



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتعلم والمعادن - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES ET DE LA



METALLURGIE

AMAR LASKRI- ANNABA

Département Génie Minier

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Minier

Spécialité : Contrôle des Terrains Avancé

Thème

**ANALYSE ET CHOIX DES REACTIFS DE
FLOTTATION UTILISES DANS LE
TRAITEMENT DU MINERAI SULFURE DE
KHERZET YUCEF**

Présenté par : **Amel BOUSBAINÉ**

Encadré par : **Dr Hamid GOUCHENE**

Jury de Soutenance

Hamza CHENITI

Docteur, ENSMM

Président

Djamel NETTOUR

Docteur, ENSMM

Examinateur

Hamid GOUCHENE

Docteur, ENSMM

Encadreur

Novembre 2020



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie

Département Génie Minier

AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU MEMOIRE DE MASTER

Je soussigné (e) M... *Cheriti Hanga*
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de Master, déclare avoir autorisé
M... *Bonsabaine Amel*
à déposer son mémoire de Master après avoir apporté les corrections signalées
par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

Avis de l'Examineur :

Président du Jury

Résumé

Grace à la flottation il est possible de traiter de façon économique les minerais pauvres dont le traitement ne serait pas rentable par les autres méthodes de traitement minéralurgique. Plusieurs réactifs sont employés pour améliorer les rendements de flottation. Comme ils possèdent un grand impact sur la qualité de la récupération et purification des métaux.

Pour cela des essais de flottation de la blende à différents : temps de flottation, concentrations du collecteur, concentrations de l'activant et les valeurs de pH ont permis de mettre en évidence les quantités optimales pour la flottation de ce minerai.

Mots Clés : flottation, traitement minéralurgique, réactif, rendement, récupération, blende.

Abstract

Through flotation it is possible to economically process poor ores that would not be economically processed by other mineralogical processing methods. Several reagents are used to improve flotation yields. As they have a great impact on the quality of metal recovery and purification.

For this reason, tests of blende flotation at different flotation times, collector concentrations, activator concentrations and pH values have shown the optimal quantities for the flotation of this ore.

Keywords: flotation, mineralogical processing, reagents, yield, recovery, blende.

ملخص

بنضال البعوييم يمكن معالجة الخامات البؤيرة اؤنصاديا والتي لن تكون معالجةها بالطرق الأخرى للمعالجة المعدنية. يتم اسخدام العديد من الكواشف لبسبن إنباحية البعوييم حيث أن لها تأثير كبير على جودة اسنرداد ونزوية المعادن، لهذا فإن اخببارات بعوييم البزيج ني أووات مذبذبة: ووت البعوييم، ونركببات المجمع، ونركببات المنشط وويم الألس الهيدروجيني، جعلت

من الممكن إظهار الكميات المبلى لبعوييم هذا
الخام.

الكلمات المنبأحة: البعوييم، المرردو، نزوية، خام البكبزيند، المعالجة المعدنية، الكواشف.



Remerciement

Nous remercions tout d'abord dieu tout puissant de nos avoir donné le courage, la patience et la force Qui nous a permis de mener à bien ce travail

On tient surtout à adresser nos plus vifs remerciements à notre encadreur

Dr. GOUCHENE Hamid

Qui nous à permis de réaliser ce travail sous leur direction, Nous ne saurons jamais oublier leur disponibilité, leurs

Conseils judicieux et surtout leur soutien moral pour nous durant toute la période de confinement

Nous remercions également le directeur de complexe minier de kherzet youcef Mr.HELAL thelali

pour nous avoir accordée l'accès à l'entreprise et qui nous a facilité la tâche le long de notre stage pratique.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents pour leur soutien et encouragement tout au long de mes études,

*À mes chères sœurs la petite **Baraa**, **bouchra** et **Assia** qui m'ont beaucoup aidé pour terminer mes études,*

et qui

m'ont tellement

encouragé moralement et psychiquement, et qui se sont sacrifiés pour moi,

*À mon frère **Hichem** que dieu le protège, qui m'a aidé et encouragé de près comme de loin,*

*À mes chers tentes **Rebiha** et **Dalila**, pour tous leur amour, tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mon parcours universitaire.*

*Je le dédie aussi à tous mes amis de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie
ENSM - Annaba.*

AMEL

Table des matières

| | |
|--|------|
| Résumé | I |
| Abstract | II |
| ملخص | III |
| Remerciement | IV |
| Dédicace..... | V |
| Table des matières | VI |
| Liste des figures | VIII |
| Liste des Tableaux..... | IX |
| Introduction Générale | 01 |
| Chapitre I : Généralités sur les réactifs de flottation. | |
| I.1. Introduction..... | 02 |
| I.2. Conditions exigées au réactif de flottation | 02 |
| I.3. Classification des réactifs de flottation..... | 02 |
| I.3.1. Collecteurs | 02 |
| I.3.1.1. Définition des collecteurs..... | 02 |
| I.3.1.2. Rôle des collecteurs | 03 |
| I.3.1.3. Mécanisme d'adsorption des collecteurs | 03 |
| I.3.1.4. Classification des collecteurs | 04 |
| I.3.1.5. Critères de choix des collecteurs | 05 |
| I.3.2. Moussants..... | 07 |
| I.3.2.1. Définition des moussants | 07 |
| I.3.2.2. Rôle de moussant | 07 |
| I.3.2.3. Principaux moussants | 09 |
| I.3.2.4 Critères de choix des moussants | 01 |
| I.3.3. Activants | 12 |
| I.3.4. Déprimants | 13 |
| I.3.5. Les modificateurs de pH | 13 |
| I.4. Stratégie d'ajout des réactifs | 13 |
| I.4.1 Dosage..... | 13 |
| I.4.2. Distribution..... | 14 |
| Chapitre II : Réactifs de flottation des minerais sulfurés. | |
| II.1. Flottation des sulfures | 16 |

| | |
|--|----|
| II.1.1. Propriétés des sulfures en solution aqueuse | 17 |
| II.1.2. Réactifs de flottation des sulfures..... | 17 |
| II.1.3. Principaux collecteurs | 17 |
| II.1.4. Adsorption des collecteurs sur les sulfures | 12 |
| II.1.5. Moussants des sulfures | 22 |
| II.1.6. Activants des minéraux sulfurés..... | 24 |
| II.1.7. Déprimants des minéraux sulfurés | 26 |
| Chapitre III : Choix des réactifs de Flottation du zinc du Kherzet Youcef | |
| III.1. Introduction | 27 |
| III.2. Les essais de laboratoire | 27 |
| Conclusion générale | 33 |

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les réactifs de flottation

| | |
|--|----|
| Figure I .1 : flottation sans réactif et avec collecteur..... | 03 |
| Figure I.2 : Mécanisme d'adsorption d'un collecteur sur un minéral | 04 |
| Figure I.3 : Classification des collecteurs..... | 05 |
| Figure I.4 : Mode d'action d'un moussant..... | 09 |
| Figure I.5 : Courbe de la tension superficielle de solution aqueuse d'alcool aliphatique . | 11 |
| Figure I.6 : Distribution des réactifs le long d'un banc de flottation | 14 |
| Figure I.7 : Distribution au banc de cellules | 15 |

Chapitre II : Réactifs de flottation des minerais sulfurés

| | |
|---|----|
| Figure II.3 : Effet du pH sur la flottation de la blende et la pyrite activées par le sulfate de zinc | 23 |
|---|----|

Chapitre III : Choix des réactifs de Flottation du zinc du Kherzet Youcef

| | |
|---|----|
| Figure III.1 : Tube Hallimond..... | 29 |
| Figure III.2 : Cellule de flottation de laboratoire | 30 |

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les réactifs de flottation

| | |
|---|----|
| Tableau I .1 : Constantes pour le calcul de la concentration micellaire critique (c.m.c)..... | 06 |
| Tableau I.2 : Principaux moussants de flottation | 10 |
| Tableaux I.3 : Solubilités de quelques moussants dans l'eau | 12 |

Chapitre II : Réactifs de flottation des minerais sulfurés

| | |
|---|----|
| Tableau II .1 : Principaux minéraux sulfurés pouvant être séparés par flottation..... | 16 |
| Tableau II .2 : Principaux collecteurs des minéraux sulfurés | 18 |

Chapitre III : Choix des réactifs de Flottation du zinc du Kherzet Youcef Tableau

| | |
|---|----|
| Tableau III.1 : Résultats de test de flottation en laboratoire sue une série d'échantillons . | 30 |
|---|----|



INTRODUCTION GENERALE



Introduction générale

La flottation est une technique de séparation et d'enrichissement des minerais basés sur leurs propriétés de surface dans une solution aqueuse et en présence d'air. Cette technique permet de différencier les minerais hydrophiles et hydrophobes.

Pour réaliser une séparation par flottation, le mélange de particules met en suspension des substances appropriées qui exaltent les différences de mouillabilité (agents collecteurs) en faisant en sorte que les substances ayant tendance à être hydrophobes le deviennent complètement et que les particules hydrophiles conservent leur caractère.

Plusieurs réactifs sont employés pour améliorer les rendements de flottation. Comme ils possèdent un grand impact sur la qualité de la récupération et purification des métaux, ces réactifs représentent un élément important dans l'optimisation des performances des procédés minéralurgiques. Le choix de la nature de ces réactifs a également un impact important sur le processus.

Notre travail est composé de trois (03) chapitres :

- Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude théorique des réactifs de flottation
- Le second chapitre porte sur l'étude bibliographique sur la flottation des sulfures et les réactifs utilisés pour ce type de minerai (Zn).
- Le troisième chapitre traite le choix des réactifs de flottation par des essais laboratoires.



*CHAPITRE I : Généralités sur les réactifs de
flottation*



I1. Introduction

Les valeurs des énergies interfaciales et de l'angle de contact qui conditionnent le phénomène de flottation, varient avec la nature physique et chimique de la surface du solide et la composition de la solution aqueuse. C'est ainsi que l'addition d'une ou plusieurs substances, même en quantité infinie, peut modifier considérablement le comportement de la surface du solide afin d'obtenir des effets sélectifs. [1]

Pour augmenter l'efficacité de la flottation, le recours à des réactifs de flottation est souvent nécessaire. Ces agents, à savoir les collecteurs, les moussants et les modulateurs, agissent sur les surfaces des particules de diverses façons.

I2. Conditions exigées au réactif de flottation

- Ils doivent être stables pendant le stockage.
- Ils doivent être solubles dans l'eau.
- Ils doivent être non toxiques.
- Ils doivent être respectés à la protection de l'environnement.
- Le prix doit être économique. [2]

I3. Classification des réactifs de flottation

On classe les réactifs de flottation suivant leurs propriétés en :

I3.1. Collecteurs

I3.1.1. Définition des collecteurs

Les collecteurs sont des produits chimiques qui modifient la surface du minéral d'intérêt en la rendant hydrophobe. Ceci permet aux particules d'adhérer et de s'attacher aux bulles d'air plus facilement. L'action se fait sélectivement de manière à viser le minéral de valeur [3].

Leurs molécules sont constituées d'une longue chaîne hydrophobe est un groupe polaire hydrophile. Grâce à cette double nature, les molécules forment des agrégats moléculaires en solution aqueuse connus sous le terme de micelles. Dans ces derniers, les groupes polaires sont orientés de manière à avoir un contact maximal avec l'eau, tandis que la partie non polaire est éloignée le plus possible des molécules d'eau [2].

Les principaux collecteurs pour les minéraux sulfurés sont : les xanthates ou les aerofloats (acides crésylthophosphorique)

Pour les minéraux oxygénés : les acides gras et leurs sels alcalins.

I.3.1.2. Rôle des collecteurs

L'influence de ce paramètre, en type ou en concentration, se remarque sur la flottation proprement dite. En effet, le collecteur utilisé a un impact direct sur la séparation. Lorsque le composé ajouté à la pulpe n'est pas spécifique au milieu en cause, l'adsorption sur les particules n'est pas optimale (mauvaise liaison de surface). À ce moment, le rendement de la flottation est réduit. Par contre l'ajout d'un additif approprié aux solides favorise une meilleure réaction superficielle et donc un plus grand enlèvement du minerai de la matrice.

[4]

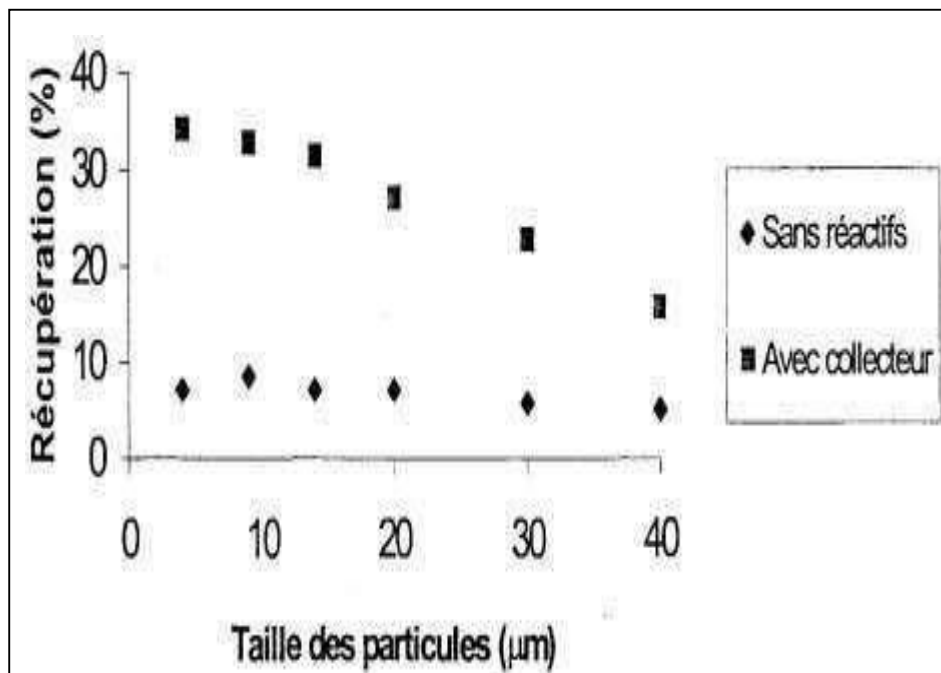


Figure I.1 : flottation sans réactif et avec collecteur.

I.3.1.3. Mécanisme d'adsorption des collecteurs

L'adsorption des collecteurs pour un solide passe par les étapes suivantes :

- On utilise une molécule chimique nommée collecteur. Ex : Xanthate.
- Le collecteur possède une extrémité polaire (hydrophile) et l'autre non polaire (hydrophobe).
- Le collecteur s'adsorbe sur la surface de la molécule.

- Ce qui crée une couche hydrophobe,
- Le solide est maintenant prêt à être flotter.

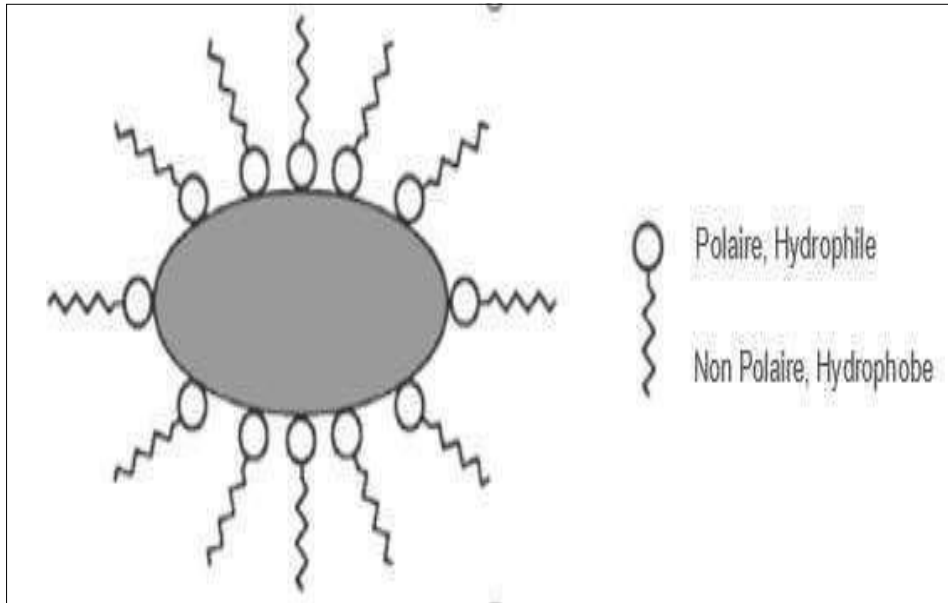


Figure I.2 : Mécanisme d'adsorption d'un collecteur sur un minéral.

I.3.1.4. Classification des collecteurs

La classification des collecteurs est donc basée sur la capacité de s'ioniser dans l'eau et sur la nature chimique de la partie polaire ; ils se divisent en deux groupes :

A. Ionogènes se dissociant en ions.

Les collecteurs ionogènes se divisent en collecteurs anioniques et cationiques :

- Les collecteurs cationiques sont des amines, surtout les amines primaires, (généralement des halogénures d'ammonium quaternaire à longue chaîne hydrocarbonée)
- Les collecteurs anioniques sont constitués d'une longue chaîne hydrophobe et d'un groupement anionique sulfate, sulfonate ou carboxylate.

B. Non Ionogènes ou neutres se fixant sous forme moléculaire.[2]

La classification des collecteurs peut être résumée sur la figure suivant : (voir Figure I.3)

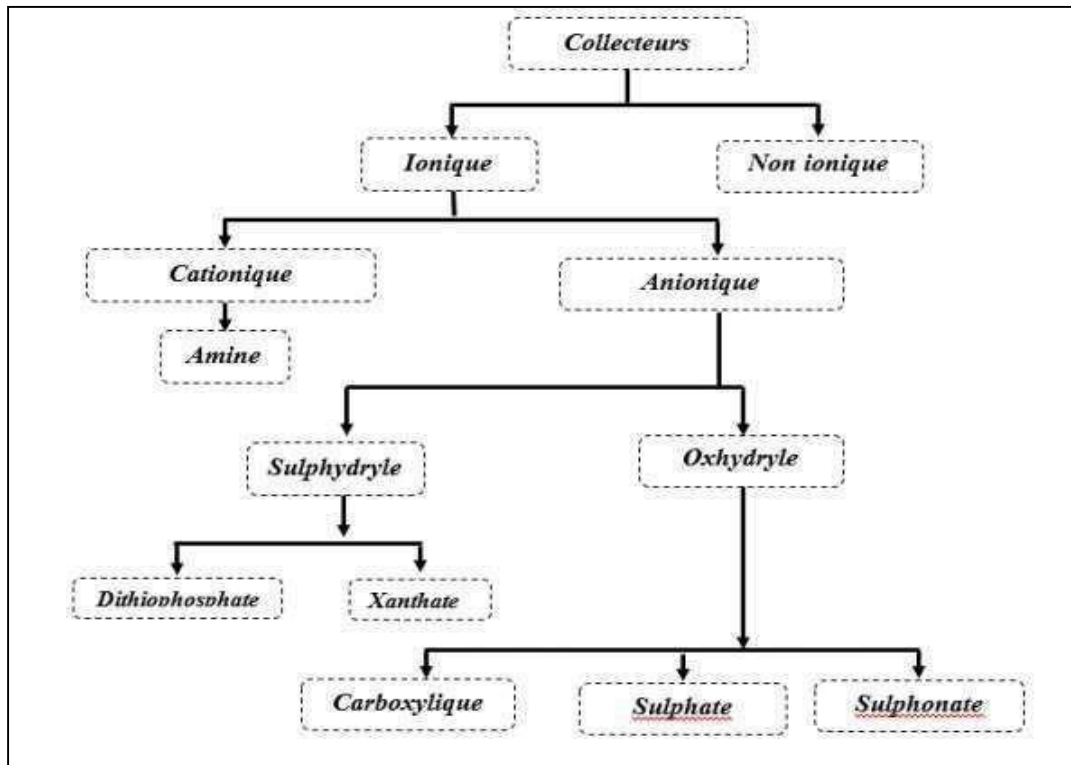


Figure I.3 : Classification des collecteurs.

I.3.1.5. Critères de choix des collecteurs

Le choix de la nature de ce réactif doit être tel que son action n'interfère pas avec celle du moussant. Étant de même nature (hétéropolaire) il est possible qu'une molécule agisse à la place d'une autre. À cet égard, des essais préliminaires sont à privilégier afin de s'assurer qu'il n'y ait aucune influence réciproque. [5]

L'utilisation des collecteurs dans le domaine de la flottation dépend de critères suivants :

A. Propriétés physico-chimiques

En pratique, les surfactants utilisés sont des molécules organiques constituées d'une partie polaire, facilement ionisante, et, d'une chaîne hydrocarbonée R, saturée ou non. Quatre groupements polaires sont utilisés et donnent les familles suivantes :

- Acides carboxyliques ou acides gras RCOOH (acide oléique) et leurs sels RCOOHNa (oléate de sodium).

- Les amines RNH_2 (Acétate d'amine) et leurs sels RNH_3Cl

- Les sulfates RSO_4Na (dodécyl sulfate de sodium)
- Les sulfonates RSO_3Na (Sulfonate de pétrole).

Remarques : Les amines sont cationiques et les 3 autres sont anioniques.

On utilise souvent les chaînes hydrocarbonées R, dérivées de produits naturels comme l'acide oléique ; l'huile de coprah ; suif ; tallöl (résidu de l'industrie du bois), des résidus sulfonés de l'industrie de pétrole avec des chaînes distribuées autour de C12 (de l'huile de coprah), C18(de l'acide oléique) et C12 à C18(dérivées du suif).

[5]

B. Hydrolyse et solubilité des surfactants

La dissociation des surfactants s'est caractérisée par la valeur de sa constante d'acidité K_a et en tirant de ceci par approximation les valeurs de pH pour lesquels un acide ($\text{pH} = \text{p}K_a$) du réactif seront non dissociés. Les espèces non dissociées sont très peu solubles. La solubilité dépend de la longueur de la chaîne hydrocarbonée.

| Surfactants | Réactions d'hydrolyse | PKa | Solubilité en 10^{-6} mole/l |
|--|---|------|-----------------------------------|
| Carboxylates (RCOOH) | $\text{RCOO}^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{RCOOH}$ | 4.7 | 1 |
| Amines primaires (RNH_3Cl) | $\text{RNH}_2 + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{RNH}_3^+$ | 10.6 | 1.2 |
| Sulfates (RSO_4Na) | $\text{RSO}_4^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{RSO}_4\text{H}$ | 1.5 | 1 |
| Sulfonates (RSO_3Na) | $\text{RSO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{RSO}_3\text{H}$ | 1.5 | - |

Tableau I .1 : Constantes pour le calcul de la concentration micellaire critique (c.m.c).

C. Concentration de collecteur

La concentration utilisée a également un impact important sur le processus. En réalité, il existe, pour chaque condition expérimentale, une concentration optimale en collecteur. En dessous et au-dessus de cette teneur la flottation diminue. Dans les faits, une teneur inférieure à celle requise a pour conséquence de ne pas rendre la surface des' particules suffisamment hydrophobe pour flotter efficacement. À l'opposé, une concentration trop importante diminue la séparation en raison des trois phénomènes suivants :

- une diminution de la taille des bulles d'air jusqu'à ce qu'elles ne puissent plus soulever de particules ;
- une orientation des molécules (seconde monocouche) de façon à reformer une barrière hydrophile ;
- la création de micelles, la bulle d'air est emprisonnée par les molécules de collecteur ce qui réduit la quantité de collecteur pour le reste des particules. [3]

I.3.2. Moussants

I.3.2.1. Définition des moussants

Le moussant, par définition, intervient à l'interface liquide/gaz. Ce sont des substances qui peuvent provoquer une formation des mousses avec l'eau

Un bon moussant doit être :

- Un corps organique.
- Un corps dont la molécule est hétéro polaire.
- Un corps de solubilité ni trop faible ni trop forte (en général entre 0.2 à 5 g/l).
- Un corps qui ne s'ionise pas.
- un corps qu'on peut trouver sur le marché à un prix raisonnable. [5]

I.3.2.2. Rôle de moussant :

Le moussant, par définition, intervient à l'interface liquide/gaz. Il a trois fonctions essentielles.

La première fonction est de créer des interfaces liquides gaz importantes. Les bulles d'air dispersées dans les pulpes ont des distributions dimensionnelles très étendues, allant généralement du dixième de millimètre à plusieurs millimètres au départ, suivant les dispositifs utilisés. [1]

En présence de moussant, les bulles sont beaucoup plus petites de 0.1 à 1mm (0.5mm en moyenne). Elles ont une forme très voisine d'une sphère (en raison de la très grande élasticité de leur surface que leur confère le tensioactifs adsorbés), alors que les bulles, en absence des moussants, ont des formes allongées. La forme intervient sur la vitesse d'ascension des bulles dans les pulpes, qui est d'autant plus faible que la forme se rapproche de celle d'une sphère pour un volume donné. Enfin, l'aire globale de l'interface liquide - gaz augmente avec la finesse des bulles.

La deuxième fonction consiste à faciliter la fixation à l'interface liquide gaz des particules collectées, par coadsorption avec le collecteur, comme le démontre l'augmentation de l'angle de contact. Le revêtement collecteur se trouverait donc plus solidement adsorbé.

La troisième fonction est de donner une écume (mousse - particules) pseudostable au-dessus de la cellule de flottation. L'écume sert de milieu de séparation des particules solides que l'on désire récupérer de celles qui ne flottent pas. Son rôle mécanique est essentiel. Elle a également, suivant sa hauteur, un rôle de concentration secondaire. En raison de la grande turbulence existant dans les cellules de flottation et des courants parasites qui existent dans les traînées des particules et des bulles qui pénètrent dans l'écume, une certaine quantité de particules hydrophiles est entraînée mécaniquement. Ces particules retombent dans la pulpe, drainées par le courant d'eau descendant de la partie supérieure de l'écume et provenant de la rupture des films d'eau composant les bulles d'air, dans des conditions de faible turbulence. [1]

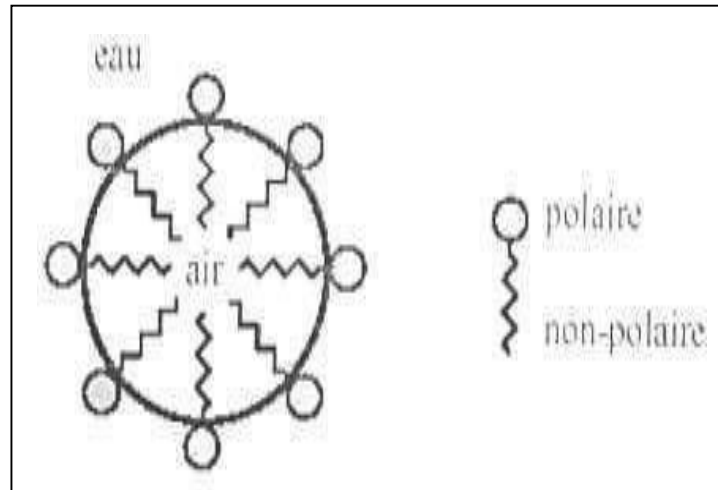


Figure I.4 : Mode d'action d'un moussant.

I.3.2.3. Principaux moussants

Les principaux moussants sont donnés dans le tableau I .2, ils ont tous une structure hétéropolaire et sont légèrement solubles dans l'eau. Les moussants tels que les acides gras, les alkylsulfates et les amines ne sont pas utilisés en tant que moussants, étant donné leurs propriétés collectrices et la difficulté à abattre les écumes qu'ils génèrent.

Les moussants synthétiques (MIBC, dérivés du glycol, TEB) ont dans de nombreux cas remplacé l'huile de pin ou d'eucalyptus et les acides crésyliques, par suite de leur grande stabilité de composition [6].

| moissants | Solubilité dans l'eau à 20° C (g/L) | Quantités employées (g/t) |
|---|-------------------------------------|--|
| 1 – Alcools aliphatiques | | |
| Méthylisobutylcarbinol (MIBC) CH ₃ CH(CH ₃)CH ₂ CH(OH)CH ₃ ou 4 méthyl-2 pentanol C ₆ H ₁₄ O | 17 | 30 pour les minerais sulfurés 125 pour le charbon |
| Acide crésylique (ou crésol) CH ₃ C ₆ H ₄ OH | 1,66 | 40 pour les minerais sulfurés |
| Huile de pin (mélange d'alcools terpéniques) C ₁₀ H ₁₇ OH | 2,5 | 30 pour les minerais sulfurés 130 pour le charbon |
| 2 – Polyéthers hydroxyles | | |
| Éther de glycol polypropylénique, CH ₃ (C ₃ H ₆ O) _n OH | | 25 pour les minerais sulfurés |
| 3 – Paraffines alkoxy substituées | | |
| Triéthoxy 1,1,3-butane (TEB) CH ₃ CH(OC ₂ H ₅)CH ₂ CH(OC ₂ H ₅) ₂ | 8 | 30 pour les minerais sulfurés |

Tableau I.2 : Principaux moissants de flottation.

Les moissants Durant la flottation, les moissants interviennent dans le contact entre les bulles et les particules minérales rendues hydrophobes et dans la séparation de la phase bulle – particule de la phase liquide – particule.

I .3.2.4 Critères de choix des moissants

A. Propriétés physiques :

Lorsqu'on augmente la concentration de composés organiques hétéropolaires dans la solution aqueuse, la tension superficielle de la solution décroît jusqu'à une valeur minimale. Cela est dû au fait que le composé hétéropolaire se fixe préférentiellement à l'interface air – solution. Un équilibre semblable à celui de l'eau et de sa vapeur se crée entre les molécules placées à la surface et les molécules en solution. Le degré

d'absorption à l'interface liquide – air est donné par l'équation de Gibbs :

$$\Gamma_m = - C_m / RT (\partial \gamma / \partial C_m)$$

Avec :

Γ_m = quantité de moussant absorbée à l'interface [mol/ cm²]

γ = tension en dynes /cm

R = constante des gaz parfaits : 8.31 x10⁻⁷ erg/deg-mol

T = température absolue

C_m = concentration en moussant

Pour créer des écumes, il faut que $\partial \gamma / \partial C_m$ atteigne la valeur positive ou négative.

Quand $\partial \gamma / \partial C_m$ est voisin de 0, on ne peut obtenir d'écumes de flottation.

Exemple : Courbe de la tension superficielle de solution aqueuse d'alcool aliphatique

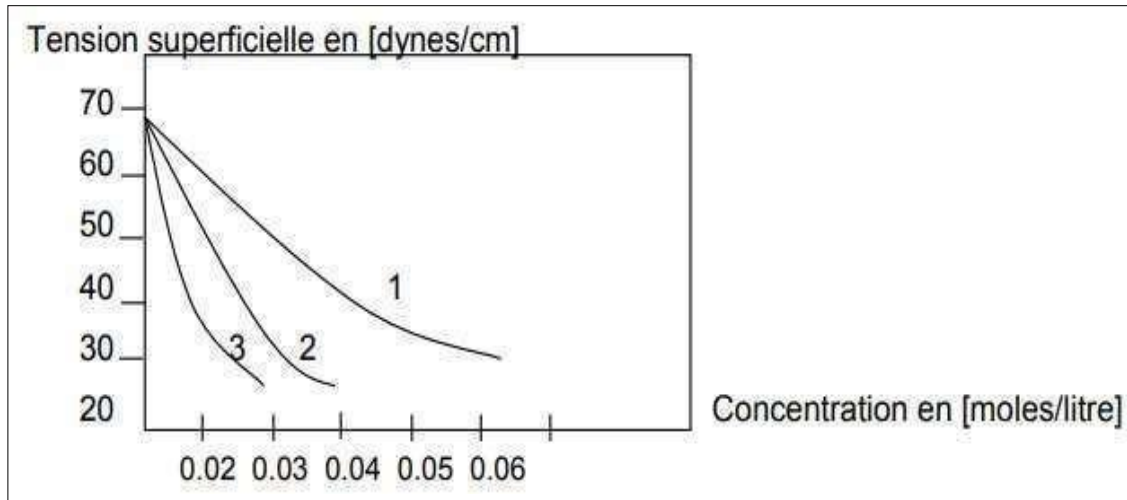


Figure I.5 : Courbe de la tension superficielle de solution aqueuse d'alcool aliphatique.

L'allure des courbes montre que $(\partial\gamma / \partial C_m)$ est toujours positif, donc que les alcools sont positivement adsorbés à l'interface et que $(\partial\gamma / \partial C_m)$ est triplé pour chaque groupe CH_2 ajouté à la chaîne.

B. Propriétés chimiques

Les propriétés moussantes d'une grande quantité de substances dépendent de ses propriétés chimiques c'est-à-dire la présence des groupes polaires extrêmement variés qui peuvent être des groupes :

- Hydroxyle $-\text{OH}$
- Carboxyle $-\text{C}=\text{O OH}$
- Carbonyle $=\text{C}=\text{O}$
- Amine $-\text{NH}_2$
- Sulfate $-\text{OSO}_2\text{OH}$

Il existe une liaison très nette entre le pouvoir moussant et la longueur de la chaîne carbonée pour qu'un agent tensioactif ait une action effective, il faut que sa chaîne hydrocarbonée présente au moins 6 atomes de carbone.

Exemple : Le pouvoir moussant d'un alcool aliphatique est généralement supérieur à celui d'un alcool aromatique à cause de la double liaison du noyau benzénique qui sature rapidement.

NB: Les moussants peuvent présenter des propriétés collectrices comme les moussants présentant le groupe carboxyle, amine, sulfate, qui sont utilisés comme un collecteur que moussant. Et, celles qui n'ont pas de propriétés collectrices comme les moussants présentant le groupe alcool.

C. Solubilité

Les composés utilisés comme moussants ne sont que légèrement solubles dans l'eau. Il faut remarquer que la quantité utilisée en flottation est de l'ordre de 25 mg/l.

| MOUSSANTS | Solubilité en g Pour 100g de solution | Température en °C |
|-------------------------------|--|------------------------------|
| n-héptanol | 1.81 | 25 |
| Huile de pin | 2.50 | 25 |
| n-octanol | 0.59 | 25 |
| α -térpinéol | 1.98 | 15-20 |
| Alcool méthyamylique | 17.00 | 20 |
| Alcool caprilique(octanol-2) | 1.28 | 25 |

Tableaux I.3 : Solubilités de quelques moussants dans l'eau.

I.3.3. Activants

Lorsque les collecteurs ne réagissent pas avec la surface des minéraux cibles, la séparation est impossible, l'ajout d'un activant permet de modifier la nature chimique de la surface de ce minéral favorisant l'adsorption du collecteur. [2]

Les activants sont utilisés pour rendre flottable des substances qui ne le sont pas naturellement (ou trop peu) ou qui ont été rendues volontairement et momentanément inflottables par un dépresseur. [5]

I.3.4. Déprimants

Contrairement à l'activant, le déprimant empêche le collecteur de réagir avec la surface d'une particule de gangue et donc empêche la flottation des certaines substances minérales que l'on ne désire pas flotter qui conserve ainsi son caractère hydrophile

Les déprimants permettent pour cette raison, la flottation sélective et ils agissent par :

- Une neutralisation des activateurs.
- Un changement de signe des charges superficielles des particules
- Une destruction des couches de collecteur déjà fixées sur les particules.
- Oxydation des collecteurs entraînant une réduction de leur pouvoir hydrophobes [5].

I.3.5. Les modificateurs de pH

Sont des réactifs influant sur le processus d'interaction minéral des collecteurs, des déprimants et des activateurs avec la surface minérale. Ils créent les conditions optimales pour une bonne action des autres réactifs, ils sont destinés à :

- A précipiter les sels solubles qui nuisent à l'action des collecteurs (poisons de la flottation) ; sels ferreux, ferriques, d'aluminium, etc...
- A adapter le PH de la pulpe, ce qui a une grande influence sur le traitement. On utilise la chaux, le carbonate de soude et l'acide sulfurique. [6]
- La chaux et le bicarbonate de sodium sont fréquemment utilisés comme modificateurs de pH. [7]

I.4. Stratégie d'ajout des réactifs

Une stratégie d'ajout des réactifs caractérise la quantité et la façon dont les réactifs sont ajoutés dans un circuit de flottation.

I.4.1. Dosage

L'ajout d'un réactif dans une unité de flottation est basé sur la quantité de minerai alimentée au circuit et est souvent exprimé en grammes de réactif par tonne de minerai. Le dosage des réactifs est une variable de contrôle stratégique. Lorsque le rendement métallurgique est à la baisse, on augmente le dosage du collecteur ou du moussant. Cependant un surplus de collecteur peut favoriser la flottation d'espèces non désirées réduisant ainsi la sélectivité du procédé. De la même façon, une quantité trop élevée de

moissant peut causer une augmentation de l'entraînement des particules. À l'opposé, une quantité insuffisante de collecteur réduit la capacité de flottation et l'utilisation restreinte du moissant peut causer une instabilité de l'écume et une diminution de la récupération des minéraux de valeur. L'opérateur doit donc tenir compte de tous ces facteurs afin d'ajuster les dosages de réactifs de façon à maintenir les performances de l'unité de flottation. Sa tâche est plus complexe lorsque des activants et/ou déprimants sont utilisés pour la flottation. [7]

I.4.2. Distribution

Les réactifs peuvent être ajoutés à différents endroits du circuit. On retrouve parfois des points d'injection pour le collecteur et le régulateur de pH au broyage permettant ainsi de maximiser le temps de conditionnement. Cependant, la majeure partie du collecteur et du moissant est ajoutée dès la première étape de l'ébauchage et une plus faible partie est distribuée dans les bancs de cellules subséquent. La figure 2.4 présente une possible distribution de réactifs dans un banc ébauchage-épuisage ou X % est ajouté à l'ébauchage, Y% et Z% dans les deux bancs d'épuisage. [7]

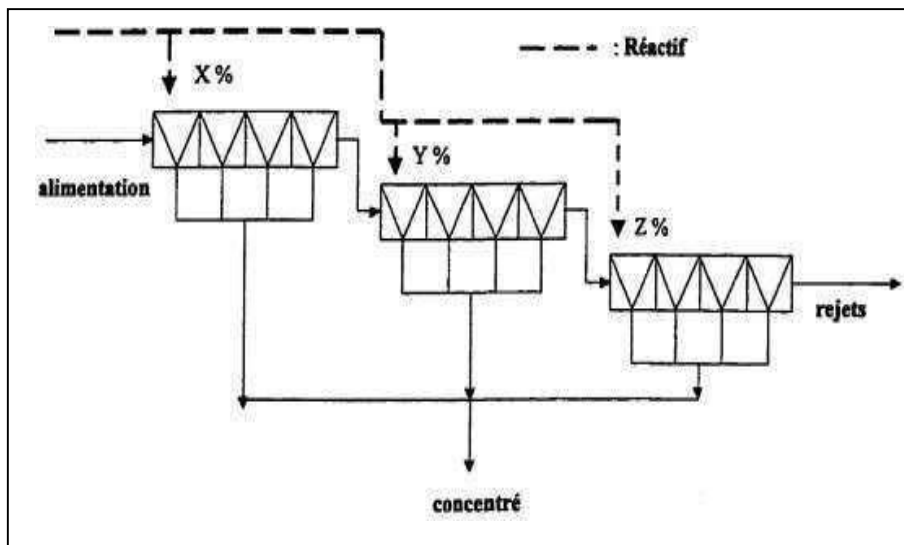


Figure I.6 : Distribution des réactifs le long d'un banc de flottation.

En industrie, la distribution des réactifs est effectuée dans certains cas à l'aide d'un distributeur rotatif composé d'entonnoirs de différentes dimensions et amovibles permettant l'ajustement des proportions envoyées dans chaque partie du circuit. Chaque banc de cellules est relié par une conduite au distributeur à partir duquel on peut décider d'interrompre ou d'augmenter la proportion alimentée. La figure 2.5, montre le schéma d'un système de distribution. [7]

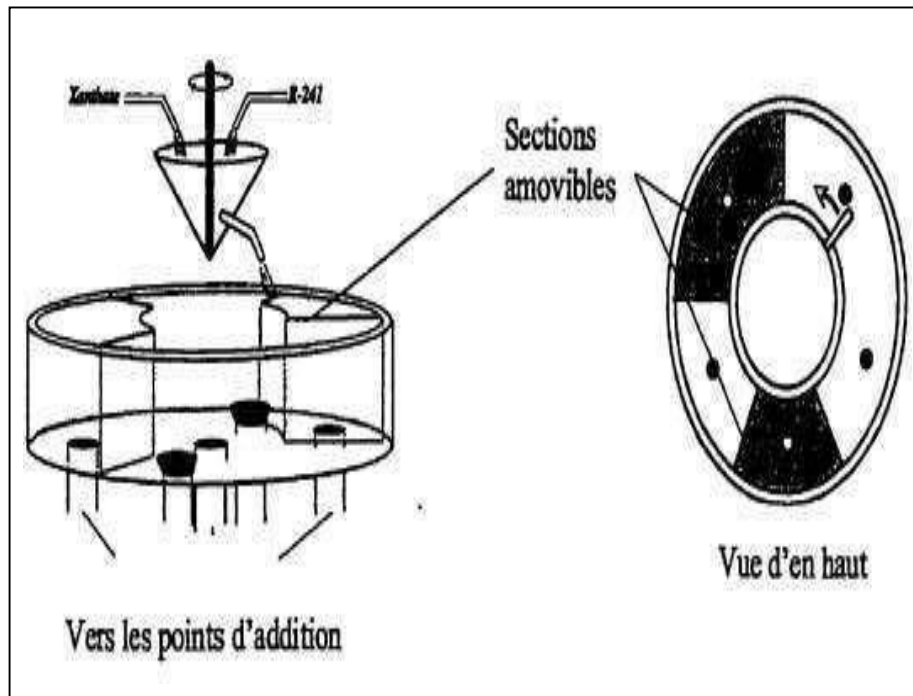


Figure I.7 : Distribution au banc de cellules



Chapitre II : Réactifs de flottation des minerais sulfurés



II.1. Flottation des sulfures

La flottation des sulfures métalliques, qui sont les minerais naturels des métaux de base non ferreux, représente historiquement le procédé qui a permis de traiter des minerais complexes à fine minéralisation ou à faible teneur, notamment les minerais de plomb-zinc-cuivre, qui sont concentrés par flottation dans plus de 90 % des cas, La flottation des sulfures est l'une des applications les plus répandues de ce type de procédé dans l'industrie minière.

| | |
|--------------|--|
| Galène | PbS |
| Blende | ZnS |
| Marmatite | $Zn_{1-x}Fe_xS$ |
| Molybdénite | MoS ₂ |
| Pentlandite | $Ni_{1-x}Fe_xS$ |
| Chalcocite | Cu ₂ S |
| Covellite | CuS |
| Chalcopyrite | CuFeS ₂ |
| Bornite | Cu ₅ FeS ₄ |
| Enargite | Cu ₃ AsS ₄ |
| Tennantite | (Cu, Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃ |
| Tétrahédrite | (Cu, Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃ |
| Pyrite | FeS ₂ |
| Pyrrhotite | Fe _{1-x} S |
| Mispickel | FeAsS |

Tableau II .1 : Principaux minéraux sulfurés pouvant être séparés par flottation.

II.2. Propriétés des sulfures en solution aqueuse

Deux phénomènes importants interviennent et ont une influence sur le comportement des sulfures mis en solution aqueuse :

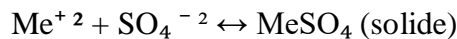
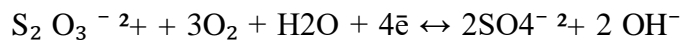
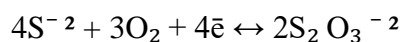
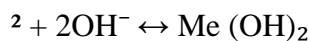
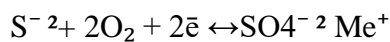
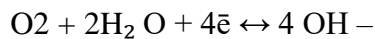
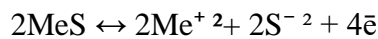
- Insolubilité : Les sulfures en solution aqueuse sont caractérisés par une très grande insolubilité des réactions de type :



Donnant lieu à des produits dont le PKs est très élevé de l'ordre de 20

- Instabilité en présence d'eau et de l'air :

Les sulfures, en présence d'eau d'air sont très instables. Ce sont des réactions de type :



Elles sont toutes possibles. On remarque donc que, en raison de la présence du gaz carbonique dissout et en fonction de la solubilité relative des carbonates par rapport aux sulfates, thiosulfates, etc..., le composé de surface peut être transformé, par un mécanisme d'échange d'ions, en un carbonate de surface.

Après flottation les concentrés contiennent 40 à 60 % de Zn sous forme ZnS. Lors de la flottation, le zinc n'est pas transformé chimiquement, il reste sous forme de sulfure.[8]

II.3. Réactifs de flottation des sulfures

II.3.1. Principaux collecteurs

Les collecteurs actuels appartiennent à la famille des thiols RS et les plus répandus sont les dithiocarbonates et les dithiophosphates, Ces produits très sélectifs, plus connus

respectivement sous leur dénomination de xanthates et d'Aerofloats. Ils sont utilisés comme collecteurs des sulfures

L'adsorption des collecteurs sur les sulfures est basée sur la stabilité des sels métalthiol. Plus la chaîne hydrocarbonée est longue, plus le complexe formé sur la surface est stable et plus la récupération des espèces est facile. Autrement dit, le phénomène de flottation résulterait d'une adsorption chimique du surfactant ionique le revêtement collecteur le moins soluble, donc le plus stable donnant les meilleurs résultats en flottation. [8]

Les groupements alkyls sont généralement courts [C2 (éthyl) à C8 (hexyl)]. Les produits commerciaux sont généralement des sels de sodium ou de potassium (tableau 3).

| Collecteur | Formule | PH de mise en œuvre |
|--------------------------------------|---|---------------------|
| Alkyldithiocarbamates (xanthates) | $\begin{array}{c} \text{S} \\ // \\ \text{R-O-C} \\ \backslash \\ \text{S}^-, \text{K}^+ \end{array}$ | 8-13 |
| Dialkyldisulfures (Dixanthogène) | $\begin{array}{c} \text{SS} \\ // \quad \backslash \\ \text{R-O-C} \quad \text{C-O-R} \\ \backslash \quad / \\ \text{S-S} \end{array}$ | 1-11 |
| Dialkyldithiophos-phates | $\begin{array}{c} \text{R-O} \quad \backslash \quad \text{S} \\ \quad \quad \text{P} \quad // \\ \text{R-O} \quad / \quad \text{S}^-, \text{K}^+ \end{array}$ | 4-12 |
| Dialkyldithiocarbamates | $\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{S} \\ \quad \quad // \\ \text{R} \quad \quad \text{N-C} \\ \quad \quad \backslash \\ \quad \quad \text{S}^-, \text{K}^+ \end{array}$ | 5-12 |

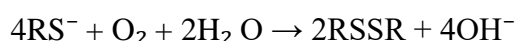
Tableau II .2 : Principaux collecteurs des minéraux sulfurés. (R = radical aliphatique)

Les propriétés les plus importantes des réactifs thiols sont les suivantes :

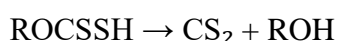
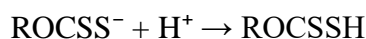
- Leur solubilité relative est assez élevée pour les concentrations rencontrées en flottation (sauf pour les deux dernières familles citées tableau II .2). Cette solubilité dépend de la longueur des chaînes alkyles.
- Les thiols sont des réducteurs pouvant tous donner lieu à des réactions du type :



Les composés du type RSSR sont des huiles hydrophobes insolubles dans l'eau. Les potentiels standards de ces réactions dépendent du thiol et, apparemment, de la longueur de sa chaîne. Pour les xanthates et les dithiophosphates, les valeurs sont, respectivement, de l'ordre de $-0,08$ V et $+0,2$ V par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH), pour des chaînes en C2 à C5, habituellement utilisées. La réaction globale s'écrit :

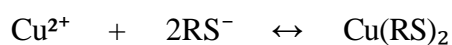


- Les thiols sont des acides relativement faibles, avec des valeurs de pKa de l'ordre de 3.
- Les thiols se décomposent relativement facilement en solution aqueuse. En fait, le produit non ionisé se dégrade en redonnant les produits utilisés dans la synthèse. Dans le cas des xanthates :



La vitesse de décomposition dépend donc très fortement du pH. Pour l'éthylxanthate, le temps nécessaire pour observer la disparition de la moitié de la concentration en collecteur est de 5 minutes à pH 3, de 4 heures à pH 5 et de 20 jours aux pH supérieurs à 7 (à 25 °C).

- Les thiols donnent des sels peu solubles avec la majeure partie des métaux de transition. Les produits de solubilité pour les éthylxanthates et diéthylthiophosphates sont donnés dans le tableau II .2 pour les différents métaux d'importance économique. Les réactions ne sont pas toujours simples puisque, dans le cas du cuivre par exemple, on peut observer des réactions d'oxydoréduction :

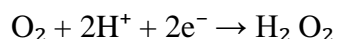


- En raison de la faible longueur des chaînes hydrocarbonées desthiols utilisés couramment en industrie (C2 à C5), ces réactifs n'ont pas de propriétés de surfactants à l'interface liquide/gaz et ne sont pas des moussants. Pour la même raison, ils ne forment que peu d'agrégats ioniques ou moléculaires en solution (micelles).[8]

II.3.1.1. Adsorption des collecteurs sur les sulfures

L'action des mécanismes de l'adsorption des thiols, répond aux règles pratiques suivantes :

- la plupart des sulfures d'importance industrielle sont naturellement hydrophiles en l'absence d'oxygène (milieu réducteur). Cependant, pour certains d'entre eux, on constate une flottabilité naturelle. C'est le cas, par exemple, de la molybdénite (MoS_2) et de la stibine (Sb_2S_3) ;
- les sulfures n'adsorbent pas les thiols en milieu réducteur et la flottation est impossible.
- tous les sulfures (sauf la blende) adsorbent fortement les thiols à courte chaîne en présence d'oxygène de l'air ; la flottation est possible et même facile. L'hydrophobicité de surface conférée ainsi aux sulfures par un film adsorbé, correspondant en général à moins d'une couche moléculaire, est relativement importante et tient aussi bien à l'hydrophobicité des composés adsorbés qu'à la très faible affinité de la surface des sulfures pour l'eau ;
- pour la galène et la plupart des sulfures, à l'exception de la pyrite et de la blende, l'adsorption peut résulter :
 - soit d'une réaction du thiol avec les composés oxydés du sulfure de type échange d'ions, par exemple entre RS^- et carbonate ou thiosulfate de Pb dans le cas de PbS ;
 - soit d'une réaction du thiol sur le sulfure en présence d'oxygène dissous, conformément à la théorie électrochimique qui donnerait : une réaction cathodique (réduction de l'oxygène),



une réaction anodique (oxydation de sulfure) :



mais la présence de soufre élémentaire n'est pas mise en évidence expérimentalement, celui-ci étant logiquement oxydé ;

- pour la pyrite, l'arsénopyrite, la molybdénite et la pyrrotite, il s'agirait de l'adsorption physique (réversible) du dixanthogène RSSR.[6]

II.3.2. Moussants des sulfures

Il est possible de considérer la flottation des sulfures comme un procédé de séparation faisant intervenir trois étapes principales :

- La modification des sulfures minéraux.
- Le contact entre les bulles et les particules minérales.
- La séparation de la phase bulle- particules de la phase liquide- particules. [8]

Les moussants interviennent dans la deuxième et la troisième étape. Ce sont des corps dont l'utilisation correspond à la création d'une mousse et qui, de ce fait, permettent la séparation des particules hydrophobes et hydrophiles. Les propriétés moussantes de certaines huiles sont dues à la présence de certaines fonctions tels que le - OH, -COOR, -CO, soufre, -OSO₂OH, la fonction amine et les composés aromatiques. Le moussant par définition, intervient au niveau de l'interface liquide-gaz. Il a pour fonction essentielle, de contrôler la distribution granulométrique des bulles d'air, d'assister la collection des solides par co-adsorption à l'interface solide/liquide et de former une mousse stable à la surface de la cellule. Cependant, le choix du moussant est restreint, car, s'il possède des propriétés détersives, il peut exister un antagonisme entre ce dernier et le collecteur. On utilise généralement, des huiles de goudron, de bois, de pin en particulier pour remplir ce rôle.

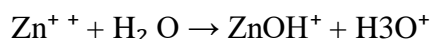
Les moussants doivent idéalement posséder les propriétés physico-chimiques suivantes :

- une faible concentration doit produire une mousse de volume et de résistance mécanique suffisante, pour servir de milieu de séparation pour les solides.
- L'écume doit se briser facilement, après avoir quitté les conditions de pseudo stabilité qui permettent son maintien à la partie supérieure de la cellule de flottation, pour permettre le transport par pompage du concentré.
- La texture de l'écume doit permettre l'élimination des particules solides non flottées.
- La dimension des bulles d'air et leur cinétique de coalescence, doivent être aussi faibles que possible.
- Leur activité chimique, vis à vis de la surface des solides, doit être strictement nulle.
- Posséder une grande stabilité chimique par rapport à des changements brusques de pH, de concentration en sels dissout, etc.

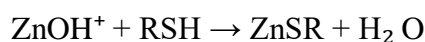
- Leurs coûts relatif doit être bas.[8]

II.3.3. Activants des minéraux sulfurés

L'activation de la blende a fait l'objet de nombreux travaux ayant trait, soit à l'action du pH, soit à l'action des cations comme le cuivre et l'argent. Récemment. L'adsorption des groupes hydroxyles sur la surface de la blende peut être représentée par les équilibres suivants :



L'adsorption de molécules neutres RSH sur les sites de surfaces hydratées peut être représentée par :



seuls les collecteurs hydroxyles ionisés ne peuvent remplacer les groupements hydroxyles, par suite de la faible énergie de formation des sels de zinc. De plus, à des valeurs de pH acide le nombre de sites de surface hydratée est réduit gêne l'adsorption du collecteur. Ces deux effets expliquent que la blende flotte mieux avec les composés sulfhydriques, les moins acides et se trouve activée aux pH de l'ordre 8 à 9.[6]

On observe pour la blende et pour la pyrite que l'activation est réelle à pH acide (figure II-3) et au voisinage du milieu neutre ces minéraux sont déprimés et les quantités de cuivre nécessaires sont très faibles immédiates et limitées, alors que les ions Ag^+ ont une action lente, mais leurs adsorptions augmente avec le temps, sans atteindre une limitation nette.[8]

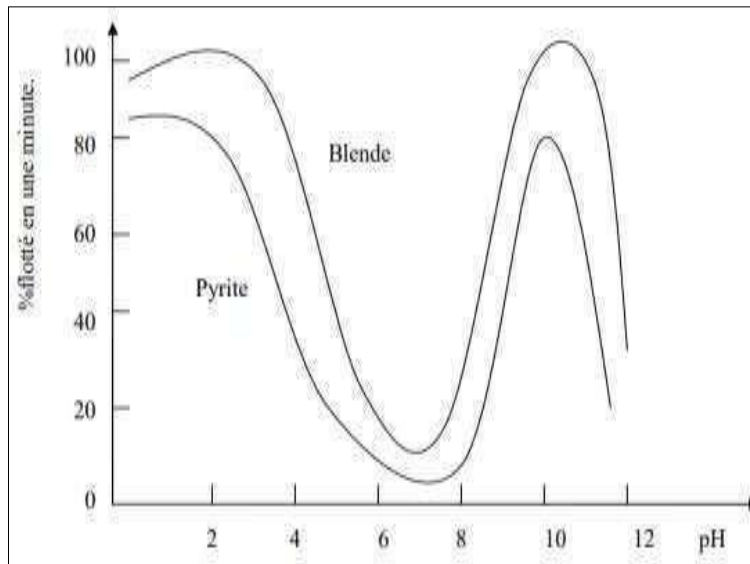


Figure II.3 : Effet du pH sur la flottation de la blende et de la pyrite activées par le sulfate de zinc.

a) Activation de la blende par Cu^{2+}

Le mode d'action de la blende le plus connu est l'activation par les ions cuivre la constante d'équilibre de la réaction à 25°C :

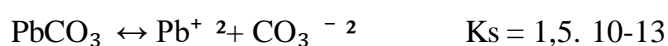
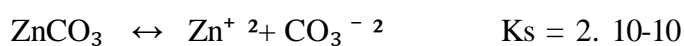
$$K = \frac{[\text{Zn}^{+2}]}{[\text{Cu}^{+2}]} = 9 \cdot 10^{-10}$$

La structure formé à la surface correspond une covelline orientée sur la blende. En présence de thiols et d'oxygène , il se forme à la surface activée un film continu de CuS partiellement recouvert de CuRS et de RSSR adsorbé.[6]

b) L'activation de la blende par Pb^{+2}

La faible valeur de la constante d'équilibre $K = \frac{[\text{Zn}^{+2}]}{[\text{Pb}^{+2}]} = 103$ permet de contrôler la réaction (en déplaçant l'équilibre vers la gauche) avec des quantités relativement faible de réactifs.

L'ajout d'ions carbonates contrôle le sens de la réaction par les concentrations d'équilibres des réactions suivantes:



La condition d'équilibre pour la réaction d'activation peut s'écrire

$$K = \frac{[\text{Zn}^{+2}][\text{CO}_3^{-2}]}{[\text{Pb}^{+2}][\text{CO}_3^{-2}]} = \frac{2 \cdot 10^{-10}}{1,5 \cdot 10^{-13}} > 10^3$$

la réaction est donc possible vers la droite, ce qui permet de maîtriser l'activation de la blende. [6]

II.34. Déprimants des minéraux sulfurés

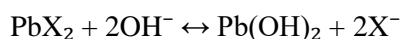
Ces déprimants peuvent agir, soit par action à la surface minérale, soit par la dépôt du collecteur, en le précipitant sous une forme insoluble. [8]

a) Action des bases :

L'addition d'une base fait varier la concentration des ions hydrogène et hydroxydes dans la solution. Dans certains systèmes, notamment en présence de sulfate de cuivre, la chaux ou la soude caustique sont, pour la pyrite, de meilleurs déprimants que les carbonates de soude.

b) Action des cyanures de sodium :

La dépression des solutions de cyanure a été étudiée en présence d'éthylxanthate les conclusions retenues, montrent que la galène est le seul sulfure qui n'est pas influencé, la température permet de diminuer la quantité de cyanure employée et toute augmentation de la quantité du collecteur, croit celle du cyanure nécessaire pour déprimer. Le phénomène de dépression est interprété par le fait que la concentration des ions cyanure dépend de la constante de dissociation de l'acide cyanhydrique. La dépression est due à l'adsorption des ions OH^- et la formation des hydroxydes.



c) Action de sulfure de sodium

La dépression par le sulfure de sodium dépend étroitement de l'ionisation de l'hydrogène sulfuré suivant les équilibres :

$$K1 = \frac{(H^+)(HS^-)}{(H_2S)} = 10^{-7}$$

$$K2 = \frac{(H^+)(S^{2-})}{(HS^-)} = 2.10^{-15}$$

d) Actions des cations

Les métaux lourds sont des déprimants des minéraux sulfurés par les xanthates, car ils précipitent sous forme de composés insolubles.

e) La séquestration des ions activants

La séquestration des ions en solution dans une pulpe peut être offerte par l'utilisation de résines échangeuses d'ions. Ainsi la vitesse d'adsorption du cuivre en solution, est deux fois plus élevée pour les résines que pour la blende, la dépression des sulfures peut être due à :

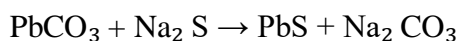
- 1) l'oxydation poussée et sélective des sulfures, dont la surface est transformée en un composé oxydé.
- 2) O₂ nécessaire à la flottation des sulfures par les thiols est une maîtrise du pouvoir oxydant de la pulpe permet de moduler l'adsorption.
- 3) Les composés de surface métal thiol ou RSSR peuvent être détruits par un pH très acide.

d) le cyanure complexe le cuivre

qui est l'activant de la blende par conséquent peut être utilisé comme déprimant de ce sulfure.[8]

II.3.5. Modificateurs de PH des sulfures

Les principaux agents modifiants le milieu sont : l'acide sulfurique et le sulfure de sodium utilisés pour précipiter les sels solubles qui se trouve dans la pulpe, et aussi pour faciliter le flottage des minerais oxydés en recouvrant leur surface d'une couche de sulfure. :



- les silicates de sodium déflocculent la gangue.
- La soude caustique et la chaux, utilisées pour produire une légère alcalinité.
- Le carbonate de sodium qui précipite les sels de calcium dont, l'effet est généralement nuisible.
- Le cyanure de sodium favorise le flottage de la galène.
- Le sulfate de cuivre qui accélère le flottage de la blende et retarde celui des autres sulfures.[8]



*Chapitre III : Choix des réactifs de
Flottation du zinc du Kherzet Youcef*



III.1. Introduction

La flottation consiste en une série d'étapes telles que :

- la mise en suspension des particules solides, idéalement constituées d'une seule phase (libérées), qui doivent être séparées ;
- le traitement de la pulpe avec certains réactifs (conditionnement) pour rendre hydrophobe la surface de certaines particules ;
- l'introduction de la pulpe dans les cellules de flottation, appareils munis d'un système d'injection de bulles d'air et fournissant l'agitation nécessaire à la suspension du solide;
- l'attachement des bulles d'air (dont la dimension est contrôlée par leur mode d'introduction, l'agitation et la présence d'agents surfactants à l'interface liquide) aux surfaces hydrophobes;
- la montée en surface due à la poussée d'Archimède des ensembles (agrégats) particule-bulle;
- l'établissement (dépendant de la quantité et du type de moussant utilisé) dans la partie supérieure de la cellule d'une phase écume stable dans laquelle vont se rassembler les particules qui flottent;
- l'enlèvement (raclage) de l'écume enrichie en phase solide à séparer pour former le concentré;
- l'enlèvement de la pulpe restant dans la cellule (résidu ou rejet).

Comme norme générale, c'est le minéral de valeur qui est flotté, laissant la gangue dans la pulpe à rejeter. Cette procédure s'appelle flottation directe, par opposition à la flottation inverse où la gangue est éliminée dans la fraction flottée.

III.2. Les essais de laboratoire

Pour concevoir un circuit de flottation pour un minerai donné, on doit préalablement conduire des essais de laboratoire afin de déterminer le type et le dosage de réactifs nécessaires, les conditions de la flottation (pH, % solides, etc.) et le temps de flottation (lié aux dimensions des équipements) nécessaire pour obtenir des objectifs métallurgiques donnés (récupération et teneur du concentré). Ces essais doivent être faits sur un échantillon représentatif du minerai

broyé à la dimension optimale, c'est-à-dire celle qui assure un degré de libération adéquat. Ce broyage doit être accompli en humide et immédiatement avant les essais de flottation, afin d'éviter l'oxydation des nouvelles surfaces, nuisible à la flottation surtout dans le cas des sulfures. Afin de reproduire le plus près possible les conditions du broyage en circuit fermé qui sera fort probablement utilisé dans l'usine en conception, le broyage en laboratoire doit se faire dans des broyeurs à barres, car ces machines génèrent des produits avec une distribution granulométrique semblable à celle des produits de circuits fermés de broyage. La pratique idéale serait d'accomplir ces tests de flottation sur des échantillons différents, chacun ayant une distribution granulométrique particulière, afin de déterminer le niveau optimal de broyage.

Des tests préliminaires de flottabilité peuvent être faits sur des particules minérales libérées afin de déterminer les collecteurs et d'autres réactifs convenables à leur flottation, ainsi que le pH optimal de travail. Une méthode utilisée est la mesure de l'angle de contact, technique qui consiste à presser une bulle d'air sortant d'un capillaire sur une particule de minéral placée dans de l'eau distillée. Si, après un certain temps, on n'observe pas d'adhérence (en retirant la bulle), on peut supposer que la particule est propre, c'est-à-dire sans réactifs. On ajoute alors le collecteur à tester et si le minéral devient hydrophobe, on remarquera un certain niveau d'adhérence. L'angle de contact produit à travers la phase aqueuse est une mesure de l'hydrophobicité induite. Cette méthode est cependant limitée, entre autres raisons, par le fait qu'elle est statique tandis que la flottation est dynamique.

La technique du tube de Hallimond (voir figure ci-dessous) est une méthode dynamique où les particules minérales sont maintenues sur un support de verre fritté placé à l'intérieur d'un tube contenant de l'eau distillée et le collecteur à essayer. Lorsqu'on introduit de l'air à travers le verre fritté, les particules minérales hydrophobes adhéreront aux bulles, étant alors entraînées vers la surface de l'eau, où crèvent les agrégats bulle-particule. Les particules minérales se déposent dans le tube collecteur d'où elles sont retirées, leur masse pouvant être reliée au degré d'hydrophobicité.

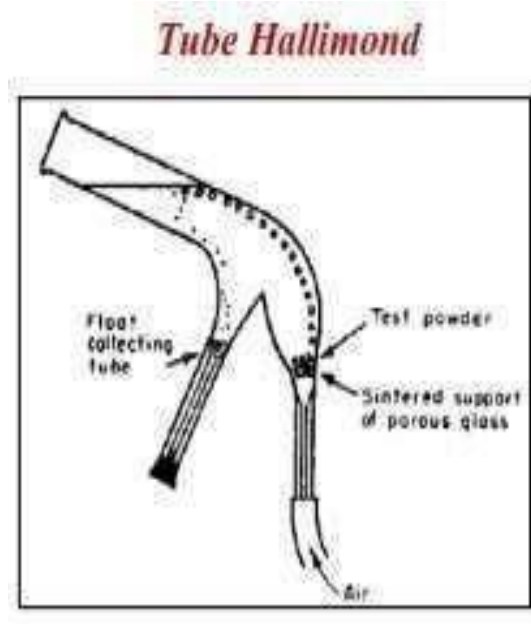


Figure III.1 : Tube Hallimond.

La méthode la plus utilisée est sans doute la flottation batch dans une cellule de laboratoire (voir figure ci-dessous), consistant en un réservoir de volume donné (1l, 2l, 4l) muni d'un agitateur à vitesse variable. L'air nécessaire à la flottation est aspiré à travers l'axe creux de l'agitateur, une valve permettant de régler le degré de succion et, par conséquent, le flux d'air ajouté. Les bulles ainsi produites montent vers la surface à travers la pulpe en agitation, collectant au passage les particules hydrophobes. Ces agrégats bulle-particules s'accumulent dans la partie supérieure du réservoir (surface de la pulpe) créant une zone de mousse ou écume, d'où ils doivent être retirés par raclage manuel, et recueillis dans un contenant pendant une certaine période de temps. Ces concentrés sont ensuite séchés, pesés et analysés pour l'élément d'intérêt. Typiquement, on recueillera quatre ou cinq concentrés, chacun sur une période de temps donnée (par exemple 0-1 min, 1-2 min, 2-4 min, 4-8 min, 8-16 min). Ensuite, un échantillon des rejets restant dans la cellule est aussi prélevé et analysé. Il est clair que le premier concentré recueilli est le plus riche, car il contient les particules les plus hydrophobes (minéral de valeur) et le dernier est celui le plus pauvre (à part bien sûr les rejets).



Figure III.2 : Cellule de flottation de laboratoire.

Les résultats de ces tests peuvent être présentés de différentes formes, les plus courantes étant (Voir figure suivante) :

- Récupération cumulée en fonction du temps
- Récupération cumulée en fonction de la teneur cumulée.

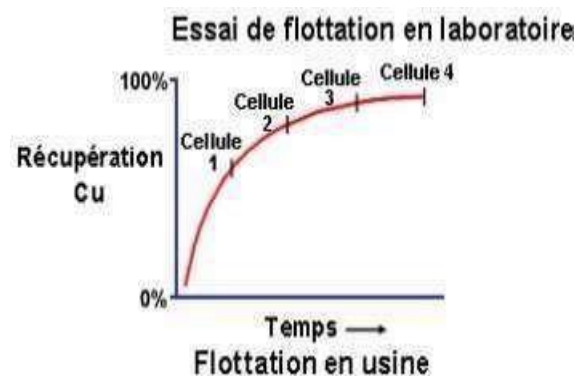
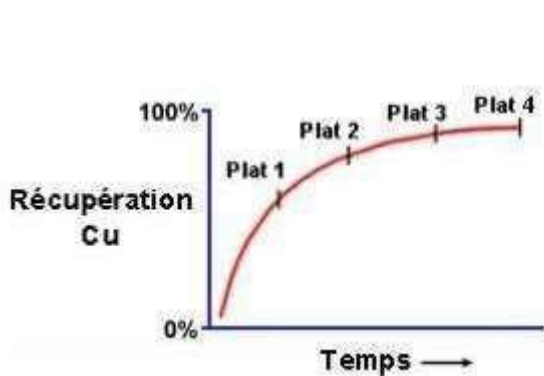
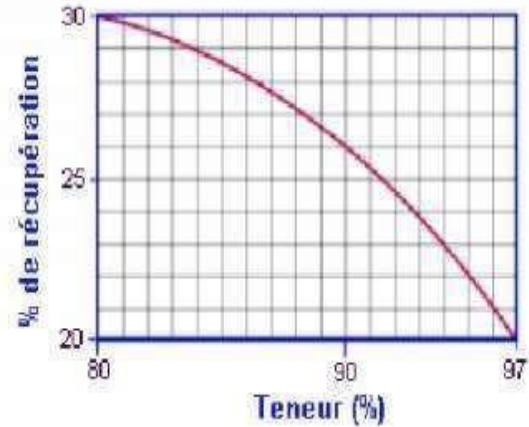
A la fin d'un test de flottation en laboratoire on a donc une série d'échantillons de concentrés et les rejets finaux puis chaque échantillon est pesé (sec) et analysé chimiquement pour l'élément de valeur (par exemple : **Zn**). On obtient les résultats du tableau ci-dessous.

| | Temps (min) | Masse (g) | Teneur (%Zn) | Masse Zn | Masse cumul | Masse Zn cum | Récup Zn cum | Teneur cumulée |
|----------------|----------------|--------------|-----------------|-------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Conc. 1 | 0 - 2 | 83.28 | 83.46 | 69.5 | 83.28 | 69.5 | 65.0 | 83.46 |
| Conc. 2 | 2 - 4 | 44.33 | 43.41 | 19.2 | 127.6 | 88.8 | 83.0 | 69.59 |
| Conc. 3 | 4 - 8 | 60.99 | 15.78 | 9.62 | 188.6 | 98.4 | 92.0 | 52.17 |
| Conc. 4 | 8 -16 | 106.2 | 4.02 | 4.29 | 295.2 | 103.0 | 96.0 | 34.89 |
| Rejets | - | 934.8 | 0.46 | 4.30 | 1230 | 107.0 | 100.0 | 8.70 |
| Total | - | 1230.0 | - | 107.0 | - | - | - | - |

Tableau III.1: Résultats de test de flottation en laboratoire sur une série d'échantillons



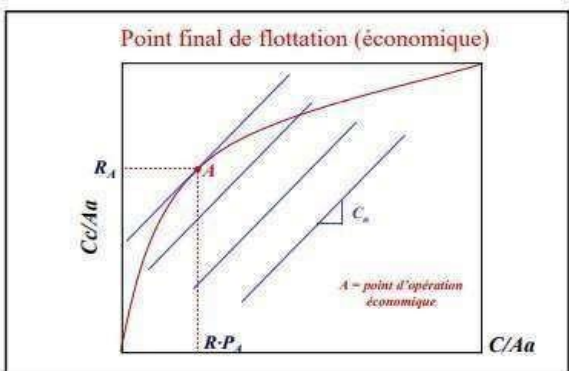
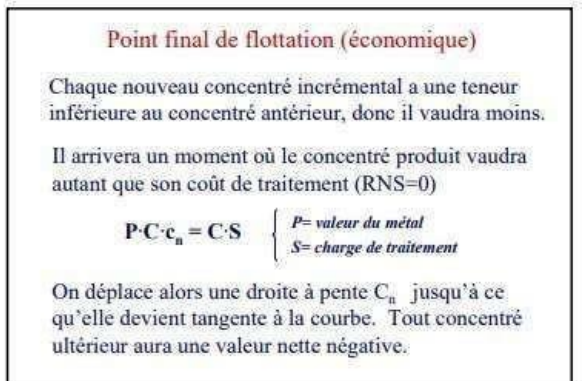
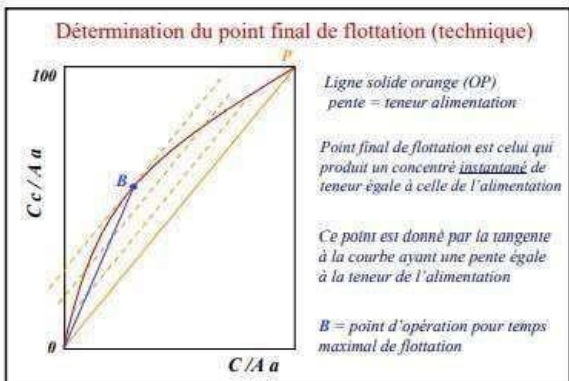
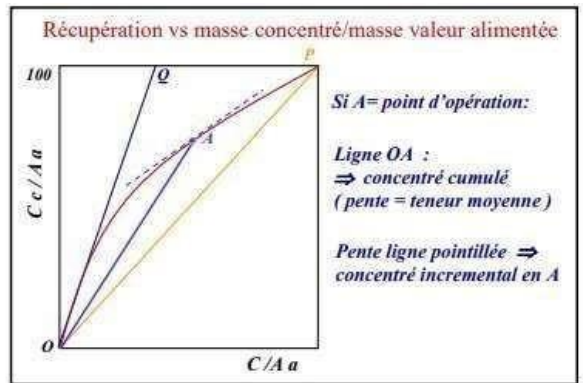
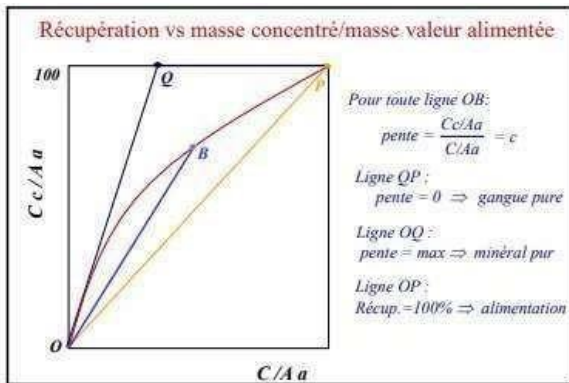
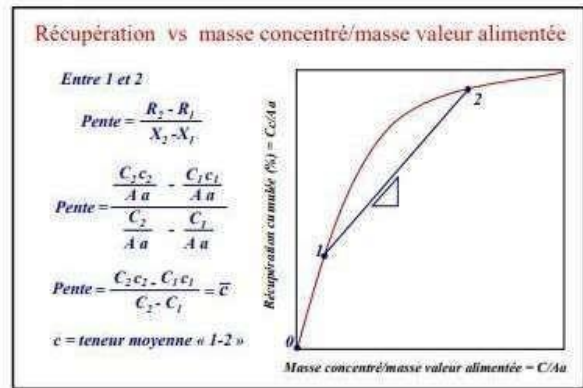
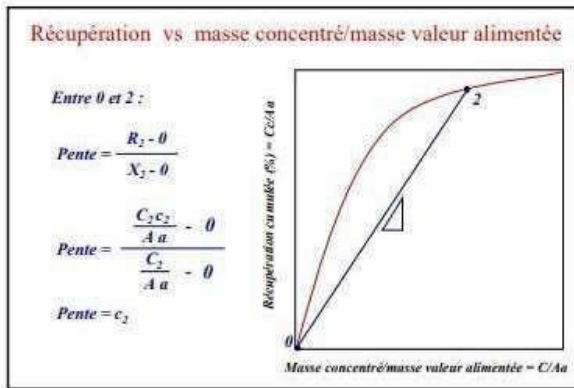
Récupération dans un banc cellules



D'autres façons de présenter ces résultats de laboratoire sont :

- Récupération cumulée du minéral en fonction de récupération cumulée du minerai (aussi appelé rendement poids)
- Récupération cumulée de minéral en fonction de la masse de concentré par masse de minéral de valeur alimentée.

Cette dernière forme est particulièrement intéressante car la pente de toute ligne joignant un point quelconque A de la courbe (équivalent à un temps de flottation donné) et l'origine correspond à la teneur moyenne du concentré recueilli durant tout ce temps de flottation. Pareillement, la pente de la ligne droite joignant deux points B et C de la courbe correspond à la teneur du concentré recueilli entre les temps t_b et t_c . La pente de la tangente à la courbe à un point quelconque A correspond à la teneur du concentré produit à l'instant t_a . Finalement, la pente de la droite joignant l'origine et le point correspondant à une récupération de 100% équivaut à la teneur de l'alimentation.





CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

L'influence des réactifs en type ou en concentration, se remarque sur la flottation proprement dite. En effet, le type de réactif utilisé a un impact direct sur la séparation. Lorsque le composé ajouté à la pulpe n'est pas spécifique au milieu en cause, l'adsorption sur les particules n'est pas optimale (mauvaise liaison de surface). À ce moment, le rendement de la flottation est réduit. Par contre l'ajout d'un additif approprié aux solides favorise une meilleure réaction superficielle et donc un plus grand enlèvement du minerai de la matrice.

Pour concevoir un circuit de flottation d'un minerai donné on doit préalablement conduire des essais de laboratoire afin de déterminer le type et le dosage de réactifs nécessaires.

Références bibliographiques

- [1] **KOUACHI Sabri**, Étude et Simulation par Modèles Mathématiques des Étapes Élémentaires lors du Contact Particule – Bulle en Flottation, thèse doctorat, Université Mentouri Constantine.
- [2] **DJEDID Rahma et HAZEM Chahra Zed (2018/2019)**, Caractérisation analytique des collecteurs, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi Oum ElBouaghi.
- [3] **HAFEDH Tbaybi (2015)**, Impact de la flottation éclair sur l’empreinte énergétique d’un circuit de broyage – Cas de la mine Nyrstar – Langlois, mémoire du grade de maître ès en génie des mines, Université Laval-Canada.
- [4] **ANNIE Bélanger (2000)**, applicabilité de la flottation en colonne pour le traitement des sols et des sédiments contaminés : récupération des particules fines de sphalérite, mémoire du grade de maître et sciences (m.sc.) en sciences de la terre, Université Du Québec Inrs-Géoresources.
- [5] **RALAINAIVO MANIRINTSOA Delloue Michel(2001)**, conception et réalisation d’un appareil de flottation : flottation de la bauxite, mémoire de fin d’études d’ingénieur, Université d’Antananarivo.
- [6] **Pierre BLAZY et El-Aid JDID**, flottation : mécanismes et réactifs, *Techniques de l’ingénieur*, Traité Génie des procédés, [J 3 350], 2001.
- [7] **Mélanie Proulex (2000)**, Amélioration du rendement des particules grossières par la stratégie d'addition des réactifs dans un banc de flottation, mémoire du grade de maître ès sciences, Université Laval-Canada.
- [8] **Mme MAHTOUT Leila (2009)**, influence de la consommation des réactifs de flottation sur la sélectivité des métaux Pb/Zn (mine amizour), Thèse doctorat, Université Ferhat Abbas De Setif.