

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Laboratoire de Génie Minier

Mémoire de Master en Génie Minier

Effet de la taille des particules du concentré de la sphalérite sur la récupération en zinc métallique à partir du minerai de Chaabet el Hamra de la W. de Setif.

Réalisé par :

OUSERIR Hamza

Sous la direction de :

Dr A.AKKEL

Présenté et soutenu publiquement le : 21/06/2017

Composition du Jury :

Président :	Dr.OULD HAMOU Malek	M C A, ENP, Alger
Promoteur :	Dr.AKKEL Arezki	M C A, ENP, Alger
Examineur :	Mme.MERCHICHI Amira	M A A, ENP, Alger

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Laboratoire de Génie Minier

Mémoire de Master en Génie Minier

Effet de la taille des particules du concentré de la sphalérite sur la récupération en zinc métallique à partir du minerai de Chaabet el Hamra de la W. de Setif.

Réalisé par :

OUSERIR Hamza

Sous la direction de :

Dr A.AKKEL

Présenté et soutenu publiquement le : 21/06/2017

Composition du Jury :

Président :	Dr.OULD HAMOU Malek	M C A, ENP, Alger
Promoteur :	Dr.AKKEL Arezki	M C A, ENP, Alger
Examineur :	Mme.MERCHICHI Amira	M A A, ENP, Alger

ENP 2017

Remerciements

On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

On tient tout d'abord à remercier notre rapporteur Monsieur **AKKAL ,A** pour ces précieux conseils qu'il nous a donné et pour ces connaissances théoriques et expérimentales qu'on a exploité durant notre mémoire de fin d'études.

Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté d'examiner mon travail, et d'y avoir porté leur juste appréciation.

Nos remerciements les plus chaleureux vont également aux enseignants du département Génie Minier qui ont contribué à notre formation. À tous nos collègues avec qui on a partagé ces années de post graduation.

Et en fin nos vifs remerciements à nos parents, nos frères et sœurs et nos amis. Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A

Mes chers parents qui ont toujours veillé sur moi

Mes frères et ma sœur & toute ma famille

Tous mes collègues de l'ENP & mes amies.

*Toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation
De ce travail.*

ملخص:

تتعدد استعمالات معدن الزنك في مختلف المجالات وذلك نظرا لأهميته الكبيرة وخصائصه المميزة.

تم انجاز هذا العمل بهدف دراسة العملية المعدنية لاستخراج الزنك من سفاليرايت منجم شعبة الحمراء بولاية سطيف. حيث خضع المعدن لعملية التحضير الميكانيكي (سحق وطحن) التي تسبق عملية الطفو العاملة على رفع جودة المنتج وتحضيره لاستخراج الزنك.

يتم استخراج الزنك تحت عدة عوامل وفقا للبروتوكول التالي: الاحراق – الرشح – التصفية – المعايرة – التحليل الكهربائي. هذه العوامل تسمح برفع نسبة استخراجه أهمها ما قمنا بدراسته في هذا الجزء الا وهي حجم الجسيمات ونوع الحمض المستعمل اثناء الرشح على مستوى مخبر هندسة المناجم للمدرسة الوطنية متعددة التقنيات.

الكلمات المفتاحية: الزنك - الاحراق - الرشح - التصفية - المعايرة - التحليل الكهربائي.

Abstract :

Zinc is used in various fields because of its importance and its distinctive characteristics.

The purpose of this work is to apply a metallurgical process to develop the zinc metal from the sphalerite of the chaabet el hamra mine in the W.Setif. In a first step, the ore underwent mechanical preparation (Crushing and grinding), then the ore (0.074 mm) has undergone a flotation which serves to increase the quality of the product used subsequently in the hydrometallurgical process for the extraction of zinc.

The metalaturgical study is dedicated to the study of the impact of particle size of sphalerite concentrate on zinc recovery while applying the same protocol used in PFE such as roasting, leaching, purification, dosing and electrolysis .

Keywords : Zinc - CHAABET EL-HAMRA mine - Mechanical preparation - Flotation - Metallurgical extraction - Leaching - roasting - Purification - Electrolysis - Content.

Résumé :

Le zinc est utilisé dans divers domaine en raison de son importance et ses caractéristiques distinctives.

Le but de ce travail est d'appliquer un processus métallurgique afin d'élaborer le métal du zinc à partir de la sphalérite de la mine de chaabet el hamra dans la W.Setif. Dans une première étape, le minerai a subi une préparation mécanique (concassage et broyage), ensuite le minerai de taille (0.074 mm) a subi une flottation qui sert à augmenter la qualité du produit utilisé par la suite dans le processus hydrométallurgique pour l'extraction du zinc.

L'étude métalatllurgique est réservée à l'étude de l'impact de la taille des particules

de concentré de la sphalérite sur la récupération en zinc tout en appliquant le même protocole utilisé dans le PFE tel que grillage, lixiviation, purification , dosage et électrolyse.

Mots clés : Zinc - Mine de CHAABET EL-HAMRA - Préparation mécanique - Flottation - Extraction métallurgique - Lixiviation - Grillage - Purification - Électrolyse - Teneur .

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des abréviations

Introduction Générale **11**

I Partie Théorique **13**

1 Généralités **14**

1.1 Historique 14

1.2 Propriétés du zinc 14

1.2.1 Propriétés physico-chimiques 14

1.2.2 Propriétés mécaniques 15

1.3 Utilisations 15

1.4 Production du zinc 16

1.4.1 Production mondiale 16

1.4.2 Production nationale 16

1.5 Évolution des prix 17

2 Les gisements du zinc **18**

2.1 Types des gisements 18

2.2 Gisement de CHAABET EL HAMRA (Ain Azel-Sétif) 19

2.2.1 Situation géographique du site 19

2.2.2 Géologie et morphologie du gisement 20

2.3 La laverie d'enrichissement 21

3 Préparation des minerais **22**

3.1 Concassage 22

3.2 Broyage 22

3.3 Classification 22

3.4 Flottation 22

3.4.1 Type de flottation 23

3.4.2 Les exigences aux réactifs de flottation 23

4 Extraction du zinc **24**

4.1 Les avantages d'hydrométallurgie et pyrométallurgie 24

4.2 Etapes de la production du zinc 24

4.2.1 La pyrométallurgie 25

4.3 Méthode hydrométallurgique 26

4.3.1 La lixiviation conventionnelle 26

4.3.2 Lixiviation sous pression 28

4.3.3 Production du zinc à partir des minerais carbonatés 29

II	Partie Expérimentale	30
5	Partie Expérimentale	31
5.1	Introduction	31
5.2	Section concassage – criblage	31
5.3	Section de traitement par gravimétrie	31
5.4	Section Broyage-Classification	32
5.5	Section de flottation et filtration	33
5.6	Grillage	33
5.7	Lixiviation	34
5.8	Purification	36
5.9	Dosage	36
5.10	Électrolyse	37
5.11	L’effet de la granulométrie	38
5.12	Etude comparative	40
	Conclusion Générale	43
	Annexe 1	45
5.13	Types de concasseurs	45
5.14	Types de broyeurs	48
5.15	Types de classificateurs	50

Liste des tableaux

1.1	Propriétés Physico-chimiques du zinc	15
2.1	Coordonnées UTM du gisement de CEH	19
5.1	Conditions de lixiviation	39
5.2	Domaine d'étude de la taille des grains	39
5.3	Teneur en Zn en fonction du pH	39
5.4	Tableau comparatif des résultats	41
5.5	Tableau comparatif des résultats	42

Table des figures

1.1	Utilisations du zinc	16
1.2	L'évolution des prix du zinc dans les dernières années	17
2.1	Types de gisements du zinc(NERC)	18
2.2	La situation géographique d'Ain Azel	20
2.3	Technique d'enrichissement du minerai de Chaabat El Hamra	21
3.1	Principe de flottation	23
4.1	La variation de l'enthalpie libre standard de formation d'un oxyde en fonction de la température	26
4.2	La production électrolytique du zinc	27
4.3	Le processus de double lixiviation	28
4.4	Lixiviation sous pression du minerai de zinc	28
4.5	Production électrolytique du zinc à partir du minerai de Smithsonite	29
5.1	Section de concassage et de criblage	32
5.2	Section de broyage et de classification	32
5.3	Schéma de montage de grillage	33
5.4	Schéma explicatif du grillage	34
5.5	Dispositif de lixiviation	35
5.6	Schéma explicatif de lixiviation	35
5.7	Purification des ions Fe^{3+}	36
5.8	Purification des ions Cu^{2+}	36
5.9	Dosage du zinc	37
5.10	Montage d'électrolyse	38
5.11	Tamiseuse de type Retch	39
5.12	Variation de la teneur en zinc en fonction de la taille des grains	40
5.13	Dosage des deux échantillons	41
5.14	Produit final des deux échantillons	41
5.15	Concasseur à mâchoires	45
5.16	Types de concasseurs à mâchoires	45
5.17	Concasseur giratoire	46
5.18	Concasseur à cône	47
5.19	Concasseur à percussion	48
5.20	Broyeurs à barres	48
5.21	Broyeurs AG/SAG	49
5.22	Broyeur à boulets	49
5.23	Différents types de classificateurs	50

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation.

CEH : Chaabet El Hamra.

EDTA : Ethylène-Diamine-Tétra-acétate disodique.

NERC : : Natural Environment Research Council.

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

pH : Potentiel d'hydrogène.

Introduction Générale

Après le fer et le cuivre, l'homme exploite énormément le zinc. Il s'agit d'un élément chimique métallique, de symbole Zn et de numéro atomique 30 de couleur blanc bleuâtre appartenant au sous-groupe II b de la classification périodique. Sa grande exploitation est basée sur le fait qu'il fait partie des 25 éléments les plus abondants dans l'écorce terrestre.

Les minerais de zinc se trouvent dans la nature sous deux formes principales : d'une part, les variétés sulfurées, blende (ou sphalérite) et wurtzite ; d'autre part, les variétés oxydées, smithsonite, hydrozincite (carbonates), franklinite, zincite (oxydes), hémimorphite (ou calamine), willemite (silicates), les teneurs en zinc du minerai varient de 4 % à 20 %.

L'extraction du zinc est le processus par lequel les formes minérales du zinc métallique sont extraites de la terre par l'exploitation minière. Une mine de zinc est une mine qui produit du zinc métal. Certaines mines produisent principalement du zinc, mais certaines mines produisent du zinc comme produit secondaire d'un métal qui a une concentration plus élevée dans le minerai. La plupart des mines de zinc produisent du zinc et du plomb ou du zinc et du nickel.

Plus de 50 pays dans le monde extraient du minerai de zinc, l'Australie, le Canada, la Chine, le Pérou et les États-Unis étant les plus gros producteurs. Environ 80% du zinc mondial est extrait en sous-sol, tandis que 8% est extrait à ciel ouvert, Et avec le reste en utilisant une combinaison des deux méthodes. Après l'extraction et la transformation, le zinc est envoyé à une fonderie de zinc.

Après le fer et le cuivre, l'homme exploite énormément le zinc. Il s'agit d'un élément chimique métallique, de symbole Zn et de numéro atomique 30 de couleur blanc bleuâtre appartenant au sous-groupe II b de la classification périodique. Sa grande exploitation est basée sur le fait qu'il fait partie des 25 éléments les plus abondants dans l'écorce terrestre. Les minerais de zinc se trouvent dans la nature sous deux formes principales : d'une part, les variétés sulfurées, blende (ou sphalérite) et wurtzite ; d'autre part, les variétés oxydées, smithsonite, hydrozincite (carbonates), franklinite, zincite (oxydes), hémimorphite (ou calamine), willemite (silicates), les teneurs en zinc du minerai varient de 4 % à 20 %. L'extraction du zinc est le processus par lequel les formes minérales du zinc métallique sont extraites de la terre par l'exploitation minière. Une mine de zinc est une mine qui produit du zinc métal. Certaines mines produisent principalement du zinc, mais certaines mines produisent du zinc comme produit secondaire d'un métal qui a une concentration plus élevée dans le minerai. La plupart des mines de zinc produisent du zinc et du plomb ou du zinc et du nickel.

Ce travail se subdivise en deux grandes parties :

— Une partie théorique qui englobe : Généralités, les principaux gisements de zinc, préparation des minerais, et les procédés pyrométallurgie et hydrométallurgique pour l'extraction du zinc.

— Une partie expérimentale qui montre le principe, mode opératoire et l'enchaîne-

ment des opérations permettant d'extraire le métal du zinc à partir des échantillons de la sphalérite en provenance de la laverie de CH à Setif. Nous avons étudié deux échantillons E1 et E2 (Lors du lixiviation et pour l'échantillon E1 on utilise l'acide sulfurique (H_2SO_4), pour l'échantillon E2 on utilise l'acide chlorhydrique (HCl)), issus du concentré de la laverie de Chabet El Hamara titrant plus de 55% de Zn. Les deux échantillons ont subi un grillage afin d'éliminer le soufre et de les préparés pour l'attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl) en investiguons l'impact de la taille des particules sur la récupération en zinc.

Première partie
Partie Théorique

Chapitre 1

Généralités

1.1 Historique

Le zinc (Zn) a été utilisé à Rome et en Chine il y a plus de 2000 ans en tant que composant du laiton qui est un alliage zinc-cuivre. La production commerciale du zinc n'a pas commencé en Europe jusqu'au 18^{ème} siècle, et aux États-Unis en 1860. Le zinc est un composant naturel de la croûte terrestre et une partie inhérente de notre environnement. Il se trouve pas seulement dans les roches ou dans le sol mais on peut le trouver aussi dans l'air, l'eau et la biosphère même les plantes, les animaux et les humains contiennent du zinc. Cependant les minéraux et les métaux sont obtenus principalement à partir de la croûte terrestre. Le taux naturel moyen du zinc dans la croûte terrestre est de 70 mg / kg (poids sec) compris entre 10 et 300 mg / kg (Malle 1992).

Dans certaines régions le zinc se trouve à des concentrations très élevées, formé par des processus géologiques et géochimiques naturels (5-15% ou 50.000-150.000 mg / kg). Les gisements du zinc sont largement répandus dans le monde entier.

Les minerais du zinc sont extraits dans plus de 50 pays. La Chine, l'Australie, le Pérou, l'Europe et le Canada sont les plus grands pays miniers de zinc. Le zinc est normalement utilisé en conjonction avec d'autres métaux, y compris le cuivre, l'or et l'argent.

1.2 Propriétés du zinc

Le zinc est un métal de transition qui se trouve au centre du tableau périodique. L'espace entre les groupes 2 et 13 est occupé par les métaux de transition, ces métaux partagent de nombreuses propriétés physiques et chimiques en commun.

1.2.1 Propriétés physico-chimiques

Le zinc est un métal blanc bleuâtre avec une surface brillante. Il n'est ni ductile ni malléable à la température ambiante. cependant à des températures supérieures à 100 ° C le zinc devient un peu malléable.

Symbole	Zn
Nombre atomique	30
Masse atomique	65,38
Groupe	12
Mode du réseau	Hexagonale
Configuration électronique	[2,8,18]4s2
Point de fusion	419,5 ° C
Point d'ébullition	908 ° C
Densité	7,24
Dureté	2,5

TABLE 1.1 – Propriétés Physico-chimiques du zinc

1.2.2 Propriétés mécaniques

Le zinc est malléable et peut être laminé entre 100 ° C et 200 ° C. Il devient cassant à une température supérieure. Cependant, vers 50 ° C, il est relativement souple et peut être embouti ou étiré en fils. La densité du zinc s'élève par martelage ou laminage jusqu'à 7.25. Sa résistance à la traction pour la qualité ordinaire 97,75% est de 16 à 20 kg/mm² avec un allongement de 25 à 40%. Plus le métal est pur, moindre est sa résistance à la traction et l'allongement est plus élevé. Ainsi, pour le zinc à 99%, la résistance descend à 12 kg et l'allongement s'accroît jusqu'à 50%.

1.3 Utilisations

Le zinc est surtout utilisé comme protecteur du fer et de l'acier (galvanisation par trempage dans le zinc fondu). Il sert aussi à la fabrication du laiton (alliage de zinc et de cuivre (% maxi. Zinc = 46%).

Dans la construction, il est utilisé dans les toitures et les gouttières ainsi que le bardage dans la construction de charpentes ou de façades.

75% du zinc est consommé sous sa forme métallique ; les 25% restant sont employés soit sous la forme d'oxyde, soit sous celle de sulphure de zinc.

L'oxyde de Zinc est utilisé dans la fabrication de pigments pour peintures. Le sulfure de zinc quant à lui, est principalement employé dans la confection de peintures peu toxiques.

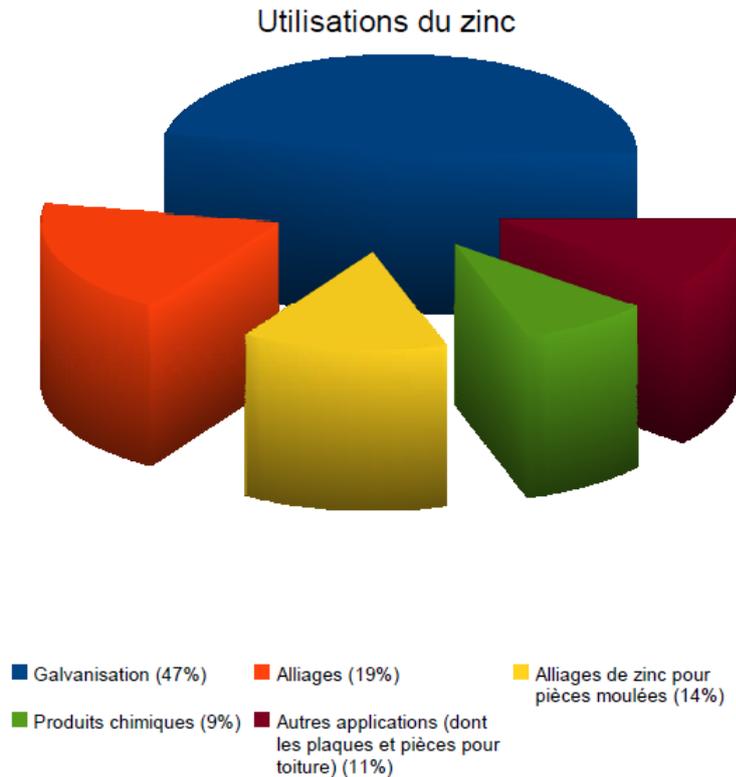


FIGURE 1.1 – Utilisations du zinc

1.4 Production du zinc

1.4.1 Production mondiale

Le zinc est le quatrième métal produit au monde après le fer, l'aluminium et le cuivre. Il est exploité dans plus de 50 pays à travers le monde. Cependant, les cinq premiers pays producteurs (Chine, Australie, Pérou, Canada et Etats-Unis) comptent pour environ 65% de la production mondiale. Le zinc sous forme de minerai représentant près de 50% de la production mondiale totale. En ce qui concerne les Etats-Unis par exemple, les deux tiers du zinc produit le sont à partir du minerai alors qu'un tiers provient du recyclage des résidus et des déchets. La progression de l'offre de zinc est encouragée entre autres, par les débouchés potentiels et la forte croissance du secteur de la construction dans les pays industrialisés depuis les années 1970.

1.4.2 Production nationale

L'Algérie comporte essentiellement des gisements polymétalliques (Zn, Pb, Cd), de type sulfure rarement oxyde. Il existe deux laveries (El Abed et Kharzet Youcef) produisant du Zn, Cd, métal et de l'acide sulfurique. Cependant les besoins annuels en alimentation de concentré du zinc de cette usine métallurgique s'élèvent à 80,000 tonnes, mais l'usine de Kharzet Youcef est à l'arrêt de puis 1990, suite à une inondation de la mine. Néanmoins le gisement de Chaabet El-Hamra situé à proximité doit en quelque sorte pallier à ce problème et permettre la réouverture de la laverie. Signalons que la production

nationale en concentré de zinc permet un approvisionnement de l'ordre de 8 à 10% des besoins de l'usine de Ghazaouet, le reste étant importé. L'exploitation d'une part du gisement de Chaabet El Hamra dans l'immédiat, puis du gisement d'Oued Amizour devrait en quelques sorte être en mesure de satisfaire nos besoins.

1.5 Évolution des prix

En octobre 2016, le prix du zinc s'établit à 2 312 dollars la tonne, en hausse de 0,8% sur un mois et en hausse de 34,1% sur un an.

Le prix du zinc indiqué ici est tiré des statistiques de la Banque mondiale, établies à partir des chiffres du London Metal Exchange (LME), pour du zinc avec un degré de pureté minimal de 99,95%.

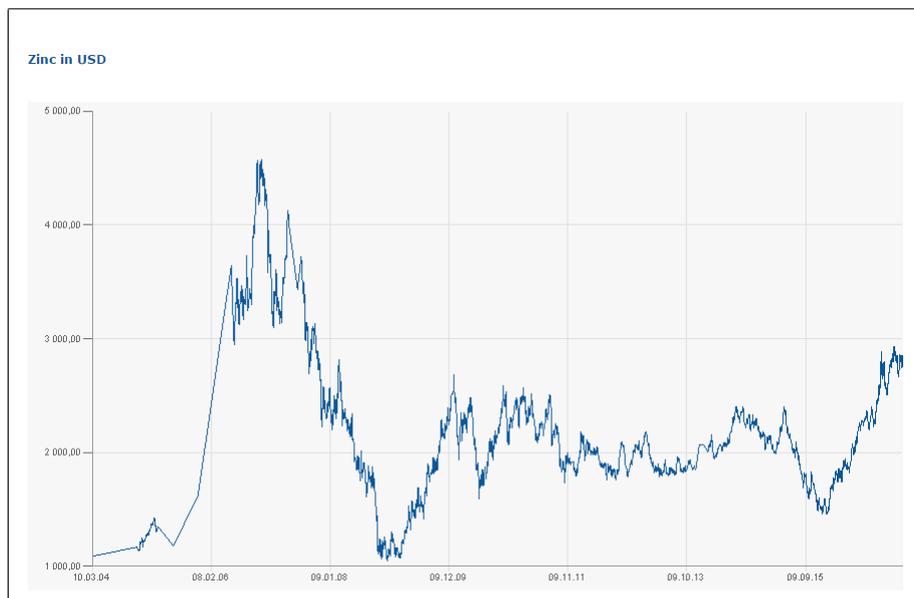


FIGURE 1.2 – L'évolution des prix du zinc dans les dernières années

Chapitre 2

Les gisements du zinc

2.1 Types des gisements

Le principal minéral du zinc est la sphalérite (Zn,FeS), qui contient jusqu'à 67% de zinc. Smithsonite ($ZnCO_3$, 52%), willemite (Zn_2SiO_4 , 59%) et hémimorphite ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2H_2O$, 54%) ils peuvent se produire altérés près de la surface ou oxydés d'un corps minéralisé.

Les gisements du zinc se forment à partir des fluides chauds ou hydrothermaux générés dans la terre. Ces fluides peuvent être piégés sous la surface dans des fissures où la sphalérite et d'autres minéraux peuvent précipiter pour former des filons. En présence du calcaire les fluides peuvent remplir des cavités pour former des dépôts riches mais fragmentés. Certains fluides peuvent atteindre le fond océanique dans des zones d'activité volcanique sous-marine pour former des dépôts volcanogènes. D'autres fluides peuvent s'échapper à la surface par des fissures ou des défauts dans de petits lacs ou mers peu profonds et dans des conditions convenables, des dépôts de plomb-zinc-argent peuvent se former.

Le minerai du zinc alors se trouve dans deux types principales de gisements : minerai primaire dans les filons minces (sulfuré) ou secondaire formé par l'altération et/ou l'oxydation des filons (oxydé).

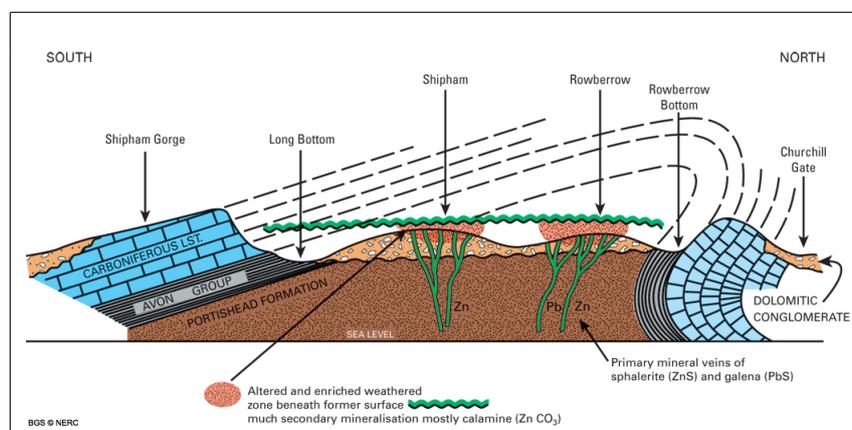


FIGURE 2.1 – Types de gisements du zinc (NERC)

2.2 Gisement de CHAABET EL HAMRA (Ain Azel-Sétif)

2.2.1 Situation géographique du site

La wilaya de Sétif est située à 300 Km à l'est d'Alger. Elle est limitée au nord, par les wilayas de Bejaia et Jijel; A l'est, par la wilaya de Mila, à l'ouest, par la wilaya de Bordj-Bou-Arredj; au sud-est, par la wilaya de Batna et au sud-ouest, par celle de M'Sila.

La daïra d'Aïn Azel est située à 50 Km de Sétif (Figure 2.2), de part et d'autre de la route nationale 78, à une position médiane par rapport à son territoire communal et à l'intersection de la route nationale n° 78 et le chemin 64 de wilaya. Le site est plat, dont la pente est inférieure à 5%. Il est caractérisé par d'alluvions anciens et quelques affleurements de conglomérats gris roux.

La région d'Ain-Azel possède un sous-sol riche en potentialités minières non exploitées dans leur totalité, une industrialisation en cours de développement, notamment de petites entreprises qui pourront absorber une partie considérable du chômage qui sévit actuellement dans la région.

Les résultats enregistrés en matière de développement local, sont porteurs d'espoir pour les habitants.

Le gisement de Chaâbet-El-Hamra est situé dans la wilaya de Sétif, à 04 Km au Sud-est de Ain-Azel et 12 Km de la mine de kherzet-youcef, aux coordonnées ci-dessous :

Points	A	B	C	D
X	726 900	728 500	728 500	726 900
y	3963200	3963200	3962500	3962500

TABLE 2.1 – Coordonnées UTM du gisement de CEH

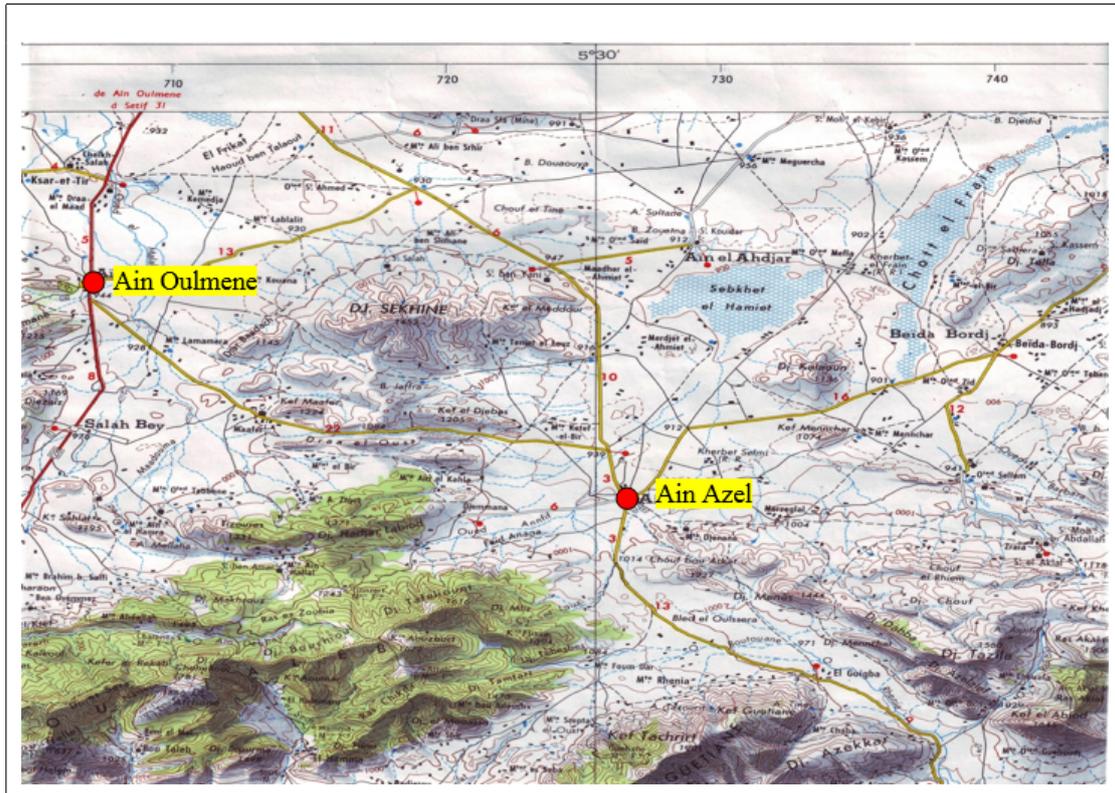


FIGURE 2.2 – La situation géographique d’Ain Azel

-L’altitude du gisement varie de 950 à 1 200 mètres.

2.2.2 Géologie et morphologie du gisement

Du point de vue structural, le gisement de Chaâbet-el-hamra est soumis à des structures plissées et des accidents cassants. Les rejets verticaux sont de 10 à 20 m. Des failles secondaires recoupent transversalement les formations du Crétacé inférieur.

Les corps de minerais stratiformes sont encaissés dans les dolomies massives et se présentent, d’une manière générale, sous forme de bandes allongées de direction SE-NW sur une longueur de 2 700 m et une largeur variant de 300 à 600m.

La zone minéralisée comporte cinq (05) niveaux métallifères dont deux (02) seulement (le corps 1 et 2) présentent un intérêt industriel.

La puissance du corps 1, situé au-dessus, varie de 2.27 à 7.66 m avec une moyenne de 4.17 m. La puissance du corps 2, situé au-dessous, varie de 1.22 à 5.13 m, avec une moyenne de 3.72m. L’intercalaire stérile entre les deux (02) corps, 1 et 2, varie de 0 à 10 m.

Les travaux par galeries ont montré que les corps 1 et 2 sont constitués de lentilles minéralisées dont la superposition explique les variations de puissance.

La minéralisation se présente sous forme de sphalérite (Blende), pyrite, Marcassite et plus rarement de galène et d’hématite.

La gangue est composée de dolomie, de la calcite, de la barytine et plus rarement de quartz et de gypse.

2.3 La laverie d'enrichissement

L'usine d'enrichissement du complexe minier de Kharzet Youssef est conçue pour le traitement du minerai de zinc provenant de la mine de Chaabat El Hamra comme le montre la figure 2.3. De nos jours la laverie ne produit que le zinc, plusieurs modifications ont été faites au niveau de la laverie, comme la section de préconcentration gravimétrie (suspension lourde), la section de la flottation du plomb, les hydrocyclones, la séparation magnétique. Tous ces modifications ont été faite dans le but d'économiser l'énergie et les dépenses.

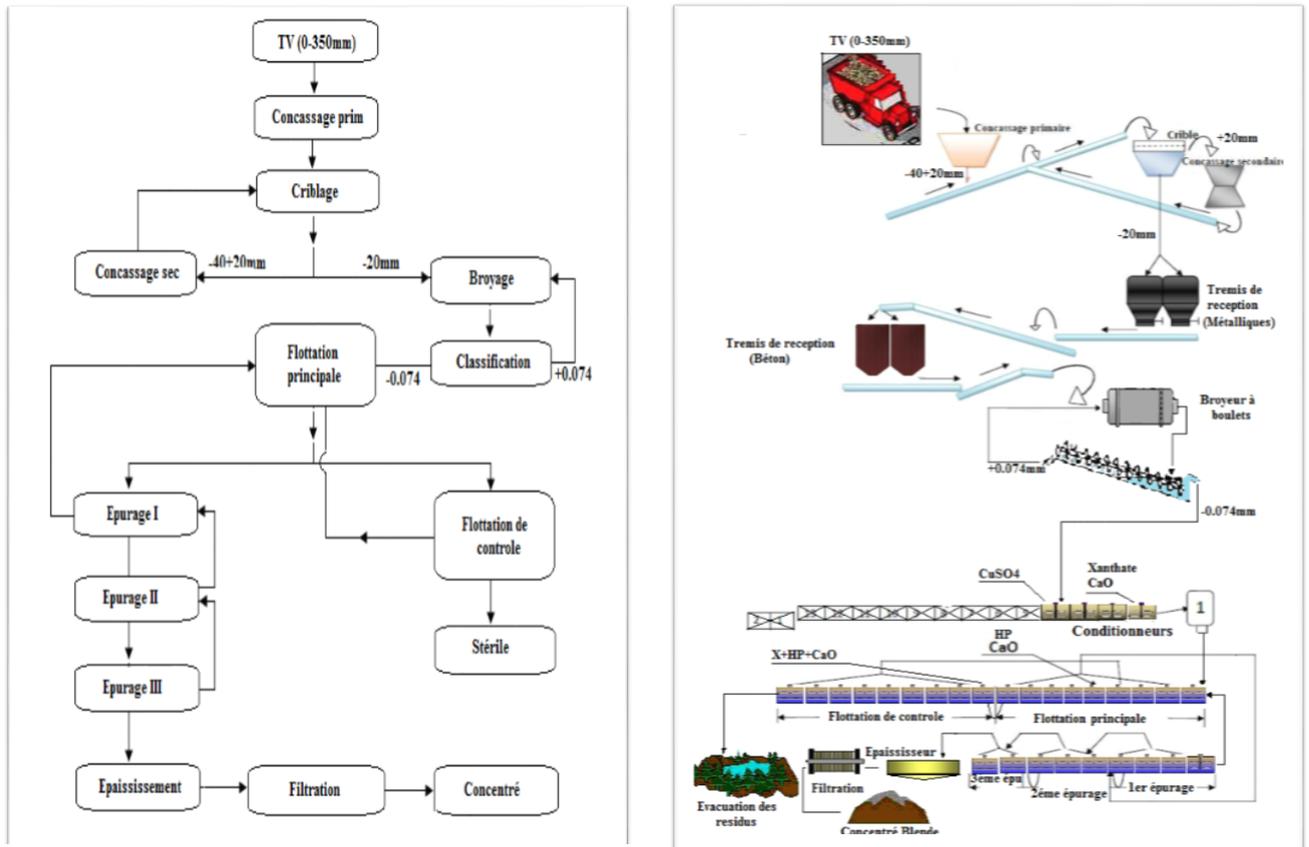


FIGURE 2.3 – Technique d'enrichissement du minerai de Chaabat El Hamra

Chapitre 3

Préparation des minerais

3.1 Concassage

La fragmentation d'un solide s'opère sous l'action d'un champ de contrainte tridimensionnel non homogène généré par des forces en contact. Le concassage commence à un stade précoce de la réduction dimensionnelle. Il est une opération de réduction du tout-venant extrait de la mine ou de la carrière jusqu' à une dimension de l'ordre de quelques centimètres ou millimètres. Il s'agit généralement d'une opération sèche réalisée en deux ou trois étapes (primaire, secondaire et tertiaire).

3.2 Broyage

Le broyage est l'action de séparer un matériau donné en plusieurs parties ou de diminuer sa taille. Cela concerne donc la réduction d'un ou de plusieurs corps en fragments de dimension préalablement établie, ou à la réduction d'un ensemble solide, déjà fragmenté en éléments encore plus petits.

3.3 Classification

La classification est une méthode de séparation des particules en deux ou plusieurs classes sur la base de la vitesse avec laquelle elles se sédimentent dans un milieu fluide (Heiskanen, 1993), il s'agit généralement de l'eau. Puisque la vitesse des particules dans un milieu fluide dépend non seulement de la taille, mais aussi du poids spécifique et de la forme des particules donc les principes de classification sont importants et variés. Les classificateurs sont également influencés fortement par la performance des circuits de broyage.

3.4 Flottation

La flottation est sans aucun doute la technique de traitement des minerais la plus importante et la plus utilisée, c'est un procédé de traitement physico-chimique basé sur les propriétés superficielles des particules minérales, selon qu'elles soient en contact avec de l'air ou de l'eau. Dans cette optique, on met en suspension dans de l'eau les particules de minerai finement broyées, puis on conditionne le mélange minerai/eau (ou pulpe) avec

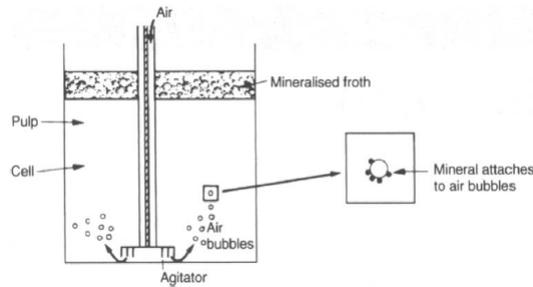


FIGURE 3.1 – Principe de flottation

un réactif chimique appelé collecteur, dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface de la substance à flotter, afin que celle-ci soit plus encline à adhérer aux bulles d'air qu'aux particules d'eau.

La pulpe est alors introduite dans un appareil muni d'un agitateur et d'une arrivée d'air. Les bulles d'air injectées vont se fixer sur les particules devenues hydrophobes, et ainsi les faire remonter à la surface la pulpe. Il suffira par la suite de recueillir la mousse résultante ; le concentré minéral est obtenu par simple lavage suivi d'un séchage. La qualité de la mousse (stabilité, solidité, taille des bulles) est assurée par l'ajout d'un réactif appelé moussant.

3.4.1 Type de flottation

Selon les besoins industriels et économique pour une telle ou telle substance minérale, on y trouve deux types de flottation :

- a. **Flottation Directe** : Lors de ce procédé, on cherche à extraire prioritairement la substance utile comme produit de mousse et on laisse la gangue plonger en produit de cellule. On effectuera donc une flottation directe de minéral utile. Cette flottation est généralement utilisée pour récupérer des petites quantités valorisables présentes dans une gangue importante, ou purifier le produit de cellule des impuretés qui y sont présentes.
- b. **Flottation Inverse** : En revanche, ce procédé consiste à faire flotter la gangue, en laissant la substance utile en produit de cellule. Dépendamment des quantités à récupérer et des réactifs nécessaires, il peut parfois être plus intéressant d'effectuer une flottation inverse, notamment lorsque la flottation sélective de certains minéraux est plus compliquée.

3.4.2 Les exigences aux réactifs de flottation

Les réactifs de flottation doivent être :

- Non coûteux.
- Non déficitaires.
- Stables lors du stockage.
- Solubles dans l'eau.
- Non toxiques.
- Leur action doit être sélective.
- Leur qualité doit être standardisée.

Chapitre 4

Extraction du zinc

La sphalérite est le principal minéral de zinc. La plupart des gisements de zinc contiennent de la sphalérite (ZnS). En raison de la présence répandue sur la surface de la terre, la plupart des usines de zinc au monde fonctionnent avec des minerais sulfureux. Il n'y a que quelques usines exploitées avec d'autres minerais de zinc.

Le minerai de zinc devrait inclure un pourcentage suffisant de zinc pour la production de zinc métallique. Étant donné qu'un minerai de zinc typique a 2-20% de zinc, il doit être concentré par flottation à une valeur de zinc raisonnable pouvant être utilisée comme matériau d'alimentation dans une usine de zinc. Après la flottation, le concentré de zinc est généralement subira un grillage pour obtenir un oxyde de ZnO avant la lixiviation ou la fusion.

Principalement, l'extraction du zinc s'effectue de deux manières différentes, la méthode hydrométallurgique ou pyrométallurgique.

4.1 Les avantages d'hydrométallurgie et pyrométallurgie

Tout d'abord, en pyrométallurgie, une température élevée est nécessaire afin qu'une consommation élevée d'énergie et beaucoup de carburant soit nécessaire pour la récupération, mais les processus hydrométallurgiques sont effectués à basse température (environ 100°C).

Un autre point important est la formation de SO_2 en pyrométallurgie. SiSO_2 n'est pas suffisant pour fabriquer H_2SO_4 , son élimination devient un très gros problème. Bien qu'une énergie supplémentaire soit nécessaire pour traiter les minerais de faible teneur en raison de la présence d'une quantité élevée de minéraux de gangue dans la méthode pyrométallurgique, ce problème pourrait être éliminé en utilisant un lixiviant sélectif dans le procédé hydrométallurgique. Enfin, les opérations hydrométallurgiques sont réalisées à petite échelle et nécessitent des investissements inférieurs à ceux de la pyrométallurgie.

4.2 Etapes de la production du zinc

La métallurgie du zinc peut se faire soit par la pyrométallurgie soit l'hydrométallurgie.

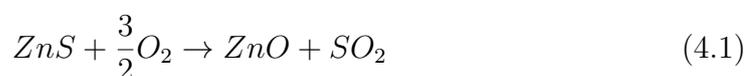
4.2.1 La pyrométallurgie

La pyrometallurgie du zinc se réalise en trois étapes :

a. Grillage des sulfures :

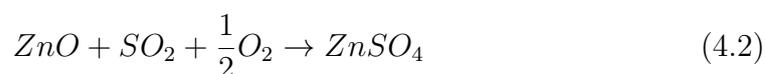
Si l'objectif premier de cette étape est de transformer le sulfure en oxyde, dit calcine, il est, plus largement, de préparer une charge dont les caractéristiques physico-chimiques induiront directement le rendement métallurgique ultérieur. Les éléments autres que le zinc sont à prendre en compte, par exemple pour la formation d'un laitier, si bien que les conditions particulières de grillage sont à adapter en fonction de l'outil à alimenter. Il y a cependant des caractéristiques communes qui nous permettront une présentation globale.

La transformation du sulfure de zinc en oxyde se fait par une réaction exothermique, si bien qu'une fois amorcée l'opération se poursuit sans apport extérieur de chaleur (equation 4.1) :



$\Delta H = -445 \text{ kJ/mole de ZnS entre } 800\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

des réactions parasitaires, qui se produisent surtout à température relativement basse (500-600 °C), conduisent au sulfate de zinc à partir de ZnS ou de ZnO.



$\Delta H = -305 \text{ kJ/mole de ZnO}$.

Ces sulfates se décomposent à partir de 900 °C. il faut ajouter à cela que d'autres réactions parasitaires sont inévitables tels que la formation de silicate de zinc (willémite), celle de ferrite de zinc (franklinite) et celle de différents spinelles type aluminates.

b. Réduction de l'oxyde :

Le diagramme d'Ellingham-Richardson, qui donne la variation de l'enthalpie standard en fonction de la température, ramenée pour toutes les réactions d'oxydation à une mole d'oxygène, permet de cadrer rapidement la métallurgie thermique du zinc (Figure 4.1).

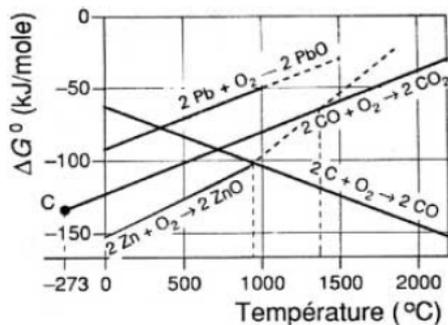


FIGURE 4.1 – La variation de l'enthalpie libre standard de formation d'un oxyde en fonction de la température

c. Affinage du zinc brut :

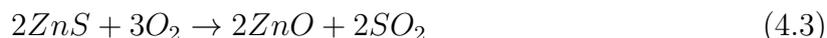
Le zinc produit par les condenseurs des différents types ne titre que 98,5 %, ce qui ne permet guère qu'une utilisation dans la galvanisation au trempé (article Galvanisation à chaud dans ce traité). Les principales impuretés contenues sont le plomb, de l'ordre du pour-cent, le fer et le cadmium, de l'ordre de 0,1 %, et à des teneurs plus faibles, de 10 à 100 ppm : As, Sb, Sn, Cu. Les conditions de marché imposent le plus souvent une purification.

4.3 Méthode hydrométallurgique

Dans le monde, plus de 90% de la production de zinc provient des minerais de sulfures primaires traités par le processus grillage-lixiviation- électrolyse. Les minerais de carbonate de zinc ($ZnCO_3$) sont traités selon le schéma suivant : four à arc électrique (Waelz) - lixiviation – électrolyse. En conséquence, l'extraction hydrométallurgique du zinc peut être résumée dans deux schémas pour les minerais sulfurés et les minerais carbonés.

4.3.1 La lixiviation conventionnelle

Le concentré de zinc obtenu après le processus de la flottation peut être traité par lixiviation dans des procédés discontinus ou continus. La figure (4.2) montre le diagramme pour un processus de zinc électrolytique simple appelé « lixiviation unique ». Pour le concentré de zinc de type sulfure, le grillage est la première étape de ce processus. Durant cette première étape, le ZnS réagit avec de l'oxygène selon la réaction (4.3) . À la fin de la réaction, on obtient de la calcine de zinc (ZnO) et on libère du SO_2 qui sera transféré dans une usine pour produire de l'acide sulfurique.



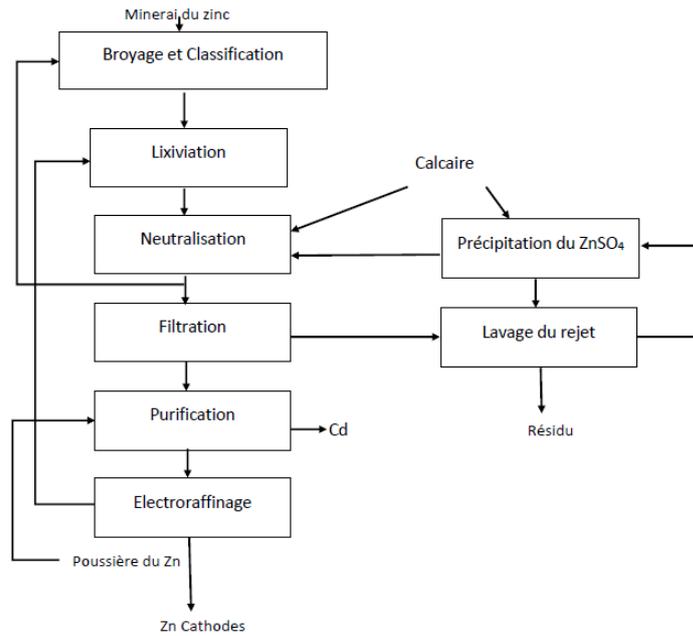
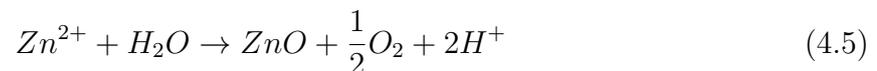
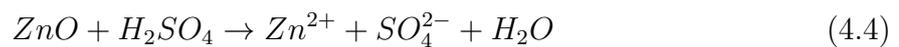


FIGURE 4.2 – La production électrolytique du zinc

Pendant la lixiviation, de la calcine est ajoutée à l'électrolyte épuisé jusqu'à atteindre la concentration minimale en acide pour pouvoir dissoudre le zinc. Pour éliminer le fer et d'autres impuretés, la pulpe est neutralisée avec de la chaux (CaO). Dans la lixiviation acide, le ZnO est converti en ZnSO₄ soluble dans l'eau selon la réaction (4.4). Après filtration, on obtient une solution chargée. Cette solution impure est ensuite purifiée en ajoutant un mélange de zinc-fer ou du zinc en poudre, ce qui provoque la dissolution des métaux d'impuretés par cimentation. Lorsque la solution sort de la section de purification, elle passe au réservoir électrolytique pour obtenir du zinc métallique de haute pureté selon la réaction suivante :



Selon les nouvelles technologies, le processus de « double lixiviation », illustré à la figure (4.3), est développé. Principalement, ce processus comporte deux étapes de lixiviation. Dans la première étape, on ajoute un excès de calcine jusqu'à ce que tout l'acide dans l'électrolyte soit consommé, tandis que le fer et d'autres impuretés sont précipités. La deuxième phase de la lixiviation se fait par une solution à faible acidité. Ensuite, cette solution revient à la première étape de lixiviation et les résidus de lixiviation sont éliminés.

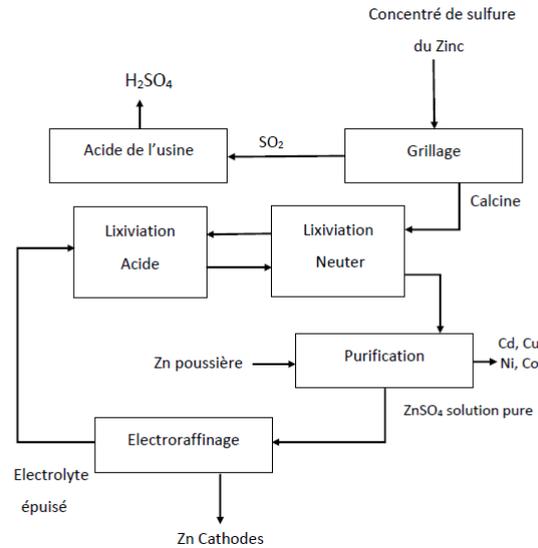


FIGURE 4.3 – Le processus de double lixiviation

4.3.2 Lixiviation sous pression

Étant donné que la sphalérite est directement attaquée avec de l'acide sulfurique dans ce procédé, elle s'appelle «lixiviation directe du concentré de zinc» ou procédé de lixiviation sous pression. Par rapport au processus conventionnel, le procédé de lixiviation directe présente des avantages. Tout d'abord, le stade de grillage est éliminé, ce qui empêche la formation de ferrite de zinc complexe ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{ZnO}$). En outre, les minerais de faible teneur peuvent être évalués par lixiviation directe même en présence de fer à haute teneur dans le minerai. Un autre aspect positif est le faible coût de ce processus. Le processus de la lixiviation directe est donné dans la figure suivante (figure 4.4) :

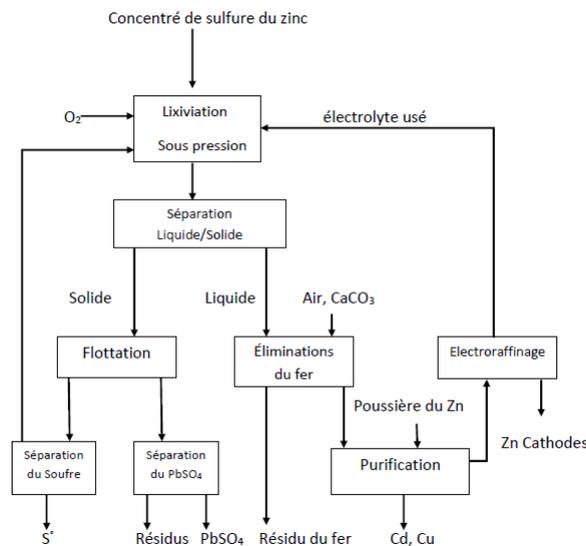
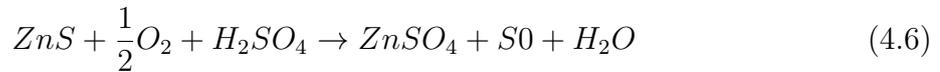


FIGURE 4.4 – Lixiviation sous pression du minerai de zinc

En utilisant le procédé cité dans la figure précédente, tout métal précieux peut être

obtenu avec différents lixivants. Pour la récupération du zinc à partir du concentré en utilisant de l'acide sulfurique comme lixiviat, le concentré doit être finement broyé à - 44 microns pour que toutes les particules réagissent avec l'acide sulfurique. La réaction globale (4.6) qui se produit dans les autoclaves est la suivante :



Après la lixiviation, la liqueur de lixiviation subira une purification afin d'éliminer les éléments du fer. Enfin, le zinc métal est obtenu par électrolyse et l'électrolyte utilisé revient à la première étape. Pour une lixiviation optimale, la température maximale devrait être inférieure à 150 °C et une pression partielle minimale d'oxygène devrait être supérieure à 2 bars. En utilisant ces conditions, on peut obtenir plus de 97% d'extraction de zinc.

4.3.3 Production du zinc à partir des minerais carbonatés

Les minerais de carbonate, contenant des quantités élevées de smithsonite ($ZnCO_3$), qui sont très difficiles à concentrer par la flottation ou d'autres techniques de traitement des minéraux. Par conséquent, ces minerais ont besoin d'un prétraitement pyrométallurgique pour pouvoir convertir la smithsonite ($ZnCO_3$) en oxyde de zinc (ZnO). La technologie du four Waelz a été utilisée pour ce prétraitement. En fait, le procédé Waelz est conçu pour le traitement des minerais de faible qualité et complexes et s'applique à tous les minerais contenant du zinc, du plomb, du cadmium, etc.

La longueur moyenne du four Waelz et le diamètre intérieur sont respectivement de 70 m et 4,3 m. Le four Waelz est alimenté par un minerai concassé avec ajout d'une quantité calculée d'agent réducteur approprié tels que le coke ou de charbon. Dans le four, une réaction de longue durée se produit entre la charge et les agents réducteurs. Cette réaction permettra une décomposition complète de tous les composés de zinc. Dans ce type de four règne une forte température, cependant les métaux en charge sont volatilisés, puis ces vapeurs métalliques sont oxydées dans le four. Tous ces processus se déroulent entre 900 et 1300 °C. À la fin du processus de Waelz, on obtient des métaux oxydés (ZnO , PbO , CdO) appelés oxyde de waelz. Après une étape de densification qui nécessite l'élimination des éléments volatils tels que Cl et F, la ligne de production ressemble à d'autres processus de lixiviation expliqués ci-dessus comme le montre la figure 4.5.

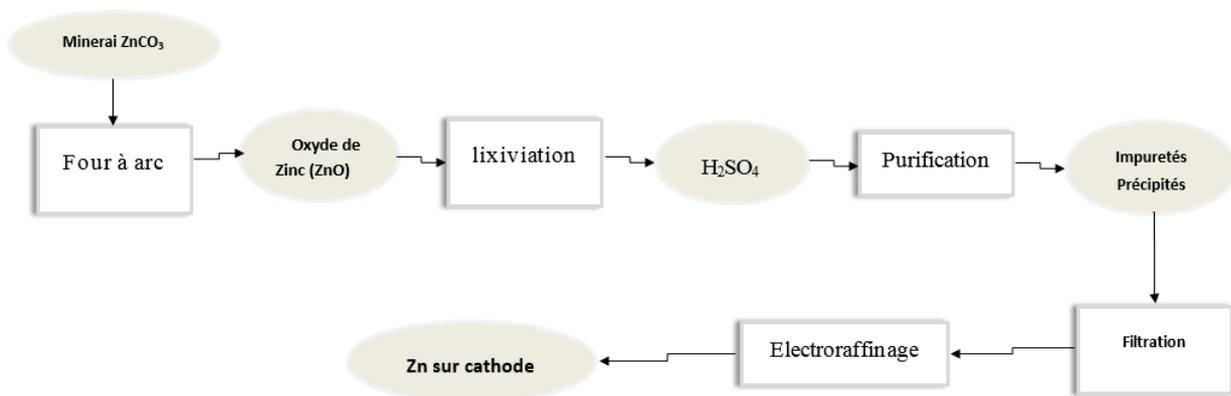


FIGURE 4.5 – Production électrolytique du zinc à partir du minerai de Smithsonite

Deuxième partie
Partie Expérimentale

Chapitre 5

Partie Expérimentale

5.1 Introduction

Cette partie consiste à traiter le minerai (concentré) en provenance de la laverie de Ain Azel situé dans le wilaya de Sétif par la méthode hydrométallurgique.

Après avoir passé le minerai par une préparation mécanique (concassage, broyage et flottation) au niveau de la laverie. Le minerai sulfuré ZnS a subi initialement un grillage, ensuite une lixiviation, une purification et un dosage. Afin d'arriver à l'électrolyse pour récupérer le produit final ayant un degré de pureté plus élevé.

Ce travail a été effectué dans le but d'étudier l'influence de la granulométrie des particules lors de la lixiviation sur la taux de récupération du zinc, et de faire une comparaison de résultats en utilisant deux agents lixivants(l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique)Pour déterminer le choix optimal pour l'opération.

5.2 Section concassage – criblage

Le minerai tout-venant, d'une granulométrie moyenne de 0-350 mm, subit initialement un pré-criblage à 80 mm afin de permettre au concasseur primaire à mâchoires de ne traiter que la fraction supérieure à 80 mm et avoir ainsi un rendement optimal de concassage.

Les passants de pré-criblage et le produit du concasseur primaire (fraction de 0-80 mm) subissent un criblage à 20 mm.

La fraction de 20-80 mm est traitée en circuit fermé dans un concasseur secondaire giratoire.

La fraction de 0-20 mm obtenue (à l'issue de cette préparation mécanique à sec) est ensuite dirigée vers une préparation mécanique par voie humide.

5.3 Section de traitement par gravimétrie

Les caractéristiques minéralogiques du minerai permettent d'effectuer la pré concentration en milieu dense avant l'enrichissement final par flottation, par cette méthode nous arrivons à séparer de 15 à 20 % de minerai stérile (fraction légère).

Le but principal de traitement en suspension lourde, est d'augmenter le traitement général de l'usine.



FIGURE 5.1 – Section de concassage et de criblage

Le minerai de classe inférieure à 20 mm est déversé dans la trémie du corps principal (125t), par l'intermédiaire de l'élévateur à godets il est déversé dans une crible-tambour de lavage :

- La classe granulométrique 0-5 mm éliminée au tambour de lavage alimente le classificateur monosépale, et là s'effectue une séparation :
 - Inférieure 0,074 mm alimente l'épaississeur.
 - 0,074 – 5 mm rejoint la fraction lourde sur le convoyeur à bande N ° 7.
- De l'épaississeur, les sables sont aspirés par une pompe et alimentent directement la flottation, l'eau clair décantée est recyclée vers le tambour de lavage.
- La classe (5 -10) éliminée au niveau du crible DRAGON est déversée dans le crible WEDAG dans la partie fraction lourde.

5.4 Section Broyage-Classification

Le broyage et la classification visent à révéler les particules minérales et ce qui garantit les conditions optimales à obtenir. Une récupération au maximum des parties intégrantes utiles avec la qualité la plus haute possible, et une consommation de réactifs et d'énergie minimale.

Le procédé de broyage

Par un broyeur à boulets fonctionnant en cycle fermé avec un classificateur monospirale. C'est de s'assurer à obtenir une base de minerai de classe inférieure à 0.074 mm.



FIGURE 5.2 – Section de broyage et de classification

5.5 Section de flottation et filtration

Le schéma de flottation actuel est sélectif directe, il composé du cycle de Zinc.

Le cycle de Zinc est précédé par une agitation, en vue de permettre au sulfate de cuivre de libérer les grains minéraux de Zinc. Le cycle comprend : une opération principale, une de contrôle, et trois d'épuration.

Le drainage des concentrés vers les épaisseurs se fait par l'intermédiaire des pompes. Après épaisseur sage, les concentrés sont aspirés par des pompe à membrane et dans des filtres à tambour s'effectuer la filtration des produits.

5.6 Grillage

Dans un premier stade, avant de procéder aux essais hydrométallurgiques, une opération de grillage doit être effectuée afin de désulfurer le minerai sulfuré ZnS et le rendre sous la forme d'un oxyde ZnO selon la réaction suivante.(équation 5.1).



L'opération du grillage est réalisée comme suit : le concentré du minerai sulfuré obtenu par flottation est introduit dans un four(Type FOV) sous une température fixée à 900 ° C pendant deux heures de temps. Durant cet intervalle de temps, l'air est injectée continuellement chaque 15 minutes en utilisant un compresseur afin d'éliminer le soufre selon la réaction chimique précédente (equation 5.1). Le four est liée à un récipient contenant une suspension d'hydroxyde de baryum Ba(OH)₂ afin de piéger le dioxyde de soufre qui est un élément toxique et polluant pour l'environnement. Le concentré du minerai sulfuré

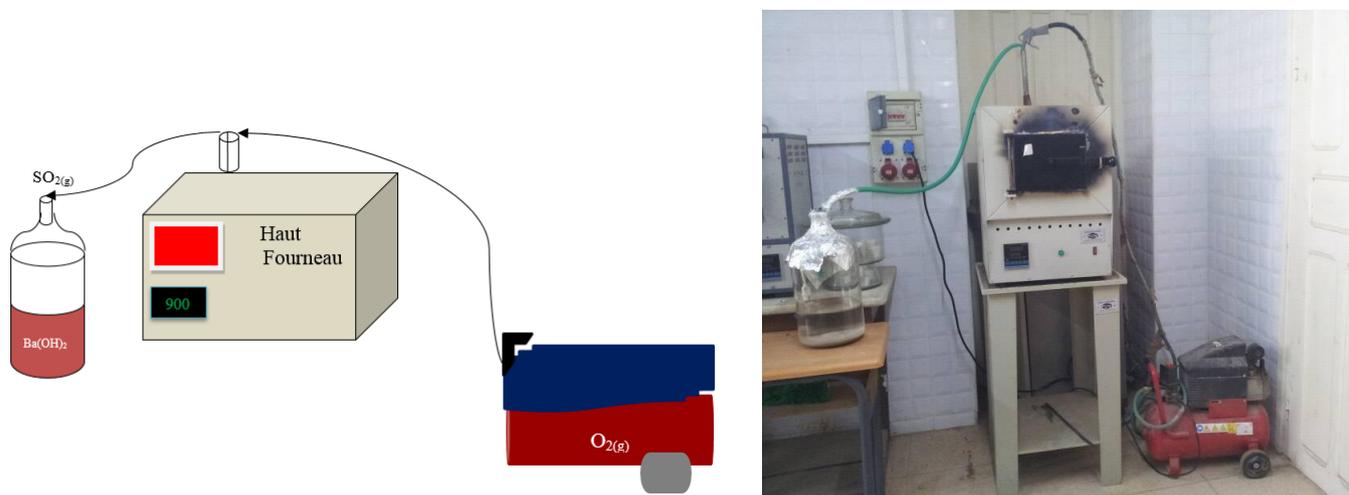


FIGURE 5.3 – Schéma de montage de grillage

obtenu par flottation est composé essentiellement des éléments sulfureux ZnS, FeS, PbS et les éléments oxydés CuO et SiO₂. Après la réalisation de l'opération du grillage, une calcine est obtenue composée des oxydes suivants sous forme solide : ZnO, Fe₂SO₄,PbO, CuO et une faible quantité de SiO₂ (Voir figure 5.4). Le produit final, la calcine, est utilisé par la suite dans les essais de lixiviation.

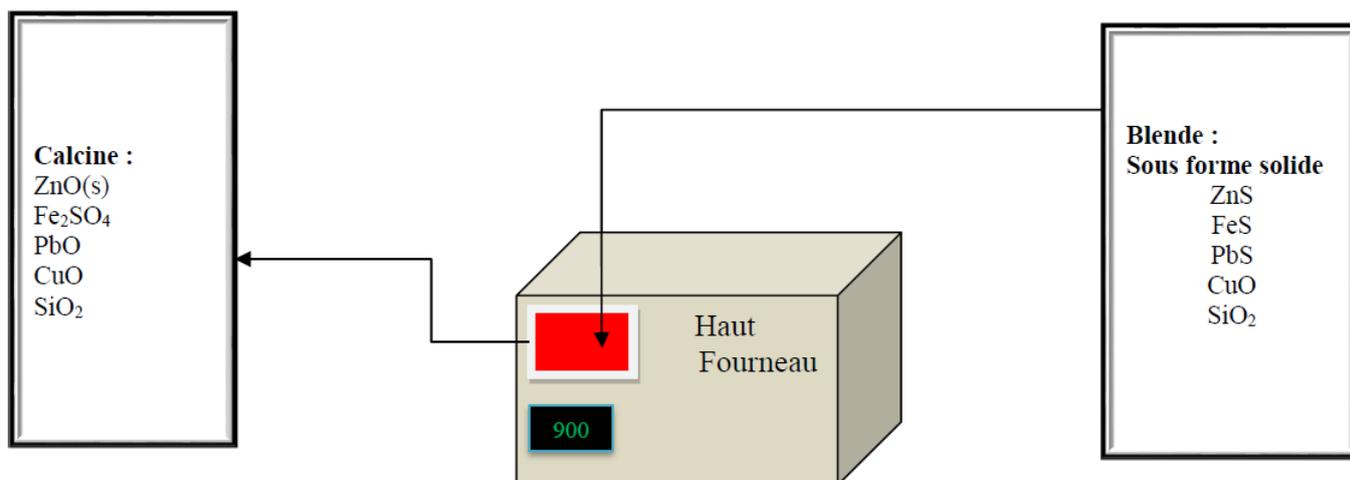
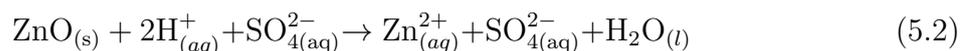


FIGURE 5.4 – Schéma explicatif du grillage

5.7 Lixiviation

La lixiviation généralement utilisée dans les industries minières du district de Kolwezi est la lixiviation par agitation. Le minerai broyé ou le concentré est lixivié dans des tanks munis d'un système d'agitation pneumatique et/ou mécanique. Pour obtenir un liqueur clair après lixiviation, une séparation solide liquide est appliquée. La séparation solide liquide peut se faire par décantation à contre courant, par filtration au filtre à bande, par filtration au filtre à tambour ou à disque ou par la combinaison de la décantation contre courant suivi de la filtration, ça Consiste en une lixiviation acide où la calcine est attaquée par une solution diluée d'acide sulfurique selon la réaction suivante :



Le protocole adopté est le suivant : une suspension composée de la calcine obtenue par grillage est mélangée, dans un récipient, avec de l'eau formant un rapport solide/liquide bien déterminé. La suspension est agitée en utilisant un agitateur magnétique et est chauffée par une plaque chauffante. Un volume d'acide sulfurique diluée est ajoutée continuellement par une burette pendant l'agitation de la suspension. Le volume d'acide sulfurique est fixé par le pH. La température est surveillée en utilisant un thermomètre (voir figure 5.5).

Matériel

- Bêcher,
- Agitateur,
- pH mètre,
- Thermomètre,
- Couvercle pour empêcher la diffusion des vapeurs dans l'air,
- Acide sulfurique,
- Minerai.

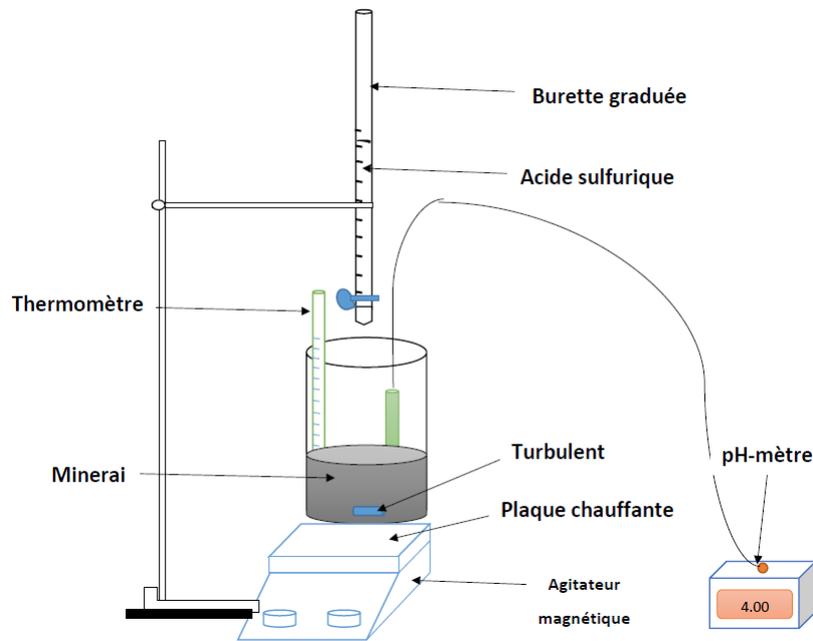


FIGURE 5.5 – Dispositif de lixiviation

Les paramètres étudiés durant les essais de lixiviation sont la température, le rapport solide/liquide, le pH, la durée d'agitation. La solution obtenue après la lixiviation est composée essentiellement des éléments sous forme ionique tels que Fe^{3+} et Cu^{2+} , et les oxydes (PbO et SiO_2) restent insolubles comme le montre la figure 5.6.

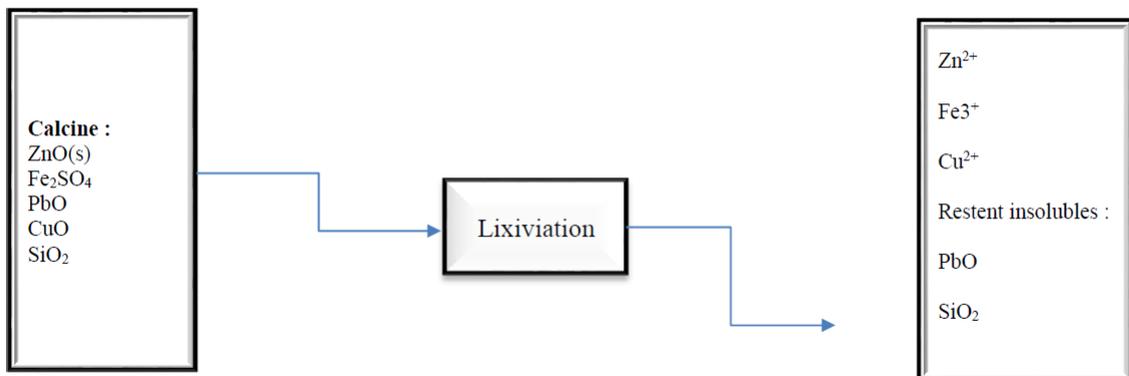


FIGURE 5.6 – Schéma explicatif de lixiviation

5.8 Purification

Dans ce qui suit, la solution (lixiviat) obtenue par lixiviation contient des impuretés qui sont insolubles tels que PbO et SiO_2 qui seront éliminées par filtration. La solution obtenue, après filtration, doit être l'objet d'une précipitation en éliminant les ions Fe^{3+} par ajout du sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ avec un $\text{pH} = 5$ (précipité rouge brique) comme le montre la figure 5.7.



FIGURE 5.7 – Purification des ions Fe^{3+}

Et les ions du cuivre Cu^{2+} seront précipités par l'ajout de thiosulfate de sodium $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (précipité vert) comme le montre la figure 5.8.

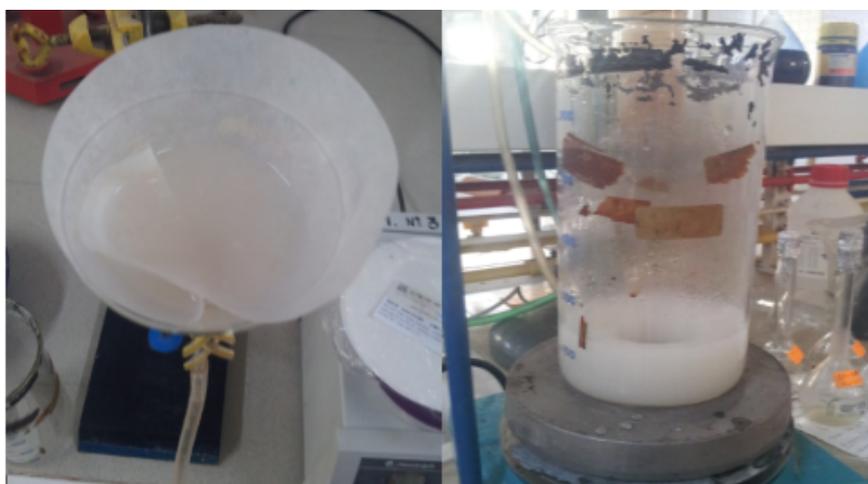


FIGURE 5.8 – Purification des ions Cu^{2+}

5.9 Dosage

Afin de connaître la teneur en zinc dans la solution purifiée, nous utilisons la méthode classique volumétrique.

Cette méthode est basée sur le titrage volumétrique par la solution du sel disodique de E.D.T.A (Ethylène-Diamine-Tétra-acétate disodique) (0.2 M) en présence de l'orange de xylénol utilisé comme indicateur pour des titrages par complexométrie. Le titrage s'effectuera en ajoutant l'orange de xylénol jusqu'à ce que la couleur devient violet, puis nous ajoutons la quantité nécessaire de l'E.D.T.A jusqu'à ce que la couleur passe du bleu violet au jaune citron comme le montre la figure 5.9.

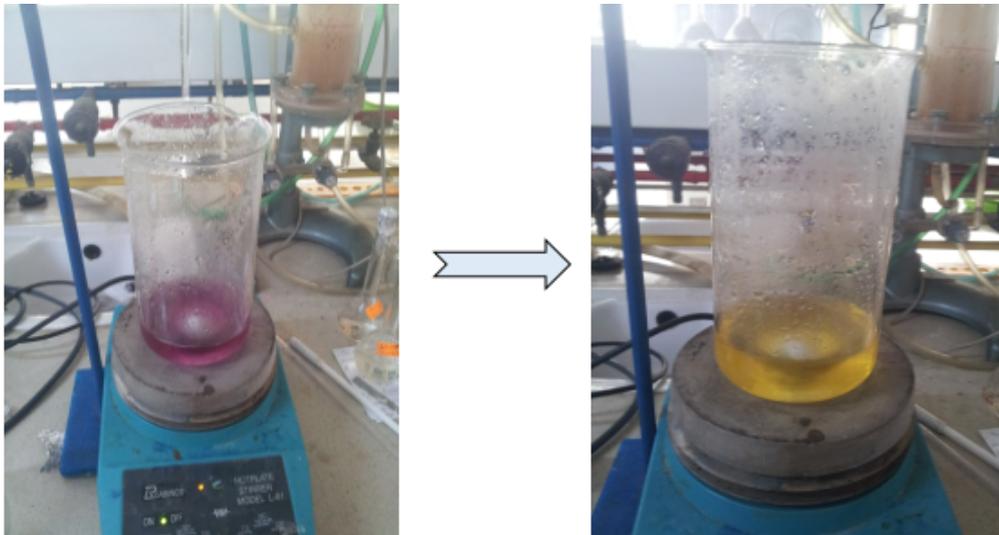


FIGURE 5.9 – Dosage du zinc

La teneur du zinc est déterminée selon la formule suivante 5.3 :

$$Zn\% = \frac{V_{EDTA} T_{Zn} \times 100}{G} \quad (5.3)$$

Tel que :

V_{EDTA} : Volume de complexons(EDTA) utilisée pour le titrage (ml).

T_{Zn} : Quantité de zinc correspondant à 1ml de complexons(EDTA) en $g.ml^{-1}$.

G : Poids de l'échantillon(g).

5.10 Électrolyse

L'électrolyse est un processus d'échange au cours duquel l'énergie électrique est transformée en énergie chimique. La réaction a lieu dans une solution d'électrolyte. Les ions doivent pouvoir circuler librement dans cette solution électrolytique pour passer d'une électrode à l'autre. Les deux électrodes sont reliées par l'électrolyte et par un générateur de courant électrique comme le montre la figure suivante (Figure 5.10).



FIGURE 5.10 – Montage d'électrolyse

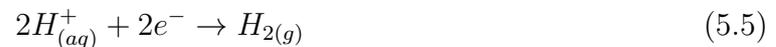
Afin de récupérer le zinc contenu dans la solution purifiée après lixiviation, nous allons procéder à l'électrolyse en utilisant la solution purifiée comme électrolyte et deux électrode l'un en aluminium comme cathode et l'autre en plomb comme anode.

Elle met en jeu les réactions suivantes (5.4) :

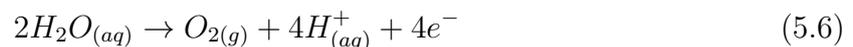
-Cathode en aluminium :



et



-Anode en plomb :



Cette opération est réalisée à l'aide d'un générateur de courant (type Gw-INSTTEK GPS-3303), en appliquant une tension de 20 V (tension minimale de l'électrolyse du zinc est voisine de 3.35 V).

Le degré de pureté est déterminé selon la formule suivante 5.7 :

$$P(\%) = \frac{M_{Zn}}{M_{récupéré}} \quad (5.7)$$

5.11 L'effet de la granulométrie

Afin d'étudier l'effet de la taille des particules sur la récupération en zinc, un échantillon de concentré en provenance de la laverie de CH a subi un grillage au sein du four du Laboratoire de Génie Minier à l'ENP pour éliminer le soufre qui est un élément toxique.

Après le grillage, un tamisage est élaboré pour extraire quatre classes granulométrique à savoir 0.1 mm, 0.08 mm, 0.071 mm et 0.063 mm qui seront utilisées par la suite dans le procédé de lixiviation afin d'élucider l'effet de la taille des grains sur la récupération en zinc. L'agent d'attaque est l'acide sulfurique (H_2SO_4) tout en gardant le même

protocole utilisé dans le PFE (tableau N° 4.16)



FIGURE 5.11 – Tamiseuse de type Retch

PH	4
Température (° C)	80
Rapport solide/liquide (%)	50
Temps d'agitation (min)	30

TABLE 5.1 – Conditions de lixiviation

Afin d'étudier l'effet de ce paramètre sur la lixiviation, nous avons fixé les autres paramètres(Tableau 5.1), et en faisant varier la taille des grains (Tableau 5.2).

Paramètre	Domaine d'étude			
La taille des grains (mm)	0.1	0.08	0.071	0.063

TABLE 5.2 – Domaine d'étude de la taille des grains

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Taille des grains (mm)	0.1	0.08	0.071	0.063
V_{EDTA} (ml)	34	35	37	39
%Zn	44.47	45.77	48.39	49.70

TABLE 5.3 – Teneur en Zn en fonction du pH

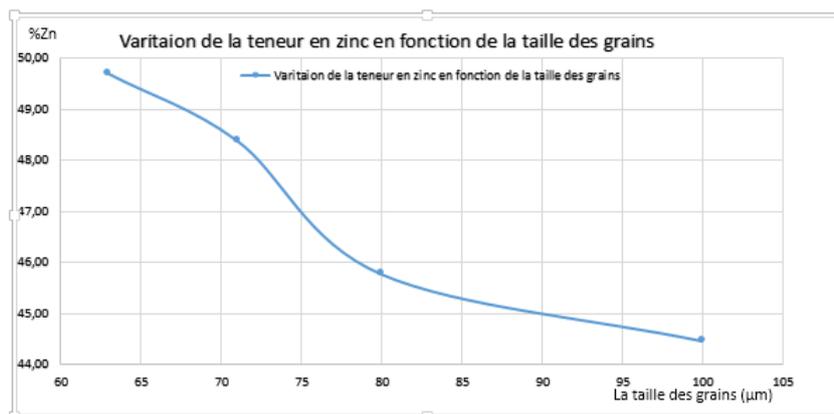


FIGURE 5.12 – Variation de la teneur en zinc en fonction de la taille des grains

Interprétation

Sur la base des résultats obtenus, nous avons tracé la courbe de variation de la récupération en zinc en fonction de la taille des particules comme le montre la figure (5.12). Nous remarquons la récupération en zinc est maximale (presque 50%) pour des grains de tailles petites (0.063 mm).

Au fur et à mesure que la taille des particules augmente la récupération en zinc diminue. Ceci est justifié par le fait que plus la taille des particules est petite plus la surface de contact entre la sphalérite ZnS et l'acide sulfurique est grande, ce qui favorise une bonne dissolution des ions Zn^{2+} dans le lixiviat.

5.12 Etude comparative

Cette partie consiste à appliquer les conditions idéales de lixiviation sur le concentré traité au sein de la laverie de Kharzet-Youcef. Lors du lixiviation et pour l'échantillon (E1) on utilise l'acide sulfurique H_2SO_4 , pour l'échantillon (E2) on utilise l'acide chlorhydrique HCl , à la fin une comparaison entre les deux produits a été faite.

Les deux échantillons ont subi un grillage sous une température de $900^\circ C$ afin d'éliminer le dioxyde de soufre (SO_2). L'étape suivante consiste à faire passer les deux minerais par une lixiviation (l'échantillon E1 par l'acide sulfurique, et l'échantillon E2 par l'acide chlorhydrique) qui se déroulent dans les conditions idéales déduites précédemment.

Lors de la lixiviation, des ions partent en solution sous forme ioniques et d'autres restent insolubles, ces derniers forment les impuretés de la solution. La solution impure sera purifiée en éliminant les impuretés insolubles par filtration, alors que les impuretés métalliques seront éliminées par complexométrie en ajoutant le complexant correspondant à chaque élément. Après cette étape de purification une filtration est appliquée afin d'obtenir une solution pure qui sera l'objet d'un dosage par la méthode volumétrique en présence de xélynol orangé comme indicateur et l'EDTA comme complexant dans le but de déterminer la teneur en zinc dans les deux solutions(Figure 5.13).

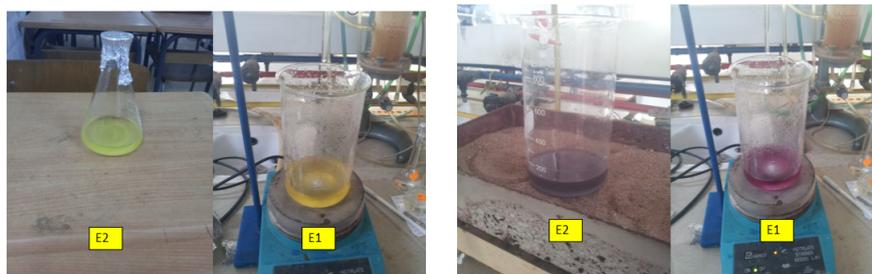


FIGURE 5.13 – Dosage des deux échantillons

La récupération en zinc pour les deux échantillons a été réalisée en appliquant une lixiviation sous les conditions optimales trouvées précédemment tels que une température de 80 ° C, une durée d'agitation de 30 min, un rapport liquide solide de 50%, avec un PH = 4, et une taille des grains de 0.063 mm.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Echantillon	V_{EDTA} (ml)	m_{Zn} (g)	%Zn
E1	38	0.50	49.70
E2	34	0.45	44.47

TABLE 5.4 – Tableau comparatif des résultats

Sur la base des résultats de la lixiviation des échantillons E1 et E2, il est à constater que la récupération en zinc est plus importante pour l'échantillon E1 avec un taux de 49.70% par rapport à l'échantillon E2 avec un taux de 44.47%. Cette différence est étroitement liée aux choix du type d'acide utilisé.

Dans ce qui suit on applique l'électrolyse sur les deux échantillons dans le but est de faire précipiter le zinc contenu dans les deux échantillons, et déduire le degré de pureté du produit final.

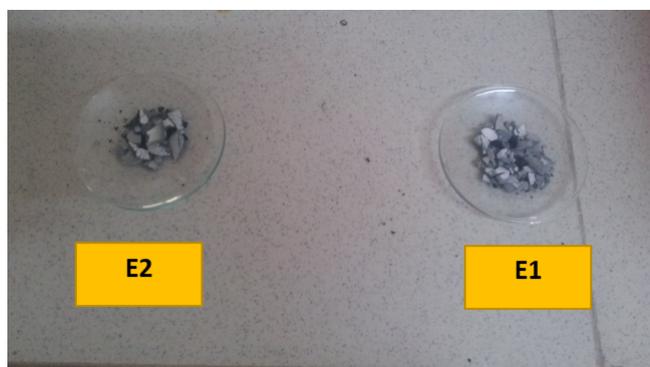


FIGURE 5.14 – Produit final des deux échantillons

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Echantillon	M_{Zn} (g)	$M_{récupéré}$ (g)	Degré de pureté (%)
E1	0.50	0.5278	94.73
E2	0.45	0.4871	92.38

TABLE 5.5 – Tableau comparatif des résultats

Sur la base de ces deux résultats, il est à constater que la récupération est relativement plus élevée pour l'échantillon E1 que pour l'échantillon E2 avec des récupérations de 94.73% et 92.38% respectivement. En général, la récupération du zinc selon les littératures atteint ou dépasse 99%. Pour notre étude, certains impuretés sont toujours présents dans la solution d'électrolyte ce qui empêche une meilleure récupération du zinc.

Conclusion générale

Dans cette étude, le but était de récupérer le zinc à partir de la sphalérite en provenance de la laverie de Chabet El Hamra à Setif (un concentré de sulfure de zinc ZnS), par hydrométallurgie sous les différentes conditions en utilisant l'acide sulfurique.

Avant d'appliquer le procédé hydrométallurgique, le concentré de sulfure de zinc a subi un grillage afin d'éliminer le soufre (S) qui est un élément toxique. D'après les études qui ont été faites, l'élimination n'est jamais complète et que 3% de soufre à peu près reste toujours dans le minerai bien sûr si le grillage est déroulé dans des conditions optimales. Ceci justifie la présence d'une fine couche en jaune qui recouvre le minerai après le grillage.

Afin d'appliquer le procédé hydrométallurgique, des essais préliminaires ont été réalisés dans le but de déterminer les conditions opératoires de lixiviation.

Dans une troisième étape, des essais de lixiviation ont été réalisés sur le minerai de sulfure de zinc (ZnS) de l'échantillon E1 pour récupérer le zinc en utilisant l'acide sulfurique (H_2SO_4), et l'acide chlorhydrique (HCl) pour l'échantillon E2. Il a été constaté que la récupération du zinc augmente avec l'augmentation de la concentration en acide, la durée d'agitation, la taille des particules, la température et le rapport liquide/solide. Cependant, la concentration optimale en acide H_2SO_4 est de 2ml (pH=4), la durée de la réaction chimique est de 30 min, la taille des particules est de 0.063mm, une température de 80 ° C et un rapport liquide/solide de 50%.

Enfin, le lixiviat obtenu après sa purification a subi une électrolyse sous une tension de 20 V en utilisant une cathode en aluminium et une anode en plomb. Cette opération a été appliquée sur les deux échantillons E1 et E2. La récupération obtenue était de 0.5278 g et 0.4871 g avec un degré de pureté de 94.73% et de 92.38% respectivement.

Références bibliographiques

- Rosenqvist, T. Principles of Extractive Metallurgy. Tapir Academic Press,2004. ISBN 9788251919227.
- Davenport, W.G. and King, M.J. and Schlesinger, M.E. and Biswas, A.K. Extractive Metallurgy of Copper. Elsevier Science,2002. ISBN 9780080531526.
- Cottrell, A.H. and Institute of Materials (Great Britain). An Introduction to Metallurgy. Institute of Materials,1995. ISBN 9780901716934.
- ENOF. Plan du directeur de développement de CHAABET EL HAMRA, Déc 2016.
- Rudis. Recherches géologiques effectués sur le gisement de Kherzet-Youcef. Association industrielle et minière,1964- 1965.
- OULDHAMOU,M. Cours de Minéralurgie, école nationale polytechnique d'Alger.
- Habashi, F. A Textbook of Hydrometallurgy. Metallurgie Extractive Quebec,1993. ISBN 9782980324703.
- Kordosky, Gary A. Copper solvent extraction : The state of the art. JOM,1992. Volume 44, N° 5, p 40-45.
- BANKA A,TRAHI A. Essai de Valorisation par Flottation de minerais polymétallique de Chaabet El-Hamra (122p).PFE,Alger,école nationale polytechnique : 2014.
- Gupta, C.K. and Mukherjee, T.K. Hydrometallurgy in Extraction Processes. Taylor Francis,1990. ISBN 9780849368042.
- Gilchrist, J.D. Extraction metallurgy. Pergamon Press,1989. ISBN 9780080366128.
- Blazy, P. La métallurgie extractive des métaux non ferreux. Société de l'Industrie Minérale,1979. ISBN 9782902723010.
- Ashok Gupta and Dennis S Yan. Mineral Processing Design and Operations (Second Edition). Elsevier,2008. ISBN 978-0-444-63589-1.

Annexe 1

5.13 Types de concasseurs

1. Concasseurs à mâchoires

La caractéristique distinctive de cette classe de concasseurs est les deux plaques qui s'ouvrent et se ferment comme des mâchoires. Les mâchoires sont disposées selon un angle aigu l'une par rapport à l'autre et une mâchoire est pivotée de façon à basculer par rapport à l'autre mâchoire fixe (Figure 5.16). Le matériau introduit dans les mâchoires est alternativement pincé et libéré.

Les concasseurs à mâchoires sont classés par le procédé de pivotement de la mâchoire oscillante (Figure 5.15)

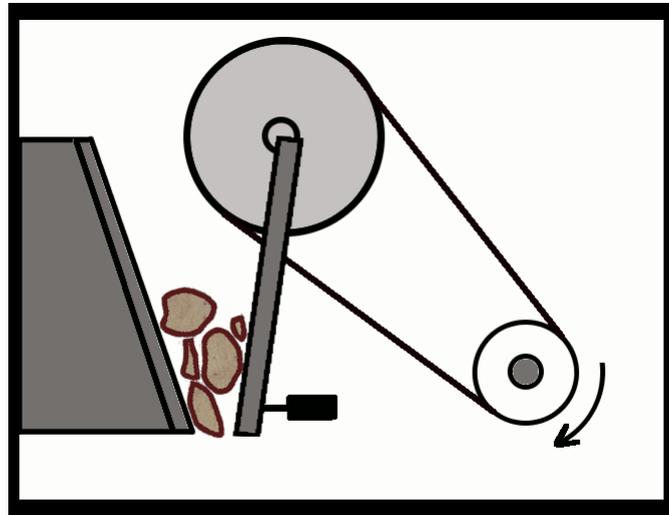


FIGURE 5.15 – Concasseur à mâchoires

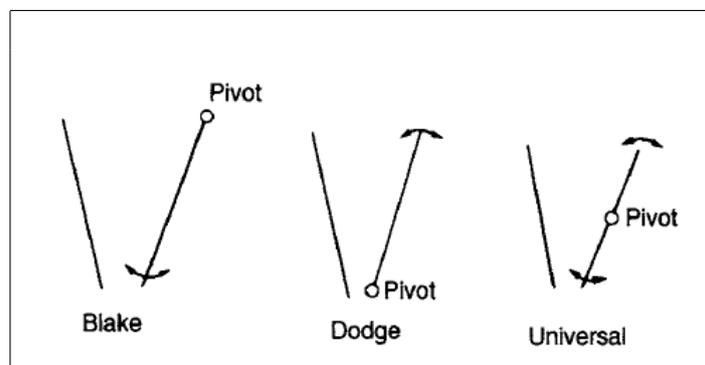


FIGURE 5.16 – Types de concasseurs à mâchoires

2. Concasseurs giratoires

Concasseur giratoire, soit concasseur à cône, s'adapte à broyer des sortes de minéral et de roche dur ou demi-dur. Il a des avantages comme : structure fiable ;

production efficace ; facile de régler ; économisé, etc. il se compose essentiellement d'une longue broche, portant un élément conique en acier dur. la tête assise dans un manchon excentrique. La broche est suspendue et à mesure qu'elle tourne elle balaie un chemin conique à l'intérieur de la chambre de broyage. Comme dans le concasseur à mâchoires, le mouvement maximal de la tête se produit près de l'ouverture de décharge.

A toute section transversale, il existe en fait deux ensembles de mâchoires s'ouvrant et se fermant comme des concasseurs à mâchoires. En fait, le concasseur giratoire peut être considéré comme un nombre infiniment grand de concasseurs à mâchoires de largeur infiniment petite, contrairement au concasseur à mâchoires le concasseur giratoire écrase sur un cycle complet, il a une capacité beaucoup plus élevée qu'un concasseur à mâchoires.

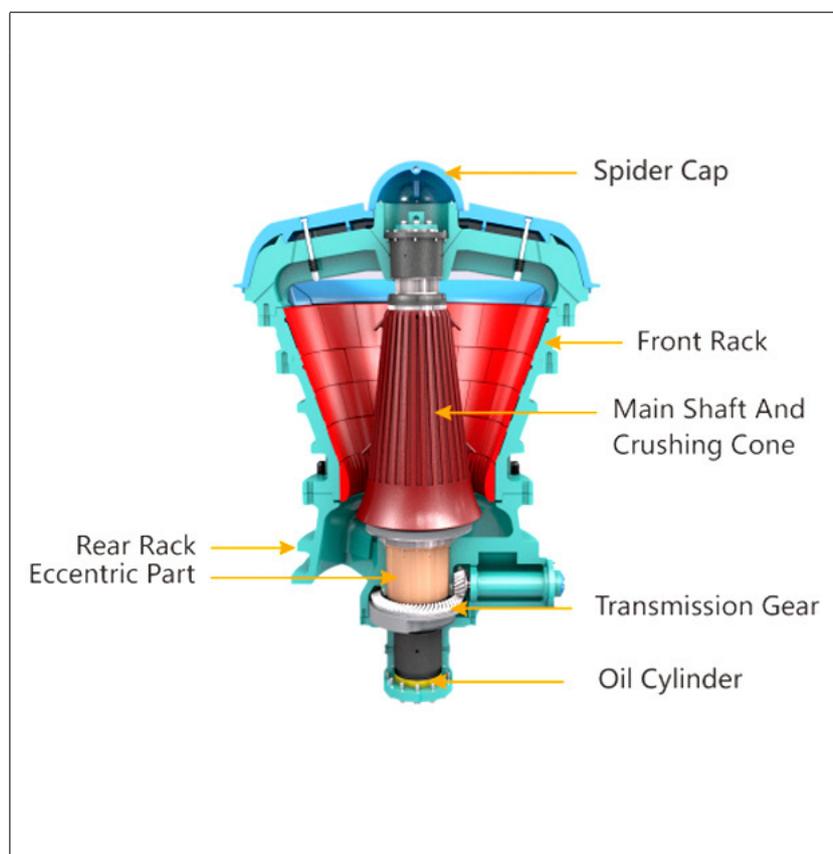


FIGURE 5.17 – Concasseur giratoire

3. Concasseurs à cône

Le concasseur à cône est un concasseur giratoire modifié. La différence essentielle est que la broche plus courte du concasseur à cône n'est pas suspendue, mais est soutenue par un battement universel incurvé sous la tête.

L'alimentation des concasseurs à cône peut être jusqu'à cinq fois supérieure à celle des concasseurs primaires, qui doivent supporter des contraintes de travail plus lourdes. Ils sont également réglés à des vitesses beaucoup plus élevées. Le matériau traversant le concasseur est soumis à une série de coups de marteau

plutôt que d'être progressivement comprimé par la tête lentement tournante du concasseur giratoire. Cela permet de décharger rapidement les fines broyées, ce qui permet de laisser l'espace pour une alimentation supplémentaire.

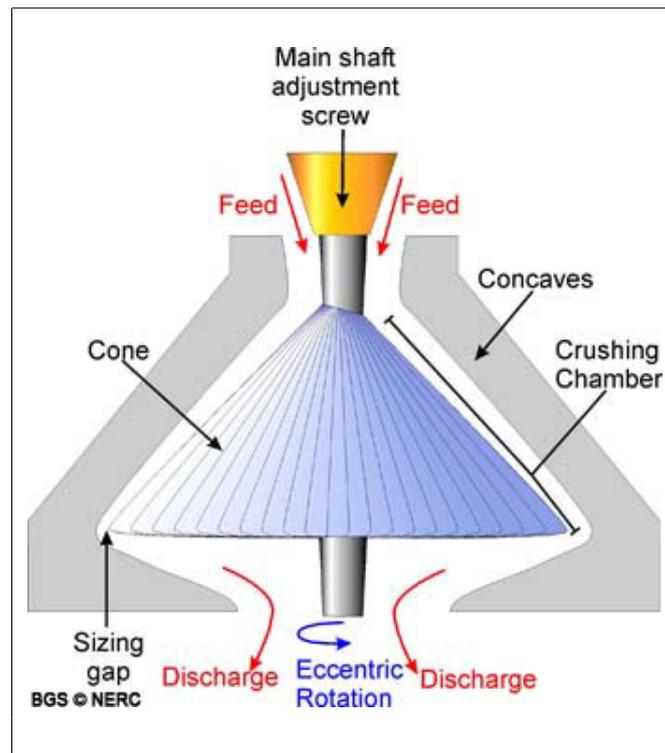


FIGURE 5.18 – Concasseur à cône

4. Concasseurs à percussion

Dans ce type, le concassage se fait par choc plutôt que par compression, par des coups brusques à grande vitesse appliqués sur le minerai à chute libre. Les contraintes internes créées dans les particules sont souvent assez grandes pour les faire briser.

Il y a une différence importante entre les états des matériaux écrasés par compression et par choc parce que des contraintes internes dans les matériaux brisés par compression sont créées et elles peuvent provoquer plus tard des fissurations, alors que le choc provoque une fracture immédiate sans stress résiduel. Les concasseurs à percussion ont donc une utilisation plus large dans l'industrie des carrières que dans l'industrie des mines de métaux. Ils sont privilégiés dans l'industrie des carrières en raison de l'amélioration de la forme du produit. Les concasseurs à cône ont tendance à produire des particules plus allongées en raison de leurs rapports de réduction élevés et de leur aptitude à traverser la chambre sans être brisées. Dans un concasseur à percussion, toutes les particules sont soumises à un choc et les particules allongées ayant une résistance plus faible du fait de leur section plus mince, seraient cassées.

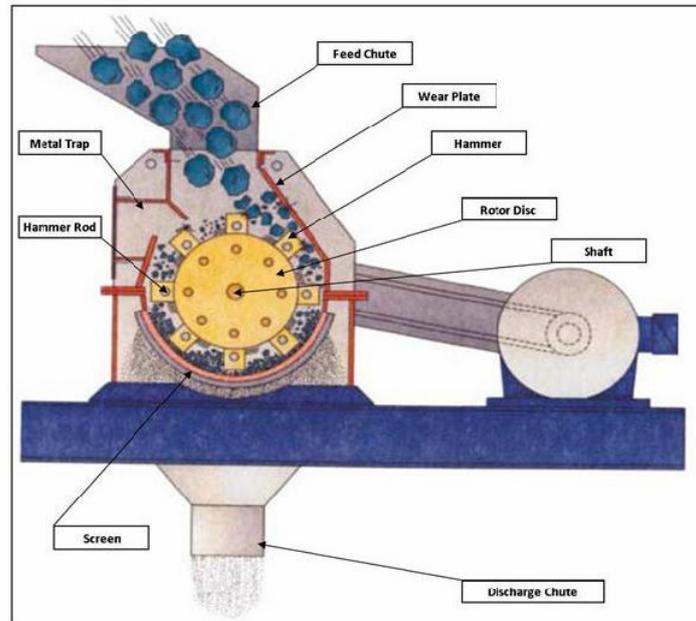


FIGURE 5.19 – Concasseur à percussion

5.14 Types de broyeurs

-Broyeurs à barres : Les broyeurs à barres sont généralement utilisés comme première étape de broyage après le concassage dans l'industrie minière (Figure 5.20). Leur utilisation est généralement limitée à des cas spéciaux tels que :

- Une taille très grossière de produit est nécessaire.
- Le surbroyage doit être minimisé.
- Le minerai est très difficile.

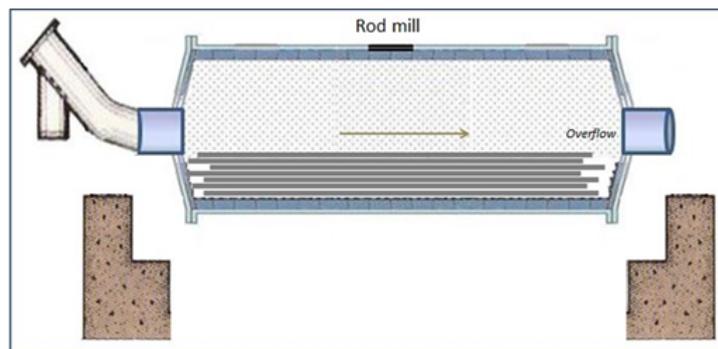


FIGURE 5.20 – Broyeurs à barres

-Broyeurs AG et SAG : Les circuits de broyeurs AG (AUTOGÈNES), SAG (SEMI-AUTOGÈNES) sont généralement et avantageusement utilisés pour de grandes capacités de traitement des minerais avec des teneurs métalliques inférieures. Comme les broyeurs AG, les broyeurs SAG sont utilisés comme broyeurs primaires. (Figure 5.21)

Un broyeur AG est un broyeur à tambours qui utilise le minerai lui-même comme corps de broyage. Le minerai doit contenir suffisamment de morceaux compétents pour servir au broyage. Un broyeur SAG est un broyeur autogène qui utilise des boulets en acier en

plus des morceaux compétents du minerai pour effectuer le broyage.

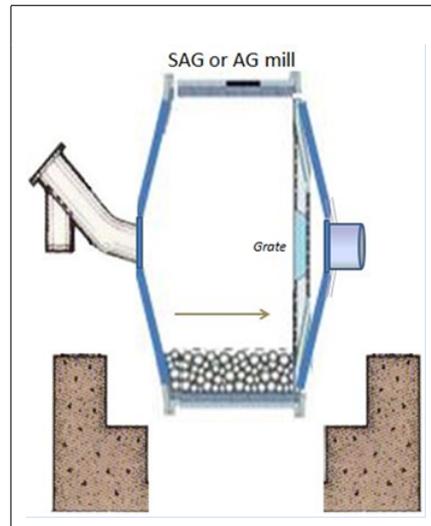


FIGURE 5.21 – Broyeurs AG/SAG

-Broyeurs à galets :

- Les broyeurs à galets sont utilisés comme étape de broyage secondaire.
- L'alimentation fraîche est le produit des broyeurs à barres et SAG.
- Les corps broyants se composent de morceaux de minerai lui-même, de cailloux synthétiques, ou d'oxyde d'alumine.
- La dimension des cailloux est entre 50 et 90mm.
- Les broyeurs à galets opèrent avec une grille de décharge.

-Broyeurs à pâte (à boulets) : (Figure 5.22)

- Les broyeurs à pâte sont utilisés dans le broyage secondaire d'une installation minière et aussi dans la section du cru en cimenterie.
- Ces broyeurs fonctionnent en circuit ouvert ou fermé sur hydrocyclones.
- Les blindages sont en acier ou en caoutchouc selon le cas.
- La sortie du broyeur peut être en système de trop-plein ou avec une grille de décharge .

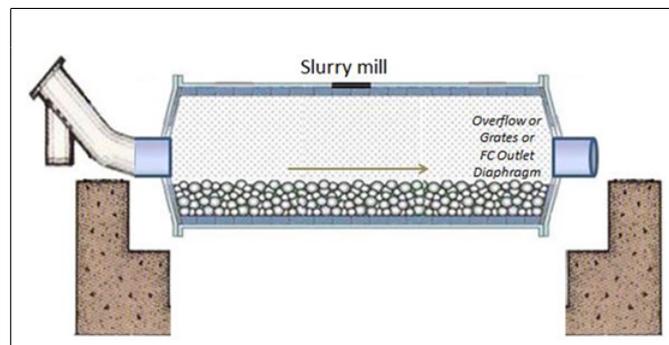


FIGURE 5.22 – Broyeur à boulets

5.15 Types de classificateurs

De nombreux types de classificateurs ont été conçus et construits. cependant ils peuvent être regroupés en deux grandes classes selon le sens d'écoulement du courant porteur : Classificateurs à courant horizontal et classificateurs à courant vertical.

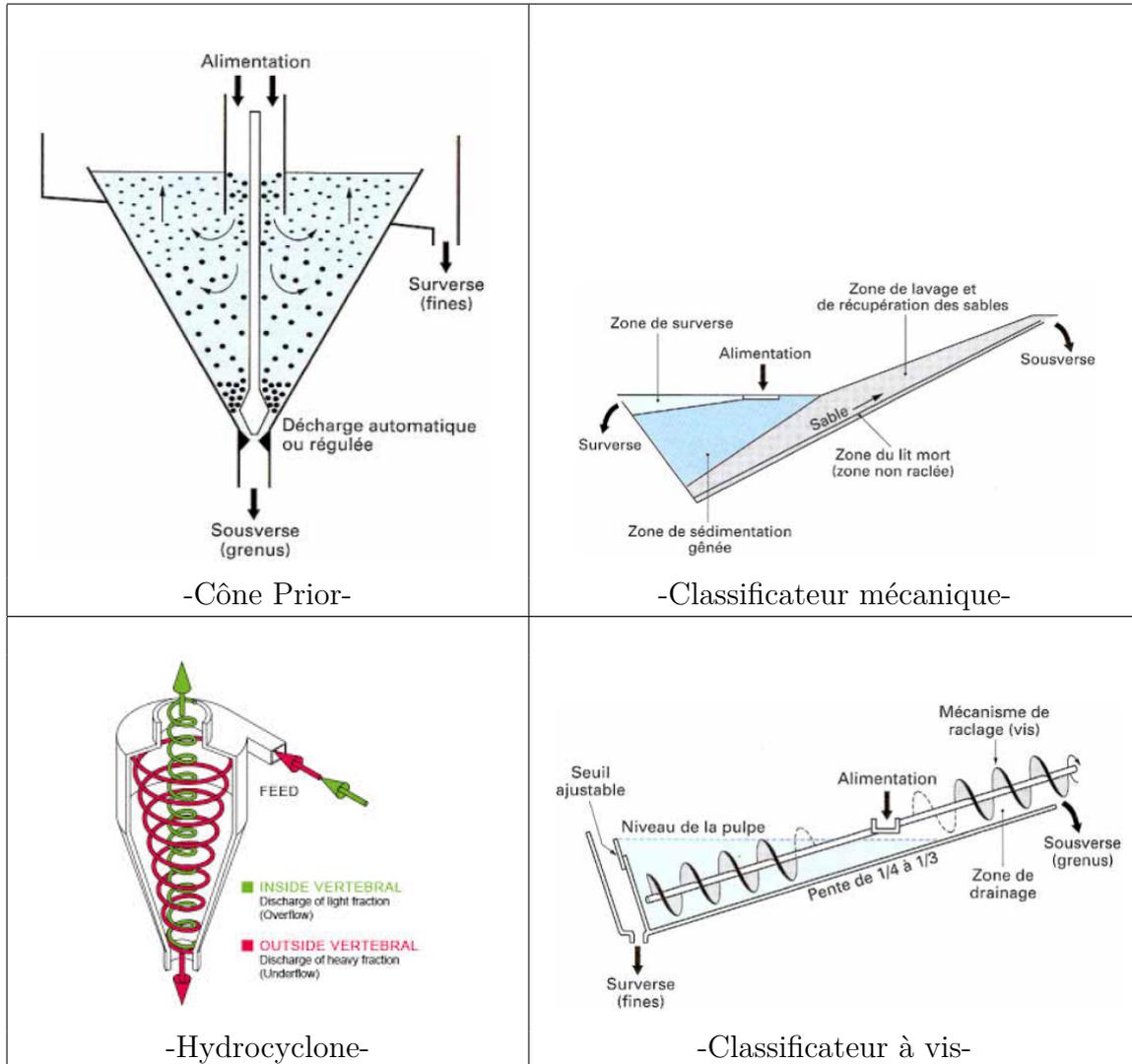


FIGURE 5.23 – Différents types de classificateurs