

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

Thème :

Caractérisation et étude géochimique des rejets provenant des sites miniers d'el Abed (Tlemcen) et de Boukaid (Tissemsilt)

Réalisé par :

Abderaouf ALILAT et Mohammed MEDJAOURI

Sous la direction de Mme Merchichi Amira

Présenté(e) et soutenue publiquement le (21/06/2018)

Composition du Jury :

Président	M. Malek Ould Hamou	M.C.A	ENP
Rapporteur	Mme, Merchichi Amira	M.A.A	ENP
Examineur	M. Rezki Akkal	M.C.A	ENP

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

Thème :

Caractérisation et étude géochimique des rejets provenant des sites miniers d'el Abed (Tlemcen) et de Boukaid (Tissemsilt)

Réalisé par :

Abderaouf ALILAT et Mohammed MEDJAOURI

Sous la direction de Mme Merchichi Amira

Présenté(e) et soutenue publiquement le (21/06/2018)

Composition du Jury :

Président	M. Malek Ould Hamou	M.C.A	ENP
Rapporteur	Mme, Merchichi Amira	M.A.A	ENP
Examineur	M. Rezki Akkal	M.C.A	ENP

ENP 2018

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu ALLAH, le tout puissant, qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

*Nous exprimons nos vifs remerciements et toute notre gratitude à notre promotrice Madame **Merchichi Amira**, pour le temps qu'elle nous a accordé et les conseils qu'elle nous a prodigué pour l'élaboration de notre projet de fin d'études.*

Nos remerciements à l'ensemble des enseignants de département de Génie Minier, qui nous ont encadrés tout au long de ce cursus,

Nous remercions vivement Monsieur **AKKAL Rezki**, de nous avoir honorés en acceptant d'être membre de jury.

Nous remercions profondément Monsieur **Ould Hamou Malek**, notre Chef de département de génie minier, pour avoir *accepté de juger ce travail* et d'en être le président de *jury*

Nous tenons à remercier nos parents, pour leur soutien et surtout pour la confiance qu'ils nous portée durant ces années.

Enfin, nous voulons exprimer notre reconnaissance envers, nos proches, nos camarades de classe tous nous amis qui nous ont apporté leurs support moral, intellectuel tout au long de cette démarche et leurs soutiens inconditionnels.

Dédicaces

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL AVEC TOUTE
MON AFFECTION AUX ÊTRES, QUI ME SONT TRÈS
CHERS AU MONDE MES PARENTS.

A MES CHERS FRÈRES : NOUREDDINE, SAMI.

A MES GRANDS-PARENTS ET MES TANTES
FATIMA, MERIEM, ET MES ONCLE AHMED ET
ABDELKADER ET TOUTE LA FAMILLE
MEDJAOURI CHACUN PAR SON NOM.

A MES AMIS SURTOUT : BRAHIM, BARDO, AMINE,
ZAKI, OMAR, RAOUF, DJAMEL, IMAD, ABDESLAM,
MALEK, TOUFIK, HASINA, KINANA.

ET TOUTE LA PROMOTION 2018 D'INGÉNIEURS EN
GÉNIE MINIER DE L'ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE D'ALGER.

A TOUS CEUX QUI PAR LEUR SOURIRE, LEUR
GENTILLESSE ET ESPOIR, M'ONT ENCOURAGÉ À
POURSUIVRE MES ÉTUDES.

Mohammed

Dédicaces

Aux êtres les plus chers de ma vie, mes parents, qui m'ont toujours poussé à aller vers l'avant, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance éternelle pour tout ce qu'ils m'ont donné, pour leur amour, leur encouragement, et leurs conseils, aucun remerciement ne serait leur exprimer, à sa juste valeur, mon profond amour et mon dévouement.

À mes sœurs, À mon petite nièce Elina Mayar, qu'elles soient assurées de mon affection, ma profonde reconnaissance et mes souhaits de bonheur et de réussite.

À ma famille paternelle.

À tous mes enseignants.

À mes amis, qu'ils soient assurés de mon affection et qu'ils sachent que je leur suis reconnaissant pour leur soutien moral.

À tous ceux avec qui je partage l'amitié, l'amour et le respect.

Abderaouf

ملخص:

استغلال المناجم يخلف كمية كبيرة من النفايات والتي تعتبر المصدر الرئيسي في التدهور البيئي وتلويث المياه الجوفية. قمنا بمعالجة وتخصيب النفايات المأخوذة من منجمي العابد (تلمسان) وبوقايد (تيسمسيلت) بواسطة عملية الترشيح الكيميائي لمعرفة مدى قابلية المعادن الموجودة فيها واجربنا بعض الاختبارات لنرى تنقل وتوزع المعادن الثقيلة في الطبيعة واذ كان بقدرتها توليد حمض التعدين الصحي وقمنا بتحليل كيميائية لنرى تراكيز المعادن الموجودة فيها وخاصة الرصاص والزنك والباريت لفرض امكانية استغلالها من جديد او مدى تأثيرها على البيئة.

الكلمات المفتاحية: النفايات، البيئة، الترشيح الكيميائي، المناجم.

Abstract

Mining exploitation generates a large amount of residues, which are the main cause of environmental degradation and groundwater pollution. This type of contamination can produce acidic or neutral drainage; then we will speak of either acid mine drainage (AMD) or contaminated neutral drainage (CND).

The aim of this project is to characterize the geochemical behavior of the discharges of two mines of El-Abed (Tlemcen) and Boucaïd (Tissemsilt), in normal (laboratory) conditions by different methods namely: Kinetic tests, static prediction and extraction tests. We aim to better understand the phenomena involved in the generation or the mitigation of a possible contamination.

Keywords: tailings, chemical leaching, environmental, mines.

Résumé

L'exploitation des mines génère une grande quantité de résidus, qui sont la principale cause de dégradation de l'environnement et de pollution des eaux souterraines. Ce type de contamination peut produire un drainage acide ou neutre ; on parlera alors soit de drainage minier acide (DMA) ou de drainage neutre contaminé (DNC).

Le but de ce projet est de caractériser le comportement géochimique des rejets de deux mines d'El-Abed (Tlemcen) et de Boucaïd (Tissemsilt), en conditions normales (de laboratoire) par différentes méthodes à savoir : Essais cinétiques, statiques de prédiction et des tests d'extraction. On vise à mieux connaître les phénomènes impliqués dans la génération ou l'atténuation d'une éventuelle contamination.

Mots clés : résidus, environnement, lixiviation chimique, mines

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviation

Introduction générale.....14

Partie I : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Les rejets dans l'environnement minier

I.1	Introduction :.....	16
I.2.	Nature et caractéristiques des résidus miniers :.....	16
I.3.	Types de rejets dans la nature :.....	17
I.3.1	Stériles francs de découverte :.....	18
I.3.2.	Résidus d'exploitation :.....	19
I.3.3.	Résidus de traitement (tailings)	19
I.3.4.	Autres types de résidus :.....	19
I.4.	Types de résidus de traitement :	19
I.5.	Contenu en métaux de base et métaux stratégiques :.....	21
I.6.	Les principaux impacts environnementaux et les enjeux liés aux rejets miniers :.....	21
I.7.	Drainage minier acide :.....	22
I.8.	Drainage neutre contaminé (DNC) :.....	23
I.9.	Méthode de traitement de DMA	24

Chapitre II : Mobilité des ETM (éléments traces métalliques)

II.1.	Inventaire des technologies de décontamination des métaux :	26
II.1.1	Procédés de fixation des contaminants :.....	26
II.1.2.	Etapes de prétraitement	27
II.2.	Solubilisation des métaux	28
II.2.1.	Définitions de lixiviation chimique :.....	28
II.2.2.	Les différents paramètres de lixiviation chimique :.....	28

II.2.3. Types de lixiviation chimique des sulfures.....	29
II.3. Évaluation de la mobilité des métaux	30
II.3.1. Extraction séquentielle :.....	31
II.3.2. Extraction simple	32
1. Identification du gisement d'el Abed.....	35
1.1. Généralités.....	35
1.2. Situation géographique du gisement d'El-Abed	36
1.3. Stratigraphie du gisement	36
1.4. Particularité du gisement	38
1.5. Genèse	38
1.6. Para-genèse	38
1.7. Méthode d'exploitation dans le gisement D'EL Abed	39
1.8. Description du processus de traitement	39
2. Identification du gisement Boucaïd.....	41
2.1. Situation géographique	41
2.2. Historique des travaux géologique et minier	42
2.3. Cadre géologique.....	43
2.3.1. Cadre géologique régional	43
2.4. Conditions climatiques	44
2.5. Géologie des gisements de Baryte	44
2.5.1. Géologie du gisement Sidi Belabbes	44
2.5.2. Géologie du gisement Lakhdar.....	45
2.5.3. Géologie du gisement Nord	45
2.6. Minéralisation.....	46
2.7. Réserves géologiques.....	46
2.8. Exploitation.....	46
2.9. Description du processus de traitement	46
2.10. Présentation des rejets de Boucaïd.....	49
2.10.1. Les rejets liquides	49
2.10.2. Les rejets solides	49

Partie II: Experimentation

Chapitre IV : Méthodologie et Protocole Analytique

IV.1	Introduction	53
IV.2	Echantillonnage	53
IV.3	Préparation de l'échantillon	55
	IV.3.1. Séchage a l'air libre.....	55
	IV.3.2. Homogénéisation	55
	IV.3.3. Quartage manuel	55
IV.4	Caractérisations physiques.....	56
	IV.4.1. Détermination de la teneur en eau pondérale w (norme NF P 94-050).....	56
	IV.4.2. Détermination du poids volumique apparent	58
	IV.4.3. Détermination du poids volumique spécifique (norme NF P g4-0S4).....	58
	IV.4.4. Détermination de la teneur en carbonate (NF P 94-048 Octobre ; 1996).....	60
	IV.4.5. Analyse granulométrique.....	61
IV.5	Caractéristiques minéralogiques des résidus.....	62
IV.6	Caractérisation chimique.....	63
	IV.6.1. Extraction séquentielle par la méthode de Mehra et Jackson (1960).....	63
	IV.6.2. Etude géochimique des différents rejets (Boucaïd et El Abed).....	64
	1. Essais cinétiques.....	64
	1.1. Essais en colonnes de lixiviation	65
	1.2. Méthode de l'essai en mini-cellule d'altération.....	67
	2. Essais d'extraction.....	68
	3. Essais statiques de prédiction.....	71
	3.1 Pouvoir neutralisant (norme NQ 0419-090).....	71
	3.2 Potentiel de génération d'acide.....	74
IV.7	Analyses électrochimiques et chimiques des échantillons (lixiviats).....	74
	IV.7.1. Analyses électrochimiques	74
	IV.7.2. Caractérisation chimique des lixivats.....	75
IV.8	Conclusion.....	76

Chapitre V : Interprétation Des Résultats

V.1 - Résultats de l'analyse granulométrique.....	78
V.2 - Résultats de l'essai de pouvoir neutralisants(PN) et potentiel de génération d'acide(PA) (MA. 110 – ACISOL 1.0, (4 jan 2014)).....	83
V.3 - Résultats des essais en colonnes	84
V.4 - Résultats des essais de mini cellules d'altération.....	86
V.5 - Résultats de l'essai de mobilité des ETM par test de lixiviation.....	87
Conclusion générale	95
Références Bibliographiques.....	97
ANNEXE.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 – Etapes d’exploitation d’un gisement métallique et les résidus miniers correspondants. . .	18
Figure III. 1 – Situation géographique de la mine d’el Abed.	36
Figure III. 2– Coupe litho stratigraphique de la région d’EL ABED. [7]	37
Figure III. 3 – Cellules de flottation.	40
Figure III. 4- Situation Géographique de la mine de Boucaïd	41
Figure III. 5 – Image satellitaire de la région de Boucaïd et de la mine de Baryte (e :1/200m)	42
Figure III. 6 – Esquisse Géologique du l’Ouarsenis.....	43
Figure III. 7 – Schéma technologique de traitement de la baryte de Boucaïd.....	48
Figure III. 8 – Vue de la surface des rejets à Boucaïd.....	49
Figure IV. 1– Points d’échantillonnage (Rejets d’El Abed).....	53
Figure IV. 2 – Points d’échantillonnage (Rejets de Boucaïd)	54
Figure IV. 3 – Homogénéisation et quartage de l’échantillon de Boucaïd (Baryte).	55
Figure IV. 4 – Homogénéisation et quartage de l’échantillon de Boucaïd (Pb-Zn).	56
Figure IV. 5 – Calcimètre de Bernard.	60
Figure IV. 6 – Tamiseuse.	62
Figure IV. 7 – Extraction séquentielle par la méthode de Mehra et Jackson (1960).....	64
Figure IV. 8 – Schéma d’une colonne de lixiviation	66
Figure IV. 9 – colonnes de lixiviation	66
Figure IV. 10 – Essais en mini-cellules d’altération.	67
Figure IV. 11 – Schéma résumant les essais en mini-cellule d’altération.	68
Figure IV. 12 – Essais d’extraction des rejets à analyser	70
Figure IV. 13 – Agitateur mécanique.	70
Figure IV. 14 - Titrage de NaCl (0.01N) par HCl(0.01N) jusqu’à l’obtention d’un pH de 7,0.	73
Figure IV. 15 – pH-mètre.	74
Figure IV. 16– Spectrophotomètre DR 2800.	75
Figure IV. 17 – Protocole d’étalonnage du cadmium (Cd).	76
Figure V. 1 - Courbe granulométrique de rejet Boucaïd (Baryte).....	78
Figure V. 2 - Courbe granulométrique de rejet Boucaïd (Pb-Zn).	79
Figure V. 3 - Courbe granulométrique de rejet d’el Abed (Pb-Zn).....	80
Figure V. 4 - résultats de l’extraction séquentielle.	82
Figure V. 5 – Classification des tailings à base du rapport NP/AP [3].	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1– Concentrations maximales des métaux dans un sol non contaminé.....	20
Tableau III. 1– Analyses chimiques des stériles de traitement et des boues des bassins de recyclage - Normes ISO : 8288 : 1986.	50
Tableau IV. 1 – Coordonnées géographiques des points de prélèvements du rejet d’el Abed (Pb-Zn).....	53
Tableau IV. 2 – Coordonnées géographiques des points de prélèvements du rejet Boucaïd (Pb-Zn).	54
Tableau IV. 3 – Coordonnées géographiques des points de prélèvements du rejet Boucaïd (baryte) .	54
Tableau IV. 4 – Teneur en eau des échantillons d’El Abed (rejet Pb-Zn).....	57
Tableau IV. 5 –Teneur en eau des échantillons de Boucaïd (rejet Pb-Zn).	57
Tableau IV. 6 –Teneur en eau des échantillons de Boucaïd (rejet de la baryte).	57
Tableau IV. 7 – Résultats du taux d’humidité.	57
Tableau IV. 8 – Résultats des essais de détermination du poids volumique apparent.	58
Tableau IV. 9 – Résultats obtenus pour le poids volumique des particules solides.	59
Tableau IV. 10 – Résultats de la densité.	59
Tableau IV. 11 – Résultats expérimentaux déterminant la teneur en carbonate.	61
Tableau IV. 13– Essais d’extraction en fonction des classes granulométriques.	70
Tableau V. 1 - Résultat d’Analyse granulométrique d’un échantillon de rejet Boucaïd (Baryte).....	78
Tableau V. 2 - Résultat d’Analyse granulométrique d’un échantillon de rejet Boucaïd (Pb-Zn).	79
Tableau V. 3 - Résultat d’Analyse granulométrique d’un échantillon de rejet d’el Abed.	79
Tableau V. 4 - tableau regroupant Les indices granulométriques.	81
Tableau V. 6 – résultats des essais de PA et PA.	83
Tableau V. 7 - Résultats d’analyse des différents lixiviats des essais en colonnes.	84
Tableau V. 8 - Analyses électrochimiques (pH) des lixiviats.	86
Tableau V. 9 - Résultats des essais d’extraction des lixiviats mesurés par Spectrophotomètre DR2800.	88

ABREVIATIONS

AFNOR : Association Française de Normalisation.

Ba : Symbole chimique de la barytine

BRGM : bureau de recherches géologiques et minières

DMA : Drainage Minier Acide.

DNC : Drainage Neutre Contaminé.

DRX : Diffraction aux rayons x.

EDTA : éthylène diamine tétra acétique.

Eh : Potentiel d'oxydo-réduction (mV).

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

ETM : Eléments Traces Métalliques.

g : gramme

i.e. : c'est à dire

L : Litre

L/S : Rapport liquide – solide.

mm : millimètre.

PA : potentiel de production d'acide.

Pb : Symbole chimique du plomb.

PbS : Sulfate de plomb connu aussi sous le nom de la galène.

pH : potentiel d'hydrogène.

PN : pouvoir neutralisants.

MS : minéraux sulfures.

SEDTEC : la base de données terminologique et linguistiques du gouvernement de la canada.

SONAREM : Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minières.

Zn : Symbole chimique du zinc.

ZnS : Sulfate de zinc connu aussi sous le nom de la sphalérite ou blende.

°C : Degré Celsius.

BaSO₄ : Sulfate de Baryum.

µm : micromètre.

Première partie

Synthèse bibliographique

Introduction Générale

L'Algérie est un pays très riche en ressources minérales, tout en sachant que le territoire algérien n'a pas été totalement exploré et prospecté, que ce soit des minéraux non métallifères tels que le calcaire, les dolomies, la baryte, le sable...etc ou bien des minéraux métallifères tels que l'or, l'argent, le fer, les phosphates, le plomb, le zinc...etc ainsi que les terres rares tels que le thorium, l'uranium, sans oublier les hydrocarbures. Ceux-ci sont distribués en gisements à ciel ouvert et en gisements souterrains. L'exploitation de ces gisements générera à coup sûr des profits économiques.

Comme toute industrie minière d'importance, l'activité minière génère des rejets de différents états (solide, liquide, gaz), pourront porter atteinte à différents éléments de l'environnement, en particulier l'eau, les sols, le paysage, la végétation et l'homme. Il existe plusieurs études et recherche sur l'environnement minier, traitant les différents types et nature de rejets miniers et leurs impacts (MERCHICHI, 2013 ; BALADAH, 2012).

Dans le but de contrôler les contaminations provenant des résidus miniers, de limiter leurs impacts environnementaux et de maîtriser les mécanismes des éléments métalliques sous différentes conditions, nous choisissons trois types de rejets miniers issus de traitement de 3 gisements qui se situent au Nord-Ouest de l'Algérie, à savoir :

Rejets Plombo zincifère et plombo-barytique de la mine de Boucaïd (wilaya de Tissemsilt) et les rejets plombo-zincifères de la mine d'el Abed (wilaya de Tlemcen).

Notre projet a pour objectifs d'une part de déterminer les caractéristiques physico-chimiques, chimiques et minéralogique et d'autre part d'approfondir la compréhension du comportement géochimique par des essais cinétiques de lixiviation en colonne et en mini-cellule, des tests statiques en évaluant le pouvoir neutralisant et générateur d'acide ainsi que des essais d'extraction des métaux.

Dans le présent travail qui porte sur **l'étude des caractéristiques géochimique des rejets d'El Abed (Tlemcen) et de Boucaïd (Tissemsilt)**, nous avons développé les parties suivantes :

Premier chapitre : sera sur les différents types des rejets miniers, leurs impacts environnementaux.

Deuxième chapitre : nous parlerons sur la mobilité des ETM (éléments trace métallique) et les différents techniques d'extraction.

Troisième chapitre : Présentation des sites de Boucaïd et d'El Abed.

Quatrième chapitre : cette partie comprend la méthodologie de travail et les matériels utilisés

Cinquième chapitre : nous présentons les résultats et discussions des essais cinétiques (lixiviation en colonnes, en mini cellules d'altération), des tests statiques et d'extraction.

Chapitre I : Les rejets dans l'environnement minier

I.1. Introduction :

Les résidus miniers peuvent être définis comme tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai ; ces résidus peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits artificiels, plus ou moins transformés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejet de laverie, scories) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques. Comme nous le verrons, la nature et l'importance des éventuels impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement seront fonction de : [1]

- Sa quantité totale.
- Sa composition chimique et minéralogique.
- Ses caractéristiques physiques.
- La méthode de stockage et sa localisation dans un contexte environnemental particulier.

Ces différents aspects sont fortement influencés par la caractéristique de la mine elle-même :

- La substance exploitée.
- La nature du gisement.
- Sa taille et la méthode d'exploitation utilisée.
- Les procédés de traitement des minerais employés.
- Sa localisation dans un contexte environnemental particulier.

I.2. Nature et caractéristiques des résidus miniers :

La production de métaux d'intérêt à partir de gisements primaires passe par deux opérations principales consécutives :

- L'extraction du minerai contenant les métaux, généralement présent à hauteur du pourcent (aux extrêmes : 30% pour le fer et 0,01% pour l'or), puis
- La préparation et le traitement du minerai pour concentrer les métaux.

Chacune de ces étapes génère des déchets miniers, principalement de deux types :

- Des **déchets rocheux** de type gangue (« waste rock »), et
- Des **résidus issus de traitements** minéralurgiques (« tailings »). [2]

Ces déchets ont des caractéristiques physiques et chimiques différentes.

Ainsi, les **déchets rocheux** sont les roches encaissantes évacuées pour accéder au minerai à traiter. Ils ne sont pas exploités car pauvres en substances de valeur et sont stockés ou utilisés sur site (remblais, par exemple). Les déchets rocheux sont assez grossiers en taille (jusqu'à pluri-décimétriques) et représentent des volumes souvent conséquents.

Les **résidus de traitement** sont des sous-produits des opérations de traitement du minerai par différentes techniques minéralurgiques (séparation et concentration) après préparation par concassage/broyage. Ils sont stockés sur site en tas ou en lagunes. Ils sont de granulométrie fine à très fine (millimétriques à quelques dizaines de micromètres) et potentiellement générateurs de questions environnementales (relargage de métaux, drainage minier, acide ou non ; poussières) nécessitant une gestion adaptée dans le cadre de l'après-mine. [2]

Citons enfin, les déchets de traitement métallurgique classique (pyrométallurgie et hydrométallurgie) que sont les scories et les boues et qui peuvent se rajouter aux deux types de déchets précédents comme une autre source potentielle de métaux. [2]

I.3. Types de rejets dans la nature :

Les principaux types de résidus miniers peuvent être classés selon quatre différents groupes (B.R.G.M 1997) et qui sont :

- Les stériles francs de découverte et\ou de traçage de galerie.
- Les résidus d'exploitations qu'ils soient des résidus de gangue ou bien de la couche minéralisé (les pertes).
- Les résidus de traitement (issus de l'usine de traitement après avoir extrait le concentré).
- Les autres résidus (les scories...etc.).

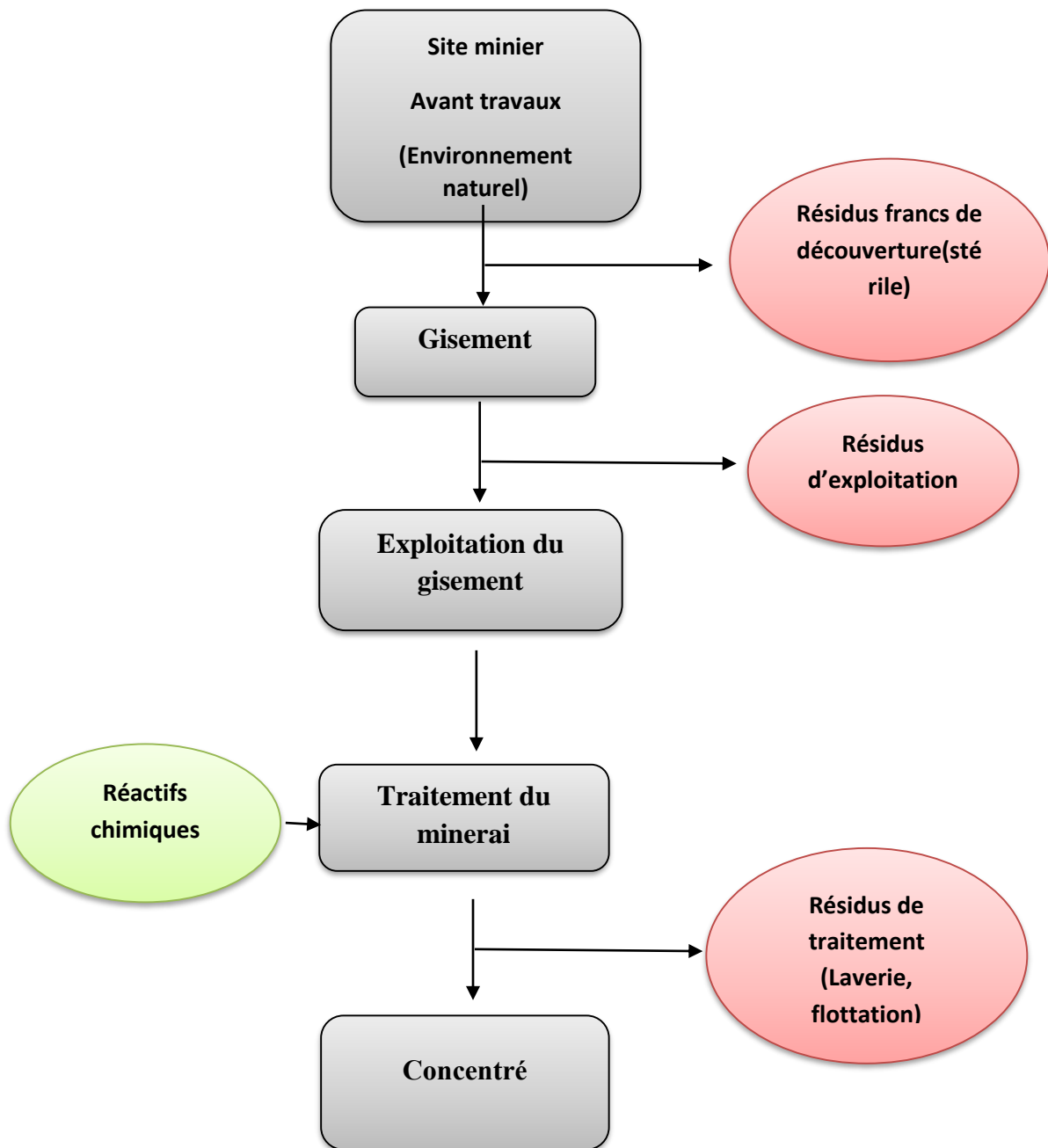


Figure I. 1 – Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants.

I.3.1. Stériles francs de découverte :

Ce sont les morts terrains qui recouvraient le minerai avant le début des travaux miniers, décapés. Ces résidus, généralement, contiennent de faibles teneurs en minerais utiles. D'une certaine façon, ses caractéristiques physiques et chimiques ne se différencieront pas de celles des matériaux qui auront été remaniés lors de la construction d'un ouvrage d'art (autoroute, tunnel, barrage, etc.) dans le même contexte régional.

I.3.2. Résidus d'exploitation :

Lors de l'exploitation, le mineur opérera un tri précoce entre le minerai vendable et le minerai pauvre où la récupération des substances valorisables sera non économique, Ce minerai pauvre pourra être stocké sur place, dans l'attente d'un traitement éventuel si les cours du métal venaient à monter.

I.3.3. Résidus de traitement (tailings) :

La valorisation du minerai vendable consiste à effectuer plusieurs opérations de pré concentration des minéraux économiques ; ces opérations produisent plusieurs types de solides : l'un concentré riche en substances valorisables, et un ou plusieurs autres solides pauvres formant la gangue.

Cette gangue, issu de la laverie, comportant 40 à 70% de liquide et 30 à 60% de matière solide est retenue dans des digues ou déposée en terril. Elle contient des teneurs significatives en éléments accompagnateurs, en minéraux secondaires ainsi que leurs produits d'oxydation et même des concentrations résiduelles en réactifs utilisés pour la séparation et la concentration en métaux valorisables.

I.3.4. Autres types de résidus :

Dans certains anciens sites d'exploitation polymétallique (fer, cuivre, étain, plomb/zinc, or...), le minerai concentré était grillé ou fondu sur place pour éliminer certains composants (Sulfures, par exemple) afin d'arriver à un produit marchand de qualité. Dans ce cas, les rejets sont soit des suies ou des scories. [3]

I.4. Types de résidus de traitement :**I.4.1. Résidus miniers lixiviables :**

Tous les résidus miniers qui produisent un lixiviat contenant un contaminant dont la concentration est supérieure aux examens adaptés pour la protection des eaux souterraines. Le tableau ci-après (Tableau I.1) montre les concentrations maximales des métaux dans un sol non contaminé.

Tableau I. 1– Concentrations maximales des métaux dans un sol non contaminé.

PARAMETRES	CRITÈRES (mg/L)	PARAMETRES	CRITÈRES (mg/L)
Arsenic	5	Mercure	0,1
Baryum	100	Nitrates + nitrites	1000
Bore	500	Nitrites	100
Cadmium	0,5	Sélénium	5
Chrome	5	Plomb	1
fluorures totaux	150	Uranium	2

I.4.2. Résidus Miniers acidogènes :

Résidus miniers contenant des sulfures en quantité supérieure à 0,3 % et dont le potentiel de génération acide a été confirmé par des essais de prévision cinétique ou par des essais de prévision statiques qui révèlent que le potentiel net de neutralisation d'acide est inférieur à 20 kg CaCO₃/tonne de résidus ou que le rapport du potentiel de neutralisation d'acide sur le potentiel de génération d'acide est inférieur à 3. [2].

I.4.3. Résidus miniers cyanurés :

Résidus miniers renfermant des cyanures libres et complexes générés suite à l'utilisation d'un procédé de cyanuration du minerai.

I.4.4. Résidus miniers inflammables :

Résidus miniers dont le point d'éclair est égal ou inférieur à 61 °C [2].

Résidus solides qui sont susceptibles :

- a. Soit de s'enflammer facilement et de brûler violemment ou longtemps.
- b. Soit de causer ou de favoriser un incendie sous l'effet du frottement ou de la chaleur.
- c. Soit de subir une décomposition fortement exothermique à la température ambiante ou, en cas d'inflammation, de brûler violemment en présence ou en l'absence d'air.

I.5. Contenu en métaux de base et métaux stratégiques :

Les résidus de traitement contiennent des métaux de base (tels que Cu, Zn, Pb et Ni) et aussi des métaux rares, associés en faible quantité aux métaux de base dans le gisement (tels que Ga, In, Ta, Ag, W, etc.). Ces métaux rares n'étaient souvent pas extraits par le passé parce qu'économiquement non rentable ou sans application connue, ou étaient exploités au moyen de techniques dont les performances ont largement évolué depuis.

Dans le contexte actuel de tension internationale sur les approvisionnements en matières premières minérales, pour l'industrie de haute technologie notamment, certains de ces métaux rares sont désormais dits « stratégiques » ou « critiques ». Il s'agit de substances dont un pays est très dépendant du point de vue de leur importance dans une ou plusieurs filières économiques ainsi que les risques pesant sur leurs approvisionnements.

I.6. Les principaux impacts environnementaux et les enjeux liés aux rejets miniers :

En Algérie, et selon la loi minière de 2014, une énorme importance fut donnée pour la gestion des rejets miniers dans le cadre de la réhabilitation des lieux d'exploitation (carrières\ mines) dans un cadre de respect de l'environnement afin d'assurer un développement durable. Pour ce faire, des aménagements spéciaux devraient être mis en évidence dans le but d'assurer un bon entreposage de ces déchets afin de faciliter, de gérer et de contrôler leurs impacts sur l'environnement, car si leurs gestions ne sont pas faites correctement, leurs impacts seront catastrophiques sur l'environnement. Leur nocivité dépend en grande partie de leur composition chimique et minéralogique ainsi que de leur stabilité chimique.

❖ Les enjeux et les impacts :

-Suite à l'érosion par les eaux de ruissellement, d'être une source de matière en suspension (sédiments) entraînant ainsi une dégradation de la qualité des eaux de la nature des fonds des cours d'eau en aval du site. Cela peut avoir des éventuels impacts sur la flore et la faune naturelles et donc sur l'utilisation éventuelle de ces cours d'eau pour la pêche, la pisciculture (...). [1]

D'être une source de poussière, donc de nuisance pour les habitants, les résidus de laverie peuvent être particulièrement sujets à ce type de transport hors site dû à la finesse des particules de ce genre de résidu.

A un effet négatif sur les qualités esthétiques de l'environnement ; cela peut être le cas par exemple pour tous les résidus ont volume important (stériles de découverte, d'exploitation, de laverie) dont les lieux de stockage n'ont pas été réaménagés (terrassment, végétation). [1]

Destruction de l'écosystème local et risques de glissements de terrain.

La dégradation et le ralentissement du processus de photosynthèse pour la flore.

Contamination chimique des eaux de surface et /ou souterraines - drainage minier acide (DMA).

I.7. Drainage minier acide :

L'oxydation naturelle des minéraux sulfurés tels que la pyrite, la pyrrhotite, etc., exposés à l'air et à l'eau peut entraîner la production d'effluents suffisamment acidifiés et chargés d'ions métalliques pour poser de sérieux problèmes dans un milieu aquatique récepteur.

Ce phénomène est plus souvent appelé drainage minier acide (DMA), et constitue le problème environnemental le plus important pour les mines exploitant ce type de minerais

Ces effluents peuvent être produits par des sources naturelles (ruisseaux en contact avec des affleurements de minéralisation sulfurées) ou par l'exposition de résidus contenant des minéraux sulfurés à l'air libre suite à des travaux miniers ; ce sont principalement les résidus de l'usine de traitement et les stériles minéralisés. Il est à noter que le phénomène de DMA ne se présente pas dans toutes exploitations de minerais sulfurés, l'existence de phases minérales capables de neutraliser l'acidité (tels que : calcaire, dolomie) diminue ce phénomène. [1]

Les caractéristiques chimiques généralement rencontrées dans un cas « classique » de DMA sont :

- Une forte acidité (pH faible),
- Concentrations élevées en fer dissous
- Concentrations élevées en certains autres éléments (Ni Zn Pb Cd As, etc.).
- Concentrations élevées en divers ions majeurs (SO₄...).



Figure I. 2 – Exemple sites affectés par le DMA (Boucaïd).

I.8. Drainage neutre contaminé (DNC) :

Le drainage neutre contaminé est un drainage caractérisé par une forte concentration en métaux lourds et en métalloïdes et dont le pH est neutre. Donc, la qualité chimique de ce drainage dépend étroitement des caractéristiques chimiques et minéralogiques des rejets/résidus miniers à travers lesquels ils circulent.

Plusieurs processus contribuent à la formation et la production du drainage neutre contaminé, tels que :

- La dissolution des métaux inclus dans les rejets miniers engendrée par l'oxydation des minéraux sulfureux générateurs d'acides, en raison de la baisse du pH.
- La lixiviation des minerais métalliques non générateurs d'acides contenus dans les rejets tels que la sphalérite qui peut réagir avec l'oxygène en libérant du zinc sans générer d'acides.
- Les barrières à oxygène limitent l'apport en oxygène aux résidus miniers ce qui conduit à la limitation de l'oxydation des sulfures.

Les principaux effluents générés par le DNC sont : l'antimoine, l'arsenic, cadmium, chrome, cobalt, manganèse, mercure, molybdène, nickel, sélénium, sulfates et le zinc. [3]

I.9. Méthode de traitement de DMA :

Certains facteurs tels que les caractéristiques chimiques du DMA, le climat local, le terrain, le sol, la durée du traitement prescrivent la complexité du traitement nécessaire pour s'assurer que les normes de contamination d'effluents seront atteintes (Akeil et al, 2006).

La gestion du DMA vise à réduire l'impact de l'effluent à des seuils tolérés par l'environnement. Les traitements doivent non seulement traiter le DMA, mais aussi empêcher la migration des polluants dans l'environnement. L'eau est le transport de base de la majorité des contaminants.

Lorsque des rejets sont identifiés comme potentiellement générateurs de DMA par les méthodes de prédiction, il est nécessaire de prendre des mesures qui limiteront les impacts environnementaux de ceux-ci. Les méthodes visant à prévenir la production de DMA ont pour objectif d'éliminer ou de réduire à des niveaux très faibles, la présence d'air (ou d'oxygène), d'eau ou de sulfures par différentes méthodes. On peut distinguer :

- ❖ Enlèvement des sulfures
- ❖ Barrières à l'oxygène
- ❖ Recouvrements étanches et contrôle des infiltrations d'eau. [4]

Chapitre II : Mobilité des ETM (éléments traces métalliques)

II.1. Inventaire des technologies de décontamination des métaux :

Les procédés d'enlèvement des métaux reposent majoritairement sur des phénomènes de solubilisation des métaux suivis d'une séparation de la phase liquide (contaminée) de la phase solide (décontaminée). Certaines technologies chimiques utilisent des agents chélateurs qui permettent de solubiliser les métaux sous formes complexes (par exemple, silicates d'hydroxydes de métaux) pour ensuite solidifier les complexes afin de rendre le produit inerte. Certaines études sont portées sur l'usage de l'EDTA (l'une des méthodes que nous avons utilisées) pour l'enlèvement de certains éléments métalliques avec des résultats surpassant la lixiviation avec HCl. [19]

Tallon metal est une technologie opérée depuis longtemps dans la décontamination des sols qui contiennent des métaux lourds. Cette technologie, développée au Canada et essentiellement au Québec, comprend des étapes de séparation magnétiques et gravimétriques afin d'isoler la fraction de particules fines contaminées (< 0,1 mm). Un traitement chimique de lixiviation des métaux à l'aide des absorbants permet le recyclage du Pb, Cu, Zn et d'autres contaminants métalliques. Tallon a été sélectionnée pour décontaminer 115 000 tonnes de sol principalement contaminé en Pb à la Base des Forces canadiennes à Montréal.

II.1.1. Procédés de fixation des contaminants :

Ces types de procédés sont conçus pour réduire à long terme la mobilité des contaminants. Ces procédés impliquent habituellement l'ajout d'une matière de type ciment jumelé à des agents chélateurs. Ces procédés sont grandement utilisés vu la facilité relative d'application par rapport à d'autres technologies onéreuses. Ces procédés ont comme principal objectif la fixation des métaux et ne s'attaquent pas, ou très peu, aux autres contaminants. La philosophie de ce type de traitement est toutefois discutable car on ne fait que procéder à une fixation des contaminants sur le site même de la contamination. Bien que cette méthode limite les risques de contamination de l'environnement voisin (eaux de surface, nappe phréatique), les méthodes de décontamination semblent plus appropriées dans une politique de restauration de l'environnement. Selon les données fournies par la base de données SEDTEC, le coût moyen de traitement par fixation/stabilisation se situe entre 30 et 70 \$/t avec une grande variation (20 à 200 \$/t).

II.1.2. Etapes de prétraitement :

Le prétraitement comprend les procédés qui précèdent les traitements mentionnés plus haut.

Habituellement, le but de ce type de traitement est la réduction du volume à traiter par concentration de la contamination dans une phase précise afin de procéder, selon le cas, au traitement, au transport ou à l'entreposage spécialisé de cette phase. Sont incluses dans les prétraitements toutes les étapes de réduction de volume par tamisage, par magnétisme ou par hydrocyclone.

La description sommaire des procédés ne mentionne pas dans tous les cas les étapes de préparation des sols contaminés suite à l'excavation. Dans le cas du procédé Metanetix, le prétraitement permet une réduction du volume de solide à traiter de l'ordre de 80%, car la contamination est associée à 20% du volume total. [20]

La justification de l'utilisation des procédés de prétraitement repose sur le fait reconnu scientifiquement que la très grande majorité des contaminants est associée à une certaine fraction du sol. En effet, les particules fines inférieures au millimètre contiennent la quasi-totalité des contaminants étant donné leur grande surface spécifique sur laquelle les contaminants peuvent s'adsorber [19]. Dans le cas d'un sol contaminé par les métaux, il est fréquent de trouver une contamination très grossière (plaques de métal, fils, tuyauterie) et le prétraitement saura isoler ces débris en vue d'un recyclage ou de la récupération des métaux. La fraction de granulométrie inférieure peut ensuite subir l'étape de la désagrégation pour produire une fraction encore plus fine. Une fois les graviers et les sables éliminés, la fraction restante contient un haut niveau de contamination.

La composition de la fraction fine a aussi une grande importance sur l'efficacité des divers traitements. Les sols fins contenant de très faibles concentrations en argile et matières humiques peuvent être traités avec succès. Toutefois, lorsque les proportions d'argile et de substances humiques sont élevées, la décontamination devient de plus en plus ardue et l'efficacité des procédés s'en trouve affectée.

Le choix de la granulométrie est spécifique au site d'application du prétraitement et la contamination peut se retrouver à différents niveaux selon la granulométrie. A titre d'exemples [22] rapportent une contamination dominante associée aux particules de moins de 210 μm (70 mesh), [20] <63 μm (230 mesh) et [21] <63 μm .

II.2. Solubilisation des métaux :

Les métaux lourds, ou éléments en traces (Cd, Pb, Zn, Cr, Fe, Cu ...), sont des éléments naturels présents dans les divers milieux de notre environnement : l'air, l'eau, et les sols. Aujourd'hui, un grand nombre de techniques de récupération de métaux, domestiques ou industrielles, sont utilisées. Elles diffèrent les unes des autres et incluent, par exemple, l'extraction liquide-liquide, la flottation, la précipitation, l'adsorption... etc. Notre étude repose sur l'utilisation de la technique de lixiviation et d'extraction liquide-liquide afin de déterminer la mobilité des métaux lourds et leur extraction chimique. [5].

II.2.1. Définitions de lixiviation chimique :

La lixiviation permet à extraire des éléments constituants de minéraux en faisant passer une solution aqueuse à travers le sol permettant la dissolution des matières solides qui y sont contenues. Cette technique est couramment utilisée dans le secteur minier pour récupérer des métaux de valeur (argent, or, cuivre, uranium, zinc...) à partir de matériaux géologiques.

La lixiviation est une réaction de formation de complexes entre les éléments des lixiviants de la solution et le métal contenu dans la roche. C'est une réaction lente limitée par la distribution des réactifs dans le solide et des produits de la réaction dans la solution. [5].

II.2.2. Les différents paramètres de lixiviation chimique :

Pour extraire des métaux, il est obligatoire d'utiliser des techniques exigeantes d'affecter les conditions dans lesquelles ces métaux sont soumis. Chaque expérience présente un choix plus ou moins artificiel des paramètres de lixiviation (temps de lixiviation, type de lixiviant, rapport solide/liquide, agitation, tailles des grains, etc.).

La mise en œuvre d'un test de lixiviation est constituée des étapes suivantes :

- L'état physique de l'échantillon testé : granulaire ou massif. Selon les besoins, un matériau massif peut être broyé à une granulométrie maximum donnée pour subir un essai de lixiviation donné.
- La nature de l'agent lixiviant : il peut s'agir d'eau pure (eau dé-ionisée et saturée en air à 20 °C) ou de solutions aqueuses contenant des espèces chimiques (acides, bases, sels, complexant,) à des concentrations fixées [5].

- Le rapport Liquide / Solide peut être soit fixé au départ du test (exemple L/S = 10) soit varié de façon continue tout au long du test de lixiviation (le rapport peut ainsi varier de 0 à plus de 100 très facilement) [5].
- La variation du temps t de chaque opération de lixiviation pour établir une cinétique de mise en solution effectivement d'observer un état d'équilibre.

II.2.3. Types de lixiviation chimique des sulfures

➤ Lixiviation en milieu sulfate :

La lixiviation par l'acide sulfurique est la plus développée et la plus utilisée que d'autres agents lixivants comme des chlorures, des nitrates, des amines ; parce qu'elle est économique, et moins corrosive.

La dissolution des sulfures MS est effectuée suivant la réaction :



Lorsqu'on utilise un réacteur à l'air libre, l'oxygène dissous participe à la réaction et l'on obtient une lixiviation lente comparable à la lixiviation sous pression d'oxygène.

La lixiviation en milieu sulfate est souvent gênée par les produits de réaction qui se forment à la surface des minéraux. Ces produits forment un écran à la diffusion des réactifs et produits de la réaction et finissent parfois à passiver totalement les minéraux lixiviés. [5]

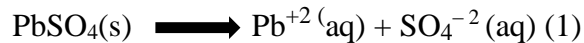
➤ Lixiviation oxydante

Au cours de la lixiviation en milieu sulfate ; il y'a une formation des produits qui engendrent un écran à la surface des minéraux qui terminent rarement à passiver la lixiviation des minéraux. Cette passivation est due principalement aux polysulfures et au soufre élémentaire constitué par la réaction décrite par différents auteurs.

Pour cette raison on la lixiviation oxydante est réalisée à des températures et pressions faibles lorsqu'on utilise l'ion Fe^{3+} comme oxydant et à des températures et pressions élevées dans le cas de l' O_2 .

➤ Lixiviation par complexation

Lixiviation par complexation directe La formation de complexes est une procédure très utilisée pour mettre en solution certains ions. Un cas typique est la dissolution du sulfate de plomb, très peu soluble dans l'eau, par le chlorure de sodium pour former un plombo chlorure de sodium.



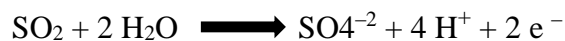
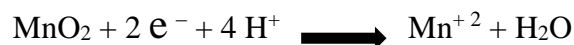
L'action des ions Cl⁻ est alors de maintenir en solution le peu d'ions Pb⁺² qui solubiliseront par l'action de l'eau. En retirant les ions Pb⁺² par la réaction (2), on force l'équilibre (1) à se déplacer vers la droite, mettant ainsi en solution davantage de PbSO₄. [32]

Un autre exemple est la dissolution d'oxydes de cuivre par l'ammoniac.

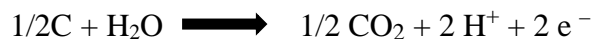


➤ Lixiviation en milieu réducteur:

Certains composés, typiquement les oxydes des métaux tétravalents, sont lixiviables seulement dans un milieu réducteur. Par exemple, le dioxyde de manganèse (pyrolusite) est attaqué par l'acide sulfurique dilué seulement en présence d'un agent réducteur (Fe⁺², Cu⁺, SO₂). Les réactions qui se vérifient lors de cette lixiviation sont : [32]



Ou



Ou



II.3. Évaluation de la mobilité des métaux :

Les interactions entre les polluants métalliques et le sol peuvent être étudiées en considérant les différents mécanismes et constituants responsables de la rétention. Cette démarche permet d'établir une répartition des polluants entre la phase solide et la phase liquide, et donc d'évaluer la mobilité et la biodisponibilité des polluants dans le sol.

La **mobilité** par définition désigne l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment du sol à un autre. La **biodisponibilité** désigne la capacité d'un élément présent dans le sol, à être absorbée par un être vivant. Lorsqu'il s'agit de plantes, on parle de phytodisponibilité. [23]

La mobilité d'un métal donné dépend du type de sol, de sa texture, et des paramètres qui affectent les interactions des métaux avec ce sol. Il s'agit principalement du pH, de la teneur en carbonates, de la teneur en matière organique et du potentiel redox. Elle dépend également de la nature de la contamination et des conditions environnementales. [24]

II.3.1. Extraction séquentielle :

La connaissance des teneurs totales en métaux est nécessaire mais elle n'est cependant pas suffisante pour évaluer leur mobilité potentielle et les risques environnementaux qui en découlent. La prévision de ces risques est étroitement liée aux formes physico-chimiques sous lesquelles les métaux sont présents, c'est-à-dire à leur spéciation. Par l'emploi d'une procédure séquentielle, les polluants métalliques présents dans le sol peuvent se distribuer dans les différentes fractions suivant leur solubilité et leur mobilité, définissant ainsi leur spéciation. [25]

La spéciation est la caractérisation de la répartition d'un élément dans les différents compartiments du sol et de l'état chimique dans lequel il se trouve dans ces différents compartiments (ionique, complexé, lié par covalence, etc.). Dans les schémas séquentiels, l'utilisation des extractants avec une capacité d'extraction croissante peut être intéressante pour déterminer les distributions chimiques des éléments polluants. Les réactifs sont choisis en fonction de leur sélectivité vis-à-vis de certaines formes physico-chimiques particulières. [26]

❖ La fraction mobile et bio disponible :

Les fractions à extraire sont la fraction hydrosoluble, la fraction échangeable et la fraction carbonatée. Le choix des réactifs se fait en fonction de la nature et de la composition des échantillons étudiés.

- **La fraction hydrosoluble :**

L'échantillon est mis en agitation avec de l'eau pure avec un rapport 1/10 pendant une heure ; la quantité d'éléments métalliques extraite représente la fraction la plus mobile. [6]

- **La fraction échangeable :**

C'est la fraction des éléments qui interagissent rapidement avec la solution du sol, représentée par les éléments adsorbés sur les surfaces minérales par des liaisons non spécifiques comme les attractions électrostatiques. [27]

La fraction échangeable est couramment extraite par des solutions salines à pH du sol ou à pH= 7 ; il s'agit de provoquer l'échange des éléments retenus à la surface des solides étudiés par un ion introduit par excès dans la solution.

Les solutions les plus classiquement employées sont les suivantes : des nitrates de Ca, Na, Mg, NH₄, des chlorures de Ca, Na, Ba, Mg, des carbonates et des sulfates. Selon [28], les réactifs les plus fréquemment utilisés sont : CaCl₂, NaNO₃ et NH₄NO₃.

Les deux fractions hydrosoluble et échangeable sont souvent faibles et inférieures aux limites de détection analytiques mais elles présentent un intérêt environnemental important.

- **La fraction carbonatée :**

Elle concerne les éléments métalliques précipités avec les carbonates. Plusieurs réactifs sont utilisés dans la littérature afin d'attaquer cette fraction. C'est d'abord l'acide acétique avec l'acétate de sodium qui est utilisé comme tampon. Cette extraction se fait à pH 5 ou 5,5. [6]

Le pH le moins agressif vis-à-vis de la matière organique selon [29] est le pH 5,5. L'efficacité de cette extraction a été étudiée par [30] qui ont montré qu'une seule extraction est souvent incomplète pour les sols très riches en carbonates et proposent une deuxième extraction.

La fraction liée aux oxydes de fer et de manganèse « fraction réductible » est libérée dans des conditions réductrices. Le réactif le plus souvent utilisé est le chlorure d'hydroxylamine en milieu acide à 96°C afin de favoriser la réaction. L'ajout d'acide acétique permet d'éviter la ré-adsorption des cations métalliques sous forme de fraction échangeable.

- **La fraction oxydable :**

La matière organique est une fraction susceptible de complexer les métaux. Cette fraction est sensible aux conditions oxydantes d'où une attaque par un mélange de peroxyde d'hydrogène et d'acide nitrique à 86°C. Comme pour la fraction réductible, l'attaque se fait en présence d'acétate d'ammonium car il possède un pouvoir complexant important afin d'éviter la ré-adsorption des cations métalliques. [6]

- **La fraction résiduelle :**

Elle est relative aux métaux qui sont contenus dans la structure cristalline des minéraux primaires et secondaires. Cette fraction est déterminée par une attaque totale par un mélange d'acides forts (HF/HNO₃/HCl) dans les mêmes proportions que pour la minéralisation.

II.3.2. Extraction simple :

Il existe plusieurs méthodes d'extraction, mises au point pour mesurer les métaux traces labiles du sol [31]. Elles visent toutes à intégrer en une seule extraction la fraction labile par un seul extractant. Différents réactifs d'extraction ont été utilisés, soit des complexants (EDTA, DPTA, ...) soit des sels ((MgCl₂, BaCl₂, CaCl₂, KNO₃, NaNO₃, ...) ou des acides dilués (HCl dilué, CH₃COOH, ...) (Ure, 1996). Plusieurs chercheurs ont démontré que les teneurs extraites par ces électrolytes présentent une bonne corrélation avec la quantité assimilée par les plantes tests. [29]

Les avantages de cette extraction par rapport aux extractions séquentielles sont :

- Chaque extraction permet de s'affranchir de possibles changements de la spéciation d'un élément au cours des étapes d'extraction à cause de l'utilisation successive des réactifs.

- Le protocole de manipulation est moins contraignant ; en effet, lorsqu'un problème apparaît au cours d'une extraction, tous les résultats d'un même échantillon ne sont pas perdus comme dans le cas des extractions séquentielles. [6]

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

1. Identification du gisement d'el Abed

1.1. Généralités :

Le gisement d'El-Abed représente la partie orientale d'un des plus grands champs miniers de plomb-zinc stratiformes d'Afrique du Nord.

L'étude géologique de ce champ a pris naissance en 1906 sur sa partie occidentale, située sur le territoire marocain. Le gisement fut découvert en 1940, suite à de longues recherches, effectuées par la compagnie "Zellidja" et le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), sur le prolongement Est des gîtes marocains de TOUISSIT et SIDI BOUBKER. Son exploitation ne débuta qu'en 1952 par la dite compagnie.

L'exploitation a débuté en 1952 par cette société qui rétrocéda une partie de ses droits à la société nouvelle des Mines de Ain Arko et à l'Algérienne du Zinc, elle reprendra la totalité de ses droits en 1964. Dans le cadre de l'extension des travaux d'exploitation dans la partie Algérienne du gisement, le puits n°3 est réalisé en 1963 et le puits n°4 en 1964. Au début de l'exploitation, le minerai extrait était acheminé vers le Maroc par les ouvrages souterrains communicants entre les deux pays. La mine fût nationalisée le 06 Mai 1966 et confiée à la SONAREM. Elle a été intégrée dans le patrimoine de l'ENOF en Juillet 1983. [11]

La mine de zinc et de plomb d'El Abed (exploitée à partir de 2006 par une entreprise chinoise : le Bureau de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales et géologiques de la province de Henan de la République populaire de Chine) était fermée depuis 2002 alors qu'elle était exploitée par l'entreprise nationale des produits non ferreux, l'Enof.

Les Chinois vont y investir environ 1200 millions de dinars, dont 800 millions pour la seule réhabilitation de la mine.

La mine devrait produire entre 1 000 à 1 500 tonnes par jour, près de 600 emplois seront créés et la main- d'œuvre recrutée sera algérienne sauf pour les postes de management qui seront doublés pour permettre le transfert de savoir-faire. Les réserves en place seraient de 12 millions de tonnes toutes catégories confondues. [12]

1.2. Situation géographique du gisement d'El-Abed :

Le gisement polymétallique d'El-Abed se situe dans la région extrême du Nord-Ouest de l'Algérie, à environ 42 Km au Sud de la ville de Maghnia, 100 Km au Sud-Ouest de la ville de Tlemcen et à 1 Km de la frontière algéro-marocaine.

Appartenant à la chaîne des hauts plateaux, la région d'El-Abed est caractérisée par :

- Un relief montagneux, d'altitude variant de 1260 m à 1540 m.
- Un climat subtropical, se traduisant par un été chaud et prolongé avec une température moyenne de 27°C et un hiver froid et court avec une température moyenne de 4°C. [7]



coordonnées géographiques:
 ✦ : 36°45'06.6"N 3°05'00.2"E
 ✦ : 34°28'35.2"N 1°39'59.7"W

Figure III. 1 – Situation géographique de la mine d'el Abed (Echelle :1/100.000.00)

1.3. Stratigraphie du gisement :

Le territoire métallifère du gisement d'El Abed, tout comme l'ensemble de la région minière comprend deux étages structuraux :

1-Etage inférieur constitué de terrains paléozoïques fortement disloqués

2-Etage supérieur formé de dépôts mésozoïques, à pente faible dans les limites du gisement, les terrains paléozoïques sous-jacents sont représentés par une série de roches volcano-sédimentaires. [11]

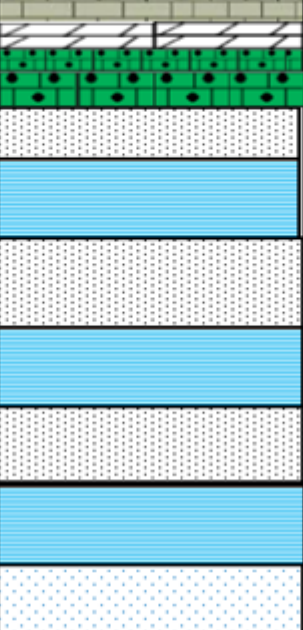

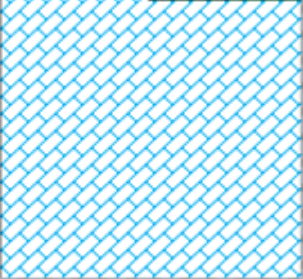


Coupe litho-stratigraphique de la région d'el-Abed					
Période du système	Epoque du système	Indice	Représentation de roche	Puissance	Description des roches
Jurassique supérieure	Portlandien Kimméridgien	J ₃		200	Calcaire et dolomite
	Lusitanien Callovien Oxfordien		700	Transition les dolomites, les marne et grès	
Jurassique	Bathonien Bajocien supérieur	J ₂		170	Calcaire marneux et dolomitique grès et marne dolomitique.
Jurassique inférieur	Bajocien inférieur Aalénien	J ₁		1 ÷ 500	Dolomite, gris blanche Dolomite gris fine
Trias		T		10	Conglomérat rouge
					Roches métamorphique et éruptives

Figure III. 2– Coupe litho stratigraphique de la région d'EL ABED. [7]

On distingue des dépôts de Permo-Trias surmontés par une assise jurassique, où l'on rencontre les roches du lias, Dogger, Callovien-oxfordien, Lusitanien et Kimeridgien.

Le gisement est situé dans les zones de horsts, le horst de Tounzait et le prolongement oriental des horsts occidentaux. Au Nord, il est bordé par une zone haute qui regroupe le horst de boukker et le nord-ouest d'EL ABED. [11]

1.4. Particularité du gisement :

La minéralisation plumbo-zincifère s'étend en direction Est à partir de la frontière Marocaine suivant deux bandes distantes de 5m environ qui convergent ensuite pour former une seule bande.

La largeur de la bande minéralisée dans sa partie Est est de 1800 m et de celle de l'Ouest est de 2700m ne renferme pas de minéralisation. La partie Nord et celle du Sud ont une largeur de 1300m environ. [7]

Toute la superficie du gisement est divisée conventionnellement en deux zones.

La zone sud qui englobe tous les quartiers actuellement en exploitation (AIN ARKO, ALZI, EL ABED) et parallèlement à la zone sud, une zone Nord dont l'exploitation n'a jamais vu le jour à cause de l'effondrement du puits N°5.

Les zones minéralisées ont une faible inclinaison du Nord-Est au sud-ouest. Généralement, le pendage est de 7° à 10°. Parfois, il peut atteindre 15°. [11]

1.5. Genèse :

Il existe deux hypothèses de genèse du gisement :

La première suppose que l'origine de la minéralisation est sédimentaire, du fait que les corps des minerais en couches se trouvent dans les roches sédimentaires métamorphiques disloquées.

La seconde hypothèse, paraissant la plus probable, est d'origine hydrothermale. [7]

1.6. Para-genèse :

Les minerais du gisement d'El-Abed se caractérisent par une composition minéralogique relativement simple, on y distingue :

- Les minéraux principaux : la blende (ZnS), la galène (PbS), la pyrite (FeS₂) et la chalcopryrite (CuFeS₂).
- Les minéraux secondaires : la cérusite (PbCO₃), l'anglésite (PbSO₄), la smithsonite (ZnCO₃) et des Oxydes, tels que : la malachite (Cu₂CO₃(OH)₂),

L'azurite ($\text{Cu} [\text{OH}/\text{CO}]_2$)

- **La blende :** C'est le principal minéral métallique, elle se présente en agrégats massifs. La grosseur de ses grains varie largement de 50 μm à 5 cm. La couleur de la blende est du jaune clair au brun rougeâtre et marron foncé.
- **La galène :** Le minerai est localisé dans les grès, les brèches et les dolomies marneuses. [7]

1.7. Méthode d'exploitation dans le gisement D'EL Abed :

La méthode d'exploitation utilisée dans la mine d'El Abed fut celle des chambres et piliers abandonnés ; le gisement est découpé par une série de voies, afin de diviser les quartiers en chantiers puis en blocs. [10]

1.8. Description du processus de traitement :

Le traitement se pratique dans la laverie depuis 1972 ; cette dernière comprend une section de préparation mécanique (fragmentation) et une section de séparation sélective (flottation). Les concentrés de plomb et de zinc sont les produits finis de la laverie. Cette dernière a une capacité de traitement de 2000 tonnes/jour. [9]

Les étapes de traitement :

1.8.1. Concassage :

Le tout venant de granulométrie variant de 0 à 350 mm est stocké dans une aire de stockage au-dessus d'une trémie de 400 tonnes, déversant le minerai dans un alimentateur, alimentant un convoyeur ; ce dernier déverse directement le matériau dans un crible préalable d'ouverture [-100mm].

Les grandes particules [+100 mm] passent directement au concasseur à mâchoire, avec une granulométrie de sortie de [-100 mm]. Le passant du crible et du concasseur se rejoignent sur un second convoyeur, pour alimenter deux trémies de criblage de capacité 2x40 tonnes. Chaque trémie fournit sur un crible de deux étages. Les particules [0-12mm] passant dans une trémie de broyage de capacité 4000 tonnes. Par contre les particules de granulométrie comprise entre [+14 -100 mm] sont déversées dans un concasseur à cône moyen, et celle comprise entre [+12-14 mm] sont envoyées vers un concasseur à cône fin. [8]

1.8.2. Broyage :

La trémie de broyage alimente 6 convoyeurs de direction fixe et 2 de direction variable ; ces convoyeurs alimentent deux classificateurs spiraux de 2 x 21 tours/minute, raccordés en circuit

fermé avec deux broyeurs à boulets humides. La granulométrie de sortie du classificateur est de -74 micron.

La densité de la pulpe sortante est de 1360 à 1380g/l, avec un apport de 5 - 20 g/t de cyanure de potassium KCN et de 200 g/t de sulfate de zinc $ZnSO_4$; le mélange est orienté vers la flottation. [9]

1.8.3. Flottation :

Elle comprend deux niveaux : le premier est consacré à L'extraction du plomb (flottation principale du Pb), quant au second, il est adapté à la récupération du zinc.

En plus de l'addition de KCN et de $ZnSO_4$; on ajoute à la pulpe de l'Aeroflot comme moussant et du butyl_xanthate pour collecter le plomb alors que le KCN et le $ZnSO_4$ déprimant respectivement le fer et le zinc.

Le relevage de la mousse se fait avec apport d'eau et on l'épaissit pour favoriser le phénomène de décantation. Ensuite un filtre séchera la pulpe et le concentré sera extrait vers une aire de stockage. Le même procédé est appliqué pour le zinc. On remplace le sulfate de zinc ($ZnSO_4$) par l'activant de sulfate de cuivre, afin de flotter le zinc. [9]



Figure III. 3 – Cellules de flottation.

2. Identification du gisement Boucaïd

2.1. Situation géographique :

Le champ minier de Boucaïd est situé à 70 Km au Sud-Est du Chlef, 62 Km au nord de Tissemsilt et à 250 Km Au Sud-Ouest de la capitale d'Alger. [13]



★ : 36°43'17.3"N 3°09'36.3"E

★ : 35°53'26.2"N 1°37'06.9"E

Figure III. 4- Situation Géographique de la mine de Boucaïd

Le champ minier de l'Ouarsenis représente la partie la plus élevée du massif, il appartient au système montagneux de l'atlas tellien.

Le relief est très accidenté, avec des dénivelées de 500 à 900 m, ce qui explique les conditions d'affleurement excellentes, dont les formes positives de la topographie sont constituées de pointements de roches Jurassiques composées le plus souvent du calcaire. Ces

derniers affleurent sous forme de crêtes étroites et de sommets rocheux. Les massifs sont peu boisés et la végétation n'est observée qu'au pied des montagnes.

La région de l'Ouarsenis est marquée par un climat méditerranéen typique avec un été torride et un hiver pluvieux. Les côtes absolues atteignent 1985m. [13]

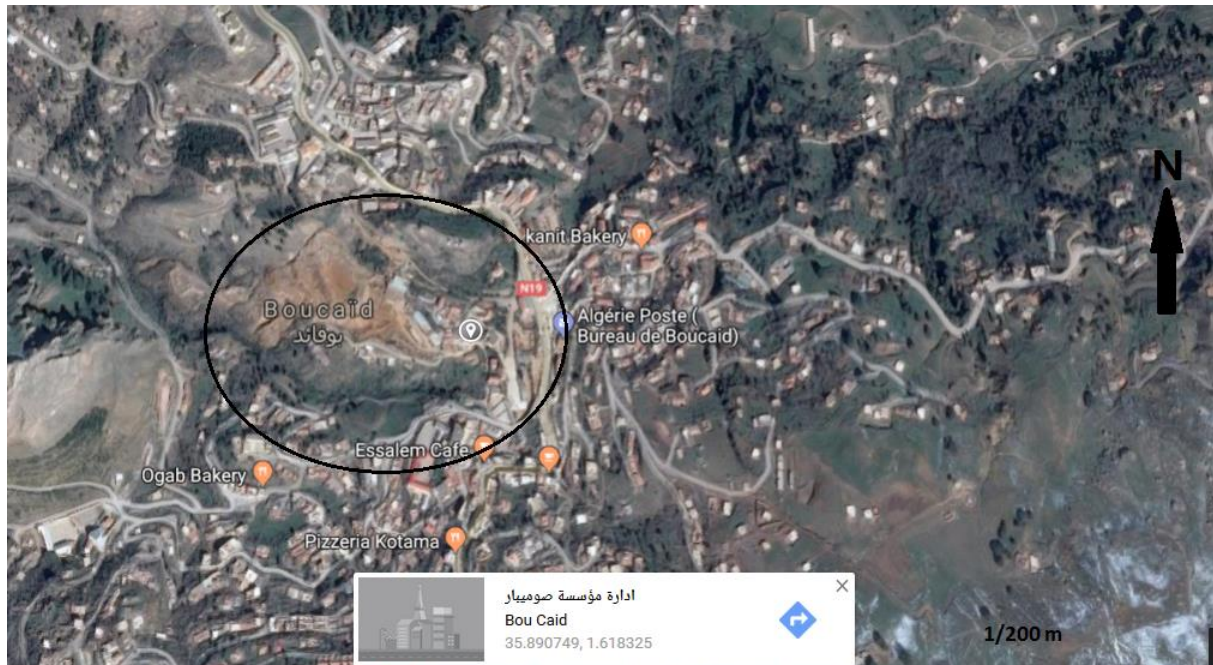


Figure III. 5 – Image satellitaire de la région de Boucaïd et de la mine de Baryte (e : 1/200m)

2.2. Historique des travaux géologique et minier

La mise en exploitation du gisement de Boucaïd date de la fin du 19^{ème} siècle pour les poly métaux (Pb-Zn), qui a connu son apogée dans les 1940 suite aux études réalisées par le géologue français M. Fourmel, la deuxième période a démarré avec la nationalisation des mines en 1966 et la continuité en matière d'exploitation des poly métaux, parallèlement, la SONAREM a entamé les travaux de prospection à partir de 1967 qui consistent dans les études et la reconnaissance systématique du gisement.

En 1975, lors des travaux de levé géologique au 1/5000 du gîte de Sidi Bel Abbes, il y a eu la découverte d'une puissante structure barytine de 850 m de longueur.

Cette dernière a fait l'objet de travaux de prospection et d'évaluation de 1977 à 1981. [13]

L'exploitation et le traitement de la baryte a commencé en 1976. Parallèlement aux travaux d'évaluation du gîte de Sidi Bel Abbes, la prospection a été lancée sur les sites de Sidi Ouidah, sur les flancs oriental et occidental du gîte Nord (Massif d'Abdelkader) et sur le flanc occidental du massif de Belkheiret. En 1976, les sites de l'Ain et le Nord furent transmis à la mine de Boucaïd dont les réserves sont de 50 000 tonnes pour le premier et 10 000 tonnes pour le second. Durant la période 1978 à 1982, quatre sites ont été évalués et sont passés à l'exploitation à savoir :

Ammal, Rasfa, Grand Pic et Nord. Il est à noter que 90% des travaux ont été réalisés sur le site de Sidi Bel Abbas. [13]

2.3. Cadre géologique :

2.3.1. Cadre géologique régional :

L'Ouarsenis est constitué de pointements de roches sédimentaires jurassiques qui affleurent sous forme de massifs isolés parmi les terrains crétacés : Grand Pic, Sra Sidi Abdelkader, Sidi Belkheiret, Rokba, Batha, et certains blocs de glissement par gravité.

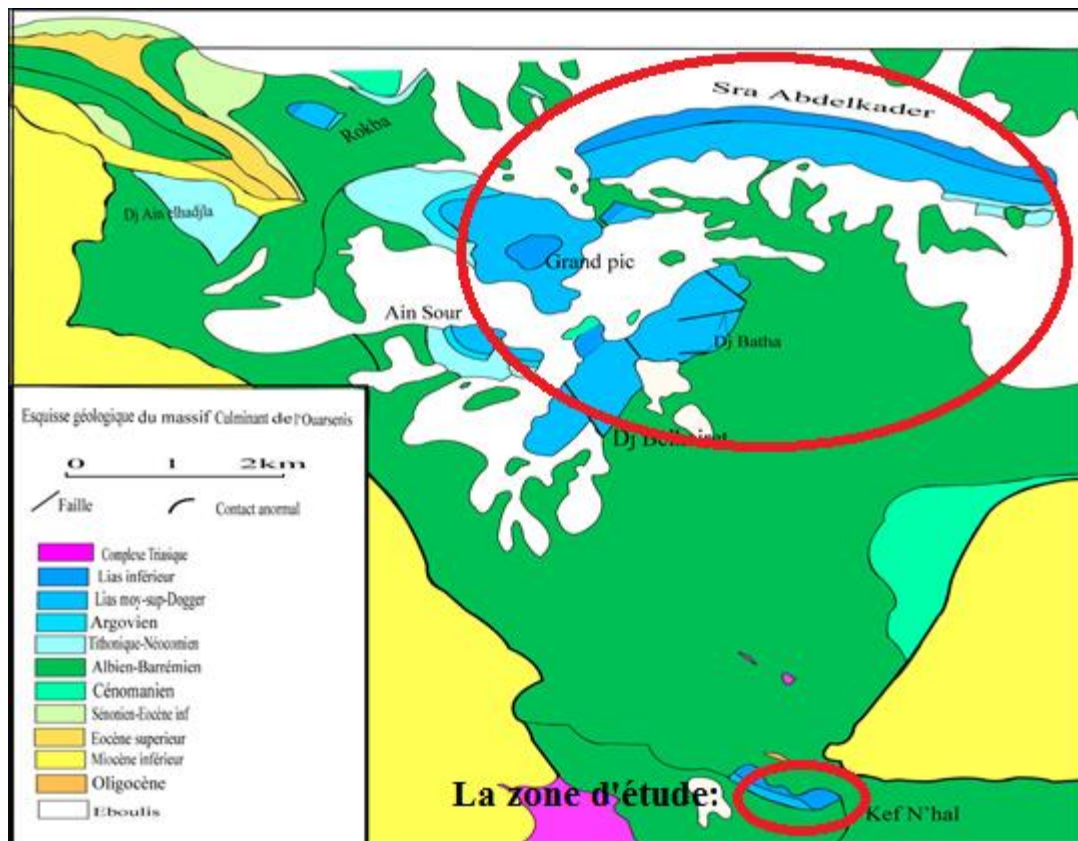


Figure III. 6 – Esquisse Géologique du l'Ouarsenis

La tectonique des gisements constituant la mine de Boucaïd est celle qui affecte le massif de l'Ouarsenis est à l'origine des déplacements des nappes.

Il en résulte un anticlinorium à ennoyage vers le Nord-est constituant ainsi l'ossature du massif montagneux, et un flanc inverse l'anticlinal couché au Sud remplissant l'aire synclinale. Ceci ayant été à l'origine de nombreux accidents tectoniques affectant les différentes masses calcaires.

2.4. Conditions climatiques :

La mine de Boucaïd qui a fait l'objet de notre étude est située dans la région de l'Ouarsenis, elle est caractérisée par un climat méditerranéen typique avec un hiver pluvieux, humide et froid et un été chaud et sec.

La saison estivale (période chaude), allant de la mi-Mai jusqu'à Septembre, peut connaître des maximums de température atteignant 42,0°C voir même 45,0°C.

La saison hivernale (période froide) est comprise entre les mois de décembre, voir mi-novembre, et Avril. Celle-ci connaît des minimums de température pouvant atteindre 0.3°C. Lors de cette saison, des chutes de neiges peuvent avoir lieu, causant un gel allant de quelques jours jusqu'à deux semaines, et cela à partir d'une altitude de 1100m.

Concernant les vents, cette zone est soumise à des vents de direction Nord-Ouest ou Nord, avec une vitesse moyenne annuelle allant de 2.4km/s jusqu'à 2.9km/s qu'on pourrait qualifier de très légère brise. [13]

2.5. Géologie des gisements de Baryte :

2.5.1. Géologie du gisement Sidi Belabbes :

- **Filon Sidi Belabbes partie Ouest :**

Il s'agit d'un corps filonien qui affleure au jour sur une longueur de 315 m avec une direction Est-ouest, et une puissance qui varie entre 0.5 et 2 m. L'angle de pendage est Sub-vertical (86°). La structure est encaissée dans les calcaires du Lias moyen- supérieur. Le minerai est d'une teneur moyenne de 84.55 % en BaSO₄ et la densité moyenne est de l'ordre de 4. [16]

- **Filon Sidi Belabbes partie Est :**

Ce corps de minerai de barytine est la continuité du filon Sidi Belabbes Ouest qui se localise à l'extrémité orientale du Sra d'Abd El- Kader, reconnu lors des itinéraires de reconnaissance à l'Ouarsenis effectués par la division de recherche de 1977 à 1982 (EX : SONAREM). Il affleure au jour entre les côtes 1210 et 1290 m, sur une longueur de 130 m

Selon un pendage de 76° vers le Sud, une épaisseur moyenne de 1,6 m et une teneur moyenne de 86.32 % en BaSO₄. [16]

Ce corps est contrôlé par une structure technique de direction Est-Ouest encaissée dans les calcaires du Dogger.

2.5.2. Géologie du gisement Lakhdar

- **Corps Lakhdar Supérieur :**

Le corps du minerai se présente sous forme d'amas d'une structure très irrégulière, dont une base de 350 m² au niveau 1475 m, Au niveau 1485 m le corps est d'une section de 654 m². Cependant, avant l'exploitation de la partie supérieure au niveau 1485 m, le corps présentait une allure conique avec un axe décentré. Le minerai très dense (4.2) est contenu dans une gangue argileuse plus ou moins importante. Le minerai est encaissé dans les calcaires Lias moyen –supérieur. La teneur moyenne du minerai en BaSO₄ est de 76.08 %. [16]

- **Corps Lakhdar Inférieur :**

Ce corps de minerai se présente sous forme d'amas d'une structure très irrégulière. Le corps se trouve situé en contrebas du corps de Lakhdar du niveau 1452 m. Il s'agit de sa continuité vers le bas. Le gisement est localisé entre les niveaux 1330 m et 1452m. Le minerai très dense (4.32) est contenu dans une gangue argileuse plus ou moins importante. Le minerai est encaissé dans les calcaires du lias moyen-supérieur. La teneur moyenne du minerai est de 78.86%. [16]

Le corps minéralisé a été développé par galerie au jour et par des sondages fond, les réserves développées sur ce niveau sont de l'ordre de 148 000 tonnes en C1.

- **Lakhdar Niveau 1497 m :**

C'est le prolongement du filon Sidi Ouadah niveau 1518m. Cette galerie qui évoluée avec le corps du minerai, constituée la limite supérieure de cette partie. Quant à la limite inférieure, elle est arrêtée à 50m plus bas.

Ce filon est d'une puissance moyenne de 1,30 m d'une teneur moyenne de 85.79 % BaSO₄ et d'un pendage de 25° à 35° vers sud. Le filon se trouve encaissé dans les calcaires du Lias moyen – supérieur. [16]

2.5.3. Géologie du gisement Nord :

Il s'agit d'une structure filonienne mise en place dans un accident cassant de direction sub-latitudinale (112-192°) et à pendage de 70-75° vers le N-NE.

La minéralisation est reconnue en surface sur une longueur de 300 m environ. Elle est encaissée dans les dolomies du Lias inférieur, au voisinage du contact avec les schistes argileux de l'Albo-Aptien. L'épaisseur varie de 0,4 - 0,6 à 9-10 m et fait en moyenne 1,5 -1,6 m. La teneur moyenne en BaSO₄ est de 70 %. [16]

Le filon Nord est ouvert sur trois niveaux, niveaux 1200 m, niveau 1150 m et le niveau 1115 m. Les niveaux 1200 m et 1150 m ont fait l'objet de l'exploitation durant les années précédentes. Ces deux niveaux ont subi au début de l'exercice 2009 des affaissements et des fissurations naturelles aux alentours des entrées des galeries des niveaux et aux niveaux des pistes d'accès. [16]

Cette calamité naturelle a influé négativement sur le déroulement de l'exploitation durant toute l'année 2009 et au début de l'exercice 2010.

Les travaux d'exploitation ont repris au début du deuxième semestre 2010.

2.6. Minéralisation :

La morphologie des gisements de l'Ouarsenis, Boucaïd inclus, est caractérisée par des filons, lentilles et amas résultant des accidents tectoniques ayant eu lieu dans cette zone. On distingue deux types de gisement selon leur formation : les amas et les filons. [13]

2.7. Réserves géologiques :

- Réserves géologiques Lakhdar, Nord et Ammal : 626 000 t ;
- Réserves exploitables Lakhdar, Nord et Ammal : 550 000 t. [13]

2.8. Exploitation :

Les méthodes d'exploitation utilisée :

- **Chambre et piliers** : pour les gisements filoniens à faible pendage entre 15° et 30°.
- **Sous niveaux abattus** : pour les amas puissants.
- **Chambres magasins** : cette méthode employée pour les gisements verticaux et Sub-verticaux 86° à 90° qui se présentent sous la forme filonienne. [13]

2.9. Description du processus de traitement :

L'usine de Boucaïd traite, enrichit et transforme le Tout-venant Baryte (Matière première) provenant des différents quartiers dans un but d'obtenir un produit marchand conforme aux normes API.

Le Tout-venant avec une grosseur maximale de 500 millimètres et une teneur minimale de 60% en BaSO₄ est traité dans Trois stations.

- Station de concassage : Préparation du Tout-venant à l'enrichissement ;
- Station d'enrichissement : Enrichissement du Tout-venant par la méthode de séparation gravimétrique humide par accélération différentielle en utilisant un appareil appelé Remer-Jig de marque WEMCO.
- Station de Pulvérisation et de conditionnement : Séchage, Broyage fin et Mise en Big-Bag. L'usine dispose d'une aire de stockage de produit fini pouvant aller jusqu'à 3000 tonnes de produit fini. [17]

2.9.1. Concassage :

Cette étape consiste à réduire le Tout-venant de minerai de Baryte jusqu'à une grosseur admise par la prochaine étape pour pouvoir l'enrichir.

Le Tout-venant est chargé à l'aide d'une pelle chargeuse dans une trémie réceptrice de capacité de 120 tonnes à partir d'une aire de stockage pouvant atteindre jusqu'à 5000 tonnes.

Le Tout-venant avec une grosseur maximale de 500 mm à l'alimentation subit trois opérations de réduction mécanique de grosseur :

Réduction à 70 mm à l'aide d'un concasseur à mâchoires à simple volet type VB67 BERGEAUD.

Criblage et réduction de grosseur à 14 mm dans un groupe mobile broyeur crible SYMENS, à l'aide d'un crible à 3 étages

Réduction à 6mm dans un concasseur à cylindres lisse type BCR 60X80 .

Le Tout-venant réduit à une grosseur comprise entre (0-8 mm) est stocké dans trois trémies tampons de 120 tonnes de capacité chacune.

L'installation de concassage débite un rendement de 30 tonnes par heure en concassé à (0-8 mm). [17]

2.9.2. Enrichissement :

Le Tout-venant réduit à (0-8 mm) subit une séparation gravimétrique humide dans un appareil appelé Remer-Jig de marque WEMCO.

Le produit léger soit les rejets sont acheminés en surface avec l'eau vers une digue pour décantation et stockage et recyclage de l'eau clarifiée.

Le produit lourd représente le concentré (Baryte) est récupéré du bas de l'appareil dans un classificateur spiral puis évacué vers des chambres pour égouttage et stocké à proximité dans une aire de stockage allant jusqu'à 9000 tonnes de capacité.

Le rendement de cette installation est de 12 tonne/heure en concentré. [17]

2.9.3. Station de Pulvérisation et conditionnement (Broyage) :

Cette opération permet de transformer le concentré à un produit fini marchand conforme aux normes. Le concentré avec une humidité maximale de 12% à l'entrée subit une opération de séchage dans un sécheur rotatif de 14 mètres de long et 2 mètres de diamètre pour le ramener à un taux inférieur de 1% à la sortie du séchage.

Le produit séché subit un broyage fin dans un broyeur pendulaire BP16, d'un rendement moyen de 14 tonnes/heure et une séparation en granulométrie dans un séparateur statique où les particules inférieures à 75 microns sont stockées dans une trémie de stockage de produit fini.

Le produit réduit à 75 microns est mis en Big-Bags d'ensacheuses de marque TESTUT et pesé dans une balance électronique.

Le produit conditionné dans des Big-Bags de 1,5 tonne représente le produit fini de l'usine, il est destiné pour l'utilisation en boue de forage pétrolier.

La capacité nominale de la station de pulvérisation et conditionnement est de 12 tonnes/heure. [14]

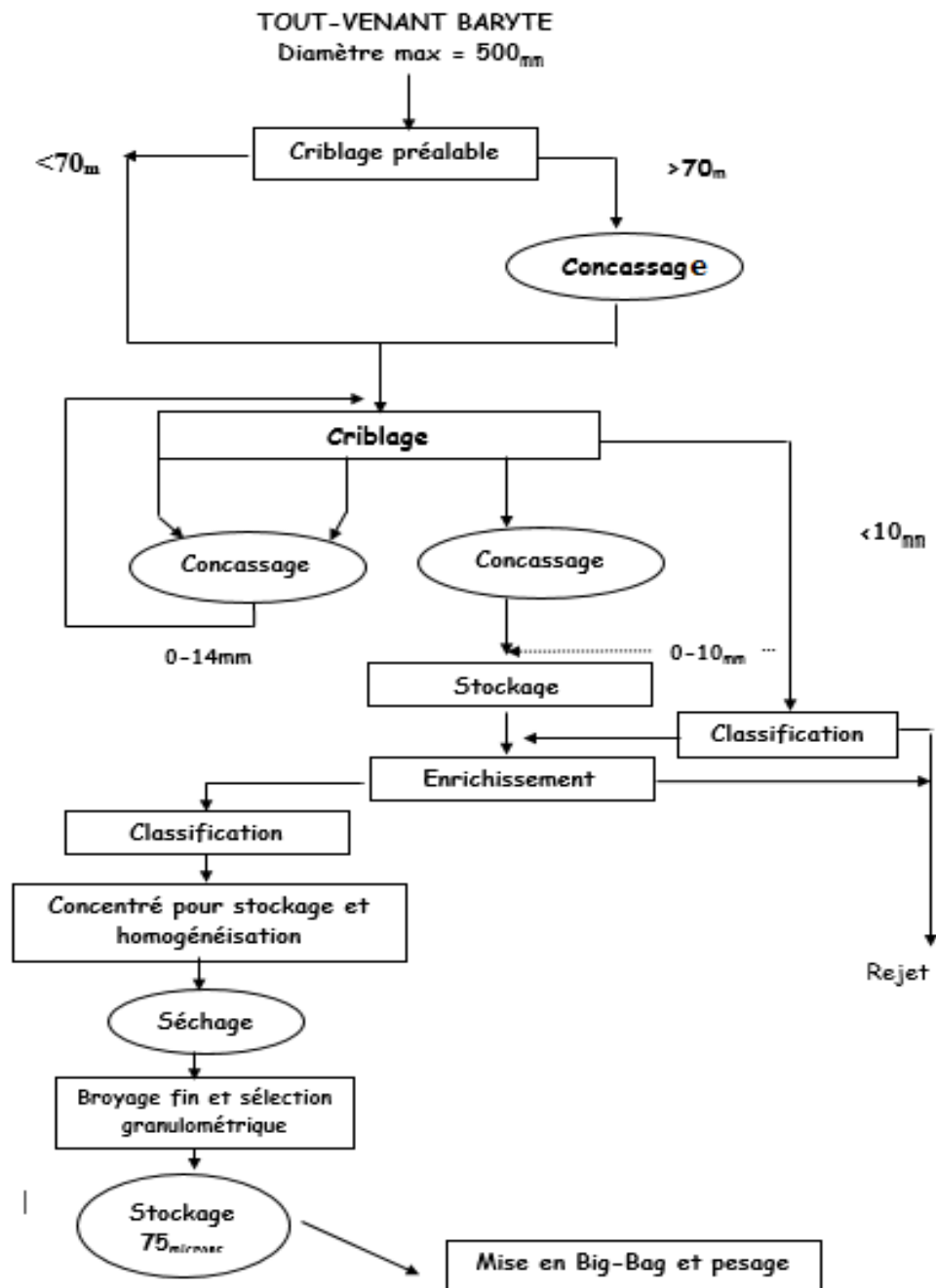


Figure III. 7 – Schéma technologique de traitement de la baryte de Boucaïd.

2.10. Présentation des rejets de Boucaïd :

L'exploitation et traitement de minerais de barytine dans la zone de Boucaïd génère une grande quantité de déchets, cela se traduit par une pollution environnementale significative et un impact considérable sur les différentes composantes du milieu.

2.10.1. Les rejets liquides :

Les eaux de traitement interviennent en phases d'enrichissement du minerai de baryte, cependant des quantités importantes d'eaux sont utilisées dans le processus de séparation entre le minerai et la gangue.

- Qualité des rejets liquides :

Étant donné que l'eau est recyclée pour qu'elle puisse être retravaillée, l'analyse et le traitement de cette dernière ne sont pas recommandés, par contre nous avons jugé important de citer que cette eau après usage est chargée de sulfates issues de la composition de base du minerai, et que la couleur finale de cette dernière est plutôt rougeâtre suite à l'oxydation du fer contenu dans la gangue. [13]



Figure III. 8 – Vue de la surface des rejets à Boucaïd.

2.10.2. Les rejets solides :

Les rejets solides issus du traitement de baryte de Boucaïd sont représentés principalement par les résidus générés, déposés et stockés dans les aires voisinant la zone d'activité. Les stériles dans leur ensemble sont des tas de roches de cailloux et de fines

particules de diamètres et de compositions différentes. Ces entrepôts restent exposés aux aléas climatiques, ce qui fait d'eux le siège d'activités et de dynamisme physico-chimique par excellence.

- **Qualité des rejets solides :**

Un dépôt solide est toujours agressé par les conditions climatiques. Toutes les substances entraînées regagnent les cours d'eaux par ruissellement ou plutôt s'infiltrant en profondeurs, ainsi les eaux seront complètement contaminées. La pollution en question sera fonction de la composition chimique des rejets.

Dans le cadre de notre étude nous nous sommes intéressés aux analyses minéralogiques de ces rejets, pour pouvoir cerner la véritable menace vis-à-vis des eaux susceptibles d'être atteints.

Les analyses ont été effectuées par CETIM (Centre d'Études et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction), les résultats révèlent une charge importante en métaux lourds. [13]

Remarque :

Les rejets solides englobent aussi les boues issues des bassins de décantation pour le traitement des poussières, ces dernières sont déposées dans les mêmes aires de stockage que les rejets.

Tableau III. 1– Analyses chimiques des stériles de traitement et des boues des bassins de recyclage - Normes ISO : 8288 : 1986. [18]

Paramètres	Unités	Échantillon n°1	Échantillon n°2
Cr	mg/kg	<20	<20
Cu	mg/kg	121,3	214
Pb	g/kg	13,7	16,9
Cd	mg/kg	18,6	42,2
Co	mg/kg	<20	25
Ni	mg/kg	<20	101,6
Mo	mg/kg	<10	<10

Les résultats révèlent un haut risque de toxicité, en effet il s'est avéré que les deux échantillons analysés présentent un taux considérable en matière de métaux lourds dont (Cr, Cu, Pb, Cd, Co, Ni, Mo), la présence de ces substances s'explique par le fait que la matière première est un polymétallique, issu d'une région géologiquement parlant riche en ces substances, Il est à signaler que les métaux lourds peuvent aussi provenir des anciens rejets (plombo-zincifère) de ce site. [13]

Deuxième partie

Partie expérimentale

Chapitre IV : Méthodologie et protocoles analytiques

IV.1 Introduction :

Afin d'atteindre l'objectif principal de ce mémoire, soit de caractériser le comportement géochimique des rejets, il est primordial de connaître les principales propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des résidus miniers de notre zone d'étude. Ce chapitre présente les méthodes utilisées pour caractériser et étudier les différents rejets miniers qui ont fait l'objet de notre étude (rejets de la mine de Boucaïd et d'El Abed).

IV.2 Echantillonnage :

L'échantillonnage est une étape très importante dans toute étude géologique et/ou minière. Celui-ci permet de réduire la fraction à étudier à partir d'un lot primaire en le divisant en plusieurs autres échantillons selon divers processus, que ce soit manuellement ou bien mécaniquement. L'échantillonnage donc assure la représentativité des échantillons prélevés.

Les échantillons ont été prélevés à partir des digues de la mine de Boucaïd (Pb-Zn ; Baryte) et de la mine d'el Abed (Pb-Zn), nous avons divisé la zone d'étude en des secteurs dont les coordonnées géographiques sont citées ci-après :

Tableau IV. 1 – Coordonnées géographiques des points de prélèvements du rejet d'el Abed (Pb-Zn).

Point	Latitude	Longitude
1 ^{er} Point	34° 27' 9.043'' N	1° 40' 56.67'' O
2 ^e Point	34° 27' 9.043'' N	1° 41' 7.238'' O
3 ^e Point	34° 27' 8.392''N	1° 41' 16.65'' O
4 ^e Point	34° 27' 8.431''N	1° 41' 1.064'' O
5 ^e Point	34° 27' 9.828''N	1° 40' 59.28'' O
6 ^e Point	34° 27' 11.04''N	1° 38' 20.868''O

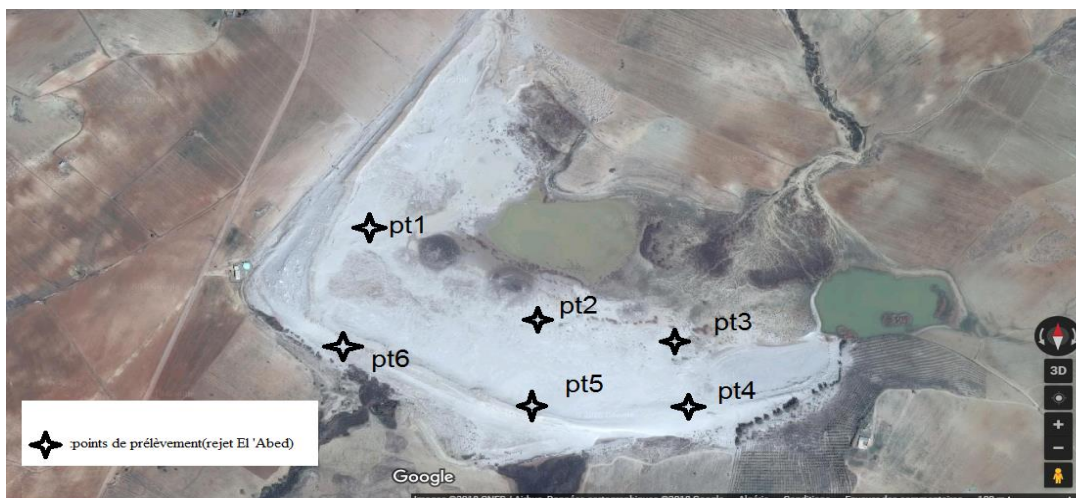


Figure IV. 1– Points d'échantillonnage (Rejets d'El Abed).

Tableau IV. 2 – Coordonnées géographiques des points de prélèvements du rejet Boucaïd (Pb-Zn).

Point	Latitude	Longitude
1 ^{er} Point	35° 53' 26.615'' N	1° 36' 52.279'' E
2 ^e Point	35° 53' 26.55'' N	1° 36' 52.298'' E
3 ^e Point	35° 53' 26.521'' N	1° 36' 52.028'' E
4 ^e Point	35° 53' 26.717'' N	1° 36' 52.173'' E
5 ^e Point	35° 53' 27.546'' N	1° 36' 54.896'' E
6 ^e Point	35° 53' 27.71'' N	1° 36' 54.992'' E

Tableau IV. 3 – Coordonnées géographiques des points de prélèvements du rejet Boucaïd (baryte)

Point	Latitude	Longitude
1 ^{er} Point	35° 53' 29.515 N	1° 36' 55.079'' E
2 ^e Point	35° 53' 28.601 N	1° 36' 55.472'' E
3 ^e Point	35° 53' 27.463 N	1° 36' 56.725'' E
4 ^e Point	35° 53' 35.52 N	1° 36' 56.484'' E



Figure IV. 2 – Points d'échantillonnage (Rejets de Boucaïd)

Dans chacune des zones, nous avons prélevé environ 15 Kg d'échantillon. La profondeur d'échantillonnage est de l'ordre de 50 cm.

IV.3 Préparation de l'échantillon :

IV.3.1. Séchage a l'air libre :

C'est une méthode simple qui sert à mettre l'échantillon à l'air libre pendant 48h au minimum afin de travailler facilement avec un échantillon sec.

IV.3.2. Homogénéisation :

Après avoir séché les échantillons, nous avons procédé à l'homogénéisation des trois types de rejets, en les plaçant sur une surface plane. La durée d'homogénéisation est de 20 minutes environ.

IV.3.3. Quartage manuel :

C'est une opération indispensable pour une meilleure représentation de l'échantillon. Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation des résidus miniers.

Le rejet doit être disposé sur une surface plane en formant un parallélépipède de faible épaisseur. Après brassage, il est partagé en quatre quarts équitables. On élimine 2 fractions opposées et on réunit les 2 autres fractions. Si la quantité est encore trop importante, le quartage se poursuit selon le même processus jusqu'à atteindre la quantité voulue. (Même méthode pour les 03 rejets).



Figure IV. 3 – Homogénéisation et quartage de l'échantillon de Boucaïd (Baryte).



Figure IV. 4 – Homogénéisation et quartage de l'échantillon de Boucaïd (Pb-Zn).

IV.4 Caractérisations physiques :

Cette étape consiste à déterminer les différents paramètres physiques, entre autres : le taux d'humidité, le poids volumique apparent et le poids volumique des particules solides caractérisant notre minerai, et cela en effectuant les essais suivants :

IV.4.1. Détermination de la teneur en eau pondérale w (norme NF P 94-050) :

On détermine la teneur en eau pondérale par l'intermédiaire de deux pesées selon la norme NF P 94-050. On effectue une première pesée de notre échantillon à l'état humide. Ensuite on l'insère dans un bécher et on le passe à l'étuve à une température de 105°C pendant 24 heures. Après le passage à l'étuve, on effectue une deuxième pesée qui constitue la masse sèche de notre échantillon.

$$w = \frac{m_w}{m_s} * 100 = \frac{W_w}{W_s} * 100 \text{ Avec } m_w = m - m_s = m_E - m_{\text{Ecalciné}}$$

Tableau IV. 4 – Teneur en eau des échantillons d'El Abed (rejet Pb-Zn).

Echantillon	$m_E(g)$	$m_c(g)$	$m_{Ecal}(g)$	$m_s(g)$	$m_w(g)$	W (%)
Ech01	20	47,61	67,21	19,6	0,4	2,04%
Ech02	20	48,27	68,25	19,98	0,02	0,10%
Ech03	20	35,75	54,21	18,46	1,54	8,34%
Ech04	20	24,97	44,04	19,07	0,93	4,88%
Ech05	20	22,68	41,83	19,15	0,85	4,44%
Ech06	20	22,06	40,5	18,44	1,56	8,46%

Tableau IV. 5 – Teneur en eau des échantillons de Boucaïd (rejet Pb-Zn).

Echantillon	$m_E(g)$	$m_c(g)$	$m_{Ecal}(g)$	$m_s(g)$	$m_w(g)$	W (%)
Ech01	20	36,31	55,12	18,81	1,19	6%
Ech02	20	22,49	41,80	19,31	0,69	4%
Ech03	20	21,57	40,50	18,93	1,07	6%
Ech04	20	36,14	54,10	17,96	2,04	11%
Ech05	20	22,66	40,67	18,01	1,99	11%
Ech06	20	20,69	39,91	19,22	0,78	4%

Tableau IV. 6 – Teneur en eau des échantillons de Boucaïd (rejet de la baryte).

Echantillon	$m_E(g)$	$m_c(g)$	$m_{Ecal}(g)$	$m_s(g)$	$m_w(g)$	W (%)
Ech01	20,000	36,580	55,960	19,380	0,620	3,20%
Ech02	20,000	38,740	58,060	19,320	0,680	3,52%
Ech03	20,000	19,460	39,020	19,560	0,440	2,25%
Ech04	20,000	21,080	40,770	19,690	0,310	1,57%

Tableau IV. 7 – Résultats du taux d'humidité.

Echantillons	La moyenne de la teneur en eau(%)
Rejet d'el Abed (Pb-Zn).	4,71%
Rejet de Boucaïd (Pb-Zn).	7,00%
Rejet de Boucaïd (baryte).	2,64%

Avec :

- m_E : masse de l'échantillon+ creuset
- m_c : masse du creuset
- m_{Ecal} : masse de l'échantillon calciné + creuset
- m_s : masse du solide calciné
- m_w : masse de l'eau évaporée
- w : la teneur en eau dans l'échantillon

IV.4.2. Détermination du poids volumique apparent :

Pour déterminer le poids volumique apparent, nous utilisons la méthode du moule qui consiste à prendre un échantillon préparé selon un processus bien défini, on remplit le moule, jusqu'à le débordement ensuite on l'arase à l'aide d'une règle. ($P = m/v$) [kg/dm^3] (Norme NF P 94-093).

Tableau IV. 8 – Résultats des essais de détermination du poids volumique apparent.

type de l'échantillon	numéro de l'échantillon	mE(g)	V _B (ml)	ρ_{Apparent} (kg/dm ³)	La Moyenne ρ_A (kg/dm ³)
rejet d'el Abed (Pb-Zn)	Ech ₀₁	182	175,8	1,035	1,171
	Ech ₀₂	227		1,291	
	Ech ₀₃	181		1,030	
	Ech ₀₄	230		1,308	
	Ech ₀₅	230		1,308	
	Ech ₀₆	185		1,052	
rejet de Boucaïd (Pb-Zn)	Ech ₀₁	226		1,285	1,357
	Ech ₀₂	236		1,342	
	Ech ₀₃	196		1,115	
	Ech ₀₄	197		1,121	
	Ech ₀₅	175		2,061	
	Ech ₀₆	214		1,217	
rejet de Boucaïd (baryte)	Ech ₀₁	257		1,462	1,456
	Ech ₀₂	256		1,456	
	Ech ₀₃	243		1,382	
	Ech ₀₄	268		1,524	

IV.4.3. Détermination du poids volumique des particules solides (norme NF P 94-054) :

Le poids spécifique des grains d'un sol (γ_s) est le quotient du poids de ses grains solides (W_s) par leur volume absolu (V_s).

C'est un rapport exprimé en (g/cm^3 ou bien kg/m^3) de la quantité de la masse (M_s) des grains solides après un étuvage d'une durée de 24h à une température de 105°C au volume absolu (V_s) de l'échantillon.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} .$$

- γ_s \longrightarrow Poids spécifique des grains solides.
 W_s \longrightarrow Poids du sol sec.
 V_s \longrightarrow Volume absolu des grains solides.

Cette méthode consiste à déterminer le volume absolu à l'aide d'un pycnomètre.

Tableau IV. 9 – Résultats obtenus pour le poids volumique des particules solides.

Type de rejets	essais	W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₃ (g)	W ₄ (g)	W _s (g)	V _s (cm ³)	γ _s (g/cm ³)	moyenne γ _s (g/cm ³)
Rejet d'el Abed (Pb-Zn)	1	31,12	83,56	47,95	94,33	16,83	5,96	2,82	2,99
	2	31,12	83,56	42,03	91,04	10,91	3,33	3,28	
	3	31,12	83,56	46,70	93,3	15,58	5,74	2,71	
	4	31,12	83,56	42,64	91,64	11,52	3,34	3,45	
	5	31,12	83,56	53,76	97,9	22,64	8,21	2,76	
	6	31,12	83,56	44,46	92,17	13,34	4,63	2,88	
Rejet de Boucaïd (Pb-Zn)	1	31,12	83,56	50,40	95,65	19,28	7,09	2,72	3,00
	2	31,12	83,56	46,97	93,97	15,85	5,34	2,97	
	3	31,12	83,56	47,04	93,7	15,92	5,68	2,80	
	4	31,12	83,56	50,56	97,36	19,44	5,54	3,51	
	5	31,12	83,56	48,40	94,66	17,28	6,08	2,84	
	6	31,12	83,56	53,42	98,68	22,30	7,08	3,15	
Rejet de Boucaïd (Baryte)	1	31,12	83,56	57,33	101,71	26,21	7,97	3,29	3,21
	2	31,12	83,56	54,59	99,97	23,47	6,96	3,37	
	3	31,12	83,56	54,25	98,05	23,13	8,55	2,71	
	4	31,12	83,56	58,75	103,18	27,63	7,92	3,49	

Tableau IV. 10 – Résultats de la densité.

Type de rejets	Moyenne γ _s (g/cm ³)	Densité
Rejet d'el Abed (Pb-Zn)	2,99	2.99
Rejet de Boucaïd (Pb-Zn)	3,00	3.00
Rejet de Boucaïd (Baryte)	3,21	3.21

Formules de calcul :

$$W_s = W_3 - W_1$$

$$V_s = (W_2 - W_1) - \frac{W_4 - W_3}{\gamma_w T^\circ C}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \longrightarrow \quad G_s = \frac{\gamma_s}{\rho_w}$$

Poids volumique de l'eau en fonction de la température :

Température : 22 °C \longrightarrow poids volumique de l'eau ρ_w : 0.9987.

Avec :

W₁ : poids de pycnomètre vide.

W₂ : poids de pycnomètre + eau.

W₃ : poids de pycnomètre + échantillon.

W_4 : poids de pycnomètre + échantillon + eau.

V_s : volume du matériau.

W_s : poids du matériau.

γ_s : poids volumique absolu des grains solides.

G_s : la densité

IV.4.4. Détermination de la teneur en carbonate (NF P 94-048 Octobre ; 1996) :

- Méthode du Calcimètre :

Le Calcimétrie est la mesure du pourcentage de CaCO_3 dans une roche, un sédiment, un sol... etc. L'appareil de mesure la plus fréquemment utilisée est le Calcimètre de Bernard.

Le dosage du carbonate de calcium est basé sur l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl) dilué d'un échantillon d'une masse donnée à pression et température standard. On mesure le volume de CO_2 dans un tube manométrique après attaque par l'acide chlorhydrique (HCl) suivant la réaction ci-après :



On utilise l'eau saturée en sel pour éviter la perte de CO_2 à partir la réaction suivante :



Figure IV. 5 – Calcimètre de Bernard.

La teneur en carbonate est :

$$\text{Taux CaCO}_3(\%) = \frac{M_t \cdot V_d}{M \cdot V_t} \cdot 100$$

M_t : la masse de carbonate pur.

M : la masse de l'échantillon.

V_d : le volume dégagé par l'échantillon.

V : le volume dégagé par les carbonates purs.

Tableau IV. 11 – Résultats expérimentaux déterminant la teneur en carbonate.

Type de rejet	Abed (Pb-Zn)		Boucaïd (baryte)			Boucaïd (Pb-Zn)	
	1	2	1	2	3	1	2
Nb de l'essai							
Taux CaCO ₃ (%)	72.55	79.07	18.04	33.78	39.73	57.77	73.70
Taux moyenne CaCO ₃ (%)	75.81 %		30.51 %			65.73 %	

. D'après les résultats enregistrés, on constate que les rejets contiennent des quantités importantes en carbonates particulièrement les rejets d'el Abed (Pb-Zn) et de Boucaïd (Pb-Zn). Selon la classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate (**NF P 94-048 Octobre 1996**) ;(voir le tableau de classification dans l'annexe A.2), on déduit que la nature de la roche encaissante de chaque minéralisation est comme suit :

- Rejet de la mine d'el Abed (Pb-Zn) est fortement calcaire (calcaire marneux)
- Rejet de la mine de Boucaïd (Pb-Zn) et (Baryte) sont moyennement calcaire.

IV.4.5. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une méthode dont le principe est la détermination de la distribution quantitative des particules du sol en les répartissant sur des classes granulométriques, afin de connaître le comportement de la roche lors du concassage qui dépend principalement de la constitution des grains et de leur dureté, ainsi que de fournir des fractions granulométriques qui serviront aux prochaines étapes de caractérisation et de valorisation.



Figure IV. 6 – Tamiseuse.

L'analyse est effectuée par tamisage à l'aide d'une série de tamis normalisée (Retsch ISO 3310). Une tamiseuse de type Retsch AS200 a été utilisée pour réaliser toutes les analyses granulométriques.

Le choix des tamis s'est fait selon la norme AFNOR : les ouvertures des tamis ont une relation constante l'une avec l'autre, chaque dimension de maille d'un tamis correspond donc à la dimension du précédent multipliée par $\sqrt{2}$.

a) L'essai 01(rejet d'el Abed (Pb-Zn)) :

- Série de tamis utilisés : **0.5, 0.315, 0.25, 0.16, 0.125, 0.08, 0.063, 0.04.**
- La prise d'essai est de 1500 Kg.

b) L'essai 02(rejet de Boucaïd (Pb-Zn)) :

- Série de tamis choisis : **0.5, 0.315, 0.25, 0.125, 0.063 ,0.04.**
- La masse initiale de l'échantillon est de 1500 Kg.

c) L'essai 03(rejet de Boucaïd(Baryte)) :

- Tamis utilisés pour l'analyse : **10, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.315, 0.25, 0.125, 0.063 ,0.04.**
- La masse initiale de l'échantillon est de 1300 Kg.

IV.5 Caractéristiques minéralogiques des résidus :

- **Diffraction des rayons X :**

La technique d'analyse par diffraction des rayons X est utilisée pour la détermination de la composition minéralogique des rejets. Elle est basée sur la diffusion d'un faisceau de rayon X monochromatique par les plans réticulaires des cristaux.

- L'analyse par DRX indique que les résidus plombo barytique de Boucaïd ont une composition minéralogique complexe, formée principalement de minéraux carbonatés comme la calcite, de minéraux sulfates tels que la baryte et rozenite ainsi que des sulfures à savoir : Sphalérite et pyrite. Les minéraux identifiés sont représentés dans le tableau 5.11.
- Les rejets plombo zincifère de Boucaïd sont composés principalement de dolomite, calcite, sphalérite, galène, pyrite, gypse, anglesite et minrecordite.
- Les résidus d'El Abed ont une composition minéralogique formée de minéraux de gangue comme la dolomite et minrecordite. Les minéraux sulfurés et sulfatés retrouvés après analyse sont : Sphalérite, marcassite, pyrite, gypse, scotlandite et anglesite.

Tableau IV. 12 – Composition minéralogique des digues différents (Boucaïd et El Abed).

Classes	Minéraux principaux		
	résidus plombo barytique de Boucaïd	résidus plombo zincifère de Boucaïd	Digue plombo zincifère d'El Abed
Sulfures	Pyrite FeS ₂ Sphalérite ZnS	Pyrite FeS ₂ Sphalérite ZnS Galène PbS	Pyrite FeS ₂ Sphalérite ZnS Galène PbS marcassite FeS
Carbonates	Calcite CaCO ₃	Calcite CaCO ₃ Minrecordite	Dolomite Minrecordite
Sulfates	Rozenite FeSO ₄ (H ₂ O) ₄ Baryte Ba SO ₄	Anglesite Gypse	Anglesite Gypse Scotlandite PbSO ₄

IV.6 Caractérisation chimique :

IV.6.1. Extraction séquentielle par la méthode de Mehra et Jackson (1960) :

Cette méthode a été utilisée juste pour déterminer la concentration des ETM dans le solide (concentration initiale).

❖ Instruments, matériels et réactifs :

- Fiole jaugée de 200 ml.
- Entonnoir.
- Balance.
- Réactifs : acide sulfurique, HCl et acide nitrique (liquide).
- Récipient (Coupelle, verre de montre).

- Echantillons à analyser
- Bain de sable

Protocole d'extraction :

- Peser 1g d'échantillon et le placer dans erlenmeyer.
- Ajouter successivement :
 - 20 ml d'acide sulfurique (96%)
 - 4 ml de HCl (37%)
 - 4 ml d'acide nitrique (65%)
- Chauffer à l'aide d'un bain de sable jusqu'à la dissolution.



Figure IV. 7 – Extraction séquentielle par la méthode de Mehra et Jackson (1960).

IV.6.2. Etude géochimique des différents rejets (Boucaïd et El Abed) :

Des essais cinétiques et statiques de prédiction, ainsi qu'une caractérisation et des essais d'extraction ont été effectués sur les rejets de la mine de Boucaïd et d'El Abed. Les protocoles expérimentaux sont présentés dans les sections suivantes.

1. Essais cinétiques

Le potentiel de génération d'acide peut être évalué à l'aide des essais cinétiques de prédiction du DMA. Les essais cinétiques simulent une altération naturelle et accélérée des rejets miniers dans des conditions contrôlées en laboratoire ou en conditions naturelles de terrain. Contrairement aux tests statiques qui sont rapides, faciles à mettre en œuvre et considérés comme qualitatifs, car ils n'informent pas sur le comportement environnemental du matériel dans le temps, les tests cinétiques sont plus dispendieux et s'étalent sur une

période plus longue (de quelques semaines à 2 ans, voire plus, selon le type d'essai cinétique et les objectifs recherchés). Il existe plusieurs types d'essais cinétiques selon le dispositif expérimental utilisé : on peut citer les colonnes et les mini-cellules d'altération (Plante, 2012 ; Benzazoua et al, 2015)

1.1. Essais en colonnes de lixiviation :

Les essais en colonne au laboratoire ne sont pas normalisés et peuvent donc être adaptés selon les objectifs visés. Ces essais sont utilisés depuis le début des années 1990 à partir des travaux de Marchant et Lawrence (1991). Généralement, les essais en colonne permettent l'établissement de conditions géochimiques plus proches de celles de terrain (Villeneuve, 2004 ; Villeneuve et al., 2009), grâce entre autres à des rapports liquides/solides plus faibles.

Pour quantifier le comportement géochimique se produisant dans les rejets de Boucaïd et d'El Abed et évaluer plus précisément leurs potentiels de génération de drainage minier acide ou de drainage neutre contaminé, des essais en colonnes ont été effectués. Ce type de test est fréquemment utilisé pour statuer sur le potentiel de génération de drainage minier acide lorsque les essais statiques ne permettent pas la détermination d'un verdict sur ce point en raison des incertitudes reliées à la méthode. Si les rejets ne sont pas potentiellement générateurs d'acidité, les essais en colonnes vont également nous renseigner sur le potentiel de DNC. Dans cette étude, l'emphase est portée sur l'évaluation du potentiel de contamination des eaux de lixiviation par 14 éléments métallique. Trois colonnes (C1 à C3) ont été installées, contient chacune un des rejets échantillonnés.

❖ Description de l'essai en colonne :

Ce sont des essais cinétiques effectués dans des colonnes faites de PVC d'une hauteur de l'ordre de 01 m et d'un diamètre de 10 cm. une plaque perforée surmontée d'un géotextile a été posé au fond pour empêcher la migration des particules et permettre la circulation d'eau à partir de la vanne du bas. La figure ci-après illustre le principe de l'essai.

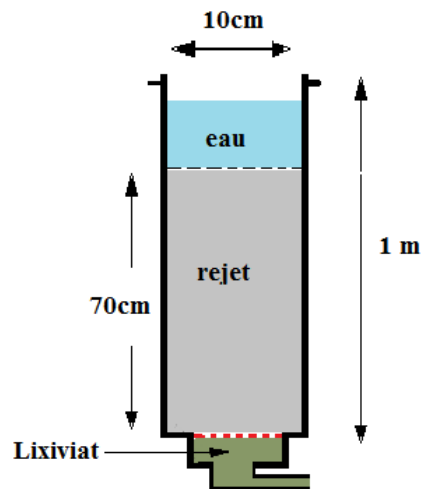


Figure IV. 8 – Schéma d'une colonne de lixiviation.

Les essais en colonnes sont réalisés au laboratoire pendant un mois. Le mouillage (ou la lixiviation) correspond à un remplissage de la colonne par 02 litres d'eau distillée (saturation). L'eau pénètre dans le résidu par gravité. Ensuite, la colonne est vidée par la vanne du bas et des analyses chimiques sont effectuées sur le lixiviat.



Figure IV. 9 – colonnes de lixiviation

1.2. Méthode de l'essai en mini-cellule d'altération :

Les essais en mini-cellules d'altération sont des versions réduites des essais en cellules humides (Villeneuve, 2004 ; Villeneuve *et al.* 2009 ; Bouzahzah, 2013 ; Bouzahzah *et al.* 2014a, b), utilisant moins de matériel (environ 67 g), lixiviant 2 fois par semaine (typiquement, les lundis et jeudis), en utilisant 50 ml d'eau dé-ionisée et laissant le matériel sécher à l'air libre entre les lixiviations. L'échantillon est placé sur un entonnoir Buchner de 10 cm de diamètre interne surmonté d'un filtre à 0,45 μm , dont l'étanchéité est assurée par l'utilisation de graisse à vide. Le lixiviat est laissé en contact avec le solide pour une période de 3 jours, Le Büchner est placé sur un support sous lequel est placé un erlenmeyer à vide de 01 L pour récupérer l'eau de lixiviation, tel que montré à la figure suivante :



Figure IV. 10 – Essais en mini-cellules d'altération.

L'eau est ensuite retirée sous vide de la cellule pour être récupérée dans l'erlenmeyer. Les paramètres analysés sur les eaux récupérées sont le pH, potentiel (ox/red), la conductivité électrique et le contenu en éléments chimiques. Le schéma présenté à la Figure 3-6 résume le matériel utilisé et les manipulations effectuées.

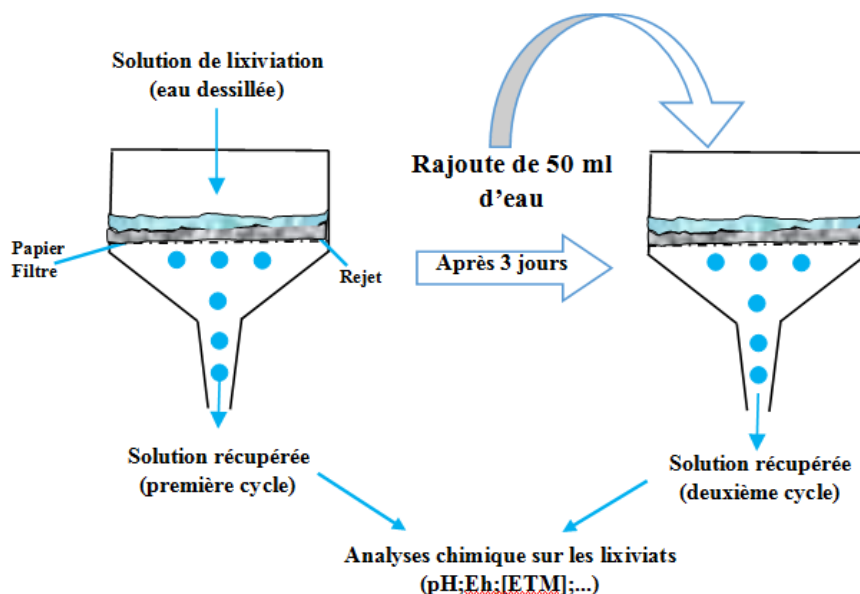


Figure IV. 11 – Schéma résumant les essais en mini-cellule d'altération.

2. Essais d'extraction :

Les essais d'extraction sont des essais permettant d'extraire les constituantes lixiviables dans les conditions auxquelles on soumet les échantillons. Généralement, ces essais consistent à exposer l'échantillon à un liquide d'extraction durant un certain temps (quelques secondes à quelques jours, avec ou sans agitation), puis à analyser les espèces chimiques extraites du solide (Benzaazoua et al, 2015).

Il existe plusieurs méthodes d'extraction, mises au point pour dissoudre et mesurer les métaux traces du sol et des rejets miniers (Mehlich, 1984 ; Black et al. 1965). Elles visent toutes à intégrer en une seule extraction la fraction labile, contribuant aux équilibres sol-solution. Les extractions simples ont été réalisées sur les échantillons séchés à l'air libre. Les solvants utilisés pour les extractions simples sont (l'eau dé-ionisée, les solutions salines, les acides dilués et les complexant organiques). Les extractions sont faites dans des tubes falcons. Un volume de solution d'extraction préalablement défini (10 ml) a donc été additionné à une quantité de minerai préalablement pesée (1g). Le mélange est maintenu sous agitation mécanique pendant 2 heures. Ensuite, on effectue une centrifugation afin de séparer le liquide du solide. Les liquides résultants des opérations d'extractions avec différents réactifs sont analysés par spectrophotomètre DR 2800 de Hach.

❖ Instruments, matériels et réactifs :

- Fiole jaugée de 200 ml.
- Entonnoirs.
- Centrifugeuse de marque sigma.

- Balance.
- Réactifs : EDTA, FeCl₂, FeSO₄ H₂O (poudre), H₂SO₄ (pureté : 96%).
- Agitateur mécanique.
- Récipient (Coupelle, verre de montre).
- Eau distillée.
- Echantillons à analyser : (rejet de la mine d'el Abed (Pb, Zn) et rejet de la mine de Boucaïd baryte et rejet (Pb, Zn)).

❖ **Préparations des solutions : EDTA, FeSO₄ H₂O et FeCl₂ (C : 0.3 M ; V : 200ml), H₂SO₄ (0.5 M ; V : 200ml) :**

- Peser **1.75 g d'EDTA** en utilisant une balance électronique de précision.
- Introduire le solide dans une fiole jaugée de volume **V = 200 ml** en utilisant un entonnoir.
- Rincer le récipient utilisé et l'entonnoir avec une pissette d'eau distillée. L'eau de rinçage doit couler dans la fiole jaugée.
- Remplir la fiole jaugée environ aux trois quarts avec de l'eau distillée. Agiter pour accélérer la dissolution et homogénéiser la solution.
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Homogénéiser le mélange.
- Refaire les mêmes étapes pour les autres solutions. Les masses à prélever :
 - 0.76 g de FeCl₂
 - 1.65 g de FeSO₄ H₂O
 - 6 ml de H₂SO₄ dilué 35 fois.

❖ **Préparation de l'échantillon :**

Un échantillon de 01 g doit être homogénéisé de façon à obtenir un mélange qui soit le plus parfait possible.

❖ **Préparation du mélange de lixiviation :**

- Peser 01 g d'échantillon préalablement homogénéisé.
- Introduire l'échantillon dans un tube falcon de 50 ml, à lequel on ajoute 10 ml de la solution préparée tout en respectant un ratio solide : liquide de 1 :10.
- Effectuer 04 essais pour chaque échantillon (Quatre solutions différentes à savoir : EDTA à 0.03 M, FeCl₂ à 0.03M, FeSO₄ H₂O à 0.03M et H₂SO₄ à 0.5M).
- Agiter la solution à l'aide d'un agitateur mécanique pendant 2h.
- Réaliser une séparation des phases solides et liquides par centrifugeuse de marque sigma.

Tableau IV. 13– Essais d'extraction en fonction des classes granulométriques.

Type de rejet	Type de solution	classes granulométriques (mm)
Rejets d'el Abed (Pb-Zn)	Test 01=>EDTA [0.03]M	[- 0,315 +0,16]
		[-0,16 +0,08]
Rejets de Boucaïd (Pb-Zn)	Test 02 => FeCl ₂ [0.03]M Test 03 => FeSO ₄ H ₂ O [0.03]M	[-0,5 +0,25]
		[-0,25 +0,125]
		[-0,125 + 0.063]
Rejet de Boucaïd (Pb-baryte)	Test 04 =>H ₂ SO ₄ [0.5]M	[-0,5 +0,125] sans broyage
		[-0,125 + 0,063]
		[-10 + 1] avec broyage



Figure IV. 12 – Essais d'extraction des rejets à analyser



Figure IV. 13 – Agitateur mécanique.

3. Essais statiques de prédiction

Le potentiel de génération d'acide peut être évalué à l'aide des essais statiques de prédiction du DMA. Ces essais consistent généralement à faire le bilan entre le potentiel de génération d'acide (PA) et le potentiel de neutralisation d'acide (PN).

Les tests statiques se déroulent en général en deux étapes distinctes : (1) la détermination du PA relié à la présence des minéraux générateurs d'acidité (acidogènes) ; (2) la détermination du PN associé aux minéraux neutralisants (acidivores).

3.1 Pouvoir neutralisant (norme NQ 0419-090) :

Une portion d'échantillon séché est mise en contact avec une solution d'acide chlorhydrique. L'excès d'acide est titré avec une solution d'hydroxyde de sodium jusqu'à l'obtention d'un pH de 7,0. Le pouvoir neutralisant est exprimé par un pourcentage en équivalent de CaCO_3 (% E.C.C.) de la masse sèche.

❖ Instruments, matériels et réactifs :

- Etuve à $104^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.
- pH-mètre.
- Plaque agitatrice.
- Fioles de 1 L.
- Pipette.
- Hydroxyde de sodium NaOH, acide chlorhydrique, carbonate de sodium.

❖ Préparation des échantillons :

L'échantillon est séché à $104^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et broyé si nécessaire. Utiliser la portion inférieure à $150\ \mu\text{m}$ (dans notre cas $125\ \mu\text{m}$).

❖ Étalonage de la solution d'acide chlorhydrique 1,0 N :

- Introduire, à l'aide d'une pipette, 40 ml de la solution de Na_2CO_3 d'environ 0,4 N dans un bécher de 250 ml.
- Diluer à environ 100 ml avec de l'eau, plonger l'électrode pour le pH et titrer avec la solution d'acide chlorhydrique 1,0 N jusqu'à l'obtention d'un pH de 4,5. Noter le volume ajouté.

La concentration de HCl exprimée en normalité est calculée de la façon suivante :

$$N = \frac{A \times B}{53 \times C \times V}$$

Où

N : normalité de la solution de HCl (N) ;

A : poids de Na₂CO₃ utilisé pour la préparation de la solution de Na₂CO₃ d'environ 0,4 N (g) ;

B : volume de la solution de Na₂CO₃ d'environ 0,4 N utilisé (40 ml) ;

C : volume de la solution de HCl utilisé (ml) ;

V : volume de Na₂CO₃ préparé (l) ;

53 : poids d'un équivalent de Na₂CO₃ (g).

❖ **Étalonnage de la solution d'hydroxyde de sodium 1,0 N :**

- Introduire à l'aide d'une pipette, 10 ml de la solution de NaOH d'environ 1,0 N dans un Bêcher de 150 ml.
- Diluer à environ 50 ml avec de l'eau, plonger l'électrode pour le pH et titrer jusqu'à l'obtention d'un pH de 8,7 avec la solution de HCl 1,0 N. Noter le volume ajouté.

À partir du pH de 9,7, il suffit d'environ une goutte pour obtenir un pH d'environ 7.

La concentration de NaOH exprimée en normalité est calculée de la façon suivante :

$$N = \frac{A \times B}{C}$$

Où

N : normalité de la solution de NaOH (N) ;

A : volume de la solution de HCl utilisé (ml) ;

B : normalité de la solution de HCl (N) ;

C : volume de la solution de NaOH utilisé (10 ml).

❖ **Dosage :**

- Peser exactement environ 1,50 g d'échantillon dans un bêcher de 250 ml.
- Ajouter 50 ml de HCl 1,0 N, couvrir d'un verre de montre et porter à ébullition très lentement sur une plaque chauffante. Maintenir l'ébullition pendant 5 minutes.
- Chauffer sur une plaque chauffante pendant 3 heures à une température de 55 °C ± 5 °C.
- Laisser refroidir et rincer le verre de montre avec de l'eau dans le bêcher.
- Plonger l'électrode pour le pH dans la solution.

- Titrer rapidement avec la solution de NaOH 1,0 N jusqu'à l'obtention d'un pH de 2,0, puis continuer graduellement jusqu'à l'obtention d'un pH de 7,0 constant pendant 1 minute.
- Noter le volume de NaOH 1,0 N nécessaire pour effectuer le titrage.

❖ **Les formules de calculs :**

Le pouvoir neutralisant exprimé en pourcentage de la masse sèche est déterminé comme suit :

$$C = \frac{5 \times [(A \times B) - (D \times E)]}{F}$$

Où

C : pouvoir neutralisant (% E.C.C.) ;

A : normalité de la solution de HCl utilisé (N) ;

B : volume de la solution de HCl utilisé (ml) ;

D : normalité de la solution de NaOH utilisé (N) ;

E : volume de la solution de NaOH utilisé (ml) ;

F : poids d'échantillon utilisé (g).



Figure IV. 14 - Titration de NaCl (0.01N) par HCl(0.01N) jusqu'à l'obtention d'un pH de 7,0.

3.2 Potentiel de génération d'acide :

Le potentiel de génération d'acide des résidus industriels inorganiques est utilisé pour déterminer si le résidu peut être générateur d'acide dans l'environnement.

Le potentiel d'acidité maximal (PA) exprimé en kg CaCO₃/tonne métrique est déterminé comme Suit :

$$A = S \times 31,25$$

Où

A : potentiel d'acidité maximal (kg CaCO₃/tonne métrique) ;

S : pourcentage de sulfure (%).

IV.7 Analyses électrochimiques et chimiques des échantillons (lixiviats) :

IV.7.1. Analyses électrochimiques :

Les analyses électrochimiques comprennent les mesures du pH des échantillons liquides.

a) pH :

Le pH permet de déterminer l'aptitude du matériau à neutraliser les solutions acides ou basiques auxquelles il est soumis à l'aide d'un pH-mètre selon la norme AFNOR NF X31-103 (1992). La spéciation, la mobilité et la biodisponibilité des éléments traces métalliques sont liées à la valeur du pH. La valeur du pH a été mesurée à l'aide d'une électrode de verre de type **HANNA**, couplée à un appareil **JUNWAY 3510**.



Figure IV. 15 – pH-mètre.

IV.7.2. Caractérisation chimique des lixiviats :

La caractérisation chimique des lixiviats de tous les tests effectués (Essais en colonnes, en mini-cellule d'altération et d'extraction) a été réalisée au laboratoire de Génie Minier de l'ENP à l'aide d'un **Spectrophotomètre DR 2800**.

Le spectrophotomètre DR2800 technologie RBT est destiné à identifier les composés chimiques présents dans l'eau, par balayage de longueurs d'onde. Etant un appareil indispensable, ce spectromètre permet de donner la concentration de ces espèces dans l'eau analysée.

Grâce à son faisceau de référence intégré, le spectrophotomètre DR2800 technologie permet de mesurer l'absorbance d'une solution à une longueur d'onde donnée ou sur une région donnée du spectre. Selon la loi de Beer-Lambert, l'absorbance d'une solution est proportionnelle à la concentration des substances en solution.

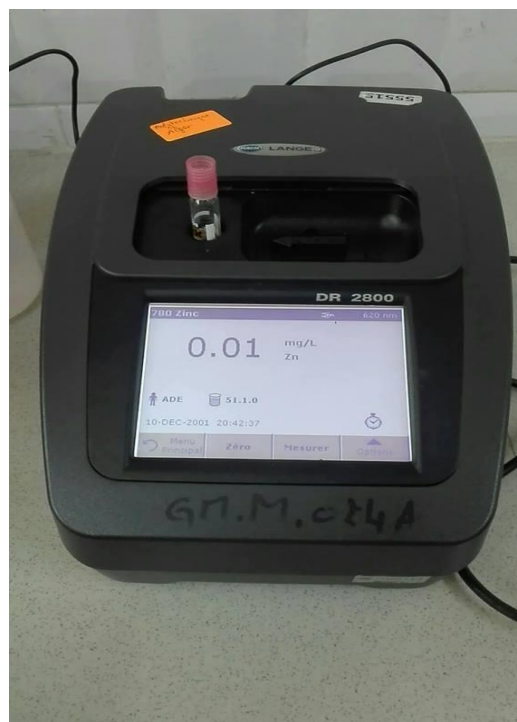


Figure IV. 16– Spectrophotomètre DR 2800.

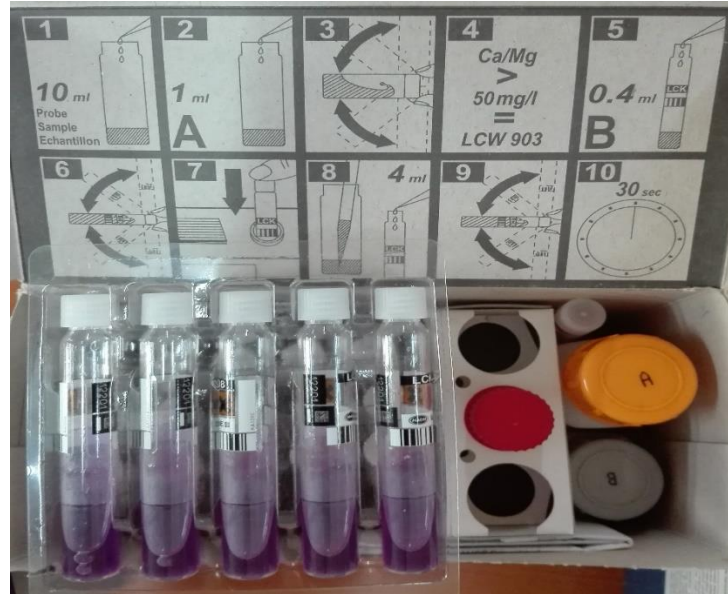


Figure IV. 17 – Protocole d'étalonnage du cadmium (Cd).

IV.8 Conclusion

L'objectif de notre étude consistera à étudier le comportement des échantillons composites, plus moins représentatif de l'ensemble des différents digues (Boucaïd et Abed), De nombreux essais de comportement ont été mis au point pour évaluer le potentiel polluant des déchets lors de l'ensemble d'essais de préparation.

Ces tests qualifiés de paramétriques, fournissent des informations liées aux conditions expérimentales spécifiques du protocole mis en œuvre. Ils doivent être combinés à une connaissance en laboratoire.

Actuellement, les essais de lixiviation constituent l'approche la plus usitée qui exige tout un traitement préalable et une manipulation délicate afin d'avoir des résultats satisfaisants.

Les essais cinétiques (les essais de colonnes, mini de cellule d'altération) et statiques apportent des informations sur la mobilité des métaux ainsi que potentiel de génération de DMA. Tandis que les essais dans les tubes falcons permettent d'extraire l'élément métallique par solubilisation.

Chapitre V : Interprétation des résultats

V.1 - Résultats de l'analyse granulométrique :

Après la pesée des refus de chaque tamis, on calcule les rendements cumulés refus/tamisât, ces calculs nous permettent de tracer la courbe granulométrique. Les résultats sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V. 1 - Résultat d'Analyse granulométrique d'un échantillon de rejet Boucaïd (Baryte).

Tamis (mm)	Refus de chaque tamis (g)	Refus cumulés de chaque tamis en g	Refus cumulés de chaque tamis en %	Tamisât cumulés en %
10	115	115	8,85	91,15
8	113	228	17,54	82,46
5	190	418	32,15	67,85
4	187	605	46,54	53,46
1	156	761	58,54	41,46
0,5	122	883	67,92	32,08
0,25	115	998	76,77	23,23
0,125	147	1145	88,08	11,92
0,063	133	1278	98,31	1,69
0,04	17	1295	99,62	0,38
Fines	5	1300	100,00	0,00
M0	1300	/	/	/

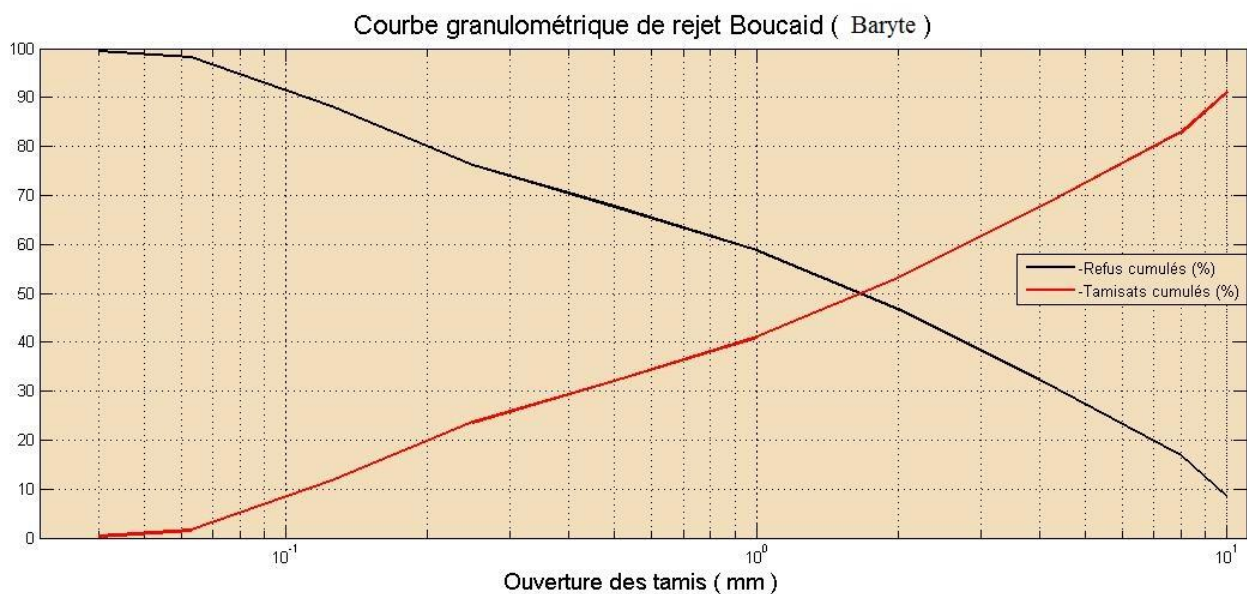


Figure V. 1 - Courbe granulométrique de rejet Boucaïd (Baryte)

Tableau V. 2 - Résultat d'Analyse granulométrique d'un échantillon de rejet Boucaïd (Pb-Zn).

Tamis (mm)	Refus de chaque tamis (g)	Refus cumulés de chaque tamis en (g)	Refus cumulés de chaque tamis en %	Tamisât cumulés en %
0,5	163	163	10,56	89,44
0,315	244	407	26,36	73,64
0,25	153	560	36,27	63,73
0,125	472	1032	66,84	33,16
0,063	314	1346	87,18	12,82
0,04	145	1491	96,57	3,43
Fines	9	1500	97,15	2,85
M0	1500	/	/	/

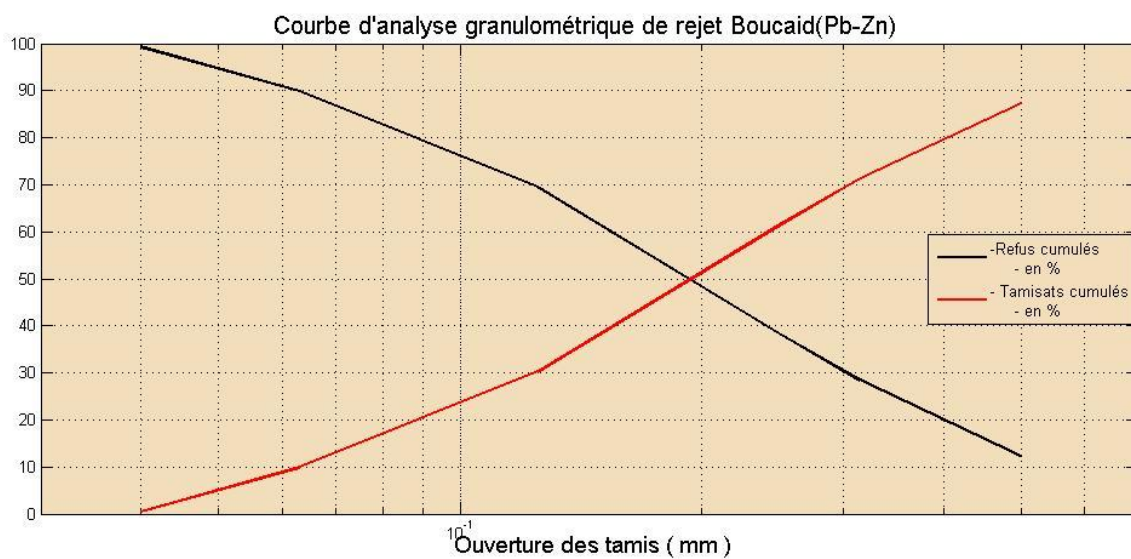


Figure V. 2 - Courbe granulométrique de rejet Boucaïd (Pb-Zn).

Tableau V. 3 - Résultat d'Analyse granulométrique d'un échantillon de rejet d'el Abed.

Tamis (mm)	Refus de chaque tamis (g)	Refus cumulés de chaque tamis en (g)	Refus cumulés de chaque tamis en %	Tamisât cumulés en %
0,5	57	57	3,63	96,37
0,315	310	367	23,38	76,62
0,25	243	610	38,85	61,15
0,16	402	1012	64,46	35,54
0,125	170	1182	75,29	24,71
0,08	144	1326	84,46	15,54
0,063	133	1459	92,93	7,07
0,04	25	1484	94,52	5,48
fines	16	1500	95,54	4,46
Mo	1500	/	/	/

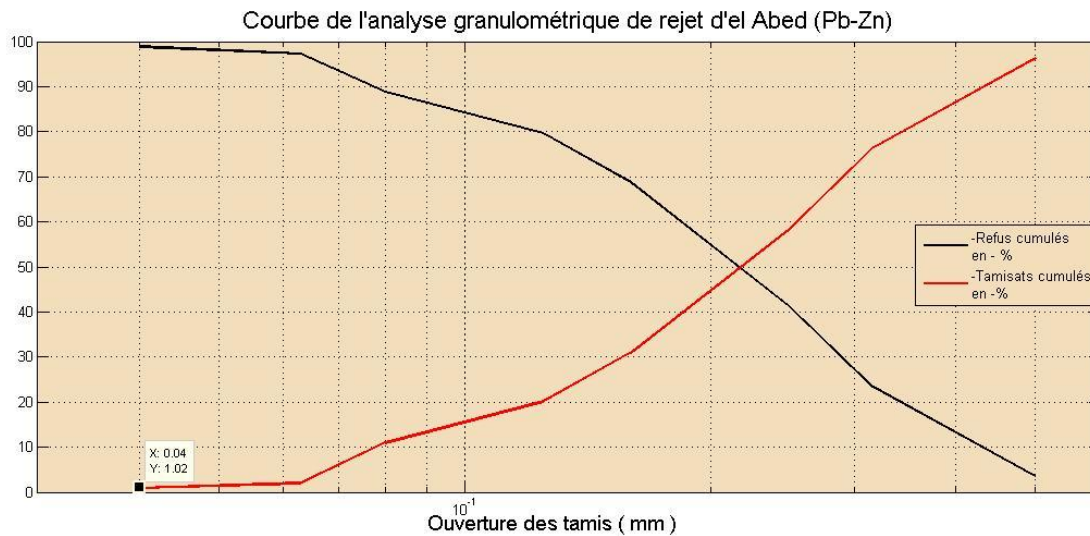


Figure V. 3 - Courbe granulométrique de rejet d'el Abed (Pb-Zn).

Pour connaître le comportement de notre rejet vis-à-vis de l'analyse granulométrique, il y a des coefficients qui nous permettent de déduire l'aspect granulométrique de notre échantillon (serré, étalé, peu de particules fine, ...). Ces coefficients sont : **Cu**, **Cc**.

Avec :

- Cu coefficient d'uniformité d_{60}/d_{10} (dit de Hazen) ;
- Cc coefficient de courbure $(d_{30})^2/d_{60} \times d_{10}$.

D10, D30 et D60 : sont les diamètres efficaces (en mm) des tamis laissant passer respectivement 10%, 30% et 60%.

Coefficient d'uniformité (Hazen) Ce coefficient permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée. $Cu > 2 \rightarrow$ granulométrie étalée $Cu < 2 \rightarrow$ granulométrie uniforme ou serrée

Coefficient de courbure :

Afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée ou mal graduée (un sol est mal gradué si une fraction de grains prédomine)

Si $1 < Cc < 3$: La continuité est bien répartie ou sol bien gradué Si $Cc < 1$ ou $Cc > 3$: La continuité est mal répartie ou sol mal gradué.

Tableau V. 4 - tableau regroupant Les indices granulométriques.

Type de rejets	D ₈₀	D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c
Rejet d'el Abed (Pb-Zn)	0,33	0,24	0,17	0,07	3,43	1,72
Rejet de Boucaïd (Pb-Zn)	0,50	0,23	0,13	0,06	3,71	1,19
Rejet de Boucaïd (Baryte)	7,00	1,90	0,40	0,11	18,10	0,80

D'après les résultats de tableau V.1 :

On note que le coefficient d'uniformité **C_u** pour les trois rejets (El Abed, Boucaïd (Pb, Zn) et Boucaïd Plomb-baryte) est supérieur à **2**, la granulométrie des échantillons est donc étalée. Cela nous laisse dire que la résistance mécanique des différents composants minéralogiques des échantillons soit très variable.

Pour le coefficient de courbure des rejets de Boucaïd (Pb, Zn) et d'El Abed, il est compris entre **1 < C_c < 3** donc on peut dire que la granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie). Tandis que le rejet de **baryte**, il a un coefficient de courbure inférieur à **1**, de ce fait la granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

Résultats de l'essai de l'extraction séquentielle par spectrophotomètre DR2800 :

Cette partie regroupe les résultats de l'essai de l'extraction séquentielle. Le tableau ci-après présente les concentrations initiales des lixiviats de chaque rejet.

Tableau V. 5 - Résultats de l'essai de l'extraction séquentielle.

Éléments (mg/L)	Lixiviat de rejet d'el Abed (Pb-Zn)	Lixiviat de rejet de Boucaïd (Pb-Zn)	Lixiviat de rejet de Boucaïd (Baryte)
Al	2,86	0,965	2,88
Ag	1,7	0,55	1,65
Ba	260	90	270
Cd	0,275	0,09	0,285
Cn-	0,525	0,15	0,45
Co	4,95	1,55	3,15
Cr+6	2,07	0,665	1,95
Mo	101,5	31,5	105
K	24,5	10	28,5
Ni	0,36	0,1	1,065
Zn	5,8	1,45	4,8
Fe	8,9	2,45	7,95
Selenium	0	1,45	5,4
Sio2	499	127,5	475,5
Sulfate	150	45	165
Sulfur	2,295	0,61	1,965

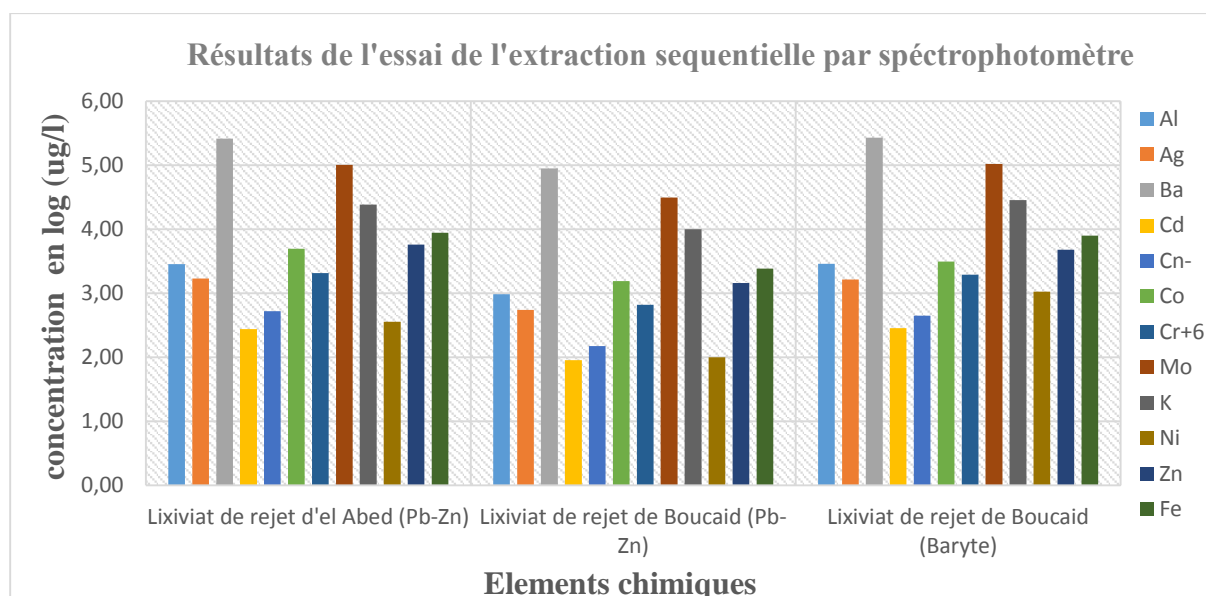


Figure V. 4 - résultats de l'extraction séquentielle.

Les résultats montrent les concentrations des éléments métalliques contenus dans les rejets d'el Abed et Boucaïd (Baryte, Pb-Zn). Ces rejets ont été traités par mélange de plusieurs acides forts. Nous constatons que les concentrations sont considérables en matière de métaux lourds dont (Cr, Pb, Cd, Co, Ni, Mo, Ba...), cela explique un haut risque de contamination des eaux de surfaces et souterraines, les sols agricoles et les zones environnantes.

V.2 - Résultats de l'essai de pouvoir neutralisants(PN) et potentiel de génération d'acide(PA) (MA. 110 – ACISOL 1.0, (4 jan 2014)) :

Les tests statiques chimiques et minéralogiques se déroulent en général en deux étapes distinctes : (1) la détermination du PA relié à la présence des minéraux générateurs d'acidité (acidogènes) ; (2) la détermination du PN associé aux minéraux neutralisants (acidivores). Les principaux tests statiques sont résumés dans les tableaux V.6.

Il est à noter que pour calculer le potentiel de génération d'acide PA, nous avons pris la teneur initiale en soufre mesurée par spectrophotomètre DR 2800.

Tableau V. 6 – résultats des essais de PA et PN.

Type de rejets	PN(%E.C.C)	PA(KgCaCO ₃ /Tonne Métrique)	Rapport (PN/PA)
Abed (Pb-Zn)	88	0.49	1.79
Boucaïd (Pb-Zn)	71	0.14	4.96
Boucaïd (Baryte)	35.33	0.56	0.62

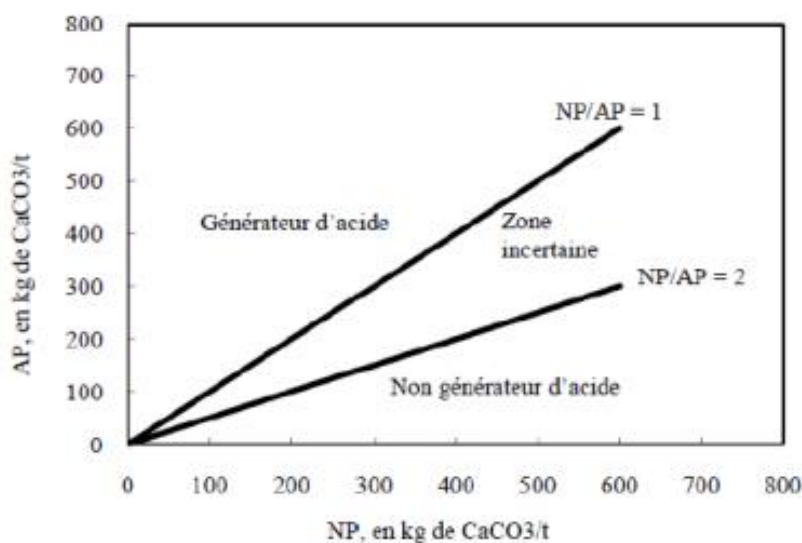


Figure V. 5 – Classification des tailings à base du rapport NP/AP [3].

La classification des rejets miniers est basée sur une comparaison entre le PA et le PN obtenus par les tests statiques. Il existe un critère de classification : (rapport PN/PA). Cette classification est différente selon les auteurs et selon le NPR. L'ensemble de ces critères est représenté graphiquement à la figure V.5.

On peut classer les rejets, selon la norme PGA, en des rejets générateurs d'acide ou non générateur d'acide

Pour ce critère de classification, on retrouve deux zones pour lesquelles la nature des rejets miniers est bien classifiée, soit générateur ou non générateur d'acide. La zone des « non générateurs » d'acidité correspond aux rejets miniers renfermant une plus faible quantité de minéraux acidogènes (sulfures) par rapport à la quantité de minéraux neutralisants. Inversement, il existe une zone où les rejets sont classifiés comme générateurs d'acidité, pour les rejets contenant nettement plus de minéraux acidogènes que neutralisants.

D'après les résultats obtenus :

- ✓ Rejet d'El Abed : ce rejet se trouve dans la zone incertaine. Donc, la nature du matériel est difficile à définir par rapport à son potentiel de génération d'acide.
- ✓ Rejet de Boucaïd (Pb-Zn) : non-générateur d'acide.
- ✓ Rejet de Boucaïd (baryte) : générateur d'acide.

V.3 - Résultats des essais en colonnes :

Les résultats des analyses des lixiviats échantillonnés lors des essais en colonne pendant un mois sont présentés dans le tableau (V.7) ci-dessous. Quatorze éléments sont analysés par spectrophotomètre DR2800 : Argent (Ag), Aluminium (Al), Baryum (Ba), Cadmium (Cd), CN, Cobalt, Cr, Fer, Potassium (K), molybdène (Mo), nickel (Ni), sulfate(SO₄), sulfure(S) et zinc (Zn), Pour cause de manque de moyens d'analyse de certains éléments tels que le cuivre (Cu), le plomb (Pb) et le titane (Ti), nous n'avons pas pu étudier la distribution de tous les éléments métalliques comme le cuivre(Cu) et le plomb(Pb).

Tableau V. 7 - Résultats d'analyse des différentes lixiviats des essais en colonnes.

C :[élément] en (mg/L)	Lixiviat de rejet d'el Abed(Pb-Zn)	Lixiviat de rejet de Boucaïd(Pb-Zn)	Lixiviat de rejet de Boucaïd (Baryte)
Ag	0,01	0,02	0,11
Al	0,045	0,021	0,197
Ba	6	2	17
Cd	0,0035	0,0037	0,0194
Cn-	0,005	0,005	0,035
Co	0,05	1,7	0,33
Cr	0,019	0,015	0,14
Fe	0,03	0,12	0,64
K	0,2	0,4	2,5
Mo	1,6	1	7
Ni	0,006	0,008	0,023
Zn	0,02	0,03	0,39
Sulfate	2	5	10
sulfur	0.008	0.01	0.16

Pour pouvoir mieux interpréter les résultats obtenus, nous les avons représentés sous forme d'histogrammes.

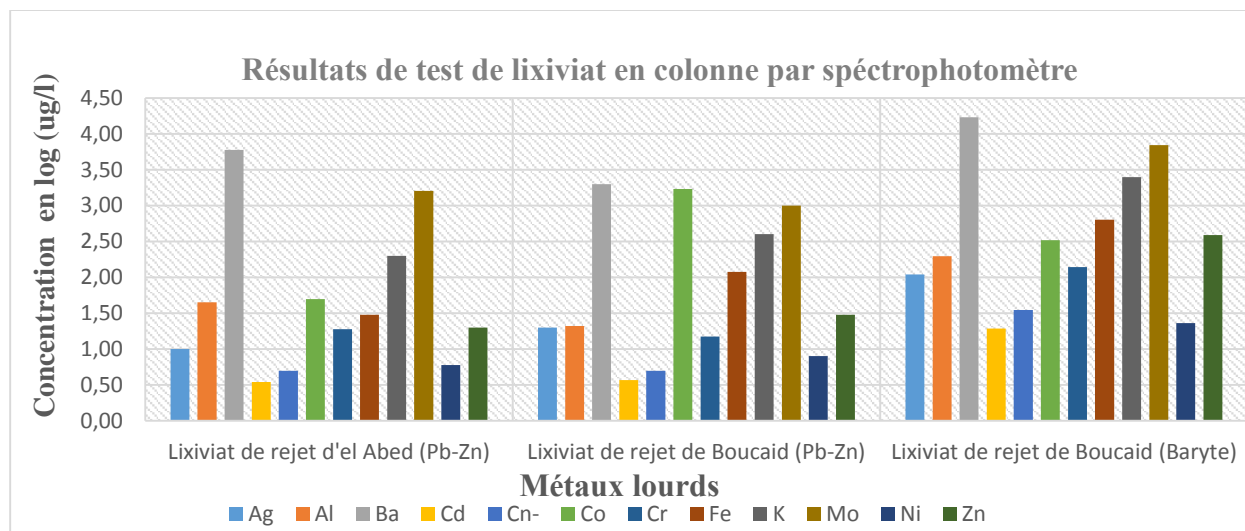


Figure V.39 - Résultats de tests des lixiviats en colonne par spectrophotomètre DR2800.

D'après les différents histogrammes qui représentent les valeurs de concentrations des métaux contenus dans les lixiviats des rejets, on note que :

En ce qui concerne les rejets de Boucaïd (Pb-Zn), nous constatons que le baryum (2mg/l), cobalt (1.7mg/l) et molybdène (1mg/l) présentent des quantités élevées due à la forte solubilité dans l'eau par rapport aux autres métaux tandis que Les histogrammes de la répartition des éléments métalliques dans les rejets de Boucaïd (baryte) montrent des valeurs considérablement importantes en baryum (17mg/l), molybdène (7mg/l) et potassium (2.5mg/l). Les autres métaux Ag, Al, Cd, Cr, Zn, Fe, Co et Ni se trouvent en faibles quantités, Ag (0.11mg/l), Al (0.197mg/l) et Cd (0.0194mg/l).

En revanche, les teneurs des métaux dans les lixiviats des rejets d'el Abed indiquent l'existence de baryum (6mg/l), molybdène (1.6mg/l) en grandes quantités avec des concentrations élevées en cobalt (50µg/l), aluminium (45 µg/l), fer (30 µg/l) et zinc (20 µg/l). Les autres métaux Ag, Cd et Ni se trouvent en faibles teneurs.

De plus, les teneurs en sulfates se trouvent en quantité importante dans les trois types de rejets, on note aussi que les sulfures se présentent en traces dans les trois types de rejets (<16 µg/l).

Il est à noter que les éléments ayant la forte mobilité sont : Ba, Mo, K, due à la forte solubilité dans l'eau distillée.

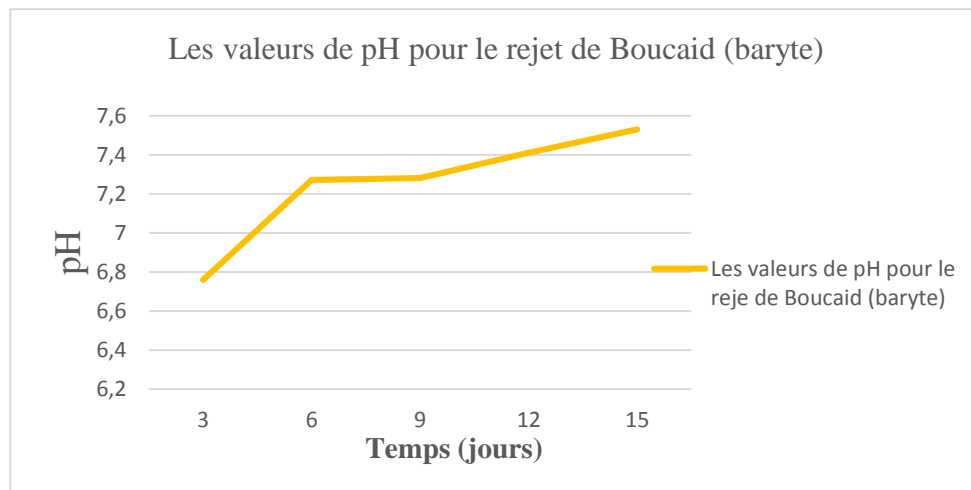
Nous constatons que les minéraux sulfatés sont plus altérables (oxydables) par rapport aux minéraux sulfurés en fonction du temps.

V.4 - Résultats des essais de mini cellules d'altération :

Les analyses élémentaires ont été effectuées sur les lixiviats. Les figures ci- après présentent les caractéristiques électrochimiques (pH) des lixiviats récupérés des essais en mini-cellules d'altération.

Tableau V. 8 - Analyses électrochimiques (pH) des lixiviats.

Type de lixiviats	Nombre de cycle	PH
Abed(Pb-Zn)	1	5,19
	2	7,08
	3	6,7
	4	7,6
	5	7,62
Boucaïd(Pb-Zn)	1	6,49
	2	6,55
	3	7,23
	4	7,04
	5	7,17
Boucaïd(Baryte)	1	6,76
	2	7,27
	3	7,28
	4	7,41
	5	7,53



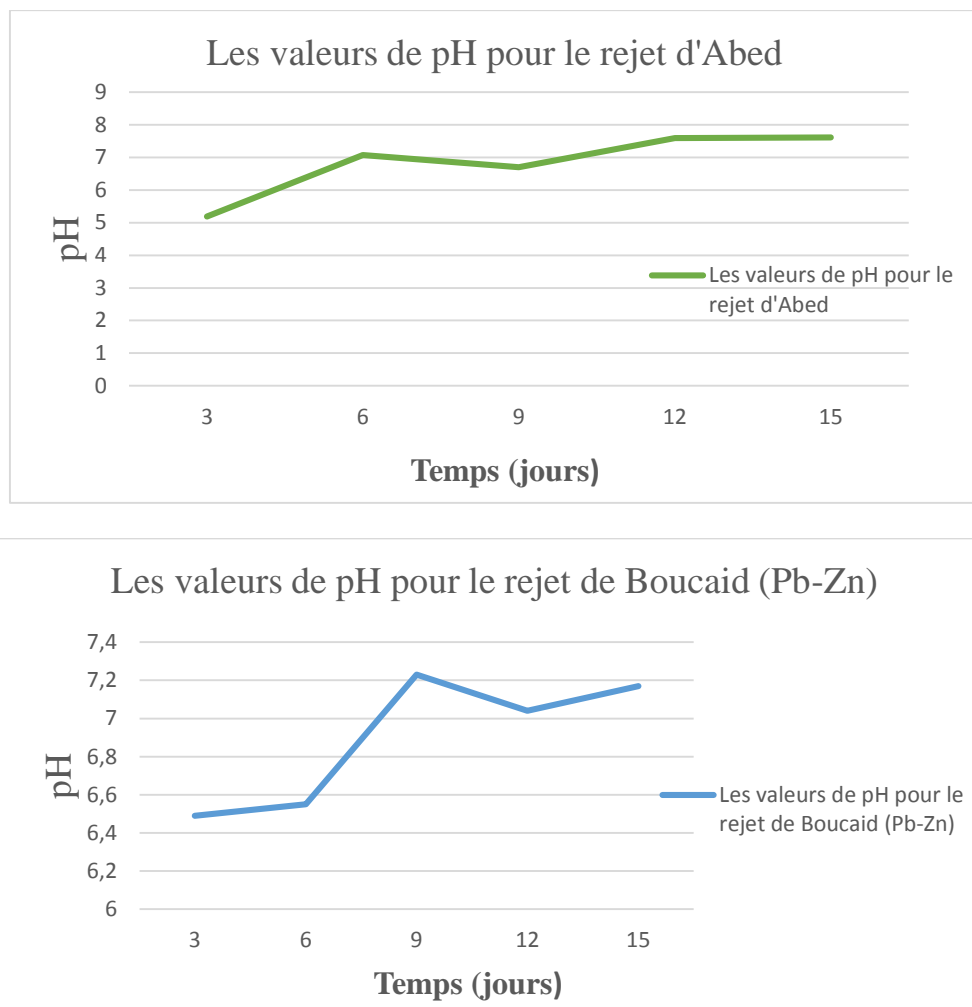


Figure V.40 : Résultats du pH dans les eaux issues des essais en mini-cellules d'altération

Le pH des 3 lixiviats varie peu globalement, et oscille autour du pH « naturel » 5.2 à 7.8. Ce pH est à relier à la présence des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) qui tamponnent le pH (neutraliser l'acidité des résidus).

Synthèse d'essais en mini cellules d'altération :

Les analyses chimiques des lixiviats ont confirmé la mobilité des éléments traces métalliques dans les résidus avec faible relargage des métaux.

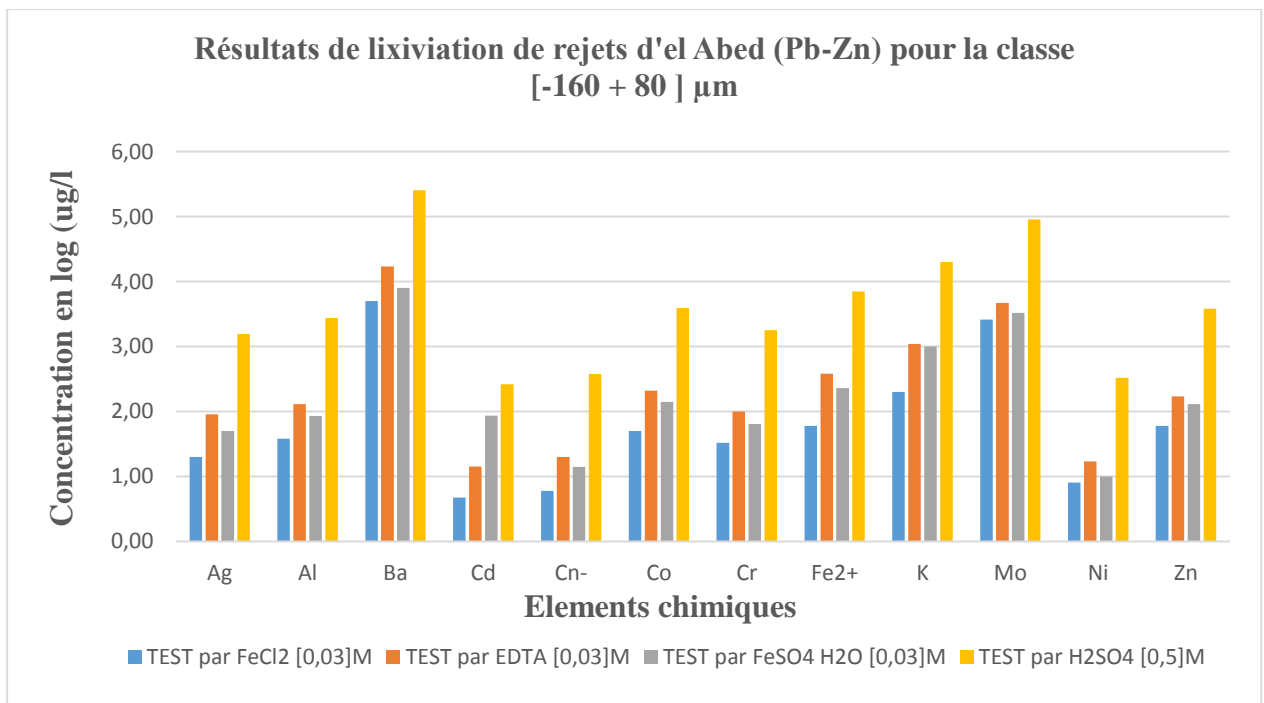
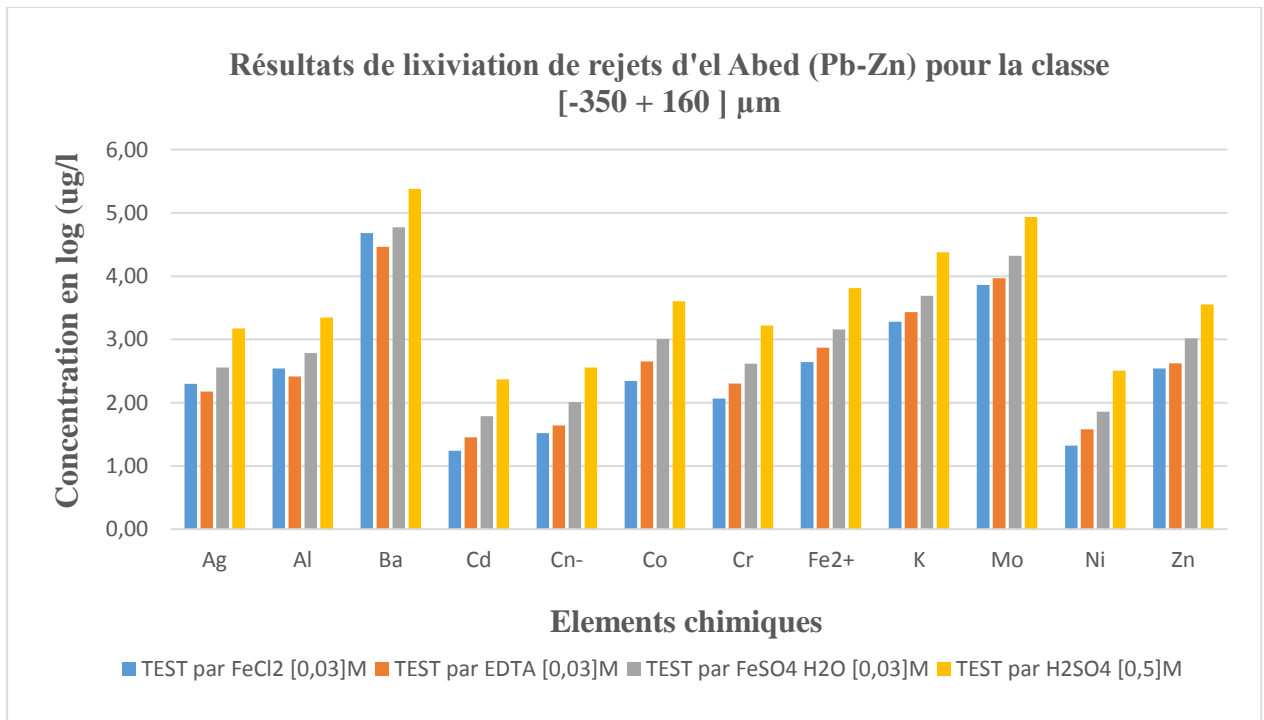
V.5 - Résultats d'essais d'extraction

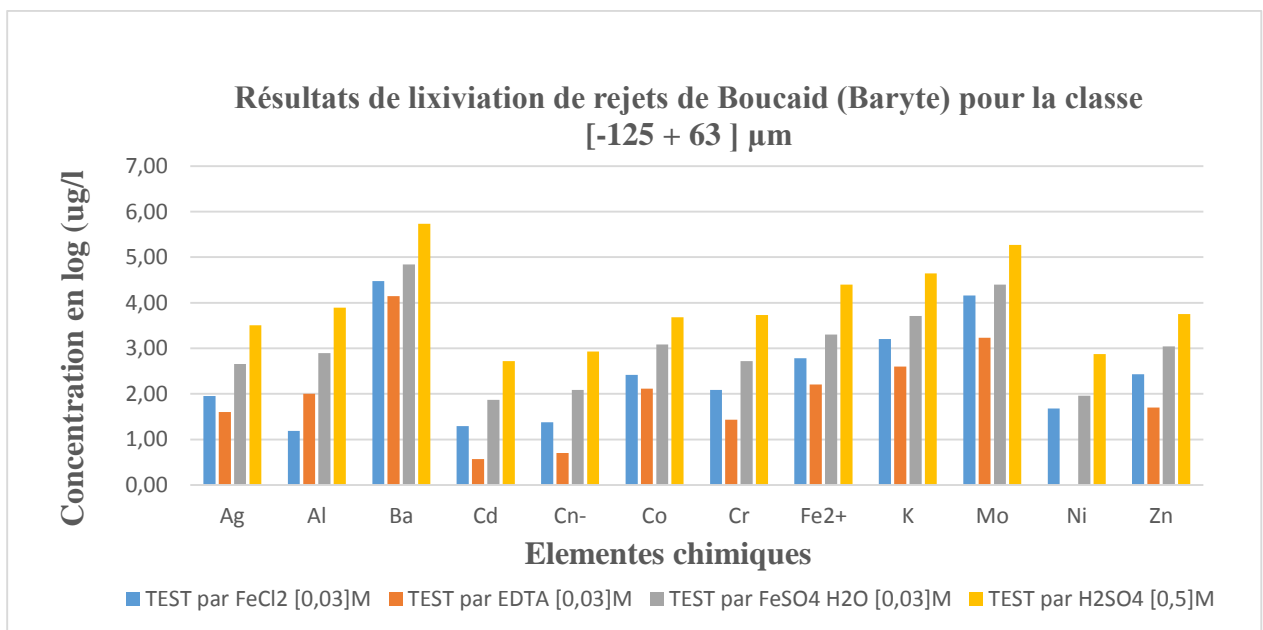
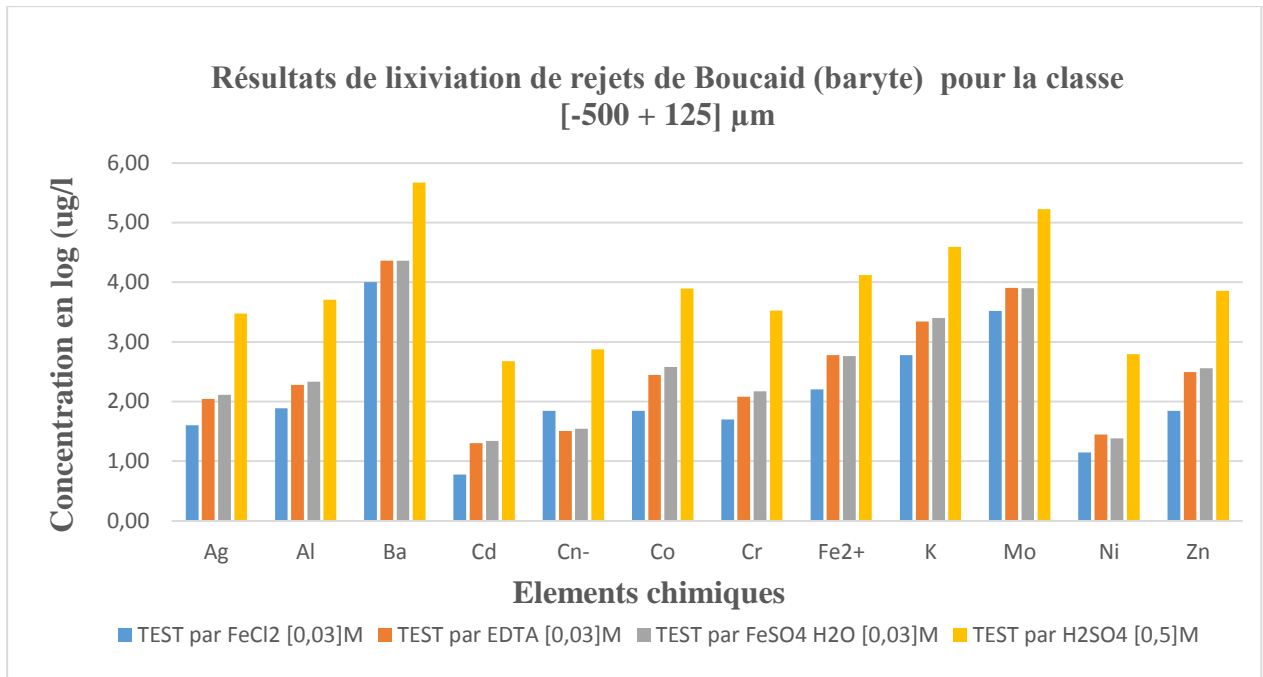
Cette section regroupe les résultats des essais d'extraction par test de lixiviation réalisés avec différents réactifs (voir Tableau V.9).

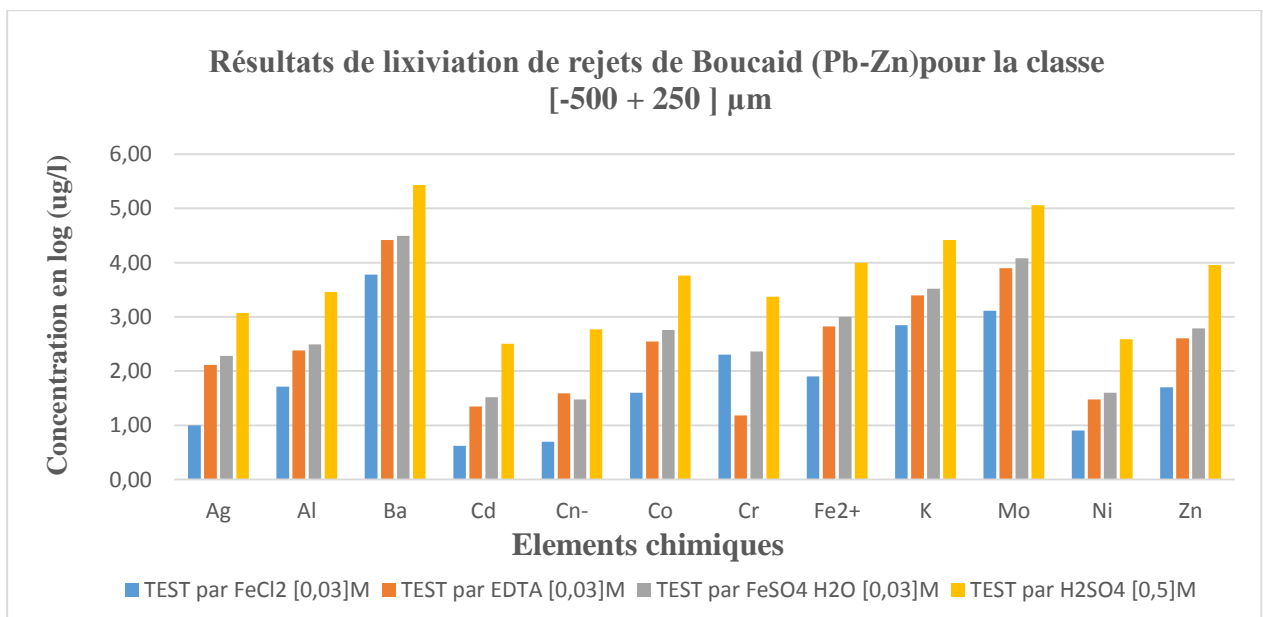
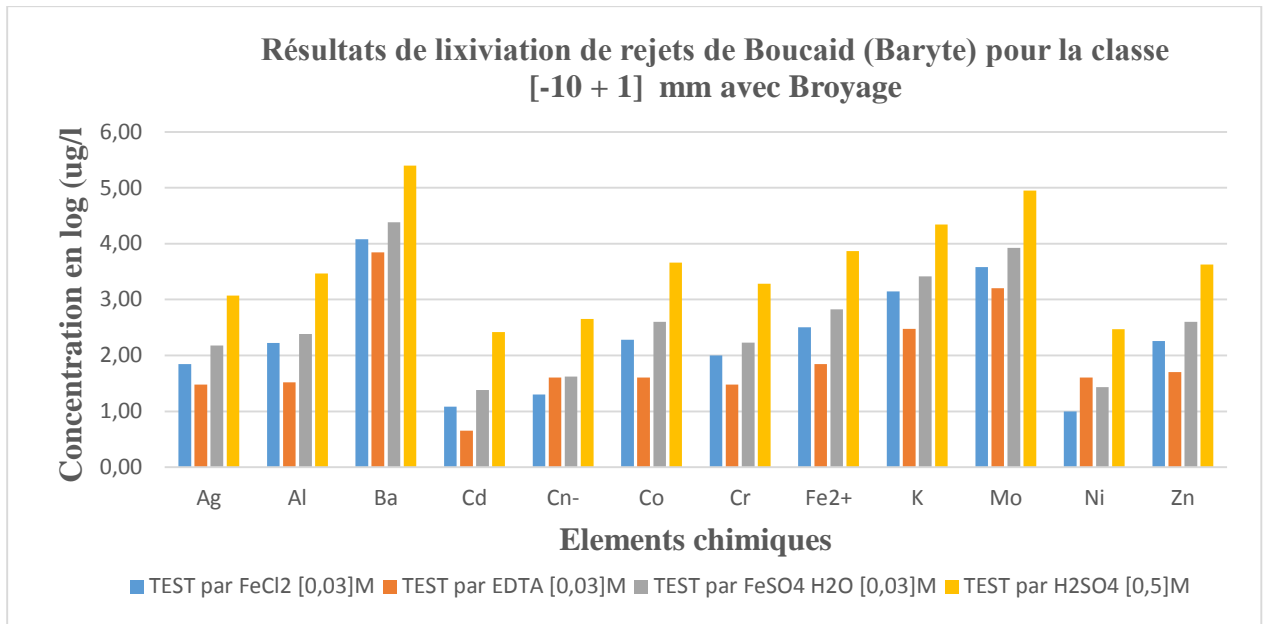
Tableau V. 9 - Résultats des essais d'extraction des lixiviats mesurés par Spectrophotomètre DR2800.

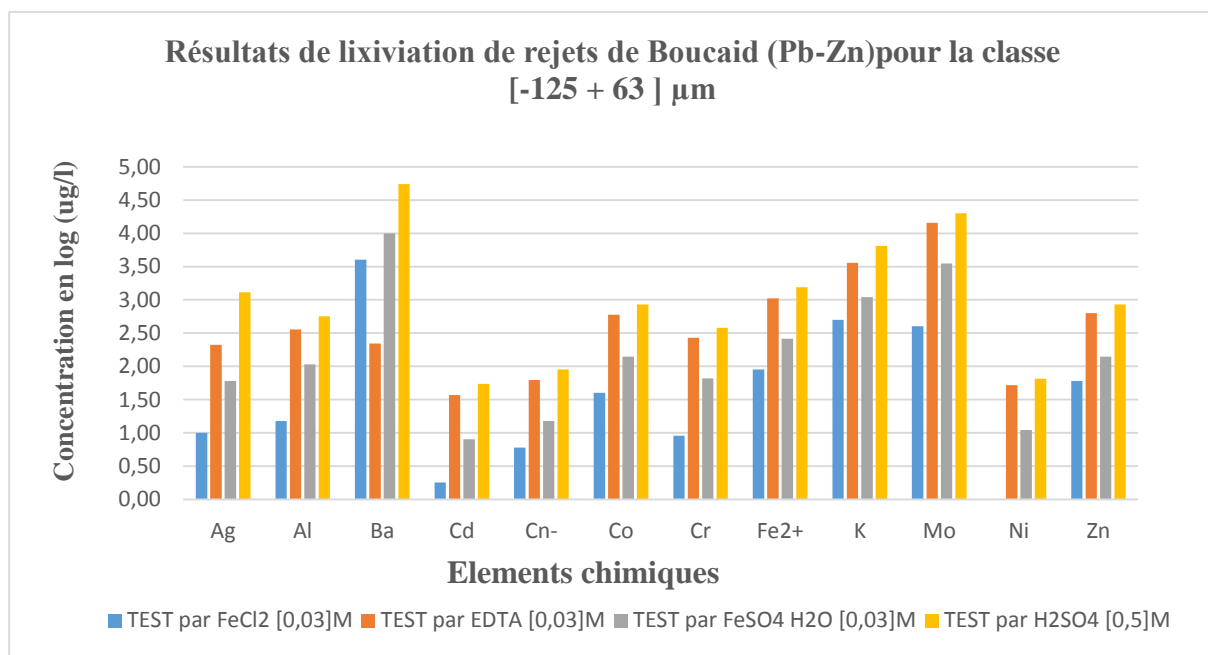
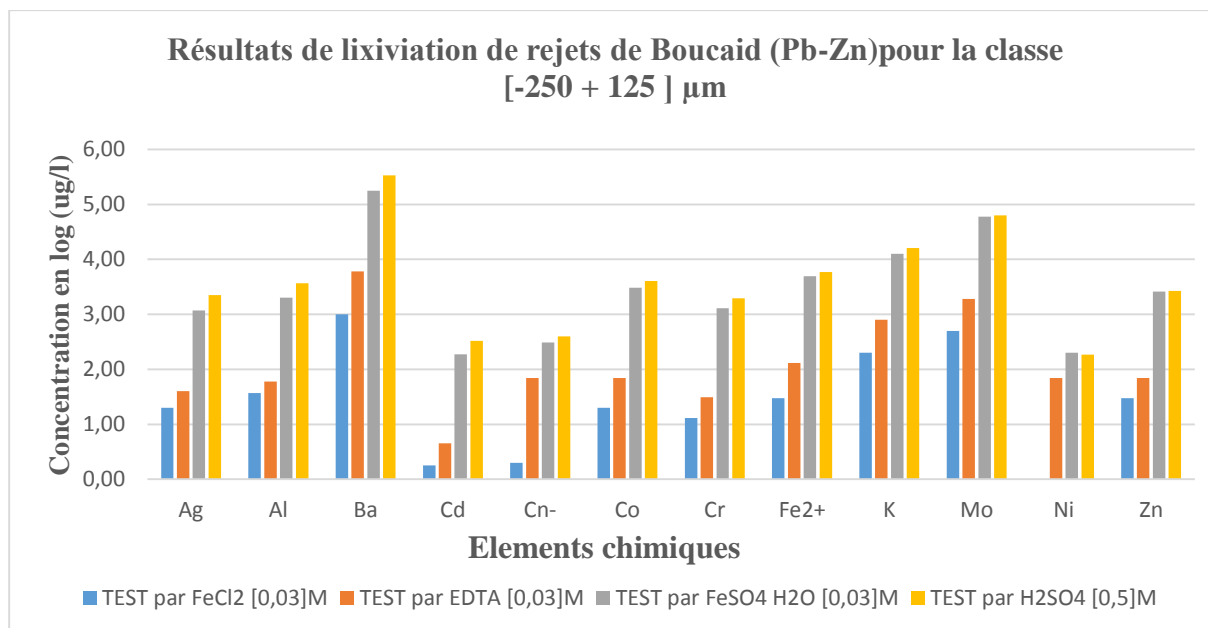
Type de réactifs	Eléments	les classes rejet d'el Abed (Pb-Zn) (μm)		les classes (rejets Boucaïd (baryte))(μm)			les classes (rejets Boucaïd (Pb-Zn)(μm)		
		[- 315 +160]	[-160 + 80]	[-500 + 125]	[-125 + 63]	[-10 mm + 1mm]broyé	[-500 +250]	[-250 +125]	[-125 +63]
FeCl₂ [0.03]mol/L	Ag	0,2	0,02	0,04	0,09	0,07	0,01	0,02	0,01
	Al	0,348	0,038	0,077	0,0154	0,167	0,052	0,037	0,015
	Ba	48	5	10	30	12	6	1	4
	Cd	0,0174	0,0047	0,006	0,0197	0,0121	0,0042	0,0018	0,0018
	Cn-	0,033	0,006	0,07	0,024	0,02	0,005	0,002	0,006
	Co	0,22	0,05	0,07	0,26	0,19	0,04	0,02	0,04
	Cr	0,116	0,033	0,05	0,123	0,1	0,2	0,013	0,009
	Fe	0,44	0,06	0,16	0,61	0,32	0,08	0,03	0,09
	K	1,9	0,2	0,6	1,6	1,4	0,7	0,2	0,5
	Mo	7,3	2,6	3,3	14,5	3,8	1,3	0,5	0,4
	Ni	0,021	0,008	0,014	0,048	0,01	0,008	0,001	0
	Zn	0,35	0,06	0,07	0,27	0,18	0,05	0,03	0,06
	Sulfate	10	0	26	19	2	2	1	2
sulfur	0.072	0.003	0.153	0.114	0.018	0.025	0.019	0.029	
EDTA [0.03]mol/L	Ag	0,15	0,09	0,11	0,04	0,03	0,13	0,04	0,21
	Al	0,26	0,13	0,19	0,1	0,033	0,24	0,06	0,36
	Ba	29	17	23	14	7	26	6	22
	Cd	0,0285	0,0142	0,02	0,0037	0,0045	0,0223	0,0045	0,037
	Cn-	0,044	0,02	0,032	0,005	0,04	0,039	0,07	0,062
	Co	0,45	0,21	0,28	0,13	0,04	0,35	0,07	0,6
	Cr	0,201	0,1	0,12	0,027	0,03	0,0153	0,031	0,27
	Fe	0,74	0,38	0,6	0,16	0,07	0,67	0,13	1,05
	K	2,7	1,1	2,2	0,4	0,3	2,5	0,8	3,6
	Mo	9,3	4,7	8	1,7	1,6	7,9	1,9	14,4
	Ni	0,038	0,017	0,028	-0,018	0,04	0,03	0,07	0,052
	Zn	0,42	0,17	0,31	0,05	0,05	0,4	0,07	0,63
	Sulfate	14	6	2	10	6	1	6	32
Sulfur	0.171	0.076	0.014	0.106	0.050	0.205	0.045	0.340	

Type de réactifs	Eléments	les classes rejet d'el Abed (Pb-Zn) (μm)		les classes (rejet Boucaïd (baryte)) (μm)			les classes (rejet Boucaïd (Pb-Zn)) (μm)		
		[- 315 +160]	[-160 + 80]	[-500 + 125]	[-125 + 63]	[-10 mm + 1mm]broyé	[-500 +250]	[-250 +125]	[-125 +63]
FeSO ₄ H ₂ O [0.03]mol/ L	Ag	0.36	0.05	0.13	0.45	0.15	0.19	1.17	0.06
	Al	0.61	0.085	0.215	0.78	0.243	0.31	2.004	0.107
	Ba	59	8	23	69	24	31	177	10
	Cd	0.061 5	0.086	0.022	0.074	0.024	0.033	0.189	0.008
	Cn-	0.103	0.014	0.035	0.122	0.042	0.03	0.309	0.015
	Co	1.02	0.14	0.38	1.22	0.4	0.57	3.06	0.14
	Cr	0.416	0.064	0.148	0.52	0.17	0.232	1.296	0.066
	Fe	1.44	0.23	0.58	2	0.67	1	4.95	0.26
	K	4.9	1	2.5	5.1	2.6	3.3	12.6	1.1
	Mo	21.1	3.3	7.9	25	8.4	12	59.7	3.5
	Ni	0.072	0.01	0.024	0.092	0.027	0.04	0.201	0.011
	Zn	1.04	0.13	0.36	1.10	0.4	0.61	2.58	0.14
	Sulfate	62	51	20	24	35	50	65	10
Sulfur	0.681	0.563	0.225	0.299	0.491	0.725	0.8	0.117	
H ₂ SO ₄ [0.5]mol/L	Ag	1.5	1.55	3	3.21	1.17	1.17	2.25	0.3
	Al	2.21	2.75	5.08	7.8	2.93	2.87	3.67	0.565
	Ba	240	255	470	541	250	270	335	55
	Cd	0.234	0.261	0.476	0.528	0.262	0.321	0.331	0.054
	Cn-	0.36	0.375	0.75	0.85	0.45	0.59	0.395	0.09
	Co	4	3.9	7.8	4.78	4.55	5.8	4.05	0.85
	Cr	1.66	1.78	3.33	5.36	1.91	2.35	1.96	0.38
	Fe	6.5	7.05	13.1	25.08	7.35	9.9	5.85	1.55
	K	24	20	39	44	22	26	16.11	6.5
	Mo	86	90.5	167	186	89.5	115	63	20
	Ni	0.32	0.33	0.62	0.75	0.295	0.385	0.185	0.065
	Zn	3.6	3.8	7.2	5.62	4.25	9	2.65	0.85
	Sulfate	30	20	109	140	50	60	0	30
sulfur	0.420	0.17	0.850	1.55	0.6	0.760	0.070	0.26	









L'histogramme de la répartition des éléments métalliques dans la classe [-315 +160] de rejet d'El Abed qui est traité par les 4 réactifs (EDTA, FeCl₂, FeSO₄(H₂O)₄, H₂SO₄) montre une extraction importante des métaux lourds par l'acide sulfurique (teneur élevée) fer(6.5mg/l), cobalt(4mg/l), zinc (3.6mg/l). De plus, l'extraction par FeSO₄(H₂O)₄ est moins importante qu'en utilisant l'acide sulfurique mais plus efficace qu'avec (EDTA, FeCl₂).

Pour la classe [-160 +80] on observe que la concentration en métaux lourds est meilleure que la classe précédente.

D'après ces résultats, nous constatons que la classe [-160 +80] contient plus de métaux extraits à l'aide de l'acide sulfurique. C'est le réactif le plus efficace pour cette extraction.

Les résultats enregistrés dans l'échantillon de Boucaïd (baryte) montrent des concentrations différentes pour les trois classes choisies pour ce traitement (EDTA, FeCl_2 , $\text{FeSO}_4(\text{H}_2\text{O})_4$, H_2SO_4)

Pour toutes les classes, on observe des valeurs élevées de concentration de baryum, molybdène, fer, cobalt et aluminium par rapport aux autres éléments avec ces 4 réactifs et aussi la meilleure récupération des métaux par le biais de l'acide sulfurique. Nous constatons que les teneurs en métaux lourds sont plus élevées dans la classe [-125 +63].

D'après les histogrammes des concentrations en métaux lourds pour les classes que nous avons choisies (voir le tableau V.9) (en utilisant le même procédé que celui de Boucaïd (Pb-Ba)). Nous remarquons que les concentrations de baryum, molybdène, fer, cobalt et aluminium de la classe (-125 + 63). Concernant les lixiviats de Boucaïd (Pb-Zn) montrent également que l'échantillon a la teneur en zinc la plus élevée. Pour les deux tests (EDTA, FeCl_2) par contre ; les métaux sont présents en grande concentration pour la classe (-500 +250) qui est traitée par les lixivants (H_2SO_4 et $\text{FeSO}_4 \text{H}_2\text{O}$).

D'après l'histogramme des concentrations en métaux lourds de l'échantillon Boucaïd(Pb-Zn) en fonction de la granulométrie. Nous remarquons que les concentrations de baryum, molybdène, fer, cobalt et aluminium de la classe (-125 + 63) montrent également que l'échantillon a la concentration la plus élevée en métaux lourds, pour les deux tests (EDTA, FeCl_2). Par contre ; ils présentent une grande concentration pour la classe (-500 +250) qui est traitée par les lixivants (H_2SO_4 et $\text{FeSO}_4 \text{H}_2\text{O}$).

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les objectifs de ce travail étaient : d'une part, à procéder à une caractérisation physique, chimique et minéralogique des résidus de traitement de la mine d'El Abed et celle de Boucaïd. D'autre part de contribuer à une meilleure compréhension du comportement géochimique de ces rejets

Pour atteindre nos objectifs, nous avons effectué deux campagnes d'échantillonnage sur Site. De plus, au laboratoire, nous avons préparé 3 échantillons composites pour d'éventuels analyses et des essais de lixiviation, à savoir : essais cinétiques, statiques de prédiction et tests d'extraction.

En effet, dans l'étape de caractérisation, nous avons déterminé les propriétés physicochimiques (densité, humidité, taux de carbonates).

Pour les méthodes d'analyse utilisées sont principalement la DRX et spectroscopie (DR2800). Les résultats de la première confirment l'altération des résidus par la présence des minéraux sulfatés à cause de leur contact avec l'air et l'eau ; de plus, elle nous a permis de connaître leur composition minéralogique : minéraux sulfurés de Zinc et de fer, minéraux sulfatés de baryum, minéraux carbonatés spécialement les dolomites et calcites.

Pour les essais de lixiviation en colonnes de PVC, nous ont permis de conclure que les résidus ont un impact sur l'environnement par le relargage des Eléments Traces Métalliques tels que le cadmium, le zinc, le cobalt, le chrome, le fer... ; Les essais en mini cellule, nous ont permis de constater que les deux digues ont un milieu neutre (pH= 6 à 7) alors nous pouvons statuer que les résidus ne génèrent pas un drainage minier acide, mais plutôt un drainage minier contaminé.

En ce qui concerne les essais statiques de prédiction, les résultats du rapport PN/PA, on a pu constater que :

- ✓ Rejet d'El Abed : ce rejet se trouve dans la zone incertaine. Donc, la nature du matériel est difficile à définir par rapport à son potentiel de génération d'acide.
- ✓ Rejet de Boucaïd (Pb-Zn) : non-générateur d'acide.
- ✓ Rejet de Boucaïd (baryte) : générateur d'acide.

En utilisant quatre réactifs pour les essais d'extraction, nous avons constaté que l'acide sulfurique donne le meilleur résultat.

Références Bibliographiques

- [1]. BRGM (1997) –les résidus minier français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. Rap39503, 83, 14 fig., 10 table. ; 1 Ann.
- [2]. Annexe 1 - Directive 019 sur l'industrie minière « Québec »- novembre 2004 http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/oka_eaux/documents/DB77B.pdf.
- [3]. MERCHICHI Amira. « Etude géochimique et traitement des rejets de la digue provenant de la mine de kherzet Youcef et chaabet el Hamra » « Décembre 2013 ».
- [4]. <https://www.researchgate.net/publication/228708079> la gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement [accessed jun 10 2018].
- [5]. DJENETTE EL BAR / EP. BOUCHERITTE (2016) Lixiviation du Minerai du Zinc de Chaabet El Hamra et Extraction Sélective des Métaux par la Salicylidèneaniline. Thèse de doctorat université de Biskra.
- [6]. KHELALFA. A « Élimination du chrome du minerai de phosphate par lixiviation chimique : Étude du système binaire Cr(III)/acide carboxylique ». (Thèse de doctorat université de Annaba 2016).
- [7]. Rapport final sur l'étude géologique complémentaire du gisement d'EL-ABED (1986-1991) O.R.G.M.
- [8]. Maddi, N « appréciation des problèmes sécuritaires et environnementaux dans les mines souterraines - cas de la mine d'El-Abed » (PFE, 2002) E.N.P Alger.
- [9]. M. F. FOURAR « Etude d'orientation sur la valorisation du minerai sulfuré polymétallique du gisement d'El-Abed » (PFE, 1999) E.N.P Alger.
- [10]. BENABDERRAHMANE, Djamel « Valorisation du minerai polymétallique (Plomb / Zinc) du gisement d'EL-ABED (Tlemcen) ». (PFE, 2010) E.N.P Alger.
- [11]. ENOF. Presentation de la mine d'el abed (2015).
- [12]. <http://www.almanach-dz.com/index.php?op=fiche&fiche=1716>.
- [13]. K. Nedjemeddine « Évaluation et critique de la stratégie de gestion des rejets miniers (Cas de la mine de Boucaïd – Tissemsilt) » -(PFE ,2016) Université Abderrahmane Mira de Bejaia Faculté de Technologie Département des Mines et géologie.

- [14]. Rapport de stage SOMIBAR 2012, mine Boucaïd.
- [15]. MEFTAH, Lamine. Rapport « Audit environnemental unité de traitement de baryte de Boucaïd (w. Tissemsilt) ». (2015).
- [16]. Bourbala Brahim, Moussaoui El Abbas « Essais de valorisation de la Barytine du Gisement de Boucaïd par Flottation » (PFE, 2013) ENP ALGER.
- [17]. Medjitena Mehdi, M. Mohamed Islam « Traitement et caractérisation des rejets de la mine de Boucaïd (Tissemsilt) et de la mine de Kherzet-Youcef (Sétif) » (PFE ,2017) ENP ALGER.
- [18]. Bulletin d'analyse réf. n°33/SST/ONEDD/2014 de la Station de surveillance de Tiaret.
- [19]. Reed, B. E., Carrierg P.C. and Moorg R. (1996). Flushing of aPb@) contaminated soil using HCl, EDTA andCaCl2.JournalofEnvironmental Engineering January, 48-50.
- [20]. Iang D.D. et Mourato, D. (1993). Results of the Toronto harbour commissioners soil recycling Demonstration project.42 pages.
- [21]. Rubin, 8, Gaire, R, Cardenas, Pages et Masters, H. (1990).U.S.EPAs mobile volume reduction Unit for soil washing. Dans: Super found '90. Proceedings of the I lth National Conference, November26-28, 1990: 760-764.
- [22]. Hall, D. et Holbei4 B.E. (1993). Integrated treatment of heavy metal and organic contaminated Industrial soils. Soil Remediation SymposiuSept.1993:151-195.
- [23]. Baize D. et M. Tercé (2002). Les éléments traces métalliques dans les sols (France), INRA Editions, Paris, 565 p.
- [24]. Sahuquillo A., A. Rigol, G. Rauret (2003). Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. Trends in Analytical Chemistry, 22: 152-159.
- [25]. Rauret G. (1998). Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment. Talanta, 46 : 449–455.
- [26]. Ariza G. J. L., I. Giráldez, D. Sánchez-Rodas, E. Morales (2000). Selectivity assessment of a sequential extraction procedure for metal mobility characterization using model phases. Talanta, 52(3): 545-554.
- [27]. Yong R. N., R. Galvez-Cloutier, Y. Phadungchewit (1993). Selective Sequential Extraction Analysis of Heavy Metal Retention in Soil. Revue canadienne de géotechnique, 30(5): 834 – 847.

[28]. Lebourg A., T. Sterckeman, H. Ciesielski, N. Proix (1996). Intérêt de différents réactifs d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces du sol. *Agronomie*, 16 : 201 – 215.

[29]. He Q. B., Singh B. R. (1995). Cadmium availability to plants as affected by repeated applications of phosphorus fertilizers. *Acta Agriculturae Scandinavica B*, 45(1): 22-31.

[30]. Tessier A., P. G. C. Campbell, M. Bisson (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metal. *Analytical chemistry*, 51: 844-851.

[31]. Black C. A., D. D. Evans, R. C. Dinauer (1965). Methods of soil analysis. *American Society of Agronomy*, 9: 653-708. Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable – MATEV (10 Mars 2014).

[32]. AKKAL Rezki. Cours d'hydrométallurgie, 2014.

ANNEXE

A.1- Calcul de la masse volumique absolue :

Matériels utilisés :

- Balance
- Spatule
- Pycnomètre ;(capacité de 25 ml à 22°C).
- Eau distillé
- Thermomètre

Mode opératoire (pycnomètre) :

Le problème posé dans cette partie, c'est la mesure du volume des grains solides, constituant l'échantillon de sol. Afin de régler ce problème, on effectue cette mesure à l'aide du pycnomètre.

Le pycnomètre est un instrument utilisé dans le laboratoire dans le but de déterminer, à une température donnée d'un produit liquide, pâteux, ou bien solide le poids volumique des grains solides. Le pycnomètre qu'on utilise dans notre manipulation est un pycnomètre à verre s'assemblant précisément par un joint en verre rodé, celui-ci est constitué de deux parties :

- Une fiole
- un bouchon percé par un tube capillaire contenant un petit entonnoir

Lorsque l'on ajuste le bouchon sur la fiole, le trop-plein de liquide s'échappe par l'extrémité supérieure du tube et, dans la mesure où ce tube est très fin, le volume de liquide est déterminé avec une grande précision.

A.2- Détermination de la teneur en carbonate CaCO_3 :

Matériel utilisée :

- NaCl
- Carbonate pur
- HCl
- Balance
- Calcimètre
- Erlenmeyer
- Pince

Mode opératoire :

- Préparer une solution saturée de NaCl.
- Tarer la balance puis peser 0.25g de l'échantillon broyé. (Notre rejet et carbonate pur)
- Remplir au même niveau le niveau de la solution saturée en NaCl du tube gradué et de l'ampoule du Calcimètre et on note la division correspond au v_1 sur le tube gradué.
- Introduire 0.25 g de carbonate pur ou 0.25 g de l'échantillon à étudier dans l'erenmeyer.
- Remplir un petit tube avec de l'acide chlorhydrique (HCL 10 ml) et on l'introduit dans l'erenmeyer avec une pince et avec précaution pour ne pas le verser.
- Boucher l'erenmeyer avec le bouchon relié au tube gradué de calcimètre de Bernard.
- Renverser l'acide contenu dans le tube sur l'échantillon.
- Agiter de temps en temps l'erenmeyer pour activer la réaction.
- A la fin de l'effervescence on note la division correspond au V_2 sur le tube gradué.
- Le volume de CO_2 dégagé est la différence des volumes V_2-V_1 .

Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate $CaCO_3$:

Teneur en carbonate(%)	Classification	Exemple
< 10	non calcaire	argile, sable siliceux...
10 à 29	peu calcaire	marne
30 à 69	moyennement calcaire	marne...
70 à 89	fortement calcaire	calcaire marneux...
≥ 90	calcaire	calcaire

A.3- Analyse granulométrique :

Mode opératoire :

Afin de procéder à l'analyse granulométrique de chacun de nos échantillons, il faudrait d'abord déterminer toutes les caractéristiques physiques de chaque échantillon (déterminées précédemment). Pour procéder au tamisage vibratoire dans notre laboratoire, il faudrait bien s'assurer que notre échantillon est sec.

Les appareils à utiliser dans le but d'effectuer cette analyse sont :

- Un plateau ;
- Une balance électronique ;

- Une série de tamis de la norme AFNOR en inox ayant les diamètres qui seront cités dans les tableaux suivants (6.6 , 6.7 , 6.8) ainsi que d'un système de fixation ;
- Une tamiseuse, des bacs, des brosses et des sacs

1. Les indices granulométriques :

A partir de la courbe granulométrique on tire plusieurs informations sur la nature de notre poudre parmi lesquelles :

- **D₁₀** : représente le diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de 10% du matériau de départ.
- **D₃₀** : représente le diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de 30% du matériau de départ.
- **D₅₀** : représente le diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de 50% du matériau de départ.
- **D₆₀** : représente le diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de 60% du matériau de départ.
- **D₈₀** : représente le diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de 80% du matériau de départ.

Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité) :

Le coefficient de HAZEN permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (Uniforme)
Ce coefficient est défini par la relation suivante :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Tel que } C_U : \text{ Le coefficient de HAZEN ;}$$

D'après CAQUOT et KERISEL :

Si $C_U < 2$: La granulométrie est serrée (uniforme) ;

Si $C_U > 2$: La granulométrie est étalée.

Coefficient de courbure :

Le coefficient de courbure vient en complément de coefficient de HAZEN dans la classification des sols. Afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée (un sol est mal gradué si une fraction des grains prédomine

Le coefficient de courbure est donné par l'équation suivante :

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

C_C : le coefficient de courbure :

Si $1 < C_C < 3$: La granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie).

Si $C_C < 1$ et $C_C > 3$: La granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

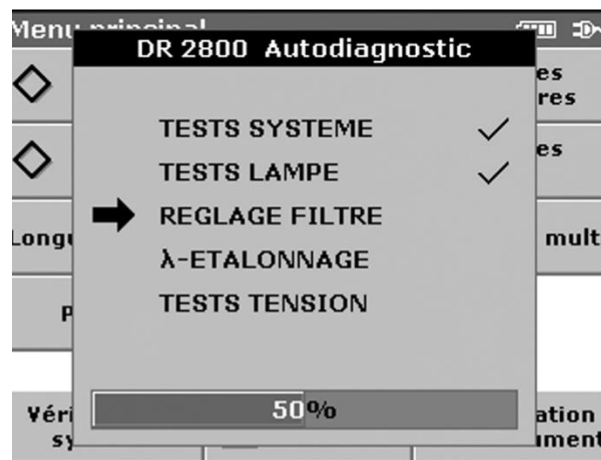
A.4- Principe d'utilisation de spectrophotomètre DR 2800 :

Auto diagnostique :

A chaque mise sous tension de l'appareil, une série de tests de diagnostic est exécutée automatiquement pour garantir le fonctionnement des principaux composants du système.

Cette procédure, qui dure environ deux minutes, contrôle le système, les lampes, l'étalonnage de la longueur d'onde, le réglage du filtre et la tension. Chaque plage qui fonctionne correctement est confirmée à l'aide d'une coche.

Le « Menu principal » s'affiche quand les diagnostics à la mise sous tension sont terminés.




Programmes enregistrés

L'instrument contient plus de 200 procédures programmées, auxquelles on peut accéder par l'intermédiaire du menu **Programmes enregistrés**.

Sélectionnez un test ou une méthode enregistrée en entrant les données de base de l'utilisateur :

1. Appuyer sur **Programmes** enregistrés dans le menu principal pour afficher une liste alphabétique des programmes enregistrés et de leur numéro respectif. La liste des programmes enregistrés s'affiche.
2. Mettre en surbrillance le test de votre choix. Par la sélection de leur numéro.
3. Appuyer sur **Démarrer** pour lancer le programme. Une fois le programme sélectionné, l'écran correspondant à ce paramètre s'affiche.

Programmes enregistrés		
170	Acide cyanurique	50 mg/L
770	Acides volatiles	2800 mg/L
907	Agents compl. org.	20.0 mg/l
250	Agents réducteurs	1.00 mg/l
10	Alumin. aluminium	0.800 mg/L
9	Aluminium ECR	0.250 mg/L
660	Argent	0.700 mg/L
399	Azote TKN	150 mg/L
20	Baryum	100 mg/L
30	Benzotriazole	16.0 mg/L

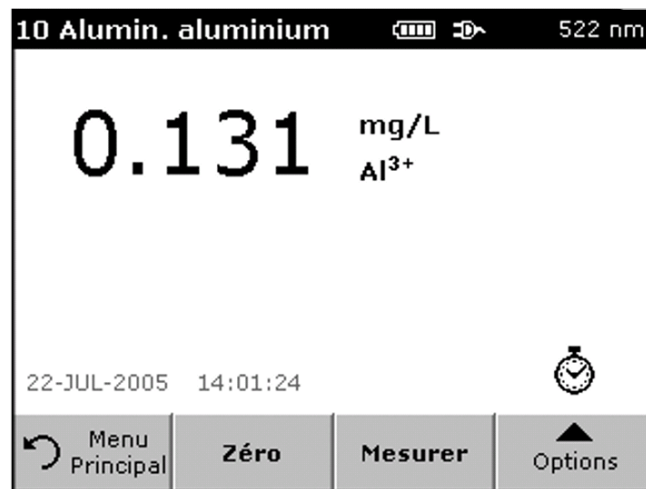
 Menu Principal	Sélectionner par numéro	Options du programme	Démarrer
--	-------------------------	----------------------	-----------------

Analyse des échantillons

1. Appuyer sur **Programmes enregistrés** et sélectionner un programme.
2. Insérer la cuve vide dans le porte-cuve.
3. Appuyer sur **Zéro**.

10 Alumin. aluminium				522 nm
0.000		mg/L Al ³⁺		
22-JUL-2005 14:01:14				
 Menu Principal	Zéro	Mesurer	 Options	

- Retirer la solution zéro et insérer la cuve/cellule d'échantillon dans le compartiment pour cuves.
- Appuyer sur **Lecture**. Le résultat s'affiche.



Programmes de codes à barres :

Un lecteur de code à barres spécial, situé dans le compartiment pour cuves n° 1, lit automatiquement le code à barres des cuves ou fioles de 13 mm pendant que ces dernières effectuent une rotation simple. L'instrument utilise l'identification par code à barres pour définir automatiquement la longueur d'onde appropriée pour l'analyse, et calcule immédiatement le résultat grâce aux facteurs enregistrés.

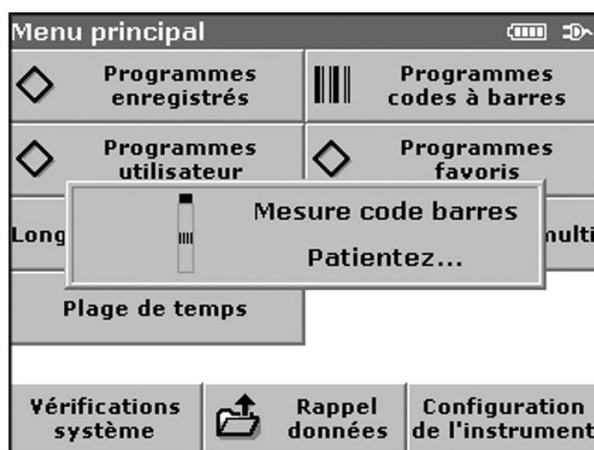


Figure A-5.1 : Compartiment pour cuves n° 1 pour cuves ou fioles de 13 mm avec codes à barres.

En outre, les valeurs mesurées sont enregistrées à 10 positions différentes au cours de la rotation. Un programme spécial d'élimination des aberrations calcule la moyenne des valeurs mesurées. Les erreurs ou souillures des cuves et fioles sont ainsi identifiées, ce qui permet d'obtenir des résultats extrêmement précis.

Effectuer un test sur cuve ou fiole de 13 mm avec codes à barres :

1. Insérer l'écran protecteur de lumière dans le compartiment pour cuves n° 2.
2. Préparer la cuve ou fiole de 13 mm avec code à barres en suivant les procédures de travail, puis l'insérer dans le compartiment pour cuves n° 1.



- Lorsqu'une cuve/cellule d'échantillon codée est placée dans le compartiment pour cuves n° 1 (Figure A-5.1), le programme de mesure adéquat est activé automatiquement dans le menu principal.
- Dans le cas contraire, appuyer sur **Programmes de codes à barres** dans le menu principal, puis insérer la cuve ou la fiole d'échantillon ou de blanc (selon votre procédure de travail) dans le compartiment n° 1.



La mesure commence automatiquement, et les résultats sont affichés. Pour évaluer d'autres tests sur cuve ou fiole ainsi que d'autres paramètres, insérer la cuve ou la fiole préparée dans le compartiment pour cuves, et lire le résultat.

Étalonnage des métaux non enregistrés :

Certains tests (métaux) ne figurent pas dans la base de données de notre machine, ce qui indique qu'ils ne sont pas enregistrés. On utilise la méthode à code à barre pour étalonner ces métaux.

On Prépare la solution étalon dans une cuvette du test d'étalonnage en fonction de leur protocole qui est indiqué dans la boîte commerciale de ce métal.



FigureA-5.2 : Cuvette du test d'étalonnage

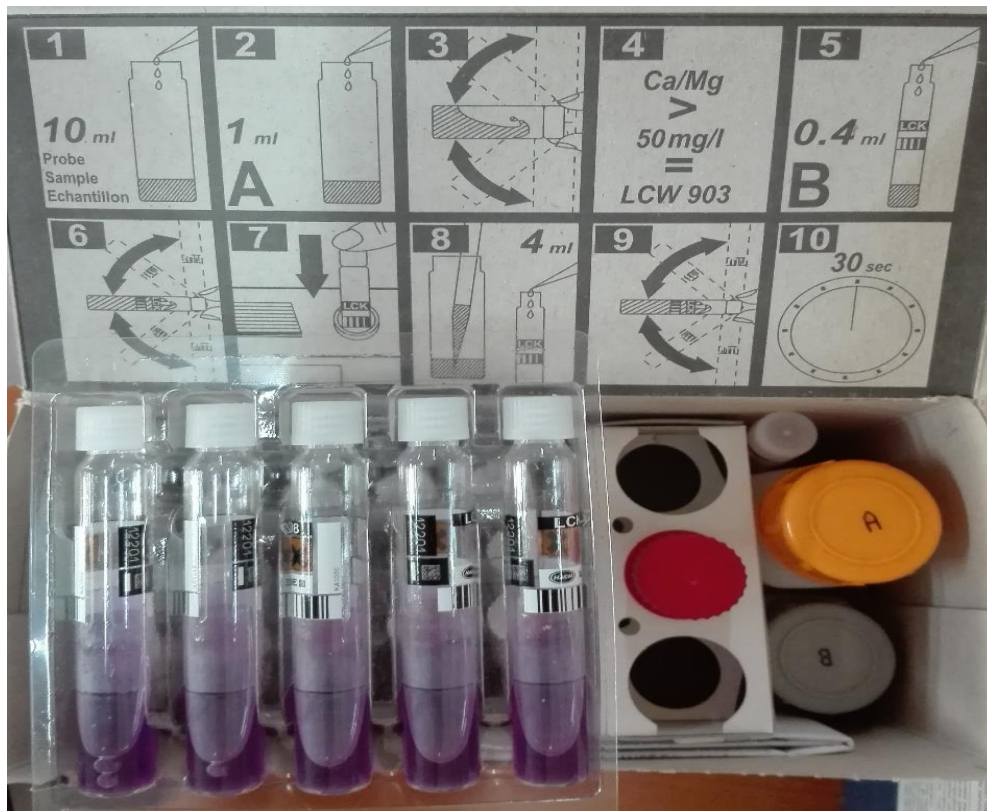


Figure A-5.3 : Protocole d'étalonnage de cadmium (Cd).

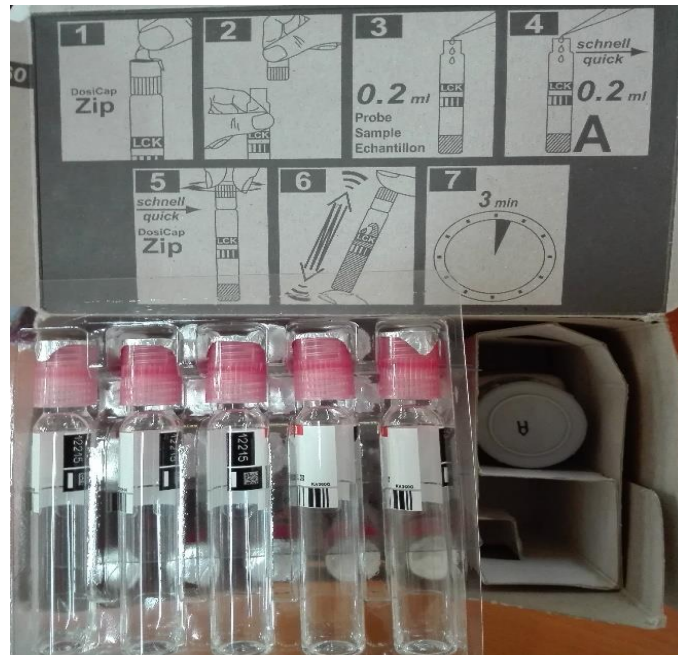


Figure A-5.4 : Protocole d'étalonnage de zinc (Zn).