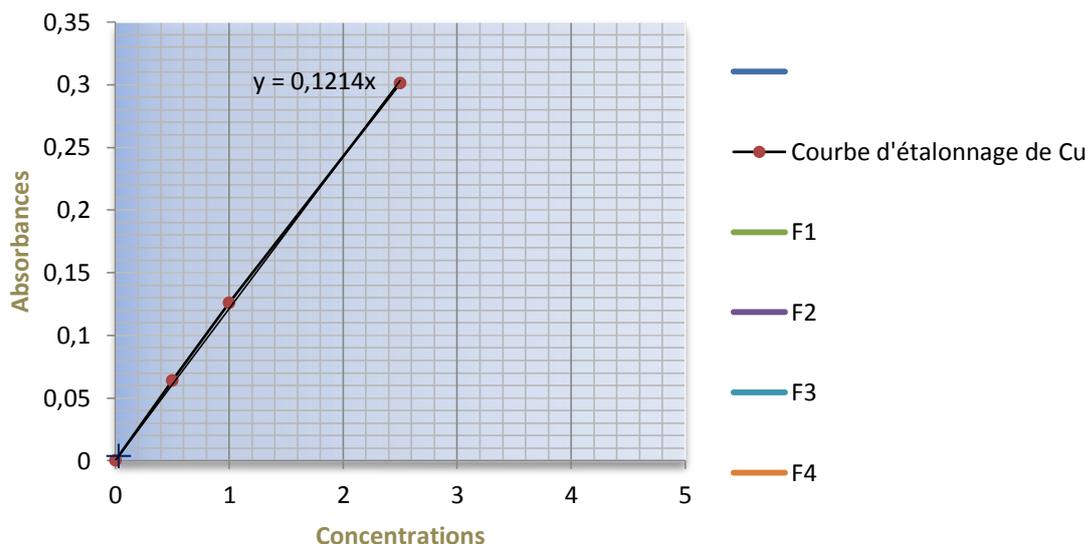
Cadmium (Cd)		
Les Etalons	Conc mg/l	Abs. mg/l
Zero Cal	0,000	0,000
Etalon N1	0,300	0,102
Etalon N2	0,500	0,167
Etalon N3	1,000	0,302



❖ **Courbe d'étalonnage de Cuivre (Cu)**

Echantillons	Conc . mg/l	Abs. mg/l
1	0,003	0,0004
2	0,002	0,0003
3	0,002	0,0002
4	0,001	0,0001
5	0,002	0,0003
6	0,028	0,0036

Cuivre (Cu)		
Les Etalons	Conc. mg/l	Abs. mg/l
Zero Cal	0,000	0,000
Etalon N1	0,500	0,064
Etalon N2	1,000	0,126
Etalon N3	2,500	0,301



II.3.4. Analyse des éléments chimiques majeurs (Na, K, Ca) par le photomètre à Flamme (Modèle PFP7)



Figure 18 Le Photomètre A Flamme au niveau du laboratoire de génie minier

✓ Description de l'instrument

Le PFP7 est un photomètre à flamme d'émission à basse température, avec un simple canal, destiné à la détermination en routine du Sodium (Na) et du potassium (K) ainsi que du lithium (Li), Calcium (Ca) et Baryum (Ba) à l'aide de filtres interférentiels de l'appareil.

C'est un appareil à lecture directe digitale, utilisé en analyses médicales et industrielles.

✓ **Spécifications**

▪ **Sensibilité**

Une lecture de 100,0 peut être réglée à des concentrations de:

Na 3-100ppm

K 3-100ppm

Li 5-100ppm

▪ **Linéarité**

Meilleure que 2 % quand les concentrations 3 ppm (Na et K) et 5 ppm (Li) sont réglées pour une lecture de 100,0. (Dans le cas où l'échantillon ne contient pas d'éléments interférents).

▪ **Stabilité**

Meilleure que 2% après 5 minutes d'aspiration continue d'un échantillon de 10 ppm réglé à une lecture de 50,0 dérive du Zéro meilleure que 2%/heure.

▪ **Reproductibilité**

Le coefficient de variation est inférieur à 1% quand on prend 20 lectures consécutives d'un échantillon d'une concentration de 10 ppm réglé à une lecture de 50,0.

Lectures obtenues à 20 secondés d'intervalles.

▪ **Préchauffage**

La flamme doit être allumée pendant 15 minutes pour assurer les résultats des spécifications indiquées ci-dessus.

▪ **Quantité d'échantillon**

Entre 2 et 6ml/mn

▪ **Sortie enregistreur**

1,00 volt pour lecture 1000

▪ **Température de travail**

15°C à 35°C ambiante

▪ **Dimensions**

420 x 360 x 300mm (photomètre seulement)

▪ **Poids8Kg**

✓ **Principes d'utilisation**

La photométrie de flamme repose sur le fait que les composés des métaux alcalins et alcalino-terreux peuvent être dissociés thermiquement dans la flamme et que la plupart des atomes produits sont excités à un haut niveau d'énergie. Quand ces atomes retournent à l'état initial, ils émettent des radiations dans le spectre visible. Chaque atome émet une radiation à la longueur d'onde spécifique de cet élément.

Au-delà de certaines échelles de concentration, l'intensité de l'émission est directement proportionnelle au nombre d'atomes retournés à l'état initial. Ceci est inversement proportionnel à la quantité absolue de l'espèce volatilisée, dans la flamme **ex**: la lumière émise est proportionnelle à la concentration de l'échantillon. Ceci peut être détecté si la lumière émise par l'élément à une longueur d'onde caractéristique, est isolée par un filtre optique et que l'intensité de cette lumière est mesurée par un photo-détecteur. Ce photo-détecteur délivre un signal électrique proportionnel à la concentration de l'échantillon. Ce signal électrique peut être mesuré, et une lecture est obtenue sous forme analogique ou digitale.

1. Préparation de l'échantillon

a. Standards de calibration

Une série de solutions standards pour la calibration est disponible chez le Fournisseur pour les applications industrielles et médicales.

Le photomètre à flamme mesure la concentration de Sodium et Potassium en termes de quantité de l'élément lui-même en solution, les standards préparés à partir des sels de ces métaux doivent être faits de façon à obtenir la concentration désirée des éléments Na ou K. Les valeurs ci-dessous sont typiques pour les standards de 1 mg Na/100 ml et 1 mg K/100 ml.

✓ **Sodium**

0.634 g de NaCl de qualité analytique doit être pesé avec une balance de précision, dissout avec de l'eau distillée dans une fiole jaugée de 500ml. Pour préparer la solution standard qui sera utilisée par le photomètre à flamme, on doit diluer cette solution 1/50 et la garder en stock.

On calcule de la façon suivante :

Connaissant le poids atomique Na = 23,0 g/mol

Poids moléculaire NaCl = 58.46 g/mol

0,634 gr de NaCl contiennent :

$$\frac{0.634 \times 23}{58,46} = 0,25 \text{g Na}$$

Dans la solution de 500ml nous avons 250 mg Na ou 50 mg Na/100ml. En diluant 1:50 on obtient un standard de 1 mg Na/100ml.

✓ **Potassium**

0,477g de KCl de qualité analytique doit être pesé avec une balance de précision et dissout avec l'eau distillée dans une fiole jaugée de 500ml.

Pour préparer la solution standard qui sera utilisée par le photomètre à flamme, on doit diluer cette solution 1/50 et la garder en stock.

On calcule de la façon suivante :

Connaissant le poids atomique K = 39,1gr et le poids moléculaire KCl = 74,56 donc 0,477 gr de KCl contient $0,477 \times 39,1 = 0,25$ gr K

Soit dans 500ml de solution, nous avons 250 mg K ou 50 mg K/100ml. En diluant 1/50 on obtient un standard de 1 mg K/100ml

✓ **Dilution**

Il est quelquefois nécessaire de faire plusieurs dilutions pour obtenir des concentrations correctes et similaires de l'échantillon et de la solution standard. Une eau distillée de bonne qualité est nécessaire pour effectuer ces dilutions.

Il est aussi recommandé d'utiliser la même eau pour diluer l'échantillon ainsi que le standard.

2. La calibration du photomètre (Figure 19)



Figure 19 Calibrage du photomètre par des solutions standards

Pour effectuer la calibration du photomètre (application biologique), suivre la procédure ci-dessous:

- a) Aspirer de l'eau dés-ionisée et ajuster la valeur lue sur l'indicateur à zéro.

- b) Sélectionner le filtre approprié à la mesure souhaitée (Na ou K) par le commutateur "Filtre Select" et la position du point décimal en utilisant le sélecteur "dp".
- c) Aspirer la solution standard désirée (par exemple 140Na/5K) et ajuster la valeur du standard lue sur l'indicateur à l'aide des deux potentiomètres de réglage "Fine" et "Coarse" Recontrôler le zéro et l'ajuster à nouveau si nécessaire.
- d) Régler le débit du gaz par le potentiomètre "FUEL ADJUST" dans le sens des aiguilles d'une montre de façon à obtenir un maximum de sensibilité.
- e) Aspirer l'échantillon pré-dilué et noter la lecture.
- f) Une calibration est nécessaire pour un contrôle périodique en aspirant une solution blanc et des solutions standards. Initialement, ce contrôle devait être fait tous les 10 échantillons. L'expérience dans le temps et la fiabilité croissante du photomètre PFP7 permet de juger par nous-même d'une fréquence acceptable de ce contrôle.

3. Arrêt de l'appareil

- a) Aspirer l'eau distillée au moins dix minutes.
- b) Si l'arrêt est pour un court terme il est suffisant d'arrêter l'appareil par le bouton "POWER". L'arrêt de la flamme se fait sans risque.
- c) Si l'arrêt est prévu pour un temps assez long, il est prudent d'arrêter l'appareil, en fermant aussi la bouteille de gaz.

II.3.5. Comparaison entre les deux méthodes

➤ Tableau de comparaison

Tableau 7 Comparaison entre [SAA et UV visible]

Analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)	Analyse par spectrophotométrie UV visible
- La meilleure méthode d'analyse pour les ETM (ANRH, 2013)	- La mauvaise méthode d'analyse pour les ETM
- Système de filtration des éléments (analysé élément par élément)	- Sans filtration de l'élément. - donne des mauvais résultats
- Condition de manipulation fastidieuse	- Manipulation délicate et simple
- Analyser les Solutions pures et complexes	- Analyser seulement les solutions pures

Après les analyses effectuées au niveau de notre laboratoire et du laboratoire de l'ORGM la SAA semble être la meilleure méthode d'analyse aux appareils utilisés pour les ETM par rapport à UV-Visible, cette conclusion repose sur les causes suivantes :

- Les ETM peuvent être dissociés thermiquement dans la flamme car la plupart des atomes produits sont excités à un haut niveau d'énergie (ASS)
- Pour analyser un élément dans une solution complexe (solution contient plusieurs éléments), il faut éliminer les autres éléments et les parasites pour obtenir un bon résultat, SAA utilise le système de filtration avec une lampe spéciale pour éliminer les parasites, par contre l'UV-Visible n'est pas efficace pour les solutions complexes parce que les faisceaux lumineux sont perturbés par la diffraction des autres éléments présents dans la solution.
- L'analyse par le SAA est fastidieuse car pour chaque élément analysé la flamme doit être réglée par leur solution standard (à une concentration et absorbance idéales) et l'emplacement de la lampe ; il faut aussi nettoyer la pipette d'aspiration des solutions.

Cependant il semblerait que la méthode de SAA donne de bons résultats.

II.4. Les analyses des échantillons au niveau de la mine de Chaabet el Hamra

II.4.1. Interprétation et comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM aux normes (OMS, Algériennes)

Les résultats des analyses des eaux prélevées dans les six forages de la mine de Chaabet el-Hamra en (mg/l) durant la période d'avril 2013, ainsi que les normes de l'eau potable (OMS et normes algériennes) sont illustrés dans le tableau suivant (**Tableau 8**).

Tableau 8 Concentrations des ETM et éléments majeurs dans les six forages de la mine en mg/l

Echantillons	Cd	Cu	Pb	Zn	Fe	Ca ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Mg ⁺²	Cl ⁻	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻
Forage N 1	0,002	0,003	<0,01	0,0059	0,072	74,54	2	22	40,78	44	332,4	75
Forage N 2	0,001	0,002	<0,01	0,0171	0,071	66,85	1	17	37,93	35	298,9	60
Forage N 3	0,004	0,002	<0,01	0,0462	0,085	74,74	1	19	42,35	40	311,1	82
Forage N 4	0,003	0,001	<0,01	0,0448	0,307	77,19	1	19	42,6	40	323,3	88
Forage N 5	0,002	0,002	0,01	0,0031	0,065	77,96	1	20	44,85	50	292,8	94
Forage N 6	0,004	0,028	0,01	0,0549	0,141	72,25	1	20	42,71	40	311,1	86

Tableau 9 Répartition des normes [OMS et algériennes] sur les ETM et E-majeurs

Eléments	Cd	Cu	Pb	Zn	Fe	Ca	K	Na	Mg	Cl	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻
OMS 2008	0.003	1.00	0.01	3.00	0.30	75	-	-	50	200	-	250
Algériennes	0.01	1.50	0.05	5.00	0.30	75-200	20	200	150	200-500	-	200-400

II.4.1.1. Interprétation du résultat des éléments majeurs

Dans cette partie les analyses sont effectuées par deux méthodes différentes :

- Le Photomètre a flamme (Ca, Na, K), au niveau du laboratoire de génie minier.
- La spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA), au niveau du laboratoire de l'ORGM.

a. Calcium (Ca)

Les teneurs en calcium des eaux souterraines de la nappe hauterivienne varient entre 66.85 mg/l et 77.96 ml/l, les résultats obtenus montrent que la concentration de calcium dans les forages (4 et 5) dépasse la norme (OMS) avec un pourcentage de 33.33 %, par contre pour la norme algérienne toutes les concentrations de calcium dans les forages sont admissibles.

b. Potassium (K) et Sodium (Na)

Les teneurs en potassium et sodium dans la nappe hauterivienne varient entre 1 et 2 mg/l pour le potassium et entre 17 et 22 mg/l pour le sodium, ces concentrations ont des valeurs admissibles (100%) pour la norme algérienne.

Les éléments (Fe, Mg, Cl, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Pb, Zn, Cd, Cu) ont été analysés par le SAA au niveau du laboratoire de l'ORGM et on a procédé :

- On a Placé la lampe à cathode creuse de l'élément qu'on doit analyser (chaque élément correspond à une lampe spéciale).
- On a Calibré l'appareil pour chaque élément (concentration et absorbance idéal).
- Puis on est passé à l'étape de l'analyse. Les teneurs ont été lues en (mg/l)

c. Fer (Fe)

Les teneurs en fer varient entre 0.065 et 0.307 mg/l, ces valeurs sont admissibles (100%) selon les normes OMS et Algériennes.

d. Magnésium (Mg)

Les teneurs en magnésium dans les eaux souterraines de la nappe hauterivienne varient entre 37.93 et 44.85 mg/l, ces concentrations montrent des valeurs inférieures aux normes OMS et Algériennes.

e. Chlorure (Cl)

Les teneurs en chlorure dans les eaux souterraines de la nappe hauterivienne varient entre 35 et 50 mg/l ces concentrations 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^-) et Carbonate (CO_3^{2-})

Les teneurs en bicarbonates dans les eaux souterraines de la nappe hauterivienne varient entre 292.8 et 332.4 mg/l, par contre les teneurs en carbonates montrent de très faibles valeurs non décelables.

g. Sulfate (SO_4^{2-})

Les teneurs des sulfates enregistrées dans les eaux souterraines de la nappe hauterivienne varient entre 60 et 94 mg/l, les teneurs en sulfates ne dépassent pas les normes admissibles de l'eau potable (500 mg/l, normes OMS) et (200 à 400 mg/l, normes Algériennes)

II.4.1.2. Interprétation des résultats des ETM

Le matériel qu'on a utilisé pour les analyses des ETM est :

- L'appareil de SAA
- Les lampes à cathode creuses: est une source de rayonnement spécifique de l'élément à doser
- Correction par une lampe à deutérium : utilisé pour filtrer les éléments.

a. Plomb (Pb)

Les teneurs en plomb montrent de faibles valeurs variant entre (0.01 et <0.01 mg/l) durant la période Avril 2013 cette valeur est inférieure à la limite de détection de l'appareil (SAA) (0.1 mg/l), la concentration en plomb inférieure aux normes admissibles pour l'eau potable (0.01 mg/l, OMS) et (0.05 mg/l, Normes Algériennes), la concentration en plomb dans les six forages de la mine de Chaabet el-Hamra a sensiblement la même valeur.

b. Zinc (Zn)

La concentration de zinc des eaux souterraines de la nappe hauterivienne durant la même période varie entre (0.0059 et 0.0549 mg/l), Les teneurs en zinc sont inférieures aux normes admissibles pour l'eau potable (3 mg/l, OMS) et (5 mg/l, Normes Algériennes).

c. Cuivre (Cu) et Cadmium (Cd)

Les teneurs en cuivre de la nappe hauterivienne montrent des concentrations qui varient entre (0.001 et 0.028 mg/l), et entre (0.001 et 0.004 mg/l) pour le cadmium, on remarque que la concentration de cuivre est admissible avec les deux normes (OMS, 1 mg/l) et (1.5 mg/l, Normes Algériennes), par contre la concentration de cadmium dépasse la norme (OMS, 0.003 mg/l) dans les deux forages (F03 et F06) ,mais pour les normes Algériennes (0.01 mg/l) la concentration de cadmium est admissible (100%).

II.4.1.3. Conclusion

Après les interprétations des résultats des analyses des échantillons prélevés au niveau des six forages de la mine de Chaabet el-Hamra durant la période Avril 2013, on conclut que toutes les teneurs moyennes des éléments traces métalliques (Pb,Zn,Cu,Cd) présentent des concentrations acceptables (normes), seul le cadmium dans les deux forages (F03 et F06) a une concentration assez élevée (norme OMS), mais pour les **normes Algériennes** toutes les concentrations sont admissibles.

Les teneurs des éléments chimiques majeurs sont conformes aux normes d'eau potable sauf le calcium qui présentent une concentration assez élevée au niveau des deux forages (F04 et F05). Cette élévation du calcium est due essentiellement à la dissolution des roches carbonatées dans la nappe hauterivienne. Cette nappe est dans les formations carbonatées à dolomies fissurées hématitisées et parfois cavernueuses.

Finalement on peut dire, que la nappe hauterivienne répond aux normes de potabilité.

II.4.2. Comparaison des teneurs des éléments chimiques et les ETM avec les études antérieures sur la mine de chaabet el hamra (nappe hauterivienne)

Plusieurs études ont été faites sur la région d'Ain Azel pour évaluer la potabilité des eaux souterraines à partir des Normes, parmi ces études : Bedjaoui en 2012 (résultat Avril 2012), on a fait la comparaison avec les autres études dans la période sèche parce que notre prélèvement a été effectué dans la période sèche (Avril 2013) et sur la mine de Chaabet el-Hamra.

Le tableau ci-après représente la comparaison des teneurs ETM dans les points de prélèvements communs avec Bedjaoui sur la mine de Chaabet el-Hamra.

Au niveau de la nappe hauterivienne (mine de Chaabet el-Hamra)

Tableau 10 Teneurs moyennes des ETM en 2012 par Bedjaoui et notre analyse en 2013 au niveau des forages (F04, F05, F06) en mg/l

Teneurs moyennes ETM	Pb	Zn	Cu	Cd
Bedjaoui ,2012	<0.01	0.025	<0.04	<0.01
2013	<0.01	0.034	0.010	0.003

Tableau 11 Teneurs des ETM obtenues en 2012 par Bedjaoui et nos analyses en 2013 au niveau des forages (F04, F05, F06) en mg/l

Teneurs en mg/l des ETM		Pb	Zn	Cu	Cd
Forage N 04	Bedjaoui Avril 2012	<0.01	0.033	<0.04	<0.01
	Avril 2013	<0.01	0.0448	0.001	0.003
Forage N 05	Bedjaoui Avril 2012	<0.01	0.0325	<0.04	<0.01
	Avril 2013	<0.01	0.0031	0.002	0.002
Forage N06	Bedjaoui Avril 2012	<0.01	<0.01	<0.04	<0.01
	Avril 2013	<0.01	0.0549	0.028	0.004

Le tableau comparatif des ETM ci-dessus représente les résultats d'analyses obtenues des eaux de la nappe hauterivienne durant l'année 2012 et 2013 dans la période sèche.

a. Plomb (Pb)

Durant les deux années 2012 et 2013 la teneur en plomb reste la même à une concentration inférieure à 0.01 mg/l, elle ne présente aucune contamination durant la période sèche de chaque année.

b. Zinc (Zn)

Les teneurs en zinc dans les deux forages (F04 et F06) ont été élevées en 2013 par contre le forage F05 a une très faible concentration 0.0031 mg/l durant la période sèche en 2013 par rapport à l'année 2012 (0.0325 mg/l), on remarque que la concentration des éléments diminue progressivement (dépollution) pendant les sept années derniers, la cause principale de cette dépollution semble être liée aux eaux des pluies, et au pompage permanent dans ce forage.

L'élévation des teneurs en zinc dans les deux forages (F04 et F06) est due à l'irrégularité du pompage (les pompes de ces deux forages ne fonctionnent qu'en période de grande sécheresse, le reste du temps le volume d'eau extrait par jour est constant).

D'autre part les traces métalliques présentes dans les eaux ont différentes origines :

Evolution de la pollution de l'eau de la mine de Chaabet el-Hamra

- une origine naturelle par lessivage des sols et du sous-sol,
- une origine industrielle (fonderies, traitements de surface, accumulateurs, peintures...),
- une origine agricole (engrais, biocides, lisiers...)
- une origine domestique (chauffage, peinture, piles...).

D'après les cartes des distributions de teneur en zinc et des épaisseurs, on a sélectionné les positions des deux forages sur ces cartes ci-dessous :

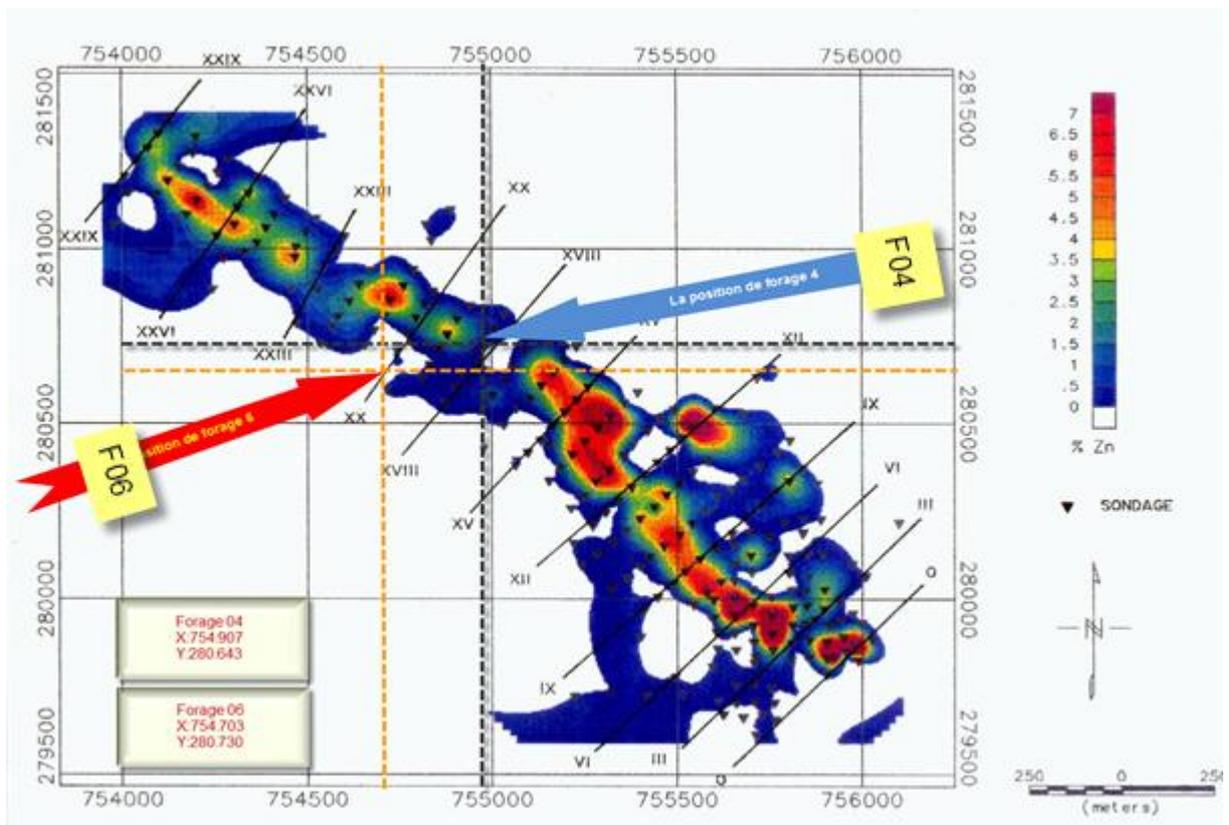


Figure 20 Distribution des épaisseurs des corps minéralisés (Ouzouaz S)

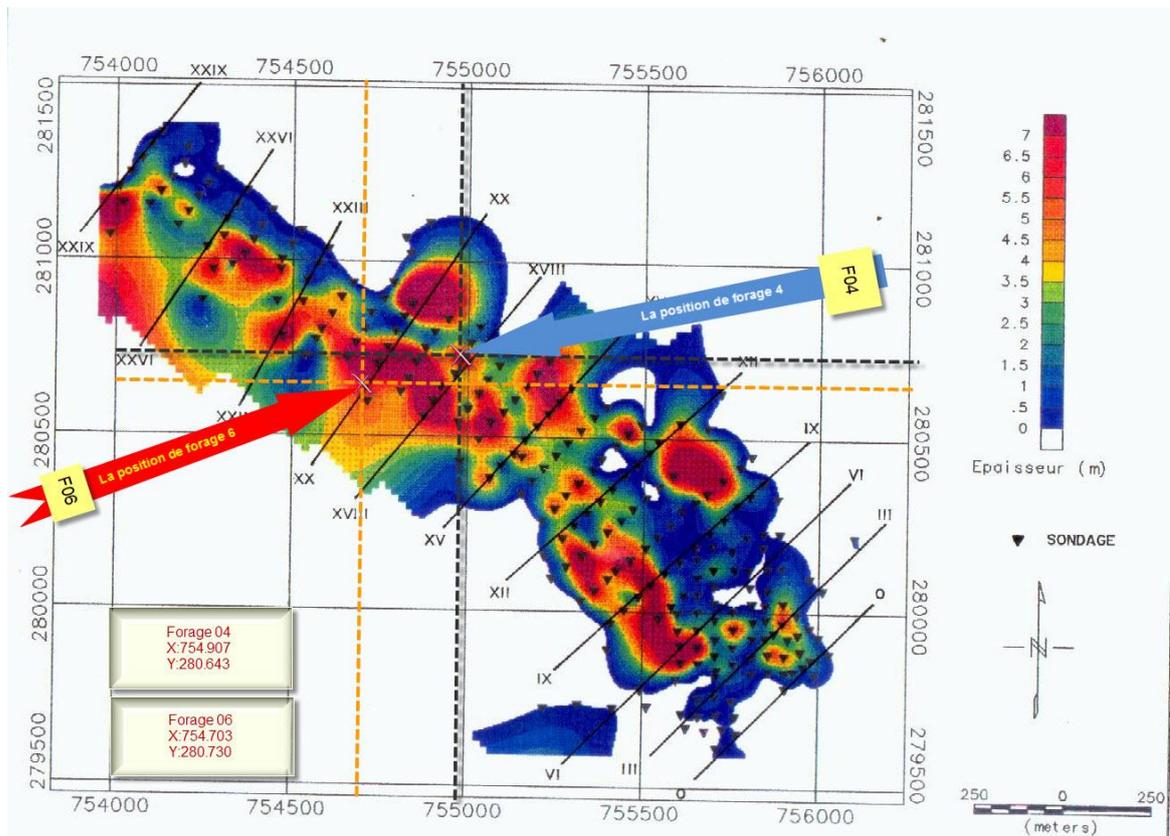


Figure 21 Distribution des teneurs en Zn des corps minéralisés (Ouzouaz S)

A partir des cartes des distributions des teneurs en zinc et des épaisseurs on remarque que les teneurs en Zn dans les deux forages (F04, F06) représentent de faibles pourcentages environ de (0 à 0.5 %) et des épaisseurs importantes. On ne peut expliquer l'élévation de la teneur que par le lessivage continu de ces couches.

D'après les informations des forages, on remarque que les deux forages (F06 ,220m ; F04 ,260m) sont plus profonds que les autres, alors cette élévation des teneurs en zinc est expliquée par la migration des métaux lourds vers les nappes souterraines, et par leur transport par les eaux en direction de zones plus lointaines et plus profondes.

c. Cuivre et cadmium (Cd)

Les teneurs en cuivre et cadmium obtenues dans les années 2012 et 2013 pendant la période de prélèvement sèche varient entre 0.001 et 0.028 mg/l, en 2013 pour le cuivre et sont inférieures à 0.04 mg/l en 2012, et pour le cadmium elles varient entre 0.002 et 0.004 mg/l en 2013 et sont

inférieures à 0.01 mg/l pendant l'année 2012 .On ne peut pas comparer nos résultats avec ceux de Bedjaoui car ses résultats sont inférieurs à la limite de détection de l'appareil utilisé .

II.4.2.1. Conclusion

D'après les interprétations des données obtenues, la concentration des ETM montre de faibles valeurs pratiquement identiques pendant la période sèche pour les deux années 2012 et 2013. Mais pour le cuivre et le cadmium les résultats obtenus en 2012 ne sont pas précis :les teneurs de cuivre sont approximatives <0.04 mg/l pour tous les forages on ne peut pas les comparer avec nos valeurs ; les teneurs de cadmium sont inférieures à 0.01 mg/l.C'est le problème car la norme de potabilité **OMS** limite la concentration acceptable à 0.003 mg/l, dans ce cas les résultats de 2012 n'apportent aucune information sur la potabilité de l'eau (<0.01 mg/l inclut plusieurs valeurs peut être 0.007 ou 0.001 mg/l) Toutefois selon la **norme algérienne l'eau est potable aussi bien en 2012 qu'en 2013.**

II.4.2.2. 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 de CONSTANTINE

On peut évaluer la pollution de la mine de Chaabet el-Hamra d'après les analyses des ETM obtenue par nous et l'ANRH de CONSTANTINE.

Les résultats de ces analyses sont représentés dans les tableaux ci-dessous Au niveau de la mine de Chaabet el-Hamra

Forages	HCO ⁻	SO ₄ ⁻	cl ⁻	CA ⁺⁺	Mg ⁺⁺	NA ⁺	K ⁺
Forage F1	332.4	75	44	74.54	40.78	22	02
Forage F2	301.7	78	32	69.18	38.75	23	01
Forage F3	317.9	41	34	75.84	41.15	17	02
Forage F4	312.5	49	41	76.48	39.5	24	04
Forage F5	298.2	22	47	79.58	40.56	20	01

**Table
au 12
Teneu**

Forage F6	335.5	88	30	80.11	36.12	26	03
-----------	-------	----	----	-------	-------	----	----

**rs des éléments majeurs obtenues au niveau de la mine de Chaabet el-Hamra par l'ANRH de
CONSTANTINE 25 Février 2010 en mg/l**

Tableau 13 Teneurs des ETM obtenu au niveau de la mine de Chaabet el-Hamra

Forages	Zn	Pb	Fe	Mg	Cd
Forage F1	1.018	ND	0.008	/	/
Forage F2	0.010	ND	0.160	/	/
Forage F3	0.080	ND	0.002	/	/
Forage F4	0.000	ND	0.004	/	/
Forage F5		ND			
Forage F6	0.052	ND	0.048	/	/

Les tableaux précédents montrent que :

- Les teneurs des ETM pendant les trois années dernières sont proches et la différence entre les résultats serait due au pompage temporaire des forages.

II.5. Les analyses des échantillons au niveau de la mine de Kherzet Youcef

II.5.1. Interprétation et comparaison des teneurs des éléments majeurs (Ca, Na, K) aux normes (OMS, Algériennes)

Dans cette partie on a fait des analyses pour déterminer la teneur de trois éléments (Ca, Na, K), avec le photomètre à flamme.

Les échantillons des eaux sont prélevés au niveau du puits de la mine de Kherzet Youcef durant la période d'avril 2013, (**Tableau 14**)

Tableau 14 Concentrations des éléments majeurs (K, Ca, Na) dans le puits de la mine de Kherzet Youcef

Echantillon& Normes	Ca (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)
Puits de la mine de Kherzet Youcef	219.0	78.5	5.4
OMS 2008	75	-	-
Normes Algériennes	75-200	200	20

II.5.1.1. Interprétation des résultats

1. Calcium (Ca)

Le calcium est un élément (métal) alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates surtout à l'état d'hydrogéo-carbonaté et en quantité moindre sous forme de sulfate et de chlorure. Il est le composant majeur de la dureté de l'eau, et l'élément dominant des eaux naturelles, d'après le tableau des analyses on remarque que sa teneur dans les eaux souterraines de la nappe barrémienne dépasse la norme (OMS) et Algériennes.

2. Sodium (Na)

Les teneurs en sodium dans la nappe barrémienne au niveau du puits de la mine de Kherzet Youcef est 78.5 mg/l, cette valeur est inférieure aux normes admissibles pour l'eau potable (Normes Algériennes)

3. Potassium (K)

Le potassium beaucoup moins abondant que le sodium, et rarement présent dans l'eau, dans notre cas d'après les analyses des eaux souterrain de la nappe barrémienne au niveau de la mine de Kherzet Youcef on remarque que la teneur en potassium est faible Par rapport les autre éléments et inférieure aux normes admissibles pour l'eau potable (Normes Algériennes).

II.5.1.2. Comparaison des teneurs des éléments majeurs avec les études antérieures

On a fait des comparaisons avec les études antérieures dans la période sèche parce que notre prélèvement a été effectué dans la période sèche (Avril 2013) sur la mine de Kherzet Youcef, pour évaluer la pollution sur la région d'Ain Azel.

Le tableau ci-après représente la comparaison des teneurs des éléments majeurs (Ca, K, Na) avec Bedjaoui en 2012 sur la mine de Kherzet Youcef. (**Tableau 15**)

Tableau 15 Teneurs des éléments majeurs (Ca, K, Na) obtenues en 2012 par Bedjaoui et les analyses en 2013 au niveau de puits de Kherzet Youcef

Teneurs	Ca (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)
Bedjaoui Avril 2012	225.85	105.21	10.572
Avril 2013	219.0	78.5	5.4

Interprétation

D'après le tableau ci-dessus on remarque que les teneurs des trois éléments majeurs (Ca, K, Na) en 2013 sont inférieures par rapport à l'année 2012, selon les analyses précédentes ce résultat est prévu, et la cause principale de cette dépollution semble être liée aux eaux des pluies par dilution des concentrations des éléments dans la nappe.

La comparaison des teneurs des éléments majeurs (Ca, K, Na) avec l'ANRH de Constantine en 2004 sur la mine de Kherzet Youcef. (**Tableau 20**)

Tableau 16 Teneurs des éléments majeurs (Ca, K, Na) obtenues en 2004 par ANRH et les analyses en 2013 au niveau de puits de Kherzet Youcef

Analyses	Ca (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)
ANRH de Constantine Juin 2004	186.0	80	7
Avril 2013	219.0	78.5	5.4

Interprétation

A partir du tableau ci-dessus on remarque que les teneurs en sodium et potassium en 2013 sont inférieures à celles de 2004 ce qui implique qu'il y a une dépollution, la cause principale étant toujours liée aux eaux des pluies, mais par contre la teneur en calcium en 2013 est élevée par rapport à l'année 2004, cette variation présente une anomalie, on peut expliquer cette élévation comme suit :

- ✓ Par la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique dans la nappe barrémienne.
- ✓ Le calcium peut se former à partir des formations gypsifères ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont facilement solubles dans l'eau:



- ✓ Le pompage au niveau de la mine de Kherzet Youcef est discontinu.
- ✓ Les analyses par des méthodes et des conditions différentes influent sur les résultats, dans notre cas nous avons utilisé le photomètre à flamme au niveau de notre laboratoire par contre Bedjaoui a utilisé la SAA au niveau du laboratoire de l'ORGM

Conclusion

D'après les résultats d'analyses des éléments majeurs (Ca, Na, K) obtenues en 2013 on remarque que :

- La teneur en Ca dépasse les normes OMS et algériennes.
- Les teneurs en Na et K sont corrects selon les normes algériennes.

D'après les normes (OMS, algériennes), la teneur en Ca indique un résultat négatif sur la potabilité de l'eau.

Conclusion générale

La présente étude a porté sur l'évolution de la pollution en ETM dans la mine de Chaabet el-Hamra à partir d'analyses chimiques de l'eau souterraine de la nappe hauterivienne durant la période d'Avril 2013. L'interprétation des données d'analyse a montré que la variation des teneurs des éléments chimiques durant les deux années 2012 et 2013 est très faible.

Bien que le nombre d'échantillons analysés soit peu représentatif statistiquement, on peut avancer que :

- Les paramètres responsables des variations de la qualité des eaux souterraines sont principalement liés à la présence et la dissolution de certains minéraux carbonatés, dolomitiques et évaporitiques dans l'aquifère, des processus normaux et de l'interaction d'eau-roche.

L'interprétation des résultats d'analyse des ETM au niveau de la mine de Chaabet el Hamra montre que :

- Les teneurs sont admissibles selon les normes de potabilité (OMS et Algérienne), elles ne comportent aucun risque sur la santé humaine.

Différentes études antérieures (Bedjaoui A., 2012 ; ANRH, 2010)

- Avaient montré l'absence dans l'eau de contamination par les ETM.

La baisse des teneurs en Pb et Zn trouvées lors de nos investigations, s'explique par

- L'arrêt de l'usine de traitement de 2006 jusqu'à maintenant.
- La dilution due aux eaux de pluies.

L'interprétation des résultats d'analyse des éléments majeurs (Ca, Na, K) au niveau de la mine de Kherzet Youcef montre que :

- La teneur en Ca dépasse les normes OMS et algériennes, cela affecte la potabilité de l'eau.

Cette étude est réalisée par Spectrométrie d'Absorption Atomique, Spectrophotométrie à UV-Visible et Photométrie de Flamme.

L'appareillage utilisé pour les analyses joue un rôle important dans la précision des résultats.

La précision des résultats dépend des longueurs d'ondes des éléments et du système de filtration de chaque appareil

- La détection des éléments stables (leur longueur d'onde supérieure à 300 nm) est plus facile que celle des éléments instables.
- Le système de filtration permet d'obtenir des résultats plus précis

Il semblerait que la meilleure méthode d'analyse des métaux lourds et des métaux de transition soit le spectromètre d'absorption atomique four (SAAF) généralement utilisé pour une précision de l'ordre du ppb (partie par billions).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHMED ZAID T., 2013.** Méthodes d'analyses des ETM, prof. Dép. génie chimique ENP, communication orale.
- ALLOWAY B.J., 1995.** Heavy metals in soils. Ed 2. Blackie Academic & Professional, Glasgow, 368 p.
- ARTIGNAN D, COTTARD F., 2003.** Éléments à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un Plan de Prévention, des Risques Miniers (PPRM) **BRGM.** p 24.25.
- ATTOUCHEK L., 2006.** Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youcef (Sétif) et son impact sur l'environnement, mag géologie minière, Univ U.S.T.H.B, Algérie, 82 p.
Azal - Est Algérie, doct en hydraulique, Univ de Batna, p 6.
- AZRI A., 2013.** Mode de fonctionnement des appareils d'analyses et manipulation, chimiste laboratoire de l'ORGM, communication orale.
- BEDJAOUI A., 2012,** Pollution et environnement : Etat de la pollution des eaux du district minier après l'arrêt de la mine de chaabet el hamra, mag Mines et environnement, ENP, Alger. 86 p.
- BELKHIRI L., 2011,** Etude de la pollution des eaux souterraines : cas de la plaine d'Ain Azel, Thèse doct en hydraulique, U.H.L.B, 114p.
- BENDAAMOUCHE Ch., 2013.** Préparations des solutions chimiques, chimiste, mine de Kherzet Youcef, communication orale.
- BOUSDIRA D., 2009.** Etude des impacts des activités d'exploitation des mines polymétalliques (Pb-Zn) sur l'environnement de la région de Kherzet Youssef (Wilaya de Sétif), mag génie de l'Envir, ENP, Alger. 120 p.
- BOUTALEB A., 2001,** Les minéralisations à Pb-Zn du domaine sétifien-Hodna : gîtologie, pétrographie des dolomies, micro-thermométrie et implications métallogéniques, Thèse de doct, FSTGAT, Univ U.S.T.H.B, Algérie, 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, doc du BRGM 300. 103 p
- BRILH. et FLOC'H J.P., 2001.** Revue "Géologues" publiée par l'Union française des Géologues, N° 130/131, p 233 – 241.
- DIBM., 1997.** Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation, E.N.S.M de Saint-Etienne. 49 p.
- GLAÇON J., 1967.** Recherches sur la géologie et les gîtes métallifères du Tell Sétifien, Thèse doct. Sc. Nat. Publ. Serv. Géol. D'Algérie. Bull. n° 32, 2t. 751 pp.
- GUIDE CANADIEN** d'évaluation des incidences sur la santé, 1999, Prise de décisions en matière d'évaluation des incidences de l'environnement sur la santé, pp 166-169.
- GUIRAUD R., 1973.** Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne Alpine de l'Algérie, d'après l'étude du bassin d'El Eulma et les régions voisines, Thèse Sc. Nat, Nice, France.
- HENNI A., 1984.** La minéralogie, les particularités géochimiques et la genèse du gisement de Kherzet Youssef. Résumé de Th. De 3ème cycle Univ. Leningrad, URSS. 329-336 p.
- HENNI A., 1995.** Caractérisation minéralogique et géochimique des sphalérites de l'Algérie. Bull. Serv. Géol. Algérie, vol.6, no2. 225-237 pp.

HENNI A., 1998. Minéralogie, géochimie et métallogénie du gisement Pb-Zn de Kherzet Youssef. Mémoires. Serv. Géol. Algérie, no9. 77-114 pp.

IMCHAL N et REZIGAT K., 2008. Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaabet El-Hamra (Ain Azel, Wilaya de Sétif), Projet de Fin d'Etudes, Univ Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, p 70-72.

KHALID S., 2013. Méthodes d'analyses chimiques des eaux et techniques d'analyse, hydrogéologue, ANRH Constantine, communication orale.

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), Mag. Sc. du sol, INA, Algérie, 162 p

NAIVONIRINA R., 2012. Effet du vent sur le taux d'accumulation de pollution à la surface des isolateurs de haute tension dans les conditions hivernales, Mém présenté à Univ du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle du doct en ingénierie, 211 p.

O.Q.L.F., « Pollution », 2004. <http://gdt.oqlf.aouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?IdFiche=8358493> (dernière consultation décembre 2012)

OUZOUAZ S., 2013. Hydrogéologie de la région d'Ain Azel, hydrogéologue, mine de Chaabet el Hamra, communication orale.

OUZOUAZ S., 2013. Rapport sur la Mobilisation & Valorisation des ressources en eau de la mine de chaabet el hamra, hydrogéologue, inédit.

PASCAL T., 2000. Etude de l'influence des métaux lourds sur la conductivité hydraulique de couches sable/bentonite, mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'Univ Laval pour l'obtention du grade de maître ès Sc (M.Sc.), 115 p.

POTVIN R., 2004. Réduction de la toxicité des effluents des mines de métaux de base et précieux à l'aide de méthodes de traitement biologique, Rapport de Synthèse environnementale présenté comme exigence partielle du doct. Sc. de l'environnement, Univ du Québec en Abitibi-Témiscamingue, pp 7-23.

RODIERJ, BAZIN C, BROUTIN J.P., 1996. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Dunod, 8ème édition.

SAVORNIN J, 1920, Etude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien. Thèse Sc, Lyon et Bull. Serv. Carte géol. Algérie, (2), n 7.

SIRVEN J-B., 2006, détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS), Univ Bordeaux 1, Ecole doct. Sc. physiques et de l'ingénieur, 250 p.

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

VILA J.M., 1980. La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens, Thèse doct ès-sc. Nat, Paris VI, France. 663 pp

ANNEXE I

Les différentes séries constituant les monts du Hodna vont du Trias au Miocène (Boutaleb, 2001)

Trias

Les formations les plus anciennes appartiennent au Trias qui affleure en pointements exotiques et chaotiques d'argiles bigarrées à blocs carbonatés, de roches vertes et à lentilles gypsifères par endroits dans les monts du Hodna (Boutaleb, 2001).

➤ **Jurassique**

Les affleurements jurassiques recouvrent des surfaces considérables et sont surtout développés à l'Est d'Ain Azel. Ils sont essentiellement calcaro-dolomitiques, ils ont été subdivisés Guiraud R. 1973 en deux groupes : Jurassique inférieur à moyen (Lias) et jurassique supérieur (Malm-Berriasien).

1. Lias

Il est constitué d'une série de dolomies et de calcaires dolomitiques, de couleur gris-foncé, très massive, mal litée et très épaisse (500 m environ). Elle se termine par une surface de ravinement traduisant un ralentissement de la sédimentation. Un niveau de marne peu épais (10 à 20 m) de couleur variable renfermant des restes d'Ammonites et de Bélemnites datés du Toarcien terminent ce sous système.

2. Dogger-Malm-Berriasien

Le Dogger des monts du Hodna est représenté par des calcaires fins à filaments ; et des calcaires à silex plus ou moins dolomitisée, à débris d'Ammonites, de Bélemnites et des calcaires oolithiques. Son épaisseur est de 100 à 200 mètres.

Le Dogger est surmonté par l'Ammonitico Rosso supérieur (couches rouges) de l'Oxfordien, qui marque la limite inférieure du Jurassique supérieur. Il correspond à un niveau calcaro-argileux bigarré à Ammonites mal conservées (10 à 15 mètres). Au-dessus du faciès Ammonitico rosso supérieur repose le groupe marno-calcaire de 250 à 300 d'épaisseur (Guiraud, 1990).

➤ **Crétacé**

1. Néocomien

Le Néocomien représente un nouvel épisode argileux ou marneux.

Le Valanginien dans les massifs du Hodna est toujours en dépression dans le paysage accompagné souvent de recouvrements quaternaires. Sa limite supérieure est imprécise alors que sa limite inférieure est définie par la présence d'Ammonites pyriteuses. C'est une sédimentation

essentiellement marneuse et à marnes silteuses gris-verdâtres à rares intercalations de calcaires à la base, pour devenir gréseuse en bancs épais vers le sommet.

L'Hauterivien, dans le Hodna comprend des dolomies massives rouges, alternant avec des grès, des dolomies gréseuses et des argiles. Ces dolomies sont fréquemment minéralisées (**Pb-Zn-Fe-Ba**) et correspondent à la formation dolomitico-gréseuse (Guiraud, 1973).

2. Barrémien

Le Barrémien correspond à une série complexe composée de calcaires, dolomies et des grès avec de minces intercalations argileuses ou marneuses. Il affleure pratiquement dans tous les massifs qui constituent l'ensemble allochtone Sud Sétifien, néanmoins son épaisseur augmente du Nord au Sud (de 100 à plus de 500 mètres) (Guiraud, 1973). Dans les monts du Hodna, le Barrémien-Aptien inférieur est une formation qui débiterait par des niveaux gréseux pour passer ensuite à des passées franchement calcaires. Vers le sommet du Barrémien, il y a retour à une sédimentation grésio-argileuse, il s'agirait de la formation argilo-calcaro-gréseuse (Guiraud, 1973). A sa base, elle est définie par une faune supposée du Barrémien: *Exogyraboussinganti* (Glaçon, 1967).

3. Aptien

Dans le domaine Sétifien, l'Aptien débute par un mince repère où dominent les marnes jaunâtres très caractéristiques de l'Aptien inférieur datées grâce à la présence de *Palorbitolina lenticularias* et de *Glavelinella flandrin*. Ces marnes ne dépassent guère les 60 mètres d'épaisseur. Il est surmonté d'un ensemble calcaire en gros bancs à Orbitolines, de calcaires grossiers où noduleux à Nérinées, de biosparites à Rudistes avec de minces intercalations marneuses. Cette épaisse formation de 250 à 300 mètres n'affleure que dans les massifs septentrionaux et contient une association à *Orbitolina cf. subconcava*, *Cunéolina laurentii*, *Sabaudia minuta*, des milioles et *Ovaléolinareicheli*.

Dans le Hodna, l'Aptien supérieur débute par une barre massive calcaro-dolomitique (Glaçon, 1967; Guiraud, 1973), repère stratigraphique minéralisé à l'échelle régionale. Elle est surmontée par une formation d'alternance calcaires, argiles et marnes sur 270 mètres à lumachelles (Gastéropodes, Toucasia et Nérinées).

4. Albien-Vraconien

Dans les monts du Hodna, quand l'Albien-Vraconien est complet, il correspond à la formation marno-gréseuse. Cet ensemble est caractérisé à sa base par des niveaux gréseux blanchâtres à grains moyens et à stratifications obliques, auxquels succèdent des calcaires et des calcaires argileux prédominants au sommet de la formation.

5. Cénomaniens-Turonien

Cette formation repose sur l'Aptien à la faveur d'un hard-ground au Djebel Guetiane. La formation devient plus haut calcaro-dolomitique et lumachellique à tendance récifale à péri-récifale à Rudistes et à *Caprinula* (Glaçon, 1967).

6. Sénonien

Le Sénonien inférieur est constitué dans le domaine Sétifien par des placages bréchiques polygéniques à éléments carbonatés du Cénomaniens-Turonien.

Le Maastrichtien est transgressif dans la partie occidentale du Hodna, il correspond à des calcaires gris compacts avec des intercalations marneuses. La faune y est 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 est marneux, il devient ensuite calcaire. 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.

➤ Pliocène-Eocène

Dans le Hodna, les formations du Pliocène-Eocène n'affleurent que sur des surfaces réduites autour des massifs occidentaux (Maadid et OuledTebben).

L'Eocène calcaire est constitué essentiellement par des calcaires à silex et des niveaux phosphatés. Ces derniers, d'aspect souvent conglomératique peuvent renfermer d'abondants petits galets de silex. Ces niveaux livrent une abondante faune de vertébrés et surtout des sélaciens comme *Myliobatis dixonii* et *Lamna oblique*. Au sommet de cette série un repère à nodules de calcédoine et géodes de quartz. La série débute par une couche bréchoïde phosphatée qui repose directement sur le Crétacé supérieur. 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 dolomitisée, alternant avec des marnes grises ou verdâtres. Certains niveaux sont pétris de *Thersithéa ponderosa*, *Hemithersthéamaroccana* et *Hedbergella ventricosa*. Localement la série se poursuit par des couches lagunaires gypseuses avec parfois des galets.

➤ Miocène transgressif

Dans les massifs septentrionaux, le Miocène est constitué de conglomérats rougeâtres à la base qui ravinent largement son substratum; viennent ensuite des calcaires gréseux roux et des marnes. Dans le Hodna, le Miocène débute par des poudingues rouges et des grès à Pectinidés (huîtres) et

Lithothamniées (algues). Les poudingues remanient de gros blancs d'Eocène à silex et de Crétacé supérieur (calcaires à Orbitoïdes et Laffittéines).

➤ **Plio-Quaternaire**

Dans le Hodna, le Pliocène est généralement concordant sur le Miocène. La série est d'abord détritique, à affinité deltaïque, puis marneuse et enfin envahie à son sommet par de nouveaux 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 glacis des hautes plaines et des terrasses anciennes étagées des basses plaines entre OuledTebben et Djebel Boutaleb.

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 de quelques blocs 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 graviers disséminés dans les différentes couches.

Age	Lithologie	Caractères hydrogéologiques probables
Mio-Plio-Quaternaire	Sables, graviers, galets et conglomérats	Formation perméable
Miocène	Calcaires, calcaires gréseux dolomies et conglomérats à la base	Formation perméable
Turonien	Dolomies à silex et calcaires	Formation perméable à semi-perméable
Cénomanién	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Vraconien	Marnes, calcaires gréseux et grès	Formation perméable
Albien	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Aptien supérieur	Alternance de calcaires, grès, marnes et marneux calcaire	Formation perméable à semi-perméable
Aptien inférieur	Alternance de marnes, calcaires et dolomies	Formation perméable à semi-perméable
Barrémien supérieur	Alternance de calcaires, marnes gréseux et dolomies	Formation perméable
Barrémien inférieur	Alternance calcaro-marneuse, dolomies et grès	Formation perméable

Figure 1 : Niveaux pouvant être contaminés par les polluants métalliques dans le site de Kherzet Youcef (Attouchek, 2006)

ANNEXE II

Principaux métaux étudiés

1. Le plomb

Le plomb, du latin plumbum, est un métal mou, gris, habituellement trouvé en petite quantité dans la croûte terrestre. Il n'a ni goût ni odeur caractéristique. Il appartient au groupe IVb de la classification périodique des éléments. Ses principales propriétés physico-chimiques sont présentées dans le (Tableau 5).

Le plomb est naturellement présent en moyenne à 0,002% dans la croûte terrestre, généralement sous forme peu soluble. Des dérivés inorganiques sont présents dans les eaux, les sédiments, les sols, l'atmosphère et éventuellement en microtraces chez les organismes vivants. Le plomb est concentré dans les gisements de sulfures où il est communément rencontré sous forme de galène (PbS(s)). Il peut être également rencontré sous la forme d'anglésite (PbSO₄(s)) et de cérusite (PbCO₃(s)).

Tableau 5 Principales propriétés physico-chimiques du plomb.

Symbole	Pb
Numéro Atomique	82
Masse atomique	207,2 g.mol ⁻¹
Point de fusion	327°C
Point d'ébullition	1740°C
Densité	11,35
Configuration électronique	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²
Valence	0, +2, +4

2. Le zinc

Le zinc, dernier élément de la première série de transition de la classification périodique des éléments, de masse atomique 65.37 g/mol, appartient au groupe II-B. Les principaux gisements minéraux de zinc sont constitués de sphalérite (ZnS) et de smithsonite (ZnCO₃). Les différentes sources sont l'industrie principalement sous forme de sulfures (ZnS), l'épandage agricole d'effluents d'élevage ou de boues urbaines, l'activité urbaine.

Les teneurs en Zn dans les sols non contaminés sont généralement les plus élevées de tous les ETM. En contexte contaminé, si la concentration en Zn dépasse 300 mg.kg⁻¹ un effet toxique sur

différentes espèces de micro-organismes du sol apparaît, réduisant leur capacité de dégradation des débris végétaux et la fixation de l'azote atmosphérique.

Le minerai le plus utilisé est le sulfure de zinc appelé blende ou sphalérite (ZnS).

Le zinc, relativement mobile est facilement adsorbé par les constituants du sol organiques et minéraux. Il peut donc être mobile et migrer facilement en profondeur.

La précipitation n'est pas un mécanisme majeur de rétention de Zn dans les sols à cause de la solubilité élevée des composés de Zn.

Tableau 17 Principales propriétés physico-chimiques du Zinc.

Symbole	Zn
Masse atomique	65.38 g/mole
Numéro atomique	30
Densité	7,142
Le point de fusion	419°C
Le point d'ébullition	907°C
Viscosité	0.0039 à 420°C, 0.0030 à 500°C (pa/s)

3. Cuivre

Dans la lithosphère, le cuivre est le 26ème élément en abondance après le Zn avec une teneur moyenne comprise entre 45 ug/g et 70 ug/g (Alloway). Le cuivre est un contaminant qui accompagne notamment le zinc, le plomb et le cadmium dans les activités métallurgiques des métaux non ferreux. C'est un élément essentiel pour plusieurs organismes, cependant il peut avoir des effets toxiques dans certaines conditions. Le cuivre est un élément ubiquiste. La concentration limite de cuivre dans l'eau de boisson est de 1.5 mg/l d'après les **normes Algériennes** et de 1 mg/l pour l'OMS.

4. Cadmium

Le cadmium est un élément ductile, malléable et très fusible (point de fusion à 320°); il possède un poids atomique de 112,40. Dans la nature, le cadmium est généralement associé au zinc. D'une façon générale, les phases dissoutes et les sédiments contiennent une très faible concentration de cadmium et pourtant cet élément trace est l'un des plus redoutés car il est très toxique, les concentrations du Cd dans l'environnement sont probablement contrôlées par les réactions d'adsorption/désorption à la surface des matériaux colloïdaux.

Compte tenu de sa toxicité, la teneur en Cd dans les eaux superficielles destinées à l'alimentation est fixée à 0,001 mg/l par les directives du conseil des communautés européennes et 0.01 mg/l aux

normes Algériennes. Suivant le traitement susceptible d'être appliqué, il peut être acceptable d'utiliser une eau contenant jusqu'à 0,005 mg/l de Cd (Rodier. 1996, in Belkhiri. 2011)

ANNEXE III

DRAINAGE MINIER ACIDE(DMA)



Figure 22 Exemple de drainage acide (eaux à pH de 3 riches en ions ferriques), eaux d'exhaure de l'ancienne mine de W d'Engualès (Aveyron).(BRGM, 2003)

Le tableau 8 reprend les mécanismes et réactions régissant le drainage minier acide.

Tableau 18 Mécanismes et réactions du drainage minier acide (DMA)

Mécanisme	Reaction
Oxydation directe de la pyrite par l'oxygène produisant des sulfates (SO_4^{2-}), du fer ferreux (Fe^{2+}) et une certaine acidité (H^+)	$2 FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+$
Oxydation du fer ferreux en fer ferrique (Fe^{3+}) pouvant être catalysée par des bactéries (acidithiobacillusferrooxidans)	$2Fe^{2+} + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O$
Production de l'acidité par l'hydroxyde de fer $FeO(OH)$ à partir du fer ferreux	$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + \frac{3}{2}H_2O \rightarrow FeOOH + 2H^+$
À un pH > 4, le Fe^{3+} est précipité sous forme d'hydroxyde ferrique ($Fe(OH)_3$), ce qui fait décroître le pH	$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$
Si le pH est < 4, le fer ferrique peut demeurer soluble et oxyder directement la pyrite, en augmentant l'acidité dans l'environnement :	$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$
Oxydation de la pyrite	$FeS_2 + \frac{15}{4}O_2 + \frac{7}{2}H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2H_2SO_4$

ANNEXE IV

Technique d'échantillonnage

a. Choix des points de prélèvement

Pendant la période de stage on a visité la zone pour sélectionner les points de prélèvement des eaux pour voir l'impact de l'activité minière sur l'environnement et sur les eaux souterraines. La carte d'échantillonnage ci-après montre les points de prélèvement des eaux souterraines. Les points sélectionnés sont limités au niveau des forages de la mine de Chaabet el-Hamra ; nous n'avons pas pu effectuer de prélèvements des eaux résiduaires en raison du manque d'eau dans l'oued Enza (oued temporaire).

b. 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 bouché est recommandé, on peut utiliser aussi des flacons en matières plastiques largement répandus en raison de plusieurs avantages (facilité de transport et nettoyage etc.).

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

- **Dans le cas du prélèvement à partie d'un robinet**, il sera indispensable de faire couler l'eau pendant un certain temps (10 mn au moins) c'est le cas de notre travail cette notion a été respectée.

Il existe d'autres cas :

- **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 la zone de la mine de Chaabet el-Hamra ne trouve pas des rivières ou nappes ouvertes.
- **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. On note l'absence des lacs dans la zone d'étude.

- **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 d'analyses des métaux lourds, il faut voir les deux cas suivants :

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

Pour cela nous avons effectué les prélèvements au niveau des forages et en utilisant des bouteilles en plastique afin d'éliminer toute interaction entre la matière et l'échantillon. En ce qui concerne la conservation des échantillons nous avons utilisé l'acide nitrique (HNO_3) de concentration 1N (1 normale).