

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE



## MÉMOIRE

Présenté En Vue De L'obtention Du Diplôme De Master  
En Sciences De La Terre Et De l'Univers

Option : Ressources Minérales et Environnement

## THÈME

Caractérisation Préliminaire Des Rejets Miniers

Des Mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

Encadré par :

Mr. ISSAAD Mouloud

Réalisé par :

AISSAOUI Tiziri

Soutenu publiquement le 21/09/2017, devant le jury composé de :

Mr. MAKHLOUF Ali : Docteur

Président

Mme. IZRI Dahbia : Maître-assistante

Examinatrice

Promotion : 2016/2017

## **Remerciements**

**Tout d'abord je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour finaliser ce modeste travail.**

**Je tiens à remercier tout d'abord mon promoteur Mr. ISSAAD Mouloud, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.**

**« Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude. »**

**Mes remerciements vont à Monsieur MAKHLOUF Ali pour nous avoir fait le grand honneur de présider le jury.**

**Je remercie également Madame IZRI D. qui a accepté de m'orienter et d'examiner ce modeste travail ; ainsi que pour son aide précieuse.**

**Je voudrais également remercier Monsieur ZAGHOUAN H. pour ces orientations permanentes et ces encouragements durant tout mon cursus universitaire, ainsi que le personnel et les enseignants du département Géologie. Je tiens aussi à remercier Madame ABDERRAHMANI pour son aide à la réalisation de ce mémoire.**

**A tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour !!! Merci à vous tous**

## *Dédicace*

*À mes parents*

*À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs époux et épouses*

*À ma nièce et mes neveux*

*À mes cousines préférées*

*À toute la famille AÏSSAOUI et AKBÏ*

*À mes amis et camarades*

*À tous les étudiants de ma promotion*

*À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de*

*continuer .....*

## Sommaire

Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vii
Liste des abréviations.....	viii
Résumé .....	ix
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique</b>	
I. Généralités.....	2
I.1. Généralités sur les ressources minérales de l'Algérie et l'industrie minière en Algérie .....	2
I.2. Relation entre industrie minière et environnement.....	3
I.3. Cadre légale et réglementaire en Algérie .....	5
I.4. Les rejets miniers et le drainage minier acide.....	5
I.4.1. Les rejets miniers :.....	6
I.4.2. Le drainage minier acide (DMA).....	7
I.4.2.1. Réactions chimiques du DMA.....	8
I.4.2.2. Les étapes de formation du DMA .....	8
I.4.2.3. La neutralisation de DMA .....	10
I.4.2.4. Les microorganismes catalyseurs de DMA.....	11
I.4.2.5. Le DMA et l'environnement .....	13
II. Problématique .....	14
<b>Chapitre II : Contexte géologique et historique</b>	
I. Géologie du Nord Est algérien.....	15
I.1. Les formations cristallines du socle .....	15
I.2. Les formations évaporitiques-Trias .....	15
I.3. Les formations carbonatées-dépôts Jurassique-Eocène .....	15
I.4. Formations argilo-gréseuses de la série numidienne.....	15
I.5. Les formations Mio-Pliocène .....	15
II. Le District d'AZZABA.....	17
II.1. présentation de secteur d'étude .....	17
II.1.1. Situation géographique .....	17
II.1.2. Reliefs .....	18
II.1.3. Climat .....	19
II.1.4. Hydrographie et hydrogéologie .....	19
II.2. Contexte géologique.....	19
II.2.1. Lithostratigraphie du secteur d'étude.....	20
II.2.3. Minéralisations du district d'Azzaba .....	21
II.2.3.1. Morphologie des corps minéralisés.....	22

II.2.3.2. Textures des minéralisations .....	22
II.2.3.3. Paragenèses.....	22
II.3. Historique de l'exploitation des gisements du district d'Azzaba.....	23
II.4. L'état de site.....	23
III. Le District de KEF OUM TEBOUL.....	27
III.1. présentation de secteur d'étude .....	27
III.1.1. Situation géographique .....	27
III.1.2. Reliefs .....	28
III.1.3. Climat .....	29
III.1.4. Hydrographie et hydrogéologie .....	29
III.1.5. La réserve intégrale du lac Tonga .....	30
III.2. Cotexte géologique .....	31
III.2.1. Lithostratigraphie de la zone de gisement.....	31
III.2.1.1. Eocène supérieur – Priabonien (Argiles de Numidien).....	31
III.2.1.2. Oligocène inférieur (grès de Numidien) .....	32
III.2.3. Minéralisations du district de Kef Oum Teboul .....	32
III.2.3.1. Morphologie de gisement.....	33
III.2.3.2. Textures des minerais .....	35
III.2.3.3. Composition minéralogique du minerai et paragenèse .....	36
III.3. Historique de l'exploitation de gisement du district de Kef Oum Teboul.....	37
III.3.1. La laverie .....	39
III.3.2. Usine de Messida .....	39
III.4. L'état de site .....	39

### **CHAPITRE III : Moyennes et Méthodes**

I. Prélèvement et préparation des échantillons .....	43
II. L'analyse granulométrique des rejets miniers .....	43
III. Minéralogie et pétrographie des rejets miniers.....	45
III.1. L'observation à la loupe binoculaire .....	45
III.2. Pétrographie .....	46
III.2.1. Réalisations des sections polies .....	46
III.2.2. Observation au microscope métallographique.....	47
III.3. L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) .....	48
IV. L'analyse par fluorescence des rayons X (XRF).....	50
V. L'analyse par spectrométrie d'absorption atomique .....	53
VI. pH, Conductivité électrique et le potentiel Redox .....	55

### **CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations**

I. Granulométrie .....	57
II. Minéralogie des rejets miniers .....	60
II.1. Observation à la loupe binoculaire .....	60
II.2. Observation au microscope optique métallographique.....	61

II.3. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX).....	63
III. Analyse par fluorescence des rayons X, analyse (XRF) .....	64
IV. Analyse chimique des éléments trace métalliques (ETM) .....	66
V. pH, Conductivité électrique et le potentiel d'oxydoréduction .....	67
<b>Conclusion générale</b> .....	70
Références Bibliographiques.....	71

## Liste des figures :

<b>Figure 01</b> : Carte des principales ressources minérales de l'Algérie (DIRECTION GENERALE DES MINES, 2015).....	2
<b>Figure 02</b> : Schéma récapitulant les transferts possibles des éléments traces métalliques entre les différents compartiments de l'environnement. (Sylvaine GOIX, 2012).....	4
<b>Figure 03</b> : les principaux types de résidus miniers générés au cours d'une exploitation. (BRGM/RP-50829-FR 2001).....	6
<b>Figure 04</b> : Les étapes de la formation du DMA (d'après Aubertin et al. 2002).....	9
<b>Figure 05</b> : Carte géologique du Nord-Est algérien (Souheila KHALFAOUI, 2010, in J. F. RAOULT, 1968).....	16
<b>Figure 06</b> : Localisation géographique de la région d'Azzaba et de la zone des gisements (Extrait de la carte topographique PHILIPPEVILLE 1/200.000).....	17
<b>Figure 07</b> : extrait de la carte du référence SERIES 1501 AIR SHEET NJ 32-13 EDITION 3, 1/250.000.....	18
<b>Figure 08</b> : Colonne stratigraphique synthétique de la série de Tengout (Dorsale externe) (DENOUN Abderrahmane, 1984, in Raoult J.F., 1974). ....	20
<b>Figure 09</b> : Paragenèses minérales dans les gisements Ismail et Mrah Sma (DENOUN Abderrahmane, 1984).....	22
<b>Figure 10</b> : Photo satellitaire de Le complexe industriel d'Ismail (Google Earth, 2017).....	24
<b>Figure 11</b> : Photo montre une vue générale sur la plaine d'Azzaba et de complexe mercuriel d'Ismail.....	24
<b>Figure 12</b> : Photos des rejets de traitement du complexe d'Ismail : 1- Vue sur la digue qui modéfie le paysage ; 2 - 3 – Les rejets de la digue.....	25
<b>Figure 13</b> : photos satellitaires montrent l'état les mine abandonnées sans mesure de réhabilitation (Google earth, 2017).....	26
<b>Figure 14</b> : Des gouttelettes de mercure natif dans l'enceinte de l'usine du traitement (Boutaleb et al., 2015).....	26
<b>Figure 15</b> : Photo de la mine de Guenicha inondée par des eux météorique et sous terraines (Issaad, 2015).....	26
<b>Figure 16</b> : Localisation géographique de la région de Kef Oum Teboul (Extrait de la carte topographique de Annaba 1/250.000) .....	27
<b>Figure 17</b> : extrait de la carte de référence SERIES 1501 AIR SHEET NJ 32-14 EDITION 4, 1/250.000.....	28

<b>Figure 18</b> : Schéma orohydrographique de la région de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1971).....	29
<b>Figure 19</b> : carte de la réserve intégrale du lac Tonga, Parc National d'El Kala.....	30
<b>Figure 20</b> : Coupe transversale du gisement de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1965-1966)...	35
<b>Figure 21</b> : Localisation de la laverie et de la fonderie par rapport à la mine de Kef Oum Teboul (François TOMAS, 1970).....	38
<b>Figure 22</b> : Des photos satellitaires montrent les zones d'entrepôts (A ; B ; C) et le parcours de Oued El Eurg.....	40
<b>Figure 23</b> : la zone d'entrepôt (A) des rejets miniers anarchiquement dans l'environnement (Photo prise par Mr. Issaad, octobre 2015 ; Google Earth).....	41
<b>Figure 24</b> : la zone d'entrepôt (B) des rejets minier entre les habitats, et leur DMA qui se déverse dans Oued El Eurg (Photos prises par Mr. Issaad, octobre 2015 ; Google Earth).....	41
<b>Figure 25</b> : la zone d'entrepôt (C) des rejets de la fonderie au bord de la méditerranée (Photo prise par Mr. Issaad, octobre 2015 ; Google Earth) .....	42
<b>Figure 26</b> : photos du matériel utilisé lors de la préparation des échantillons pour le tamisage .....	44
<b>Figure 27</b> : Photo de la tamiseuse vibrante Retsch AS 200 basic.....	45
<b>Figure 28</b> : Photo de loupe binoculaire utilisée pour l'observation.....	45
<b>Figure 29</b> : photo du matériel utilisé lors de la confection des sections polies des rejets minier.....	46
<b>Figure 30</b> : Photos des sections polies réalisés à partir des déchets miniers.....	47
<b>Figure 31</b> : Photo de microscope métallographique de type ZEISS.....	47
<b>Figure 32</b> : Diffusion élastique : les photons X rebondissent en gardant la même énergie....	48
<b>Figure 33</b> : Interférences des ondes diffractées - phénomène de diffraction.....	49
<b>Figure 34</b> : Loi de Bragg donnant les directions où les interférences sont constructives.....	50
<b>Figure 35</b> : Image du dispositif d'un diffractomètre RIGAKU Ultima IV.....	50
<b>Figure 36</b> : L'ionisation en couche électronique interne.....	51
<b>Figure 37</b> : Le principe de base de la fluorescence X et l'arrangement typique d'un détecteur XRF.....	52
<b>Figure 38</b> : Image du dispositif RIGAKU RIX 3100.....	52
<b>Figure 39</b> : schéma de principe du spectrophotomètre d'absorption atomique.....	53
<b>Figure 40</b> : Photo du dispositif de spectromètre d'absorption atomique VARAIN AA240.....	54

<b>Figure 41</b> : une photo des échantillons préparés pour mesurer le ph, redox et conductivité.....	55
<b>Figure 42</b> : photo de pH mètre HANNA HI 8424 utilisé.....	56
<b>Figure 43</b> : Photo du conductimètre HANNA HI 98311.....	56
<b>Figure 44</b> : Courbes cumulatives de la distribution granulométrique des échantillons prélevés dans le district d’Azzaba.....	58
<b>Figure 45</b> : Courbes cumulatives de la distribution granulométrique des échantillons prélevés dans le district de Kef Oum Teboul.....	58
<b>Figure 46</b> : Histogramme de comparions entre les défèrent classe granulométrique des échantillons prélevés dans l’Azzaba.....	59
<b>Figure 47</b> : Histogramme de comparions entre les défèrent classe granulométrique des échantillons prélevés dans le district de Kef Oum Teboul.....	59
<b>Figure 48</b> : Photos montrent les éléments des rejets miniers observés sous une loupe binoculaire (échantillons prélevés dans le district d’Azzaba).....	60
<b>Figure 49</b> : Photos montrent les éléments des rejets miniers observés sous une loupe binoculaire (échantillons prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul).....	61
<b>Figure 50</b> : Photo de rejet minier de la mine d’Azzaba observée sous le microscope métallographique.....	61
<b>Figure 51</b> : Photos des rejets miniers de la mine de Kef Oum Teboul observée sous le microscope métallographique.....	62
<b>Figure 52</b> : Diffractogramme d’un échantillon de rejet minier prélevé dans la mine de Kef Oum Teboul.....	63
<b>Figure 53</b> : Histogramme des pourcentages des oxydes majeurs des rejets miniers (Echantillons prélevés dans la mine d’Azzaba).....	64
<b>Figure 54</b> : Histogramme des pourcentages des oxydes majeurs des rejets minier (Echantillons prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul).....	65
<b>Figure 55</b> : nuages de points de résultat des analyses de pH, Redox des rejets miniers des deux mines.....	68
<b>Figure 56</b> : nuages de points de résultat des analyses de pH, conductivité des rejets miniers des deux mines.....	68

## Liste des tableaux :

<b>Tableau 1</b> : Etapes de la production du DMA (Aubertin et al. 2002).....	9
<b>Tableau 2</b> : Les principaux minéraux neutralisant et leur potentiel de neutralisation (BRGM/RP50829-FR, 2001).....	11
<b>Tableau 3</b> : Espèces de bactéries ayant une incidence sur le taux d'oxydation du fer et du soufre (Pierre Bousquet, 2000, in B.C. Task Force, 1989).....	12
<b>Tableau 04</b> : Succession paragenétique des minéraux du gisement Kef Oum Teboul (SONAREM, 1966).....	36
<b>Tableau 05</b> : les références des échantillons utilisés lors des analyses .....	43
<b>Tableau 06</b> : Tableau des classes granulométriques des rejets miniers prélevés dans la mine d'Azzaba.....	57
<b>Tableau 07</b> : Tableau des classes granulométriques des rejets miniers prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul.....	57
<b>Tableau 08</b> : Tableau des résultats d'analyse des oxydes majeurs des rejets miniers prélevés dans la mine d'Azzaba.....	64
<b>Tableau 09</b> : Tableau des résultats d'analyse des oxydes majeurs des rejets minier prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul.....	65
<b>Tableau 10</b> : Tableau des Résultats d'analyse par spectrométrie d'absorption atomique des éléments chimiques métalliques des échantillons et du Clark (B. Mason).....	66
<b>Tableau 11</b> : Tableau de résultat des analyses de pH, Redox.....	67
<b>Tableau 12</b> : les valeurs de la conductivité dans déférent types d'eau (Jean Pierre Rivron et al., 2012).....	69

## Liste Des Abréviations

°C : Degré Celsius	ORGM : Office national de recherche géologique et minière
A : Acidithiobacillus	Pb: Plomb
Al : Aluminium	S :Soufre
ANGCM : Agence Nationale de la Géologie et du Contrôle Minier	S : Sud
Ar : Argon	Sb : Antimoine
As: Arsenic	SFX : Spectrométrie par fluorescence X
Au: Or	Si : Silicium
Ca: Calcium	Sn :Étain
Cd : Cadmium	Ta : Tantale
Cm : Centimètre	Ti : Thallium
Co : Cobalt	U : Uranium
Cu : Cuivre	W : Tungstène
DMA : Drainage Minier Acide	Zn : Zinc
DRX : Diffraction des Rayons X	µm : Micromètre
E Est	µS : Microsiemens
EIE : Evaluation d'Impacts sur l'environnement	
ETM : Éléments Traces Métalliques	
Fe : Fer	
g : Gramme	
H : Hydrogène	
Hg : Mercure	
K : Potassium	
M : Mètre	
Mg : Magnésium	
Min : Minute	
ml :Millilitre	
mm :Millimètre	
Mn :Manganèse	
ms :Millisiemens	
mV :Millivolt	
N : Nord	
Na :Sodium	
Ni :Nickel	

## Résumé :

Le drainage minier acide est considéré comme le problème le plus grave au quel une industrie minière peut être confronté. Une mine avec drainage minier acide à peut provoquée des impacts dévastateurs à long terme les ressource en eau.

En Algérie, il existe de nombreux sites miniers abandonné sans aucune mesure de réhabilitation. En effet, ces sites génèrent des quantités importantes de contaminants et pourraient avoir des impacts négatifs sur l'environnement. Les mines d'Azzaba et Kef Oum Teboul situés au nord est de l'Algérie, sont deux exemples de sites abandonnés. Le type de gisement pour les deux districts est hydrothermal (mercurifère-polymétallique à Azzaba et cupro-polymétallique à Kef Oum Teboul). Notre étude a été consacrée à la prédiction du pouvoir générateur du DMA des rejets miniers des deux mines abandonnées. Pour ça un certain nombre de paramètres ont été analysé : la granulométrie, les paramètres physico-chimiques (pH, Potentiel d'oxydoréduction, conductivité électrique), DRX, XRF, analyse spectrométrique des ETM, la minéralogie et le chimisme du rejet minier.

Les résultats obtenus ont montré que les rejets miniers de la mine de Kef Oum teboul contiens des quantités importantes de sulfure, et l'encaissant est formé pour l'essentiel, par des grés ; alors, que des conditions favorable pour la génération des DMA. En autre, les rejets miniers de la mine d'Azzaba contient très peu de sulfure du fer, et l'encaissant est formé par des grés et des carbonates, autrement dit de faible chances de formation des DMA avec des paramètres pareil.

# INTRODUCTION GÉNÉRAL

## **Introduction générale :**

L’industrie minière est une activité très importante pour le développement d’un pays en matière de procuration de la matière première et des métaux de base. Bien que cette industrie amène des retombées économiques, de nombreux impacts négatifs sur l’environnement en découlent. À court terme, la destruction du paysage naturel, la fragmentation de milieux écologiques et le gaspillage des métaux précieux, sont des impacts négatifs majeurs, tandis qu’à long terme, elle peut causer d’importants dommages par l’acidification du milieu communément appelé le drainage minier acide (DMA). Par conséquent, le DMA est le problème environnemental majeur généré par l’exploitation minière puisque sa capacité de lixiviation, augmentée par l’activité bactérienne, se perpétue sur de très longues périodes de temps. En produisant généralement des eaux à des pH bas, il est un risque environnemental important; mais heureusement, il est facilement identifié lorsque des tests ont lieu.

Dans le cadre de la détection de pouvoir générateur du DMA, une étude des caractéristiques des rejets miniers de deux mines du sulfure dans le Nord-Est de l’Algérie, est traité dans ce modeste travail :

- les mines situées dans le district mercuriel d’Azzaba dans la wilaya du Skikda, avec une exploitation des minerais du mercure.
- la mine située dans le district de KEF OUM TEBOUL dans la wilaya de Taraf pour une exploitation essentiellement de minerai du cuivre.

Le présent mémoire représente essentiellement un travail de laboratoire. Vu les conditions on n’a pas pu faire une sortie du terrain ; le prélèvement des échantillons et les photos on était effectués par Mr. M. ISSAAD, en octobre 2015, dans le cadre de son doctorat, la raison pour laquelle on n’a pas pu réaliser une carte d’échantillonnage.

Ce travail a pour but la prévention des risques environnementaux qui peut être engendrés par les déchets des activités minières dans le Nord-Est de l’Algérie (cas des mines d’Azzaba et Kef Oum Teboul), notamment le pouvoir générateur du drainage minier acide (DMA). Afin de bien présenter la problématique de ce sujet, une présentation du secteur minier en Algérie, et une synthèse bibliographique sur le DMA et ces paramètres sont présentées avant de décrire les objectifs spécifiques du travail.

**CHAPITRE I :**  
**GÉNÉRALITÉS ET REVUES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**



# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

---

L'analyse géologique et géodynamique des différents ensembles géologiques et structuraux inventoriés sur le territoire national, a montré que les phénomènes métallo géniques induits, peuvent avoir généré des concentrations minérales de différentes typologies de minéralisations qui ont donné des gisements importants, ailleurs dans le monde (DIRECTION GENERALE DES MINES, 2015).

En Algérie les substances minérales ou fossiles découvertes ou non découvertes, situées dans l'espace terrestre national du sol et du sous-sol ou dans les espaces maritimes relevant de la souveraineté de l'Etat algérien ou du droit algérien, tels que définis par la législation en vigueur; et aucune activité minière ne peut être autorisée sur les sites protégés par des conventions internationales et/ou par des textes de loi (Loi minière n° 14-05, 2014, Article 2 et 3).

Les différents travaux géologiques et campagnes de recherche minière financés par l'Etat ont permis de disposer d'une infrastructure géologique de base importante, des découvertes de nombreux gites et gisements et ont permis d'identifier et d'inventorier la présence de minéralisations suivantes (DIRECTION GENERALE DES MINES 2015) :

- Les métaux précieux : Or, argent
- Les pierres précieuses et semi-précieuses : Diamant, topaze, béryl...
- Les métaux de base : Zinc, plomb, cuivre,
- Les éléments du groupe de platine (PGE) et Nickel-Cobalt
- Les métaux rares : wolfram, Etain, Tantale, niobium, béryllium,
- Les minéraux industriels : phosphate, baryte, bentonite, diatomite, magnésite, perlite, pouzzolane, pierres ornementales, talc, gypse, sables siliceux, etc.

### **I.2. Relation entre industrie minière et environnement :**

L'environnement est les ressources naturelles abiotiques et biotiques telles que l'air, l'atmosphère, l'eau, le sol et le sous-sol, la faune et la flore y compris le patrimoine génétique ; les interactions entre lesdites ressources ; les sites, les paysages et les monuments naturels. (Définition de la Loi relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, 2003, article 4), et tout changement négatif ou positif qu'un projet peut entraîner pour l'environnement est concèderai comme un impact environnemental (DIRECTION GENERALE DES MINES, 2003).

L'activité minière débute par la prospection et l'exploration pour aboutir à l'exploitation d'un gisement puis à l'arrêt des activités et à sa remise en état. La ressource minérale étant non renouvelable, il s'avère que l'industrie minière emprunte un territoire le temps d'y extraire une ressource et de la rendre économiquement viable. La remise en état de ce territoire est la phase ultime de l'activité minière.

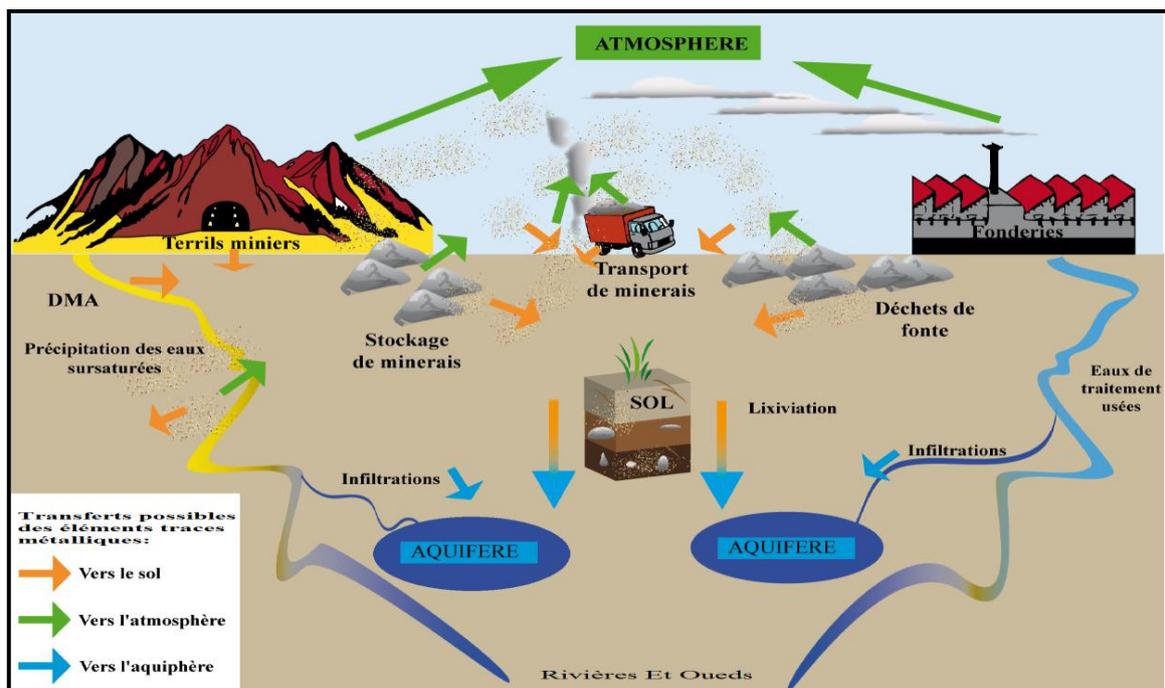
# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

Pendant son cycle de vie, l'industrie minière peut générer la modification de la configuration hydrographique, le déplacement de sols, accentuer le risque d'érosion et de glissement de terrain, émettre des poussières, du bruit, des vibrations, des contaminants chimiques ou radioactifs, épuiser ou contaminer des nappes d'eau douce, détruire la végétation ou des habitats fauniques, etc. Chaque phase du cycle de vie et chaque type d'exploitation génère ses effets particuliers sur l'environnement.

L'industrie minière rejette plusieurs milliers de tonnes de stériles et de résidus chaque année. La majeure partie de ces rejets provient de l'exploitation des minerais desquels sont extraites les substances utiles. Ces résidus miniers, une fois exposés à l'air et à l'eau, subissent des phénomènes d'oxydation qui mobilisent certains éléments traces métalliques (ETM) et métaux lourds, tels que le fer, le zinc, le plomb, le cadmium, le manganèse, etc. La lixiviation de ces métaux lourds aboutit à la formation d'eaux et d'effluents acides qui peuvent constituer des sources de pollution des eaux superficielles et du réseau hydrographique (Seydou KEITA).

Ce phénomène, connu sous le nom de drainage minier acide ou DMA, constitue l'un des problèmes environnementaux les plus importants auxquels l'industrie extractive doit faire face pour préserver la qualité des ressources en eaux dans les sites miniers (Seydou KEITA).



**Figure 2:** Schéma récapitulant les transferts possibles des éléments traces métalliques entre les différents compartiments de l'environnement. (Sylvaine GOIX, 2012).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

---

L'effet des DMA s'étend bien au delà du secteur de l'extraction de minerai et de stockage des résidus. L'entretien du caractère acide des eaux et leur entraînement vers l'aval sont favorisés par les pluies qui imbibent les gisements superficiels, terrils, décharges et bassins de décantation. Les DMA sont transportés vers les sols, les cours d'eau et les aquifères. L'acidité combinée à la présence de contaminants potentiellement toxiques comme les ETM et les divers métaux lourds (Cu, Cd, Pb, Co, Hg, As...), peut affecter sérieusement les écosystèmes environnants. (GHORBEL BEN ABID Manel, 2012)

### I.3. Cadre légal et réglementaire en Algérie :

Dans le but de réduire les effets néfastes sur l'environnement, plusieurs secteurs industriels intègrent maintenant un volet environnemental à leurs activités. Partout à travers le monde, le développement de l'industrie minière se fait actuellement dans un contexte de protection environnementale auquel l'Algérie souscrit (DIRECTION GENERALE DES MINES, 2003).

Dans ce cadre, la Loi minière n° 14-05 exige à tout demandeur d'un permis d'exploitation de mines ou de carrières, de joindre à sa demande les études d'impact et de danger de l'activité minière sur l'environnement, accompagnées du plan de gestion de l'environnement et du plan de restauration et de remise en état des lieux. Ces études sont soumises à l'examen et à l'approbation des autorités compétentes conformément à la réglementation en vigueur (article 126).

Par ailleurs l'un des principes sur laquelle la loi n° 06-190 relative à la protection de l'environnement est fondée, est le principe du pollueur payeur, selon lequel toute personne dont les activités causent ou sont susceptibles de causer des dommages à l'environnement assume les frais de toutes les mesures de prévention de la pollution, de réduction de la pollution ou de remise en état des lieux et de leur environnement (article 3).

### I.4. Les rejets miniers et le drainage minier acide :

Les rejets miniers, que ce soit les stériles francs, les stériles de sélectivité ou les résidus de traitement des minerais, constituent une source importante de pollution dans la mesure où, riches en sulfures, ils génèrent des effluents acides qui peuvent être chargés en métaux lourds, qu'on appelle le drainage minier acide (DMA) (BRGM/RP-50829-FR, 2001) ; Comme l'explique Earthworks: « **Le drainage d'acide minier est considéré comme l'une des menaces les plus graves pour les ressources en eau. Une mine avec drainage d'acide minier a le potentiel pour des impacts dévastateurs à long terme sur la vie aquatique, les cours d'eau et les ruisseaux.** »

### I.4.1. Les rejets miniers :

L'industrie minière est un des secteurs les plus importants de l'économie des pays disposant de ressources minières importantes comme le Canada et la Bolivie. L'extraction de métaux précieux, tels l'argent, ou de métaux de base, tels le cuivre, le zinc et le plomb génère une grande quantité de rejets solides et liquides.

Parmi les déchets solides produits, on peut constater deux catégories :

- Les roches stériles qu'il a fallu enlever pour atteindre le minerai et la gangue qui a été séparée du minerai ne contiennent pas ou peu de métaux. Ces haldes sont souvent très volumineuses et sont composés de fragments d'une taille variant de l'ordre du mètre jusqu'à des particules de quelques micromètres.
- Les déchets de traitement du minerai : Les rejets de concentrateurs sont constitués de la fraction non économique du minerai obtenue suite à la récupération des minéraux à valeur commerciale. Ils sont issus du broyage du minerai et sont généralement très fins (plusieurs dizaines à quelques centaines de microns) et sont sous forme d'une pulpe à leur sortie de l'usine de concentration. Les rejets de concentrateur sont entreposés sous forme de terrils stabilisés par des digues ou par le relief du terrain.

Toutes les composantes de la chaîne d'exploitation des minerais génèrent des rejets de nature diverse, en fonction du type de minerai, les principales étapes et types de rejets sont résumés sur la figure suivante :

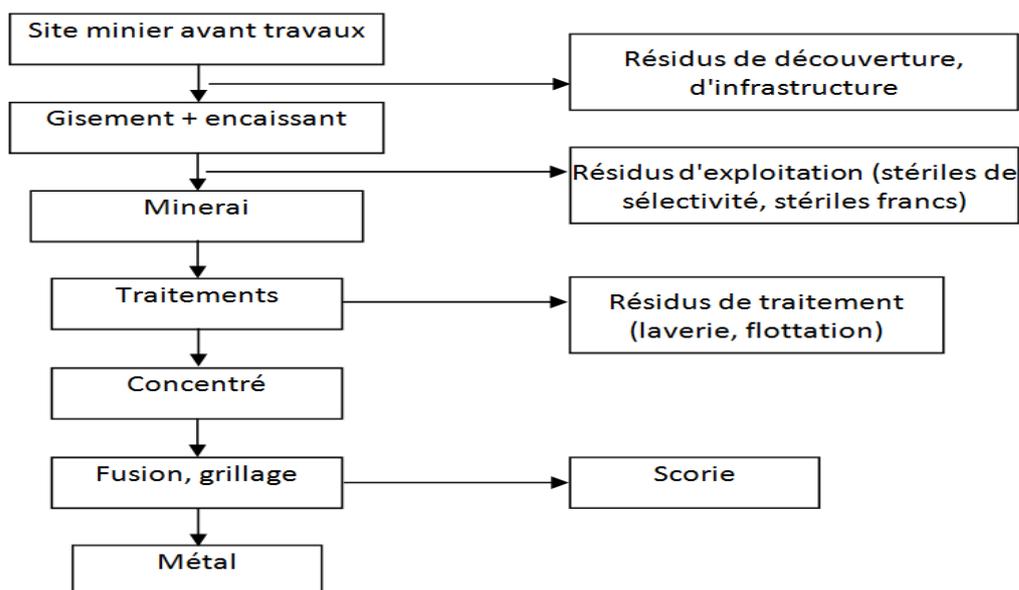


Figure 3 : Les principaux types de résidus miniers générés au cours d'une exploitation. (BRGM/RP-50829-FR 2001)

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

---

En fonction du type de rejets, la capacité à générer de DMA dépend de certains paramètres propres aux rejets miniers (BRGM/RP-50829-FR 2001) :

- la teneur en sulfures ;
- le type de sulfures, leur cristallinité et l'état d'oxydation des surfaces ;
- la composition minéralogique de la gangue et/ou de l'encaissant : contrôle le pouvoir tampon de l'encaissant ; la présence de carbonates (calcite, dolomite, magnésite, ankérite) permettra une neutralisation des solutions acides.
- la granulométrie des produits : contrôle la perméabilité du produit donc la capacité de rétention d'eau et la circulation de l'oxygène. C'est également un paramètre qui contrôle le temps de résidence du liquide et donc le temps de contact solide-liquide ainsi que le rapport entre la surface de contact et le volume du liquide, éléments importants pour le taux de dissolution des sulfures.

### **I.4.2. Le drainage minier acide (DMA) :**

« Le DMA se définit par un écoulement d'eau acide contenant des métaux lourds dissous et résultant de l'oxydation naturelle des stériles, du minerai ou des résidus miniers exposés à l'air et à l'eau. » (Pelletier-Allard Rébecca, 2014, in Chevalier, 1996).

Généralement, le DMA est un lixiviat qui se caractérise par un pH faible, une haute conductivité, la présence d'un acide minéral tel que l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), des concentrations élevées en fer, en aluminium et en manganèse, ainsi qu'une concentration élevée en métaux lourds (cuivre et zinc) et autres éléments toxiques pouvant contaminer gravement les sols et les eaux souterraines (Melanson, 2006, Peppas et autres, 2000; Akcil and Koldas, 2006). Habituellement, le phénomène est engendré par l'oxydation des minéraux sulfurés (Pelletier-Allard Rébecca, 2014, in Chevalier, 1996).

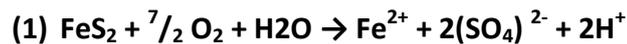
Bien que ce processus soit naturel, l'exploitation minière augmente considérablement la génération de DMA, qui dépend fortement de la minéralogie de la roche locale ainsi que de la disponibilité en eau et en oxygène. Puisque ces facteurs sont très variables d'un site à un autre, la prédiction de la génération de DMA est extrêmement difficile et coûteuse ; et aucune méthode normalisée n'existe pour le classement, l'ampleur et la réduction du risque de DMA (Akcil and Koldas, 2006).

Plusieurs réactions surviennent pour obtenir la formation de DMA. Les facteurs biologiques, chimiques et physiques permettent de déterminer le taux de production d'acide. Cependant, les facteurs physiques, particulièrement la perméabilité des dépôts de rejets miniers, sont particulièrement importants. Les sites à haute perméabilité ont un rapport d'oxygène élevé, ce qui contribue à la hausse des taux de réaction chimique puisque

les températures sont plus élevées et la pénétration de l'oxygène par convection est augmentée (Akcil and Koldas, 2006).

#### **I.4.2.1. Réactions chimiques du DMA :**

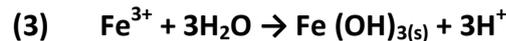
Les réactions de production de DMA peuvent être illustrées par l'examen de l'oxydation de la pyrite (FeS<sub>2</sub>). La première réaction chimique consiste à l'oxydation de la pyrite par l'oxygène (O<sup>2</sup>) et l'eau (H<sub>2</sub>O). Cette réaction libère des ions de fer ferreux (Fe<sup>2+</sup>), des sulfates (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> et des ions hydrogènes (H<sup>+</sup>). Ces derniers acidifient le milieu.



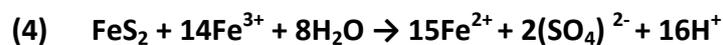
En fonction de la concentration en oxygène et du pH du milieu, la majorité du fer ferreux s'hydrolyse en fer ferrique (Fe<sup>3+</sup>) (Salomons, 1995; Melanson, 2006).



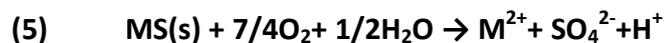
le Fe<sup>3+</sup> se précipite sous forme d'hydroxyde ferrique (Fe(OH)<sub>3</sub>) et peut aussi se cristalliser en jarosite, laissant peu de Fe<sup>3+</sup> en solution tout en réduisant simultanément le pH (Akcil and Koldas, 2006).



Ainsi, le Fe<sup>3+</sup> de la deuxième équation qui ne se précipitera pas à la troisième équation et oxydera davantage de pyrite si le pH demeure sous 4,0 (Melanson, 2006).



Les réactions ci-dessus, à l'exception de la deuxième et troisième équation, supposent que la matière oxydée est de la pyrite. Cependant, d'autres minéraux sulfurés tels que la pyrrotite (Fe<sub>1-x</sub>S), la chalcocite (Cu<sub>2</sub>S), la covellite (CuS), la bornite (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>), la sphalérite (ZnS), la chalcopyrite (CuFeS<sub>2</sub>), l'arsénopyrite (FeAsS), la marcassite (FeS<sub>2</sub>), la millérite (NiS) et la galène (PbS) produiront des réactions chimiques à des taux différents; l'équation suivante peut donc représenter la production d'acidité liée à une espèce minérale (M) sulfurée (Kalin et autres, 2006; Melanson, 2006).



#### **I.4.2.2. Les étapes de formation du DMA :**

La production de DMA s'initie et évolue selon les étapes décrites par KLEINMANN et al. 1981, en se basant sur des essais de lixiviation de minerais ainsi que sur l'étude de cas réels, ces auteurs définissent trois étapes dans la production de DMA. Le tableau et la figure

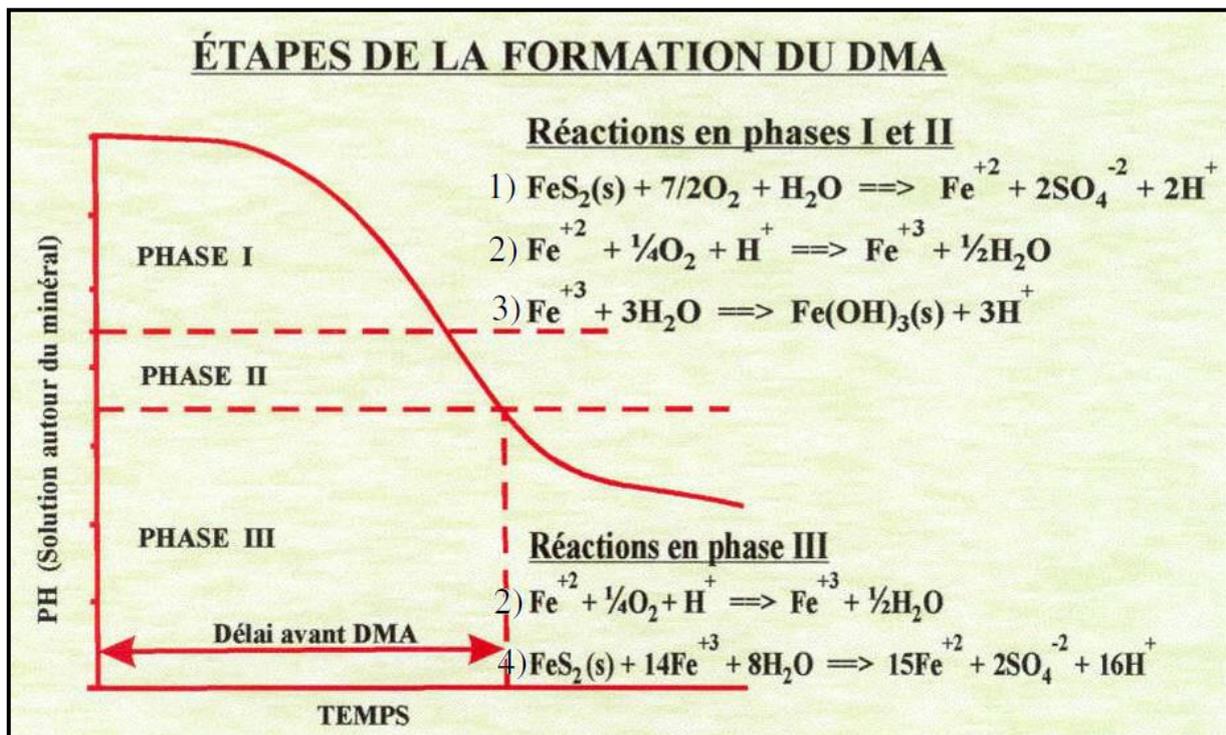
# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

présentent un résumé des différentes réactions et phases de formation du DMA. Le processus de la réaction se produit selon une séquence dépendant de l'activité bactérienne et des conditions de pH du lixiviat (Abdelmalek GOUMIH, 2014).

Réactions		
1) $\text{FeS}_2(\text{s}) + 7/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ + \text{énergie}$		
2) $\text{Fe}^{2+} + 1/4\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2\text{H}_2\text{O} + \text{énergie}$		
3) $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{énergie}$		
4) $\text{FeS}_2(\text{s}) + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + \text{énergie}$		
Etapas	Mécanismes	Effluents
I	Réaction 1 : chimique et biologique	pH > 4,5
	Réaction 2 : chimique ralentit quand le pH baisse	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] élevée [Fe] faible Acidité faible ou nulle
II	Réaction 1 : chimique et biologique	pH de 2,5 à 4,5
	Réaction 2: taux déterminé par l'activité bactérienne	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] élevée [Fe] et acidité augmentent Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> faible
III	Réaction 3 : contrôlée biologiquement	pH < 2,5
	Réaction 4 : au taux lié à celui de la réaction 3	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] élevée [Fe] et acidité élevées rapport Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> élevé

**Tableau 1 :** Etapes de la production du DMA (Aubertin et al. 2002)



**Figure 4 :** Les étapes de la formation du DMA (d'après Aubertin et al. 2002)

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

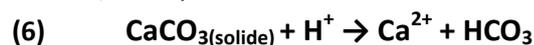
**Étape I :** À cette étape, l'oxydation de la pyrite se fait par voie chimique et biologique (réaction 1). L'hydrolyse du fer ferreux (réaction 2) et l'oxydation du fer ferrique (réaction 3) se fait principalement par voie chimique à cette étape.

**Étape II :** Cette étape est initiée par le ralentissement de l'oxydation chimique du fer ferrique causée par la baisse du pH et sa substitution par l'oxydation biologique qui s'accélère. (Abdelmalek GOUMIH, 2014).

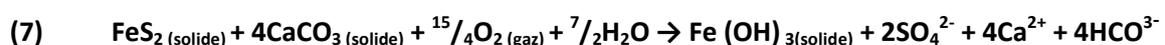
**Étape III :** Lorsque le pH diminue sous une valeur de 3, la solubilité du fer augmente et moins en moins de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  précipite. L'activité du  $\text{Fe}^{3+}$  augmente ainsi et contribue à oxyder la pyrite (réaction 4) tandis que les bactéries catalysent l'oxydation de  $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$  (réaction 3). Un cycle est ainsi créé entraînant une production intense d'acidité, de sulfate et de fer. (Abdelmalek GOUMIH, 2014).

### I.4.2.3. La neutralisation de DMA

En contexte carbonaté, la dissolution des carbonates libère des alcalis et des cations métalliques tels que Ca, Mg, et Mn et contribue à neutraliser l'acidité de l'eau selon la réaction (GHORBEL BEN ABID Manel, 2012) :



La réaction complète d'oxydation, hydrolyse et neutralisation en présence de pyrite peut être décrite par la réaction suivante (GHORBEL BEN ABID Manel, 2012, in Doye, 2005):



Parmi les roches sédimentaires les calcaires et les dolomites offrent le potentiel de neutralisation le plus élevé. Les roches ignées ont généralement un faible pouvoir tampon. Seules quelques roches ultramafiques et les carbonatites (50% de carbonates) peuvent présenter un potentiel de neutralisation élevé. Pour les roches métamorphiques, seul le marbre possède un potentiel de neutralisation (GHORBEL BEN ABID Manel, 2012).

Les minéraux neutralisants peuvent être soit naturellement présent dans les résidus miniers (minéraux de gangue ou de l'encaissant), soit ajoutés comme aditifs pour tamponner l'acidité. Le potentiel de neutralisation de ces différents minéraux est calculé par rapport à la calcite. C'est le poids nécessaire pour obtenir le même effet neutralisant que 100 g de calcite. Par exemple, le poids molaire de la magnésite est de 84 g, celui de la calcite 100 g. Ainsi, 84 g de magnésite fournissent la même quantité d'alcalinité que 100 g de calcite) (BRGM/RP50829-FR, 2001). Les principaux minéraux neutralisants et leur potentiel sont donnés dans le tableau (BRGM/RP50829-FR, 2001) :

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

Mineral	Composition	Potentiel de consommation d'acide	Tampon pH
Witherite	BaCO <sub>3</sub>	196	5,5-6,9
Rhodocrosite	MnCO <sub>3</sub>	115	5,5 - 6,9
Ankérite	CaFe(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	108	5,5-6,9
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	100	5,5 - 6,9
Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	92	5,5-6,9
Goethite	FeOOH	89	3,0-3,7
Manganite	MnOOH	88	3,0-3,7
Malachite	CU <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>	74	5,1-6,0
Magnésite	MgCO <sub>3</sub>	84	5,5-6,9
Chaux	CaO, Ca(OH) <sub>2</sub>	57	
Gibbsite	Al(OH) <sub>3</sub>	26	4,3 - 3,7
Brucite	Mg(OH) <sub>2</sub>	29	5,5-6,9

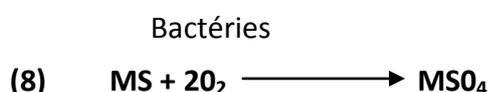
**Tableau 2** : Les principaux minéraux neutralisant et leur potentiel de neutralisation (BRGM/RP50829-FR, 2001).

### 1.4.2.4. Les microorganismes catalyseurs de DMA:

On reconnaît maintenant qu'un des facteurs déterminants dans l'initiation et le maintien de l'oxydation des sulfures métalliques dans les environnements miniers est la manifestation de l'activité catalytique de plusieurs micro-organismes (Roger Guay, Ph.D., 1994, in (Guay et coll., 1977, 1989), (cf. Annexes I à IV)).

Certains micro-organismes tirent l'énergie nécessaire à leur fonctionnement des réactions d'oxydo-réduction métalliques (Pauline COLLON, 2003) ; *Thiobacillus ferrooxidans* et *Leptospirillum ferrooxidans* sont deux espèces bactériennes indigènes des environnements miniers, et ils sont avec d'autres groupes de micro-organismes (actinomycètes, moisissures et levures) étroitement associés à la génération biologique d'acide sulfurique à partir de terrils et haldes de stériles miniers contenant des sulfures (Roger Guay, Ph.D., 1994).

La physiologie énergétique de la bactérie *T. ferrooxidans* peut être schématisée par l'équation suivante (Roger Guay, Ph.D., 1994):



Où **M** représente un métal bivalent comme le cobalt, le cuivre, le fer, le molybdène, le nickel ou le zinc.

## Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

### CHAPITRE I : Généralités et revus bibliographique

Le tableau 3 montre une liste des bactéries pouvant affecter l'oxydation du fer et du soufre. Toutefois, les bactéries ne sont pas responsables entièrement du drainage minier acide, seulement de l'accentuation du problème et de la mise en place de conditions favorables à l'entretien de la réaction. Donc, une fois que les conditions sont favorables et que l'oxydation des sulfures débute, le problème ne cessera pas d'être présent jusqu'à ce que les sulfures soient tous oxydes (Pierre Bousquet, 2000).

Espèces de Bactéries	Type	Milieu Chimique à Prolifération Optimale
<i>Thiobacillus ferroxidans</i>	Oxydant du Soufre Oxydant du Fer	pH- 2,5 à 3,5
<i>Thiobacillus novellus</i>	Oxydant du Soufre	pH - Neutre à Alcalin
<i>Thiobacillus thioparus</i>	Oxydant du Soufre	pH - Neutre à Alcalin
<i>Thiobacillus denitrificans</i>	Oxydant du Soufre	pH - Neutre à Alcalin Apport de Nitrates pour Réduction à N2
<i>Arthrobacter sp.</i>	Oxydant du Soufre	-
<i>Bacillus sp.</i>	Oxydant du Soufre	-
<i>Flavobacterium sp.</i>	Oxydant du Soufre	-
<i>Pseudomonas sp.</i>	Oxydant du Soufre	-
<i>Desulfatovibrio sp.</i>	Réducteur du Soufre	-
<i>Desulfotomaculum sp.</i>	Réducteur du Soufre	-
<i>Salmonella sp.</i>	Réducteur du Soufre	-
<i>Proteus sp.</i>	Réducteur du Soufre	-
<i>Sulfolobus sp.</i>	Oxydant du Fer	-
<i>Metallogenium sp.</i>	Oxydant du Fer	-
<i>Siderocapsa sp.</i>	Oxydant du Fer	-
<i>Leptothrix sp.</i>	Oxydant du Fer	-
<i>Gallionella sp.</i>	Oxydant du Fer	-
<i>Vibrio et Bacillus sp.</i>	Oxydant du Fer	-
<i>Aerobacter aerogenes sp.</i>	Oxydant du Fer	-

**Tableau 3** : Espèces de bactéries ayant une incidence sur le taux d'oxydation du fer et du soufre (Pierre Bousquet, 2000, in B.C. Task Force, 1989)

#### **I.4.2.5. Le DMA et l’environnement :**

L’exploitation minière est l’une des activités anthropiques les plus polluantes puisqu’elle génère la production de DMA, un lixiviat possédant une forte acidité et une concentration en métaux dissous élevés (Melanson, 2006).

Puisque chaque mine est unique en ce qui concerne la production de DMA et de ses effets (Akcil and Koldas, 2006), l’environnement est modifié de manières différentes pour chacun des sites en réduisant le pH des sols et des eaux en plus de relarguer une concentration en métaux. Il n’y a donc aucune méthode universelle de traiter le DMA. Ainsi, la capacité de support des milieux est gravement touchée puisque les limites de concentrations pour la protection du milieu de vie aquatique sont très souvent excédées (Pelletier-Allard Rébecca, 2014).

Les zones humides, les milieux aquatiques et les aquifères sont des endroits particulièrement vulnérables au DMA. Dans certains cas, ils peuvent même accentuer la production de DMA puisque la présence d’eau est importante dans ces milieux libérant ainsi plusieurs tonnes de métaux lourds dans les cours d’eau. Cependant, ce sont aussi des milieux essentiels puisqu’ils supportent la vie d’une grande et riche biodiversité. Le caractère acide des effluents miniers comporte des impacts directs tels que la mortalité des populations de poissons et crustacés puisque peu d’espèces peuvent survivre à un pH inférieur à 5. D’autres conséquences de l’acidification auront un impact sur leur taux de croissance et de reproduction. (Pelletier-Allard Rébecca, 2014).

Dans les régions où le sol est naturellement acide, l’acidité et les métaux contenus dans le DMA sont transportés sur une plus grande distance tandis que les sols constitués de calcaires diminuent la distance parcourue. Dans cette condition, les eaux acides sont rapidement neutralisées par les roches carbonatées, et la plupart des métaux deviennent insolubles et se précipitent dès que le pH remonte (Pelletier-Allard Rébecca, 2014).

La teneur élevée en sulfates provoque une pression osmotique importante engendrant la déshydratation des êtres vivants. Les métaux solubilisés dans le DMA sont non-dégradables et sont presque tous de violents poisons du métabolisme de la plupart des espèces vivantes. De plus, la présence simultanée de plusieurs métaux peut engendrer une toxicité supérieure à celle de chaque métal séparé. Par exemple, le zinc, le cadmium et le cuivre sont toxiques lorsqu’ils sont présents simultanément dans des eaux de pH faible. Ainsi, ils agissent en synergie pour inhiber la croissance des algues et affecter les poissons (FNEHIN, 2012).

## **II. Problématique :**

Les activités minières se caractérisent par l'excavation de larges volumes de stériles miniers et par la production de résidus miniers lors des différents procédés minéralogiques. Ces stériles ou résidus sont entreposés à proximité de la mine et peuvent couvrir des superficies de plusieurs hectares. Lorsqu'il y a présence de minéraux sulfurés (pyrite et pyrrhotite) et sous l'effet des eaux météoriques et l'oxygène atmosphérique, des réactions d'oxydation sont alors engendrées pour produire des eaux acides. Il y a alors production d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ), d'où une diminution du pH qui favorise la lixiviation des métaux toxiques présents dans les résidus. Ce phénomène se nomme drainage minier acide (DMA).

Tous les rejets miniers ne sont pas forcément producteurs de DMA. Dans certains contextes géologiques particuliers, la présence de minéraux carbonatés ou silicatés dans la roche permet une neutralisation naturelle de l'acidité des drainages. L'effluent est appelé, dans ce cas, drainage minier neutre (DMN) et caractérisé par un pH proche de la neutralité et des teneurs en métaux solubles généralement plus faibles qu'en DMA. Cependant, le pH neutre ne signifie pas forcément que ces effluents ne sont pas nuisibles pour l'environnement. Ces drainages, sont en effet, généralement fortement sulfatés et peuvent contenir des polluants qui nécessitent une gestion appropriée.

Afin d'étudier les pouvoirs générateurs d'acides des rejets miniers, on a choisi comme cas typique les restes miniers de la mine abandonnée d'Azzaba et de Kef Oum Teboul, et pour cela un certain nombre de paramètres furent analysés à savoir : la granulométrie, les paramètres physico-chimiques (pH, Potentiel d'oxydo-réduction, conductivité électrique), DRX, XRF, analyse spectrométrique (ETM), la minéralogie et le chimisme de rejet minière.

**CHAPITRE II :**  
**CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET**  
**HISTORIQUE**

## **Chapitre II : Contexte géologique et historique**

### **I. Géologie du Nord Est algérien :**

Les districts d’Azzaba et de Kef Oum Teboul sont situés au Nord-Est de l’Algérie, géologiquement ce domaine fait partie de la ceinture alpine appelée Maghrebides

Les principales formations géologiques du Nord-Est algérien sont de cinq types d’âges différents ; d’après Souheila KHALFAOUI, 2010, on distingue :

#### **I.1. Les formations cristallines du socle :**

Ces formations sont représentées essentiellement par le socle kabyle, constituées de trois ensembles superposés :

- **Un ensemble supérieur** : formé de schistes, ou des phyllades, des grès et des Porphyroïdes
- **Un ensemble inférieur** : gneissique à intercalation des marbres et d’amphibolites. A la base il se compose de leptynite, pyroxénite, marbre ;
- **Le socle de Cap Bougaroun** : composé de gneiss et de lherzolites serpentinisées.

#### **I.2. Les formations évaporitiques-Trias :**

Elles sont représentées par les dépôts évaporitiques. Ces formations affleurent sous forme de masses chaotiques où dominant le gypse, les argiles et les dolomies, soit organisées en unités stratifiées localisées sur les flancs des structures.

#### **I.3. Les formations carbonatées-dépôts Jurassique-Eocène :**

Ces formations correspondent au domaine externe qui est formé par un empilement complexe de nappes surmontant au Sud l’autochtone présaharien des hautes plaines. On distingue du Nord vers le Sud les unités suivantes : L’unité ultratellienne ; L’unité tellienne sensu stricto (S.S) ; Les unités méridionales à Nummulites ; Domaine néritique constantinois ; Domaine des Sellaoua

#### **I.4. Formations argilo-gréseuses de la série numidienne – (Oligocène) :**

La série Numidienne est formée par deux assises : La partie supérieure d’âge Oligocène supérieur formée par des grès quartzueux feldspathiques. L’assise inférieure est formée par des argiles grises foncées, d’âge Préabonien.

#### **I.5. Les formations Mio-Pliocène :**

Il s’agit d’un ensemble conglomératique à la base, avec alternance d’argiles sableuses. Les dépôts du Miocène sont constitués de grès quartzueux accompagnés de quelques niveaux de wackes. Il existe aussi des intercalations argileuses et marneuses.

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D’Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

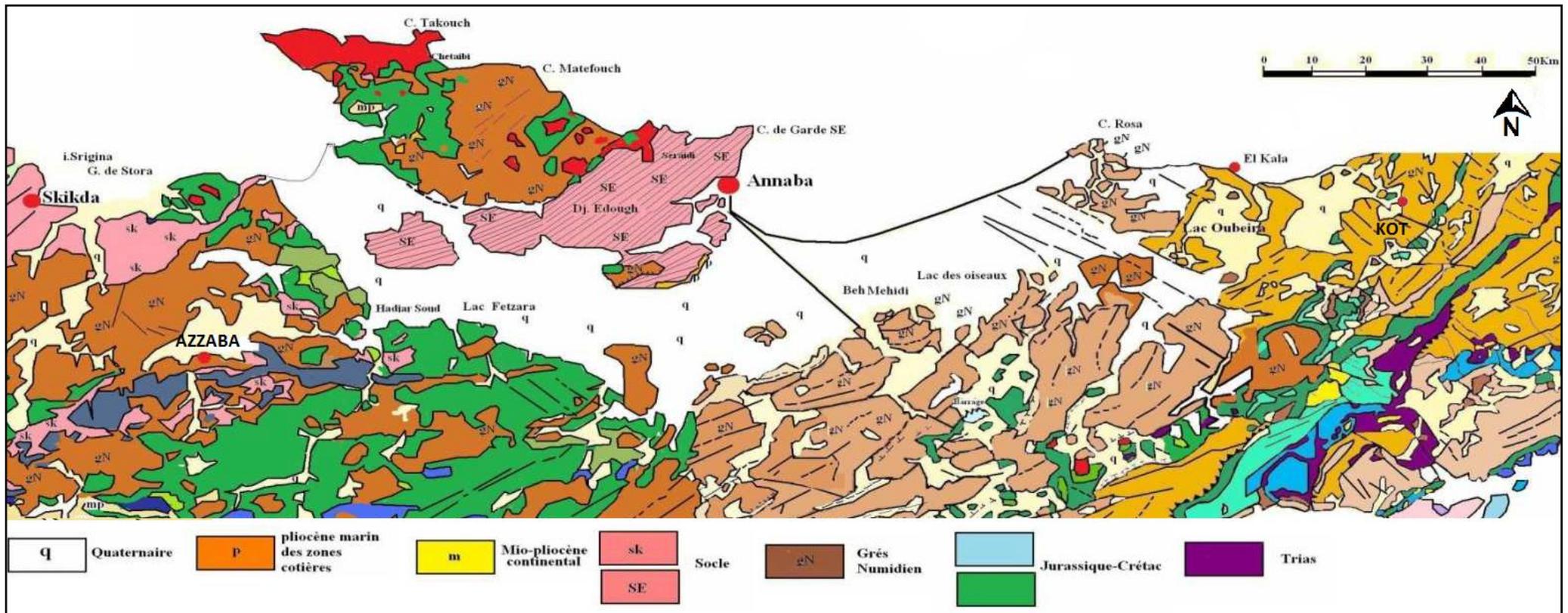


Figure 05 : Carte géologique du Nord-Est algérien (Souheila KHALFAOUI, 2010, in J. F. RAULT, 1968)

## II. Le District d’AZZABA

### II.1. présentation de secteur d’étude :

#### II.1.1. Situation géographique :

La région d’Azzaba est située dans le Nord-Est de l’Algérie, administrativement elle fait partie de la wilaya de Skikda. Elle se trouve à 80 km au Nord-Est de Constantine, à 70 Km au Sud-Ouest de Annaba et à 32 Km au Sud-Est de Skikda, à 67Km au Sud-Ouest d’Annaba.

Les gisements et indices de mercure sont localisés dans une bande étroite, longue de 24 Km et large de 4 Km environ, orientée E-W au Sud d’Azzaba (Figure 6).

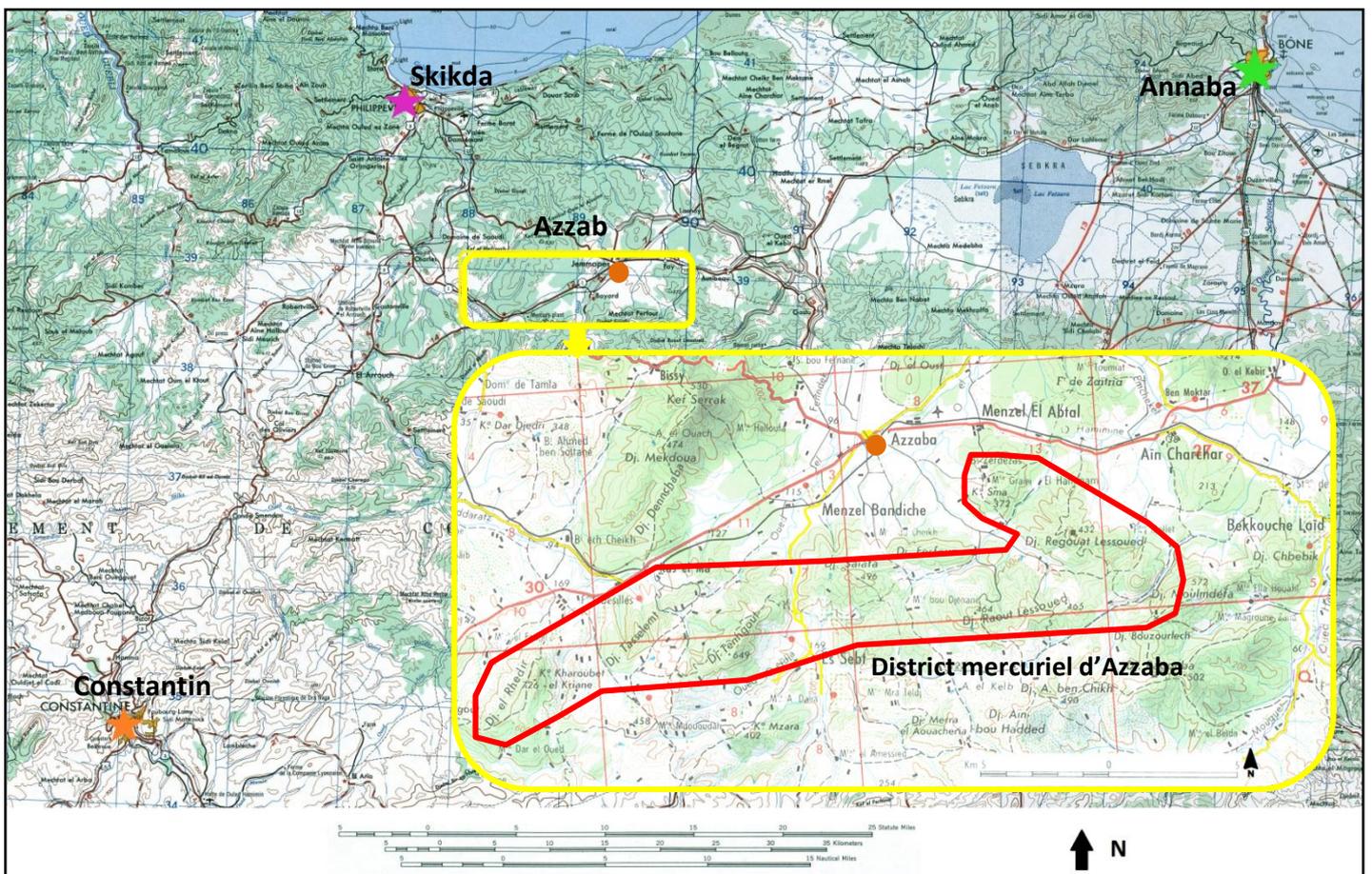


Figure 06 : Localisation géographique de la région d’Azzaba et de la zone des gisements  
(Extrait de la carte topographique PHILIPPEVILLE 1/200.000)

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

### II.1.2. Reliefs :

La région englobe essentiellement le flanc Sud du massif montagneux de Filfila, qui représente le prolongement Est du massif de la petite Kabylie. Entre le flanc Sud de Djebel Filfila et le flanc Nord de la chaîne numidique se trouve la dépression de Azzaba. Cette dépression est une plaine peu ravinée, large de 8 Km au maximum, irriguée par l'oued Fendek et ces effluents (voir la figure 7).

Les éléments géographiques les plus importants du district d'Azzaba sont :

- Au Sud la chaîne numidique avec les côtes absolues de 300 à 600m.
- Au Nord la plaine d'Azzaba avec les côtes absolues de 70 à 120m.

La côte absolue maximale de 641 m correspond au mont de Djebel Tengout, situé à l'extrême Sud Ouest de la région.

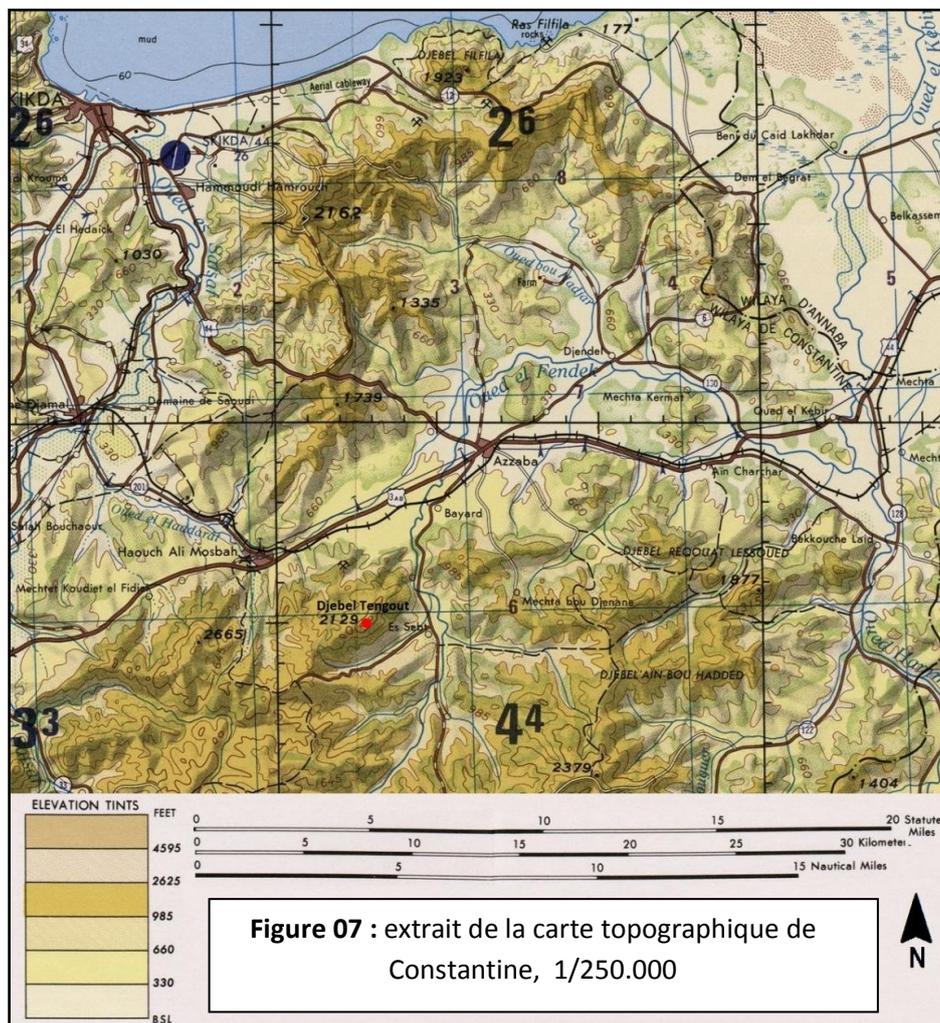


Figure 07 : extrait de la carte topographique de Constantine, 1/250.000

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

### II.1.3. Climat :

La région d'Azzaba possède un climat méditerranéen subtropical, avec un été chauds et secs et un hiver humide et froid.

Les températures annuelles varient entre la température moyenne de mois d'aout qui est de 30°C, et la température moyenne de mois de janvier qui est de 17°C. Dans la région l'humidité de l'air est très élevée elle dépasse les 65% durant toute l'année ; La moyenne mensuelle des précipitations la plus élevée est enregistrée au mois de décembre avec 123 mm et 18 jours de précipitation en moyen (meteovista, 2017).

### II.1.4. Hydrographie et hydrogéologie :

Le principal cours d'eau traversant la région est l'oued Fendek qui prend sa source dans les contreforts septentrionaux de la chaîne numidique. En amont il a une direction subméridionale et dans la dépression d'Azzaba sa direction est proche de celle de l'Est.

La région est caractérisée par deux nappes aquifères. La nappe phréatique oligocène et la nappe profonde paléocène-éocène. Les deux nappes sont séparées par les roches imperméables du Paléozoïque et du Lutétien-Priabonien représentant la minéralisation mercurielle de cinabre (HgS). Le complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène prendra la principale part de la formation des venues d'eau dans les ouvrages miniers.

## II.2. Contexte géologique :

La chaîne numidique est formée de plusieurs séries, hétéropiques dans un empilement complexe de nappes de charriage. On distingue schématiquement, du bas vers le haut (et du sud vers le nord), (DENOUN Abderrahmane, 1984) :

- a) Les séries telliennes,
- b) Les flyschs et les séries apparentées,
- c) Le socle et la Dorsale kabyle avec leur couverture (Oligo-Miocène Kabyle et Nummulitique II),
- d) La série numidienne,
- e) Les formations post-nappes du Miocène continental.

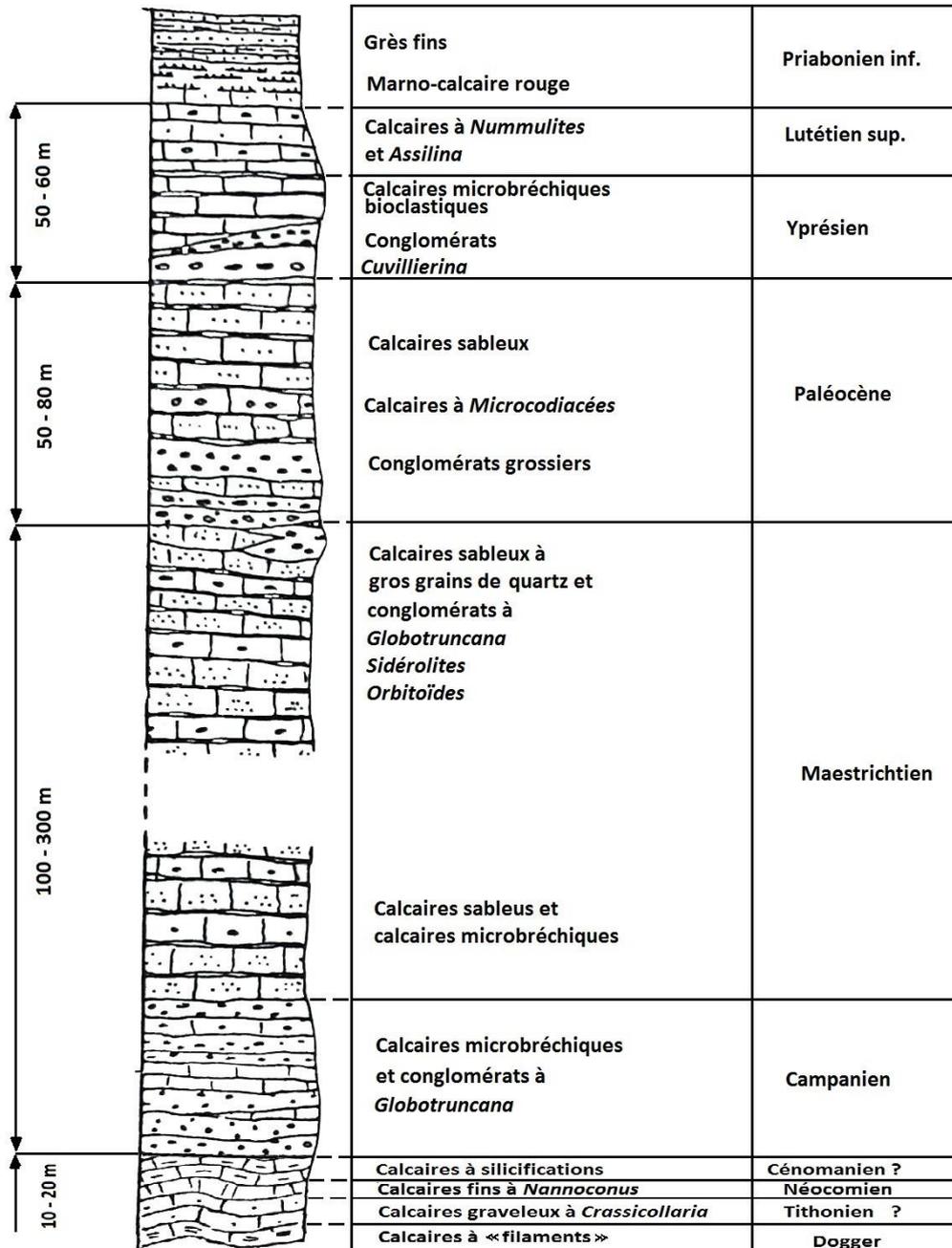
La région d'étude englobe les parties bordières de deux grandes zones structuro-faciales : de la chaîne calcaire et du Haut-fond Berbère, toutes les deux font partie d'un miogéosynclinal alpin qui a été formé sur le socle paléozoïque plissé.

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

### II.2.1. Lithostratigraphie du secteur d'étude:

La série stratigraphique la mieux représentée au sud d'Azzaba (dans la zone des gisements) est la série de Tengout, appartenant à la Dorsale externe (SONAREM, 1966 ; DENOUN Abderrahmane, 1984) (voir la figure ici dessous) :



**Figure 8 :** Colonne stratigraphique synthétique de la série de Tengout (Dorsale externe) (DENOUN Abderrahmane, 1984, in Raoult J.F., 1974).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

Elle débute par une série mal datée dans laquelle des bancs calcaires à silicifications blanches sont attribués au Vracono-Cénomaniens. Ils surmontent des calcaires fins à *Nannoconus*, des calcaires graveleux à *Crassicollaria* et des calcaires à filaments attribués respectivement au Néocomien, Tithonien, et au Dogger. L'ensemble est fortement plissé. Au dessus, et en discordance, viennent les conglomérats du Campanien en bancs réguliers.

Le Sénonien supérieur (Maastrichtien), épais est surtout représenté par des calcaires microbréchiques. Les grains de quartz sont bien roulés, alors que les débris calcaires sont anguleux.

Les terrains paléocènes débutent par des niveaux de poudingues, à éléments gros à blocs de roches dolomitiques et calcaires. Plus haut apparaissent des bancs de calcaires sableux, qui renferment de nombreux restes de Microcodiacées et des formes isolées de *Miscellanea*, *Plenorbulina antiqua*, témoignant d'un âge Thanétien.

Un faciès très variable constitué de microbrèches, conglomérato-brèches et calcaires organogènes. Les *Cuvillierina* trouvées dans la base, indique un âge Yprésien des dépôts. Quant aux calcaires organogènes des parties supérieures, ils contiennent des *Assilina* et des *Nummilites* du Lutétien supérieur (Raoult, 1969).

### II.2.3. Minéralisations du district d'Azzaba :

D'après l'état actuel des connaissances, tous les gisements de mercure de la région occupent une position géologique déterminée et peuvent être regroupés en champs miniers, caractérisés par une localisation spatiale et structurale communes (DENOUN Abderrahmane, 1984) :

- Le champ minier d'Ismaïl regroupant les trois gisements de Ras-El-Ma, Ismaïl, Guenicha, ayants pour horizon porteur de la minéralisation des conglomérats-brèches calcaires, datées de l'Hyprésien-Lutétien, chevauché par les alternances de siltites et grès du Lutétien-Priabonien, qui forment la couverture de la minéralisation.
- Le champ minier de Mra Sma, qui regroupe les gisements de Mra Sma I, Mra Sma II et Koudiet Sma, a pour horizon porteur les pseudo-brèches calcaires du Campanien et les grès du Néocomien, chevauchés par les schistes à chlorites-séricite du Paléozoïque.

La série numidienne, commune à ces deux champs miniers, forme la couverture des « nappes » kabyle à Mrah-Sma et d'Ismaïl.

Cette étude portera essentiellement sur les champs miniers d'Ismaïl et de Mrah Sma.

### **II.2.3.1. Morphologie des corps minéralisés**

Les corps minéralisés se présentent en général sous deux formes: ils sont soit concordants soit sécants sur la stratification et les charriages. Le plus souvent, les deux formes sont associées. Les corps sont rarement continus sur la vingtaine de mètres (DENOUN A., 1984).

### **II.2.3.2. Textures des minéralisations :**

Les minéralisations présentent des textures variées, toutes textures sont généralement rassemblées dans un même corps minéralisé (DENOUN A., 1984)

**a- Textures bréchiqes :** Le cinabre se trouve soit dans les éléments, où il semble remplacer ou imprégner des débris de roches d'un conglomérat, soit dans le ciment ou les fissures nombreuses où il est associé à de la calcite ou de la silice.

**b- Textures disséminées :** Dans les grès, le cinabre occupe en général les pores de la roche et remplace quelquefois les grains de quartz.

**c- Textures en "petits nids" ou en "poches" :** Le cinabre en très petits amas centimétriques à décimétriques et prend une forme pulvérulente.

**d- Textures litées :** Le cinabre se présente en lits très minces et semble occuper les niveaux les plus riches en débris de quartz.

### **II.2.3.3. Paragenèses:**

Les deux gisements (Ismail et Mrah Sma) montrent deux paragenèses différentes. Celle d'Ismail est simple, principalement monométallique, alors que celle de Mrah Sma est plus complexe (DENOUN Abderrahmane, 1984).

<b>Ismail</b>	<b>Mrah Sma</b>
Cinabre, Métacinabre, Hg natif, Réalgar, blende. Marcassite, Coloradoite (Hg Te)	Cinabre, métacinabre, Galène, Blende, Pyrite, Marcassite, Chalcopyrite, Orpiment, Hématite, Magnétite
Montroydite (Hg O), Calomel (Hg Cl), Bglestonite (Hg O Cl H), leinite limonites	Cérusite, Smithsonite, Anglésite, Covellite, Hématite, Malachite, Cervantite, Limonites
Calcite, dolomite, Silice, ( <b>Barytine</b> ).	Calcite, dolomite, Barytine, Silice.

**Figure 9** : Paragenèses minérales dans les gisements Ismail et Mrah Sma (DENOUN Abderrahmane, 1984)

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

### II.3. Historique de l'exploitation des gisements du district d'Azzaba :

En Algérie, la minéralisation au mercure a été reconnue depuis l'époque romaine, des résidus d'extraction de cinabre ont été découverts, à Grayer dans le flanc Nord de la chaîne Numidienne. Cette ceinture a fait l'objet de plusieurs enquêtes, en 1853; Le mercure a été identifié dans les dépôts de Ras El Ma et a été extrait pendant plus d'un siècle. En 1966, la SONAREM (Société Nationale de la Recherche Minière) a commencé sa prospection sur les séquences numidiennes d'Azzaba où ont été identifiées en 1969, les plus importants gisements de minerai (ALLIGUI Fadila, 2011).

En 1970, le complexe Ismail mercurielle a été installé par ENOF (Entreprise Nationale des Produits Miniers Non-Ferreux et des Substances Utiles), et a été l'important fournisseur de mercure pendant plus de trois décennies. Selon USGS la capacité de production de mines exploitées dans la région d'Azzaba, et traitée par le complexe mercurielle, étaient autour de 7 000 à 8 000 potiches 200-230 t/année, et elle a dépassée 23 000 potiches en 1984, et touche son sommet de 31 000 potiches, atteints en 1970. La production a été arrêtée pendant quelques mois pour réhabiliter l'équipement de la mine et le complexe pendant le second semestre 2003, ainsi que le renforcement des travaux miniers en vue de redémarrer la production en janvier 2005 (ALLIGUI Fadila, 2011).

Les mines ont été inondées d'une manière continue par une rivière souterraine que le pompage s'est avéré infructueux, et les résidents locaux se sont plaints depuis longtemps de problèmes environnementaux et de maladies liées aux mines. En conséquence, la fermeture du complexe a été annoncée officiellement en mai 2006 (ALLIGUI Fadila, 2011).

### II.4. L'état de site :

Le complexe industriel s'étend sur 46h et englobe l'usine de traitement, la digue et deux bassins de décantation des eaux (lagunes). L'emplacement de l'usine est occupé par plusieurs bâtiments et importantes constructions (cheminée, fours, concasseur...) qui présentent une intense dégradation des constructions métalliques qui apparaît sous forme de démembrement suite à une corrosion avancée. Des quantités considérables de gouttelettes de mercure natif visibles à l'œil nu dans l'enceinte en suivant le parcours de traitement. La digue où les résidus de calcination et de curage sont entreposés, située à proximité de l'usine. L'épaisseur des scories varie entre 20 et 25 m, sans végétations, marquées par des fissures et des affaissements. Le site est entouré par des champs où on pratique de l'agriculture et du pâturage. Les deux bassins de décantation des rejets liquides, situés au nord des scories, à proximité de l'un des affluents de l'oued Fendek, elles sont mal

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D’Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

aménagées et contiennent des quantités d’eaux très polluées qui atteignent les 80 µg/l de Hg, qui peuvent se déverser en cas de débordement dans l’oued suite à l’inclinaison suffisante du sol qui les sépare (Benderradji, 1999).

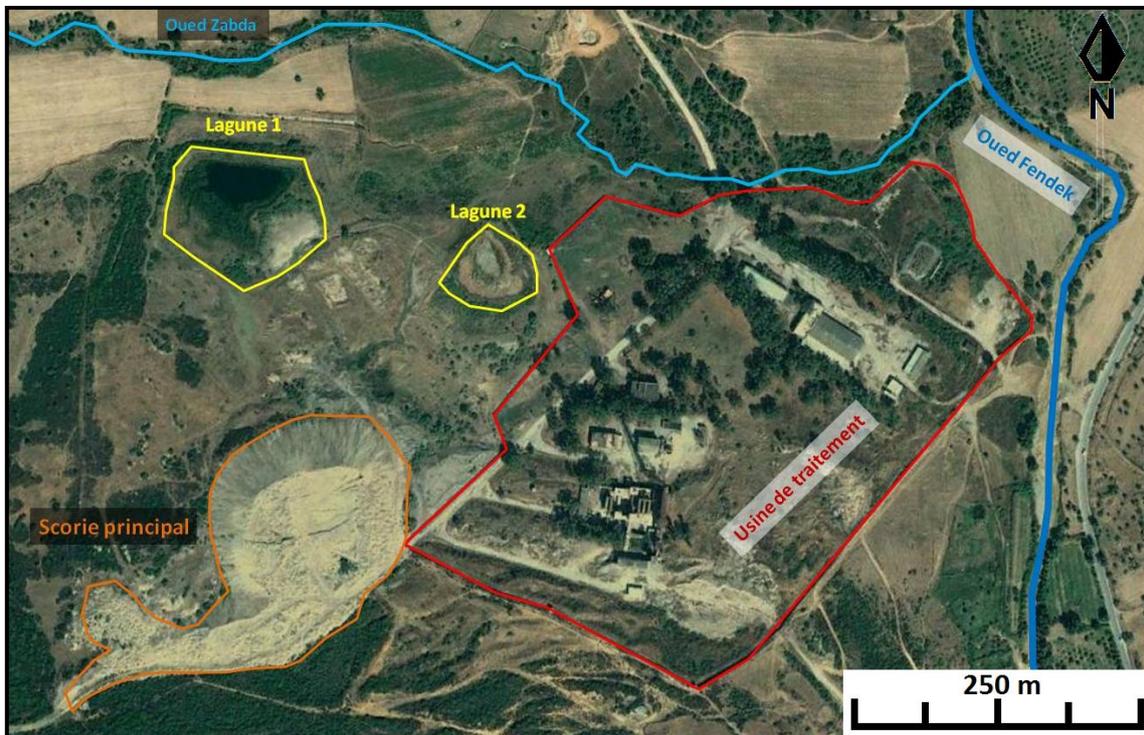


Figure 10 : Photo satellitaire de Le complexe industriel d’Ismail (Google Earth, 2017).



Figure 11 : Photo montre une vue générale sur la plaine d’Azzaba et de complexe mercuriel d’Ismail

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique



**Figure 12** : Photos des rejets de traitement du complexe d'Ismail : 1- Vue sur la digue qui modéfie le paysage ; 2 - 3 – Les rejets de la digue

Les mines à ciel ouvert (Guenicha – Mra sma) sont totalement abandonnées, leurs fosses remplies d'eau météorique et souterraine polluée (Alligui, 2011) utilisée pour l'irrigation et risquent d'être débordées dans l'oued environnant en Aval. La mine d'Ismail, une excavation à flanc de coteau, des sillons ont été creusés au cours des travaux d'extraction afin de faciliter l'écoulement des eaux de pluie. Ces eaux, qui sont plus ou moins enrichies en mercure par lavage de poussière de minerai et raclage de débris de roche, convergent vers un petit ravin naturel, creusé le long d'une forte pente, sur une portion de versant qui s'étale de la mine au lit de l'oued Fendek, c'est dans cet oued que ce ravin déverse ces eaux. Sachant aussi que les débris de minerai de cinabre (HgS) restant en contact prolongé avec l'air et l'eau de précipitation s'oxydent progressivement en mercure métallique, bien que la réaction soit très lente (plusieurs années), ce phénomène a été relevé dont des gouttelettes de mercure apparaissent à l'œil nu. Les stocks de stérile déposés à proximité de chacune des mines sont énormes et dépassent en total les 5 millions m<sup>3</sup> (SEKLAOUI M'Hamed et al., 2015).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique



**Figure 13 :** photos satellitaires montrent l'état des mines abandonnées sans mesure de réhabilitation (Google earth, 2017).



**Figure 14 :** Des gouttelettes de mercure natif dans l'enceinte de l'usine du traitement (Boutaleb et al., 2015)

**Figure 15 :** Photo de la mine de Guenicha inondée par des eaux météoriques et souterraines (Issaad, 2015)

### III. Le District de KEF OUM TBOUL :

#### III.1. présentation de secteur d’étude :

##### III.1.1. Situation géographique :

Le district de Kef Oum Teboul se trouve dans la partie la plus septentrionale de l’Algérie, à 4 km à l’Ouest de la frontière Tunisienne. La région est située dans la wilaya de l’El Tarf, à 15 km à l’Est de la ville d’El Kala, à 70 Km à l’Est de la ville d’Annaba et à environ 4 km à vol d’oiseau de la mer au Nord. Le district est près de la route Annaba-Tunisie, et aussi traversé par la route qui lie Oum Teboul et El Aioun.

La région est limitée par la frontière tunisienne au sud et à l’Est, par la mer au nord et la réserve d’El Kala (le lac Tonga) à l’Ouest

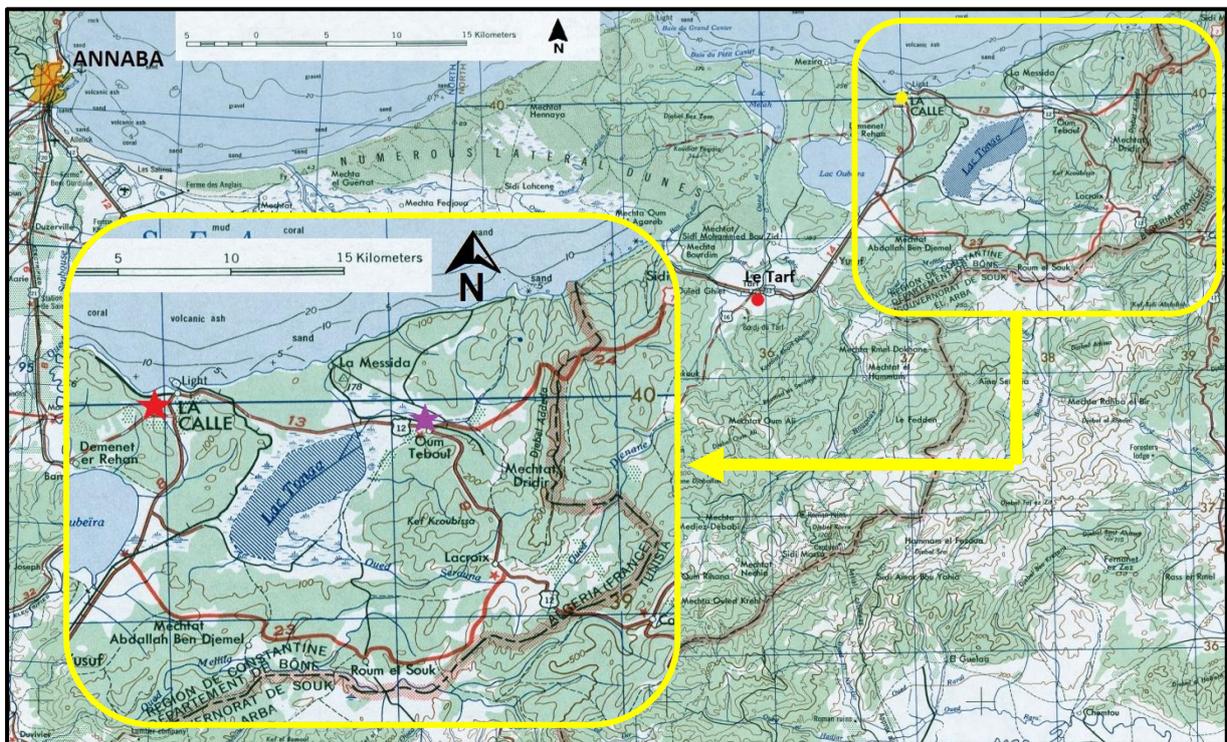


Figure 16 : Localisation géographique de la région de Kef Oum Teboul (Extrait de la carte topographique de Annaba 1/250.000)

Les coordonnées géographiques du gisement Kef Oum Teboul, d’après le quadrillage kilométrique Lambert (Nord Algérie) sont :



# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

### III.1.3. Climat :

Le climat de la zone étudiée est méditerranéen typique, subtropical. Il se caractérise par un été chaud et sec, un hiver pluvieux et relativement doux.

L'écart annuel entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est faible, les valeurs moyennes varient entre 31°C au mois d'août et 17°C au mois janvier. L'humidité de l'air est très élevée, elle affiche des valeurs moyennes pas moins de 70% durant toute l'année, et les précipitations ont un rythme saisonnier, les plus élevées sont enregistrées en hivers avec des valeurs de plus de 90 mm au mois de décembre et janvier (meteovista, 2017).

### III.1.4. Hydrographie et hydrogéologie :

Kef Oum Teboul fait partie du bassin de Oued El Eurg, laquelle se jette dans la méditerranée près de Messida à l'aide d'un canal qui sert de déversoir au lac Tonga.

La région, à cause de sa proximité de la Mer Méditerranée et de sa couverture végétale assez bonne, se caractérise par une bonne pluviométrie qui alimente les eaux souterraines ; mais à cause des pentes raides du relief et son découpage par les oueds, les eaux des pluies s'écoulent facilement et rapidement en ruisseaux, ce qui empêche l'accumulation des quantités importantes d'eau dans les roches. Ceci est favorisé aussi par la couverture d'éluviale des matériaux argilo-sableux puissante de 3 à 4 m, qui diminue l'accès des eaux atmosphériques jusqu'aux roches basales (SONAREM, 1971).

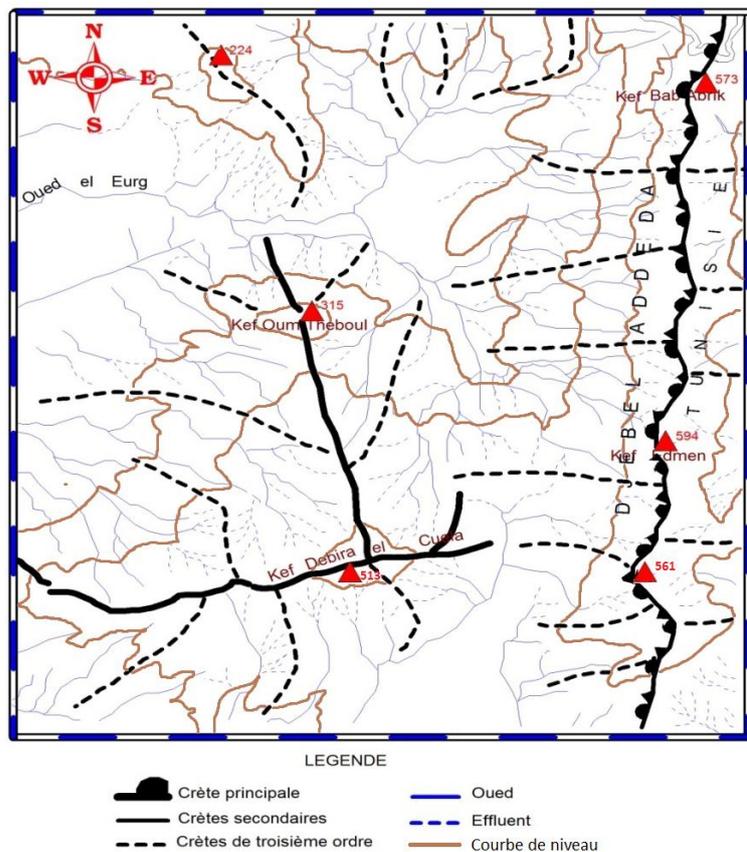


Figure 18 : Schéma orohydrographique de la région de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1971).

### III.1.5. La réserve intégrale du lac Tonga :

Le lac Tonga est situé à 36° 49’ N - 8° 32’ E à l’extrême Nord-Est du Parc National d’El Kala et de l’Algérie, à l’Est de la ville d’El Kala, wilaya d’El Tarf ; à 70 Km à l’est de la ville de Annaba et à 3 km à vol d’oiseau de la mer. Au nord, le Tonga est bordé par des dunes littorales le séparant de la mer (Direction Générale Des Forêts, 2003).

Le Tonga est classé sur la liste des zones humides Ramsar le 4 Novembre 1983, c’est une zone humide de types O, Tp et M, avec les critères Ramsar 1, 2, 3, 5 et 6, le critère qui caractérise le mieux le site est 1 (Direction Générale Des Forêts, 2003).

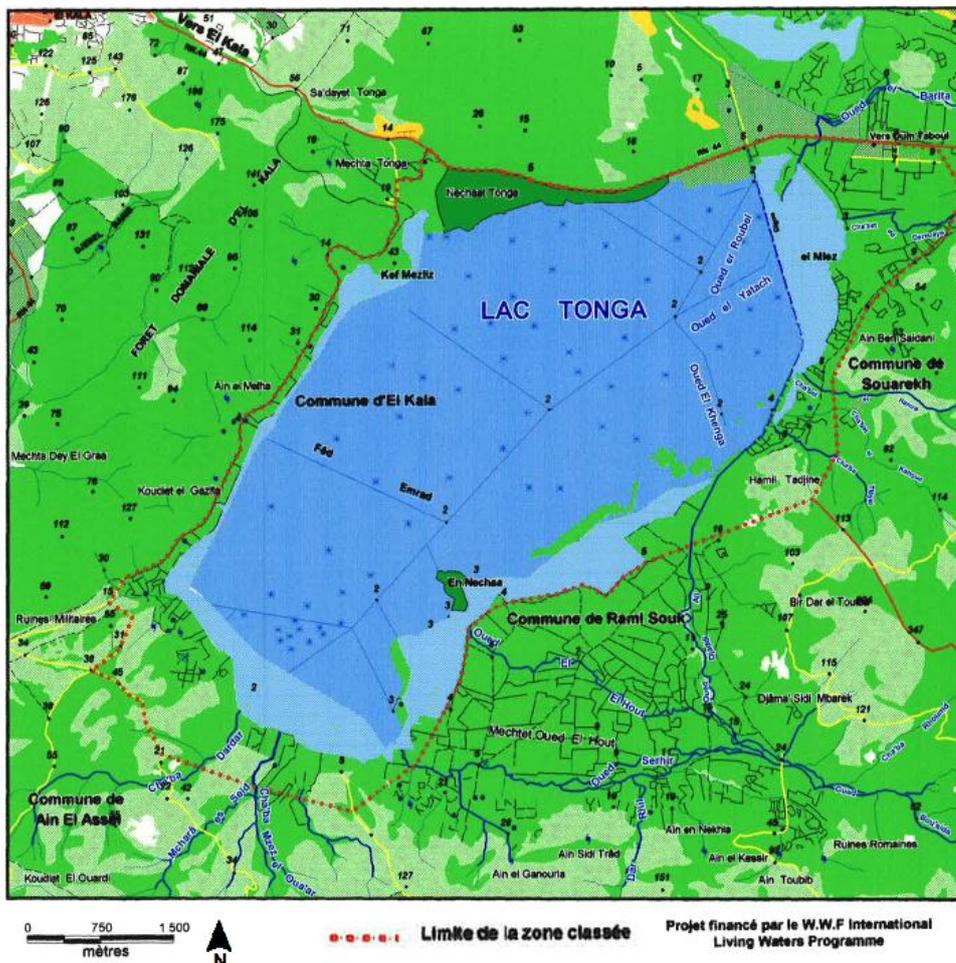


Figure 19 : carte de la réserve intégrale du lac Tonga, Parc National d’El Kala

Le Tonga est un lac de type palustre d’eau douce en communication avec la mer Méditerranée par un canal artificiel, le Canal Messida. Il se caractérise par une importante couverture végétale en mosaïque composée d’hélophytes (scirpes, phragmites et typhas).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

Site d'hivernage pour plus de 25.000 anatidés et foulques, c'est également un site de nidification important pour plusieurs espèces, dont certaines sont très rares ou en recul dans leurs habitats, comme l'Erismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*) le Fuligule nyroca (*Aythya nyroca*) la poule Sultane (*Porphyrio porphyrio*), la guifette moustac (*Chlidonias hybridus*), etc. Ses 2 bassins occupent une superficie de 15 km<sup>2</sup> chacun. Mais le bassin versant nord ne semble plus alimenter le site depuis les tentatives d'assèchement entrepris durant la période coloniale (Direction Générale Des Forêts, 2003).

Le Tonga est alimenté d'une part par de nombreux affluents (petits ravins) secs en été tout au long des rives Ouest et sud, et d'autre part par à l'Est et au Nord Est par des oueds et de 02 sous bassins versants, celui d'oued EL Hout au sud et d'Oued El Eurg au Nord ; L'exutoire du Tonga étant le canal de La Messida (Direction Générale Des Forêts, 2003).

### III.2. Contexte géologique :

La région appartient à l'Atlas Tellien représentant l'une des unités extrêmement complexe de la zone plissée de l'Afrique du Nord. Les particularités de la géologie du territoire sont déterminées par la présence de plusieurs unités structurales, indépendantes, superposées l'une à l'autre dans la région. La compréhension de la structure géologique est rendue plus difficile par le fait que l'autochtone n'affleure pas dans la région.

La région du gisement est constituée uniquement par des roches sédimentaires. Les roches métamorphiques et les roches volcaniques sont très peu représentées.

#### III.2.1. Lithostratigraphie de la zone de gisement:

Les roches les plus anciennes dans la région sont les gneiss qui constituent le substratum (socle cristallophyllien) ; et ils sont les même qui constituent la partie orientale de massif de l'Edough, et n'affleurent que loin au Nord-Ouest.

Dans la constitution du gisement participent les roches d'âge éocène et oligocène qui correspond à la série Numidienne, comme s'en suit :

##### III.2.1.1. Eocène supérieur – Priabonien (Argiles de Numidien) :

**Schistes peu cristallins** : leur pendage est de 10 à 30° vers le nord, Nord-Ouest ou bien Sud-Est ; avec les argilites ils forment le noyau d'un anticlinal local, où se situent les principaux failles minéralisées. Les schistes sont de couleur noire ou grise-noire, compacte, très durs, avec schistosité très nette.

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

**Argilites** : sont compactes et dures, de couleur gris clair, verdâtre ou brunâtre et même noires, avec schistosité nette et cassure irrégulière. Leur structure est alevrolitique ou alevrolit-pélitique, le ciment y est argileux de type basal. La composition minérale des argilites est : quartz, minéraux argileux, chlorite, muscovite. La puissance de cet horizon est de 100 à 315 m.

### III.2.1.2. Oligocène inférieur (grès de Numidien) :

**Les alevrolites** : Les alevrolites de la région du gisement sont argileux ou gréseux, par endroits passant à des argiles alevroliques noires. Les alevrolites sont gris, gris foncés à noirs; compacts avec schistosité assez nette. Très souvent entre les alevrolites s'intercalent des minces couches de grès. Les alevrolites affleurent dans la partie sud du gisement et sont également recoupés par sondages. La roche est avec ciment argileux de type basal et de structure alevrolitique ou alevrolitique-pélitique. Dans la composition minérale participent: quartz, minéraux argileux, micas, chlorite. La puissance des alevrolites est de 20 à 140 m. Ils sont recouverts par de grès.

**Les grès** : Ils affleurent dans les secteurs NE, N et SW du gisement. Les grès sont quartzeux, bien consolidés, durs, avec cassure irrégulière. Leur couleur est jaune, grisâtre à gris et très souvent on y observe de traînées et de taches ferrugineux, qui leur donnent une coloration rougeâtre. Les grès sont constitués de quartz, feldspath, muscovite, minéraux argileux et zircon. Le ciment est argileux et quartzeux de type poreux. La puissance est de 10 à 90 m.

**Conglomérats** : Ils sont observés dans la partie occidentale du gisement et rarement à l'Est et Nord-Est de la région, sous forme de taches dans les grès. Ils sont gris ou rougeâtres, jaunâtres, bien consolidés, par endroit bien lités ou on peut observer leur pendage. Les conglomérats sont constitués de morceaux de quartz et quartzites, muscovite et zircon. Le ciment y est argileux ou gréseux. Leur puissance est de 2 à 40 mètres.

### III.2.3. Minéralisations du district de Kef Oum Teboul :

D'après les résultats des travaux miniers et des prospections (rapport de la SONAREM 1966), on a constaté la présence de 3 systèmes de fractures dans le champ filonien de Kef Oum Teboul :

**Le premier** ; de direction Est-Nord-est (80°-85°), Est-Sud-Est (100°-110°).

**Le deuxième** ; de direction Nord-Ouest (120°).

**Le troisième** ; de direction Nord-Est (10°-15°).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

Les fractures minéralisées appartiennent au premier et au deuxième système, tandis qu'au troisième système sont liées des zones, assez courtes et contenant peu de minéralisation et qui se trouvent dans les grés du secteur Nord-Ouest.

### III.2.3.1. Morphologie de gisement

L'organisation de la minéralisation du gisement filonien du district Kef Oum Teboul est représentée du Sud au Nord de la manière suivante : La zone Sud, le filon du mur, le filon principal, le filon de la faille, le filon de fluorine et le filon A en position subparallèle. La description des filons d'après les rapports de la SONAREM (1966 et 1971) est résumée ci-dessous :

#### 1. Le filon principal :

Ce filon se trouve dans les versant Est, Sud et Sud Ouest du mont Kef Oum Teboul. Il fait 1 800 m de long, 591 m à la verticale et 2 m de puissance en moyenne. La direction principale du filon est de N80° et N85° avec un pendage de 50° à 75° (en moyenne 60°) vers le Nord-Nord-Ouest. Le filon est encaissé dans des roches gréseuses et argilo-gréseuses. Les sulfures sont représentées par : l'oligiste spéculaire, pyrite, arsénopyrite, chalcopryrite, sphalérite, pyrrhotite, bornite, cuivre gris (tétraédrite et tenantite), marcasite, galène, graytonnite (SONAREM, 1971). La minéralisation à sphalérite et pyrite se localise au centre du filon et celle à chalcopryrite se trouve aux épontes. D'après les travaux d'exploration et d'exploitation, les puissances et les teneurs les plus importantes se trouvent dans les intersections du filon principal avec les autres filons où se sont formées les colonnes minéralisées, à savoir : la colonne orientale, la colonne centrale et la colonne occidentale.

#### 2. Le filon de la faille :

Ce filon se trouve dans le flanc méridional du mont Kef Oum Teboul de 90 à 120m au Nord du filon principal. Il a été prospecté en surface sur une longueur de 1 700 m, et connu sue 450 m à partir de la surface. Il se caractérise par une minéralisation analogue à celle du filon principal. Cette dernière se présente sous forme de rares phénocristaux, de nids et plus rarement de veinules. Les minéraux métalliques présents dans ce filon sont : la chalcopryrite, la pyrite, la sphalérite et la galène. Cette minéralisation est irrégulière en direction et en profondeur elle présente des teneurs peu élevées ce qui rend le filon sans intérêt pratique. Le filon a en moyenne : Cu= 1.45%, Zn= 1.75% et Pb= 0.70%.

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

### 3. Le filon fluor :

Il se trouve à environ 190 à 210m au Nord du filon principal. En surface, il a été reconnu sur une distance de 1 300m pour une direction E-W, avec un angle d'inclinaison de 60°-80° au Nord. Selon les données de sondages, l'épaisseur du filon varie entre 0.1 et 2.0m, avec 0.33m d'épaisseur en moyenne. En surface, le filon est constitué d'un faisceau de minces veinules de quartz et de géodes de quartz avec des cristaux de fluorine, dans des grès quartzeux silicifiés. Les travaux souterrains ont décelé une zone peu puissante (jusqu'à 1.0m) de filonnets quartzeux avec des imprégnations de galène, de sphalérite et de fluorine. Les teneurs sont : Cu= 0.25- 3.57%, Zn= 0.12- 24.85%, Pb= 0.05- 9.95% et Ag= 246 g/t. En raison de la répartition extrêmement irrégulière de la minéralisation et des petites épaisseurs à des profondeurs étudiées, le filon « Fluor » ne présente pas d'intérêt pratique.

### 4. Le filon cuivre :

Il est prospecté en surface sur une longueur de 800m avec une direction NW-SE (110°-120°) et un pendage de 55° à 65° vers le NE. Dans sa partie NW, le filon est constitué de minces filonnets de quartz à limonite dans les grès quartzeux, tandis que dans sa partie SE, il est représenté par des argilites faiblement limonitisées. La puissance moyenne du filon est de 1m, la teneur en cuivre est de 2.5 à 3% et le minerai contient peu de zinc et de plomb. En profondeur, la puissance de ce filon varie de 0.1 à 1.14m et le minerai titrant : Cu= 0.03 - 1.68%, Zn= 0.80 - 4.75%, Pb= 0.15 - 5.0%.

### 5. Le filon « A » :

Il se trouve à 230-250m au Nord du filon principal. Il a une direction NE- SW (40°-60°) et un plongement de 75°-80° vers le NW. En direction du SW, il se joint au filon de fluor. L'épaisseur de ce filon varie de 2.0 à 3.0m sur une distance de 500m. La minéralisation se présente en dissémination de pyrite et concentration des ocre de Pb et de Zn dans les filonnets quartzeux. Les teneurs en Cu et Zn constituent 0.05% et celle du Pb atteint 2.45%. A la profondeur de 170m, la zone minéralisée est représentée par deux filons de quartz à sphalérite bien exprimée de 0.17m d'épaisseur chacun. Les teneurs en éléments utiles sont les suivantes : Cu= 0.15- 0.29%, Pb= 0.28 – 0.65%, Zn= 2.88- 4.16% et plus de 100 g/t d'Ag.

### 6. Le filon du mur :

Il se trouve au Sud du filon principal, en profondeur, il est distant de 10m environ. La puissance de ce filon peut atteindre 1.2m, mais sa puissance moyenne est de 0.80m. Le filon est constitué par des veinules très denses de quartz et de quartz-carbonates recoupant les

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

schistes peu cristallisés. La minéralisation est très irrégulière et représentée par la chalcopryrite sous forme de nids et de veinules ; et plus rarement la sphalérite sous forme de mouches. En profondeur, une baisse très brusque de la teneur en zinc a été signalée. La teneur moyenne en métal pour le filon est de : cuivre 2,01 % ; zinc 0,40 % ; plomb 0,70 %

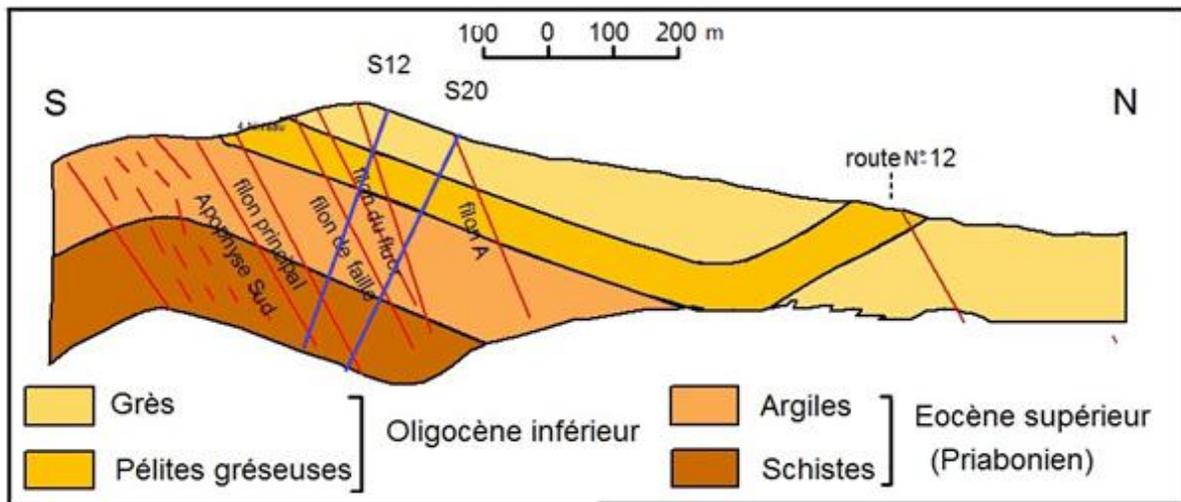


Figure 20 : Coupe transversale du gisement de Kef Oum Teboul (SONAREM, 1965-1966).

### III.2.3.2. Textures des minerais :

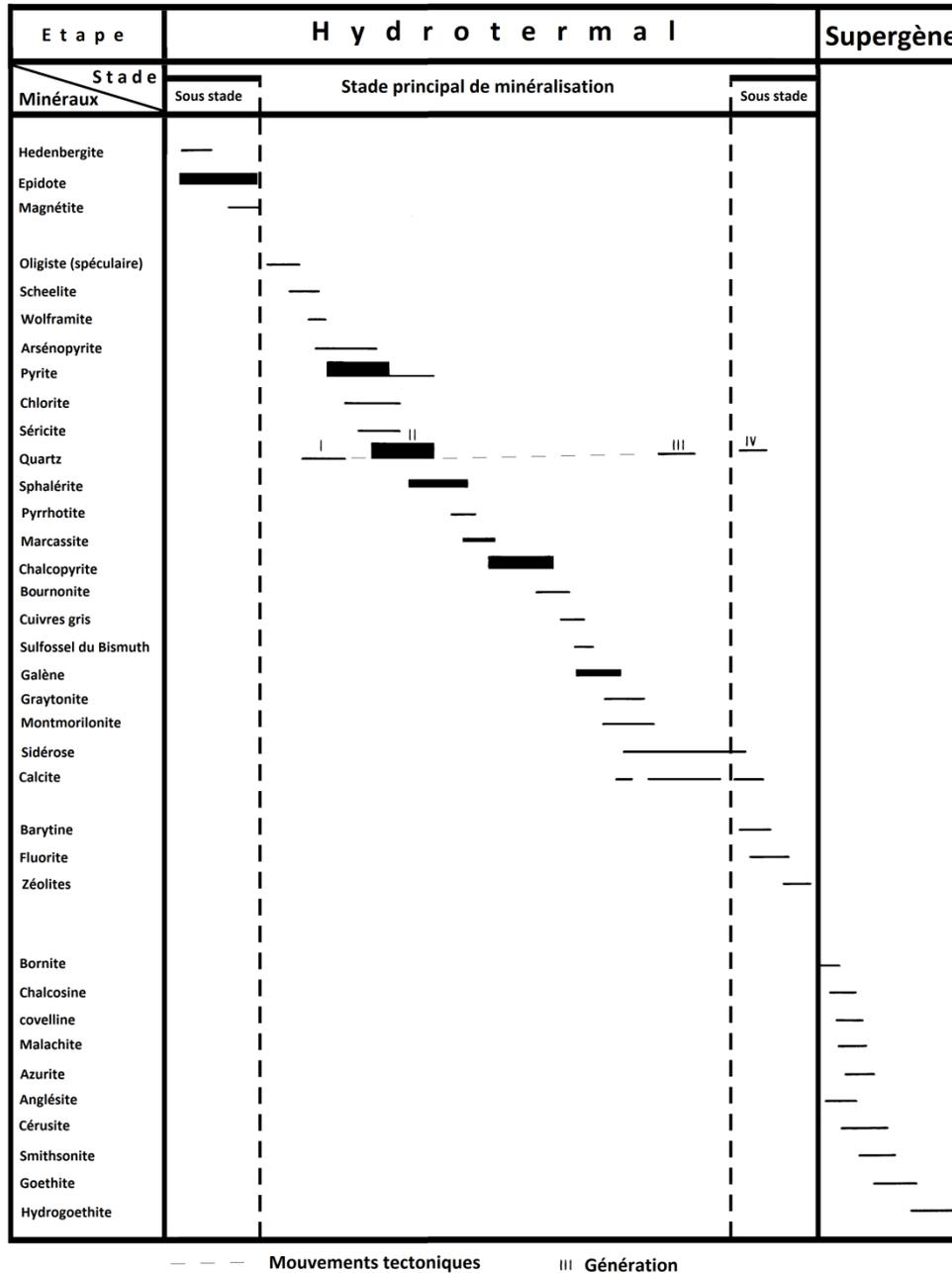
- **Imprégnations:** Les dimensions des grains sont de 1 mm au 2-3 mm et rarement plus. Une partie d'eux est dans les roches encaissantes altérées, l'autre dans le quartz filonien.
- **Texture à filonnets :** lesquels forment de fins filonnets dans les roches encaissantes et dans la minéralisation de quartz-carbonate des filons.
- **Texture à nids :** observer dans les roches encaissantes et dans le quartz filonien sous forme de nids et lentilles de dimensions de moins d'un millimètre à quelque centimètre.
- **Bréchiq**ue : développée dans roches encaissantes. Les morceaux des roches encaissantes altérées et de taille variable sont cimentés par de quartz-carbonates et de minéral.
- **Massive :** Faiblement développée; caractéristique de la pyrite, chalcopryrite et sphalérite, dans les secteurs du filon où manquent les minéraux de gangue.
- **Texture drusique :** Caractéristique du quartz. Cette dernière forme de druses dans les petits vides dans le filon; la taille de petits cristaux de quarts varie de 1-2 mm à 2-3 cm.
- **Texture en filet :** Elle se forme des minéraux métallifères et de la gangue qui constituent de petits filonnets qui recourent en réseau dense les roches altérées de la zone filonienne.
- **Texture colomorphe :** Elle est caractéristique de certaines concentrations de marcassite, pyrite et de sulfures secondaires du cuivre.

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

### III.2.3.3. Composition minéralogique du minerai et paragenèse :

La succession paragenétique des minéraux est démontrée dans le tableau suivant :



**Tableau 04** : Succession paragenétique des minéraux du gisement Kef Oum Teboul (SONAREM, 1966).

La composition minéralogique du minerai peut être subdivisée en deux groupes : minéraux métallifères primaires et secondaires, et minéraux non-métalliques (minéraux de la gangue).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

**Les minéraux métallifères primaires :** magnétite, oligiste spéculaire, scheelite, wolframite, pyrite, marcassite, chalcopryrite, sphalérite, galène, arsénopyrite, pyrrhotite, bournonite, tétraédrite, tenantite, sulfosel du bismuth, greytonite.

**Les minéraux métallifères secondaires :** chalcosite, covelline, azurite, malachite, anglésite, cérusite, smithsonite, goethite, hydrogoethite.

**Les minéraux non-métalliques :** hédenbergite, chlorite, épidote, quartz, séricite, kaolins, sidérose, calcite, ankérite, barytine, fluorine, zéolite.

### III.3. Historique de l'exploitation de gisement du district de Kef Oum Teboul :

Le gît de Kef Oum Teboul est connu dès 1845. Il s'agit d'un gisement filonien d'origine hydrothermal ; formé pour l'essentiel des sulfures. La valeur du minerai explique que l'exploitation a été entreprise dès 1849, et de grosses dépenses pour l'époque furent engagées : routes, voie ferrée de la mine à La Messida où fut construite une fonderie, assèchement du lac Tonga.

La prospection et l'exploitation de l'ancienne mine de Kef Oum Teboul couvre quelques périodes:

La première période est la plus longue, commence en 1849 et va jusqu'à 1893. En 1857, le travers-banc "Saint Barbe" a été creusé, à partir duquel les niveaux pour l'exploitation sont creusés. A cause de problèmes techniques et d'organisation, la mine a été arrêtée en 1873. Quelque temps après, les travaux ont été repris aux niveaux 6 et 10, on creuse également le puits "Saint Barbe" et la cheminée d'aérage (dite "la cheminée des fumées"). L'exploitation était principalement dans le filon principal et notamment dans les Colonnes Centrale, Ouest et Est. Dans la colonne Est un incendie est éclaté en septembre 1881, et cause l'abandon des travaux. En 1889, sur la cote de la mer près de la Messida, à environ 6 km de la mine, une installation de grillage du minerai a été mise en service avec 3 fours d'une capacité de 2 500 kg de cuivre brut, ce "cuivre" titrait de 22 à 25% de Cu, 7 à 10 % de Zn, 2,5 - 2,8 kg d'argent et 16 à 20 gr/t de l'or. En 1890 un éboulement ferme la cheminée d'aérage, et les niveaux et le puits au dessous du niveau 10 ont été inondés et tout travail arrêté le 12/7/1893. Dans cette période, d'environ 45 ans, la mine a produit environ 285 000 tonnes de minerai.

Dans la deuxième moitié de 1899 l'exploitation fut reprise par la Société minière de Kef Oum Teboul, qui a produit:

- 5 777 tonnes de cérusite avec 650 g/t Ag et 7 g/t Au;
- 6 971 tonnes de chalcopryrite;

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

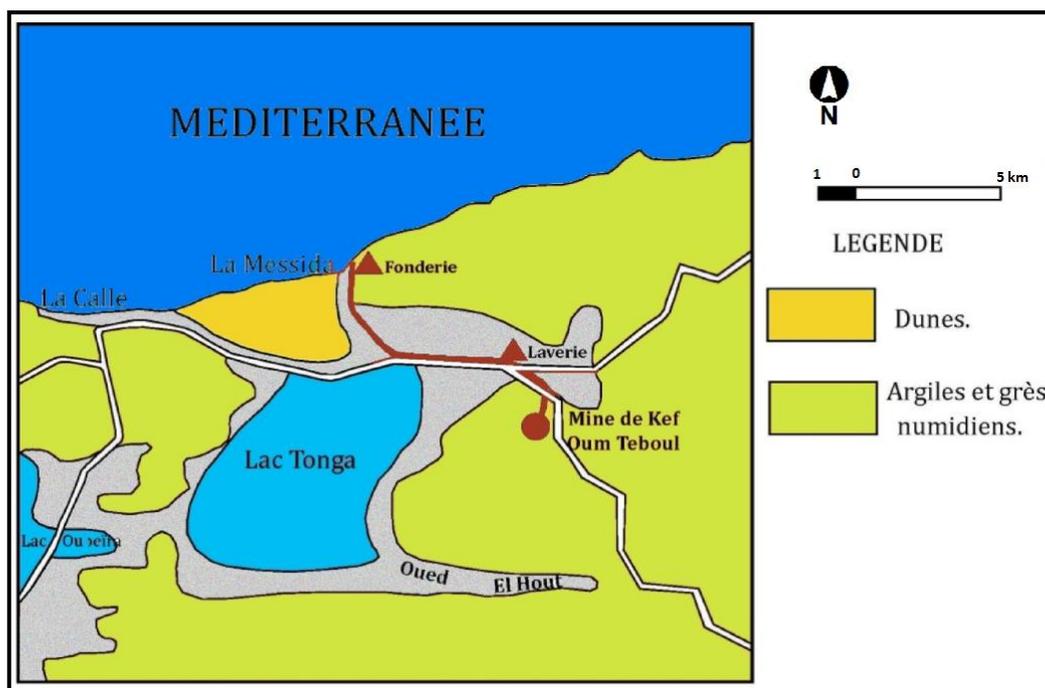
## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

- 2 294 tonnes de galène;
- 3 904 tonnes mixtes de galène + blende.

De 1907 à 1914 le Syndicat Rochette a repris les travaux, et entre 1912-1913, elle a montée une usine moderne de flottation avec une capacité de 50 tonnes par 24 heures. Le minerai cuivreux titrant environ 5% fut enrichie jusqu'au 17-20%; les concentrés obtenus contenaient 1 kg d'argent (Ag) par tonne de concentré et 20 grammes/t d'or (Au). Toutes ces installations n'existent pas à l'heure actuelle. La première guerre Mondiale est la cause d'arrêt de la mine. De 1907 à 1914 la mine a produit:

- 429 t d'oxyde de plomb
- 13 t de mixte galène + blende
- 13 000 t de minerai à 5% du cuivre, passé par la fonderie à la Messida.

Une certaine reprise des travaux de reconstruction de la mine a eu lieu après la deuxième guerre Mondiale. Alors des tentatives de remise en marche de la mine : de 1941 à 1945 par la société Minière de Penarroya ; et puis les travaux entreprise par la SONAREM avec l'aide technique d'une mission bulgare. Elles ont été considérablement touchées par les venues d'eau. Depuis la mine est abandonnée.



**Figure 21** : Localisation de la laverie et de la fonderie par rapport à la mine de Kef Oum Teboul (François TOMAS, 1970).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

---

### III.3.1. La laverie :

On procédait à une série d'opérations (broyage et lavage), au moyen desquelles le minerai était séparé du stérile. Le but principal du lavage est d'éliminer le stérile (argilites, quartz et halloysite) et d'enrichir le minerai de cuivre. Les teneurs en silice sont abaissées par lavage de 45 à 15% pour les minerais de la colonne de l'Ouest, de 15 à 6% pour les minerais de la colonne du centre et de l'Est.

Le minerai en grains de dimensions inférieures à 1mm qui n'est pas traité dans les bacs à pistons, est réuni dans des Spitzkasten à courant d'eau ascendant, qui alimente deux tables Wilfley. Celles-ci séparent un peu de galène en très petite quantité et donnent des concentrés à 6 ou 7% de cuivre. Les stériles des bacs à piston, des tables wilfley contiennent encore de 0.5 à 1% de cuivre. Ils sont mis en stock.

### III.3.2. Usine de Messida :

Dans les temps où l'usine était en marche, le triage à la main du gros et le lavage des grenailles et des menus fournissaient des minerais réunis en une seule catégorie contenant de 5 à 6% de cuivre ; de 250 à 300 gr d'argent et de 4 à 5 gr d'or à la tonne.

Au début, le lit pour fusion pyriteuse était constitué ainsi : 150 kg de minerai de la colonne de l'Ouest, 60-80 kg de calcaire et enfin 40-50 de coke. Ce lit de fusion donnait d'abord des mattes à 13% de cuivre, des scories à 40% de silice et 0.2% de cuivre. On n'avait grillé que 58% de soufre total. Un second essai avec une pression du vent plus élevée avait donné des mattes à 15% de cuivre avec 60% de soufre brûlé. Etant donné la nature des minerais très sulfureux dont dispose l'usine, on a fini par renoncer à la fusion pyriteuse et par griller les 2/3 du minerai, de sorte que le lit comprend : 200kgs de minerai grillé, 100kgs de minerai non grillé, 80kgs de calcaire et 40kgs de coke métallurgique. On obtient des mattes à 20-22% de cuivre, 200grs d'argent et 11-12grs d'or à la tonne.

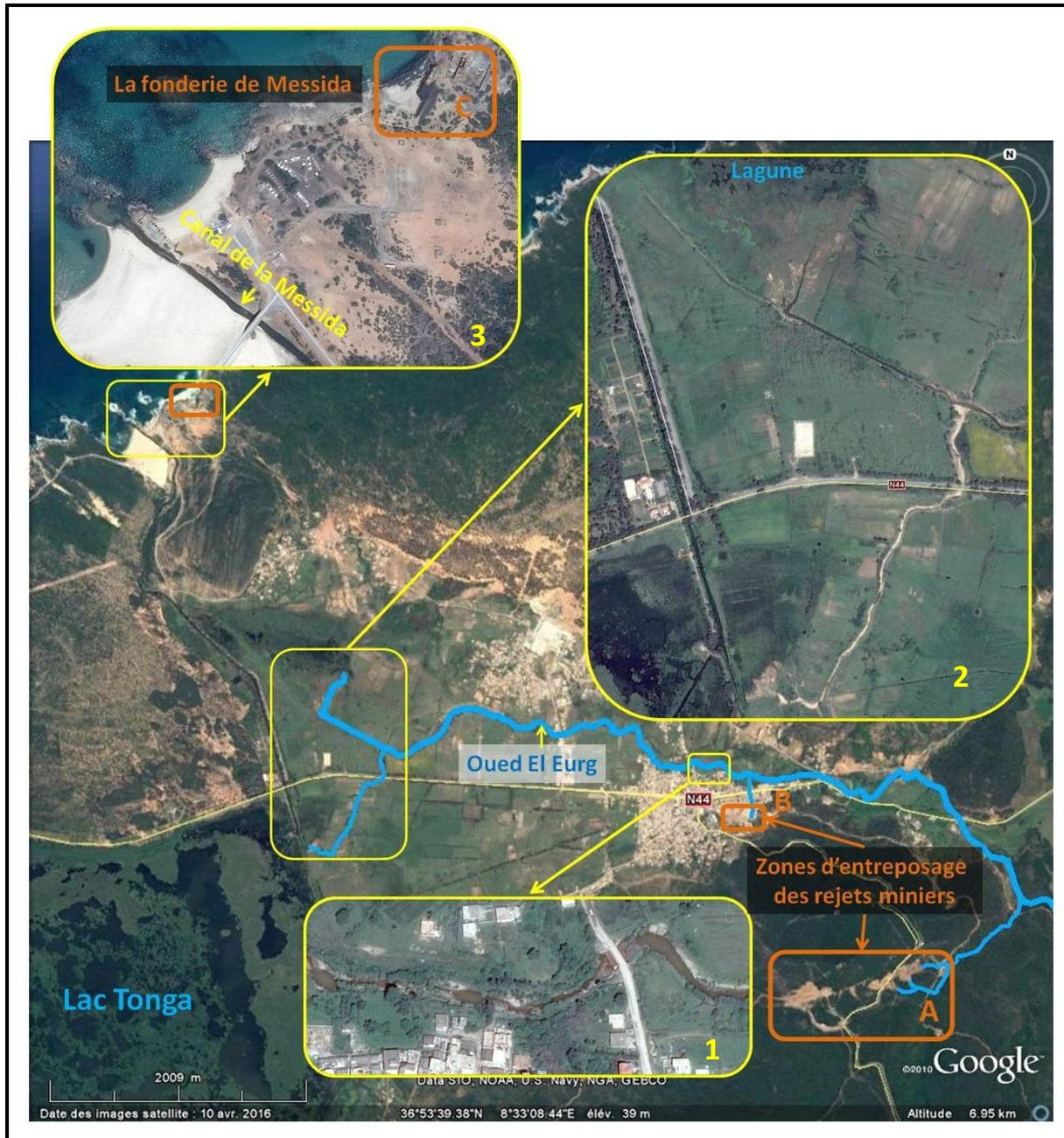
### III.4. L'état de site :

La mine et l'ensemble des équipements ont été laissés à l'abandon en ruines, sans aucune mesure de réhabilitation, le même sort est réservé aux rejets de traitement et le stérile. D'après les rapports de la SONAREM, les stériles des bacs à piston et des tables wilfley contiennent encore de 0.5 à 1% de cuivre, mis en stock, ont été perdus ; et des essais de flottation sur un minerai en stock abandonné, ont révélés les résultats suivants : rendements cuivre 90% avec des concentrations à 24 et 28% ; rendements d'or 70% avec des concentrations à environ 5%.

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D’Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

Le stérile résultant de l’extraction du gisement contiens des teneurs plus au moins importantes en Pb, Zn, Cu et As ; des milliers de tonne sont stockés dans deux zones sous forme de digues occupant des espaces assez importantes sans précaution particulière.



**Figure 22 :** Des photos satellitaires montrent les zones d’entreposages (A ; B ; C) et le parcours de Oued El Eurg: 1- aspect des eaux contaminés de Oued El Eurg ; 2- Les eaux du Oued El Eurg qui alimente le lac Tonga, et se rassemble dans une lagune avant de rejoindre le canal de La Messida ; 3- Le canal de La Messida qui se jette dans la méditerranée (Google Earth)

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE II : Contexte géologique et historique



**Figure 23** : la zone d'entreposage (A) des rejets miniers anarchiquement dans l'environnement (Photo prise par Mr. Issaad, octobre 2015 ; Google Earth)



**Figure 24** : la zone d'entreposage (B) des rejets miniers entre les habitats, et leur DMA qui se déverse dans Oued El Eurg (Photos prises par Mr. Issaad, octobre 2015 ; Google Earth)

## Caractérisation préliminaire des rejets miniers dans les mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

### CHAPITRE II : Contexte géologique et historique

L'usine de La Messida est complètement en ruine, les scories produites lors du grillage du minerai sont entreposées sur une plage, d'une épaisseur d'environ 7 m, laissées à leur sort et transportées sur le bord de la mer par l'action des vagues.



**Figure 25** : la zone d'entreposage (C) des rejets de la fonderie au bord de la méditerranée  
(Photo prise par Mr. Issaad, octobre 2015 ; Google Earth)

**CHAPITRE III :**  
**MOYENNES ET MÉTHODES**

## CHAPITRE III : Moyennes et Méthodes

### I. Prélèvement et préparation des échantillons :

L'échantillonnage est une étape très importante pour un travail fiable, il faut que l'échantillon soit représentatif, collecté méthodiquement, transporté et stocké d'une bonne manière ; et cette étape a été assurée par notre promoteur Mr. Issaad, dans le cadre de son doctorat comme déjà mentionné.

Les échantillons sont référencés comme s'ensuit :

Type d'analyse	Les références des échantillons	
	Les échantillons d'Azzaba	Les échantillons de Kef Oum Teboul
Granulométrie	AZZ 1 ; AZZ 7 ; AZZ 8 ; AZZ 9.	KOT J 1 ; KOT 3 J ; KOT G 1 ; KOT 3 G.
L'observation à la loupe binoculaire	AZZ 1 ; AZZ 7 ; AZZ 8 ; AZZ 9.	KOT J 1 ; KOT 3 J ; KOT G 1 ; KOT 3 G.
Ph, REDOX, conductivité	AZZ 1 ; AZZ 7 ; AZZ 8 ; AZZ 9.	KOT J 1 ; KOT 3 J ; KOT G 1.
Section polies	AZZ 8 ; AZZ 9.	KOT J 1 ; KOT 3 J ; KOT G 1 ; KOT 3 G.
Spectrométrie d'absorption atomique	AZZ 1; AZZ 9; SCOR.	KOT J 1 ; KOT 3 J ; KOT G 1 ; KOT 3 G.
Diffraction au Rayon X	-	KOT 2
X-Ray Fluorescence	AZZ 1 ; AZZ 2 ; AZZ 3 ; AZZ 4.	KOT1 ; KOT1bis KOT 2 ; KOT 5

**Tableau 05:** les références des échantillons utilisés lors des analyses

### II. L'analyse granulométrique des rejets miniers :

L'analyse granulométrique est l'étude de la répartition des éléments d'une roche détritique, dans notre cas les rejets miniers, selon leur taille (Dictionnaire de géologie). On classe habituellement les sédiments suivant la taille des grains qui les constitue. La terminologie la plus courante est la suivante (Dictionnaire de géologie, 6ème édition):

- A. Les rudites:** blocs, galets, graviers - diamètre  $D > 2\text{mm}$ .
- B. Les arénites:** sables avec  $2\text{mm} > D > 0,063\text{mm}$ 
  - Sables très grossiers :  $2\text{mm} > D > 0,5\text{mm}$ .
  - Sables grossiers :  $0,5\text{mm} > D > 0,25\text{mm}$ .
  - Sables moyens :  $0,25\text{mm} > D > 0,125\text{mm}$ .

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

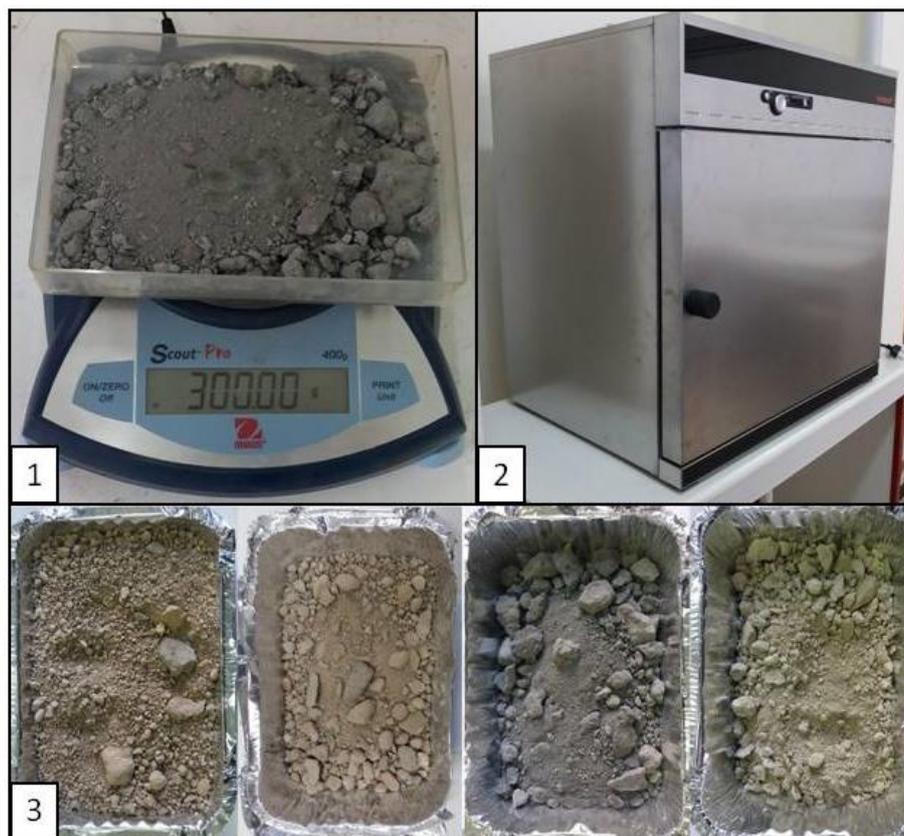
## CHAPITRE III : Moyennes et Méthodes

- Sables fins (sablon) :  $0,125\text{mm} > D > 0,063\text{mm}$ .

### C. Les lutites: - $D < 0,063\text{mm}$ .

- Silts (limons):  $0,063\text{mm} > D > 0,002\text{mm}$ .
- Argiles :  $D < 0,002\text{mm}$ .

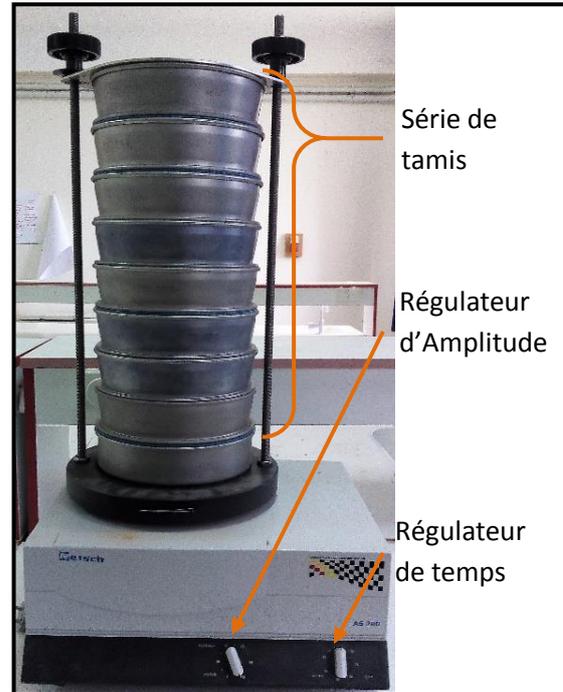
Pour obtenir les résultats souhaités on a procédé comme s'ensuit : après avoir séché les échantillons dans une étuve de référence MEMMERT pendant 24 heures à une température de  $50^{\circ}\text{C}$ , on a pesé 300 g à l'aide d'une balance de précision, puis on passe au tamisage.



**Figure 26** : photos du matériel utilisé lors de la préparation des échantillons pour le tamisage : **1-** balance de précision ; **2-** étuve ; **3-** échantillons

Le tamisage est réalisé à sec au moyen d'une tamiseuse vibrante et de 8 tamis calibrés et emboîtés les uns sur les autres en colonne, dont les mailles sont : 4 mm ; 2 mm ; 1 mm ; 0,5 mm ; 0,25 mm ; 0,125 mm ; 0,063 mm ; 0,045 mm (Norme AFNOR, NF P94- 056, 1996). Les échantillons subissent une vibration d'amplitude moyenne de 50 durant 20 min, qui répartie les différentes classes granulométriques dans les tamis, en suite on pèse le refus cumulé des tamis avec la balance de précision (OHAUS Scout Pro).

L'analyse granulométrique des échantillons a été réalisée au sein du laboratoire de sédimentologie du département géologie, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Campus Tamda, à l'aide d'une tamiseuse vibrante de type Retsch AS 200 basic (figure 27).

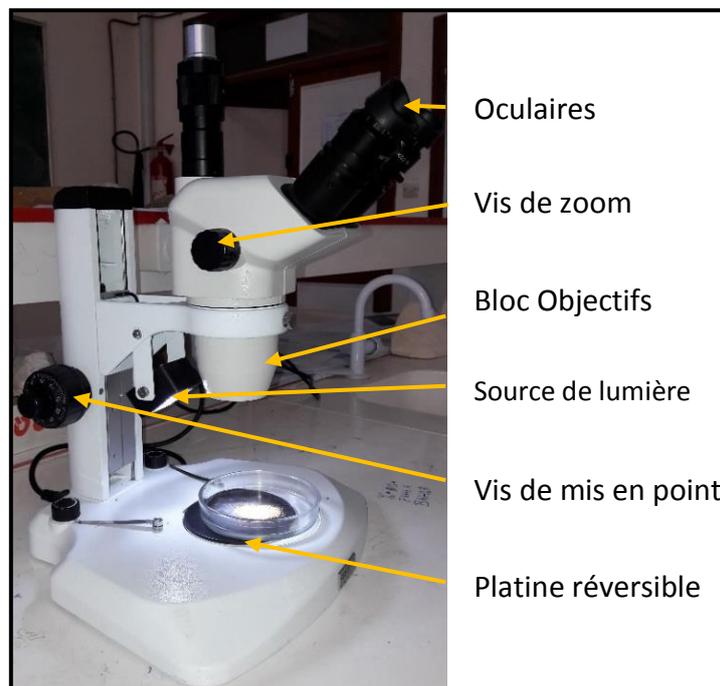


**Figure 27** : Photo de la tamiseuse vibrante Retsch AS 200 basic

### III. Minéralogie et pétrographie des rejets miniers :

#### III.1. L'observation à la loupe binoculaire :

L'étude minéralogique à la loupe binoculaire consiste à l'observation des échantillons afin de déterminé l'existence des minéraux sulfurés grâce à leur éclat métallique.



**Figure 28** : Photo de loupe binoculaire utilisée pour l'observation

Pour l'observation on a utilisé une loupe binoculaire OPTIKA sur deux fractions granulométriques d'échantillon, entre 125 $\mu$ m et 45 $\mu$ m et entre 250  $\mu$ m et 125  $\mu$ m.

Les observations à la loupe binoculaire de l'ensemble des échantillons ont été réalisées au laboratoire de sédimentologie de département de Géologie, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Campus Tamda, (2017).

### III.2. Pétrographie :

#### III.2.1. Réalisations des sections polies :

On a réalisé deux types de sections polies ; un type commun, une section polie dans une roche, l'échantillon rocheux est taillé à la scie sur la face représentative, ensuite on passe au polissage. La roche est un minerai retrouvé avec les rejets du traitement à Azzaba, alors elle est considérée comme un rejet minier.

L'autre type est réalisé avec des rejets minier d'une granulométrie fine, la fraction inférieure à 125  $\mu$ m et la fraction entre 250 $\mu$ m et 125 $\mu$ m, à l'aide d'une résine et un durcisseur qu'on mélange ; suivant les doses indiquées par le fabricant ; dans des moules en aluminium, par la suite on ajoute environ 2 g de l'échantillon sableux et on mélange encore, et puis on met le moule sur la tamiseuse et on le laisse vibré environ 10 min pour faire remonter toute les bulles d'air piégés dans la résine, et on les laisse sécher pendant trois jours, en fin on démoule les sections polies et on passe au polissages avec les différents émeris sur une plaque de verre et de velours.

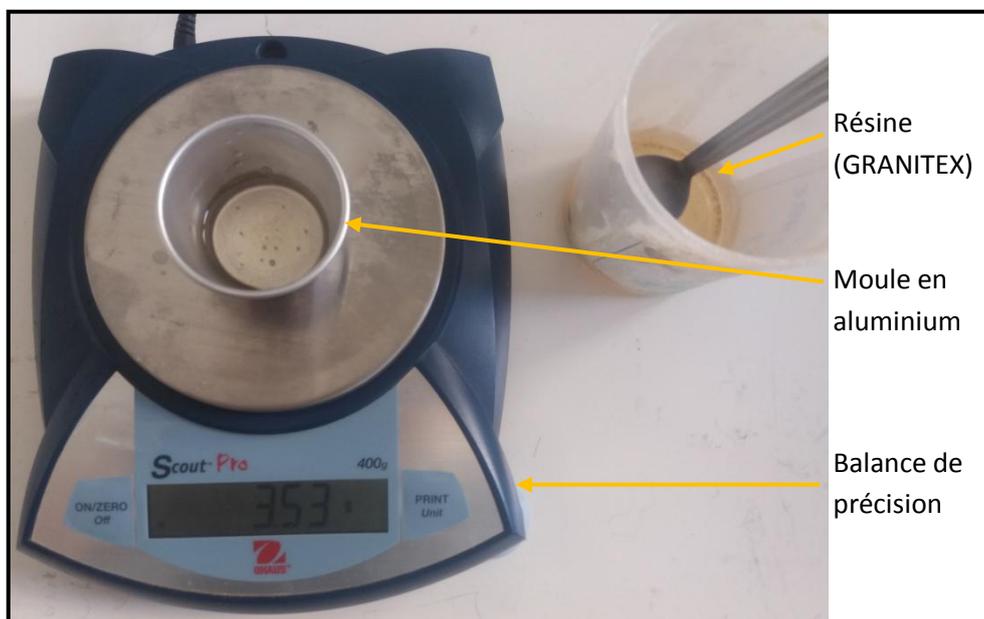
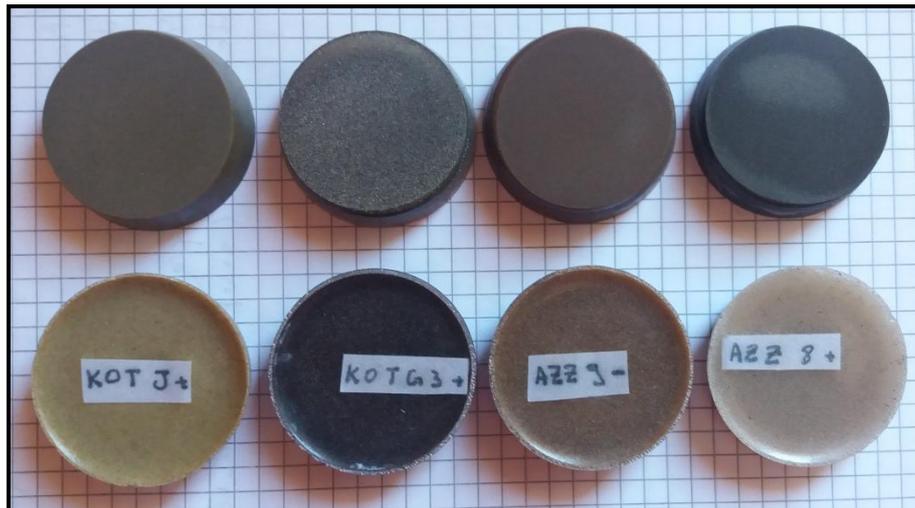


Figure 29 : photo du matériel utilisé lors de la confection des sections polies des rejets minier.

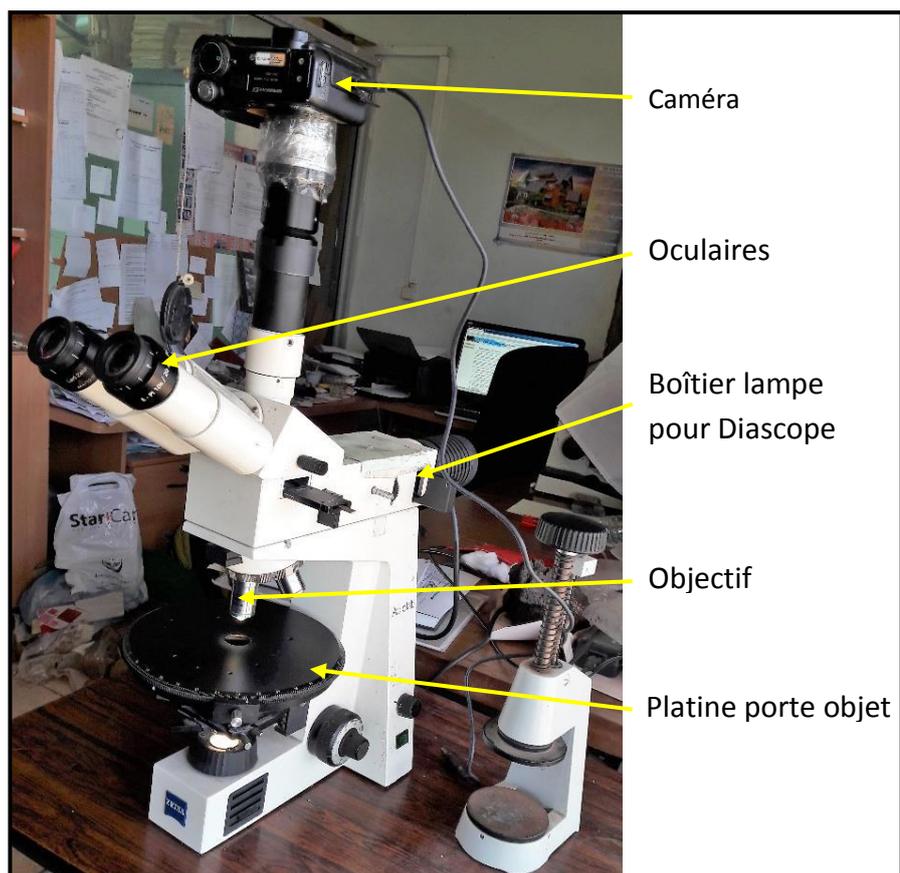


**Figure 30** : Photos des sections polies réalisés à partir des déchets miniers.

Les sections polies et le polissage de l'ensemble des échantillons ont été réalisés au laboratoire de sédimentologie de département de Géologie, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Campus Tamda, (2017).

### III.2.2. Observation au microscope métallographique :

**Figure 31** :  
Photo de microscope  
métallographique de  
type ZEISS.



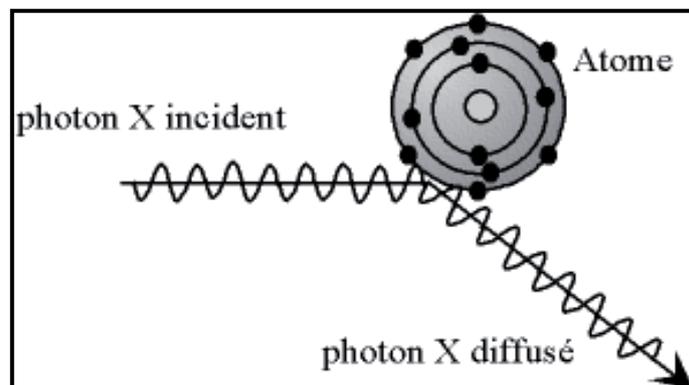
Le microscope métallographique est fait à l’aide d’un microscope optique utilisant une source lumineuse qui envoie la lumière sur l’échantillon à travers un dispositif optique. Les rayonnements réfléchis par l’échantillon sont repris par la lentille objective qui donne une première image intermédiaire qui grâce à un miroir semi-réfléchissant, elle est renvoyée vers l’œil du manipulateur à travers une lentille oculaire. L’appareil permet également d’obtenir des photos à travers une caméra solidaire.

L’observation et l’étude des sections polies ont été fait au laboratoire de géologie minière de la Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et de l’Aménagement du Territoire, Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE, Alger (2017).

### **III.3. L’analyse par diffraction des rayons X (DRX) :**

La diffraction des rayons X sur monocristal permet d’étudier les structures cristallines. La diffraction sur poudres est principalement utilisée pour l’identification de phases. C’est une méthode non destructive utilisée pour l’analyse qualitative et quantitative d’échantillons polycristallins. Cette technique est basée sur les interactions de la structure cristalline d’un échantillon avec des radiations de courte longueur d’onde (Frédéric SERNA et al., 2014).

Lorsque les rayons X entrent en contact avec la matière, parmi les plusieurs phénomènes qui peuvent se produire la diffusion : phénomène consistant en un changement de direction d’une particule ou en l’émission d’un photon à la suite d’une collision avec un électron d’une orbitale atomique. Cette diffusion peut impliquer ou non un changement d’énergie. S’il n’y a pas de changement d’énergie, on parle de diffusion élastique (ou diffusion Rayleigh). Dans le cas contraire on parlera de diffusion inélastique (ou diffusion Compton) (Frédéric SERNA et al., 2014).



**Figure 32** : Diffusion élastique : les photons X rebondissent en gardant la même énergie

L'interaction rayons X – matière peut s'expliquer par les équations de Maxwell décrivant le couplage entre les champs électrique et magnétique de l'onde incidente et les charges des électrons et du noyau d'un atome. L'utilisation des rayons X pour l'étude de la matière présente plusieurs avantages, notamment, leurs longueurs d'onde sont du même ordre de grandeur que les distances interatomiques (Frédéric SERNA et al., 2014).

Lorsque les rayons X atteignent les plans réticulaires des réseaux cristallins, soit ils entrent en contact avec les nuages électroniques des atomes constituant ce plan, soit ils ne rencontrent pas d'obstacle et peuvent continuer jusqu'au plan suivant. Ces plans sont séparés par des distances caractéristiques qui dépendent de la nature du matériau analysé (distances réticulaires) (Frédéric SERNA et al., 2014).

Les interférences des rayons vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, le flux de photons sera plus ou moins important : ces variations selon les directions forment le phénomène de diffraction X (Frédéric SERNA et al., 2014).

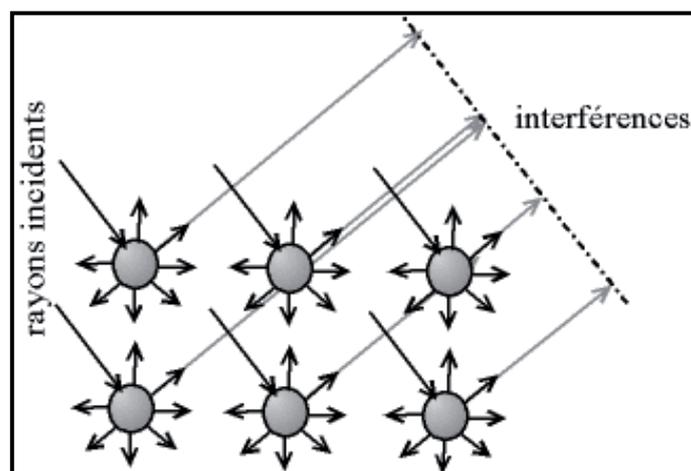


Figure 33 : Interférences des ondes diffractées - phénomène de diffraction

Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées pics de diffraction, peuvent être déterminées par la loi de Bragg :

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

Ou  $d$  est la distance interréticulaire,  $\theta$  est l'angle d'incidence des rayons X,  $n$  est un entier et  $\lambda$  est la longueur d'onde des rayons X.

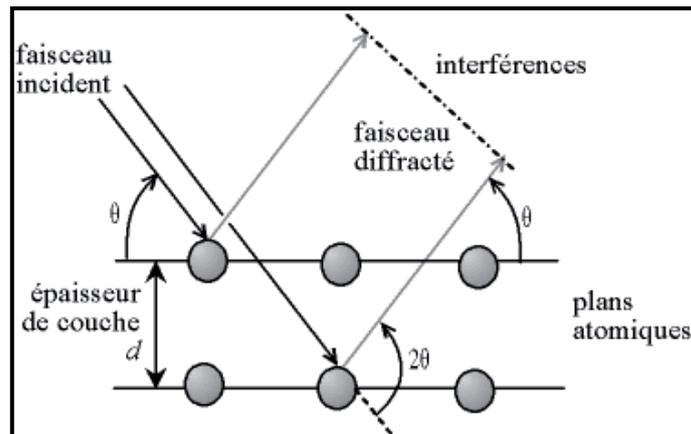


Figure 34 : Loi de Bragg donnant les directions où les interférences sont constructives



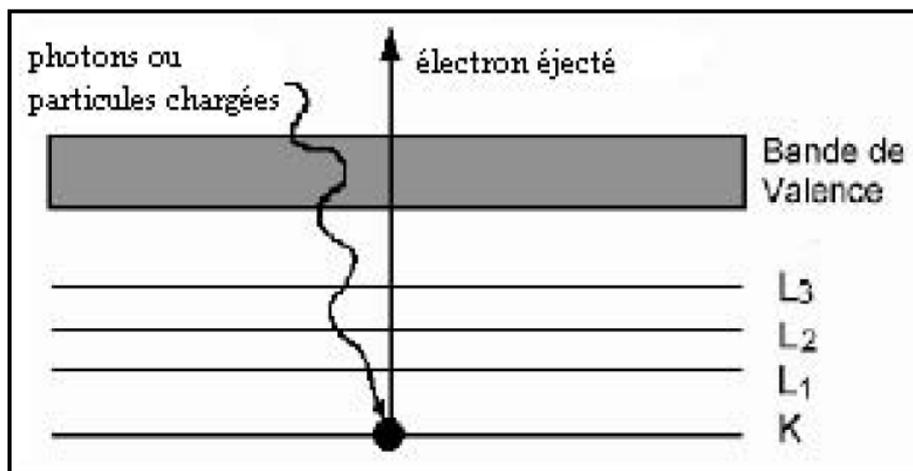
Figure 35 : Image du dispositif d'un diffractomètre RIGAKU Ultima IV.

Les analyses DRX ont été réalisées sur les échantillons DSK2, DSK4, SK1, SK7, SK11 au Japon en Décembre 2015, de la part de notre promoteur Mr. ISSAAD, avec un appareil de type RIGAKU Ultima IV.

#### IV. L'analyse par fluorescence des rayons X (XRF) :

L'analyse par fluorescence X (désignée par le sigle FX ou par le sigle anglais XRF) est une méthode de caractérisation chimique permettant de déterminer la composition élémentaire d'un échantillon (dans notre cas les oxydes majeurs).

Le principe physique qui régit cette méthode d'analyse est un processus atomique en deux étapes consécutives : ionisation en couche électronique interne de l'atome cible, suivie d'une cascade de transitions électroniques accompagnées d'émission de rayons X caractéristiques (Haïfa Ben Abdelouahed, 2010).



**Figure 36 :** L'ionisation en couche électronique interne peut se déclencher suite à un bombardement de l'atome par des photons (X ou gamma) ou par des particules (protons, électrons ou particules alpha) accélérées.

Pour déclencher le processus de fluorescence X dans les atomes d'un échantillon, on bombarde celui-ci par des photons ou par d'autres types de particules accélérées comme les électrons, les protons, ou les particules alpha (Haïfa Ben Abdelouahed, 2010).

Les photons incidents peuvent être produits par des dispositifs analogues au tube à rayons X ou par des sources radioactives dans lesquelles certains radionucléides se transforment par capture électronique interne (CEI). Dans de telles sources, tout ce passe comme si l'un des deux électrons de la couche K disparaissait subitement de l'atome. La lacune créée provoque un réarrangement responsable de l'émission X (Haïfa Ben Abdelouahed, 2010).

Les électrons de tout atome stable sont répartis dans des couches, et plus la couche est proche du noyau, plus l'énergie de liaison noyau-électron est forte. Si les photons incidents ont une énergie suffisamment importante, ils vont arracher des électrons situés au cœur de l'atome, près du noyau ; l'atome se trouve ainsi ionisé (figure 41). L'ionisation de la matière par des photons porte le nom d'"effet photo-électrique" qui a été découvert par Hertz en 1887 et interprété par Einstein en 1905 (Haïfa Ben Abdelouahed, 2010).

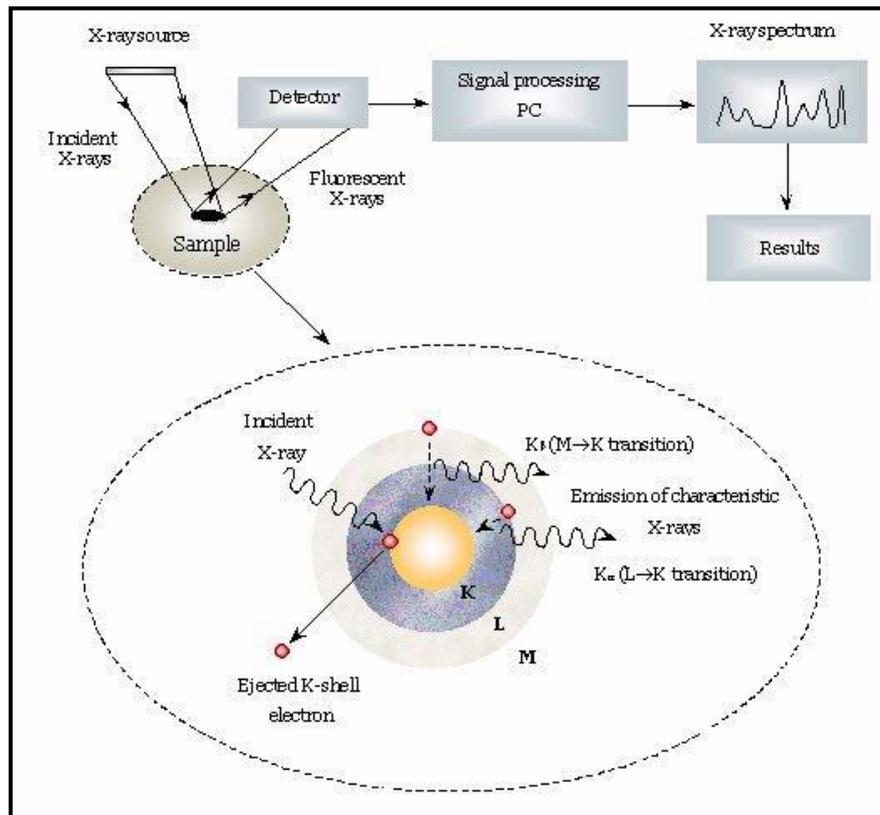


Figure 37 : Le principe de base de la fluorescence X et l'arrangement typique d'un détecteur XRF



Figure 38 : Image du dispositif RIGAKU RIX 3100.

Les analyses XRF ont été réalisées au Japon en Décembre 2015, de la part de notre promoteur Mr. ISSAAD, avec un appareil de type RIGAKU RIX 3100.

## V. L'analyse par spectrométrie d'absorption atomique :

L'absorption atomique de flamme est une méthode qui permet de doser essentiellement les métaux en solution (ELHAJJI, 2014).

Cette méthode d'analyse élémentaire impose que la mesure soit faite à partir d'un échantillon transformé à l'état d'atomes libres. L'échantillon est porté à une température de 2000 à 3000 degrés pour que les combinaisons chimiques dans lesquelles les éléments sont engagés soient détruites (ELHAJJI, 2014).

La spectrométrie d'absorption atomique est basée sur la théorie de la quantification de l'énergie de l'atome. Celui-ci voit son énergie varier au cours d'un passage d'un de ses électrons d'une orbite électronique à une autre :  $\Delta E = h\nu$  où  $h$  est la constante de Planck et  $\nu$  est la fréquence du photon absorbé. Généralement seuls les électrons externes de l'atome sont concernés (ELHAJJI, 2014).

Les photons absorbés étant caractéristiques des éléments absorbants, et leur quantité étant proportionnelle au nombre d'atomes d'élément absorbant selon la loi de distribution de Boltzmann, l'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments à doser. L'analyse par absorption atomique utilise la loi de Beer- Lambert (ELHAJJI, 2014).

S'il y a plusieurs éléments à doser, on réalise cette manipulation pour chaque élément de l'échantillon en se plaçant à une longueur d'onde fixée. Il faut donc à chaque manipulation choisir une source adaptée pour éclairer l'élément que l'on cherche à exciter.

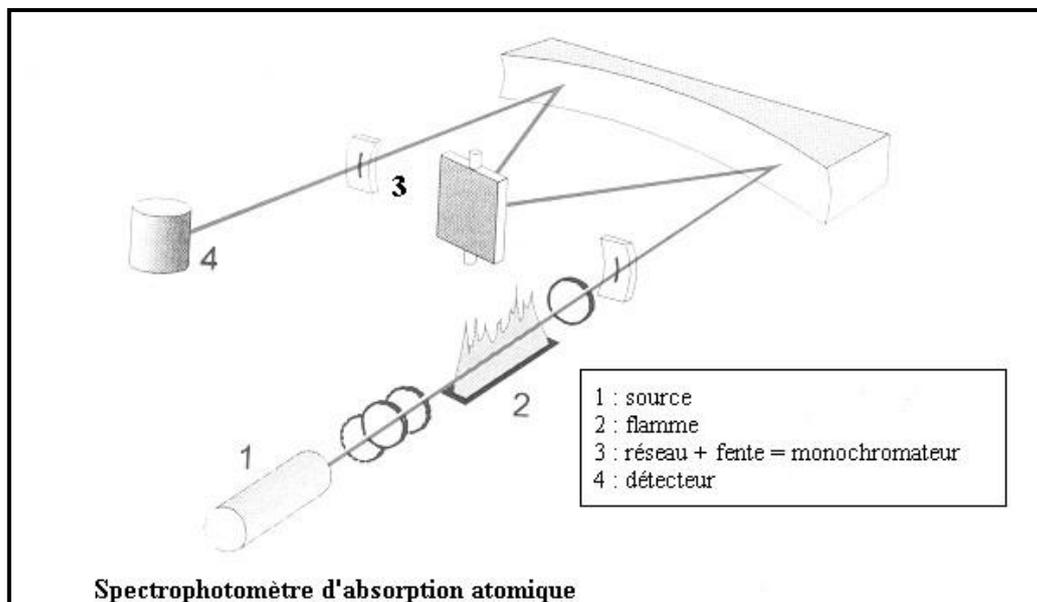


Figure 39 : schéma de principe du spectrophotomètre d'absorption atomique

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE III : Moyennes et Méthodes

Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique se compose d'une source, la lampe à cathode creuse, d'un brûleur et un nébuliseur, d'un monochromateur et d'un détecteur relié à un amplificateur et un dispositif d'acquisition (Voir la figure 39).



**Figure 40** : Photo du dispositif de spectromètre d'absorption atomique VARIAN AA240.

L'appareil utilisé est un spectromètre d'absorption atomique muni d'un dispositif à génération de flamme air-acétylène et protoxyde d'azote-acétylène, l'appareil est de type VARIAN AA240 (figure ici dessus), il est accompagné par un logiciel d'acquisition et de traitement de données Solar.

Le mode opératoire utilisé est le suivant :

- peser 0.5g de l'échantillon dans des godets entifiant ;
- attaquer avec 10ml de HF plus 10ml de HCl concentré ;
- reprendre avec 20ml de HCl concentré plus 10ml de HNO<sub>3</sub> à sec ;
- reprendre avec 10ml de HCL concentré pendant 10min ;
- transverse dans des fioles, jaugées avec 100 ml d'eau distillé et bien homogénéisé ;
- passer les étalons en premier pour obtenir les courbes de calibrations ;
- passer l'échantillon en solution ;
- les informations seront affichées sous forme de tableaux et des courbes ;
- les valeurs inférieures à 50 ppm seront négligées.

L'analyse par spectrométrie d'absorption atomique a été réalisée par Mr. TAMI K. au sein de laboratoire des analyses chimiques et pétrographiques à l'ORGM, BOUMERDAS (2017).

## VI. pH, Conductivité électrique et le potentiel Redox :

Les paramètres mesurés sur les échantillons solides sont le pH, la conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et le potentiel d'oxydoréduction Eh (mV) selon la méthode de Sobek et al., (1978).

Le mode opératoire pour cette analyse est le suivant : après avoir réaliser l'analyse granulométrique de l'échantillon ; on sélectionne les classes granulométriques inférieur à 0,125 mm et entre 0,125 et 0,250 mm. On mesure deux grammes de chaque échantillon pour les deux fractions granulométrique et on le met dans un gobelet en plastique par la suit ont ajouté de l'eau (Figure 41).



**Figure 41** : une photo des échantillons préparés pour mesurer le ph, redox et conductivité.

On a réalisé deux essais, dans le premier on a mesuré le ph et le potentiel redox de la même solution, le deuxième essai consiste a mesuré le ph et la conductivité.

Le pH et le potentiel d'oxydo-réduction est mesuré à l'aide d'un même appareil portable, un pH-mètre de référence HANNA HI 8424, avec l'électrode redox de référence HI 1332B qui mesure le potentiel d'oxydo-réduction.

Les solutions tampons utilisées pour étalonner le pH-mètre sont des solutions à pH=4, pH = 7. L'électrode redox est reportée à des valeurs de Eh relatives à l'électrode standard d'hydrogène. Généralement, plus cette valeur est grande, plus le milieu étudié est oxydant et plus la valence des métaux est positivement grande.

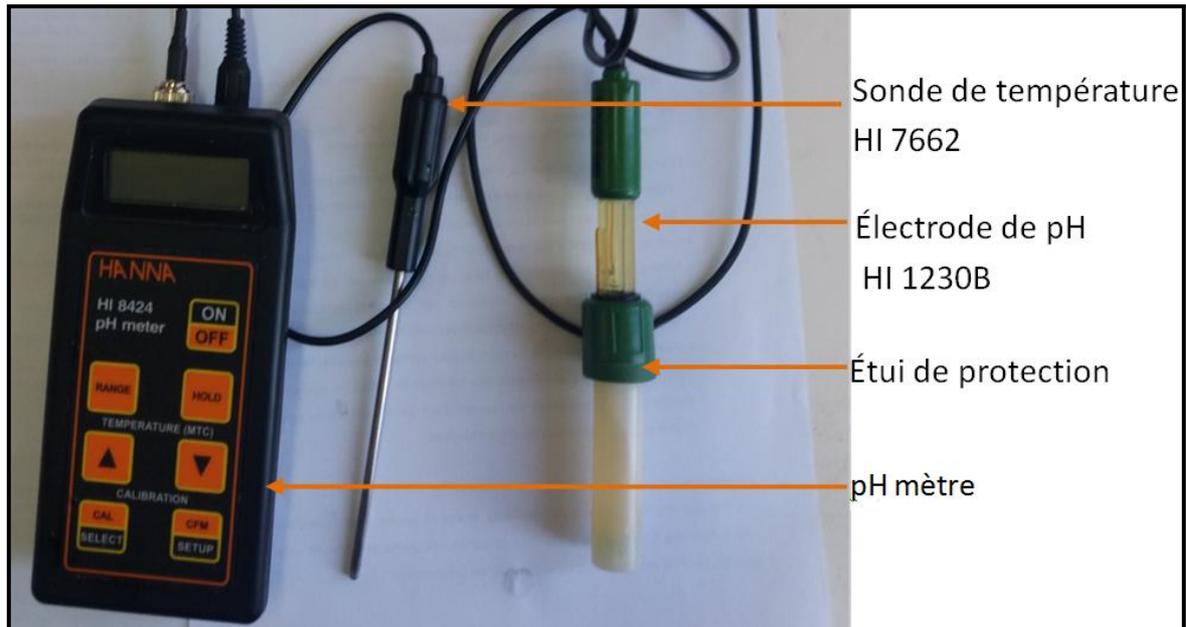


Figure 42 : photo de pH mètre HANNA HI 8424 utilisé

La conductivité de la solution dépend à la fois de la concentration des ions présents dans la solution, de leur charge électrique et de leur nature ; plus la concentration en ions dans la solution est importante, plus la conductivité est élevée. Pour la mesuré on a utilisé un conductimètre type HANNA HI 98311.



Figure 43 : Photo du conductimètre HANNA HI 98311

Avant de passer d'un échantillon à un autre pour chaque mesure, on nettoie l'électrode, le sonde de température et l'électrode de redox de pH mètre et le conductimètre de façon adéquate. Ceci a pour effet de limiter les possibilités de contamination et obtenir un résultat fiable.

Les appareils utilisés lors de ces essais appartiens à Mr. ISSAAD, et la pratique a été réalisée au sein du laboratoire de sédimentologie du département géologie, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Campus Tamda.

# CHAPITRE IV :

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

## CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations

### I. Granulométrie :

Les résultats obtenus lors des essais de la granulométrie ont permis de savoir la classe granulométrique dominante des échantillons, comme le montre les tableaux suivant :

Type	Rudites (> 2mm)		Arénites					Lutites	
	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0,043	<0,045
Diamètre (mm)									
Refus (%) AZZ	41,55		<b>57,73</b>					0,54	
Refus (%) AZZ 7	38,62		<b>57,08</b>					4,29	
Refus (%) AZZ 8	39,83		<b>55,66</b>					4,45	
Refus (%) AZZ 9	48,32		<b>48,34</b>					3,26	

**Tableau 06 :** Tableau des classes granulométriques des rejets miniers prélevés dans la mine d’Azzaba

Type	Rudites		Arénites					Lutites	
	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0,043	<0,045
Diamètre (mm)									
Refus (%) KOT J	<b>56,40</b>		42,62					0,64	
Refus (%) KOT 3 J	<b>50,60</b>		29,94					18,89	
Refus (%) KOT G	37,21		<b>55,46</b>					7,06	
Refus (%) KOT 3 G	<b>54,64</b>		41,05					4,30	

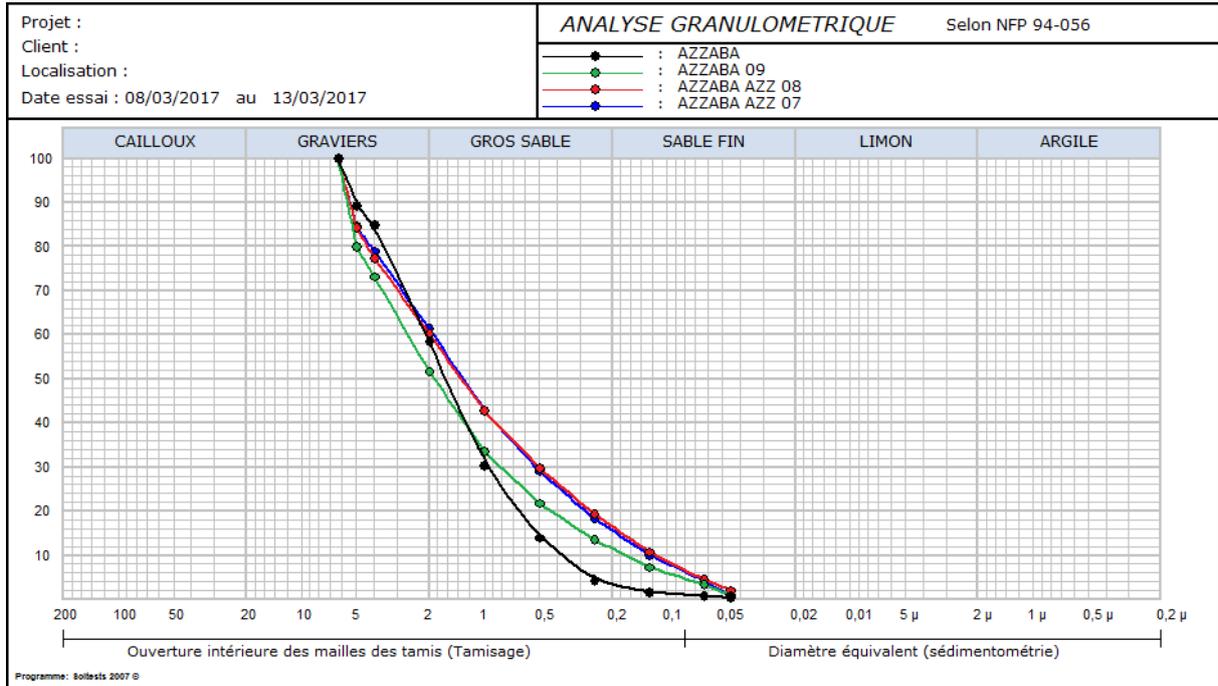
**Tableau 07 :** Tableau des classes granulométriques des rejets miniers prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul.

D’après les tableaux on peut dire que la classe granulométrique dominante est des sables (Arénites) à Azzaba, et des graviers (Rudites) à Kef Oum Teboul.

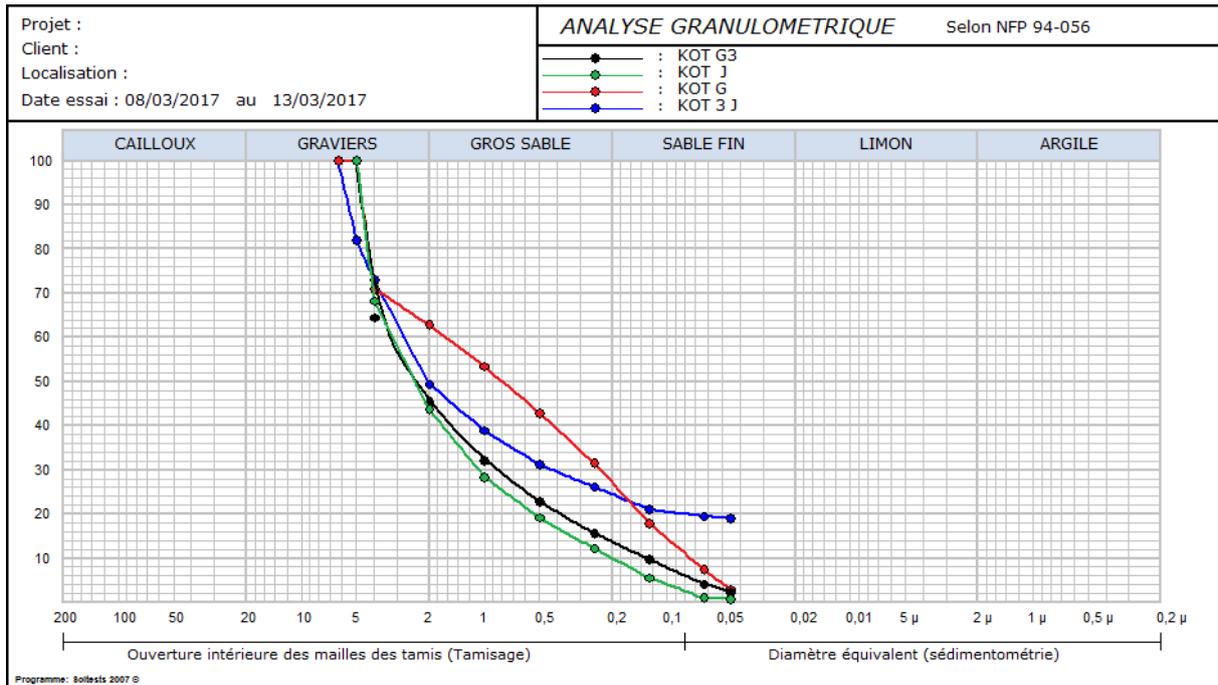
Les courbes cumulatives obtenues selon la norme française P 94-056, ici dessous, confirme l’interprétation précédente :

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

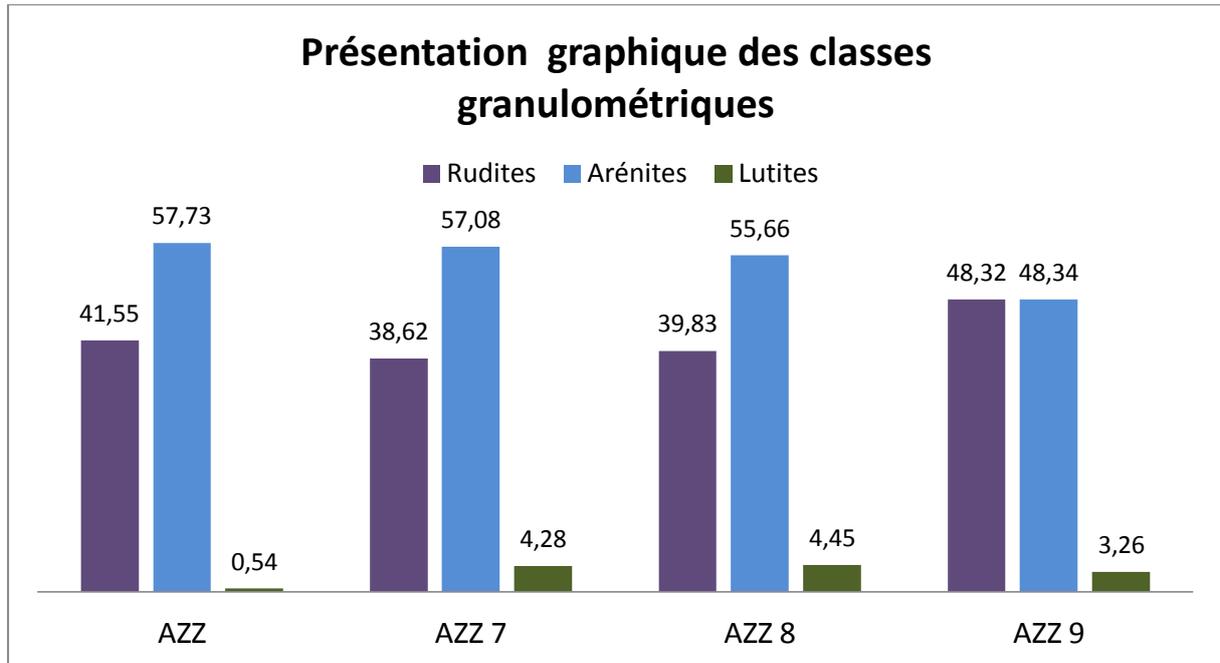
## CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations



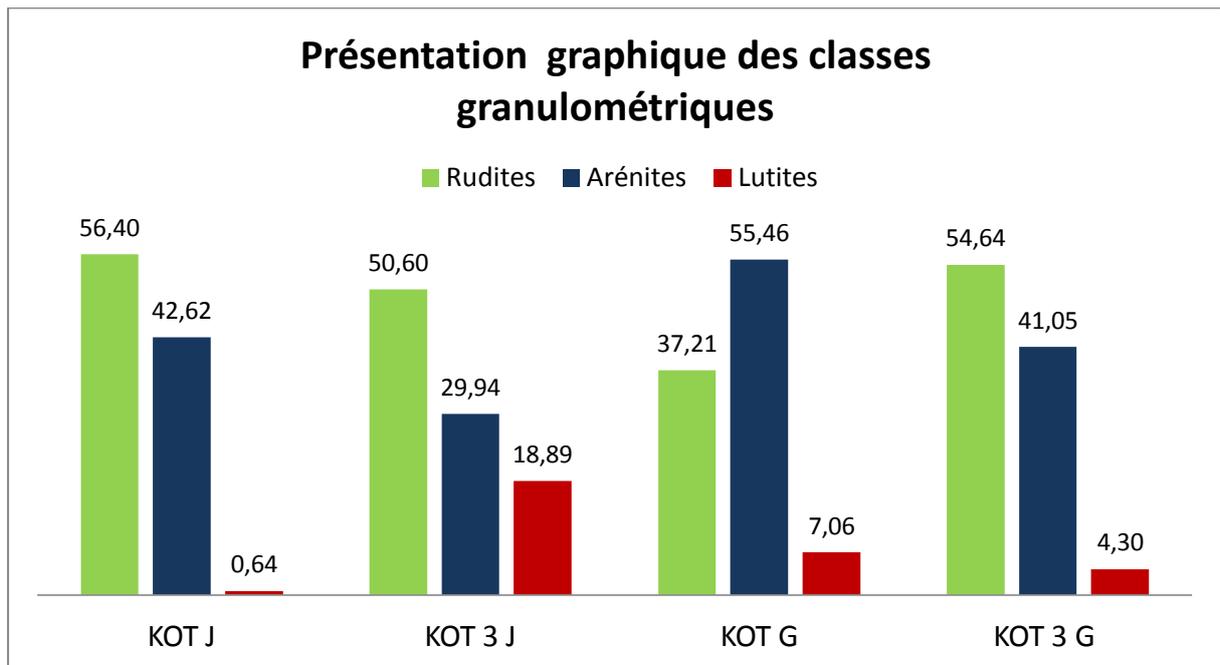
**Figure 44** : Courbes cumulatives de la distribution granulométrique des échantillons prélevés dans le district d'Azzaba



**Figure 45** : Courbes cumulatives de la distribution granulométrique des échantillons prélevés dans le district de Kef Oum Teboul



**Figure 46** : Histogramme de comparions entre les défèrent classe granulométrique des échantillons prélevés dans l'Azzaba

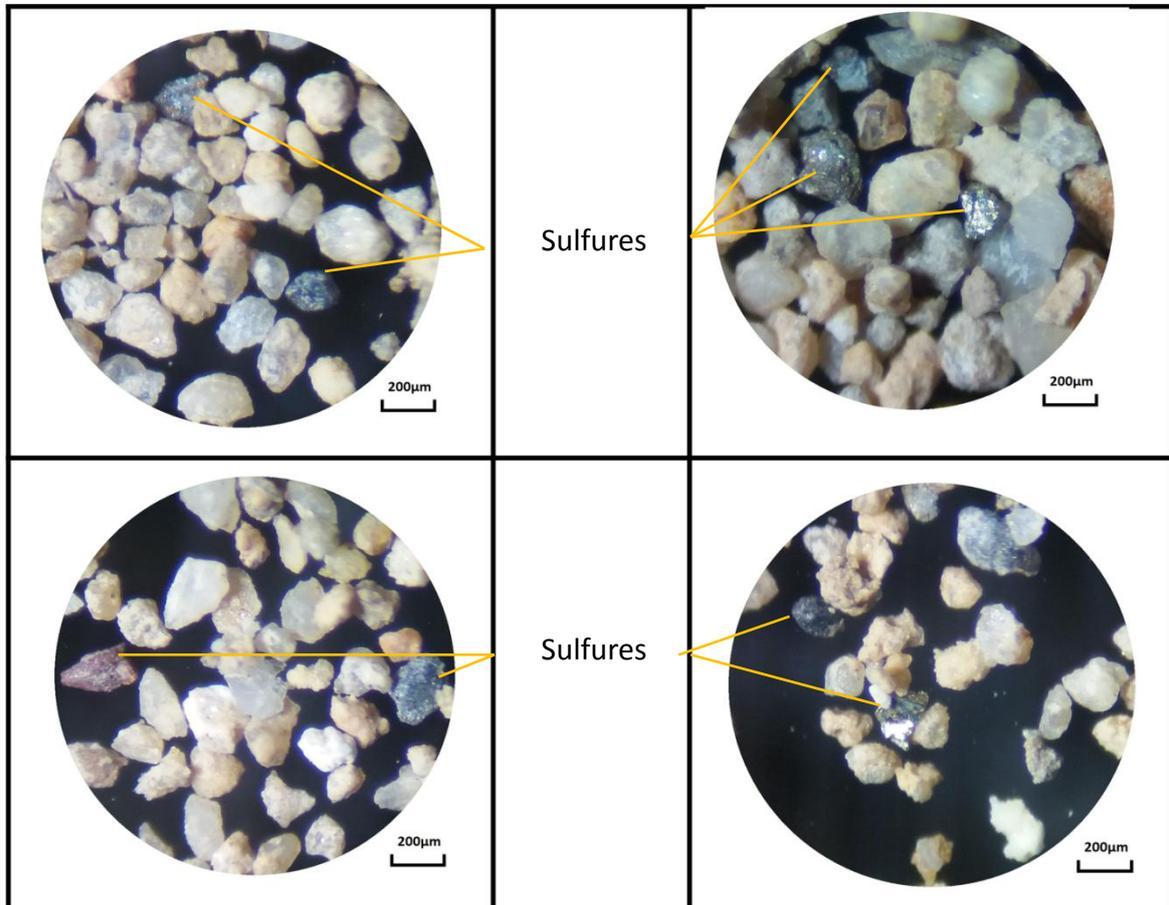


**Figure 47** : Histogramme de comparions entre les défèrent classe granulométrique des échantillons prélevés dans le district de Kef Oum Teboul

L'histogramme de Kef Oum Teboul montre que malgré que la classe dominante soit les Rudites, les valeurs des arénites sont aussi importantes et proches de celles des Rudites.

## II. Minéralogie et métallographique des rejets miniers :

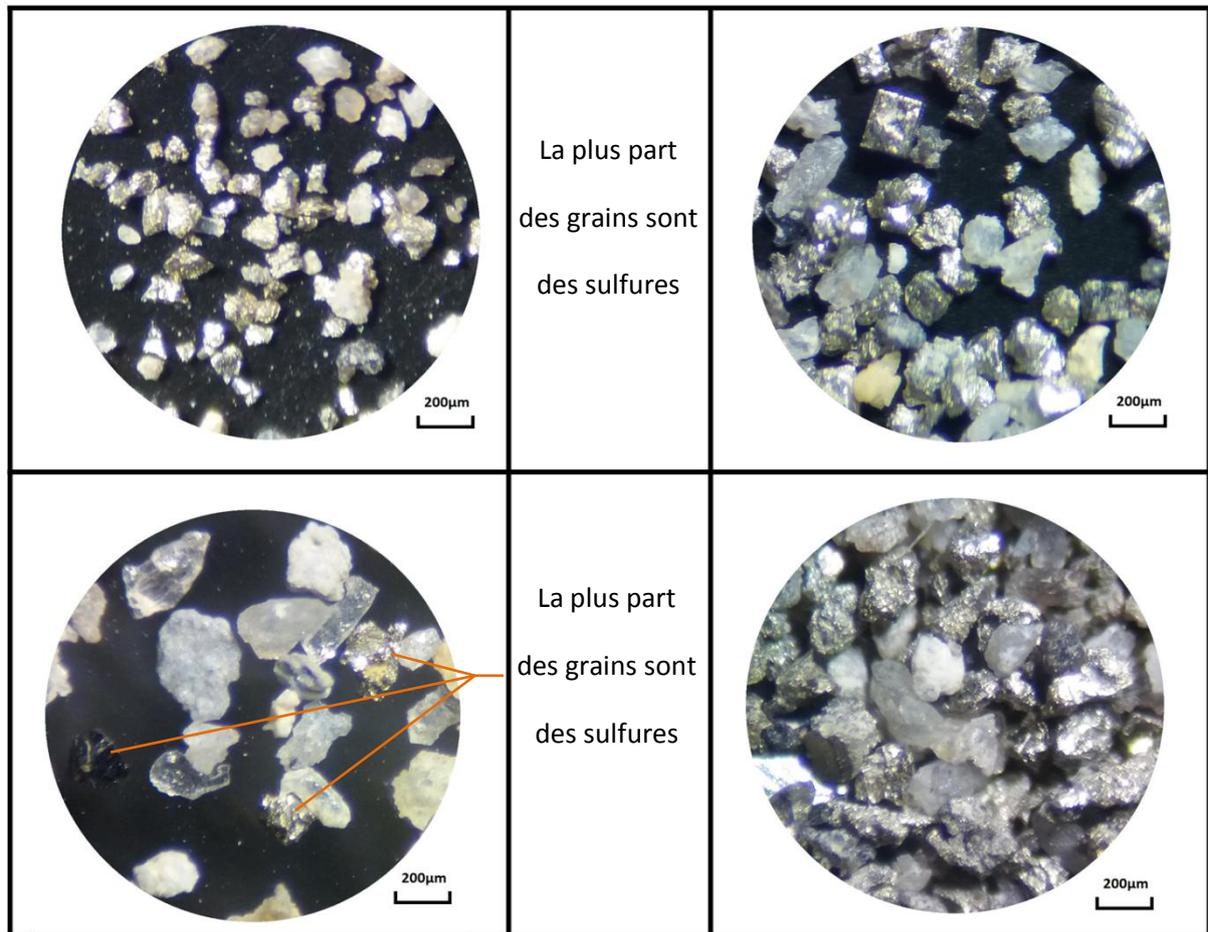
### II.1. Observation à la loupe binoculaire :



**Figure 48 :** Photos montrent les éléments des rejets miniers observés sous une loupe binoculaire (échantillons prélevés dans le district d'Azzaba).

Les grains des rejets miniers d'Azzaba présente forme arrondie, et on note la présence des minéraux métalliques qui présentent un éclat métallique, d'une couleur sombre ou claire et on arrive même à distingué le cinabre grâce à ça couleur rougeâtre.

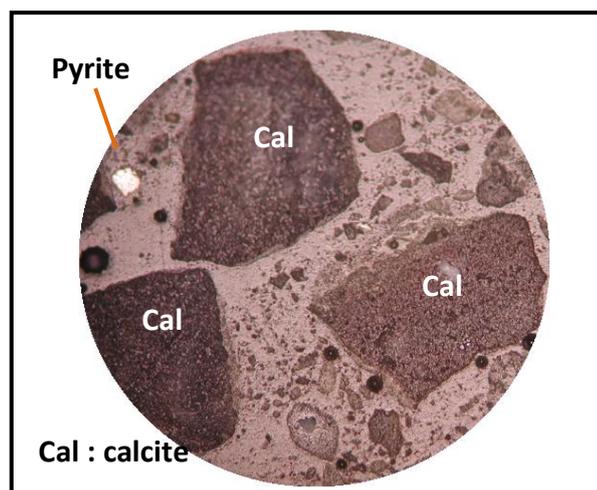
L'observation à la loupe binoculaire des échantillons prélevés dans le district de Kef Oum Teboul, révèle la présence d'une quantité très importante des minéraux métalliques (sulfures) facilement distingués, avec un éclat métallique et parfois même sous forme cubique ; en autre la forme générale des grains est anguleuse.



**Figure 49 :** Photos montrent les éléments des rejets miniers observés sous une loupe binoculaire (échantillons prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul).

## II.2. Observation au microscope optique métallographique :

**Figure 50 :** Photo de rejet minier de la mine d'Azzaba observée sous le microscope métallographique.



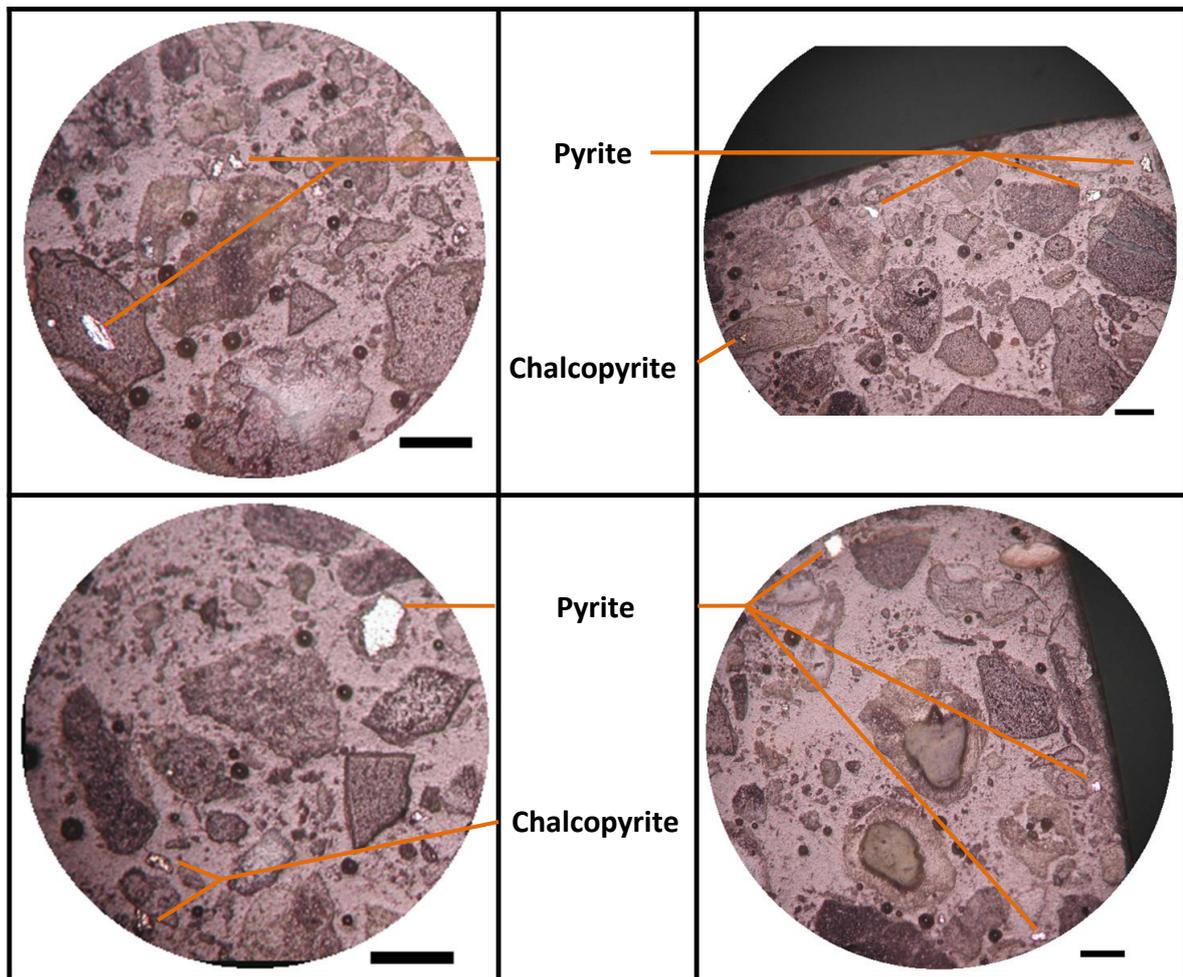
# Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations

**Pyrite ( $\text{FeS}_2$ )** : Elle est représentée par un petit cristal cubique automorphe, d'une couleur jaune, et un pouvoir réflecteur fort.

**Calcite  $\text{CaCO}_3$**  : les cristaux de la calcite sont gros et en une forme subautomorphe.

Les minéraux métalliques sont rarement présents dans les rejets miniers d'Azzaba, contrairement à ceux de Kef Oum Teboul ; comme on peut le constaté ici dessous :



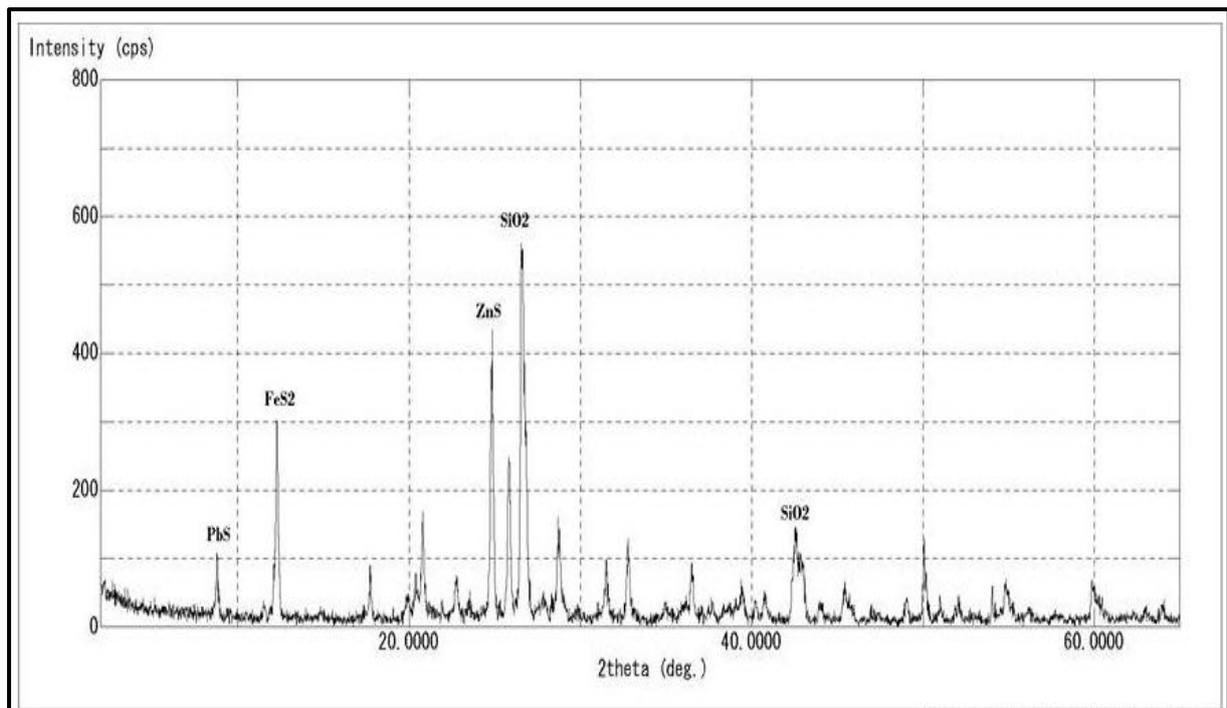
**Figure 51** : Photos des rejets miniers de la mine de Kef Oum Teboul observée sous le microscope métallographique.

**Pyrite ( $\text{FeS}_2$ )** : elle est représentée sous divers formes, xénomorphe ou même cubique, d'une couleur jaunâtre, la taille des grains varie, elle est fréquemment altérée et montre des auréoles de corrosion chimique.

**Chalcopyrite ( $\text{CuFeS}_2$ )** : Elle apparait sous forme de petits cristaux d'une couleur jaune verdâtre et d'un faible pouvoir réflecteur, le plus souvent elle est altérée avec des auréoles de corrosion chimique.

### II.3. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X effectuée sur un échantillon de rejet minier d'Azzaba n'a pas détecté des sulfures car ils sont très rares ; par contre elle a confirmé la nature de l'encaissant gréseux et calcaire.



**Figure 52** : Diffractogramme d'un échantillon de rejet minier prélevé dans la mine de Kef Oum Teboul

L'analyse cristallographique par diffraction des rayons X d'un échantillon de rejet minier (prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul), est représentée sous forme d'un diffractogramme (ici dessus) ; d'après le résultat le rejet minier est constitué essentiellement de quartz qui est expliqué par la nature de l'encaissant (les grés du Numidien) ; suivi par des quantités importantes des sulfures : sphalérite, pyrite et galène.

## Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

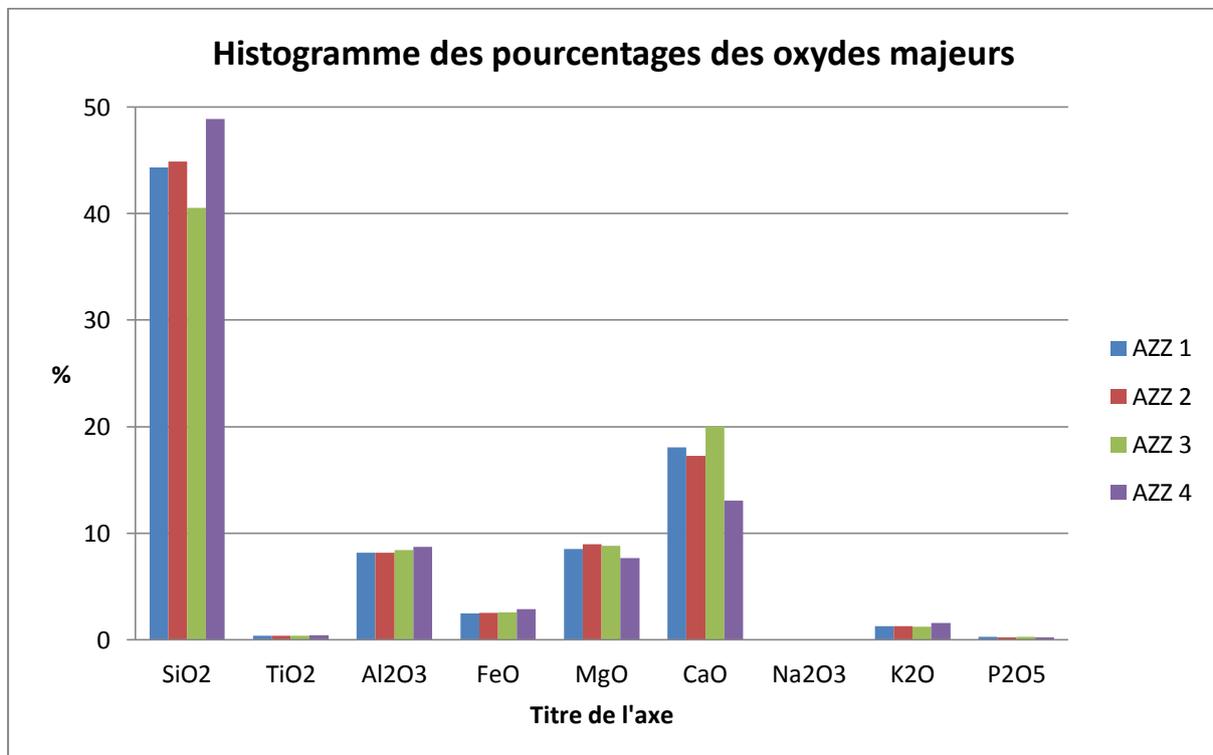
### CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations

### III. Analyse par fluorescence des rayons X, analyse (XRF) :

Les résultats de l'analyse chimique des oxydes majeurs exprimés en pourcentage (%) sont représentés dans les tableaux suivants :

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
AZZ 1	44,336	0,338	8,149	2,453	8,510	18,048	0,000	1,250	0,251
AZZ 2	44,916	0,346	8,159	2,504	8,947	17,267	0,000	1,253	0,213
AZZ 3	40,542	0,335	8,399	2,544	8,821	19,992	0,000	1,208	0,238
AZZ 4	48,919	0,382	8,685	2,869	7,655	13,050	0,000	1,530	0,187

**Tableau 08** : Tableau des résultats d'analyse des oxydes majeurs des rejets miniers prélevés dans la mine d'Azzaba.



**Figure 53** : Histogramme des pourcentages des oxydes majeurs des rejets miniers (Echantillons prélevés dans la mine d'Azzaba).

A partir des résultats obtenus par l'analyse spectrométrique de fluorescence des rayons X des oxydes majeurs, des rejets miniers prélevés dans la mine d'Azzaba, on peut confirmer la nature de l'encaissant gréseux et calcaire, vu les teneurs de la silice qui

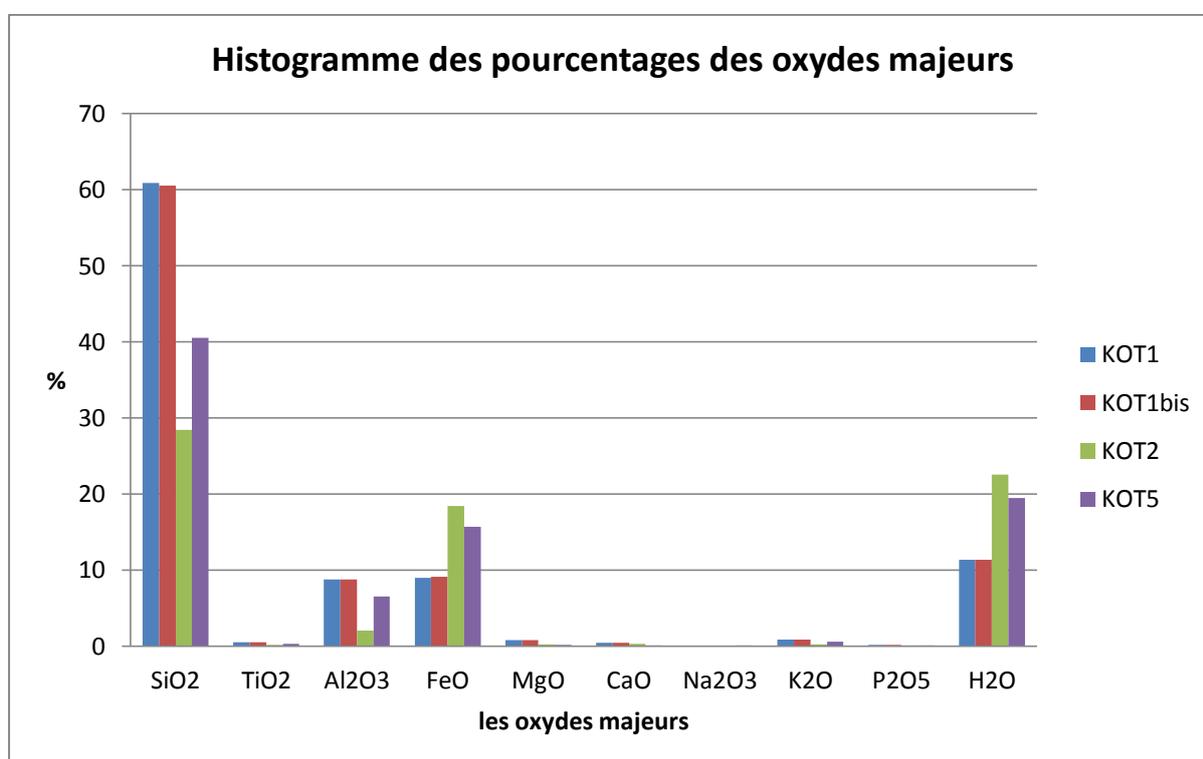
## Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

### CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations

dépasse les 40%, et les teneurs combinées du CaO et MgO, qui forme ensemble les carbonate, dépassées les 20%.

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O
KOT1	60,880	0,499	8,735	8,955	0,752	0,444	0,000	0,864	0,113	11,350
KOT1bis	60,539	0,521	8,778	9,112	0,765	0,446	0,000	0,877	0,113	11,350
KOT2	28,422	0,108	2,010	18,445	0,192	0,313	0,000	0,220	0,006	22,520
KOT5	40,495	0,270	6,490	15,713	0,144	0,091	0,100	0,561	0,073	19,450

**Tableau 09** : Tableau des résultats d'analyse des oxydes majeurs des rejets minier prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul.



**Figure 54** : Histogramme des pourcentages des oxydes majeurs des rejets minier (Echantillons prélevés dans la mine de Kef Oum Teboul).

Dans le cas des rejets miniers de la mine de Kef Oum Teboul, on constate une absence presque totale des oxydes majeurs CaO et MgO (carbonate), par contre la silice est très abondante et dépasse parfois les 60%. On note aussi la présence d'un pourcentage d'oxyde de fer et du H<sub>2</sub>O non négligeable.

#### **IV. Analyse chimique des éléments trace métalliques (ETM) :**

Les résultats de l'analyse des éléments chimique métalliques, par la méthode spectrométrie d'absorption atomique, s'exprimes en ppm et sont représentés dans les tableaux suivant :

	Pb	Zn	Cu	Cd	As	Fe
KOT G	< 50	1 600	490	< 30	3 300	161 200
KOT J	17 900	710	1100	< 30	420	156 100
KOT 3 G	7 900	1 400	80	< 30	< 30	37 200
KOT 3 J	10 900	530	710	< 30	270	114 300
AZZ	< 50	1 800	< 50	< 30	70	16 800
AZZ 9	< 50	1 900	< 50	< 30	240	17 700
SCOR	1 300	940	< 50	< 30	< 50	27 400
Clark (B. Mason)	16	132	70	0,15	5	50 000

**Tableau 10 :** Tableau des Résultats d'analyse par spectrométrie d'absorption atomique des éléments chimiques métalliques des échantillons et du Clark (B. Mason).

Les valeurs du Cd ne dépassent pas le seuil de détection du spectromètre pour tous les échantillons et qui est de 50 ppm (ça ne veut pas dire que les teneurs du Cd sont au dessous de Clark) ; et c'est le cas du Cu, Pb et As pour certains échantillons.

En outre, on constate que dans les rejets miniers de la mine de Kef Oum Teboul, les teneurs en éléments chimiques métalliques dépassent largement le Clark, et ça est dû au type de gisement (hydrothermal polymétallique) et aux méthodes du traitement du minerai

Le même résultat est observé dans le cas des rejets miniers de la mine d'Azzaba, avec des teneurs moins importantes mais non négligeables ; sauf se qui concerne le fer et le cuivre, ces derniers montres des teneurs inférieures au Clark, ça veut dire que les rejets ne contiennent pas des sulfures de fer et du cuivre (pyrite, chalcoprite...).

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations

### V. pH, Conductivité électrique et le potentiel d'oxydoréduction :

Les résultats des analyses de pH, conductivité et le potentiel d'oxydoréduction sont consignés dans le tableau suivant :

	PH	Conductivité (ms/cm)	Redox (mV)
AZZABA <125	7,65	0,78	251,6
AZZABA >125	7,56	0,76	279,1
AZZ 7 <125	7,85	0,77	240,5
AZZ 7 >125	7,65	0,75	256,3
AZZ 8 <125	7,75	0,75	225,4
AZZ 8 >125	7,63	0,76	242,5
AZZ 9 <125	7,68	0,88	272,9
AZZ 9 >125	7,55	0,78	280,2
KOT G <125	1,87	2,48	469,8
KOT G >125	2,09	1,66	461,6
KOT J <125	5,34	0,88	360,8
KOT J >125	4,62	0,83	275,8
KOT 3 J <125	4,42	0,95	355,4
KOT 3 J >125	5,77	0,75	409,4

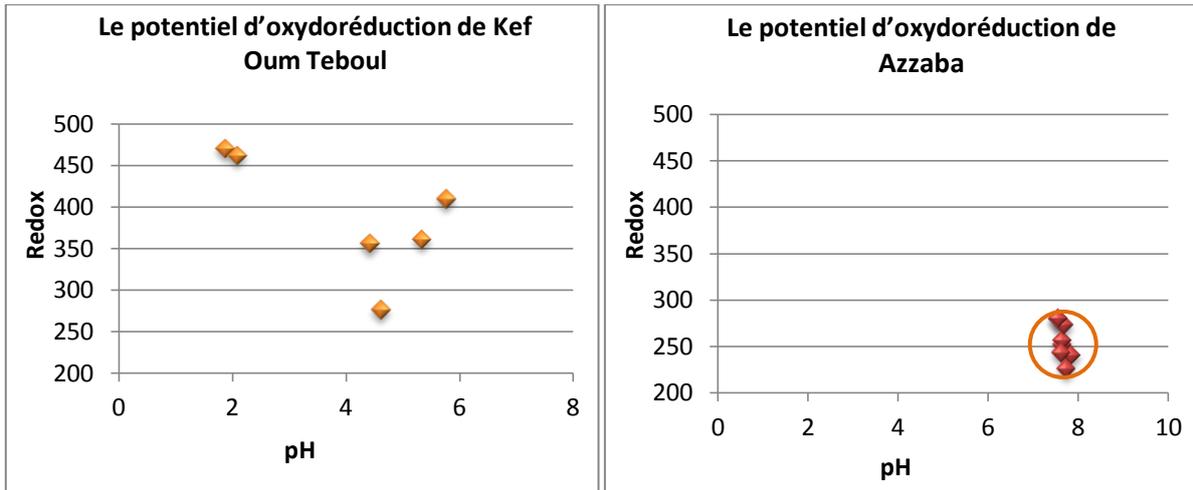
**Tableau 11** : Tableau de résultat des analyses de pH, Redox

Les valeurs de pH indiquent que les rejets miniers de la mine d'Azzaba des solutions légèrement alcaline, ce qui est logique car les teneurs en fer sont faible, et ça empêche le déclenchement des réactions du DMA.

Alors que à de Kef Oum Teboul les valeurs de pH varies en fonction de la teneur en métaux des rejets, plus précisément la teneur en fer.

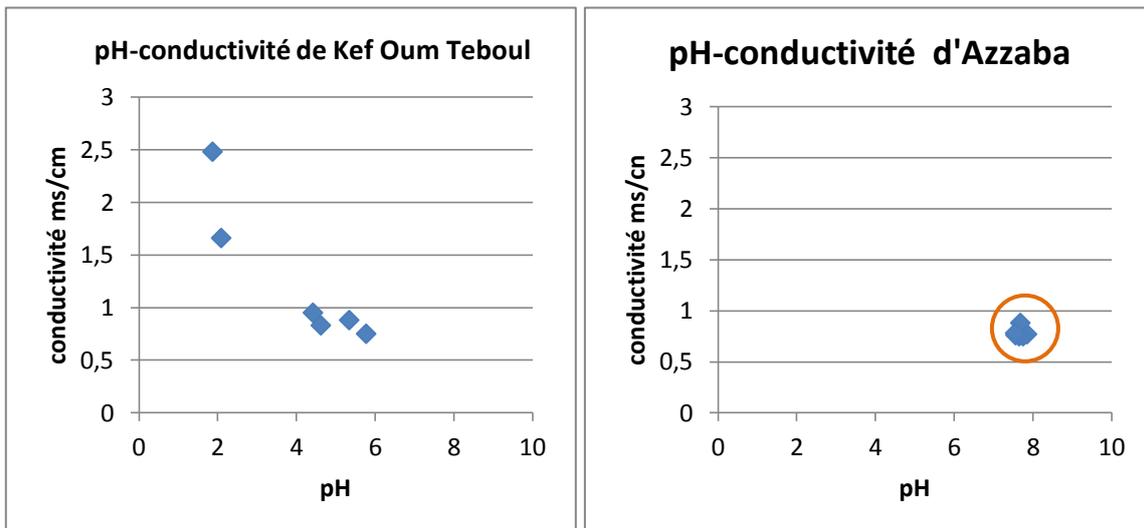
# Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations



**Figure 55** : nuages de points de résultat des analyses de pH, Redox des rejets miniers des deux mines.

Le potentiel Redox indique un caractère oxydant pour les rejets des deux mines, alors un pouvoir de génération du DMA, mais la présence des carbonate dans les rejets miniers d'Azzaba empêche le développement des eaux acide ; et à Kef Oum Teboul, c'est le cas contraire, absence des carbonate et abondance des sulfures du fer, par conséquent le potentiel redox avoisine les 490 mV



**Figure 56** : nuages de points de résultat des analyses de pH, conductivité des rejets miniers des deux mines.

# Caractérisation préliminaire des rejets miniers des mines D'Azzaba Et Kef Oum Teboul

## CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations

---

Eau pure	0,055 microS/cm
Eau distillée	0,5 microS/cm
Eau de montagne	1,0 microS/cm
Eau courante	500 à 800 microS/cm
Max pour l'eau potable	1055 microS/cm
Eau de mer	56 000 microS/cm
Eau saumâtre	100 000 microS/cm

**Tableau 12** : les valeurs de la conductivité dans différents types d'eau  
(Jean Pierre Rivron et al., 2012).

Les valeurs de la conductivité indiquent des milieux conducteurs ; à Kef Oum Teboul plus qu'à Azzaba ; alors il existe les ions et sels minéraux dissous dans la solution qui peut être libéré lors des réactions d'oxydation.

# CONCLUSION GÉNÉRAL

## **Conclusion générale :**

L'analyse granulométrique des rejets miniers des deux mines, a donnée un mélange entre les sables et les graviers. La granulométrie est un facteur important dans le processus de formation des DMA, car plus les grains sont fins, plus la surface spécifique est grande, alors une grande surface de contact avec l'eau et l'oxygène.

L'étude minéralogique et métallographique des rejets miniers de la mine de Kef Oum Teboul, démontre la présence de quantités très importantes des sulfures, notamment le sulfure de fer « pyrite » qui s'oxyde à un pH neutre. Le résultat du DRX viens confirmer les observations, et donne un aperçus sur la nature de l'encaissant qui est principalement formé par de la silice (SiO<sub>2</sub>). Ce n'est pas le cas pour les rejets miniers de la mine d'Azzaba, qui présent beaucoup plus moins du sulfure, et la DRX révèle la présence des carbonate dans la composition de l'encaissant.

L'analyse par fluorescence des rayons X des oxydes majeurs, viens confirmés les observations concernant l'encaissant, qui est constitué par des grés et des calcaires à Azzaba et des grés à Kef Oum Teboul.

Les résultats de l'analyse des éléments chimique métalliques, par la méthode spectrométrie d'absorption atomique, nous donne un aperçus sur les teneurs et le type des minéraux métalliques (sulfures) présent dans les rejets miniers : un cocktail des sulfures du Fe, Zn, Cu, As et Pb dans les échantillons de Kef Oum Teboul, et essentiellement des sulfure de Zn et As dans les échantillons d'Azzaba.

Les valeurs obtenues lors des essais de pH, conductivité et de potentiel redox, ont données des pH acides à Kef Oum Teboul et des pH légèrement basiques à Azzaba.

La nature de l'encaissant siliceux, les observations et l'ensemble des teste physico-chimique effectués sur les rejets miniers abandonnés de la mine de Kef Oum Teboul, confirmes qu'ils sont générateur de DMA et constituent un véritable danger sur la qualité des eaux et l'écosystème environnant notamment la réserve intégrale du lac Tonga extrêmement sensible.

Dans le cas de la mine d'Azzaba, la présence d'un encaissant carbonaté, les testes et les essais ont démontré que les rejets miniers de cette mine sont non générateur de DMA, mais le problème est essentiellement dans la nature du minerai, vue que le mercure est extrêmement mobile et toxique, il peu se transféré vers les aquifères par les DMN et affecté l'écosystème.

## Références Bibliographiques :

Abdelhak BOUTALEB , M'Hamed SEKLAOUI , Larbi HADJ ARAB , Mouloud ISSAAD , Fadila ALLIGUI, Dalila BERDOUS, Chirine SAKHER, Nassima AHMINE , 2015: Environmental Impacts of (Zn-Pb-Fe and Cu) Ore Deposits Mining and Associated Wastes: a Case of the Northeastern Algeria

Abdelmalek GOUMIH, 2014 : Caractérisation Environnementale Des Mines Abandonnées De La Région De Tensift : Cas Des Sites Miniers D'azegour Et D'erdouz. (Haut Atlas Occidental)

Akcil A., Koldas S., 2006: Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies (Page: 1139, 1145).

Al T.A., Martin C.J., Blowes D.W., 2000: Carbonate-mineral/water interactions in sulfidiferous mine tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Page: 3933, 3948).

Alain Foucault, Jean-François Raoult : Dictionnaire de géologie ; 6<sup>em</sup> édition.

ALLIGUI Fadila, 2011 : Dispersion Géochimique Naturelle et Artificielle du Mercure dans la Région de Azzaba -W.Skikda- et son Impact sur l'Environnement.

Aubertin et al., 2002 : Environnement et gestion des résidus miniers. Presses Internationales de Polytechnique, Corporation de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal.

BENDERRADJI Mohammed El Habib, 1999 : Quelques indices d'appréciation de la pollution mercurifère dans le milieu éco-géographique de la dépression d'Azzaba, Nord Est Algérien.

BENHAMZA Moussa, 2007: contribution de la géophysique a l'étude hydrogéologique de la zone mercurielle nord numidique (Azzaba) – détermination du degré de pollution.

BRGM/RP-50829-FR, 2001 : Traitements et préventions des drainages acides provenant des résidus miniers (Pages : 7, 9, 11, 14, 42).

Dagenais A.-M., Aubertin M., Bussière B., Bernier L., Cyr J., 2001: Monitoring at the Lorraine Mine site: a follow-up on the remediation plan. National Association of Abandoned Mine Land Programs Annual Conference (Page: 19).

DENOUN Abderrahmane, 1984 : Etude préliminaire de gisement de mercure d'Azzaba, Wilaya de Skikda.

Direction Générale Des Forêts, 2003 : Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar Réserve Intégrale du Lac Tonga, Wilaya d'El Tarf.

Direction Générale Des Mines / Ministère De L'industrie Et Des MINES, 2015 : Potentiel Minéral De L'Algérie (Pages : 1, 5).

Direction Générale Des Mines, 2003 : Guide pour l'élaboration d'un mémoire d'impact sur l'environnement pour les exploitations minières (Pages : 4).

Doye I., 2005: Evaluation de la capacité de matériaux industriels alcalins à neutraliser des résidus et stériles miniers acides. Thèse de Doctorat de l'Université Laval Québec (Page : 298).

Doye I., Duchesne J., 2003: Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigation using batch-leaching tests. Applied Geochemistry (Page: 1197, 1213).

Earthworks Fact Sheet: Hardrock Mining and Acid Mine Drainage.  
[http://www.earthworksaction.org/pubs/FS\\_AMD.pdf](http://www.earthworksaction.org/pubs/FS_AMD.pdf)

ELHAJJI, 2014 : Cours de chimie, Faculté des Sciences Rabat, Université Mohammed V Rabat ( <http://www.fsr.ac.ma/cours/chimie/El%20hajji/chap%20IV%20S4.pdf> ).

FNEHIN, 2012 : Acid Mine Drainage (First Nations Environmental Health Innovation Network)

François TOMAS, 1970 : Les mines de la région d'Annaba (Pages : 38 ; 39).

Frédéric SERNA, Jean LAGNEAU, Jean-Marc CARPENTIER, 2014: La diffraction des rayons X : une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques

GHORBEL BEN ABID Manel, 2012 : Contamination métallique issue des déchets de l'ancien site minier de Jebel Ressay : modélisation des mécanismes de transfert et conception de cartes d'aléa post-mine dans un contexte carbonaté et sous un climat semi-aride. Evaluation du risque pour la santé humaine (Pages : 6, 7, 8).

Guide pour l'évaluation des projets EIE du domaine minier : chapitre 1 : Généralités sur l'exploitation minière et ses impacts (Pages : 9).

Haïfa Ben Abdelouahed, 2010 : Etude de la fluorescence X : Développement dans Geant4 de nouveaux modèles de sections efficaces pour la simulation PIXE. Applications biologiques et archéologiques (Page : 7, 8, 9,)

Jean Pierre Rivron, Jean-Louis Ecuier, 2012 : impact de la décharge de l'Aiguillon sur son environnement. <http://slideplayer.fr/slide/2845235/>

Kalin, M., Fyson, A. and Wheeler, W.N., 2006: The chemistry of conventional and alternative treatment systems for the neutralization of acid mine drainage. Science of the Total Environment (Page: 366, 395, 408).

Loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable (pages : 8).

Loi n° 14-05 du 24 Rabie Ethani 1435 correspondant au 24 février 2014 portant loi minière. (pages : 4)

Melanson M., 2006 : Analyse s'un système de traitement passif pour le site de la mine Eustis. Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec (Page : 57).

Mylona E., Xenidis A., Paspaliaris I., 2000: Inhibition of acid generation from sulphidic wastes by the addition of small amounts of limestone. Minerals Engineering (Page: 1161-1175).

ORGM, 1981 : Rapport sur les résultats des travaux de prospection et d'estimation réalisés en 1977-1981 dans le champ polymétallique de Kef Oum Theboul. Tome I (partie géologique).

Pauline COLLON, 2003 : Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation *in situ* (Page : 30).

Peppas A., Komnitsas K., Halikia I., 2000 : Use of organic covers for acid mine drainage control. Minerals Engineering (Page: 563, 574).

Pierre Bousquet, 2000: Application De Silicates Sur La Pyrite Pour Prévenir Le Drainage Minier Acide (Pages : 3, 4).

Plumlee G.S (1999): The environmental geology of mineral deposits.(Page: 71, 116).

Rébécca Pelletier-Allard, 2014 : Caractérisation Et Neutralisation Du Drainage Minier Acide Par Une Dolomie À Haute Pureté (Pages : 14, 17, 18).

Roger Guay, Ph.D., 1994 : Diversité Microbiologique Dans La Production De Drainage Minier Acide à La Halde Sud De La Mine Doyon (Pages : 4, 5).

Salomons, W. (1995). Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. Journal of Geochemical Exploration, (Page : 52, 5-23).

SEKLAOUI M'Hamed, BOUTALEB Abdelhak, BENALI Hanafi, ALLIGUI Fadila, 2015 : CARACTERISATION DE LA POLLUTION MINIERE DANS LE DISTRICT MERCURIEL DE AZZABA

Seydou KEITA : L'évaluation Environnementale Et La Prévention Des Eaux De Drainage Acide Dans Les Exploitations Minières (Pages : 1).

SONAREM, 1966 : Rapport sur les prospections géologiques du gisement de cuivre Kef Oum Teboul.

SONAREM, 1971 : Rapport des recherches géologique sur le gisement de Kef Oum Teboul avec estimation des réserves industrielles.

Souheila KHALFAOUI, 2010 : Évaluation géostatistique de tassement des différents sols du Nord-Est algérien (Pages : 77, 78, 79).

Sylvaine Goix, 2012 : Origine Et Impact Des Pollutions Liées Aux Activités Minières Sur L'environnement (Eau-Sol-Atmosphère) Et La Santé, Cas De Oruro (Bolivie) (Pages : 14).

USEPA. (1994). Technical document of acid mine drainage prediction. Office of Solid Waste, Washington (Page: 48).

Weber, P.A., Thomas, J.E., Skinner, W.M. and Smart, R.St.C. (2005). A methodology to determine the acid-neutralization capacity of rock samples. The Canadian Mineralogist

Xenidis, A., Papassiopi, N., Komnitsas, K. (2003): Carbonate-rich mining tailings in Lavrion: risk assessment and proposed rehabilitation schemes. Adv. Envir.Res. (Page: 7, 479-494).