

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Badji Mokhtar -Annaba  
Badji Mokhtar university -Annaba



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des Sciences de la Terres  
Département des mines

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

*Doctorat LMD*

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Minier

Spécialité : Valorisation des Ressources Minérales

**Etude comparative entre l'utilisation des collecteurs Xanthate et Chélatant,  
en vue d'améliorer la flottation de la blende. Cas de la Mine de Chaâbet El  
Hamra, Sétif.**

Par : **BENAISSA Badr-Elboudour**

**Devant le jury de soutenance :**

|                       |                     |      |   |
|-----------------------|---------------------|------|---|
| <b>Président :</b>    | BOUNOUALA Mohamed   | Pr.  | Université Badji Mokhtar -Annaba  |
| <b>Directeur :</b>    | CHETTIBI Mohamed    | Pr.  | Université Badji Mokhtar -Annaba.                                       |
| <b>Co-Directeur :</b> | CHAIB Abdeslam      | MCA. | Université Badji Mokhtar -Annaba.                                       |
| <b>Examineurs :</b>   | NEMAMCHA Abderrafik | Pr.  | Université 8 mai 1945 - Guelma  |
|                       | IDRES Abdelaziz     | Pr.  | Université Badji Mokhtar -Annaba  |
|                       | NETTOUR Djamel      | MCA. | Ecole nationale supérieure de technologie<br>d'ingénierie ENSTI- Annaba |

*Soutenue le 20/05/2026*

---

## *Résumé*

La Blende (ZnS) également appelée la sphalérite, est une source essentielle de zinc, souvent associée à d'autres minéraux sulfurés comme la pyrite (FeS<sub>2</sub>). La séparation de la sphalérite de la gangue (pyrite, dolomite, etc.) par flottation est une méthode largement utilisée, avec le réactif xanthate comme collecteur principal, reconnu et adopté par de nombreuses usines à travers le monde. L'activation de la sphalérite par le sulfate de cuivre est un procédé bien établi, mais la quantité requise varie selon la teneur en zinc du minerai. Cependant, Dans les dernières années au niveau de la laverie de Kherzet Youcef, l'efficacité d'extraction du zinc diminue d'un jour à l'autre à cause de la mauvaise application du régime de réactifs d'un part et d'autres paramètres liés aux équipements de traitement d'autre part. Suite aux propriétés délicates de la surface minérale de la sphalérite, pour sa flottation, il doit être activé préalablement par un réactif activant qui est le sulfate de cuivre. Ce dernier malheureusement pose des défis importants : il est corrosif, réduisant la durée de vie des équipements, et représente un coût élevé pour les usines, tout en générant des rejets toxiques. Pour faire face à cela, un groupe de collecteurs appelant collecteur chélatant a été développé pour flotter la sphalérite sans nécessité d'activation par le sulfate de cuivre.

Cependant, dans l'actuelle requête, un collecteur chélatant type N-S (aminothiols) a été synthétisé et appliqué nouvellement dans la flottation de la sphalérite du minerai de Chaâbet El Hamra. Les résultats de la séparation ont été très significatifs en comparant avec celle de la sphalérite activée, où on a obtenu un concentré d'une teneur en 39.53% avec un taux de récupération de 59.74% à un pH 9.

Cette innovation pourrait non seulement réduire les coûts en éliminant le sulfate de cuivre dans le circuit de séparation, mais également prolonger la durée de vie des équipements et diminuer les rejets toxiques, facilitant ainsi la conformité aux normes environnementales.

**Mots Clés :** Sphalérite ; Mine Chaâbet El Hamra ; Flottation ; Caractérisation ; Xanthate ; Réactifs chélatant ; Environnement.

---

### *Abstract*

Sphalerite (ZnS) is an essential source of zinc and is often associated with other sulfide minerals like pyrite (FeS<sub>2</sub>). The separation of sphalerite from gangue minerals such as pyrite and dolomite by flotation is widely used with xanthate as the primary collector agent recognized and adopted by many plants worldwide. Activation of sphalerite using copper sulfate is an established process but the required amount varies based on the zinc content in the ore. However, in recent years at Kherzet Youcef washing plant the efficiency of extracting zinc has decreased day by day due to poor application of chemical regimes partly and equipment-related parameters partly too. Given the delicate properties of the mineral surface for flotation, it must be activated beforehand using an activating agent which is copper sulfate; however, this poses significant challenges: it's corrosive reducing equipment lifespan while being costly for plants generating toxic waste too. To address this issue a group called chelating collectors was developed to float without needing activation via copper sulphate. In this current request a new N-S type chelating collector was synthesized and applied to float Chaâbet El Hamra mine's ore showing very significant results compared to those where activation with copper sulphate was used yielding concentrate at 39.53% recovery rate at pH 9. This innovation could not only reduce costs by eliminating copper sulphate from separation circuits but also extend equipment life reduce toxic emissions facilitating compliance with environmental standards.

**Keywords:** Sphalerite; Chaâbet El Hamra deposit; Flotation; Characterization; Xanthates; Chelating Reagents; Environment.

## ملخص

معادن السفاليريت (ZnS) هو مصدر اساسي للزنك، غالبا ما ترتبط مع معادن كبريتية اخرى مثل البريت ( $FeS_2$ ). فصل السفاليريت عن الشوائب المعنية مثل ( $FeS_2$ ،  $Ca\&Mg (CO_2)_3$ ، إلخ) عن طريق الطفو هو طريقة شائعة جدًا مع استخدام Xanthate كعامل جامع رئيسي، وهو معروف ومعتمد من قبل العديد من المصانع حول العالم. تفعيل السفاليريت باستخدام كبريتات النحاس  $CuSO_4$  هو عملية راسخة، لكن الكمية المطلوبة تختلف حسب محتوى الزنك في الخام. ومع ذلك، في السنوات الأخيرة في مستوى مصنع خرزت يوسف، انخفضت فعالية استخراج الزنك يومًا بعد يوم بسبب سوء تطبيق نظام المواد الكيميائية من جهة، ومتغيرات أخرى تتعلق بمعدات المعالجة من جهة أخرى. بسبب الخصائص الحساسة لسطح المعادن في السفاليريت، يجب تفعيلها مسبقًا بمادة كيميائية تفعيلية وهي كبريتات النحاس. ومع ذلك، تطرح هذه الأخيرة تحديات كبيرة: فهي قابلة للتآكل، مما يقلل من عمر المعدات، وتكلف تكاليف عالية للمصانع، كما تنتج شوائب سامة. لمواجهة ذلك، تم تطوير مجموعة من العوامل الجامعة تسمى العوامل الجامعة المتشابهة لتطفو السفاليريت دون الحاجة إلى تفعيلها بكبريتات النحاس. ومع ذلك، في الطلب الحالي، تم تصنيع وتنفيذ جامع متشابه من النوع N-S (امينيول) في طفو السفاليريت من خام شعبة الحمراء. كانت نتائج الفصل مهمة جدًا مقارنة بتلك التي تم الحصول عليها من السفاليريت المفعلة، حيث تم الحصول على تركيز بمحتوى 39.53٪ بنسبة استرجاع 59.74٪ عند pH 9. هذه الابتكار يمكن أن يقلل ليس فقط من التكاليف عن طريق إزالة كبريتات النحاس من دائرة الفصل، ولكن أيضًا يطيل عمر المعدات ويقلل من الفاقد السامة، مما يسهل الامتثال للمعايير البيئية.

**الكلمات المفتاحية:** السفاليريت؛ منجم شعبة الحمراء؛ الطفو؛ التوصيف؛ Xanthate؛ المواد الكيميائية المتشابهة؛ البيئة.

---

## *Dédicaces*

Je dédie cette thèse :

À ma mère pour sa tendresse et son soutien qui m'ont permis de poursuivre un de mes rêves de ma vie. Son amour et sa foi en moi ont été ma plus grande source de motivation.

À mon père, qui m'a appris la valeur du travail et de la persévérance. Ta sagesse et ton soutien m'accompagnent chaque jour. Que Dieu te fasse miséricorde et t'accueille dans Son paradis.

À mes sœurs et mon frère, qui ont partagé mes joies et mes peines. Et qui m'ont appris la valeur de la solidarité et de l'amour familial. Votre présence dans ma vie a été une source de force.

À mes chères nièces **Jana** et **Maria**, qui apportent tant de joie et d'innocence dans nos vies. Que cette thèse vous inspire à poursuivre vos rêves avec courage et détermination.

À ma chère amie Dr. **SALHI Salima**, Dr. **ATTAFI Imane** et Dr. **BOUKHAMLIA Yousra** pour leurs conseils avisés et leur présence durant ces années d'études. Merci d'avoir cru en moi même dans les moments les plus difficiles.

À ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et du soutien

Merci

**Badr-Elboudour**

---

## *Remerciements*

Cette section de la thèse est souvent la plus plaisante à rédiger. Après des années de concentration intense, il est à la fois gratifiant et réconfortant de s'acquitter de ce noble devoir, qui consiste à écrire ces dernières phrases de remerciement.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma mère **HAMIDI Zineb**, dont l'amour inconditionnel et le soutien indéfectible ont été des piliers tout au long de mon parcours académique. Tu as toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles, et ta sagesse et tes encouragements m'ont permis de surmonter les obstacles. Merci pour les sacrifices que tu as faits pour m'offrir les meilleures opportunités. Ta force et ta détermination m'inspirent chaque jour à donner le meilleur de moi-même.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements mon directeur de thèse, Pr **CHETTIBI Mohamed**, pour sa guidance précieuse, ses conseils avisés et son soutien. Votre expertise et votre passion ont été une source d'inspiration constante.

Je souhaite remercier au co-directeur de ma thèse, Dr **CHAIB Abdeslam**, pour l'attention constante qu'il a portée à l'évolution de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Pr **NATARAJAN Ramanathan** de Saranathan College of Engineering, Inde, pour sa collaboration précieuse et son soutien tout au long de ma thèse. Son expertise et son engagement m'ont permis d'effectuer des progrès significatifs, et je lui suis très reconnaissant pour le temps et les efforts qu'il a consacrés sans attendre de bénéfice personnel.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

---

Je tiens à exprimer ma gratitude envers les ingénieurs de l'unité **ENOF**, spécialement M<sup>me</sup> **FADLI Hayet** pour son aide précieuse et sa disponibilité tout au long de cette thèse.

*Je remercie toute personne, qui de près ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de cette thèse.*

*Voilà, Une étape du voyage se termine ici et une autre commence...*

***Dr. BENAISSA Badr-Elboudour***

---

## *Table des matières*

|   |           |
|---|-----------|
| Résumé.....   | I         |
| Abstract.....   | II        |
| ملخص.....   | III       |
| Dédicaces.....  | IV        |
| Remerciements.....  | V         |
| Table des matières.....   | VII       |
| Liste des figures.....  | X         |
| Liste des tableaux.....   | XII       |
| Liste d'abréviations.....   | XIII      |
| Introduction générale.....  | 1         |
| <b>CHAPITRE I : Généralité sur le Zinc.....</b>   | <b>4</b>  |
| 1. Historique.....  | 4         |
| 2. Propriétés physico-chimiques et mécanique du Zinc.....                                 | 4         |
| 3. Production mondiale de Zinc.....   | 4         |
| 4. Réserves et ressources mondiale.....   | 6         |
| 5. Principaux gisements de Zinc.....  | 6         |
| 5.1. Gisement sulfuré.....  | 7         |
| 5.2. Gisement oxydée.....   | 7         |
| 6. Domaine d'utilisation de Zinc.....   | 9         |
| <b>CHAPITRE II : description de la zone d'étude.....</b>                                  | <b>13</b> |
| A. Contexte géologique de la mine de Chaâbet El Hamra.....                                | 13        |
| 1. Localisation géographique du gisement.....   | 13        |
| 2. Historique et évolution du gisement.....   | 13        |
| 3. Stratigraphie.....   | 14        |
| 4. Minéralisation.....  | 17        |
| 5. Hydrogéologie.....   | 18        |
| 6. Structure de gisement.....   | 18        |
| 7. Réserves en sphalérite de la mine de Chaâbet el Hamra.....                             | 19        |
| 8. Propriétés physique et chimique de la sphalérite.....                                  | 21        |
| B. Exploitation de la mine de Chaâbet el hamza.....                                       | 22        |
| 1. Travaux d'infrastructures.....   | 23        |
| 2. Méthode d'exploitation de la mine.....   | 23        |
| 3. Exploitation de la partie supérieure du gisement de Chaâbet El Hamra.....              | 25        |
| C. Enrichissement du minerai de sphalérite au niveau de la laverie de Kherzet Yousef..... | 27        |
| 1. Présentation de la laverie de Kherzet Yousef.....                                      | 28        |
| 2. Préparation mécanique.....   | 28        |
| 2.1. Section de concassage et criblage.....   | 28        |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 2.2.   | Section de broyage et classification.....   | 29 |
| 3.   | Séparation par flottation.....  | 30 |
| 4.   | Epaississement et filtration.....   | 32 |
| <b>CHAPITRE III : Etude bibliographique sur la séparation physico-chimique et synthèse</b> |   |    |
| <b>De différents travaux antérieurs sur la flottation de la sphalérite.....34</b>          |   |    |
| 1.   | Définition et principe de flottation.....   | 34 |
| 2.   | Différent type de flottation.....   | 36 |
| 2.1.   | Flottation a l'air induit (FAI).....  | 36 |
| 2.2.   | Micro-flottation.....   | 36 |
| 3.   | Critères d'évaluation des résultats de flottation.....  | 37 |
| 4.   | Réactifs de flottation.....   | 38 |
| 4.1.   | Collecteur.....   | 38 |
| ➤  | Collecteur Conventionnels.....  | 38 |
| ➤  | Collecteur Chélatant.....   | 39 |
| 4.2.   | Moussant.....   | 42 |
| 4.3.   | Régulateurs.....  | 43 |
| ➤  | Déprimant.....  | 44 |
| ➤  | Activant.....   | 44 |
| ➤  | Régulateur de pH.....   | 44 |
| 5.   | Réactifs de flottation classique du minerai de sphalérite.....                                | 45 |
| 6.   | Synthèse des travaux antérieurs sur la flottation de sphalérite.....                          | 46 |
| <b>CHAPITRE IV : Partie expérimentale.....58</b>   |   |    |
| A.   | Caractérisation du minerai de sphalérite de la mine de Chaâbet el Hamra.....                  | 58 |
| 1.   | Identification Des Echantillons.....  | 58 |
| 2.   | Caractérisation des échantillons du minerai.....  | 58 |
| 2.1.   | Analyse granulométrique par tamisage.....   | 58 |
| 2.2.   | Analyse pétrographique (lames minces).....  | 59 |
| 2.3.   | Analyse minéralogique par diffraction des rayon X (DRX).....                                  | 59 |
| 2.4.   | Analyse de la chimie de surface.....  | 60 |
| 2.4.1.   | Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR).....                                | 60 |
| 3.   | Résultats et Interprétation.....  | 61 |
| 3.1.   | Analyse granulométrique par tamisage.....   | 61 |
| 3.2.   | Observation des lames minces par microscope optique polarisant.....                           | 62 |
| 3.3.   | Résultats de l'analyse minéralogique par DRX.....   | 65 |
| B.   | Flottation de la sphalérite avec les deux types de réactifs conventionnels et chélatants..... | 67 |
| 1.   | Essai de flottation avec les réactifs conventionnels.....                                     | 67 |
| 1.1.   | Matières.....   | 67 |
| 1.1.1.   | Minerai.....  | 67 |
| 1.1.2.   | Réactifs chimiques.....   | 67 |
| 1.2.   | Tests de flottation.....  | 68 |

---

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 1.3.   | Analyse des produits de flottation.....                               | 70        |
| 2.   | Essai de flottation par les réactifs chélatant.....                   | 71        |
| 2.1.   | Matière.....  | 72        |
| 2.1.1.   | Minerai.....  | 72        |
| 2.1.2.   | Réactifs chimiques.....   | 72        |
| a.   | Collecteur.....   | 72        |
| ➤  | Choix du collecteur chélatant.....                                    | 72        |
| ➤  | Synthèse des aminothiols.....   | 73        |
| b.   | Modificateurs de pH.....  | 75        |
| c.   | Moussant.....   | 75        |
| 2.2.   | Test de micro flottation.....   | 75        |
| 3.   | Résultats et interprétation.....                                      | 76        |
| 3.1.   | Sphalérite non activé et conditionné avec le collecteur Xanthate..... | 76        |
| 3.2.   | Sphalérite activé et conditionné avec le collecteur Xanthate.....     | 78        |
| 3.3.   | Analyse FT-IR.....  | 79        |
| 3.4.   | Sphalérite conditionnée par le collecteur chélatant.....              | 81        |
| 3.4.1.   | Comparaison du rendement.....   | 81        |
| 3.4.2.   | Récupération de la sphalérite.....                                    | 82        |
| <b>CHAPITRES V : Impacts des travaux miniers et du traitement sur l'environnement.....</b> |   | <b>85</b> |
| 1.   | Impacte liées à la mine.....  | 85        |
| 1.1.   | Poussières et de Nuisances.....                                       | 85        |
| 1.2.   | Compaction et érosion du Sol.....                                     | 86        |
| 1.3.   | Contamination des Eaux.....   | 86        |
| 1.4.   | Santé et sécurité dans l'industrie minière.....                       | 86        |
| 1.5.   | Gestion des risques liée à la mine.....                               | 87        |
| 2.   | Impacts liés à la laverie.....  | 87        |
| 2.1.   | Section de concassage, criblage, broyage et classification.....       | 87        |
| 2.2.   | Section de flottation.....  | 88        |
| 2.3.   | Stockage du concentré a l'air libre.....                              | 89        |
| 2.4.   | Digue des stériles.....   | 89        |
| 2.5.   | Gestion des risques liée à la laverie.....                            | 89        |
| <b>CONCLUSION GENERALE.....</b>  |   | <b>92</b> |
| <b>RECOMMANDATION.....</b>   |   | <b>94</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>  |   | <b>95</b> |

---

## *Liste des figures*

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1.</b> Evolution de la répartition par pays de la production de zinc dans le monde en 2024.....  | 5  |
| <b>Figure 2.</b> Evolution de la production minière de zinc depuis 1960.....   | 6  |
| <b>Figure 3.</b> Estimation des réserves mondiales de zinc en 2024.....  | 6  |
| <b>Figure 4.</b> Mine à ciel ouvert de Red Dog en Alaska possédant les plus grandes réserves mondiales de zinc Mine souterraine de Rammelsberg en Allemagne..... | 8  |
| <b>Figure 5.</b> Les 20 plus importantes mines de Zinc en.....   | 9  |
| <b>Figure 6.</b> Domaine d'utilisation de zinc.....  | 11 |
| <b>Figure 7.</b> Les principaux usages du zinc.....  | 12 |
| <b>Figure 8.</b> Localisation de la zone d'étude.....  | 13 |
| <b>Figure 9.</b> Colonne lithostratigraphique du gisement.....   | 16 |
| <b>Figure 10.</b> Carte géologique du gisement avec implantation des profils d'exploration.....  | 16 |
| <b>Figure 11.</b> Coupe de corrélation des données des sondages du gisement.....   | 18 |
| <b>Figure 12.</b> Coupe hydrogéologique Profil 0 - Profil 15.....  | 19 |
| <b>Figure 13.</b> Exploitation par traçage, dépilage et foudroyage.....  | 24 |
| <b>Figure 14.</b> Exploitation par méthode sous niveau foudroyé.....   | 25 |
| <b>Figure 15.</b> Coup des ouvrages d'ouverture du gisement.....   | 27 |
| <b>Figure 16.</b> Concasseur à mâchoire (0 - 40mm).....  | 29 |
| <b>Figure 17.</b> Circuits fermés de broyage.....  | 30 |
| <b>Figure 18.</b> Schéma de la préparation mécanique.....  | 30 |
| <b>Figure 19.</b> Cellule de flottation.....   | 32 |
| <b>Figure 20.</b> Schéma de flottation au niveau de la laverie de Kherzet Youcef.....  | 33 |
| <b>Figure 21.</b> Principe de flottation.....  | 35 |
| <b>Figure 22.</b> Angle de contact pour un système solide-liquide-gaz.....   | 36 |
| <b>Figure 23.</b> Adsorption d'un collecteur sur une surface minérale.....   | 39 |
| <b>Figure 24.</b> Classification des collecteurs ionisants.....  | 41 |
| <b>Figure 25.</b> Chélation des ions métalliques.....  | 41 |
| <b>Figure 26.</b> Interaction entre un réactif chélatant et un métal M-Chélate.....  | 42 |
| <b>Figure 27.</b> Structure générale de la molécule de moussant à l'interface air-eau.....   | 43 |
| <b>Figure 28.</b> Le schéma des essais de micro-flottation.....  | 47 |
| <b>Figure 29.</b> Récupération de la sphalérite et de la pyrite en fonction du dosage du APTT (pH = 6).....  | 48 |
| <b>Figure 30.</b> Récupération de la sphalérite et de la pyrite en fonction de la concentration de CuSO <sub>4</sub> (pH 4.3).....                               | 48 |
| <b>Figure 31.</b> Le schéma des essais de micro-flottation.....  | 49 |
| <b>Figure 32.</b> Récupération par flottation de ZnS à différents pH en présence et en l'absence de CuSO <sub>4</sub> en utilisant le (EX) ou le (BX).....       | 50 |
| <b>Figure 33.</b> Schéma illustratif de l'adsorption de Cu sur la surface de la sphalérite.....  | 51 |

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 34.</b> Récupération par flottation de la pyrite, la sphalérite et la galène en fonction de la concentration du collecteur ([terpinéol] = $5 \times 10^{-6}$ mol/L)..... | 53 |
| <b>Figure 35.</b> Effet du dosage du collecteur HCNPHA sur la récupération et la teneur en Zn.....   | 54 |
| <b>Figure 36.</b> Effet du sulfate de cuivre sur les teneurs des concentrés.....   | 54 |
| <b>Figure 37.</b> Procédure expérimentale des tests de flottation.....   | 55 |
| <b>Figure 38.</b> Structures des acides N-arylhydroxamiques synthétisés.....   | 56 |
| <b>Figure 39.</b> Vue d'un (A) Tamiseuse électromagnétique (B) Etuve.....  | 59 |
| <b>Figure 40.</b> Principe de la diffraction des rayons X.....   | 60 |
| <b>Figure 41.</b> Courbe granulométrique du minerai.....   | 62 |
| <b>Figure 42.</b> Histogramme de distribution granulométrique du minerai.....  | 62 |
| <b>Figure 43.</b> Microphotographie d'une dolomie à grains isométriques.....   | 63 |
| <b>Figure 44.</b> Microphotographies d'une dolomie à cristaux hétérométriques (taille variable).....   | 64 |
| <b>Figure 45.</b> Microphotographie montre la présence des minéraux opaques.....   | 64 |
| <b>Figure 46.</b> Microphotographie montre la différence de taille entre les grains.....   | 64 |
| <b>Figure 47.</b> Microphotographie montre la présence d'un bioclaste recristallisé.....   | 65 |
| <b>Figure 48.</b> Diffractogrammes DRX Du minerai brut.....  | 65 |
| <b>Figure 49.</b> Superposition des Spectres de DRX réalisés sur les échantillons du minerai.....  | 66 |
| <b>Figure 50.</b> Schéma d'obtention des fractions < 75µm.....   | 67 |
| <b>Figure 51.</b> Schéma de protocole de préparation des dosages de collecteur (EX) et activant (CuSO <sub>4</sub> ).....  | 68 |
| <b>Figure 52.</b> L'appareillage utilisé pour les essais de flottation.....  | 69 |
| <b>Figure 53.</b> Différentes étapes de la flottation au niveau de laboratoire.....  | 70 |
| <b>Figure 54.</b> Protocole de titrage complexométrique.....   | 71 |
| <b>Figure 55.</b> Tube de Hallimond.....   | 72 |
| <b>Figure 56.</b> Protéine à doigt de zinc.....  | 73 |
| <b>Figure 57.</b> Représentation générale des aminothiols [2-(Alkylamino)éthanethiols].....  | 73 |
| <b>Figure 58.</b> Schéma réactionnel pour la synthèse de l'aminothiol.....   | 74 |
| <b>Figure 59.</b> Procédure de synthèse du 2-(hexylamino)éthanthiol.....   | 74 |
| <b>Figure 60.</b> Organigramme des essais de micro-flottation.....   | 76 |
| <b>Figure 61.</b> Teneur et récupération du ZnS en fonction de la concentration de Ethyle xanthate.....  | 77 |
| <b>Figure 62.</b> Teneur et récupération du ZnS en fonction de la concentration du CuSO <sub>4</sub> .....   | 78 |
| <b>Figure 63.</b> FT-IR spectral de sphalérite (a) Avant (b) Après activation avec CuSO <sub>4</sub> .....   | 80 |
| <b>Figure 64.</b> Effet des dosages des collecteur sur le rendement.....   | 81 |
| <b>Figure 65.</b> Récupération des minéraux a pH 7 et pH 9.....  | 83 |

---

---

## *Liste des tableaux*

|   |    |
|---|----|
| <i>Tableau 1.</i> Propriétés physico-chimiques de Zinc.....                                     | 5  |
| <i>Tableau 2.</i> Principaux minéraux du zinc.....  | 7  |
| <i>Tableau 3.</i> Evaluation des réserves par l'ORGM en 1992.....                               | 21 |
| <i>Tableau 4.</i> Evaluation des réserves par SIDAM en 1994.....                                | 21 |
| <i>Tableau 5.</i> Propriétés du minerai de sphalérite.....                                      | 22 |
| <i>Tableau 6.</i> Réactifs chimiques utilisé dans la laverie Kherzet Youcef.....                | 31 |
| <i>Tableau 7.</i> Résultats des essais de la séparation par flottation sphalérite/pyrite.....   | 49 |
| <i>Tableau 8.</i> Résultats d'analyse de tamisage du minerai de sphalérite .....                | 61 |
| <i>Tableau 9.</i> Concentration d'Ethyl xanthate de sodium et sulfate de cuivre.....            | 67 |
| <i>Tableau 10.</i> Détails des tests de micro-flottation effectués.....                         | 76 |
| <i>Tableau 11.</i> Teneur et Récupération du ZnS.....   | 77 |
| <i>Tableau 12.</i> Teneur et Récupération du ZnS.....   | 78 |
| <i>Tableau 13.</i> Rendement à différent pH 7 et 9.....   | 81 |
| <i>Tableau 14.</i> Composition minéralogique du concentré obtenu.....                           | 82 |
| <i>Tableau 15.</i> Récupération des minéraux à pH 7 pour un dosage de collecteur de 2 g/kg..... | 82 |
| <i>Tableau 16.</i> Récupération des minéraux à pH 9 pour un dosage de collecteur de 2 g/kg..... | 82 |

---

### *Liste d'abréviations*

- **ENOF** : Entreprise Nationale des Opérations Minières
- **ORGM** : Office de Recherche Géologique et Minière
- **SIDAM** : Société d'Ingénierie et de Développement des Mines
- **LAVAMINE** : Laboratoire De Valorisation Des Ressources Minières Et Environnement
- **CNR** : Conseil national de la recherche italien
- **EX** : Ethyl xanthate
- **BX** : Butyl Xanthate
- **FT-IR** : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
- **DRX** : Diffraction des rayons X
- **MIBC** : Méthyl-isobutyl-carbinol
- **CMC** : carboxyméthylcellulose
- **EDTA** : acide éthylènediaminetétraacétique
- **APTT** : 4-amino-5-pentyl-1, 2,4-triazole-3-thione
- **CSC-1**: 5-(butylthio)-1,3,4-thiadiazole-2-thiol
- **HCNPHA**: N-hydrocinnamoyl-N-phénylhydroxylamine
- **HSVM** : Vidéo microscopie à haute vitesse
- **MIBC**: Méthyl-isobutyle-carbinol
- **KEX** : Ethyl xanthate de potassium

## **Introduction générale**

L'Algérie, est un pays riche en ressources minérales telles que le fer, les phosphates, le plomb, le zinc et l'or, etc. L'industrie minière algérienne joue un rôle crucial dans le développement économique du pays. La sphalérite (ZnS) est un mineral sulfuré important et constitue la principale source du métal de Zinc. [1] Elle se présente sous forme cristalline et peut contenir des impuretés de fer, ce qui influence sa couleur et ses propriétés physiques. [2] Elle est généralement accompagnée de minéraux sulfurés, tels que la chalcopirite ( $\text{CuFeS}_2$ ), la galène (PbS), et la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ). [3] En Algérie, la sphalérite est particulièrement significative en raison de sa présence dans plusieurs gisements importants, tels que ceux de Kherzet Youcef, Ain Kahla Nord et Boucaïd. Ces gisements sont réputés pour leur richesse en sphalérite et contiennent également d'autres métaux précieux comme le cadmium et le germanium, Les réserves de sphalérite en Algérie sont considérées comme importantes, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer leur ampleur exacte. La sphalérite est principalement exploitée pour son contenu en zinc, qui est utilisé dans divers domaines tel que l'industrie métallurgique, la fabrication d'alliages, et les applications chimiques. [4, 5, 6] Le procédé le plus couramment utilisé pour obtenir une récupération sélective de la sphalérite est la flottation qui est un procédé physico-chimique de concentration reposant sur la différence des propriétés superficielles des minéraux à traiter, [7, 8] elle est utilisée pour assurer une séparation sélective des minéraux de l'un de l'autre et de la gangue tout en exploitant les propriétés hydrophobe et hydrophile des surfaces minérales et leur affinité de s'attacher aux bulles d'air. [9]

La technique de flottation de la sphalérite nécessite l'utilisation de différents groupes de réactifs chimiques pour assurer les conditions favorables de séparation. A savoir : les collecteurs sont utilisés pour augmenter l'hydrophobicité de la surface minérale. Le collecteur de type thiol, tel que le xanthate qui est le collecteur le plus couramment utilisé. Il est bien connu que la sphalérite ne peut pas être flottée en utilisant des collecteurs type thiol qu'après une opération d'activation par un activant tel que le sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) qui est nécessaires pour favoriser l'adsorption du xanthate, [1] et en résultat la formation d'un composé chimique plus stable et moins soluble à la surface du minéral qui sera créé.

Bien que le sulfate de cuivre ne soit pas un produit chimique spécialisé comme les collecteurs ou les moussants, sa consommation importante lui a fait le produit chimique auxiliaire le plus coûteux utilisé dans le traitement des minerais de sphalérite. La quantité du sulfate de cuivre nécessaire à l'activation de la surface dépend de la teneur en zinc du minerai. [10]

Lors de la flottation du minerai de sphalérite, une flottation involontaire de la pyrite peut se produire en raison, soit de la présence des ions de cuivre, soit de la faible concentration de sphalérite dans la pulpe. [11] En outre, le sulfate de cuivre, étant un produit chimique très corrosif, réduit la durée de vie des équipements. Ainsi, les usines traitant des minerais de zinc doivent non seulement dépenser beaucoup d'argent pour le sulfate de cuivre, mais aussi elles finissent également par produire des rejets toxiques. [12]

Malgré les développements technologiques dans le domaine de la flottation du minerai de sphalérite, en utilisant le xanthate et sulfate de cuivre comme collecteur et activant, respectivement, elle présente encore des difficultés notables. Cependant, leur utilisation peut engendrer des problèmes environnementaux et de santé en raison de leur toxicité.

Depuis que, les collecteurs conventionnels présentent des inconvénients pratiques dus à leur manque de sélectivité et de spécificité, de nombreux chercheurs se sont orientés vers l'amélioration des collecteurs conventionnels et même au développement de nouveaux réactifs collecteurs, qui peuvent assurer la flottation de la sphalérite indépendamment de l'étape d'activation, [13] ce qui non seulement améliore les paramètres technico-économiques de séparation mais aussi prolonge la durée de vie des équipements et réduire les rejets industriels toxiques qui peuvent satisfaire plus facilement aux exigences environnementales, en conséquences suite à l'élimination du sulfate de cuivre du circuit.[12]

Par conséquent, un nouveau groupe de collecteurs s'appelant collecteurs chélatants a été développé, ils se sont montrés de bons collecteurs de flottation surtout pour la sphalérite car ils ne nécessitent pas une activation préalable, ils jouent le double rôle d'un agent collecteur et activant en même temps. Ces réactifs sont donc des composés organiques qui forment des chélates insolubles dans l'eau à la surface du minéral par le processus de chélation. Les agents chélatants sont classés en fonction des atomes de chélation comme de type O-O, N-O, N-N, S-S et S-N. [14]

Le choix des collecteurs de flottation écologiques, peu toxiques et biodégradables, tout en augmentant leur efficacité et leur sélectivité pour les minerais ciblés, demeure une tâche complexe. Pour concevoir des collecteurs spécifiques aux minéraux, il est important de prêter une attention particulière aux propriétés physico-chimiques des surfaces minérales, à l'interaction des collecteurs avec les sites de surface actifs, ainsi qu'aux méthodologies de synthèse écologique. [15, 16]

Cette thèse vise à apporter une contribution significative à l'étude de la flottation de la sphalérite. Elle ne se limite pas à une simple comparaison entre deux types de réactifs, à

savoir le xanthate et le chélatant ; elle a également pour objectif d'enrichir les connaissances sur les applications industrielles, notamment dans le secteur minier de Chaâbet El Hamra.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer et de comparer l'efficacité des réactifs xanthate et chélatant dans le processus de flottation de la sphalérite, en vue d'identifier les conditions optimales permettant de maximiser la récupération du zinc tout en minimisant les impacts environnementaux. Plus spécifiquement, cette recherche vise à analyser l'impact des différents réactifs sur la récupération du zinc dans le minerai de sphalérite, à évaluer les performances des collecteurs en fonction des paramètres opératoires tels que le pH, le temps de flottation, ainsi les concentrations des réactifs.

A cet effet, dans notre travail de recherche on s'est focalisé sur la synthèse de nouveau collecteur chélatant à base des aminothiols, appartenant aux agents chélatant de type N-S, Ils sont des composés organiques qui contiennent à la fois un groupe amine (-NH<sub>2</sub>) et un groupe thiol (-SH). Cette combinaison leur confère des propriétés spécifiques qui leur permettent d'interagir efficacement avec la surface minérale, rendant celle-ci hydrophobes et favorisant leur séparation lors du processus de flottation. [17]

Pour atteindre les objectifs visés, la thèse est structurée en 05 chapitres. Le 1<sup>er</sup> chapitre vise à explorer les différentes dimensions du zinc, en mettant l'accent sur ses propriétés chimiques, ses applications industrielles, ainsi que son importance économique et environnementale. La revue de littérature permettra de contextualiser l'utilisation du zinc dans divers domaines et de cerner les enjeux liés à son extraction et à son traitement. Le 2<sup>ème</sup> chapitre présente une analyse détaillée de la zone d'étude qui est la mine de Chaâbet el Hamra, en mettant l'accent sur les aspects géologiques, les méthodes d'exploitation et les procédés de traitement des minerais de la sphalérite. Cela permettra de mieux comprendre le contexte dans lequel se déroulent les activités minières. Les principes fondamentaux de la flottation, les réactifs essentiels dans le traitement des minerais de la sphalérite sont présentés dans le chapitre 3. Le 4<sup>ème</sup> chapitre constitue le cœur de cette thèse, se concentrant sur deux aspects essentiels : la caractérisation du minerai de sphalérite et l'étude de son processus de flottation en utilisant deux types de collecteurs Xanthate et Chélatant. La compréhension approfondie des propriétés du minerai est cruciale pour optimiser les conditions de flottation et améliorer l'efficacité du processus d'extraction du zinc. Le 5<sup>ème</sup> et dernier chapitre aborde les enjeux environnementaux liés à l'exploitation minière et au traitement des minerais, en se basant sur les impacts écologiques et les mesures d'atténuation.

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE ZINC

### 1. Historique

Il y a plus de 2000 ans, le zinc (Zn) a été employé à Rome et en Chine comme élément du laiton, un alliage de zinc et de cuivre. On sait depuis l'Antiquité que le zinc s'oxyde rapidement. L'origine du terme zinc il pourrait être issu du terme latin zincum, défini par Paracelse, Le terme trouve son origine dans les mots germaniques Zinke ou Zinken, désignant une dent ou une pointe acérée, ainsi qu'une structure fourchée. Cette étymologie ferait référence à l'aspect caractéristique de la matière solidifiée après refroidissement, marqué par la présence de structures dendritiques.

La présence du zinc dans la croûte terrestre est relativement élevée, avec une quantité naturelle de 60-80 ppm (partie par million, soit 60-80 grammes par tonne). Il est extrêmement rare à l'état naturel, mais il fait partie de diverses espèces minérales. [18]

### 2. Propriétés physico-chimiques et mécanique du Zinc

Le zinc occupe une place centrale dans le tableau périodique en tant que métal de transition. Les métaux de transition occupent l'espace entre les groupes 2 et 13, ces métaux ont de nombreuses caractéristiques physiques et chimiques communes. Il est l'élément chimique de symbole Zn, il existe 5 isotopes stable de zinc.

Le zinc est un métal à surface brillante d'un blanc bleuâtre. Il n'est ni flexible ni résistant à la chaleur ambiante. Toutefois, lorsque les températures dépassent 100 °C, le zinc devient légèrement flexible.

Le zinc peut être laminé à une température allant de 100 à 200 degrés Celsius. Il se brise à une température plus élevée. Le zinc peut atteindre une densité de 7.25 lors du martelage ou du laminage. Il présente une résistance à la traction de 16 à 20 kg/mm pour la qualité standard, avec un allongement de 25 à 40%. À mesure que le métal devient plus pur, sa résistance à la traction diminue et son allongement augmente. Donc, pour le zinc à une teneur en zinc de 99%, la résistance diminue à 12 kg et l'allongement augmente jusqu'à 50%. Les caractéristiques du zinc sont représentées dans le *tableau 1*. [19]

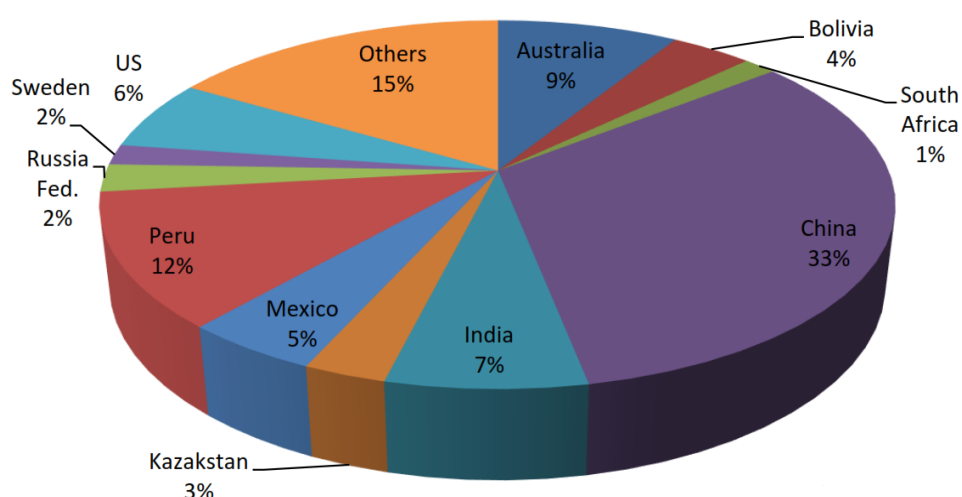
### 3. Production mondiale de Zinc

La production mondiale de zinc en 2024 est attendue autour de 12,5 à 13,7 millions de tonnes, selon les différentes sources, voir *figure 1* et *figure 2*. Une prévision de croissance de la production primaire est modérée (+2%), principalement portée par la Russie, le Mexique et l'Inde. La Russie devrait voir sa production croître de 41% avec la mise en service de la mine d'Ozernoye au troisième trimestre 2024. Le Mexique et l'Inde devraient aussi augmenter leur production en 2024, avec une hausse respective estimée à 9,3% et 5,2%. Cependant, un

rapport signale une baisse de la production minière pour la troisième année consécutive en 2024, avec un déficit estimé à environ 300 000 tonnes en zinc concentré, dû notamment à des réductions de production dans certains pays y compris la Chine, qui est le plus grand raffineur mondial mais réduit sa production. La production minière mondiale de zinc a connu une croissance régulière, passant de 3,4 millions de tonnes en 1960 à plus de 12 millions en 2010, sans interruption majeure. Après avoir atteint un sommet d'environ 13,6 millions de tonnes en 2015, elle a ensuite oscillé entre 12 et 13 millions de tonnes, témoignant d'une certaine stabilité malgré des fluctuations modérées. [20]

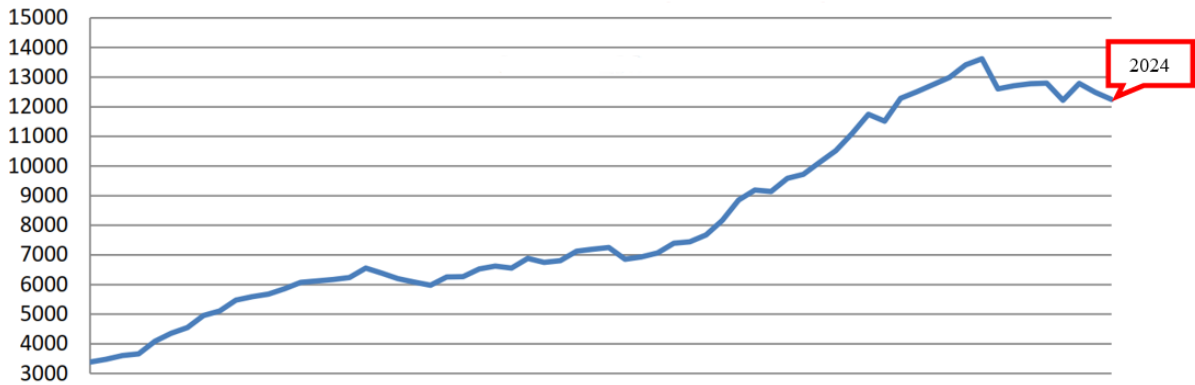
**Tableau 1.** Propriétés physico-chimiques de Zinc [19]

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| Symbole                    | Zn          |
| Nombre atomique            | 30          |
| Masse atomique             | 65.38       |
| Groupe                     | 12          |
| Mode du réseau             | Hexagonale  |
| Configuration électronique | [2,8,18]4s2 |
| Température de fusion      | 419,5°C     |
| Température d'ébullition   | 908°C       |
| Densité                    | 7,24        |
| Dureté                     | 2,5         |



**Figure 1.** Evolution de la répartition par pays de la production de zinc dans le monde en 2024

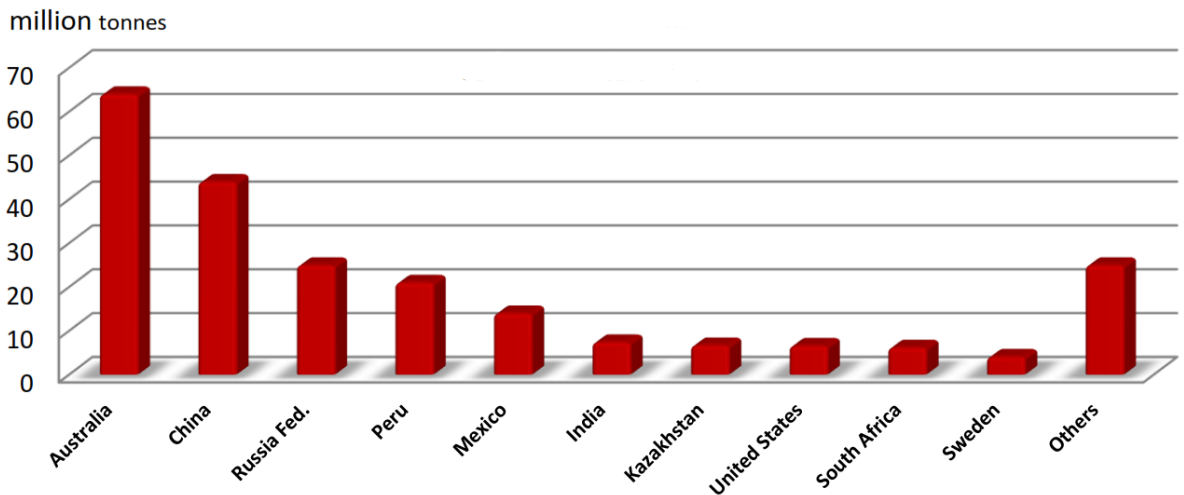
[20]



**Figure 2.** Evolution de la production minière de zinc depuis 1960 [20]

#### 4. Réserves et ressources mondiale

Les réserves mondiales de zinc prouvées s’élèvent à environ 551 millions de tonnes selon les dernières estimations, avec une teneur moyenne en zinc de 0,68% (ainsi que d’autres métaux comme le cuivre, le molybdène et l’argent). Ces réserves sont réparties dans plus de 50 pays, avec les plus importantes concentrations en Australie (environ 64 millions de tonnes), en Chine (44 millions), en Russie (25 millions), au Pérou (21 millions) et au Mexique (14 millions). La Chine est non seulement un détenteur principal de réserves, mais également le plus grand producteur mondial de zinc, suivie par le Pérou et l’Australie. Ces pays contribuent de manière significative à la production mondiale, représentant une large majorité du zinc extrait chaque année. [20]



**Figure 3.** Estimation des réserves mondiales de zinc en 2024 [20]

#### 5. Principaux gisements de Zinc

Les gisements de zinc présentent une large répartition à l’échelle mondiale et se distinguent par leur diversité géologique. Bien que le zinc à l’état natif soit extrêmement rare, il se rencontre principalement sous forme combinée dans diverses espèces minérales, parmi

lesquelles les sulfures constituent les occurrences les plus répandues. l'un des minéraux principaux du zinc est la sphalérite anciennement appelée blende (ZnS), qui renferme jusqu'à 67% de zinc. Les carbonates (smithsonite :  $ZnCO_3$ , et autres contenant en outre Cd, As, Fe) et hydrocarbonates, quelques rares silicates (hémimorphite et willémite), phosphates, et smectites. Le **tableau 2** présente les principaux minéraux du zinc. [21]

### 5.1. Gisement Sulfuré

Le sulfure de zinc (ZnS) est un composé inorganique dimorphe constitué de cations  $Zn^{2+}$  et d'anions  $S^{2-}$ . Il se présente principalement sous deux polymorphes : la wurtzite, de structure cristalline hexagonale, et la sphalérite, de structure cubique, qui constitue le minerai de zinc le plus répandu. Une variété beaucoup plus rare, la polhemusite, possède une structure tétragonale et une composition chimique (Zn, Hg)S ; elle se caractérise par une teinte noire à grise. La sphalérite naturelle présente une grande variabilité d'aspect, allant du brun clair au noir, avec des degrés variables de transparence. Elle renferme généralement des teneurs mesurables en fer et en manganèse, et peut contenir, plus rarement ou à l'état de traces, des métaux précieux tels que l'or et l'argent. [22]

### 5.2. Gisement oxydée

La production de zinc métallique au XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle provenait majoritairement de minerais oxydés, principalement riches en smithsonite. Avec l'avènement des procédés de flottation au début du XX<sup>e</sup> siècle, ainsi que l'amélioration des techniques d'affinage des concentrés de sphalérite, les minerais sulfurés sont progressivement devenus la principale source de zinc. Plus récemment, les avancées dans les technologies de lixiviation, d'extraction par solvants et d'électrolyse ont ravivé l'intérêt économique pour les gisements oxydés, qui sont envisagés comme une alternative stratégique et durable pour l'approvisionnement en zinc au cours du XX<sup>e</sup> siècle. [22]

**Tableau 2.** Principaux minéraux du zinc [20]

| Familles   | Minéraux    | Formule chimique |
|------------|-------------|------------------|
| Zinc natif | Zinc natif  | Zn               |
| Sulfures   | Sphalérite  | ZnS              |
|            | Wurtzite    | $ZnS_{1-x}$      |
|            | Polhemusite | (Zn, Hg) S       |
| Oxyde      | Zincite     | ZnO              |

|                    |                 |   |
|--------------------|-----------------|---|
| Carbonate          | Smithsonite     | $ZnCO_3$  |
| Hydrocarbonate     | Hydrozincite    | $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$                            |
| Silicates          | Hémimorphite    | $Zn_4Si_2O_7(OH)_2(H_2O)$                       |
|                    | Willémitte      | $Zn_2SiO_4$                                     |
| Phosphates         | Tarbuttite      | $Zn_2(PO_4)(OH)$                                |
|                    | Scholzite       | $CaZn_2(PO_4)_2 \cdot 2(H_2O)$                  |
| Smectite zincifère | Sauconite       | $Na_{0,3}Zn_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$  |
| Autres             | Herbertsmithite | $ZnCu_3(OH)_6Cl_2$                              |
|                    | Franklinite     | $(Zn, Mn^{2+}, Fe^{2+})(Fe^{3+}, Mn^{3+})_2O_4$ |



**Figure 4.** Mine à ciel ouvert de Red Dog en Alaska possédant les plus grandes réserves mondiales de zinc Mine souterraine de Rammelsberg en Allemagne [20]

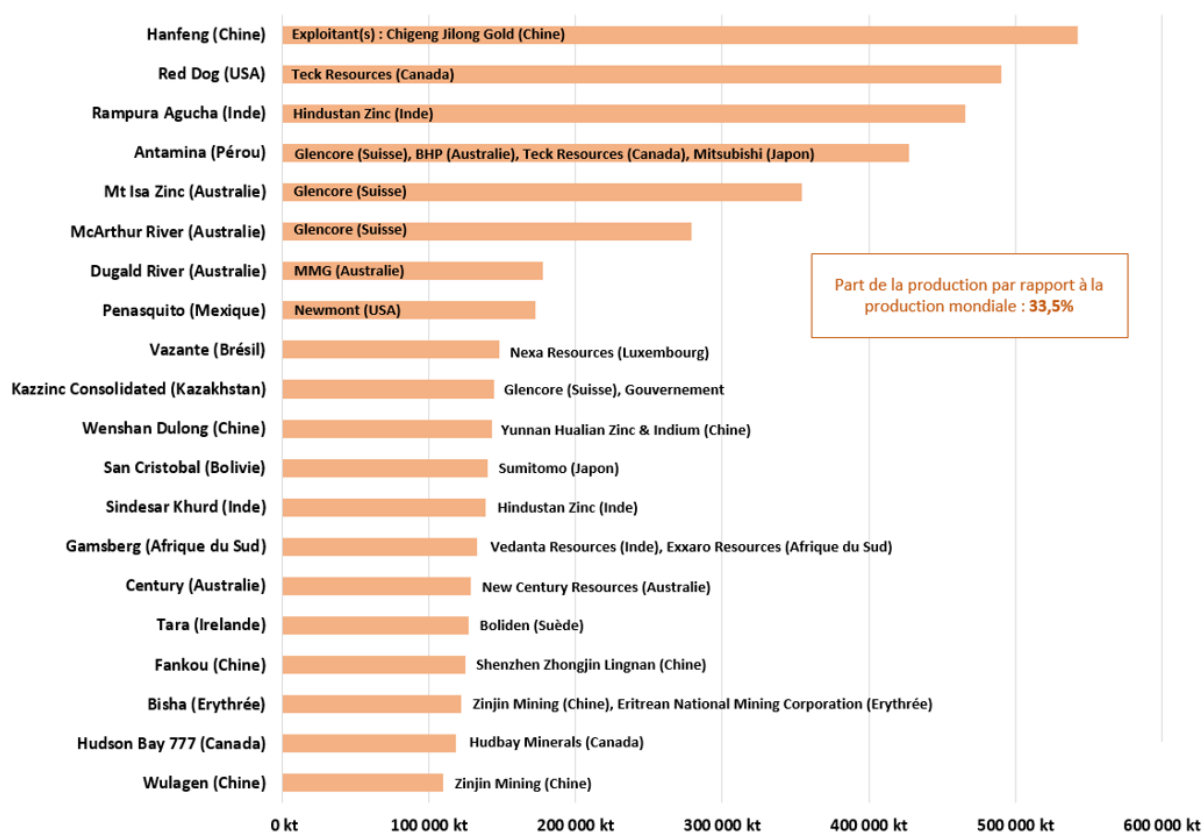


Figure 5. Les 20 plus importantes mines de Zinc [21]

## 6. Domaine d'utilisation de Zinc

Les applications industrielles du zinc sont principalement liées aux caractéristiques chimiques de ce métal, en particulier à sa capacité à réduire considérablement : protection contre la corrosion, piles alcalines. De plus, le faible point de fusion du zinc permet de fabriquer des pièces moulées complexes et fines lorsqu'il est utilisé en alliage. [23]

### ➤ Galvanisation

Le zinc est principalement utilisé pour la galvanisation, un processus qui protège l'acier et le fer contre la corrosion. Environ 60 % du zinc produit dans le monde est utilisé pour galvaniser des métaux, ce qui prolonge leur durée de vie et réduit les coûts d'entretien. Ce processus consiste à immerger l'acier dans un bain de zinc fondu, formant ainsi une couche protectrice.

### ➤ Alliages

Les alliages de zinc sont généralement composés de zinc pur associé à d'autres métaux pour améliorer leurs propriétés. Les éléments les plus couramment ajoutés incluent :

- ✚ Aluminium (Al) : Améliore la coulabilité, la résistance mécanique et réduit la corrosion intercrystalline. Les alliages contenant de l'aluminium permettent d'obtenir des pièces avec des épaisseurs très faibles.

+ Cuivre (Cu) : Confère une dureté supérieure et une résistance à l'usure, mais peut diminuer la résistance à la corrosion. Il améliore également les propriétés mécaniques à haute température.

+ Magnésium (Mg) : Augmente la dureté et affine les grains, tout en limitant la corrosion intercrystalline

➤ **Industrie chimique**

Le zinc joue un rôle crucial dans divers produits chimiques utilisés dans l'industrie.

+ Oxyde de Zinc : utilisé comme agent épaississant dans les cosmétiques, comme pigment blanc dans les peintures et comme additif dans le caoutchouc pour améliorer ses propriétés.

+ Sulfate de Zinc : employé comme coagulant dans le traitement des eaux usées, comme engrais en agriculture pour corriger les carences en zinc du sol.

➤ **Médecine**

Le zinc a plusieurs applications médicales en raison de ses propriétés bénéfiques.

+ Compléments Alimentaires : utilisé pour renforcer le système immunitaire, traiter les carences nutritionnelles et favoriser la cicatrisation des plaies.

+ Produits Dermatologiques : incorporé dans des crèmes et pommades pour ses propriétés anti-inflammatoires et cicatrisantes. Il est souvent utilisé dans le traitement des éruptions cutanées et des irritations.

➤ **Électronique**

Le zinc est utilisé dans diverses applications électroniques grâce à ses propriétés conductrices.

+ Batteries Alcalines : le zinc est un composant essentiel des batteries alcalines, où il sert d'anode. Sa capacité à réagir avec l'hydroxyde de potassium permet de générer une tension électrique stable.

+ Composants Électroniques : utilisé dans la fabrication de circuits imprimés et d'autres composants électroniques en raison de sa conductivité électrique et de sa résistance à la corrosion.

➤ **Construction**

Le zinc est utilisé dans les toitures et les revêtements extérieurs pour sa durabilité et son esthétique.

➤ **Agriculture**

Le zinc est un oligo-élément essentiel pour la croissance des plantes.

- ✚ Engrais Zincs : ajouté aux engrais pour corriger les carences en zinc dans le sol, ce qui peut améliorer le rendement des cultures telles que le blé, le maïs et le riz.
- ✚ Santé Animale : utilisé comme supplément nutritionnel pour le bétail afin d'améliorer la santé générale et la productivité.

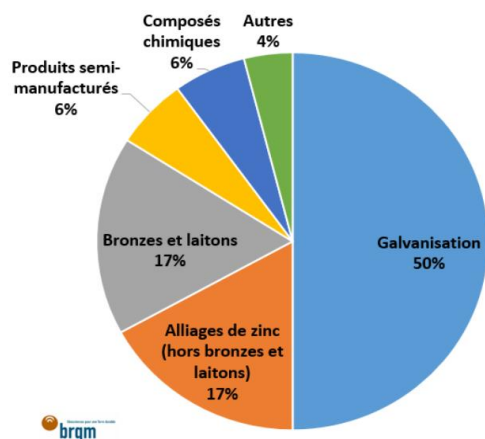
➤ **Cosmétiques**

Il est utilisé dans certains produits de soins personnels, comme les écrans solaires, en raison de ses propriétés protectrices contre les UV.

Le zinc occupe une place stratégique dans l'économie mondiale en raison de ses propriétés physico-chimiques remarquables, notamment sa résistance à la corrosion, sa capacité à former des alliages performants et sa grande polyvalence chimique. Ces caractéristiques en font un matériau indispensable dans divers secteurs, tels que la construction (bâtiments et infrastructures), le transport (pièces automobiles, batteries, alliages), l'industrie de transformation, ainsi que l'agriculture, où il intervient en tant qu'oligo-élément essentiel. [24]



Figure 6. Domaine d'utilisation de zinc



*Figure 7.* Les principaux usages du zinc [20]

## CHAPITRE II : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

### A. Contexte Géologiques De La Mine De Chaâbet El Hamra

#### 1. Localisation géographique du gisement

Le minerai de cette étude est provenant de la mine de Chaâbet El Hamra. Le type de gisement est une roche carbonatée contenant des sulfures, ce minerai actuellement est exploité par la méthode de traçage et dépilage, et traité par le procédé de flottation au niveau de l'usine de traitement de Kherzet Youcef.[25]

Le gisement de Chaâbet El-Hamra est situé à environ 250 km au sud-est d'Alger et à 50 km au sud de Sétif, dans la région de Chouf-Bouarket. Il se trouve à 4,5 km d'Aïn-Azel et à 12 km au sud-est du complexe minier de Kherzet Youssef, voir *figure 8*. Ce gisement s'inscrit dans la zone métallogénique des monts du Hodna, caractérisé par d'importantes concentrations en zinc. [26]

Le climat est semi-aride, hivernant froid et estivant chaud. La moyenne annuelle des précipitations est de 322 mm et ne dépasse que rarement les 500 mm. La moyenne annuelle de température est de 15 °C. [27]

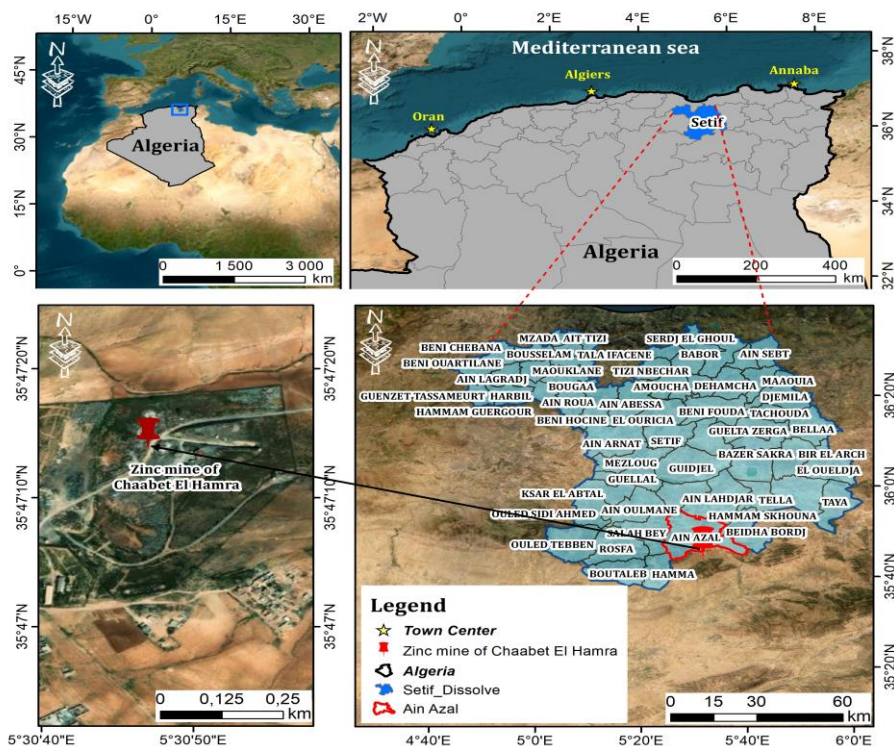


Figure 8. Localisation de la zone d'étude

#### 2. Historique et évolution du gisement

Chaâbet-El-Hamra est un gisement connu depuis le début du XXe siècle. Les affleurements de Calamines (Oxydes) ont été exploités artisanalement dans la partie Sud-Est

du gisement de 1910 à 1920 et de 1936 à 1943. Par la suite, de 1987 à 1991, des travaux d'exploration, dans la partie Nord-Ouest du gisement, ont permis de confirmer l'existence d'une minéralisation pouvant être exploitée.

En 1991, suite à l'accident inerte de la mine de Kherzet Youcef le 02 juin 1990, l'ENOF a réalisé un premier dossier de recherche approfondie par constructions minières sur le gisement de Chaâbet El-Hamra. En janvier 1992, les travaux miniers ont commencé et les travaux d'accès ont été terminés en avril 1994.

L'ENOF a choisi de ne prendre en compte que les réserves situées entre les profils 0-15 dans le projet d'exploitation des réserves de Chaâbet El-Hamra pour les raisons suivantes :

- ❖ Au-delà du profil 15, les données hydrogéologiques sont plus restrictives. Il y a un secteur d'environ 800 mètres de longueur où les corps minéralisés sont absents ou ont des teneurs et des épaisseurs insuffisantes pour justifier leur exploitation entre les profils 16 et 24.
- ❖ La zone du gisement comprise entre les profils 15-31 prend une pente plus prononcée vers le Nord-Ouest que la moyenne. Cette spécificité entraînera des problèmes d'ouverture et d'exploitation plus importants. [28]

### **3. Stratigraphie**

Le gisement étudié se développe dans une séquence de roches sédimentaires carbonatées et terrigènes caractéristiques d'un environnement de plateforme. L'âge de ces formations s'échelonne du Crétacé au Miocène, avec une stratigraphie comprenant des dépôts attribués au Valanginien, à l'Hauterivien (inférieur et supérieur), au Barrémien (inférieur et supérieur), ainsi qu'au Miocène et au Quaternaire.

#### **❖ Valangénien**

Les dépôts valanginiens, stériles, affleurent à l'est de la faille orientale et à l'ouest du gisement. Ils sont constitués d'une alternance d'aleurolites grises, de grès quartzeux clairs, de dolomies gréseuses et argileuses, ainsi que de calcaires et de marnes gris-verdâtres.

#### **❖ Hauterivien**

La minéralisation zincifère d'intérêt économique est concentrée dans l'Hauterivien inférieur, dont l'épaisseur varie entre 70 et 120 m. Ce niveau est principalement formé de dolomies et subdivisé en trois termes lithologiques :

- HI (a) : dolomies massives grisâtres à grains fins, parfois gréseuses, avec de petites inclusions et nodules blanchâtres, localement associées à des calcarénites noires (2–5 m d'épaisseur). Ce terme est discontinu et présente une puissance de 1 à 2 m.

- HI (b) : alternances de marnes gris-verdâtres (0,5–2 m), de siltites gris-brun (2–5 m), de dolomies grises (2–10 m), de dolomies gréseuses (3–8 m) et de marnes bariolées (5–10 m).
- HI (c) : dolomies fines brunâtres, localement enrichies en hématite.

L'Hauterivien supérieur est subdivisé en cinq termes, composés de successions de grès, marnes, dolomies et calcaires. On distingue notamment des dolomies massives parfois hématites, des calcaires argileux, et des alternances calcaro-marneuses et siliceuses.

#### ❖ **Barrémien**

Le Barrémien constitue la formation dominante du champ minier, affleurant largement au sud et au nord-ouest. Il repose en concordance sur l'Hauterivien supérieur et comprend :

- Barrémien inférieur : succession à dominante gréseuse à la base, surmontée d'unités calcaro-dolomitiques. Cette série débute par un niveau terrigène de grès altérés en alternance avec des argiles sombres et des marnes.
- Barrémien supérieur : formation épaisse de 50 à 150 m, s'amincissant vers l'est, composée de grès interstratifiés avec des bancs décimétriques de dolomies gréseuses (gris à rouge), associés à des marnes et des calcaires marneux.

#### ❖ **Aptien**

Cette série est représentée par une alternance de calcaires gréseux et de grès calcaireux, parfois associés à des niveaux de calcaires fins et de grès friables.

#### ❖ **Miocène**

Les dépôts miocènes affleurent uniquement sur le bord nord du champ minier. Ils reposent en discordance sur les séries barrémiennes et sont constitués à la base d'une brèche sédimentaire dolomitique et calcaire, surmontée par des calcaires gréseux.

#### ❖ **Quaternaire**

Ce sont des débris de roches en place sous forme des dolomies, calcaires, grès avec un ciment argileux. [26, 25]

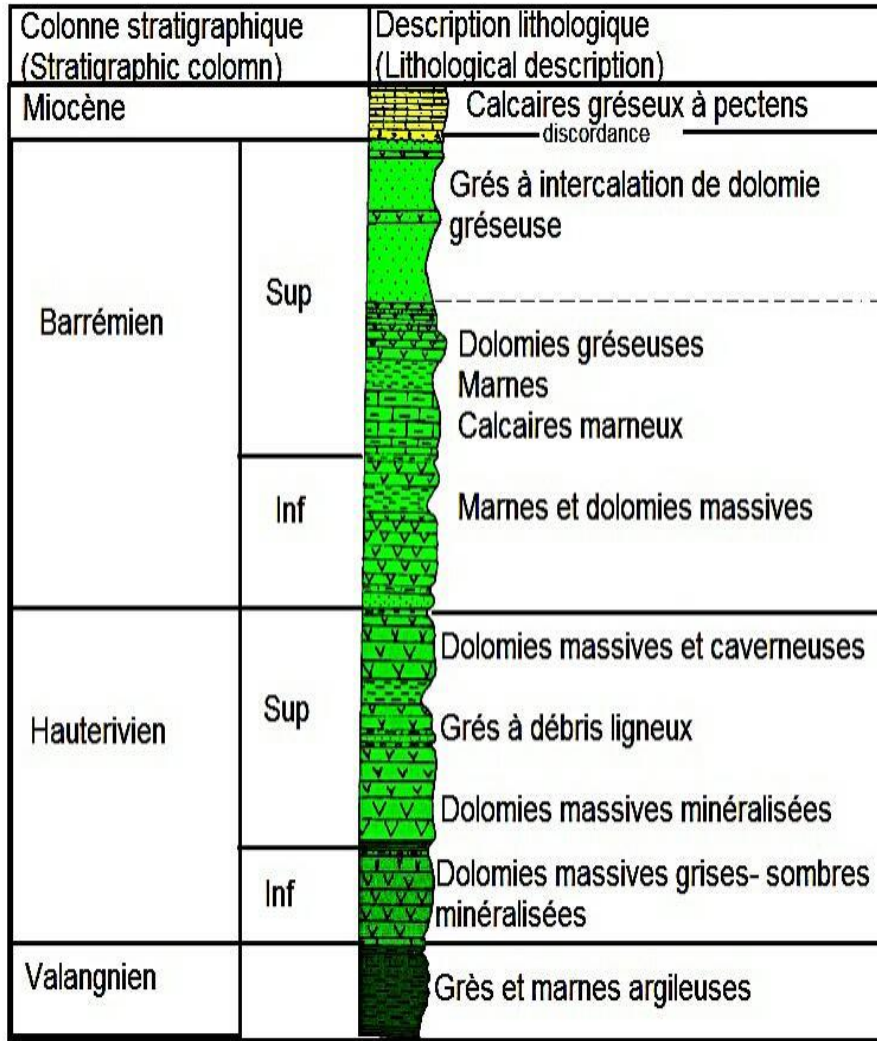


Figure 9. Colonne lithostratigraphique du gisement [26]

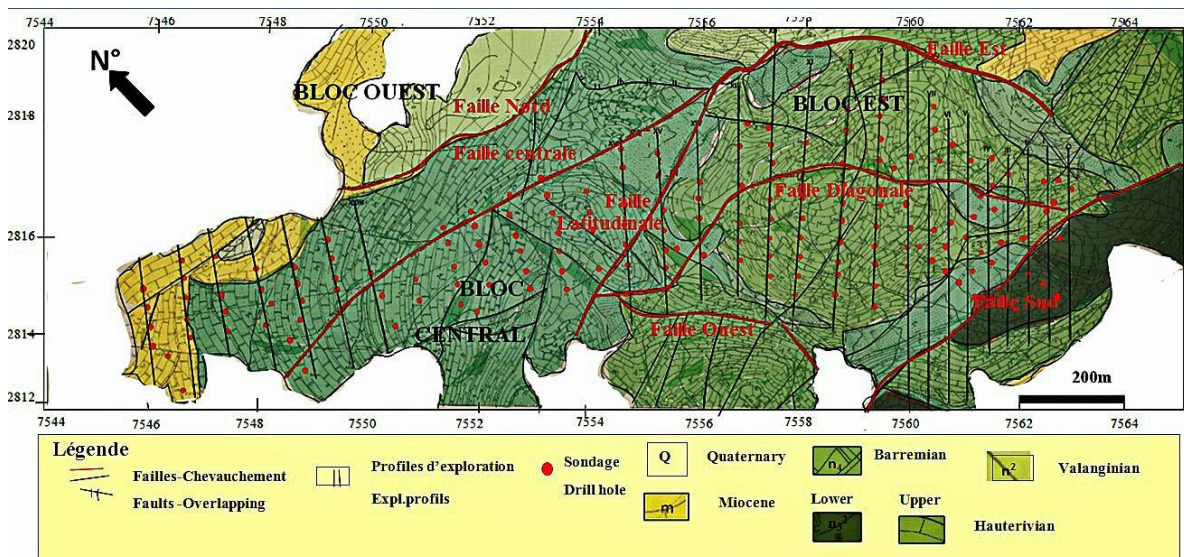


Figure 10. Carte géologique du gisement avec implantation des profils d'exploration [26]

#### **4. Minéralisation**

Les faisceaux minéralogiques dans les dolomies du membre médian du Barrémien par Kherzet Youssef sont constitués de plusieurs couches (cinq à sept couches) d'une épaisseur moyenne d'un à deux mètres, identifiés sur une longueur de 300 mètres d'extension latérale EW, avec une longueur dans le sens du pendage pouvant aller jusqu'à 1000 à 1500 mètres respectivement. Les dolomies d'origine diagenétique, appartenant au membre médian du Barrémien (caractérisé par une alternance de calcaires, de grès dolomitiques et de marnes), renferment une minéralisation d'une richesse exceptionnelle. Celle-ci se compose principalement de sphalérite cristallisée, de galène, de marcasite et de pyrite. Les minéraux de gangue sont représentés par de la calcite et de la barytine géodique, les cavités résiduelles étant partiellement colmatées par des bitumes de génération tardive. Les paragenèses minérales se distinguent par une grande variété de textures, incluant des faciès bréchique, zébrés ou rubanés, des disséminations, des remplissages de vacuoles de dissolution et de fractures, ainsi que des structures de substitution. L'ensemble de cette minéralisation s'inscrit dans un processus épigénétique. [25]

Le gisement de Chaâbet El-Hamra présente une minéralisation en faisceaux, avec des lentilles minéralisées de composition monominérale ou mixte. La paragenèse étudiée est dominée par la sphalérite, la pyrite et la marcassite, considérées comme les minéraux sulfurés majeurs. La galène, de présence rare et d'intérêt industriel limité, ainsi que l'hématite, apparaissent comme minéraux secondaires. Les phases de gangue sont représentées essentiellement par la calcite, la barytine et la dolomie, auxquelles s'ajoutent, de manière plus sporadique, le quartz et le gypse. Les produits d'oxydation identifiés sont principalement la smithsonite, la cérusite et la limonite.

Les roches dolomitiques hauteriviennes sont étroitement liées à la minéralisation de pyrite, de marcassite, de sphalérite et rarement de galène, indépendamment des structures tectoniques qui influencent ce niveau de minéralisation.

Les horizons lenticulaires de minéralisation zincifère s'organisent en deux faisceaux stratiformes distincts, séparés par un niveau de dolomie blanchâtre stérile d'environ 6 mètres d'épaisseur. La présence de la galène aux extrémités des lentilles demeure exceptionnelle, ce qui confère à la zone zincifère une extension plus restreinte que celle de la minéralisation baryto-pyritifère.

Différents types de sphalérite sont disponibles : massif, en tache de recristallisation, fissure et bréchique, qui représentent la majorité du minerai industriel. [29]

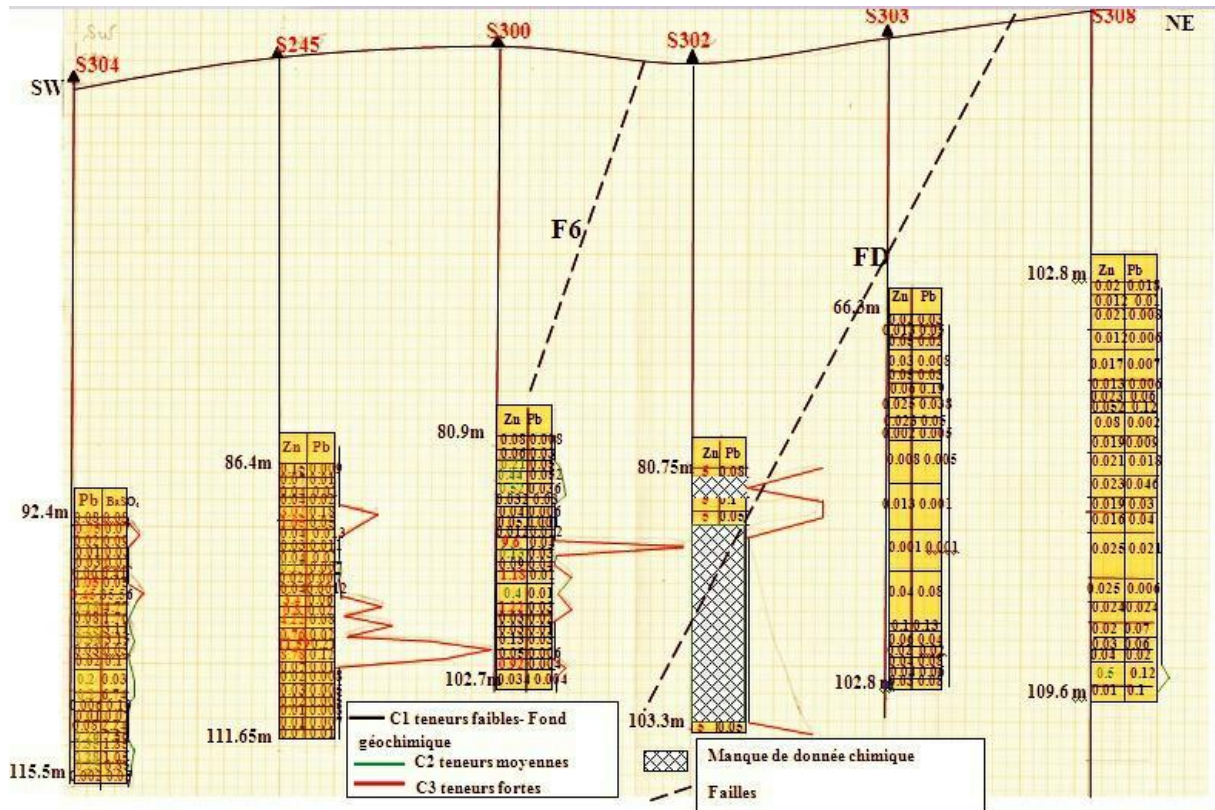


Figure 11. Coupe de corrélation des données des sondages du gisement [26]

## 5. Hydrogéologie

La région connaît assez bien l'importance de l'eau d'exhaure. La fermeture définitive de la mine de Kherzet Yousef a été causée par le catastrophique du 02 juin 1990. On récupère cette eau pour les besoins agricoles et elle permet de continuer l'exploitation de la partie inférieure du gisement de Chaâbet el Hamra, qui est en cours. Deux nappes libres sont confirmées par les données géologiques et hydrogéologiques :

- Au centre du gisement, on trouve des formations carbonatées hauteriviennes avec une perméabilité de fissure.
- Une nappe aquifère est identifiée dans les formations barrémiennes dans la partie Nord-Ouest du gisement. Ce cours d'eau est lié aux grès dolomitiques.
- Deux sondages hydrogéologiques ont été réalisés dans la partie Est du gisement, ce qui a donné des résultats négatifs et a révélé une absence de flux d'eau. Les recherches minières de l'ENOF ont confirmé l'absence de niveau aquifère dans la partie Est. [28]

## 6. Structure de gisement

Le gisement de Chaâbet El-Hamra renferme deux principaux corps minéralisés en zinc, désignés respectivement corps n° 1 (supérieur) et corps n° 2 (inférieur). Ces ensembles se présentent sous forme de bandes continues s'étendant sur environ 2 700 m en direction, avec une largeur variant de 100 à 400 m suivant la pente. L'inclinaison générale des

minéralisations est de 10° vers le Nord-Ouest. L'encaissant est constitué d'une dolomie poreuse ou bréchiq ue appartenant à la partie inférieure de l'ha uterivien (Crétacé inférieur). Le toit du gisement (corps n° 1) est formé de dolomie à lits marneux, tandis que le mur (corps n° 2) correspond à une dolomie massive à concrétions, communément appelée dolomie tachetée.

Les deux corps présentent une morphologie stratiforme, sont subparallèles et séparés par un niveau intercalaire constitué d'une dolomie faiblement minéralisée, parfois stérile. Ce niveau peut localement disparaître, conduisant à la fusion apparente des deux corps en une seule unité continue de minerai. Le corps supérieur (n° 1) présente une puissance moyenne de 5 m, tandis que le corps inférieur (n° 2) affiche une puissance de 4 m. Aucune corrélation claire n'a été mise en évidence entre les épaisseurs et les teneurs en zinc, celles-ci montrant une distribution hétérogène au sein des deux corps minéralisés. [28]

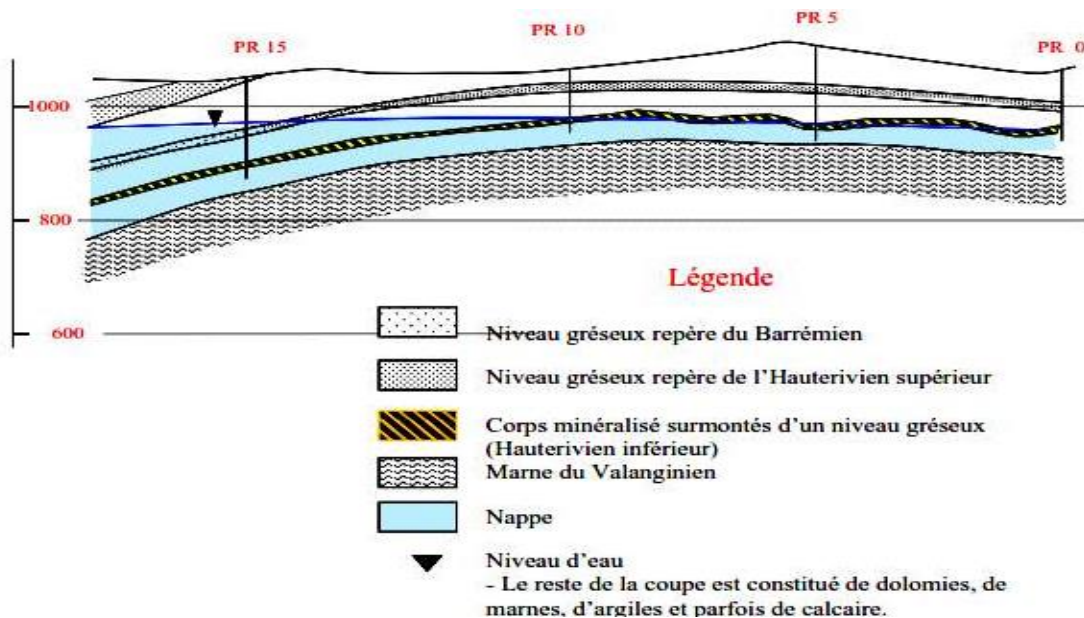


Figure 12. Coupe hydrogéologique Profil 0 - Profil 15 [28]

## 7. Réserves en sphalérite de la mine de Chaâbet el Hamra

Les réserves du gisement, comprises entre le Pr 0 et le Pr 31, ont été initialement estimées en 1992 par l'EREM, puis expertisées en 1994 par le bureau canadien SIDAM.

### 7.1. Évaluation de l'EREM

L'EREM a identifié des réserves de catégories C1 et C2, calculées selon la méthode des blocs géologiques. Dans cette approche, un bloc est défini à partir d'un ensemble de sondages respectant des critères minimaux de teneur pondérée et d'épaisseur du corps minéralisé, nécessaires pour classer le bloc comme minerai.

Les principaux paramètres adoptés sont :

Teneur de coupure : 3 %

Épaisseur minimale exploitable : 1 m

Épaisseur moyenne : moyenne arithmétique des épaisseurs des sondages inclus dans le bloc

Densité moyenne : 3,04 t/m<sup>3</sup> (corps 1) et 3,07 t/m<sup>3</sup> (corps 2)

Maillage d'évaluation :

Catégorie C1 : ≤ 100 m en pendage et 75 m en direction

Catégorie C2 : > 100 m en pendage et 75 m en direction

Les réserves définies par l'EREM, à l'issue de la campagne de prospection conduite par l'ORGM (1987–1992), sont récapitulées dans **tableau 3**. [26]

### 7.2.Évaluation par SIDAM

En 1994, l'expertise confiée au bureau canadien SIDAM a permis d'établir des réserves de catégorie C1 à l'aide de la méthode des polygones. Celle-ci consiste à attribuer à chaque sondage une zone d'influence polygonale, délimitée par des perpendiculaires tracées à mi-distance entre le sondage considéré et ses voisins.

Les paramètres de calcul sont les suivants :

Teneur de coupure : 3 %

Épaisseur minimale : 2 m

Densité moyenne : 3,05 t/m<sup>3</sup> (corps 1 et 2)

Maillage d'évaluation : catégorie C1 avec espacement > 75 m en direction et 100 m en pendage

Les résultats de cette expertise sont apparus très proches de ceux obtenus par l'EREM.[26]

### 7.3.Évaluation par l'ENOF

En 2002, l'ENOF a conduit une nouvelle évaluation du gisement polymétallique de Chaâbet El Hamra, caractérisé par une morphologie complexe et une minéralisation irrégulière liée aux effets structuraux. Les réserves ont été classées en probables (C1) et possibles (C2), selon l'espacement des sondages.

La méthode des coupes géologiques parallèles a été utilisée, particulièrement adaptée aux corps minéralisés à teneur variable. Chaque coupe correspond à un profil défini par un ensemble de sondages dont la teneur est pondérée par les épaisseurs et surfaces correspondantes. Les volumes entre deux coupes sont assimilés à des pyramides tronquées.

Les paramètres adoptés sont :

- Teneur de coupure : 4.40% Zn.
- Teneur géologique du gisement : C'est la somme des produits des tonnages géologiques par les teneurs géologiques sur la somme des tonnages.

- Epaisseur minimale d'abattage : 2.5m
- Teneur minière (abattage) : C'est la teneur géologique avec dilution.

$$T_{\min} = T_{\text{Géo l}} - T_{\text{Géo l}} \times \text{dilution}$$

- Teneur limite exploitable : est définie par le rapport entre :  
Prix de revient du produit fini X Qualité / Prix de vente X Récupération
- Réserves de catégorie B : définies par un contour délimité par des ouvrages miniers.
- Réserves de catégorie C1 : définies par une maille de sondage inférieure ou égale à 100m en direction et 50m en pendage.
- Réserves de catégorie C2 : définies par les zones d'extrapolation du corps de minerai entre un sondage minéralisé et un sondage stérile.
- La densité du minerai est de 3. [26]

**Tableau 3.** Evaluation des réserves par l'ORGM en 1992 [26]

| N° du corps             | Catégories    | Réserves géologiques (T) | Teneurs (%) | Métal   | Puissance |
|-------------------------|---------------|--------------------------|-------------|---------|-----------|
| Corps N°1               | C1            | 2 737 000                | 5.23        | 143 245 | 4.11      |
|                         | C2            | 92 200                   | 5.18        | 4 776   | 7.11      |
|                         | Total corps 1 | 2 829 200                | 5.23        | 147 921 | 4.17      |
| Corps N°2               | C1            | 2 132 500                | 6.03        | 128 590 | 3.66      |
|                         | C2            | 58 900                   | 5.60        | 3 298   | 2.61      |
|                         | Total corps 2 | 2 191 400                | 6.02        | 131 888 | 3.62      |
| Total corps 1 + corps 2 |               | 5 020 600                | 5.57        | 279 809 | 3.93      |

**Tableau 4.** Evaluation des réserves par SIDAM en 1994 [26]

| N° du corps              | Catégories | Réserves géologiques (T) | Teneurs (%) |
|--------------------------|------------|--------------------------|-------------|
| Corps N°1 et 2 confondus | C1         | 2 602 200                | 6.08        |
|                          | C1         | 2 205 800                | 6.80        |
|                          | Total      | 4 808 00                 | 6.41        |

## 8. Propriétés physique et chimique de la sphalérite

La sphalérite fait partie du groupe de minéraux sulfurés avec la formule (ZnS). Il s'agit du minerai principal de zinc. La sphalérite pure est rare et incolore. En général, la présence de fonte entraîne une variation de couleurs allant du jaune verdâtre pâle au brun et au noir avec

une concentration croissante en fer. Quand la quantité de fer est élevée, il s'agit d'une marmatite noire opaque. Il est souvent associé à galène, pyrite et à d'autres sulfures tels que la calcite, la dolomite et la fluorine. La sphalérite a également été appelée par les mineurs zinc blende, blackjack et rubis jack. Les cristaux complexes qu'il présente sont composés de formes tétraédriques ou dodécaédriques avec d'autres faces.

La sphalérite, dont le nom dérive du terme grec sphaleros signifiant « trompeur », doit cette appellation à son éclat métallique sombre pouvant être confondu avec celui d'autres minéraux. Elle se présente généralement sous forme cristalline grossière ou massive, et peut également apparaître en agrégats rubanés, botryoïdaux ou stalactitiques. Sur le plan paragénique, la sphalérite est fréquemment associée à la galène, à la pyrite ainsi qu'à la chalcopyrite. [5]

**Tableau 5.** Propriétés du minerai de sphalérite [30]

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Formule chimique        | ZnS   |
| Couleur                 | Jaune, brun clair à brun foncé, noir, brun rouge, incolore, bleu clair, vert        |
| Traînée                 | Jaune pâle à brun   |
| Lustre                  | Adamantin, Résineux   |
| Diaphanéité             | Transparent, Translucide  |
| Dureté de Mohs          | 3,5 – 4   |
| Système cristallin      | Cubique   |
| Ténacité                | Fragile   |
| Densité                 | 3.9 – 4.2g/cm <sup>3</sup>  |
| Fracture                | Conchoïdale   |
| Clivage                 | Parfait   |
| Cristal habitude        | Se présentent sous forme de cristaux bien formés présentant une bonne forme externe |
| Autres caractéristiques | Non radioactifs, amagnétiques, fluorescents et triboluminescents                    |

## B. Exploitation De La Mine De Chaâbet El Hamra

L'exploitation du minerai de la sphalérite au niveau de la mine de Chaâbet el Hamra s'effectue par les méthodes d'exploitation souterraine. Plusieurs facteurs influencent le choix d'une méthode d'exploitation, tels que :

- L'importance du gisement ;
- Les variations des teneurs ;
- La puissance, le pendage et l'irrégularité de la formation ;
- La dureté, les caractéristiques physico-mécaniques du minerai et des encaissants.

En fonction des propriétés physico-mécaniques du minerai et des roches encaissantes, ainsi que de la morphologie du gisement et de l'épaisseur des corps minéralisés, les méthodes d'exploitation adoptées sont le traçage et dépilage, ainsi que l'abattage par sous-niveaux. La mise en œuvre de ces techniques requiert au préalable la réalisation d'un ensemble d'ouvrages miniers – tels que les galeries de roulage, d'aéragé, de jonction et de découpage de blocs – constituant les travaux d'infrastructure et de préparation. Ces derniers sont conçus avec des paramètres précis permettant d'optimiser l'abattage et l'extraction du minerai. [26]

## **1. Travaux d'infrastructures**

Les travaux d'infrastructures sont des ouvrages destinés à l'accès, au roulage à l'aéragé et issue de secours du champ miniers. Ils seront creusés au mur de la minéralisation d'une manière à servir la totalité de la partie à exploitée, avec une pente de 05 % à 17 % à partir des anciens travaux sur une longueur de 535m pour atteindre le profil 15.

### *1.1. Paramètres de creusement*

La galerie de roulage et d'aéragé est réalisée en voûte, avec une section de 12 m<sup>2</sup>, correspondant à une largeur de 4 m et une hauteur de 3 m.

#### ➤ Travaux préparatoires

Les travaux préparatoires ont pour objectif de subdiviser le gisement en blocs ou en chambres d'exploitation de dimensions déterminées, tout en assurant l'aéragé des chantiers, la circulation du personnel et le transport des matériaux vers le front de taille. Ces travaux comprennent principalement les galeries de jonction et de découpage, dont le creusement s'effectue directement dans le minerai. [28]

## **2. Méthode d'exploitation de la mine**

### *2.1. Méthode de traçage et dépilage*

Cette méthode est spécifiquement appliquée aux couches dont l'épaisseur est inférieure à 5 m. Elle repose sur le creusement d'une série de chambres parallèles, appelées traçages, séparées par des piliers de 12 m de largeur.

L'exploitation des piliers s'effectue en plusieurs étapes :

- Une première enlèvement de 4 m de largeur est réalisée à proximité de la zone d'éboulement, laissant subsister un rideau de protection.

- Ce rideau est ensuite partiellement exploité par le creusement d'une refonte, qui ne conserve que deux piliers résiduels.
- Ces derniers sont progressivement amaigris puis abattus à l'explosif, ce qui permet de récupérer le minerai et provoque le foudroyage contrôlé du toit.

Les piliers résiduels jouent un rôle essentiel dans la régulation et la maîtrise de l'effondrement de la voûte. Le défilage est conduit de manière à adapter la récupération en fonction de l'épaisseur de la couche. Les pertes de minerai associées à cette méthode sont généralement estimées entre 10 et 15 %.[26]

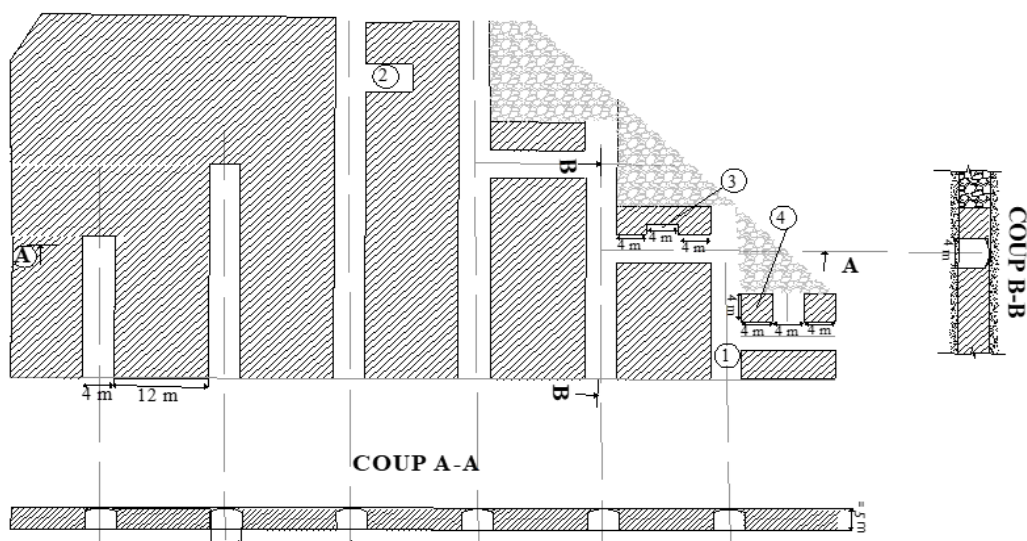


Figure 13. Exploitation par traçage, défilage et foudroyage [26]

### Légendes

Echelle 1/200

1. Traçage ;
2. Enlevure ;
3. Refeinte ;
4. Piliers résiduels.

### 2.2.Méthode sous niveau foudroyés

Cette méthode est appliquée lorsque l'épaisseur des couches minéralisées est supérieure ou égale à 5 m. Son principe repose sur l'excavation d'une série de chambres parallèles, de 12 m de largeur chacune, creusées dans une même direction et séparées par de longs piliers de dimensions équivalentes. L'exploitation de ces piliers s'effectue de la manière suivante : à l'extrémité de chaque chambre, une cheminée est forée sur toute l'épaisseur du corps minéralisé, du mur au toit. Une ouverture transversale d'environ 2 m de largeur est

ensuite réalisée, perpendiculairement aux chambres, afin de constituer une surface libre pour le tir.

Le soutirage débute par le tir d'une ou deux rangées de forages profonds, disposés en éventail à l'aide d'une machine d'abattage. Après l'abattage d'une ou deux tranches successives, le minerai est chargé et évacué. L'opération est interrompue dès l'apparition des stériles issus du foudroyage. L'ensemble des soutirages dans les différentes chambres est organisé de manière à ce que la zone de foudroyage et la masse en place soient séparées par une ligne brisée, globalement inclinée de 35° à 45° par rapport à l'orientation des chambres. [29]

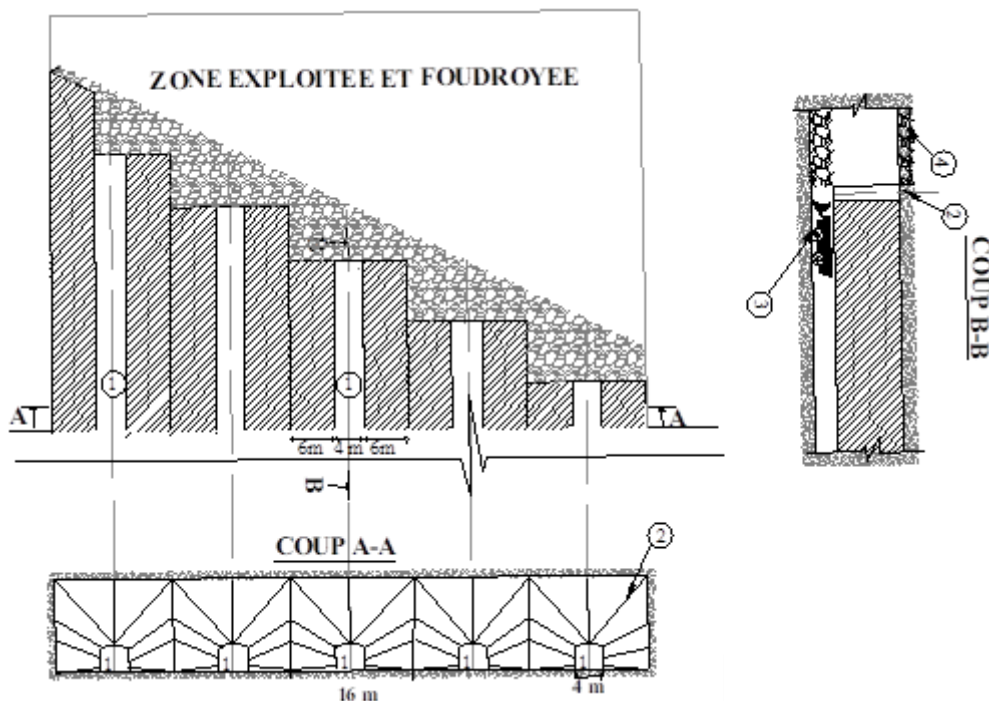


Figure 14. Exploitation par méthode sous niveau foudroyé [26]

### Légendes

Echelle 1/200

1. Traçage ;
2. Trous forés en éventail ;
3. Pelle chargeurs ;
4. Minerai abattu.

### **3. Exploitation de la partie supérieure du gisement de Chaâbet El Hamra**

La mine de Chaâbet El Hamra adopte principalement la méthode d'exploitation par chambres et piliers.

### 3.1. Mode d'ouverture et de découpage

Tranchées d'accès et descenderie: La minéralisation, localisée entre 100 et 160 m de profondeur, se présente sous forme lenticulaire, nécessitant une exploitation souterraine. L'accès à la zone minéralisée est assuré par une descenderie implantée au point le plus bas de la région, à la cote 1020. Longue de 830 m et creusée dans les stériles, elle est utilisée pour la circulation du personnel, du matériel, l'évacuation du minerai ainsi que pour l'entrée d'air frais. Cette descenderie est précédée d'une tranchée d'accès de 113 m (cotes 1034–1025), inclinée de 6 % dans le sens inverse de la descenderie, et équipée de murs de protection en béton et d'un puisard pour le drainage des eaux pluviales.

**Travers-banc 960 :** Situé à la cote 960, ce travers-banc présente une section identique à celle de la descenderie (20,60 m<sup>2</sup>), une longueur de 289 m et une inclinaison de 4 %. Il relie la descenderie au puits d'aérage et de secours, tout en traversant la zone minéralisée.

Puits d'aérage et de secours Issu initialement d'un sondage, ce puits, entièrement bétonné, possède une section de 9,60 m<sup>2</sup> et une profondeur de 117 m, dont 10 m de puisards. Il relie le niveau 960 à la surface, à la cote 1066,74.

### 3.2. Étapes d'exploitation

Le choix de la méthode dépend de la puissance du gisement, de son pendage, de la qualité du minerai et des épontes :

Traçage, dépilage et foudroyage (épaisseur < 5 m) ;

Chambres et piliers abandonnés en un seul niveau (épaisseur < 5 m) ;

Chambres et piliers à plusieurs niveaux (épaisseur > 5 m), méthode localement appelée « sous-niveaux abattus ».

#### A. Traçage et dépilage (P < 5 m)

Cette méthode conventionnelle consiste à réaliser des galeries parallèles de 5 à 6 m de largeur, espacées de 5 m, formant ainsi des piliers. Ces derniers sont ensuite partiellement récupérés, seuls des piliers résiduels de 2 m de côté étant conservés pour le foudroyage. Toutefois, elle impose la réalisation préalable de l'ensemble des travaux d'accès afin d'assurer la stabilité du toit et la sécurité des voies de passage.

#### B. Chambres et piliers (P < 5 m et P > 5 m) B

Bien que généralement réservée aux gisements de faible puissance (< 5 m), cette méthode est appliquée à Chaâbet El Hamra pour des épaisseurs atteignant 8 m. L'exploitation est alors réalisée en deux sous-niveaux. Le premier est exploité jusqu'à 3 m, avec maintien de piliers résiduels. Une partie du minerai abattu est laissée en place pour constituer un plancher de travail permettant l'abattage du niveau supérieur par foration horizontale ou inclinée, la

foration verticale posant des contraintes techniques. Cette variante explique la confusion terminologique locale avec la méthode des « sous-niveaux abattus ».

### C. Travaux d'abattage

L'abattage des panneaux est effectué à l'explosif, en laissant un stot de protection de 12 m. La largeur des chambres est de 4 m, modulable selon la stabilité des terrains. Le plan de tir et le nombre de trous varient selon les caractéristiques géologiques. L'explosif utilisé est une gélatine commerciale, avec une consommation moyenne de 15 kg par tir, soit environ 0,5 kg par trou.

### D. Chargement et transport

Le chargement et le transport du minerai sont effectués simultanément. Le tout-venant est d'abord évacué du front de taille vers une zone de stockage à l'aide d'un chargeur transporteuse CTX4 (godet de 4 t) sur environ 50 m. Le minerai est ensuite transporté par camions navettes (9 t) puis transféré par chargeuse sur pneus (godet de 9 t) vers des camions-bennes de 30 t qui l'acheminent à la laverie, située à 12 km. [28]

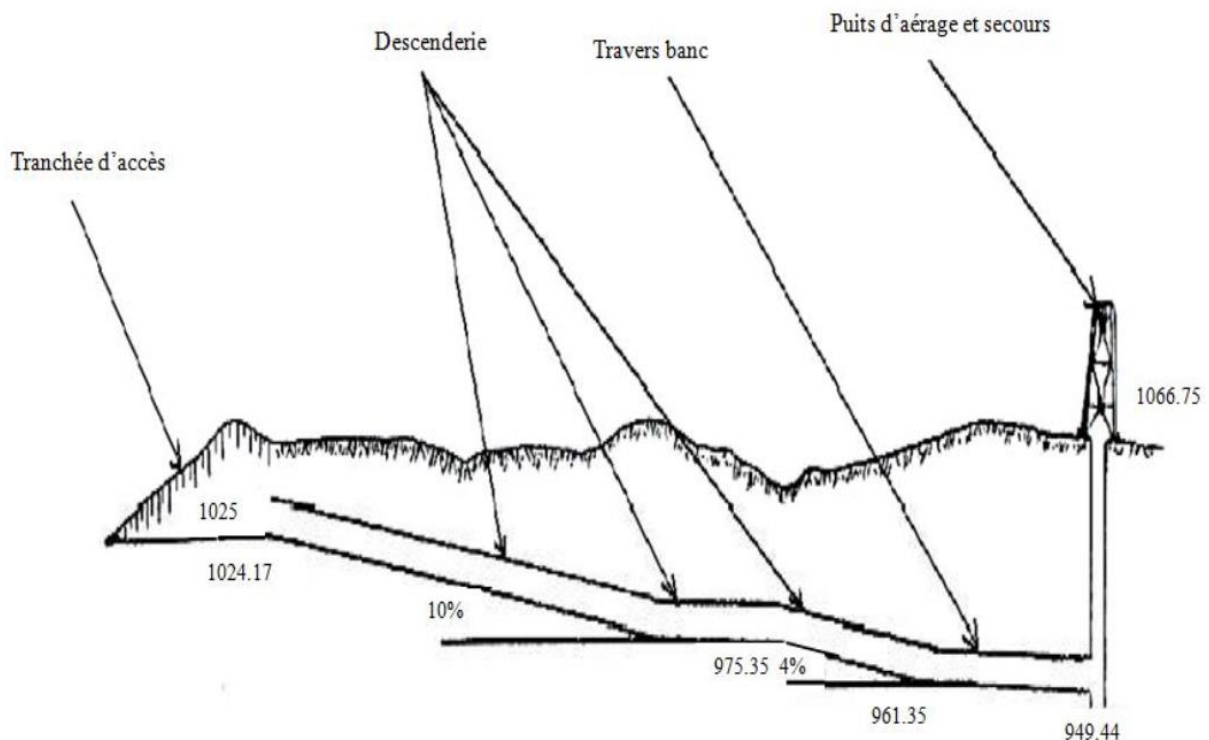


Figure 15. Coup des ouvrages d'ouverture du gisement[28]

### C. Enrichissement Du Minerai De Sphalérite Au Niveau De L'usine De Kherzet Yusef

Le gisement de Chaabet El Hamra à Sétif, en Algérie, est une source importante de sphalérite, Après l'exploitation du minerai, l'enrichissement du minerai de sphalérite, est une

étape cruciale dans l'industrie minière, cette dernière vise à augmenter la concentration de zinc.

Cette partie explore les différentes méthodes et technologies employées pour enrichir le minerai de sphalérite au niveau de la laverie de Kherzet Yousef.

### **1. Présentation de la laverie de Kherzet Yousef**

L'usine d'enrichissement du complexe de Kherzet Youcef est l'une des réalisations industrielles les plus significatives de l'Algérie dans le secteur minier. La mine de Kherzet Youcef est destinée au traitement du minerai Plomb/Zinc, mais après l'inondation du 2 juin 1990, qui a provoqué des catastrophes dans la mine, l'usine, qui était exposée au risque de fermeture, a repris du service grâce à l'ouverture de la mine de Chaâbet El Hamra, située à une dizaine de kilomètres, et caractérisé par la substance utile qui est la sphalérite. [28]

Pour obtenir le concentré de sphalérite, plusieurs opérations minéralurgiques sont utilisées dans le but est :

La réduction de la taille du minerai tout-venant, la libération des particules de zinc de la gangue, la séparation des particules minérales et la production du concentré de zinc. Ce minerai suit deux étapes de traitement, à savoir :

- Préparation mécanique ;
- Séparation par flottation ; Epaississement et filtration.

### **2. Préparation mécanique**

La préparation mécanique est une étape essentielle dans le processus d'enrichissement du minerai de sphalérite. Elle consiste en une série d'opérations visant à réduire la taille des minerais et les libérés de la gangue. Ces opérations incluent le concassage, le broyage et le criblage. Le but de la préparation mécanique est de préparer ce dernier pour les étapes ultérieures de concentration et de traitement (flottation).

#### *2.1. Section de concassage et criblage*

Le concassage vise à réduire la granulométrie du tout-venant initial (0–400 mm) jusqu'à une fraction de 0–20 mm, et s'opère en deux phases successives.

Concassage primaire : après déversement dans la trémie de réception, le minerai est introduit dans un concasseur à mâchoires, permettant d'obtenir une classe granulométrique de 0–40 mm.

Concassage secondaire : les produits du concassage primaire (0–40 mm) sont transférés par le transporteur à bande n°1 (longueur 82 m) vers un crible vibrant de type SYMONS (20 × 160 mm). Les fractions supérieures à 20 mm sont orientées vers le concasseur à cône fonctionnant

en circuit fermé avec le convoyeur à bande, tandis que les fractions inférieures à 20 mm sont dirigées vers deux trémies métalliques d'une capacité de 25 tonnes chacune.

Enfin, le minerai calibré est convoyé vers le corps principal de la laverie par un second transporteur à bande (longueur 45 m) et stocké dans deux trémies en béton, chacune d'une capacité de 100 tonnes. [28]



**Figure 16.** Concasseur à mâchoire (0 - 40mm)

### 2.2. Section de broyage et classification

Le broyage permet de libérer les particules de zinc et de séparer les grains minéraux en fonction de leur granulométrie grâce à la classification hydraulique. On procède au broyage en utilisant un broyeur à boulets fonctionnant en cycle fermé avec un classificateur monospirale.

Le classificateur à vis est constitué d'un bac en tôle incliné dont la partie inférieure, généralement élargie, forme la cuve de classification équipée d'un seuil de débordement. Le dispositif de remontée repose sur une spirale longitudinale en ruban métallique, fixée par des pattes radiales à un arbre central entraîné à faible vitesse par un moteur électrique muni d'un réducteur. Un espace annulaire est aménagé entre la spirale et l'arbre afin d'assurer la circulation des matériaux, la partie inférieure de la vis étant la seule immergée dans la cuve.

La pulpe est introduite au centre de l'appareil et subit deux étapes principales de traitement :

La séparation par décantation au sein de la cuve, qui permet l'évacuation des particules fines par le seuil de débordement ; L'essorage mécanique des sables, assuré par la spirale qui les

entraîne progressivement vers la partie supérieure, tandis que l'eau résiduelle s'écoule à travers l'espace laissé entre la spirale et les parois du bac. Au terme du processus, les sables, partiellement déshydratés, sont évacués par la sortie supérieure de l'appareil. [28]

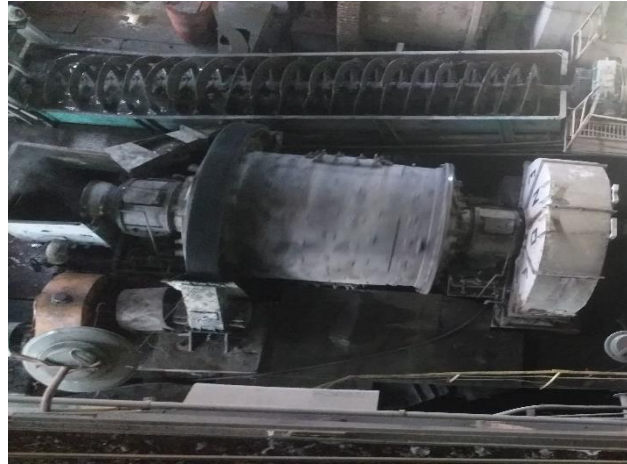


Figure 17. Circuits fermés de broyage

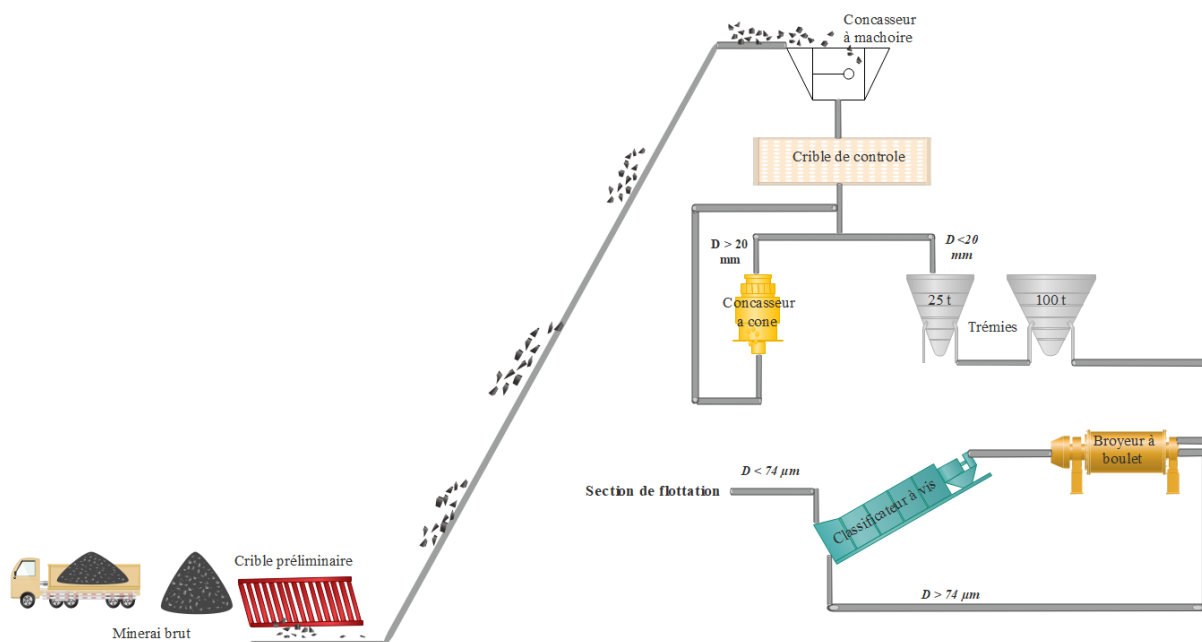


Figure 18. Schéma de la préparation mécanique

### 3. Séparation par flottation

Le processus de la flottation contient une opération principale et de contrôle ainsi que trois opérations d'épuration (releveuse).

- Opération principale (ou dégrossissage) contient un banc de 9 cellules ;
- Opération de contrôle (ou épousage) contient 9 cellules ;
- Opération releveuse composé de 3 bancs, elle s'effectue en 3 étapes:

- Releveuse 1 : 4 cellules ;
- Releveuse 2 : 3 cellules ;
- Releveuse 3 : 2 cellules.

La flottation du minerai de sphalérite au niveau de la laverie est effectuée dans une cellule de type Denver. Cependant les réactifs utilisés lors du processus de flottation sont :

- ✚ Collecteur : Amyl xanthate ;
- ✚ Activant : Sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) ;
- ✚ Moussant : Huile de pin ;
- ✚ Régulateur de pH et déprimant : La chaux ( $\text{CaO}$ ).

Les différents dosages de différents types de réactifs utilisés dans la laverie sont présentés dans le **tableau 6**.

**Tableau 6.** Réactifs chimiques utilisé dans la laverie Kherzet Youcef

| Réactifs chimiques |                   | Dosage (g/t) |
|--------------------|-------------------|--------------|
| Collecteur         | Xanthate          | 100          |
| Activant           | Sulfate de cuivre | 330          |
| Régulateur de pH   | Chaux             | 4500         |
| Moussant           | Huile de pin      | 80           |

La première étape du procédé de flottation correspond à la flottation principale (ou dégrossissage), qui génère un concentré de faible qualité nécessitant une opération releveuse. Parallèlement, le processus d'épuisage est appliqué au rejet de dégrossissage afin de maximiser la récupération du zinc résiduel, le circuit de flottation aboutit ainsi à un rejet final, tandis que le concentré obtenu est réintroduit dans l'étape de dégrossissage.

La releveuse permet ensuite d'éliminer le concentré issu du dégrossissage dont la teneur ne satisfait pas aux exigences spécifiées. Les rejets de cette étape sont recyclés vers le circuit principal. Ce circuit de relevage comporte un nombre limité de cellules, son rôle étant de produire un concentré plus riche, atteignant une teneur en zinc d'environ 53 %. [28]



*Figure 19.* Cellule de flottation

#### **4. Epaissement et filtration**

Dans le processus d'épaissement, les particules sont soumises à la loi de la chute des particules ou des solides dans un milieu liquide ou fluide, où la vitesse de chute des particules augmente en fonction de leur taille et de leur densité. Les particules épaisses produisent une surverse tandis que les particules plus fines produisent un produit boueux ou une sousverse.

La pompe à diaphragme est couramment utilisée pour l'évacuation des produits sédimentaires. Dans un épaisseur alimenté par une pulpe contenant environ 30 % de solides en poids, la concentration peut atteindre jusqu'à 60 % après décantation. Le sédiment, accumulé au fond de la cuve, est entraîné vers l'orifice de sortie au moyen d'un système de raclage constitué d'une spirale ou d'un râteau, puis transféré par la pompe. La filtration constitue l'étape suivante et vise à séparer une phase continue (liquide ou gazeuse) d'une phase dispersée (solide ou liquide) initialement mélangées. Selon l'objectif, le procédé peut être orienté soit vers la récupération de la phase continue en réduisant au maximum la présence de la phase dispersée (cas de la filtration de l'air ou de l'eau), soit vers la valorisation de la phase dispersée (par exemple, l'extraction d'un précipité cristallin ou la collecte de particules métalliques fines contenues dans une fumée). [26, 28]



***CHAPITRE III : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA SEPARATION PHYSICO-CHIMIQUE ET SYNTHÈSE DE DIFFÉRENTS TRAVAUX ANTERIEUR SUR LA FLOTTATION DE LA SPHALERITE***

L'année 2005 marque le 100<sup>e</sup> anniversaire de la flottation depuis sa première introduction commerciale à Broken Hill en 1905. La flottation est maintenant la méthode de traitement des minéraux la plus utilisée pour séparer les roches dures du charbon. La flottation est un procédé de séparation nécessaire pour traiter des minerais complexes ou à faible teneur où la taille moyenne des particules à libérer est trop faible pour permettre une séparation efficace par gravité, ou lorsque la différence de gravité entre les minéraux est trop faible. La flottation se base sur la différence des propriétés superficielles (hydrophobe et hydrophile) du minéral constituant le minerai. On observe un équilibre entre les tensions interfaciales solide-gaz, solide-liquide, liquide-gaz et solide-liquide-gaz lorsque les trois phases solide, liquide et gazeuse sont en contact. [31] La flottation, initialement développée pour le traitement des minéraux sulfurés tels que le cuivre, le plomb et le zinc, a progressivement été étendue à d'autres minerais sulfurés, notamment ceux de nickel, de platine et d'or. Son champ d'application s'est également élargi aux minéraux non sulfurés, incluant les oxydes (hématite, cassitérite), les minéraux non métalliques (fluorine, talc, phosphates, potasse) ainsi que les ressources énergétiques comme les combustibles, le charbon fin et le bitume. Par ailleurs, cette technique connaît aujourd'hui des applications au-delà du secteur minier, notamment dans l'élimination des huiles présentés dans les effluents des raffineries pétrolières. [32]

### **1. Définition et principe de flottation**

La flottation est une méthode de séparation qui exploite les différences naturelles et induites dans les caractéristiques de surface des minéraux, que la surface soit facile à mouiller par l'eau, c'est-à-dire hydrophile, ou qu'elle soit repoussée l'eau, c'est-à-dire hydrophobe. L'ensemble du système est complexe, comprenant trois phases (solides, eau et air) et l'interaction de variables chimiques et physiques interagissant. La transition entre les états hydrophile et hydrophobe est contrôlée par les variables chimiques. Ces variables physiques incluent celles qui découlent des caractéristiques du minerai, comme la taille et la composition des particules (libération), et les facteurs dérivés de la machine, comme le taux d'air et la taille des bulles. La flottation de minerai à partir de la pulpe est un processus qui implique trois mécanismes :

- Fixation sélective aux bulles d'air ;
- Entraînement dans l'eau qui traverse la mousse ;
- Le renforcement physique des particules de la mousse qui sont fixées aux bulles d'air.

L'attachement des minéraux de valeur aux bulles d'air est le mécanisme le plus important et représente la majorité des particules qui sont récupérées dans le concentré. Bien que la véritable flottation soit le mécanisme dominant pour la récupération des minéraux de valeur, l'efficacité de la séparation (SE) entre le minéral de valeur et la gangue dépend également du degré d'entraînement et de piégeage physique. Contrairement à la véritable flottation, qui est sélective par rapport aux propriétés de surface du minéral, l'entraînement et le piégeage permettent de récupérer à la fois la gangue et les minéraux de valeur. Le drainage de ces minéraux se produit dans la phase de mousse et le contrôle de la stabilité de cette phase est important pour obtenir une séparation adéquate. Dans la pratique industrielle, l'entraînement de la gangue indésirable peut être courant et, par conséquent, une seule étape de flottation n'est pas courante. Souvent, plusieurs étapes de flottation (pour former des circuits) sont nécessaires pour atteindre une qualité économiquement acceptable de minéraux de valeur dans le produit final. La durée de vie des bulles dans de l'eau pure, d'environ un centième de seconde, rend indispensable l'emploi de moussants. Ces réactifs sont constitués de molécules hétéropolaires dont la chaîne hydrocarbonée se dirige vers l'air, tandis que le groupe polaire, idéalement non ionisable pour un contrôle optimal de la flottation, interagit avec le dipôle de l'eau. Au-delà de leur rôle dans la formation de la mousse résultant de la diminution de la tension interfaciale eau-air, les moussants influencent également la répartition des bulles dans la pulpe ainsi que leur vitesse de montée. Contrairement aux collecteurs, la flottabilité d'un minéral donné ne peut être aisément associée à un type de moussant spécifique. [32]

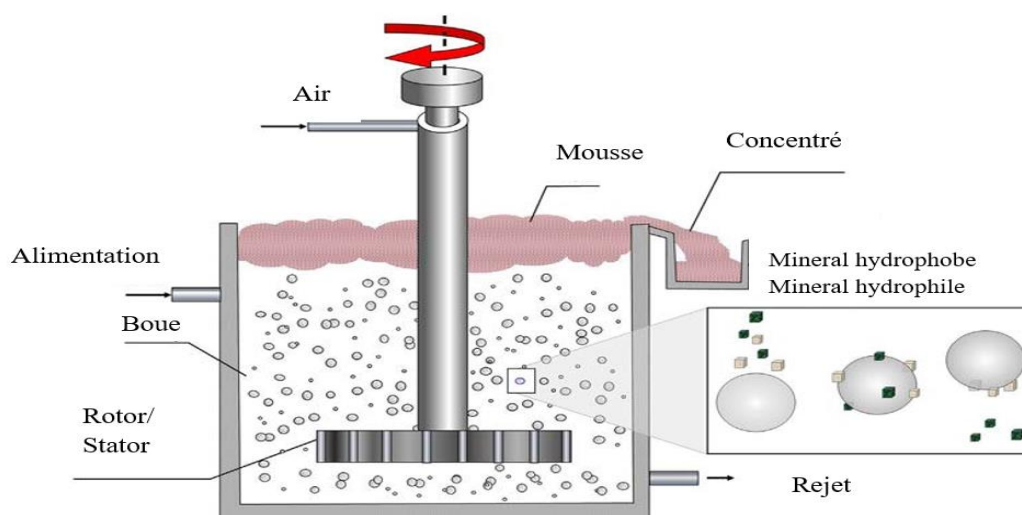
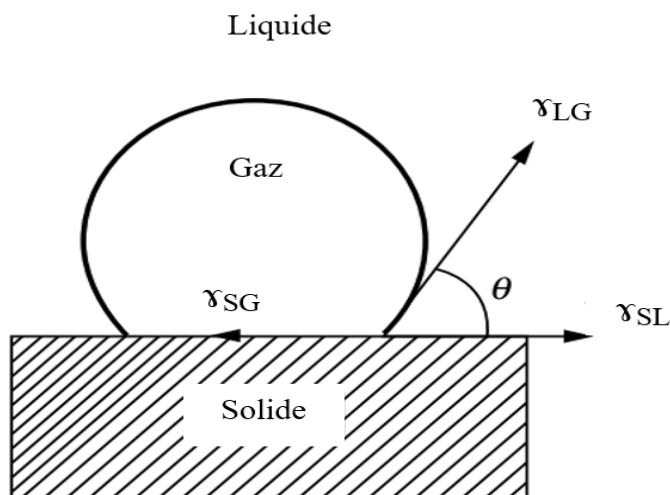


Figure 21. Principe de flottation [32]



**Figure 22.** Angle de contact pour un système solide-liquide-gaz [17]

Avec :  $\gamma_{SG}$  : tension superficielle solide-gaz ;

$\gamma_{LG}$  : tension superficielle liquide-gaz ;

$\gamma_{SL}$  : tension superficielle solide-liquide.

## 2. Différent type de flottation

### 2.1. Flottation à l'air induit (FAI)

Ce procédé est principalement employé en minéralurgie, mais peu fréquemment dans le traitement des eaux, à l'exception du secteur pétrolier et des traitements primaires d'eaux résiduelles. La dispersion d'air en bulles peut être effectuée de différentes manières :

- Agitation mécanique : consiste à introduire l'air dans la cellule sous le rotor d'une turbine grâce à une conduite. Une agitation turbulente intense peut engendrer la formation de bulles de 0,2 à 2 mm de diamètre. L'ascension a une vitesse d'environ 200 mm/s.
- Distributeurs poreux : Les diffuseurs poreux permettent l'introduction de l'air en passant par des orifices, tels que des membranes souples percées ou des matériaux céramiques poreux. Les bulles formées sont assez volumineuses, avec une taille de 2 à 4 mm.

### 2.2. Micro-flottation

Ce procédé, comme son nom l'indique, s'appuie sur la création de petites bulles pour accroître la concentration en bulles et maintenir une vitesse ascensionnelle faible des bulles d'air. Selon Gregory et Zabel 1990, le taux de séparation est le plus élevé dans cette situation. Dans ce genre de flottation, il est possible de générer des fines bulles d'air en utilisant les techniques suivantes :

- Flottation à l'air dissous : le diamètre des microbulles ( $d_p = 40$  à  $80$ )  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire 100 fois inférieur à celui obtenu en FAI, est obtenu en détenant une solution enrichie en air dissous sous une pression de quelques bars. Le système de flottation à air dissous peut être utilisé à une vitesse élevée en surface.
- Electroflottation : La flottation est une méthode basée sur l'électrolyse d'eau. Les fines bulles d'hydrogène et d'oxygène ( $d_p = 10$  à  $40$ )  $\mu\text{m}$  sont produites au niveau des électrodes en cuivre.
- Flottation chimique : On utilise fréquemment ce type de flottation pour le traitement des eaux usées. Les bulles peuvent être produites par fermentation des matières organiques ou acidification d'une solution de carbonates (ou de bicarbonates) en fonction de la nature de l'effluent. [33]

### 3. Critères d'évaluation des résultats de flottation

La performance d'une opération de flottation est caractérisée par plusieurs paramètres clés, incluant le rendement de récupération du métal, le rendement pondéral du concentré, la teneur en métal du concentré et la vitesse de flottation.

#### A. Rendement de récupération du métal

Le rendement de récupération du métal représente la fraction de métal présent dans le concentré par rapport à la quantité totale de métal contenue dans l'alimentation. L'optimisation de ce paramètre est cruciale afin de minimiser les pertes métalliques dans les rejets. Le rendement de récupération  $\eta$  du métal est donné par :

$$\epsilon = \frac{C \times c}{A \times a} \times 100 \quad (\%)$$

Avec :

a : Teneur du métal dans l'alimentation ;

A : Masse du minerai à flotter ;

c : Teneur du métal dans le concentré ;

C : Masse du concentré.

#### B. Rendement pondéral du concentré

Il s'agit du rapport entre le poids du concentré et le poids de l'alimentation en pourcentage. Afin d'assurer une flottation efficace, il est essentiel que le rendement pondéral du concentré soit le plus faible possible.

La relation suivante donne le rendement :

$$\gamma = \frac{C}{A} \times 100 \quad \text{ou} \quad \frac{a-r}{c-r} \times 100 \quad (\%)$$

Avec :

$\gamma$  : rendement pondéral du concentré.

### C. Taux de concentration

Il s'agit du rapport entre la concentration de métal dans le concentré et la concentration de métal dans l'alimentation. La flottation se révèle d'autant plus efficace que, finalement, on obtient un concentré avec un taux de concentration de l'élément utile plus élevé.

Le taux de concentration est donné par l'expression :

$$t_c = \frac{c}{a}$$

Avec :

$t_c$  : taux de concentration

## 4. Réactifs de flottation

Les réactifs de flottation jouent un rôle crucial dans le processus de séparation, permettant de récupérer des minéraux précieux à partir de leurs minerais. Ce processus repose sur la capacité des réactifs à modifier les propriétés de surface des particules minérales, favorisant ainsi leur séparation dans une solution aqueuse.

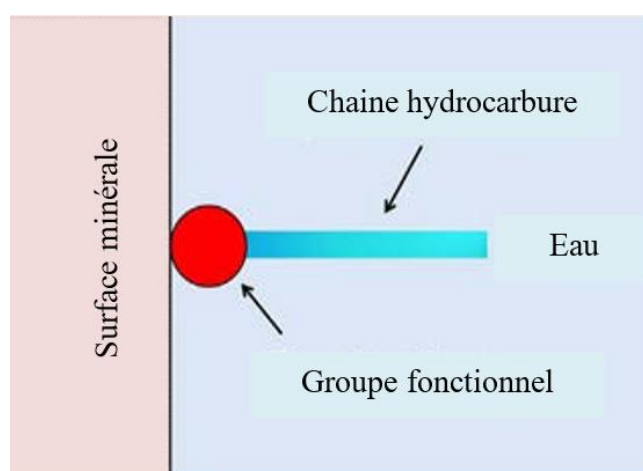
### 4.1. Collecteur

La séparation des minéraux par flottation réussie est basée sur la création sélective d'une hydrophobie sur un minéral souhaité à récupérer à l'aide d'un collecteur, tout en préservant autant que possible l'hydrophobie du minéral contraire. L'hydrophobisation sélective des particules minérales par les collecteurs est essentielle pour la flottation. Les collecteurs sont divisés en deux catégories : les collecteurs conventionnels (classiques) et les collecteurs écologiques. Étant donné que les collecteurs conventionnels présentent des désavantages pratiques en raison de leur manque de sélectivité et de spécificité, de nombreux groupes de recherche ont cherché à améliorer les collecteurs traditionnels et à en créer de nouveaux, appelés collecteurs chélatants. [13]

#### ➤ *Collecteurs conventionnels*

Les collecteurs constituent le groupe le plus important de produits chimiques de traitement des minéraux spéciaux. Selon Urbina (2003), les collecteurs sont des composés tensioactifs qui affectent la mouillabilité des surfaces solides par adsorption à l'interface

solide-liquide. Ces produits chimiques surfactants organiques s'adsorbent sélectivement sur la surface des minéraux précieux, [10] l'adsorption peut être chimique ou physique. Les collecteurs contiennent à la fois un groupe hydrocarboné non polaire et un groupe polaire qui s'adsorbe sur la surface du minéral, laissant le groupe non polaire en contact avec la solution en vrac, ce qui crée un film hydrophobe ce qui facilite la fixation des bulles a la surface mineral. La sélectivité d'un collecteur dépend des groupes fonctionnels et de la longueur de la chaîne. Les collecteurs sont classés en deux types : collecteurs ionisants (qui se dissocient en ions dans l'eau) et collecteurs non ionisants (insolubles dans l'eau). [10, 32]



**Figure 23.** Adsorption d'un collecteur sur une surface minérale [32]

Les collecteurs ionisants peuvent être classés en fonction du type d'ion, anionique ou cationique, ou de leur application principale, minéraux non sulfurés ou minéraux sulfurés. La classification des collecteurs est présentée dans la **figure 24**.

#### ➤ **Collecteurs chélatants**

Plusieurs agents chélatants se sont avérés être des meilleurs collecteurs de flottation et ont été classés comme collecteurs chélatants. Ces réactifs sont donc des composés organiques qui forment des chélates insolubles dans l'eau à la surface du minéral par chélation. Les ions de métaux de transition hydratés forment plus facilement des chélates ou des complexes en raison de la présence d'orbitales vacantes d'une énergie appropriée. Les minéraux de valeur sont généralement des composés d'ions de métaux de transition, tandis que les minéraux de la gangue sont des composés de métaux autres que de transition. Cette différence dans l'interaction métal-ligand rend les collecteurs chélatants plus sélectifs que les collecteurs conventionnels tels que les oléates et les sulfonates. La plus grande sélectivité des agents chélatants a attiré l'attention de plusieurs chercheurs et de nombreux agents chélatants ont été

testés en tant que collecteurs de minéraux. Les agents chélatants sont classés en type O-O, type N-O, type N-N, type S-S, type S-N en fonction des atomes chélatants. [34]

Les réactifs chélatant constituent une classe particulière de réactifs de complexation consistant en de grandes molécules organiques capables de se lier à l'ion métallique par l'intermédiaire de deux groupes fonctionnels ou plus, avec la formation d'un ou de plusieurs anneaux. De tels composés Ces composés annulaires sont appelés chélates.

Les chélates se caractérisent par une grande stabilité remarquable et par la sélectivité et la spécificité de leur réaction de formation. La raison de leur grande stabilité et de leur sélectivité dépend de facteurs électroniques et stériques. En effet, chaque réactif chélatant est caractérisé par la présence d'au moins un groupe capable de donner une paire d'électrons au métal auquel il se lie. Cela conduit à la formation, outre une liaison covalente, d'une liaison dative avec formation d'un anneau. En outre, les groupes chélatants sont souvent insérés dans un anneau aromatique. Ils donnent donc lieu à la formation d'anneaux de quatre à six membres, qui sont très stables. [35]

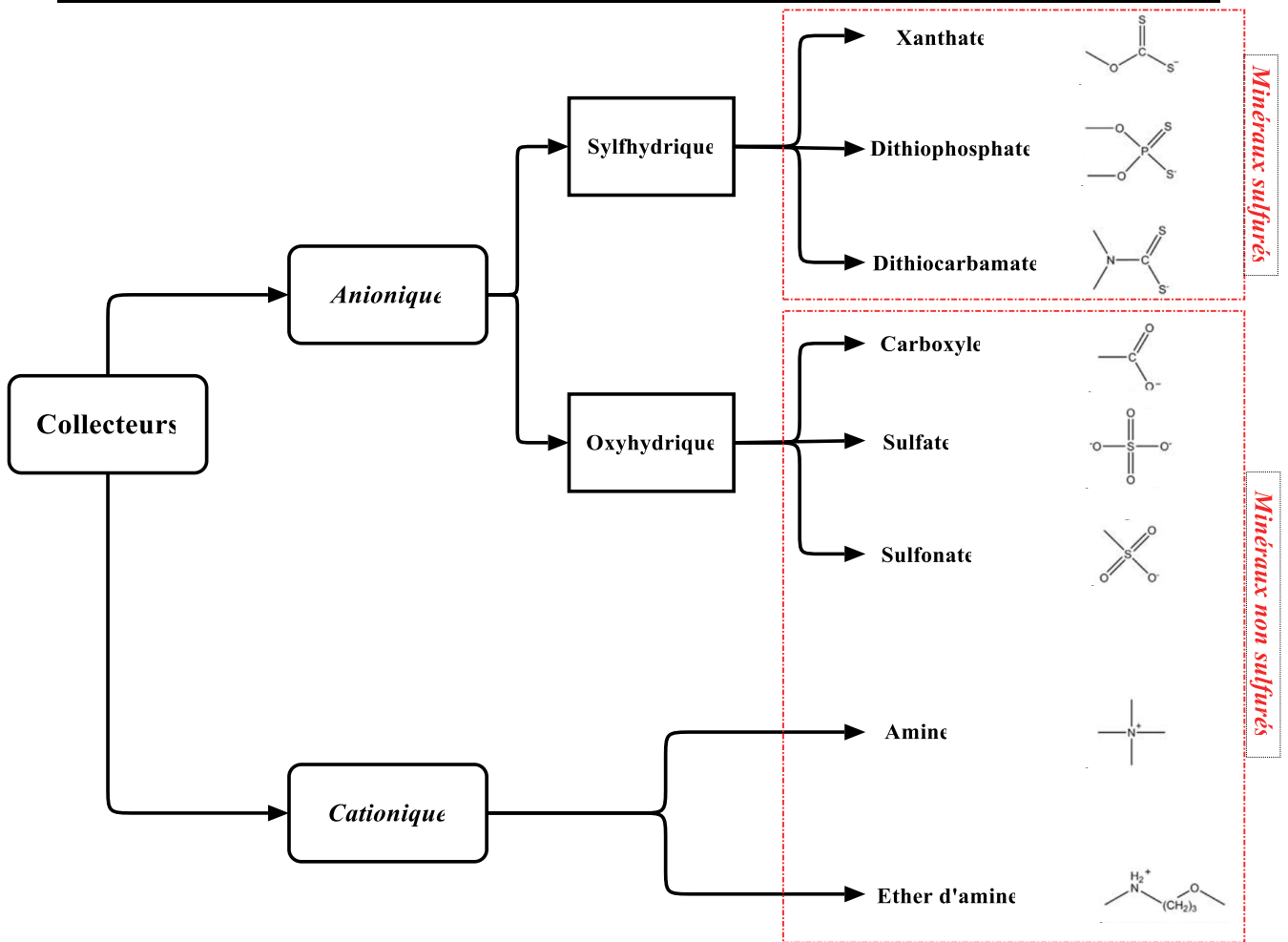
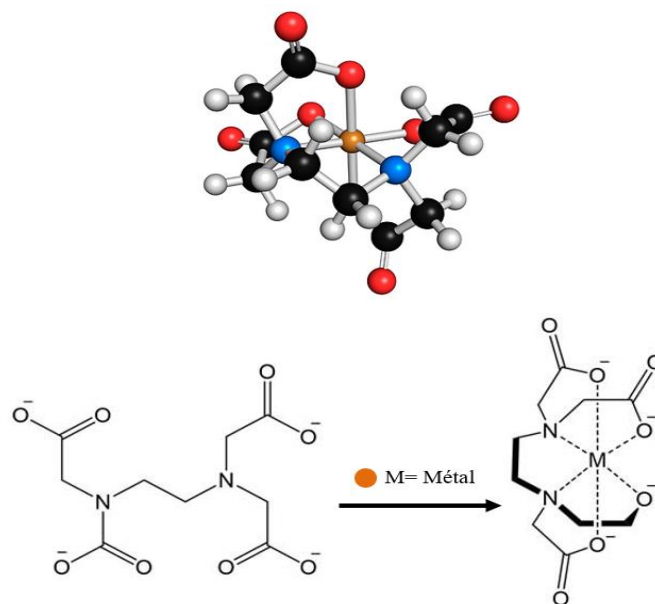


Figure 24. Classification des collecteurs ionisants



Figure 25. Chélation des ions métalliques [35]



**Figure 26.** Interaction entre un réactif chélatant et un métal M-Chélate [35]

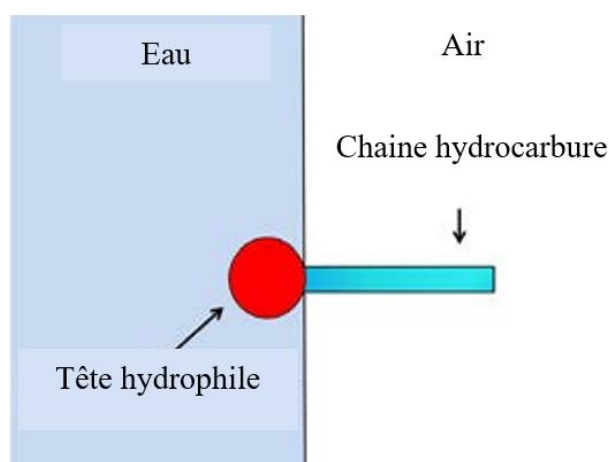
Les réactifs chélatants ont été introduits comme collecteurs de flottation par des chercheurs italiens du CNR en 1971. Ces études ont démontré la possibilité de flotter divers minéraux en utilisant un système collecteur constitué d'un agent chélatant qui se lie sélectivement à un cation à la surface du minéral et d'un hydrocarbure qui rend la phase chimia désorbée hydrophobe. Dans ces systèmes, le réactif chélatant interagit avec le cation de la surface minérale pour former un chélate métallique insoluble, auquel les chaînes hydrocarbonées de l'huile, essentielles pour assurer l'hydrophobie et donc la flottation, s'attachent par adsorption physique. Cependant, bien que la particule chélatée présente une certaine hydrophobie, elle ne l'est pas suffisamment pour garantir la flottation, car presque tous les réactifs chélatants disponibles manquent de longues chaînes d'hydrocarbures. Il est donc nécessaire de synthétiser de nouveaux réactifs chélatants qui combinent des groupes chélatants spécifiques pour des cations métalliques particuliers avec de longues chaînes d'hydrocarbures dans une seule molécule. [35]

#### 4.2. Moussant

Les moussants sont des composés tensioactifs hétéropolaires, Ils comprennent un groupe polaire (OH, COOH, C = O, OSO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>(OH)) ainsi qu'un radical hydrocarboné, qui peut s'adsorber dans l'interface entre l'eau et l'air. Les molécules d'agent moussant sont placées à l'interface entre l'air et l'eau de façon à ce que les groupes hydrophiles ou polaires soient dirigés vers la phase aqueuse, tandis que la chaîne hydrocarbonée est orientée vers la phase

d'air, où elle est hydrophobe ou non polaire. [33] Les moussant ont trois fonctions principales dans la flottation :

- Aider à la formation et à la préservation des petites bulles ;
- Réduire la vitesse de montée des bulles ;
- Aider à la formation et la stabilisation de la mousse.



**Figure 27.** Structure générale de la molécule de moussant à l'interface air-eau [32]

Des huiles naturelles telles que l'huile de pin étaient utilisées comme agents moussants, mais leur utilisation a diminué au fil des ans. Certaines propriétés de collecte des huiles naturelles interféraient également avec la sélectivité du procédé. Le fait d'avoir des propriétés de collecte et de moussage dans le même réactif peut rendre la flottation sélective difficile. Les principaux agents moussants commerciaux sont aujourd'hui les alcools et les poly glycols, un troisième type, les paraffines substituées par des alcoxy, par exemple le triéthoxy-butane, étant utilisé dans certains cas. Les alcools moussants ( $C_nH_{2n+1}OH$ ) contiennent généralement un seul groupe hydroxyle (OH) et sont limités à 57 carbones, qu'il s'agisse de chaînes droites ou ramifiées. Les alcools à chaîne plus courte ne sont pas suffisamment actifs en surface et les alcools à chaîne plus longue sont de plus en plus insolubles. Le méthyl-isobutyle-carbinol (MIBC) est un agent moussant couramment utilisé pour les alcools. [32]

#### 4.3 Régulateurs

Également connus sous le nom de régulateurs ou les modificateurs sont utilisés en conjonction avec les collecteurs pour augmenter ou diminuer l'effet hydrophobe sur la surface du minéral, rendant ainsi le collecteur plus sélectif pour les minéraux de valeur souhaités. Les modificateurs des composés chimiques qui régulent la chimie de la solution et le pH ou qui

contrôlent la dispersion ou l'agrégation de particules solides. Il existe trois principaux types de modificateurs : les modificateurs de pH, les activateurs et les déprimants. Bien qu'il existe des distinctions entre chaque type de modificateur, certains modificateurs ajoutés ont des fonctions multiples. Par exemple, la chaux peut être utilisée pour ajuster le pH du système (modificateur de pH) ; cependant, le cation calcium est un déprimant connu de la pyrite dans la flottation du cuivre. Il est donc important de comprendre l'effet que chaque réactif ajouté au système aura afin de maximiser la flottation des minéraux. [31]

➤ **Déprimant**

Les déprimants sont des composés inorganiques qui sont généralement utilisées pour enduire sélectivement les surfaces afin de les rendre plus hydrophiles et de réduire leur affinité envers les collecteurs. L'utilisation des déprimants permet d'améliorer la sélectivité de la flottation en prévenant la flottation des particules indésirables. L'activité des déprimants varie en fonction du pH de la pulpe.

➤ **Activant**

Les activateurs sont des réactifs qui modifient la nature chimique des surfaces minérales afin qu'elles deviennent hydrophobes sous l'action du collecteur. Ils sont généralement des sels solubles qui s'ionisent en solution ; les ions réagissent ensuite avec la surface minérale. [32]

➤ **Régulateur de pH**

Le pH de la pulpe est pratiquement une variable cruciale à prendre en considération et à surveiller. Effectivement, il convient de noter que la sélectivité et l'efficacité d'une séparation par flottation sont fortement influencées par le pH de la pulpe, car les divers agents chimiques (collecteurs, moussants, etc.) ont une efficacité différente en fonction du pH. Il est donc essentiel d'assurer l'utilisation des réactifs chimiques appropriés à des concentrations appropriées, tout en veillant à ce que le pH soit régulé afin d'assurer une performance optimale du procédé de flottation. En réalité, l'équilibre entre les concentrations des divers réactifs chimiques et le pH est extrêmement fragile. Fréquemment, la flottation est effectuée dans un milieu basique car la majorité des environnements. En réalité, l'équilibre entre les concentrations des divers réactifs chimiques et le pH est extrêmement fragile. La flottation est généralement effectuée dans un milieu basique, car la majorité des collecteurs sont stables dans ces climats. Par ailleurs, cela réduit au minimum la corrosion des équipements. On utilise principalement la chaux hydratée, le carbonate de sodium et, dans une moindre mesure, l'hydroxyde de sodium pour réguler le pH. [33]

## 5. Réactifs de flottation classique du minerai de sphalérite

Généralement dans la flottation de la sphalérite (ZnS), principal minerai de zinc, divers réactifs de flottation sont utilisés pour améliorer l'efficacité du processus. Les collecteurs, tels que les xanthates, sont primordiaux car ils modifient la surface de la sphalérite, la rendant hydrophobe et facilitant ainsi son adhérence aux bulles d'air. Les moussants, comme l'huile de pin, créent une mousse stable qui permet de flotter les particules hydrophobes. Les modificateurs de pH, tels que la chaux, sont utilisés pour maintenir un pH optimal, améliorant la sélectivité des collecteurs. Tandis que des activants, comme le sulfate de cuivre, peuvent être ajoutés pour améliorer la flottabilité des particules de sphalérite.

### ➤ *Mécanisme d'action de xanthate*

Xanthate ( $\text{RO}(\text{CS})\text{S}^-\text{M}^+$ ), où R est un groupe d'hydrocarbures contenant un à six atomes de carbone, sont connus comme collecteurs universels pour les minerais de sulfures de métaux communs. Les xanthates sont préparés en faisant réagir un alcool, un hydroxyde alcalin et du disulfure de carbone. Les versions les plus utilisées sont les chaînes d'hydrocarbures éthyle, isopropyle, isobutyle, amyle ou hexyle. Ils sont généralement vendus dans le commerce sous forme de solutions, mais aussi de poudres ou de granulés, les granulés étant les plus courants car ils permettent d'éviter les problèmes de poussière (la poussière de xanthate est toxique et irritante) et d'améliorer la stabilité du stockage. Classés parmi les collecteurs thiols appartenant au type de collecteurs anioniques, ce sont les collecteurs les plus utilisés dans l'industrie du traitement des minerais. Les xanthates s'oxydent facilement et ont une courte durée de vie au stockage, car après plusieurs semaines, ils développent une forte odeur (gaz de sulfure d'hydrogène) et une couleur plus foncée en raison de la formation de dixanthogène. Cette décomposition peut être inhibée dans une certaine mesure en utilisant les xanthates dans un milieu alcalin. [36]

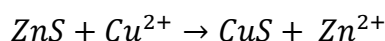
Les xanthates sont classés parmi les agents de type S-S par Nagaraj en 1987. Ils s'adsorbent sur les surfaces minérales sulfurées en raison des forces chimiques, formant des xanthates métalliques insolubles qui sont très hydrophobes. Cependant, les complexes de xanthates formés avec le zinc sont plus solubles et moins stables que ceux formés avec le cuivre, le plomb, l'argent et le mercure. Le mécanisme d'action des xanthates a été généralement reconnu comme relevant de l'une des trois théories suivantes :

- 1) Adsorption (chimisorption multicouche) ;
- 2) Échange d'ions ;
- 3) Adsorption de molécules neutres.

Les complexes instables formés avec les xanthates, par exemple le xanthate de zinc, nécessitent des activatants pour améliorer l'adsorption du collecteur sur la surface minérale. L'ion cuivrique ( $\text{Cu}^{2+}$ ), sous la forme d'un sulfate ou d'un nitrate, est un activant de l'adsorption du collecteur sur la surface minérale. Sulfate ou nitrate, est l'activant le plus utilisé. [37]

➤ *Mécanisme d'action du sulfate de cuivre*

Ces réactifs modifient la nature chimique des surfaces minérales afin qu'elles deviennent hydrophobes sous l'action du collecteur. Les activants sont généralement des sels solubles qui s'ionisent en solution, les ions réagissant ensuite avec la surface minérale. Le sulfate de cuivre est l'activant le plus connu pour la flottation classique de la sphalérite. Ce dernier n'est pas flotté de manière satisfaisante par le collecteur de xanthate, car les produits de collecte formés, tels que le xanthate de zinc, sont relativement solubles dans l'eau et ne forment donc pas de film hydrophobe autour du minéral. La flottabilité peut être améliorée par l'utilisation de grandes quantités de xanthates à longue chaîne, mais une méthode plus satisfaisante consiste à utiliser le sulfate de cuivre comme activateur, qui est facilement soluble et se dissocie en ions cuivre en solution. L'activation est due à la formation de molécules de sulfure de cuivre à la surface du minéral, car le cuivre est plus électronégatif que le zinc et s'ionise donc moins facilement :



Le sulfure de cuivre déposé à la surface de la sphalérite réagit facilement avec le xanthate pour former du xanthate de cuivre insoluble, ce qui rend la surface de la sphalérite hydrophobe. [38]

## 5. Synthèse des travaux antérieurs sur la flottation de sphalérite

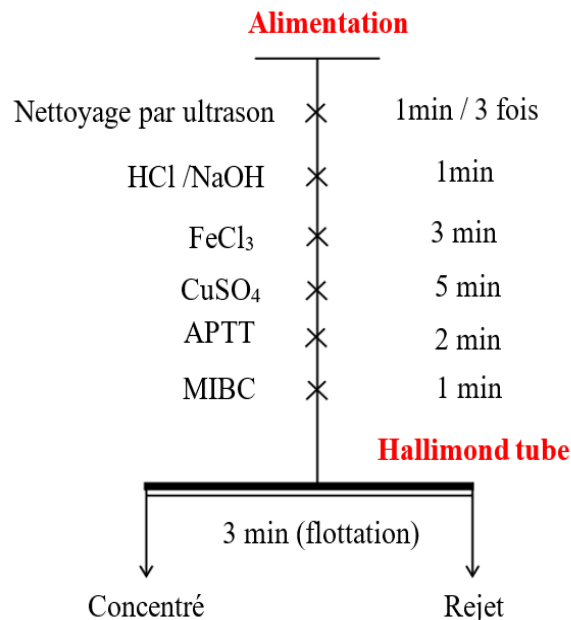
La sphalérite ( $\text{ZnS}$ ) est la principale source minérale de zinc, elle est toujours associée avec d'autres minéraux sulfurés tels que la pyrite, la galène, la chalcopyrite...l'approche de séparation la plus adéquate pour ce minerai est la flottation. Plusieurs travaux ont été consacrés dans le cadre d'étude sur le traitement de la sphalérite, en particulier, les études relatives à la flottation en utilisant différents réactifs.

Dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité du collecteur, Zhang et al, ont développé un nouveau système des réactifs ( $\text{FeCl}_3\text{-CuSO}_4\text{-APTT}$ ) pour remplacer la technologie commune ( $\text{CaO-CuSO}_4\text{-xanthate}$ ) pendant la flottation de la sphalérite. Le minerai traité est un mélange de la sphalérite ( $\text{ZnS}$ ) et la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) d'une granulométrie de  $[\text{+38 -75}] \mu\text{m}$ ; les tests de micro-flottation ont été effectués dans le tube de Hallimond selon la procédure

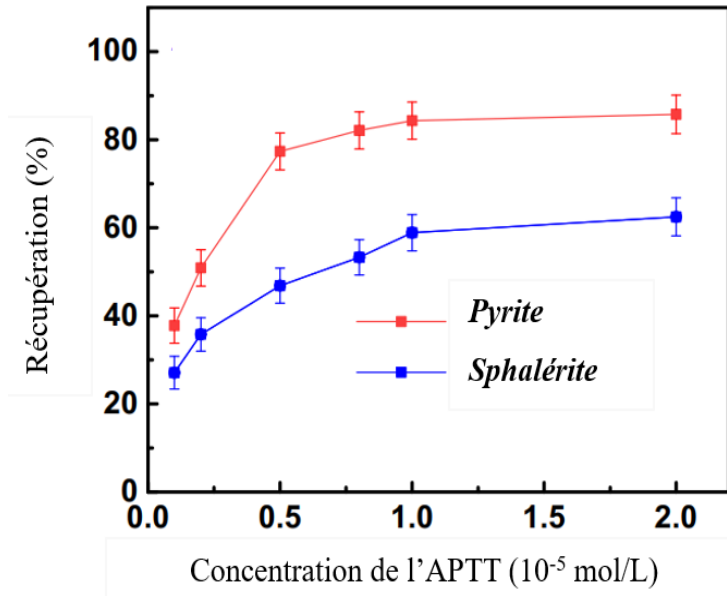
montrés dans la **figure 28**, en utilisant l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'acide chlorhydrique (HCl) comme régulateurs de pH ;le APTT (4-amino-5-pentyl-1, 2,4-triazole-3-thione)et le méthyle isobutyle carbonyle (MIBC) comme collecteur et moussant respectivement, ainsi que le sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) et le chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ) sont utilisés respectivement pour l'activation de la sphalérite et la dépression de la pyrite. [39]

D'après les résultats obtenus et présenté dans la **figure 29**, il a été constaté qu'à la présence du collecteur APTT, la flottabilité de la pyrite était meilleure que celle de la sphalérite à un pH d'environ 6 sans l'ajout d'activant.

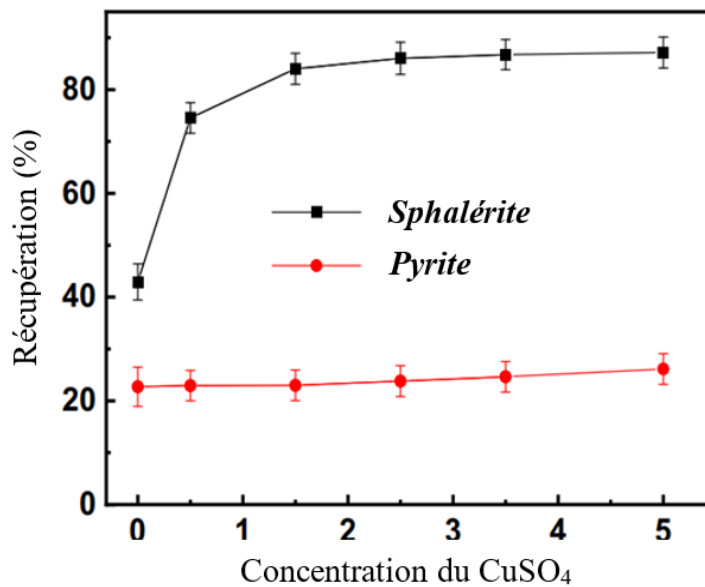
En revanche ; les résultats de la **figure 30** indiquent que la récupération de la sphalérite a augmenté dans la présence de l'activant ( $\text{CuSO}_4$ ). Ainsi, en utilisant le chlorure ferrique comme déprimant de la pyrite, l'APTT pourrait réaliser leur séparation efficace dans un milieu faiblement acide de pH 4.3.



**Figure 28.** Le schéma des essais de micro-flottation [39]



**Figure 29.** Récupération de la sphalérite et de la pyrite en fonction du dosage du APTT (pH = 6) [39]



**Figure 30.** Récupération de la sphalérite et de la pyrite en fonction de la concentration de  $\text{CuSO}_4$  (pH 4.3) [39]

Afin d'assurer une meilleure flottabilité de la sphalérite avec une teneur en zinc élevée et une récupération maximale, dans leurs travaux de recherche, Wei et al se sont basés sur l'étude de l'effet d'une combinaison des réactif déprimant CaO et NaHA sur la séparation de sphalérite/pyrite au moyen de micro flottation dont la procédure est indiquée dans la **figure 31**. Le produit sphalérite/pyrite utilisé est le résidu de la flottation sélective de la chalcopryrite du minerai de la mine d'étain de Malipo, en Chine.

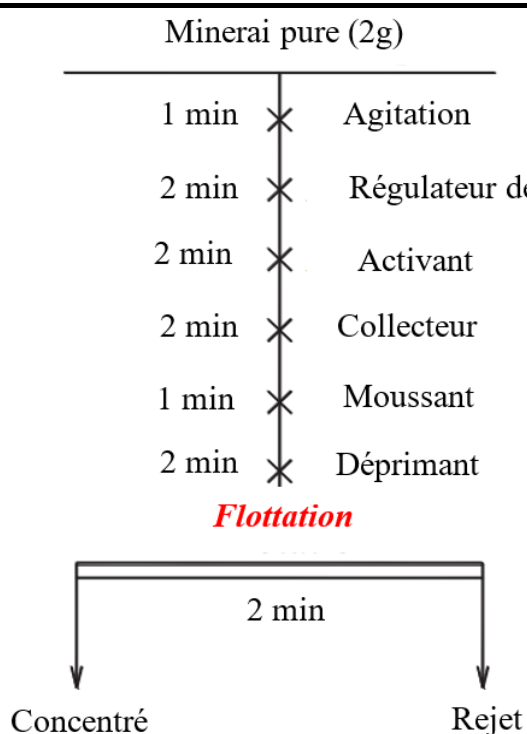


Figure 31. Le schéma des essais de micro-flottation [3]

Des meilleurs résultats ont été obtenus et illustré dans le **tableau 7** lors d'utilisation de la combinaison CaO/NaHA , cela indique que les déprimants mixtes CaO et NaHA agissaient mieux que les déprimants uniques CaO ou NaHA, et les meilleurs résultats ont été obtenus par l'addition de 820 g/t CaO et 30 g/t NaHA dans un milieu de pH 11.5, avec une teneur en Zn de 46.01 % et une récupération opérationnelle de Zn de 90.11 %.

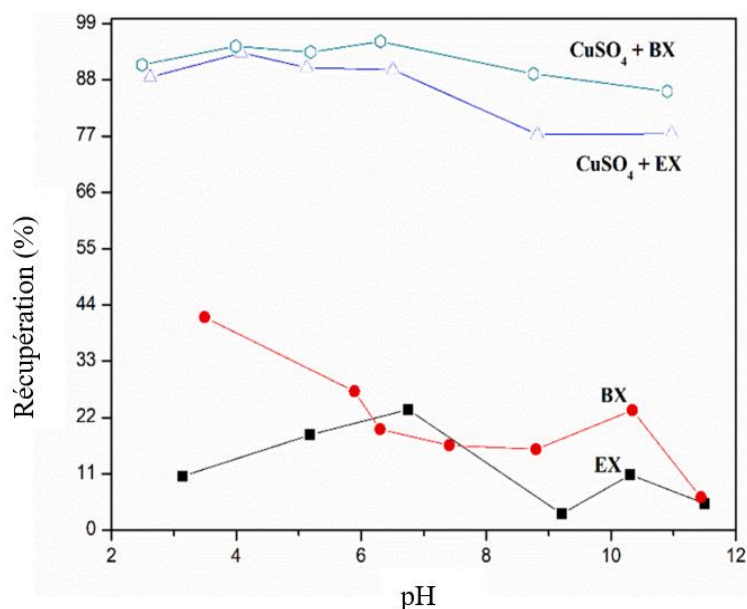
Tableau 7. Résultats des essais de la séparation par flottation sphalérite/pyrite [3]

| Déprimant<br>(g/t)           | Produit   | Teneur en Zn<br>(%) | Récupération<br>(%) |
|------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|
| <b>CaO /NaHA</b><br>(830+30) | Concentré | 46. 01              | 90.11               |
|                              | Rejet     | 3.01                | 9.89                |
| <b>CaO</b><br>(850)          | Concentré | 24.33               | 93.28               |
|                              | Rejet     | 4.78                | 6.72                |
| <b>NaHA</b><br>(850)         | Concentré | 23.51               | 92.46               |
|                              | Rejet     | 5.74                | 7.54                |

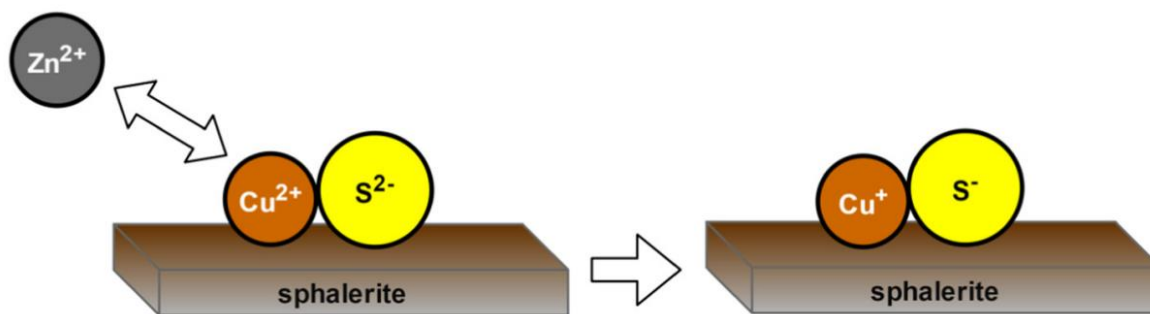
Les résultats de différents analyses (FT-IR, XPS...) du concentré obtenu, ont montré que l'addition d'espèces de calcium, principalement sous forme de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Ca}(\text{OH})^+$  a favorisé l'adsorption de NaHA sur les surfaces minérales, et la surface de la pyrite a adsorbé beaucoup plus d'espèces de calcium et de NaHA que celle de la sphalérite. L'adsorption chimique du

NaHA sur la pyrite s'est faite principalement par l'intermédiaire de ses groupes carboxyle et des atomes de  $\text{Ca}^{2+}$  à la surface de la pyrite. Tandis que, l'adsorption du NaHA sur la surface de la sphalérite était relativement faible. Par conséquent, la combinaison de CaO/NaHA pourrait être utilisée comme un déprimant efficace et non toxique pour la pyrite pendant la flottation de la sphalérite. [3]

Entre autres, pour bien assimiler le mécanisme d'adsorption du collecteur xanthate sur la surface de la sphalérite, il a été choisi pour cette raison la surface de la sphalérite type ZnS (110), ayant une surface la plus stable pour cette étude. Dans cette recherche, les chercheurs ont utilisé deux types de xanthate, éthylique (EX) et butylique (BX) comme collecteur pour favoriser l'hydrophobicité de la surface en l'absence et en la présence de l'activant  $\text{CuSO}_4$ . Les résultats obtenus sont illustrés dans la *figure 32*. Ils montrent que la récupération de la sphalérite est très faible dans les conditions de EX ou BX comme collecteur et dans l'absence de l'activant  $\text{CuSO}_4$ . Par contre, cette dernière est légèrement supérieure mieux lors de l'utilisation de BX qu'EX dans le cas d'une activation préalable par le sulfate de cuivre. Chen et al explique ces résultats par l'encombrement stérique influant sur l'interaction entre la surface de ZnS et le xanthate, grâce à l'activation par le  $\text{Cu}^{2+}$  qui remplace le  $\text{Zn}^{2+}$  lors du mécanisme d'adsorption comme montre la figure.33. Cette substitution permet de diminuer la barrière énergétique causée par l'effet d'encombrement stérique, ce qui est favorable à l'adsorption du xanthate éthylique. [1]



**Figure 32.** Récupération par flottation de ZnS à différents pH en présence et en l'absence de  $\text{CuSO}_4$  en utilisant le (EX) ou le (BX) [1]



**Figure 33.** Schéma illustratif de l'adsorption de Cu sur la surface de la sphalérite [1]

L'adsorption du collecteur xanthate d'amyle (AX) sur la surface de la sphalérite et de la pyrite activés par le sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) a été étudiée par Ejtemaei et Nguyen. Une nouvelle technique du drainage du film liquide et de l'interaction de contact bulle-surface a été adoptée pour mieux étudier le taux d'adsorption du collecteur xanthate d'amyle sur les deux surfaces utilisant le HSVM (vidéo microscopie à haute vitesse). Les produits utilisés durant ces recherches sont la sphalérite et la pyrite en vrac et mélangé ; les résultats obtenus montrent que la sphalérite activée par le Cu avec de le xanthate d'amyle a augmenté le drainage rate de manière significative, mais il n'y a pas eu d'effet notable sur le taux de drainage maximale de la pyrite. La raison pourrait être due à la couverture complète de la surface de la sphalérite avec une couche de type CuS qui a conduit à la formation de Cu-xanthate sur la blende, tandis que la formation d'une couche de type  $\text{CuFeS}_2$  sur la pyrite activée par le Cu a conduit à la formation d'une petite quantité de Cu-xanthate : suggérant ainsi que le produit hydrophobe dominant sur la surface de la pyrite était le dixanthogène.

Des études du taux de drainage in situ sur la sphalérite-pyrite combiné utilisant le xanthate d'amyle et  $\text{CuSO}_4$  comme collecteur et activant respectivement. D'après les résultats ; on conclure que le xanthate d'amyle serait plus sélectif sur la sphalérite activée. Cependant, une certaine quantité du xanthate d'amyle serait consommée par des sites activés ou non activés sur la pyrite sous forme de dixanthogène principal ou d'espèces partiellement Cu- et Fe-xanthate. [40]

Un nouveau système des réactifs a été utilisé pour améliorer la séparation de la sphalérite /pyrite. Shen et all ; ont basés sur la flottation d'un mélange sphalérite/pyrite en utilisant l'acide nitrique ou l'hydroxyde de potassium comme régulateurs de pH ; L'Ethyl xanthate de potassium (KEX) et sulfite de sodium comme collecteur et déprimant respectivement.

Le sulfite de sodium a été utilisé pour améliorer la dépression de la pyrite lors de la flottation de la sphalérite/pyrite activé par le Cu dans un milieu légèrement alcalin. D'après

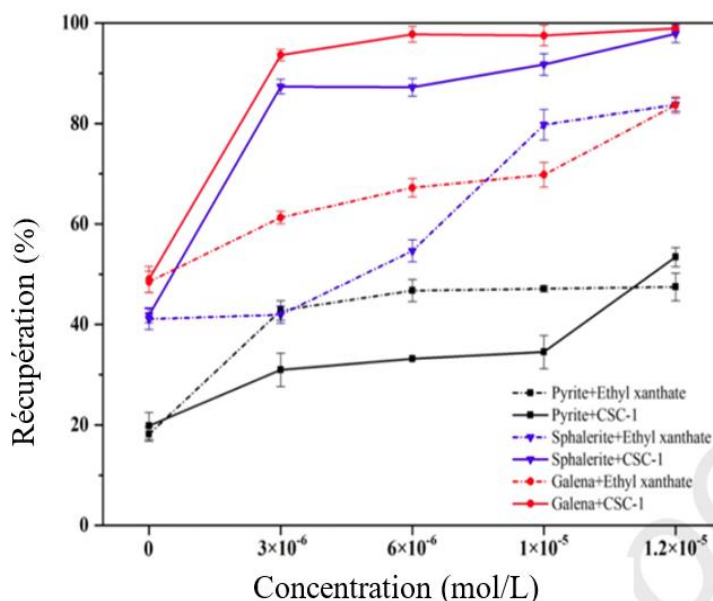
les résultats ; une meilleure séparation de la sphalérite et de la pyrite peut être obtenue à un pH de 8,5 avec l'utilisation de sulfite de sodium. Cette séparation peut encore être améliorée par un conditionnement à l'oxygène et par l'ajout de xanthate immédiatement après l'ajout de sulfite de sodium. Les spectroscopiques UV-visible, infrarouge et Spectrométrie photoélectronique X (XPS) ont montré que la dépression de la pyrite avec le sulfite de sodium est le résultat d'une oxydation élevée sur la surface. Principalement sous forme d'hydroxyde de cuivre qui empêche l'adsorption du collecteur. [7]

Le schéma des réactifs Xanthate/Sulfate de cuivre est largement utilisé dans la flottation de la sphalérite. A cause de la nocivité de l'activant  $\text{CuSO}_4$ , sa propriété chimique corrosive et son influence sur la durée de vie des équipements ; plusieurs chercheurs ont réalisé la flottation de la sphalérite en utilisant un autre type de collecteur ayant double rôle (collecteur /activant) grâce à ses avantages : Prolongation de la durée de vie des équipements, et des rejets industriels moins toxiques qui peuvent répondre plus facilement à la conformité environnementale. [41]

Afin d'assurer une meilleure flottabilité des minéraux sulfurés  $\text{PbS}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{FeS}_2$  ; Zhang et al., ont développé un nouveau collecteur qui permet la flottation sans activation. La séparation est effectuée au moyen de micro flottation en utilisant un mélange des minéraux (Galène, sphalérite et pyrite) et les réactifs suivants : le 5-(butylthio)-1,3,4-thiadiazole-2-thiol (CSC-1) et le Xanthate d'éthyle (EX) sont des collecteurs, le terpinéol et le  $\text{NaOH}/\text{HCl}$  comme moussants et régulateurs de pH respectivement.

Les résultats des essais de flottation obtenus, ont montré que lors de l'utilisation du xanthate d'éthyle, les récupérations par flottation de trois types de minéraux sont presque impossibles. Cependant, en utilisant CSC-1 comme collecteur, les taux de récupération par flottation de la sphalérite et de la galène sont significativement plus élevés que ceux de la pyrite comme montre la **figure 34**.

Ensuite, les résultats des tests de flottation ont été confirmés par la mesure du potentiel zêta et l'analyse de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) : en utilisant le CSC-1 comme collecteur, l'adsorption sur les surfaces de la sphalérite et de galène est beaucoup plus forte que celle sur les surfaces de pyrite et les mécanismes d'interaction du CSC-1 avec la sphalérite et la galène sont des forces électrostatiques et la chélation par la formation de liaisons de coordination N-Pb-S/N-Zn-S. Pourtant, en utilisant xanthate d'éthyle comme collecteur, l'adsorption sur les surfaces de pyrite, de sphalérite et de galène est faible et similaire. [42]



**Figure 34.** Récupération par flottation de la pyrite, la sphalérite et la galène en fonction de la concentration du collecteur ( $[\text{terpinéol}] = 5 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$ ) [42]

La N-Hydrocinnamoyl-N-phenylhydroxylamine (HCNPHA) a assuré la flottation de la sphalérite sans activation par le sulfate de cuivre. Cependant, la flottation concomitante de minéraux sulfurés (pyrite) et de gangues non sulfurées (silice) a réduit de manière significative la teneur en ZnS du concentré de flottation.

Hamilton et al., ont basé dans leur recherche sur l'étude de la flottabilité de la sphalérite en utilisant la HCNPHA avec et sans l'ajout de  $\text{CuSO}_4$ . Le produit sphalérite/gangue utilisé est le résidu de la flottation sélective de la Plomb-Zinc. Les tests de flottation ont été effectués dans un milieu alcalin de pH 9, en utilisant la HCNPHA et le méthyle isobutyle carbonyle (MIBC) comme collecteur et moussant respectivement, ainsi que le sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) et le carboxynéthylcellulose (CMC) sont utilisés respectivement pour l'activation de la sphalérite et la dépression de la gangue.

L'effet de collecteur HCNPHA avec une variation des dosages ont montré dans la **figure 35**, les auteurs ont été remarqué que la teneur en Zn est restée presque constante (45%) et n'a pas été affectée par la quantité de collecteur ajoutée. Cependant, la récupération de la sphalérite a augmenté avec le dosage du collecteur.

Contrairement aux essais utilisant le  $\text{CuSO}_4$ ; Les résultats présenté dans la **figure 36**, indiquent que 200 g/t de sulfate de cuivre est le dosage minimum requis pour une flottation efficace de la sphalérite à l'aide de l'HCNPHA.

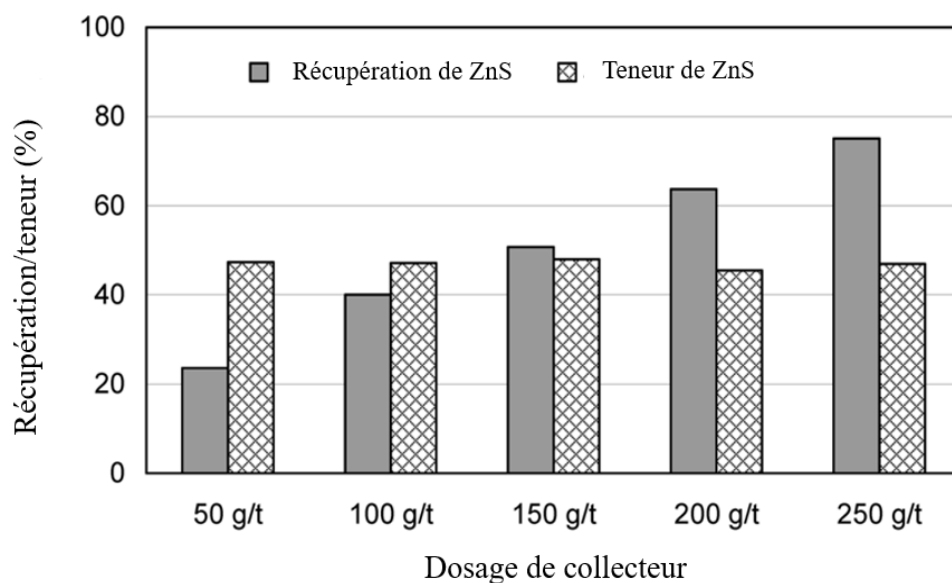


Figure 35. Effet du dosage du collecteur HCNPHA sur la récupération et la teneur en Zn [10]

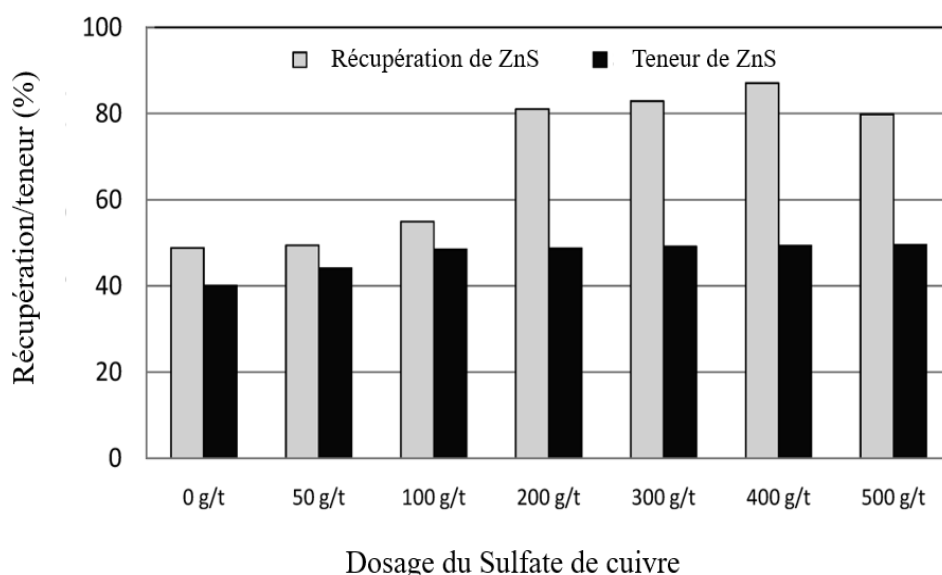
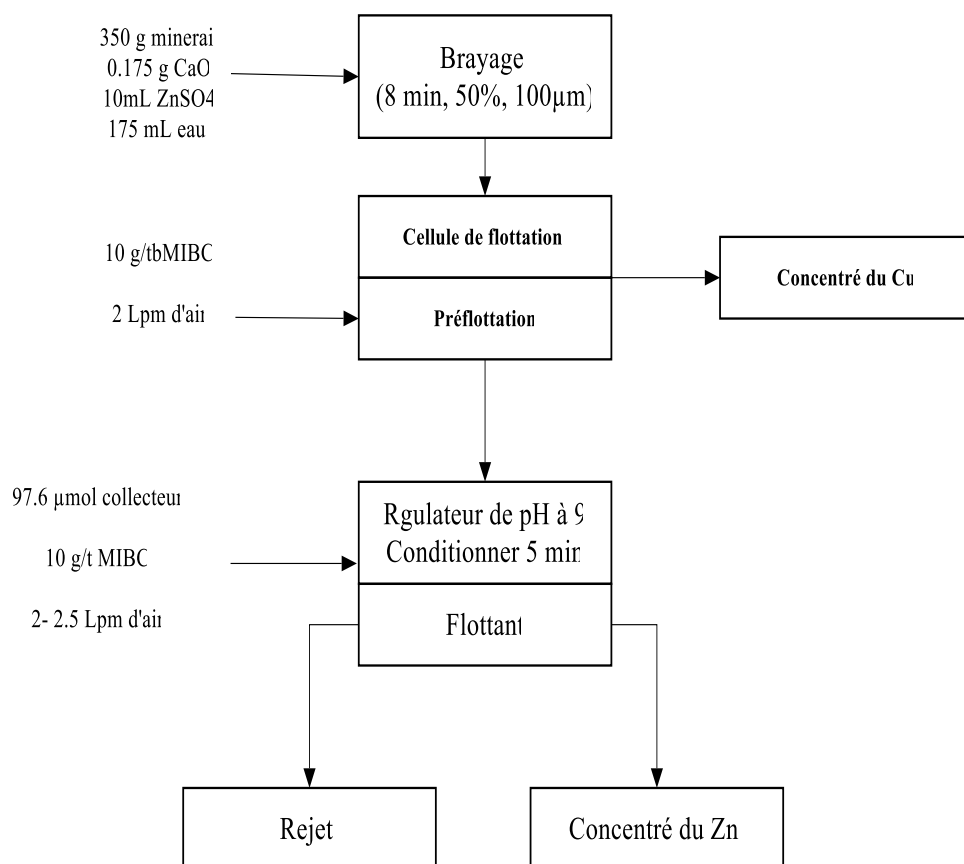


Figure 36. Effet du sulfate de cuivre sur les teneurs des concentrés [10]

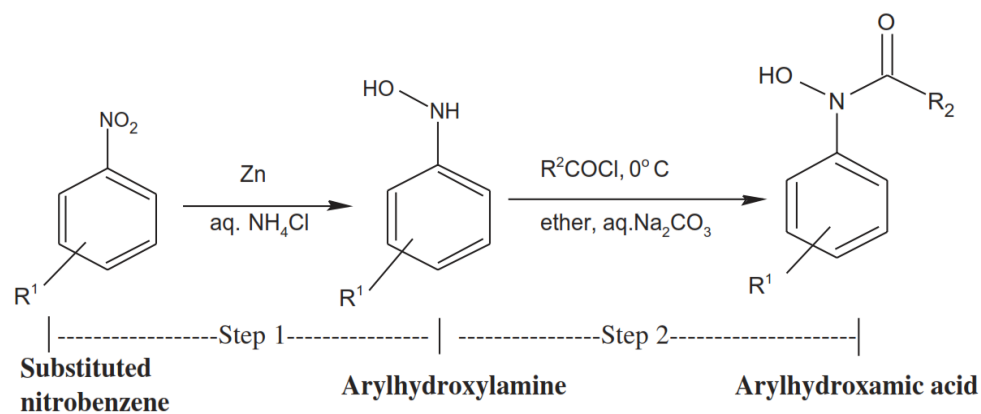
Les espèces de cations de cuivre s'adsorbent chimiquement sur la surface de la sphalérite et facilitent la chélation de surface. Dans le cas des xanthates, le sulfate de cuivre active la sphalérite en formant un complexe de surface plus stable et moins soluble, ce qui ne semble pas être le mécanisme d'activation lors de l'utilisation de l'HCNPHA, car les constantes de stabilité des complexes de cuivre et de zinc des acides hydroxamiques ne diffèrent pas beaucoup. La caractéristique moussante de l'HCNPHA à pH 9 et l'entraînement consécutif de minéraux de gangue dans le flottant ont été considérablement atténués par l'utilisation d'une carboxyméthylcellulose (CMC) modifiée. [10]

L'activation de la sphalérite par le sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) dans la flottation à base de Xanthate est largement utilisée par les usines de traitement dans le monde entier. Natarajan et Nirdosh ont synthétisée selon la procédure illustrée dans la *figure 37*, des collecteurs chélatants de type (N-arylhydroxamic acids) qui faire flotter la sphalérite sans ajout de  $\text{CuSO}_4$ .

Les composés ont été classés en quatre types, à savoir les acides N-aryl-C-alkyle, N-aryl-C aryle, N-aryl-C-aralkyle et les acides dihydroxamiques, en fonction du type de substitution. [12]



*Figure 37.* Procédure expérimentale des tests de flottation [12]



**Figure 38.** Structures des acides N-arylhydroxamiques synthétisés [12]

Cette étude a synthétisé et testé 31 acides N-arylhydroxamiques comme collecteurs pour la flottation de la sphalérite d'un minerai canadien de cuivre-zinc, sans activation préalable au sulfate de cuivre. Les composés ont été classés en quatre types : N-aryl-C-alkyl, N-aryl-C-aryl, N-aryl-C-aralkyl et acides dihydroxamiques. Les résultats ont montré que les acides dihydroxamiques sont de mauvais collecteurs, tandis que l'efficacité de la flottation de la sphalérite augmente dans l'ordre suivant : N-aryl-C-aryl < N-aryl-C-alkyl < N-aryl-C-aralkyl. Le N-hydrocinnamoyl-N-phénylhydroxylamine (HCNPHA) a permis d'obtenir la meilleure récupération de la sphalérite (environ 80 % avec une teneur de 32 %) à une dose de 67 g/t. [12]

### Conclusion

La flottation est une technique complexe et essentielle dans l'industrie minière permettant la séparation et la concentration des minéraux de valeur à partir de leurs gangues. Grâce à l'utilisation judicieuse de divers réactifs chimiques, tels que les collecteurs, moussants, modificateurs de pH, déprimants et activateurs, il est possible d'optimiser les conditions de flottation pour obtenir des résultats supérieurs. La compréhension des mécanismes physico-chimiques à l'œuvre et l'ajustement précis des paramètres opérationnels sont essentiels pour maximiser le rendement et la sélectivité du processus. La flottation continue d'évoluer avec l'intégration de nouvelles technologies et l'approfondissement des connaissances scientifiques, assurant ainsi son rôle primordial dans l'industrie minière et la métallurgie pour les années à venir.

Le choix de notre thème de recherche a été motivé par plusieurs facteurs :

- ✓ **Innovation** : L'utilisation de collecteurs chélatants représente une avancée potentielle dans les techniques de flottation, offrant une alternative plus efficace et durable.
- ✓ **Impact Environnemental** : En réduisant l'utilisation de réactifs chimiques nocifs tel que sulfate de cuivre, nous contribuons à un processus plus respectueux de l'environnement.
- ✓ **Pertinence Industrielle** : L'amélioration des taux de récupération et la qualité du concentré sont des enjeux majeurs pour l'industrie minière, rendant notre recherche pertinente pour les acteurs du secteur.

Finalement, Cette synthèse bibliographique met en lumière l'importance des collecteurs chélatants dans la flottation de la sphalérite. Ces résultats ouvrent la voie à des recherches futures et à l'optimisation des procédés d'extraction du zinc.

## CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE

### A. Caractérisation Du Minerai De Sphalérite De La Mine De Chaabat El Hamra

#### 1. Identification des échantillons

Les échantillons de cette étude proviennent des remblais du gisement de Chaâbet El Hamra, Ils sont prélevés à différents endroits selon un plan d'échantillonnage précis établi en collaboration avec le service géologique de la mine. L'objectif était d'assurer la représentativité des échantillons.

Ce dernier a été soumis à un processus de fragmentation, impliquant des opérations de concassage, l'homogénéisation et le quartage au sein du laboratoire de recherche du département des mines de la Faculté des sciences de la terre de l'Université Badji Mokhtar-Annaba (LAVAMINE). De plus, un tamisage a été effectué au laboratoire de l'École nationale supérieure des mines et métallurgie-Annaba.

#### 2. Caractérisation des échantillons du minerai

Les échantillons ont été soumis à diverses analyses en vue de leur caractérisation. Ces analyses comprennent :

- ❖ L'analyse granulométrique par tamisage ;
- ❖ L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) ;
- ❖ L'analyse pétrographique (lames minces) ;
- ❖ L'analyse de la chimie de surface.

##### 2.1. Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique consiste à diviser un échantillon de minerai en différentes tranches granulométriques. Elle présente une distribution de poids selon une série d'intervalles dimensionnels. [43] Il existe plusieurs méthodes d'analyse granulométrique, et parmi celles-ci, nous avons opté pour la méthode de tamisage dans le cadre de notre étude. [33]

Nous avons exposé notre échantillon de 500 g de minerai de sphalérite (ZnS) à un processus de séchage dans une étuve, à une température de 105 °C, pendant une durée de 6 heures afin d'éliminer toute humidité résiduelle. Le tamisage a été effectué à l'aide d'une tamiseuse électromagnétique, avec une période de 20 minutes.



**Figure 39.** Vue d'un (A) Tamiseuse électromagnétique (B) Etuve  
Laboratoire de l'école nationale supérieure des mines et métallurgie

## 2.2. Analyse pétrographique (lames minces)

Les lames minces, également appelées lames épaisses, sont couramment utilisées dans l'identification des phases minéralogiques présentes dans une roche.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons confectionnée (6) échantillons au sein du laboratoire de géologie de l'université Badji Mokhtar à Annaba.

## 2.3. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction aux rayons X est une méthode classique utilisée pour déterminer les phases minéralogiques présentes dans les matériaux cristallins.

L'analyse de DRX s'effectue par un diffractomètre de type Siemens D8 au laboratoire de centre de recherche PTAPC Biskra CRAPC. L'appareil de diffraction des rayons X fonction en se basant sur le principe de la relation de Wulff-Bragg. [8]

La technique de l'incidence rasante implique la fixation de l'angle d'incidence du faisceau de rayons X à une valeur constante  $\alpha$  par rapport à la surface de l'échantillon. En déplaçant le détecteur le long du cercle goniométrique pour un angle  $2\theta$ , les plans orientés selon l'angle de Bragg par rapport au faisceau incident vont diffuser, et leurs positions peuvent être déterminées par la relation de Bragg suivante. [44]

$$2 d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

- $D_{hkl}$  est la distance inter-réticulaire entre les plans référencés par les indices de Miller (h, k, l)
- $\lambda$  est la longueur d'onde des rayons X.
- $\theta$  l'angle de diffraction et  $n$  l'ordre de diffraction.

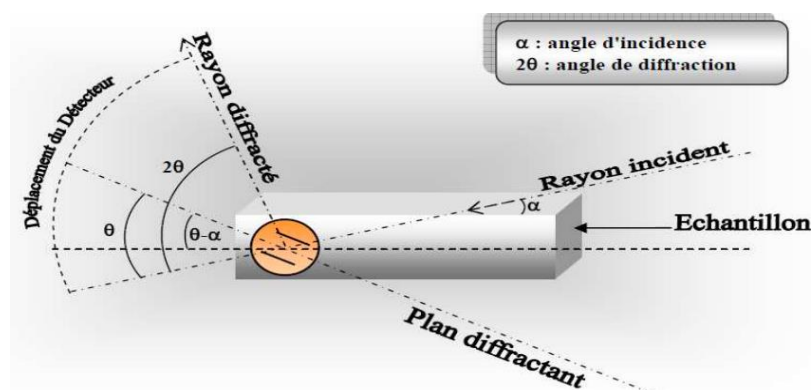


Figure 40. Principe de la diffraction des rayons X [44]

## 2.4. Caractérisation de la chimie de surface

### 2.4.1. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR)

Dans le cadre de nos travaux, l'analyse des phases formées en surface des minéraux a été faite par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

L'analyse par infrarouge repose sur l'interaction entre le rayonnement infrarouge et les niveaux d'énergie vibrationnelle moléculaire. On identifie généralement deux types d'interactions vibrationnelles entre une onde infrarouge et une molécule triatomique : dans la catégorie des vibrations d'élongation (Stretching) : l'élongation symétrique et l'élongation antisymétrique. Dans le domaine de la vibration de déformation, les auteurs mentionnent : la rotation du plan, le cisaillement du plan, le balancement hors plan et la torsion hors plan. [45]

D'après les réponses de la matière réagissant à l'excitation par un rayonnement infrarouge, on définit :

- ✚ La transmission de spectroscopie infrarouge : L'énergie transmise par l'échantillon est transmise par le faisceau infrarouge ;
- ✚ La spectroscopie spéculaire et la spectroscopie totale atténuée : Cette méthode consiste à réfléchir un faisceau infrarouge à plusieurs reprises sur l'échantillon qui est analysé.
- ✚ Spectroscopie à réflexion diffuse infrarouge : Dans cette situation, l'analyse se concentre sur le rayonnement diffus, car le faisceau infrarouge incident est renvoyé dans toutes les directions une fois qu'il a atteint l'échantillon présenté sous forme de poudre.

Les composants principaux d'un spectromètre infrarouge à transformé de Fourier comprennent : le système interférométrique, la source de rayonnement infrarouge, le détecteur et l'échantillon considéré. [46]

Le mode choisi pour la caractérisation des surfaces dans notre étude a été la transmission, l'appareil utilisé dans le cadre de cette thèse est un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) Agilent Cary 630 avec une gamme entre 4000 et 400  $\text{cm}^{-1}$ .

Les résultats sont édités sous forme d'un spectre infrarouge qui se présente généralement avec en abscisse le nombre d'onde  $\nu$  (en  $\text{cm}^{-1}$ ) qui correspond à l'inverse de la longueur d'onde incidente au facteur près pour la correspondance des unités. L'ordonnée correspond à la comparaison de l'intensité du rayonnement émis par l'échantillon avec celui de la référence.

### 3. Résultats et Interprétation

#### 3.1. Analyse granulométrie par tamisage

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont repris dans le **tableau 8** et les **figure 41**, et **figure 42**.

**Tableau 8.** Résultats d'analyse de tamisage du minerai de sphalérite

| Classes granulométriques (mm) | Poids (g) | Rendement (%) | Rendements cumulé (%) |         |
|-------------------------------|-----------|---------------|-----------------------|---------|
|                               |           |               | Refus                 | Passant |
| +2                            | 169.90    | 33.98         | 33.98                 | 100     |
| -2+1                          | 105.10    | 21.02         | 55.00                 | 66.02   |
| -1+0.5                        | 65.10     | 13.02         | 68.02                 | 45.00   |
| -0.5+0.2                      | 51.50     | 10.30         | 78.32                 | 31.98   |
| -0.2+0.125                    | 21.80     | 4.36          | 82.68                 | 21.68   |
| -0.125+0.08                   | 20.00     | 4.00          | 86.68                 | 17.32   |
| -0.08+0.063                   | 13.90     | 2.78          | 89.46                 | 13.32   |
| -0.063                        | 52.70     | 10.54         | 100                   | 10.54   |
| <b>TOTAL</b>                  | 500       | 100           | -                     | -       |

On observe que les deux courbes du passant et refus sont identiques ; Ils se coupent au point  $D_{50}$ . La distribution granulométrique est variable d'une tranche à l'autre, la fraction [+2] affiche le rendement le plus élevé, soit 33,98% ; tandis que la fraction [-0,08 +0] présente un rendement de 13,32%.

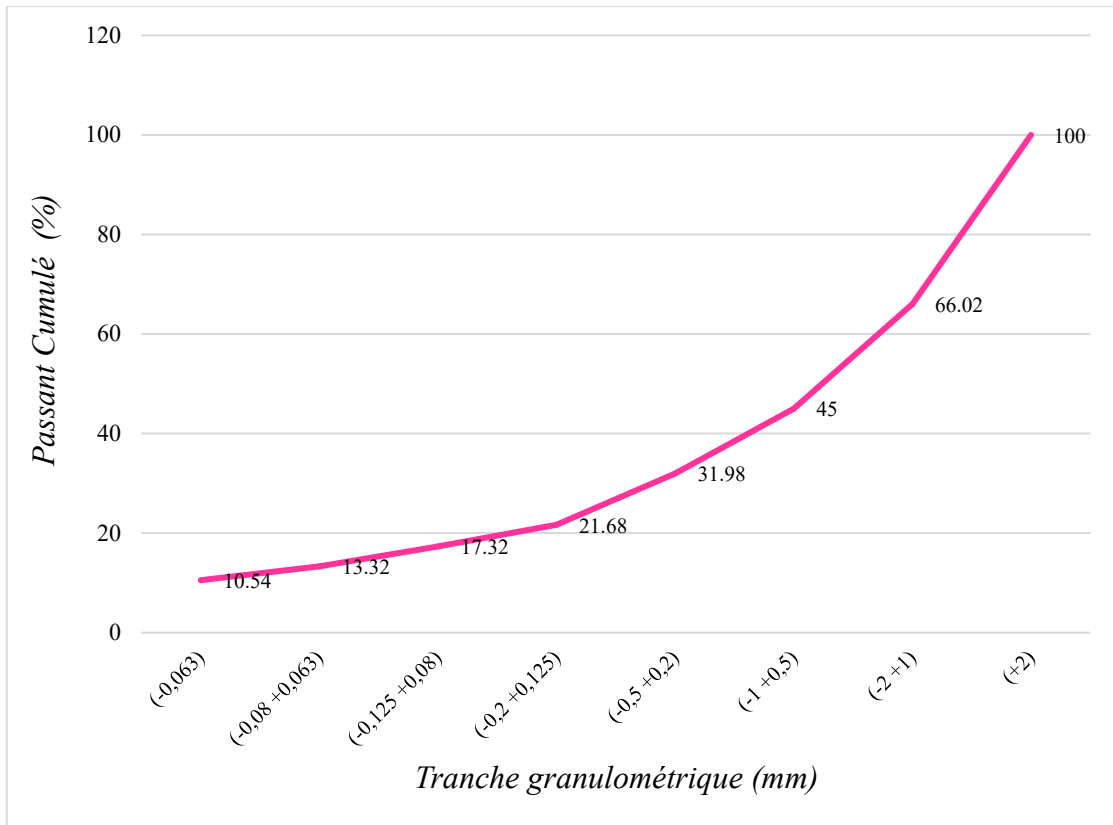


Figure 41. Courbe granulométrique du minerai

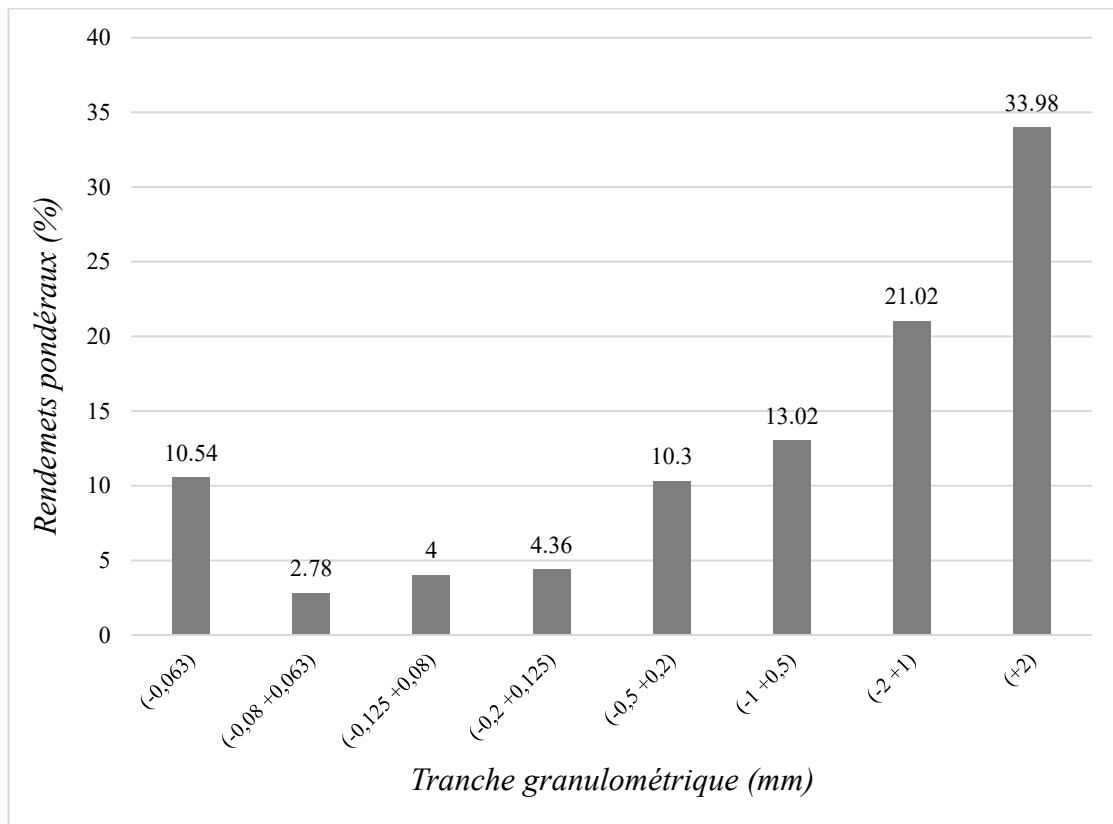
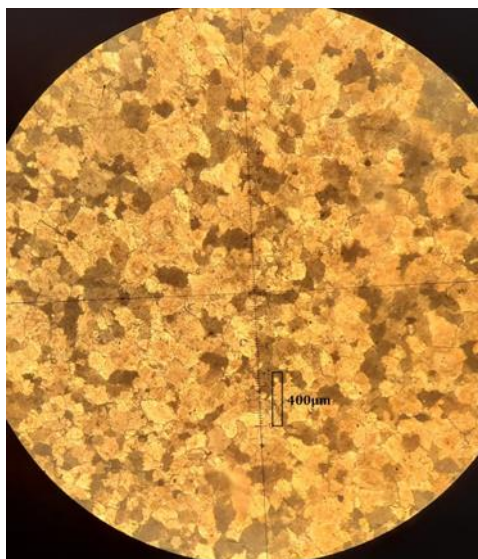


Figure 42. Histogramme de distribution granulométrique du minerai

### 3.2. Observation des lames minces par microscope optique polarisant

Les dolomies sont constituées essentiellement par des cristaux subautomorphes à xénomorphes, parfois courbes et parfois dentelés, jointifs de calcite et/ou dolomite dont la taille est d'ordre micrométrique finement à moyennement grenue. [47] Les cristaux présentent donc un arrangement (texture) non-planaire selon la classification de Sibley et Gregg. [48]

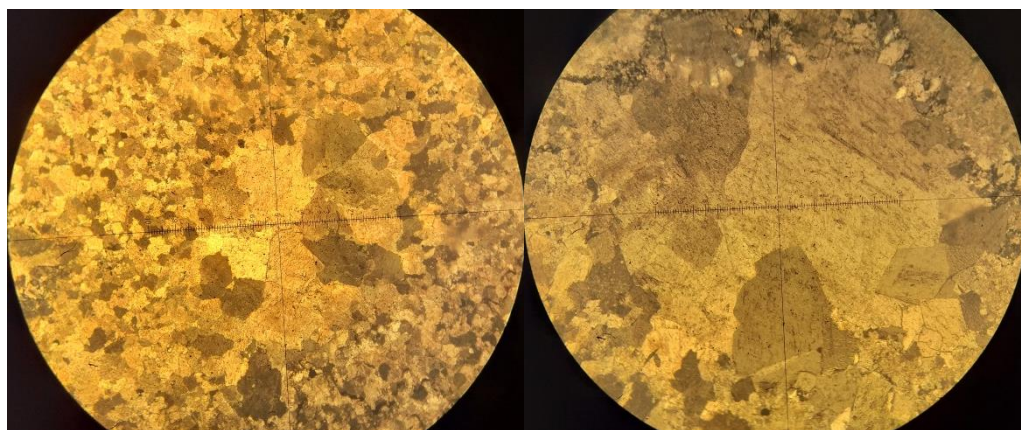
Ces dolomies sont, généralement, unimodale où la taille des cristaux est presque isométrique dans la majorité des sections.



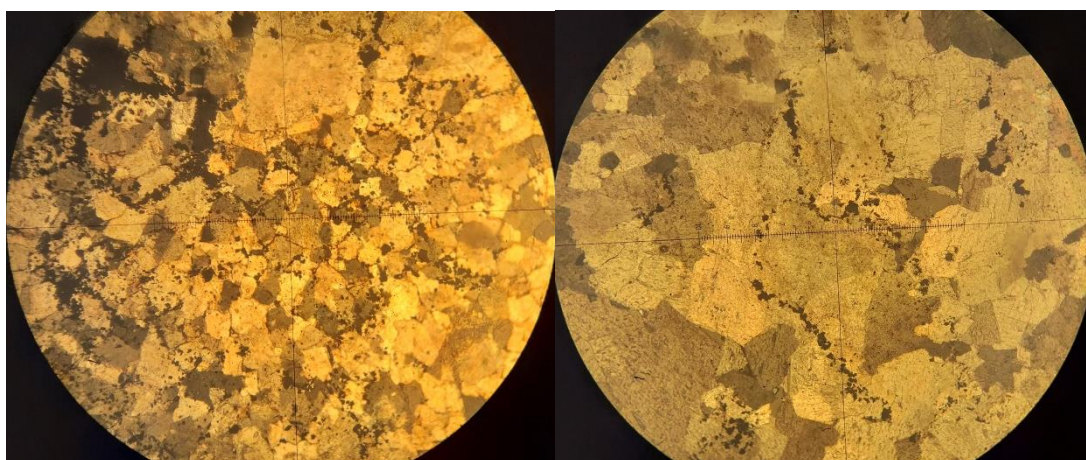
**Figure 43.** Microphotographie d'une dolomie à grains isométriques

Ces dolomies n'ont pas exclusivement les mêmes aspects microfaciologiques. Elles présentent quand-même quelques variations surtout au niveau de la texture de la roche et la taille des grains. Elles montrent, ainsi, des sections à cristaux hétérométriques (ou encore un aspect polymodal). Les cristaux y sont de plus en plus grossiers en dirigeant vers des plages arrondies à subarrondies formées par des cristaux dont la taille est millimétrique (grossièrement grenue) Voir la **figure 44**, et la **figure 45** ci-dessous. Il s'agit probablement d'un remplissage des vides ou des pores par la calcite/dolomite de recristallisation.

Les vides (les pores) sont remplis non seulement par la calcite/dolomite mais aussi par des minéraux métalliques opaques sulfures (sphalérite, pyrites...). Les minéraux métalliques se présentent, dans la roche, avec des tailles variables et une dissémination irrégulière. Cette partie des dolomies, relativement riche en matière opaque, présentent une différence, particulièrement en ce qui concerne la forme des grains qui sont plus ou moins automorphe. Elles peuvent être qualifiées, selon la classification de Sibley et Gregg (1987), des dolomies à texture planaire. Ainsi que des grains de taille plus grosse que les précédents.

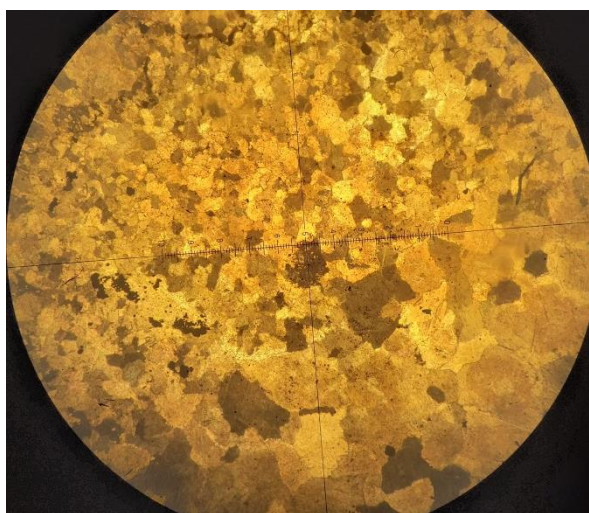


**Figure 44.** Microphotographies d'une dolomie à cristaux hétérométriques (taille variable)



**Figure 45.** Microphotographie montrant la présence des minéraux opaques

Il est remarquable également dans quelques sections, une différence dans la taille des cristaux. Une partie à grains fins de l'ordre de quelques dizaines de microns et une autre partie à grains relativement gros de l'ordre de quelques centaines de microns. La limite entre ces deux parties est bien claire et sécante.



**Figure 46.** Microphotographie montrant la différence de taille entre les grains

Du point de vue paléontologique, ces dolomies sont dépourvues de fossiles, sauf de très rares fantômes de fossiles recristallisés.

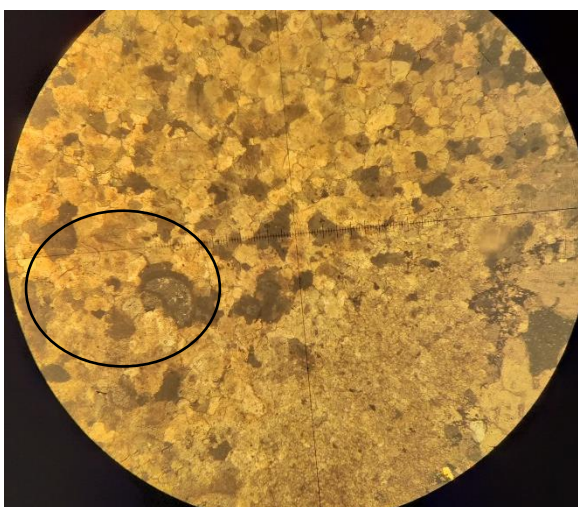


Figure 47. Microphotographie montrant la présence d'un bioclaste recristallisé

### 3.3. Résultats de l'analyse minéralogique par DRX

L'utilisation de la diffraction des rayons X a facilité une caractérisation minéralogique qualitative des différentes espèces minérales présentes dans l'échantillon. Les résultats obtenus sont représentés sur les diffractogrammes illustrés dans la **figure 39**, et la **figure 40**.

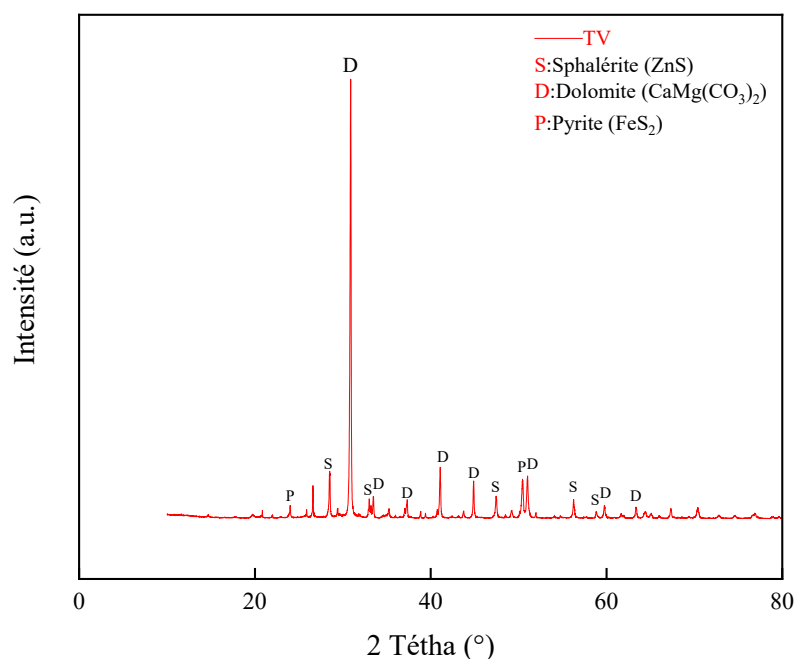
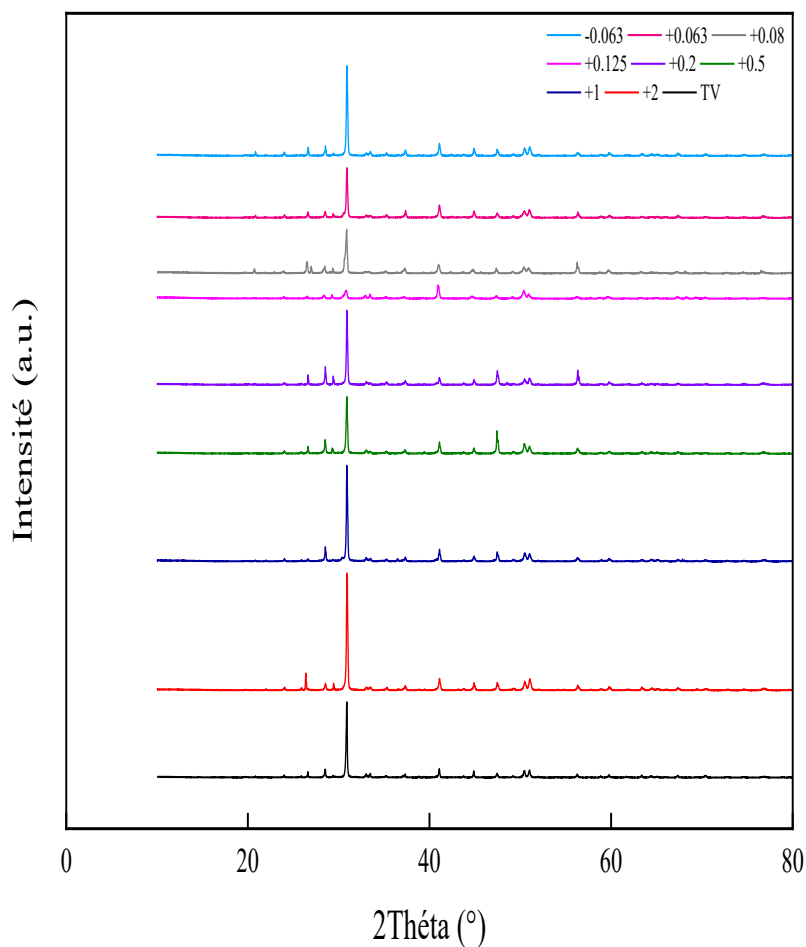


Figure 48. Diffractogrammes DRX Du minerai brut



**Figure 49.** Superposition des Spectres de DRX réalisés sur les échantillons du minerai

L'analyse par diffractomètre des rayons X (DRX) des diverses tranches granulométriques a conduit à la mise en évidence des principales conclusions suivantes :

- La principale phase minérale que l'on observe majoritairement est la dolomite ( $\text{Ca} \& \text{Mg} (\text{CO}_3)_2$ ) ; indiquant ainsi que le gisement de Chaâbet El Hamra est essentiellement composé de dolomie carbonatée.
- La présence de minerai de sphalérite ( $\text{ZnS}$ ), caractérisé par un pourcentage relativement bas, accompagnée de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ).

## B. Flottation De La Sphalérite Avec Les Deux Types De Réactifs Conventionnels Et Chélatants

### 1. Essai de flottation avec les réactifs conventionnels

#### 1.1. Matières

Les matières utilisées au cours de ce travail peuvent être regroupées en deux catégories :

- Le minéral ;
- Les réactifs chimiques.

##### 1.1.1. Minéral

Le minéral utilisé dans cette étude est provenu de la mine de Chaâbet el Hamra, Sétif ; dont la sphalérite est le principal minéral contenant le Zn dans le gisement. Les échantillons ont été broyés, déschlammés et séchés au niveau de laboratoire de département de géologie en les préparant pour les tests de flottation à une granulométrie (-75 +45)  $\mu\text{m}$  de teneur 6 % de Zn.

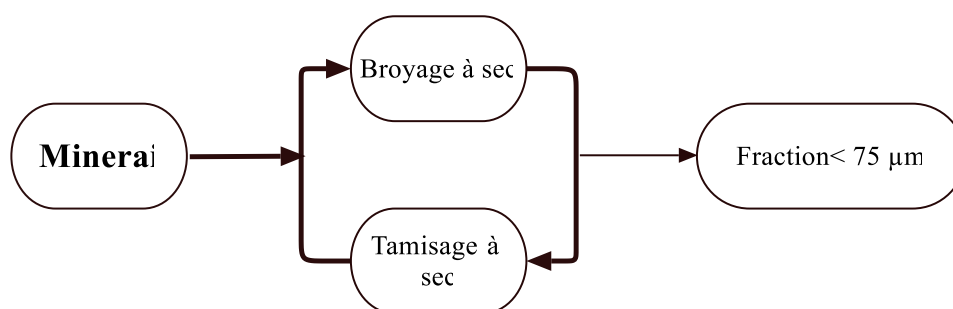


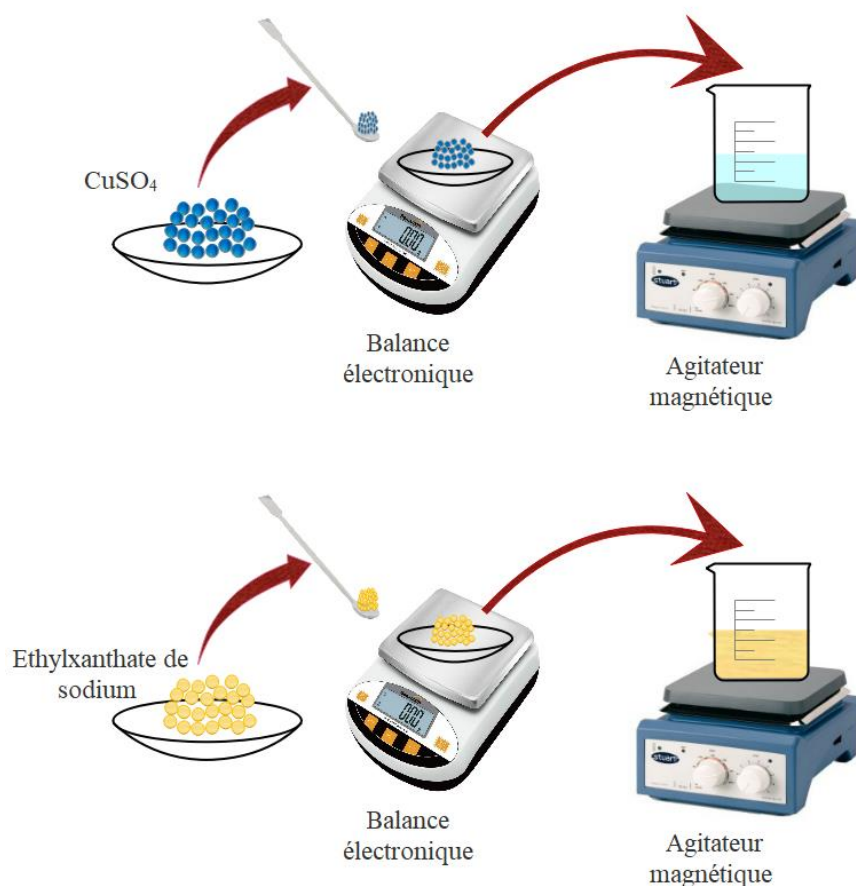
Figure 50. Schéma d'obtention des fractions < 75 $\mu\text{m}$

##### 1.1.2. Réactifs chimiques

Durant ce travail ; différents réactifs chimiques ont été utilisés ; la chaux (CaO) et l'acide chlorhydrique (HCl) comme régulateurs de pH ; l'Ethyl xanthate (EX) et l'huile de pin comme collecteur et moussant respectivement, ainsi que le sulfate de cuivre (CuSO<sub>4</sub>) est utilisé pour l'activation de la sphalérite. Les dosages d'Ethyl xanthate et sulfate de cuivre montrés dans le **tableau 9** ont été préparés au niveau de laboratoire du complexe de Kherzet Youcef ENOF comme montre la **figure 51**.

Tableau 9. Concentration d'Ethyl xanthate de sodium et sulfate de cuivre

|                     | Concentration (mol/L) |                      |                      |                      |                      |
|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [X]                 | $7 \times 10^{-3}$    | $3.5 \times 10^{-3}$ | $2.1 \times 10^{-3}$ | $0.7 \times 10^{-3}$ | $0.3 \times 10^{-3}$ |
| [Cu <sup>2+</sup> ] | $10^{-3}$             | $1.3 \times 10^{-3}$ | $1.6 \times 10^{-3}$ | $1.8 \times 10^{-3}$ | $2 \times 10^{-3}$   |



**Figure 51.** Schéma de protocole de préparation des dosages de collecteur (EX) et activant ( $\text{CuSO}_4$ )

### 1.2. Tests de flottation

Les conditions de travail de flottation du minerai de sphalérite à la laverie de Kherzet Youcef seront prises comme condition de référence dans notre travail.

- ❖ Granulométrie : ( $< 75$ )  $\mu\text{m}$
- ❖ Réactifs : ***Ethyl xanthate (Collecteur)***  
***Sulfate de cuivre (Activant)***  
***Chaux / acide chlorhydrique (Régulateur de milieu)***  
***Huile de pin (Moussant)***

- ❖ Essais au laboratoire

Les essais de flottation ont été réalisés au niveau de laboratoire LAVAMINE, dans une cellule de flottation de type DINVER d'un volume de 1000 ml. La vitesse de rotation de la machine de flottation a été fixée à 1600 r/min. [42]

Dans les conditions expérimentales ; 300g d'échantillons de minerai ( $-75 +45$ )  $\mu\text{m}$  ont été utilisés pour la flottation. La valeur de pH nécessaire est 11 à une température de

laboratoire. Le conditionnement de pulpe s'est produit pendant 20 min qui est le temps optimal pour la flottation de la sphalérite. Le temps d'aération et de flottation ont été 5 min. Les produits flotté et non flotté sont égouttés ; séchés et enfin pesés. La procédure de flottation est illustrée dans la *figure 53*.

Pour le calcul du taux de récupération, nous avons utilisé l'équation suivante :

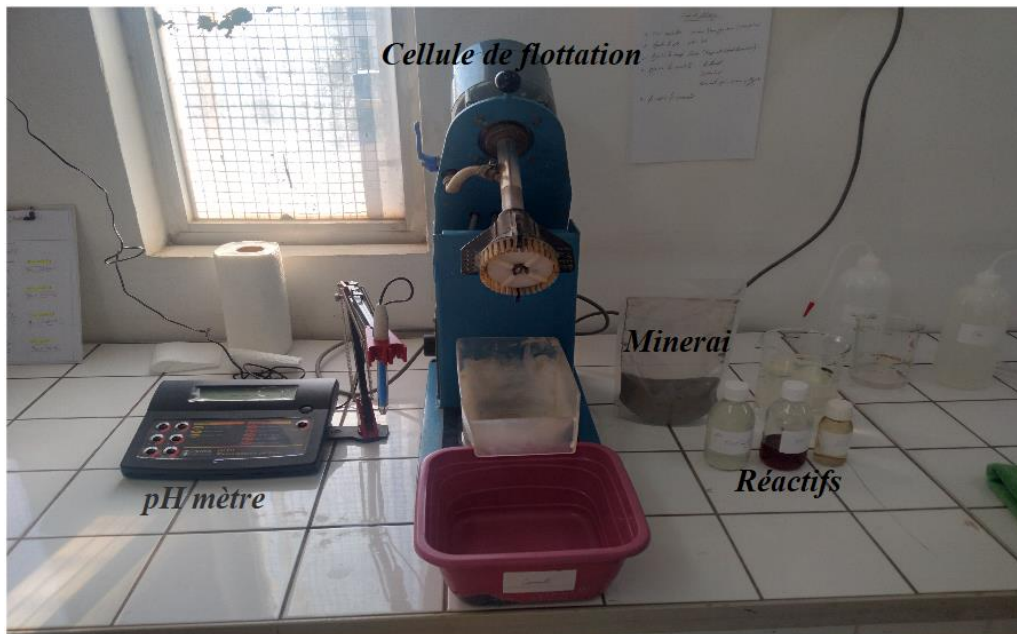
$$\text{Taux de récupération} = \frac{Cc}{Aa} \times 100\%$$

Où : *C* : le poids du concentré en (g) ;

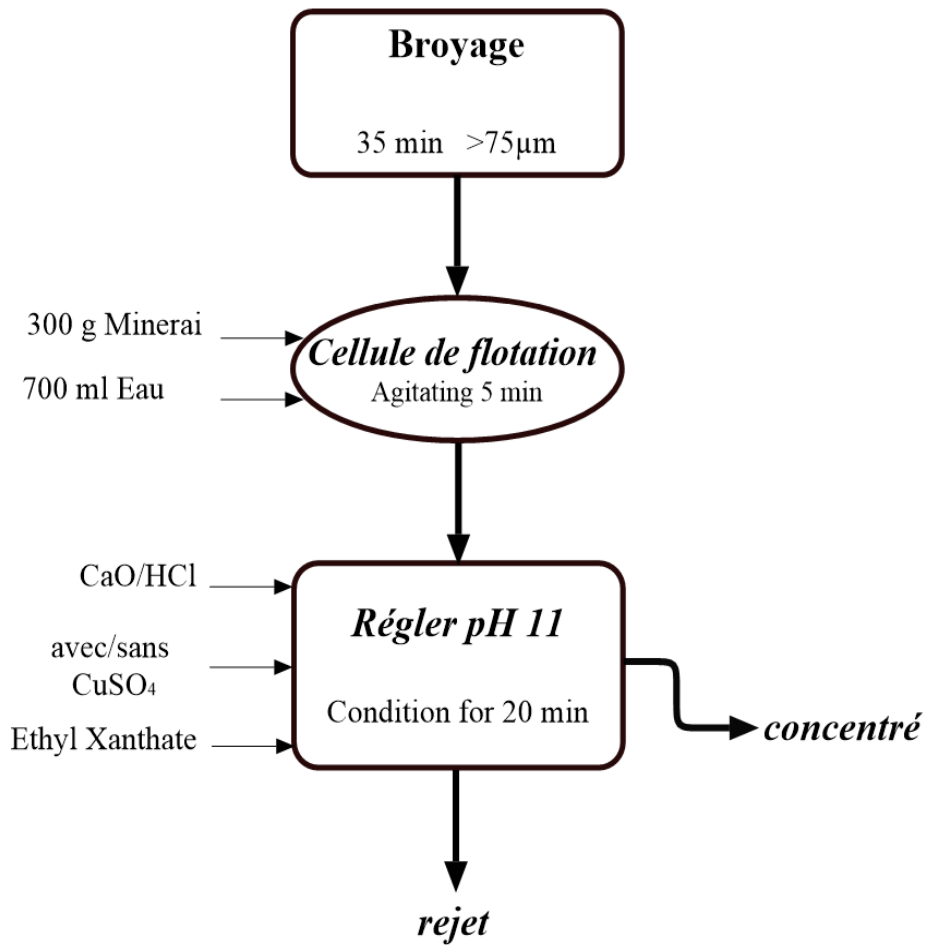
*c* : la teneur en zinc du concentré en (%) ;

*A* : le poids de l'alimentation en (g) ;

*a* : la teneur en zinc dans l'alimentation en (%).



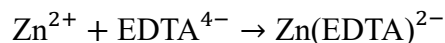
*Figure 52.* L'appareillage utilisé pour les essais de flottation



**Figure 53.** Différentes étapes de la flottation au niveau de laboratoire

### 1.3. Analyse des produits de flottation

La méthode d'analyse chimique traditionnelle, le titrage complexométrique, aussi appelé chlorométrie, a permis d'obtenir les teneurs en Zn du concentré et de rejet. Cette méthode de titrage est utilisée pour l'analyse chimique des métaux ioniques. [49] Cette technique est basée sur un titrage volumétrique par l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA) ; il forme des complexes stables avec  $Zn^{+2}$  selon l'équation de réaction.



Les analyses chimiques sont effectuées au niveau du laboratoire du complexe minier Kherzet-Youcef, le protocole de titrage complexométrique comme montre la **figure 54** pour les produits de la procédure de flottation ; les teneurs en Zn sont donc calculées à l'aide de la formule :

$$Zn \% = \frac{A \times T_{Zn} \times 100}{G}$$

Où : Zn % : teneur en zinc (%)

A : volume d'EDTA (ml)

$T_{Zn}$  : quantité de zinc correspondant à 1 ml d'EDTA (ml)

G : masse de l'échantillon (g)

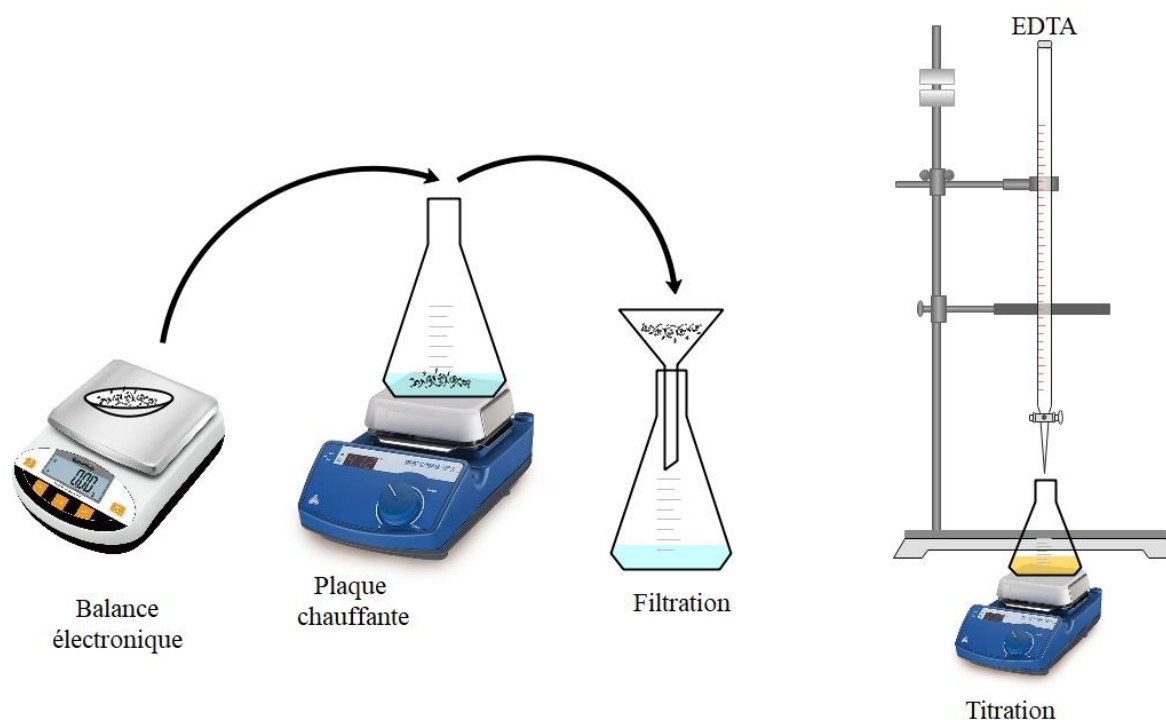


Figure 54. Protocole de titrage complexométrique

## 2. Essai de flottation par les réactifs chélatant

Depuis plusieurs années, les tests de micro-flottation sont employés afin d'évaluer les collecteurs potentiels en se basant sur leur capacité à flotter les minéraux purs. Ces tests nécessitent un petit échantillon de minéral pur, généralement de 0,5 à 5,0 g, et se sont révélés très reproductibles grâce à un bon contrôle des variables. Les tests de micro-flottation sont réalisés à l'aide d'un tube de Hallimond ou d'un tube de Hallimond modifié. [50] Dans la présente étude, nous proposons d'utiliser un tube de Hallimond pneumatique comme montre la **figure 55**, [51] ce qui présente des avantages par rapport aux tests de micro-flottation conventionnels car une plus grande quantité d'échantillon minéral peut être utilisée, le conditionnement peut être effectué dans la cellule de flottation elle-même et la lévitation du minéral est très distincte et la flottation différentielle de la gangue et des minéraux de valeur peut être facilement observée.

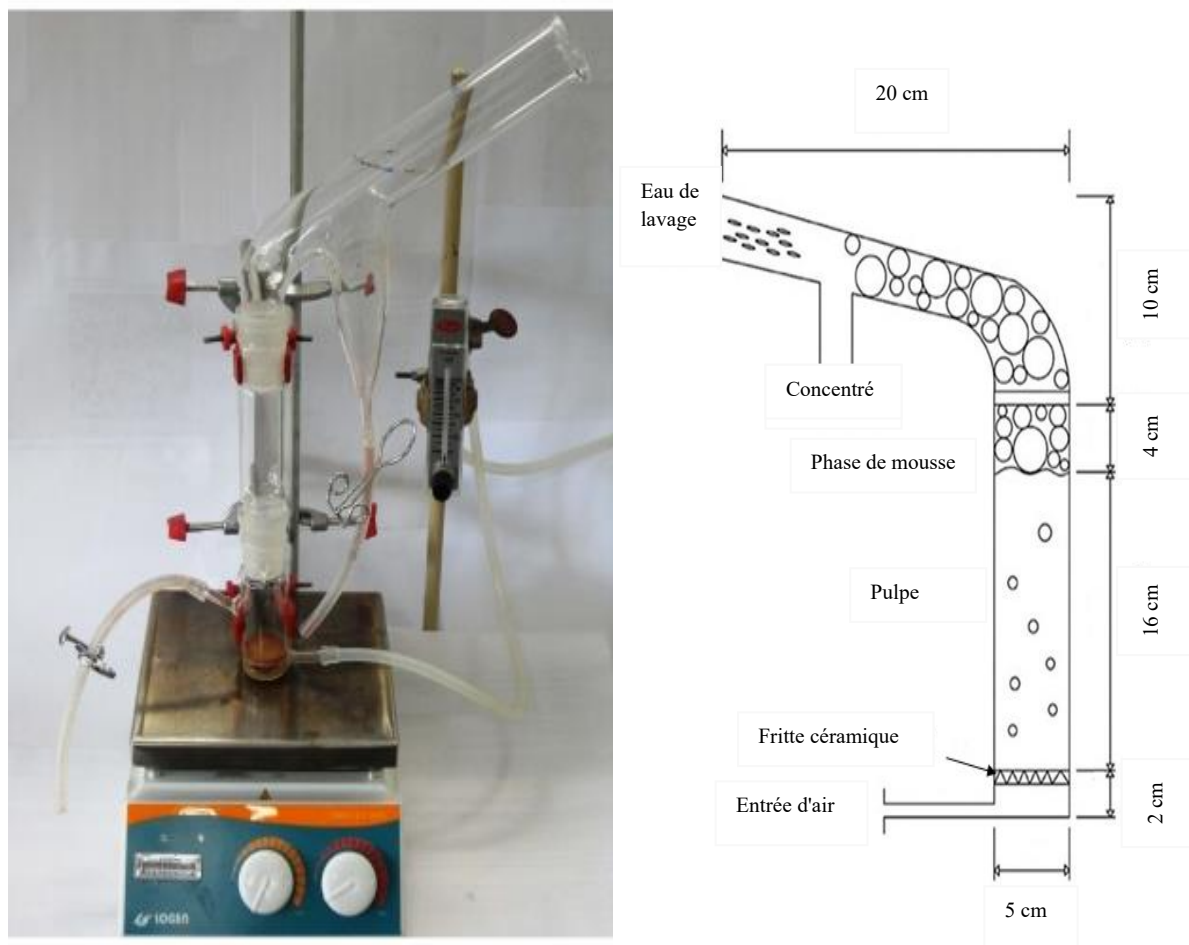


Figure 55. Tube de Hallimond

## 2.1. Matière

### 2.1.1. Minerai

Les tests de micro-flottation sont généralement effectués avec des minéraux purs (sphalérite pure). Mais dans cette étude, au lieu d'utiliser des minéraux purs, on a opté pour l'utilisation de minerai de sphalérite. Après broyage, le minerai a été préparé de manière à obtenir une fraction inférieure à 75  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.2. Réactifs chimiques

#### a. Collecteur

##### ➤ Choix du collecteur chélatant

La structure moléculaire de base ou la classe chimique a été déterminée sur la base de l'étude des sites de coordination du zinc dans diverses molécules biologiques telles que les protéines à doigt de zinc. Dans la plupart des cas, le zinc est lié à au moins un groupe amine (-NH<sub>2</sub>) et un groupe thiol (-SH). Il a donc été décidé d'utiliser une molécule chélatant qui possède un groupe chélatant N-S. L'un des choix de ligand ou de molécule chélatant de type

N-S est le squelette amino thiol et cette classe de composés a été testée comme candidat potentiel pour la flottation sélective des minéraux de zinc.

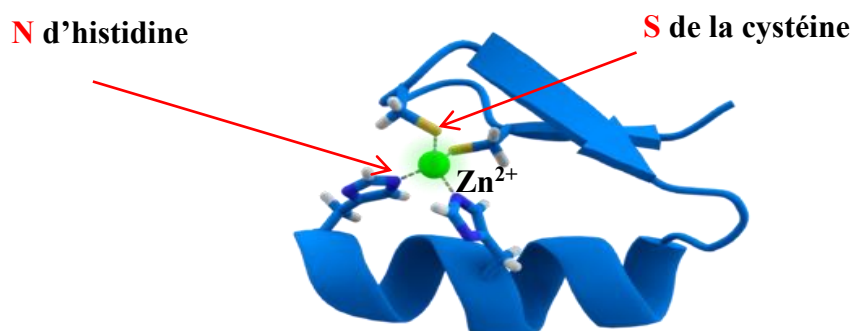


Figure 56. Protéine à doigt de zinc

La structure générale des aminothiols peut être représentée comme suit :

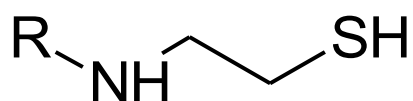


Figure 57. Représentation générale des aminothiols [2-(Alkylamino)éthanethiols]

#### ➤ Synthèse des aminothiols

Bien qu'il existe plusieurs méthodes rapportées dans la littérature pour la synthèse des aminothiols, l'investigateur principal a mis au point une synthèse en pot unique sans sous-produits ni émissions de produits gazeux. La méthode utilise du sulfure d'éthylène et une amine avec du toluène comme solvant. La réaction pour la synthèse d'un composé typique est illustrée ci-dessous dans la *figure 58*. On peut observer que la masse totale des réactifs est égale à la masse totale du produit, l'aminothiols, et qu'aucun autre produit n'est formé. Le solvant Toluène peut être récupéré par distillation. Le schéma de synthèse est donc un schéma de chimie verte. Tout réactif n'ayant pas réagi peut également être récupéré lors de la distillation.

✚ La procédure de synthèse du 2-(hexylamino)éthanthiol est comme suit :

De l'hexylamine (11,5 g ; 90 ml) dans 40 ml de toluène a été placée dans un ballon à fond rond et chauffée à reflux. Du sulfure d'éthylène (4,5 g, 75 mmol) dans 100 ml de toluène a été ajouté lentement à travers une ampoule à décanter sur une période d'une heure. Le

mélange réactionnel a ensuite été chauffé à reflux pendant 20 heures. La solution a été refroidie et le toluène avec tout sulfure d'éthylène n'ayant pas réagi a été éliminé par ébullition sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur flash. Le produit obtenu a été nettoyé en passant à travers une courte colonne de gel de silice.

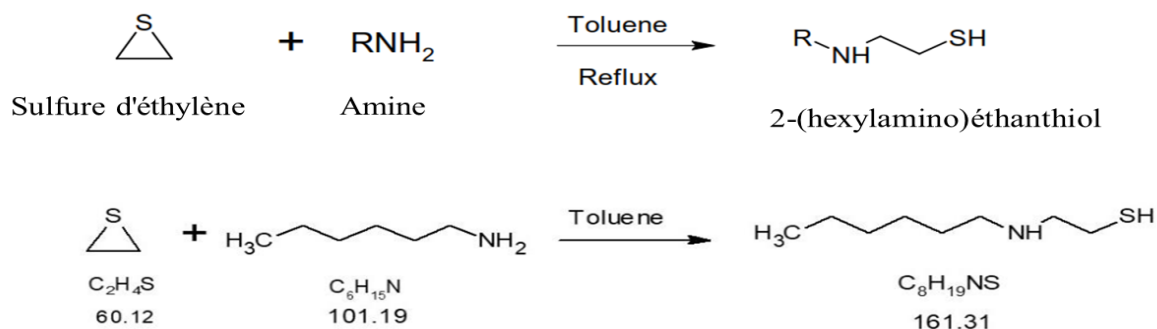


Figure 58. Schéma réactionnel pour la synthèse de l'aminothioli

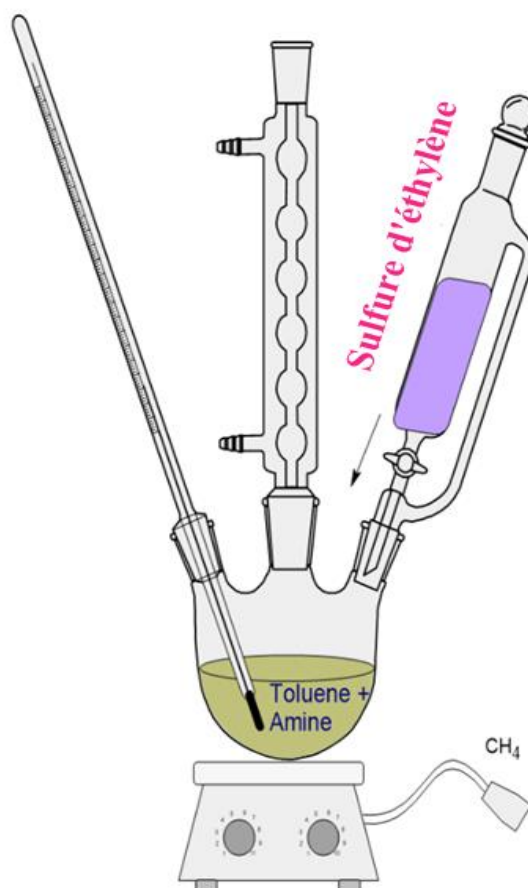


Figure 59. Procédure de synthèse du 2-(hexylamino)éthanthiol

Le collecteur a été synthétisé selon la procédure expliquée dans la section précédente. On a prélevé un volume spécifique de cette solution à l'aide d'une pipette afin de mener les

expériences de micro-flottation. Avant chaque utilisation, on a effectué une sonnerie de 10 minutes sur la solution. La solution stockée du collecteur contient 0,25 mg/ml de solution.

***b. Modificateurs de pH***

Des solutions de NaOH 0,1 ml et de HCl 0,1ml ont été utilisées pour ajuster le pH de la pulpe lors des essais de flottation.

***c. Moussant***

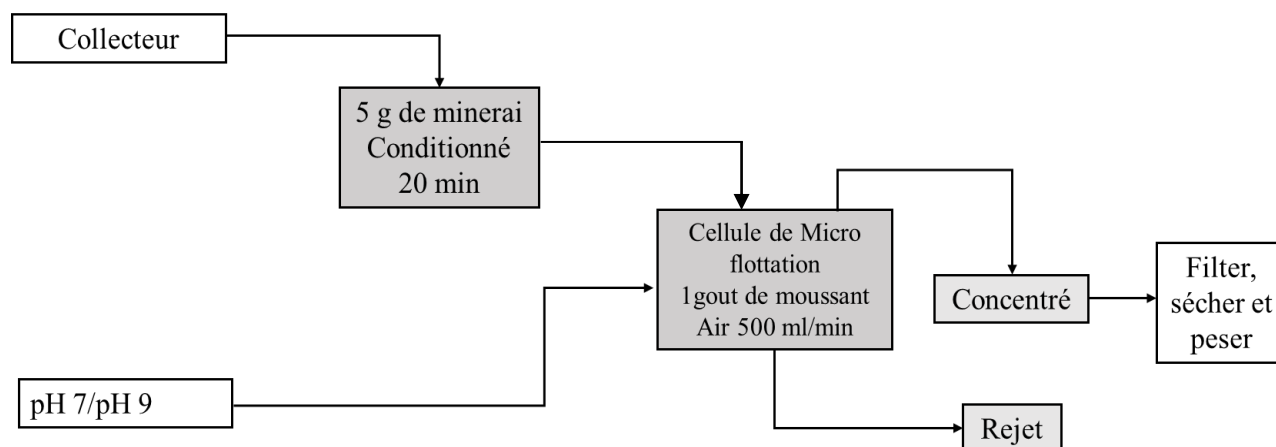
En général, aucun moussant est utilisé dans les tests de micro flottation. Cependant, pour former une mousse stable, une solution commerciale d'huile de savon a été utilisée. 1 ml d'huile de savon a été dilué à 1L avec de l'eau distillée. Une ou deux gouttes de cette solution ont été ajoutées à la solution de flottation avant l'ouverture de l'air.

***2.2. Test de micro flottation***

Après avoir libéré la surface solide par trituration dans un mortier et un pilon, 5 g de minerai, ont été transférés dans la cellule de flottation et du collecteur ont été ajoutés. Le pH de la solution a été ajusté à 7 ou 9 et a été conditionné pendant 20 minutes par agitation continue à l'aide d'un agitateur magnétique. Après le conditionnement, de l'eau distillée à pH 7et ou 9 a été ajoutée à la pulpe pour amener le niveau jusqu'à la partie supérieure de la microcellule de flottation, puis la partie courbée de la cellule a été fixée. L'air d'une bouteille comprimée a été ouvert et 01 L/min d'air a été passé. L'écume a été recueillie en plaçant un bécher sous le bec de la cellule de micro flottation. Le flottant ainsi recueilli a été séché dans un four à 120 °C pendant une nuit ensuite a été pesé.

Trois dosages différents de collecteur ont été utilisés pour tester la flottabilité du minerai, à savoir 20 ml de la solution de collecteur (1 g de collecteur/ 1 kg de minerai), 40 ml de la solution de collecteur (2 g de collecteur/ 1 kg de minerai) et 50 ml de la solution de collecteur (2,5 g de collecteur/ 1 kg de minerai).

Pour chaque essai, des tests en double ont été réalisés, les tests de micro flottation ont été illustrés dans la **figure 60**. Les tests et leurs conditions ont été répertoriés dans le **tableau 10**.



**Figure 60.** Organigramme des essais de micro-flottation

**Tableau 10.** Détails des tests de micro-flottation effectués

|         | pH | Dosage des collecteurs<br>(g/kg) |
|---------|----|----------------------------------|
| Minerai | 7  | 1                                |
|         |    | 2                                |
|         |    | 2.5                              |
|         | 9  | 1                                |
|         |    | 2                                |
|         |    | 2.5                              |

### 3. Résultats et interprétation

Les tests de flottation ont été effectués pour étudier l'influence de l'activant  $\text{CuSO}_4$  sur le comportement de flottation de la sphalérite.

#### 3.1. Sphalérite non activé et conditionné avec le collecteur Xanthate

##### ***Essais : Sphalérite + EX***

Les résultats des essais sans activation et conditionné avec le collecteur Ethyl xanthate de sodium en utilisant une variation des dosages à un pH 11 sont présentés dans le **tableau 11** et la **figure 61**.

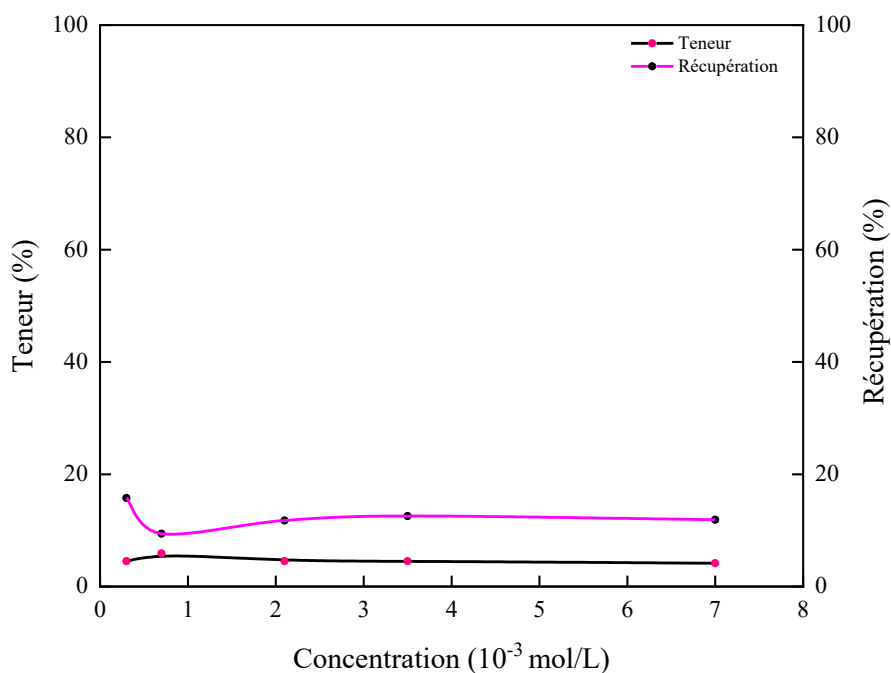
Les résultats obtenus montrent que les teneurs en Zn est faible et très proche au teneur initial (teneur en Zn dans le TV) avec des mauvais rendements de récupération ; cela indique que la sphalérite non activée par le sulfate de cuivre ne peut pas flotter efficacement ce qui entraîne une récupération plus faible du zinc contenu dans le minerai. La récupération de Zn la plus élevée était de 15,77 % avec une teneur de 4,53 % à la concentration de  $0,3 \times 10^{-3}$  mol/L, ce qui montre que la sphalérite ne réagit pas avec l'EX en l'absence de sulfate de cuivre. On peut dire que la flottation de la sphalérite nécessite une activation plus importante

pour rendre le minerai susceptible de réagir avec le collecteur afin d'obtenir une meilleure flottabilité. L'activation indésirable de la sphalérite réduira la différence de performance de flottation entre la sphalérite et la pyrite et entraînera une diminution de la récupération et de la teneur des concentrés de Zn.

On peut conclure que l'étape d'activation de la sphalérite joue un rôle essentiel dans les processus liés au traitement du zinc. Elle contribue à améliorer l'efficacité, la rentabilité. Ceci confirme l'affinité de la surface de la Sphalérite pour le  $\text{CuSO}_4$ .

**Tableau 11.** Teneur et Récupération du ZnS

| Essai | Concentration<br>( $10^{-3}$ mol/L) | Masse (g) |        | Teneur (%) |       | $\epsilon$ (%) |       |
|-------|-------------------------------------|-----------|--------|------------|-------|----------------|-------|
|       |                                     | Concentré | Rejet  | Concentré  | Rejet | Concentré      | Rejet |
| 1     | 7                                   | 54.04     | 235.5  | 4.16       | 5.54  | 11.89          | 69.03 |
| 2     | 3.5                                 | 52.31     | 235.6  | 4.53       | 5.41  | 12.54          | 67.45 |
| 3     | 2.1                                 | 49.03     | 241.42 | 4.53       | 5.57  | 11.75          | 71.15 |
| 4     | 0,7                                 | 50.34     | 337.75 | 5.92       | 5.29  | 9.42           | 99.00 |
| 5     | 0,3                                 | 39.31     | 255.59 | 4.53       | 5.54  | 15.77          | 71.54 |



**Figure 61.** Teneur et récupération du ZnS en fonction de la concentration de Ethyle xanthate

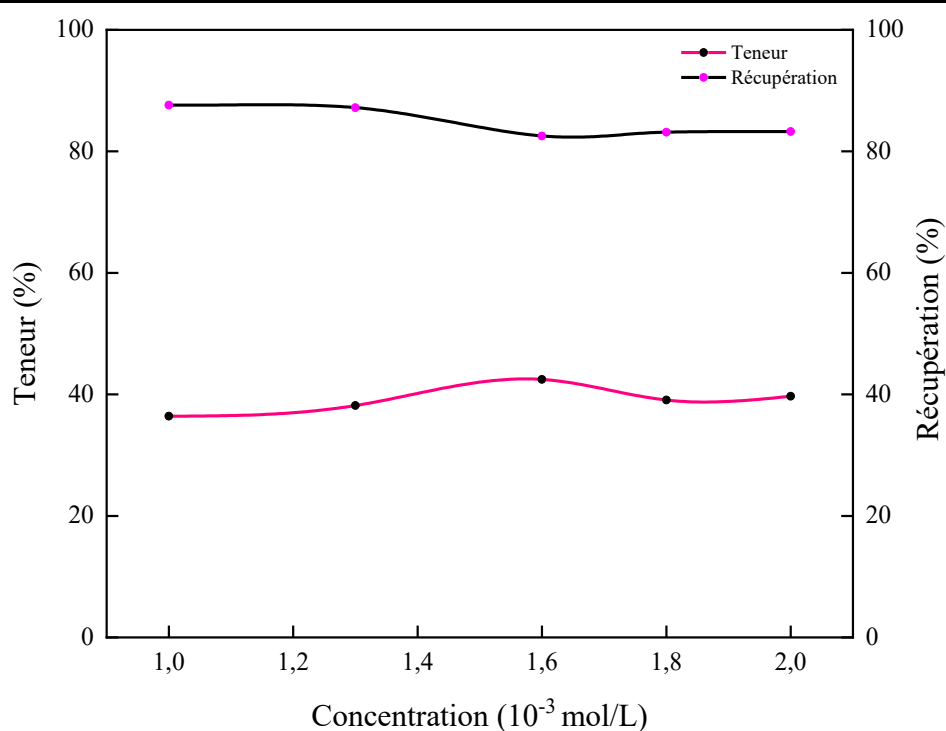
### 3.2. Sphalérite activé et conditionné avec le collecteur Xanthate

#### Essais : Sphalérite + EX + CuSO<sub>4</sub>

Les résultats des essais de flottation de la sphalérite activé et conditionne avec le collecteur Ethyl xanthate de sodium en utilisation une variation des dosages à un pH 11 sont présentés dans le **tableau 12** et la **figure 62**.

**Tableau 12.** Teneur et Récupération du ZnS

| Essai | Concentration<br>(10 <sup>-3</sup> mol/L) | Masse (g) |        | Teneur (%) |       | ε (%)     |       |
|-------|---|-----------|--------|------------|-------|-----------|-------|
|       |   | Concentré | Rejet  | Concentré  | Rejet | Concentré | Rejet |
| 1     | 1   | 48.16     | 251.84 | 36.41      | 0.75  | 87.63     | 9.44  |
| 2     | 1.3                                       | 45.71     | 254.29 | 38.17      | 0.25  | 87.19     | 1.92  |
| 3     | 1.6                                       | 38.89     | 261.11 | 42.46      | 0.75  | 82.52     | 9.41  |
| 4     | 1.8                                       | 42.60     | 257.40 | 39.06      | 0.13  | 83.16     | 1.67  |
| 5     | 2   | 41.98     | 258.02 | 39.69      | 0.37  | 83.27     | 4.77  |



**Figure 62.** Teneur et récupération du ZnS en fonction de la concentration du CuSO<sub>4</sub>

En analysant les résultats obtenus ; on constate que des meilleurs résultats ont été obtenus en comparant avec les résultats de la flottation de sphalérite sans activation. Ces résultats montrent qu'en présence de l'activant sulfate de cuivre avec le collecteur xanthate la flottation s'améliore. Une récupération maximale de zinc de 87.63 % a été obtenue en utilisant 250 g/t de  $\text{CuSO}_4$  avec une teneur en Zn 36.41%. Une teneur en zinc élevée de 42.46% en utilisant 400 g/t de  $\text{CuSO}_4$  avec une récupération de 82.52%.

En comparant les résultats de la flottation de sphalérite sans et avec l'activer par  $\text{CuSO}_4$ , la différence significative de flottabilité entre la sphalérite non activée et la sphalérite activée est apparente, et indique que la flottation de la sphalérite est impossible sans l'ajout de l'activateur. Ainsi, la meilleure séparation de la sphalérite de la pyrite et de la gangue a été obtenue en suivant le système réactif (CaO- $\text{CuSO}_4$ -EX) à pH 11.

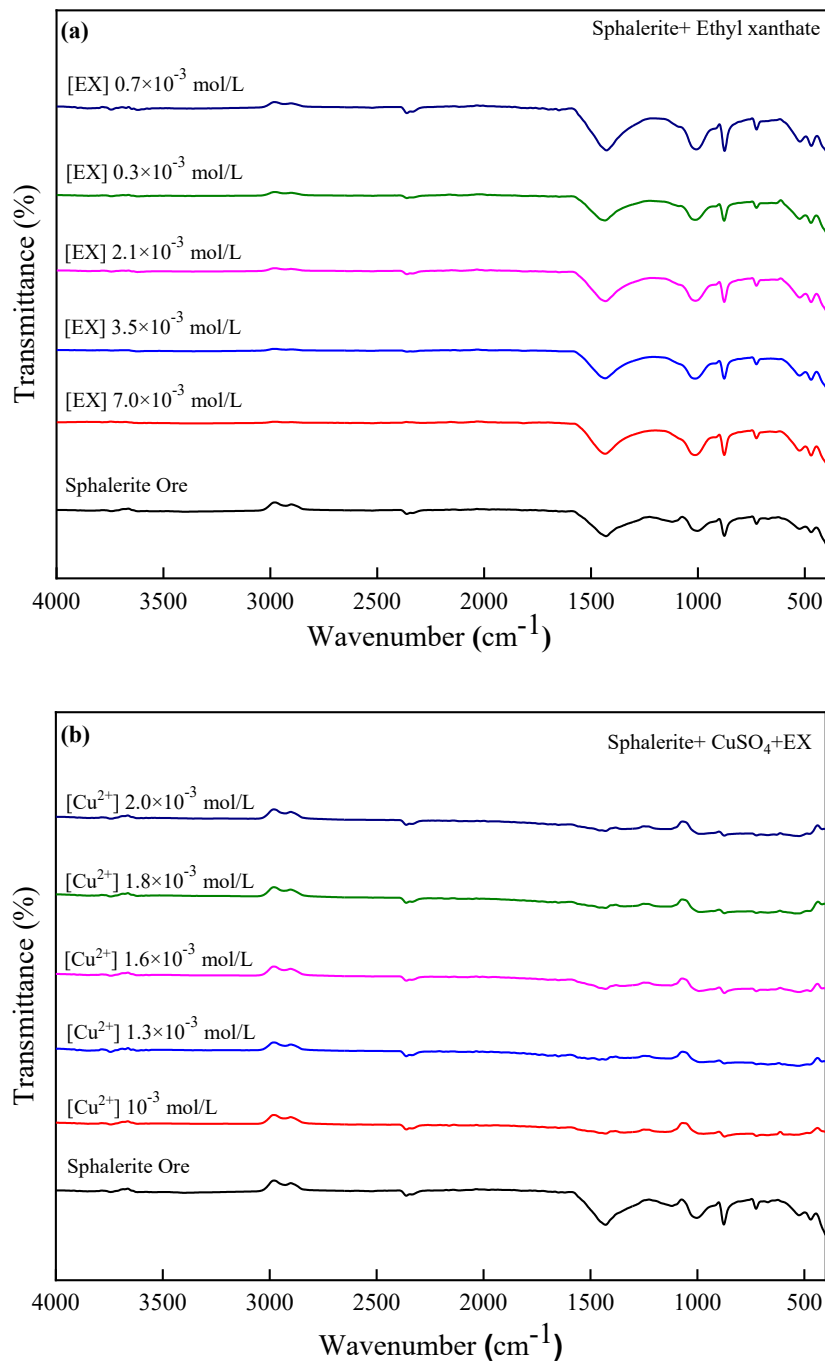
### 3.3. Analyse FT-IR

Les spectres IR de la sphalérite traitée avec le xanthate d'éthyle avant et après l'interaction avec  $\text{CuSO}_4$ , respectivement est illustrée dans la **figure 63 (a)** et la **figure 63 (b)**, afin d'étudier le mécanisme d'interaction de l'activant sur les surfaces de sphalérite à un pH spécifique de 11.

Le spectre IR de la sphalérite traitée par le collecteur EX, avec différents dosages, est représenté dans la **figure 63 (a)** ; aucune différence significative n'a été observée dans les spectres, quel que soit le dosage de xanthate d'éthyle, ce qui indique que l'adsorption de l'EX sur la surface de la sphalérite était très faible. Tous les spectres présentaient de manière cohérente des bandes autour de  $1450 \text{ cm}^{-1}$ , correspondant à la vibration d'étirement de  $-\text{C}(=\text{S})-\text{S}-$ . En outre, les pics d'absorption dans la gamme de  $1000$  à  $700 \text{ cm}^{-1}$  ont été attribués aux vibrations d'étirement des liaisons  $\text{C}=\text{S}$  et  $\text{C}-\text{S}$ , respectivement, indiquant des groupes contenant du soufre actif sur les surfaces minérales. [52] Plus précisément, les pics à  $512 \text{ cm}^{-1}$  et  $463 \text{ cm}^{-1}$  ont été associés aux vibrations d'étirement des oxydes métalliques  $\text{M}-\text{O}$  et aux vibrations de flexion des liaisons  $\text{M}-\text{O}$ , respectivement. [53]

Après l'ajout de  $\text{CuSO}_4$ , le spectre IR de la sphalérite activée comparé au spectre IR de la sphalérite non activée, un nouveau pic d'adsorption caractéristique significatif sur la surface de la sphalérite a été observé comme présenté dans la **figure 63 (b)**. Le résultat a démontré la disparition des pics de  $1450 \text{ cm}^{-1}$ , ainsi que des modifications des pics  $\text{C}=\text{S}$  et  $\text{C}-\text{S}$ , qui indiquent la chimisorption de l'ion  $\text{Cu}^{2+}$  sur la surface de la sphalérite, et suggère en outre la formation d'oxydes et d'hydroxydes de surface hydrophiles. Inversement, des changements spectraux minimes ont été notés dans les minéraux, avec la préservation des pics  $\text{C}-\text{S}$  clés dans la gamme  $1000-700 \text{ cm}^{-1}$ , indiquant une oxydation de surface limitée.

Ce comportement différentiel montre que la présence d'ions cuivre du collecteur  $\text{CuSO}_4$  a favorisé l'adsorption chimique de l'EX sur la flottation de la sphalérite, améliorant ainsi la séparation de la pyrite et de la gangue et favorisant son adsorption chimique sur la flottation de la sphalérite.



**Figure 63.** FT-IR spectral de sphalérite (a) Avant (b) Après activation avec  $\text{CuSO}_4$

### 3.4. Sphalérite conditionnée par le collecteur chélatant

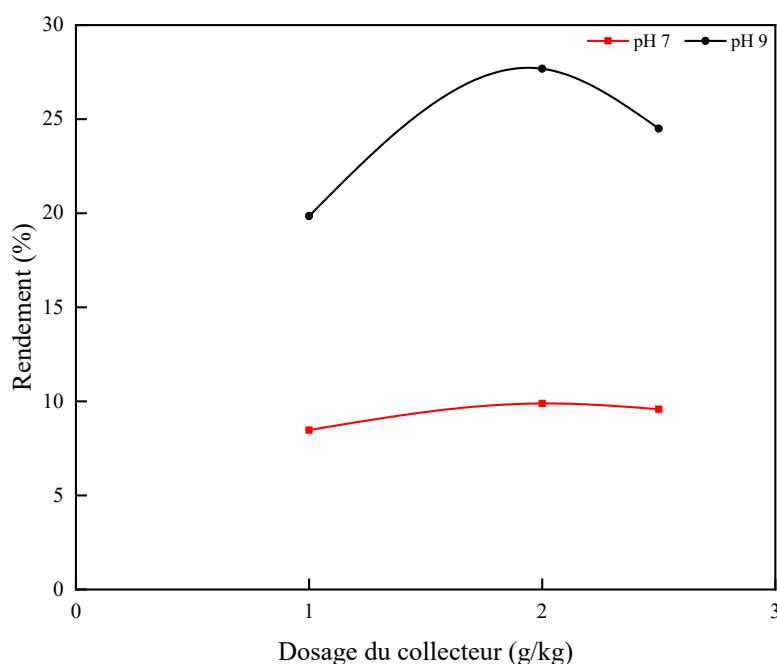
#### 3.4.1. Comparaison du rendement

La récupération de masse, c'est-à-dire la masse de solides flottant aux trois concentrations de collecteur et aux deux pH, à savoir pH 7 et pH 9, est indiquée ci-dessous dans le *tableau 13*.

**Tableau 13.** Rendement à différent pH 7 et 9

| Dosage de collecteur (g/kg) | pH 7  | pH 9   |
|-----------------------------|-------|--------|
| 1                           | 8.472 | 19.852 |
| 2                           | 9.890 | 27.683 |
| 2.5                         | 9.581 | 24.505 |

Selon les résultats, l'augmentation du dosage du collecteur au-delà de 2.5 g/kg ne cause pas d'augmentation de la récupération de masse, ce qui signifie qu'il n'y a pas davantage de minerai qui flotte. Ainsi, il ne devrait pas être bénéfique d'augmenter le dosage du collecteur au-delà de 2 g/kg de minerai. Par ailleurs, l'adaptation des conditionnements et l'utilisation des produits chimiques auxiliaires supplémentaires pourraient favoriser une récupération plus efficace du zinc.



**Figure 64.** Effet des dosages des collecteur sur le rendement

### 3.4.2. Récupération de la sphalérite

Le minerai et les concentrés contiennent principalement la sphalérite, la galène, la dolomite et la pyrite. Étant donné que la plus grande efficacité était observée avec un dosage de collecteur de 2 g/kg de minerai, seuls les concentrés à l'aide de 2 g/kg à pH 7 et pH 9 ont été analysés. La composition minérale et les teneurs de chaque minéral à pH 7 et pH 9 en utilisant 2 g de collecteur/kg de minerai est présenté dans le **tableau 14**.

**Tableau 14.** Composition minéralogique du concentré obtenu

| Mineral   | Composition (%) |       |
|---|-----------------|-------|
|   | pH 7            | pH 9  |
| Zn mineral (sphalérite, ZnS)                                      | 40.10           | 39.53 |
| Ca & Mg mineral (dolomite, CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) | 24.61           | 43.14 |
| Fe mineral (pyrite, FeS <sub>2</sub> )                            | 8.01            | 3.33  |

Les résultats des essais de micro flottation conditionné en utilisant le dosage du collecteur 2 g/kg du minerai, à un pH 7 et pH 9 sont présentés dans le **tableau 15**, et le **tableau 16** et la **figure 65**.

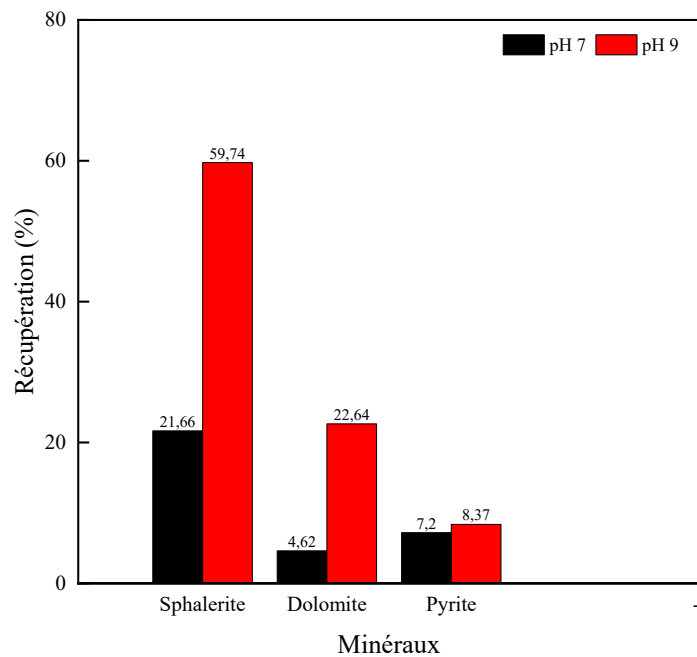
**Tableau 15.** Récupération des minéraux à pH 7 pour un dosage de collecteur de 2 g/kg

| Minéraux   | Concentré  |       |                  |
|------------|------------|-------|------------------|
|            | Teneur (%) | Masse | Récupération (%) |
| Sphalérite | 40.1       | 0.495 | 21.66            |
| Dolomite   | 24.61      | 0.495 | 4.62             |
| Pyrite     | 8.01       | 0.495 | 7.20             |

**Tableau 16.** Récupération des minéraux à pH 9 pour un dosage de collecteur de 2 g/kg

| Minéraux   | Concentré  |       |               |
|------------|------------|-------|---------------|
|            | Teneur (%) | Masse | Récupération% |
| Sphalérite | 39.53      | 1.385 | 59.74         |
| Dolomite   | 43.14      | 1.385 | 22.64         |
| Pyrite     | 3.33       | 1.385 | 8.37          |

La comparaison des récupérations minérales à pH 7 et pH 9 indique clairement une récupération plus importante de la sphalérite à pH 9, c'est-à-dire une augmentation de 21,7 % à pH 7 à 59,7 % à pH 9. Bien que la récupération de la sphalérite ait augmenté, la teneur en Sphalérite du concentré n'est que de 39,5 %. Ceci est dû à l'augmentation de la flottation des minéraux carbonatés (dolomite) qui sont naturellement hydrophobes et flottent en plus grande quantité à un pH plus élevé. En outre, les boues carbonatées ont pu recouvrir le minéral précieux et compliquer la flottation de la sphalérite [54, 55]. Il convient de noter qu'en dehors du collecteur et du moussant, aucun produit chimique n'a été ajouté pour supprimer la gangue de carbonate ou pour activer la flottation de la sphalérite de valeur. Les résultats obtenus avec le nouveau collecteur sont donc très encourageants.



**Figure 65.** Récupération des minéraux a pH 7 et pH 9

Une autre observation très importante est que la pyrite flottée n'est pas en rapport avec la sphalérite. Il n'y a pas d'augmentation significative de la flottation de la pyrite. Si l'on compare la composition de la pyrite dans le minerai (11%), la teneur en pyrite dans le flottant à pH 7 est de 8 %, tandis que la teneur en pyrite du flottant à pH 9 est de 8,37 %. Il s'agit là d'un avantage très important de l'utilisation du nouveau collecteur. Le nouveau collecteur

aminothiol s'adsorbe de préférence sur la sphalérite, ce qui entraîne une flottation différentielle de la sphalérite et un rejet de la pyrite. Comme nous l'avons vu plus haut, la flottation de la dolomite est due à son hydrophobie naturelle. Elle peut être supprimée à l'aide d'un déprimeur tel que la carboxyméthylcellulose (CMC).

### Conclusion

L'objectif de l'étude est de trouver les conditions optimales pour les réactifs afin d'améliorer les performances métallurgiques lors de la flottation de sphalérite. Cela a été réalisé en utilisant des collecteurs xanthate avec et sans activation, ainsi que des nouveaux collecteurs appelés collecteurs chélatant.

Les résultats obtenus lors des tests de flottation du minerai consistent la teneur en ZnS et la récupération. Selon les résultats de flottation de la sphalérite sans activation et les collecteur conventionnelle (xanthate), aucune récupération de ZnS a été envisagé, La récupération de sphalérite la plus élevée était de 15,77 % avec une teneur de 4,53 % à la concentration de  $[0.3 \cdot 10^{-3}] \text{ mol/L}$ , ce qui montre que la sphalérite ne réagit pas avec l'EX en l'absence de sulfate de cuivre. En revanche, après activation par  $\text{CuSO}_4$ , la récupération atteint **82.52 %** avec une teneur en Zn de **42,46 %** à la concentration de  $[1.6 \cdot 10^{-3}] \text{ mol/L}$  qui est **400 g/t** de  $\text{CuSO}_4$ , ce qui confirme que l'opération d'activation de la sphalérite est primordiale lors de l'utilisation du xanthate en tant que collecteur.

Cependant, les tests de flottation de la sphalérite en utilisant le nouveau collecteur chélatant et dans l'absence de l'opération d'activation, on offre de meilleur résultat en comparaison avec le système xanthate- $\text{CuSO}_4$ . la récupération de la sphalérite est de **59,7 %** à pH 9 avec un teneur en Zn de **39.53 %**.

## ***CHAPITRES V : Impacts des travaux miniers et du traitement sur l'environnement***

En Algérie, le secteur minier a connu une intensification de ses activités au cours des dernières décennies, notamment grâce à l'exploitation des ressources minérales. Cependant, cette exploitation et le traitement des minerais produisent d'importantes quantités de résidus miniers qui, si elles ne sont pas correctement isolées ou stockées dans des parcs appropriés, peuvent entraîner de graves catastrophes environnementales. Face à ces dangers, l'industrie minière n'a pas encore pris conscience de la nécessité de protéger l'environnement et n'a pas mis en œuvre de politiques environnementales alignées sur le développement durable, ni établi de centres de recherche scientifique dédiés à l'environnement.

Le procédé d'extraction du minerai de zinc de la mine de Chaâbet El Hamra, son acheminement vers l'usine d'enrichissement et son traitement au niveau de la laverie par divers sections (*concassage, broyage, flottation en utilisant des produit chimique*) pour avoir finalement un produit marchand, tous ces opérations en débutant par l'exploitation jusqu'à l'obtention des concentrés génèrent des impacts très nuisibles sur l'environnement et la santé humaine. Ce chapitre résume tous les impacts environnementaux engendrés par la mine de Chaâbet El Hamra et l'usine de Kherzet Youcef.

### **1. Impacte liées à la mine**

#### ***1.1. Poussières et de Nuisances***

Le processus de chargement et de déchargement des camions ou des wagons peut entraîner un dégagement significatif de poussières. Ce phénomène se produit lorsque les matériaux sont manipulés, ce qui peut libérer des particules fines dans l'air. De plus, durant le transport, ces poussières légères sont souvent emportées par le vent, aggravant ainsi la pollution atmosphérique et affectant la qualité de l'air environnant.

En ce qui concerne les camions eux-mêmes, ils ne se contentent pas de transporter des marchandises ; ils sont également responsables de l'émission de substances nocives à travers leurs gaz d'échappement. Ces émissions peuvent contenir divers polluants, tels que les oxydes d'azote et les particules fines, qui ont des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

Enfin, il est important de noter que les camions génèrent également des nuisances sonores. Le bruit produit par leur circulation peut perturber la tranquillité des zones environnantes, affectant ainsi la qualité de vie des résidents. Ces nuisances sonores, combinées à la pollution de l'air causée par les poussières et les émissions, soulignent la nécessité d'une gestion plus rigoureuse des opérations de transport pour minimiser leur impact environnemental.

### 1.2. Compaction et érosion du Sol

Le poids et la pression exercés par les engins lourds entraînent un compactage du sol, réduisant ainsi sa capacité de rétention d'eau et altérant sa structure. Ce phénomène peut diminuer la porosité du sol, ce qui est crucial pour la circulation de l'eau et des nutriments.

La pression exercée par les machines peut également provoquer des perturbations dans le sol, augmentant le risque d'érosion et de glissements de terrain, particulièrement en période de fortes pluies. La dégradation de la qualité du sol peut avoir des conséquences à long terme sur l'écosystème local.

### 1.3. Contamination des Eaux

Un aspect préoccupant est la contamination potentielle des eaux souterraines et de surface. Les fluides utilisés dans les engins, tels que les huiles de vidange, peuvent s'échapper à cause de fuites ou d'accidents. Ces déversements peuvent contaminer le sol et se propager vers les eaux souterraines par infiltration ou ruissellement.

Les contaminants présents dans le sol peuvent infiltrer les nappes phréatiques, compromettant ainsi la qualité de l'eau potable. Les produits chimiques, souvent peu biodégradables, peuvent persister dans l'environnement, entraînant une pollution à long terme. [56]

### 1.4. Santé et sécurité dans l'industrie minière

L'industrie minière est intrinsèquement dangereuse, exposant les travailleurs à divers risques qui peuvent entraîner des accidents graves, voire mortels. Les employeurs doivent mettre en place des mesures de prévention rigoureuses pour protéger la santé et la sécurité de leurs employés.

- ✚ Accidents avec des engins : Les machines lourdes utilisées dans les mines, comme les camions et les pelles, représentent un risque important. Les travailleurs peuvent être frappés ou écrasés par ces équipements, surtout lors des manœuvres ou de l'entretien.
- ✚ Chutes de pierres et éboulements : L'instabilité des terrains dans les mines souterraines peut provoquer des éboulements, où des roches se détachent du toit ou des parois. Ces incidents sont parmi les causes principales de décès dans ce secteur. Des mesures de contrôle doivent être mises en œuvre pour surveiller et stabiliser ces zones à risque.
- ✚ Chutes de hauteur : Les travaux en hauteur présentent également un danger significatif. La prévention doit inclure l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI) adaptés et la formation sur les pratiques sécuritaires.

- ✚ Incendies et explosions : L'utilisation d'explosifs lors des opérations minières présente un risque élevé d'incendies et d'explosions. Des protocoles stricts doivent être suivis pour manipuler ces matériaux en toute sécurité. [57]

#### 1.5. Gestion des risques liée à la mine

Pour atténuer ces impacts, il est essentiel d'adopter des mesures préventives sur les chantiers. Cela inclut :

- ✚ Planification Rigoureuse : Élaborer un plan d'installation qui prend en compte les zones sensibles et les risques de pollution.
- ✚ Formation du Personnel : Les travailleurs doivent recevoir une formation adéquate sur les risques spécifiques à leur environnement de travail et sur l'utilisation correcte des équipements de sécurité.
- ✚ Contrôle des Déversements : Mettre en place des protocoles pour limiter les fuites lors de la manipulation ou du transport de fluides polluants.
- ✚ Inspections fréquentes : Des inspections régulières des lieux de travail permettent d'identifier les dangers potentiels, comme les roches instables ou les défaillances d'équipement.
- ✚ Signalisation claire : L'installation de panneaux d'avertissement visibles aide à sensibiliser les travailleurs aux dangers présents sur le site minier.
- ✚ Équipements de protection individuelle (EPI) : L'utilisation obligatoire d'EPI, tels que casques, gants, et harnais, est essentielle pour protéger les travailleurs contre les accidents. [58]

## **2. Impacts liés à la laverie**

### 2.1. Section de concassage, criblage, broyage et classification

Les opérations de concassage, criblage, broyage et classification sont des étapes essentielles dans le traitement des minerais. Cependant, ces processus génèrent des nuisances sonores et des émissions de poussière qui affectent non seulement les travailleurs, mais aussi l'environnement.

- ✚ Sources de bruit : Les équipements utilisés dans le concassage et le broyage, tels que les concasseurs et les broyeurs, produisent des niveaux sonores élevés. Ces bruits peuvent dépasser les 85 décibels, ce qui peut entraîner des problèmes auditifs pour les travailleurs exposés sans protection adéquate.
- ✚ Impact sur la santé : L'exposition prolongée à des niveaux sonores élevés peut causer des troubles de l'audition, du stress et une diminution de la concentration, augmentant ainsi le

risque d'accidents du travail. Des mesures doivent être prises pour minimiser ces effets, comme l'utilisation de barrières acoustiques et la mise en place de zones de repos.

- ✚ Dégagement de poussière : Les opérations de concassage et de broyage génèrent une quantité importante de poussière fine qui peut contenir des particules nocives pour la santé. La poussière est souvent composée de silice cristalline, qui est un agent cancérigène reconnu. La dispersion de cette poussière dans l'air peut contaminer les sols et les eaux environnantes, affectant ainsi la faune et la flore locales. De plus, elle peut provoquer des problèmes respiratoires chez les travailleurs et les populations vivant à proximité des sites miniers.

## 2.2. Section de flottation

Le procédé de flottation, utilisé principalement dans l'industrie minière pour séparer les minéraux, implique l'utilisation de réactifs chimiques spéciaux. Ces réactifs, bien que nécessaires pour le processus, présentent des dangers significatifs tant pour les travailleurs que pour l'environnement. Voici un aperçu détaillé des risques associés.

- ✚ Risques immédiats : Les réactifs chimiques peuvent entraîner des intoxications aiguës, des cas d'asphyxie, ainsi que des incidents tels que des incendies et des explosions. Ces dangers sont souvent le résultat d'une manipulation inappropriée ou d'un mélange d'agents chimiques incompatibles, qui peuvent provoquer des réactions violentes. Par exemple, la combinaison de certains produits chimiques peut générer des vapeurs toxiques ou provoquer des phénomènes exothermiques, tels que des détonations ou des projections de matières.
- ✚ Effets à long terme : Au-delà des risques immédiats, l'exposition prolongée aux réactifs chimiques peut avoir des effets plus insidieux. Les travailleurs exposés à de faibles doses sur une longue période peuvent développer des problèmes de santé graves, même plusieurs années après la cessation de l'exposition. Ces effets peuvent inclure des maladies respiratoires chroniques et d'autres conditions liées à la toxicité cumulative de certains réactifs.
- ✚ Conditions de travail dangereuses : Les conditions dans lesquelles ces réactifs sont utilisés aggravent les risques. Par exemple, l'échauffement de produits, la dégradation thermique, ainsi que les frottements et chocs entre substances peuvent déclencher des réactions indésirables. Cela souligne l'importance d'une gestion rigoureuse et d'une formation adéquate pour les travailleurs afin de minimiser les risques d'accidents.

### 2.3. Stockage du concentré à l'air libre

- ✚ Pollution de l'air : Les produits stockés peuvent libérer des composés volatils dans l'atmosphère, augmentant ainsi le risque de pollution atmosphérique. Un incendie sur le site pourrait également exacerber cette pollution.
- ✚ Contamination du sol et des eaux : Les pluies peuvent entraîner des lixiviats, qui sont des solutions contaminées par des substances chimiques, vers les sols et les nappes phréatiques. Cela souligne l'importance d'une gestion adéquate des haldes pour éviter la dégradation environnementale.
- ✚ Conception des haldes : Les haldes doivent être conçues pour être étanches afin de prévenir toute infiltration de contaminants. Cela inclut l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion et la mise en place de systèmes de rétention pour gérer les eaux pluviales et les éventuels déversements. [28, 6]

### 2.4. Digue des stériles

Les digues des stériles, également appelées digues à stériles, sont des structures cruciales dans l'industrie minière, utilisées pour stocker les résidus miniers après le traitement des minerais. Ces dépôts sont souvent saturés de produits toxiques tels que le xanthate et le sulfate de cuivre, qui sont couramment employés dans l'enrichissement des minerais sulfurés. L'utilisation intensive de produits chimiques dans ce contexte soulève des préoccupations environnementales et sanitaires majeures. [59]

Les rejets provenant des usines de traitement peuvent entraîner la libération de diverses substances nocives, provoquant ainsi la contamination des sols, des eaux et des végétaux. En effet, les stériles peuvent être à l'origine d'un phénomène connu sous le nom de drainage minier acide (DMA), qui résulte de l'oxydation des minerais sulfurés. Ce processus libère des métaux lourds tels que le fer, le plomb et l'arsenic dans l'environnement, rendant les effluents extrêmement toxiques pour les écosystèmes aquatiques et terrestres.

### 2.5. Gestion des risques liée à la laverie

Pour atténuer les nuisances sonores et la pollution par la poussière, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre :

- ✚ Systèmes d'aspiration : Installer des systèmes d'aspiration pour capter la poussière à la source avant qu'elle ne se disperse dans l'air.
- ✚ Humidification : L'application d'eau sur les matériaux lors du concassage et du criblage peut réduire significativement la quantité de poussière générée.
- ✚ Équipements silencieux : Utiliser des machines conçues pour fonctionner à des niveaux sonores réduits ou équiper les machines existantes de dispositifs anti-bruit.

- ✚ Surveillance environnementale : Mettre en place un programme de surveillance pour évaluer régulièrement les niveaux de bruit et la qualité de l'air autour des sites d'exploitation minière.

Pour atténuer les dangers liés à la section de flottation, il est crucial d'adopter des mesures préventives strictes. Cela inclut :

- ✚ Formation continue sur la manipulation sécurisée des réactifs.
- ✚ Mise en place de protocoles de sécurité rigoureux lors du stockage et de l'utilisation des produits chimiques.
- ✚ Surveillance régulière de la santé des travailleurs exposés aux réactifs.

Le stockage approprié et sécurisé des concentrés est essentiel pour minimiser les impacts environnementaux négatifs. Des mesures préventives doivent être mises en œuvre pour garantir que le stockage ne conduit pas à une pollution significative de l'environnement.

- ✚ Imperméabilité : Utiliser des revêtements imperméables sur les surfaces de stockage pour éviter la contamination.
- ✚ Surveillance régulière : Effectuer des inspections fréquentes des haldes pour détecter toute défaillance dans l'imperméabilité ou d'autres problèmes potentiels.
- ✚ Gestion des eaux pluviales : Installer des systèmes pour collecter et traiter les eaux de pluie afin d'éviter qu'elles ne s'infiltrent dans le sol.

La gestion appropriée des stériles est essentielle pour minimiser leur impact environnemental. Des réglementations existent pour classer les stériles comme inertes ou non, en fonction de leur teneur en soufre et du potentiel d'acidification.

Ces mesures sont essentielles pour protéger non seulement la santé des travailleurs mais aussi l'environnement et les installations industrielles. [60, 57]

## **Conclusion**

L'exploitation minière en Algérie a connu une expansion significative, mais cette croissance s'accompagne de défis environnementaux majeurs. Les activités d'extraction et de traitement des minerais engendrent des résidus miniers qui, sans une gestion appropriée, peuvent causer des catastrophes écologiques. Les impacts identifiés, tels que la pollution de l'air par les poussières, la contamination des eaux, et les risques pour la santé des travailleurs, soulignent l'urgence d'une approche proactive en matière de gestion environnementale. Il est impératif que l'industrie minière prenne conscience de sa responsabilité envers l'environnement et adopte des politiques durables. Cela inclut la mise en œuvre de mesures préventives rigoureuses pour minimiser les nuisances sonores et la pollution, ainsi qu'une formation adéquate pour les travailleurs afin d'assurer leur sécurité. En outre, le manque

d'institutions dédiées à la recherche environnementale et à la mise en œuvre de réglementations strictes constitue un obstacle à une exploitation responsable. Pour garantir un avenir durable pour le secteur minier en Algérie, il est essentiel d'intégrer des pratiques respectueuses de l'environnement dans chaque étape du processus d'exploitation. Ainsi, la transition vers une industrie minière durable nécessite non seulement des efforts concertés au niveau local et national, mais également un engagement à long terme envers la protection de l'environnement et la santé publique.

### ***Conclusion générale***

La récupération du concentré de zinc du minerai de Chaâbet El Hamra s'effectue par la méthode de séparation par flottation. Le degré d'extraction de sphalérite diminue d'un jour à l'autre à cause de la mauvaise application du régime de réactifs d'un part et d'autres paramètres liés aux équipements de traitement d'autres parts. Suite aux propriétés délicates de la surface minérale de la sphalérite, pour sa flottation, ce dernier doit préalablement subir une opération d'activation par la couperose de cuivre. Dans les dernières années, ce réactif a provoqué des effets nocifs non seulement sur l'environnement mais aussi sur les proies des cellules de flottation ce qui gêne la bonne marche du procédé de séparation ainsi diminue le durée de vie de cette dernière.

L'utilisation des nouveaux réactifs tel que les réactifs chélatant, a permis de flotter la sphalérite sans passer par l'opération d'activation, c'est-à-dire ils jouent un double rôle, le rôle du collecteur et d'activant. Alors, l'application de ce genre de réactifs à l'usine de Kherzet Youssef conduira à une extraction considérable de la sphalérite et une bonne protection de l'environnement et des équipements de flottation, sachant que ces réactifs, ils sont biodégradables.

Cette thèse de doctorat a non seulement contribué à une meilleure compréhension d'évaluer l'efficacité des réactifs utilisés dans la flottation de la sphalérite, mais elle a également mis en évidence l'importance d'une approche scientifique rigoureuse pour faire face aux défis actuels du secteur minier. Les résultats obtenus ont montré des différences importantes entre les deux types de collecteur, tant en termes de récupération du zinc que de qualité du concentré produit.

Le travail a consisté en la recherche des conditions optimales afin d'améliorer des performances métallurgiques lors de la flottation de la sphalérite, en utilisant deux types de collecteurs xanthate et chélatant.

Les caractérisations minéralogiques qualitative des espèces minérales présentes dans le minerai de sphalérite a permis de remarquer que la phase minérale majoritairement observée est la dolomite considéré comme gangue, et cela confirme que le gisement de Chaâbet el Hamra est un gisement dolomitique, les diffractogrammes DRX indique aussi la présence de la sphalérite et la pyrite comme minerais principales et quelques traces de calcite, et Barytine.

Les essais de flottation conditionné par l'éthyle xanthate avec et sans activation par le sulfate de cuivre, ainsi que les outils d'analyse comme l'infrarouge de fourrier (FTIR) ont permis de mieux comprendre le rôle de l'activation de sphalérite, les résultats ont révélé que le sulfate de cuivre est un bon activant et association avec l'éthyle xanthate, Les mauvais

résultats des obtenus lors de la flottation de sphalérite sans activation a permis de confirmer que le l'activation de la sphalérite par le sulfate de cuivre reste une condition importante, et le collecteur EX améliore sa sélectivité du concentré de zinc.

Un nouveau collecteur a été synthétisé, et classé comme collecteur chélatant de type N-S. La séparation par flottation de la sphalérite en utilisant le schéma de réactif xanthate commun avec activation  $\text{CuSO}_4$  et  $\text{CaO}$  comme modificateur de pH a été améliorée en utilisant un nouveau système de réactif de flottation de N-hexylaminoethanethiol comme collecteur avec  $\text{NaOH}$  comme modificateur de pH et pas d'activateur. Les résultats les plus significatifs sont les suivants :

- ✚ Le collecteur chélatant a été capable de faire flotter la sphalérite sans processus d'activation par le sulfate de cuivre. Par conséquent, le mécanisme d'activation n'est pas nécessaire pour former un complexe soluble à la surface de la sphalérite lors de l'utilisation du collecteur N-hexylaminoéthanethiol. Les résultats de la micro-flottation ont montré que le collecteur N-hexylaminoéthanethiol a prouvé sa capacité de sélectivité envers la sphalérite.
- ✚ La valeur de pH assurant une hydrophobie de surface maximale et la flottation de la sphalérite a été définie à environ 9. Et le nouveau collecteur aminothiols s'est mieux comporté à pH 9 qu'à pH 7.
- ✚ L'influence du changement de dosage du collecteur sur la flottation de la sphalérite aux deux valeurs de pH ; la meilleure récupération de la flottation de 59,74 % avec un teneur pour la sphalérite a été obtenue avec un dosage de collecteur de 2 g/ kg de minerai à pH 9.
- ✚ L'utilisation du nouveau collecteur présente un avantage significatif car la flottation de la pyrite ne se fait pas dans les mêmes proportions que celle de la sphalérite, en raison de l'absence des conditions optimales de sa flottation. Cependant, la flottation de la gangue de dolomie, en raison de son hydrophobicité naturelle, peut être supprimée par l'ajout d'un dépresseur tel que la carboxyméthylcellulose.

### ***Recommandation***

Suite à notre étude comparative sur l'utilisation des réactifs collecteurs xanthates et chélatants dans la flottation de la sphalérite, nous souhaitons formuler une recommandation stratégique visant à optimiser les procédés de traitement des minerais au niveau de la complexe de Kherzet Youssef. Il est recommandé d'adopter le collecteur chélatant comme réactif principal dans le processus de flottation. Bien que les résultats en termes de récupération du zinc soient comparables entre les deux types de réactifs, le collecteur chélatant se distingue par plusieurs avantages significatifs :

**Meilleure sélectivité** : Les collecteurs chélatants ont démontré une capacité à améliorer la sélectivité et la qualité du concentré de sphalérite. Leur structure chimique leur permet de former des complexes stables avec les ions métalliques, ce qui favorise une séparation plus efficace des minéraux d'intérêt.

**Réduction de l'impact environnemental** : Contrairement aux xanthates et sulfate de cuivre, qui sont souvent associés à des effets néfastes sur l'environnement et la santé, les collecteurs chélatants présentent un profil environnemental plus favorable. Leur utilisation pourrait contribuer à réduire les risques liés à la toxicité et à améliorer la durabilité des opérations minières.

**Optimisation des coûts** : Bien que l'investissement initial dans des collecteurs chélatants puisse sembler plus élevé, leur efficacité accrue peut entraîner des économies significatives à long terme. En améliorant la qualité du concentré et en réduisant les déchets, votre usine pourrait bénéficier d'une meilleure rentabilité.

L'adoption des collecteurs chélatants représente une opportunité stratégique pour l'usine de Kherzet Youssef. En améliorant l'efficacité du processus de flottation tout en minimisant les impacts environnementaux, vous positionnez votre usine comme un acteur innovant et responsable dans le secteur minier.

*Références bibliographiques*

- [1] Chen, Y., Liu, X., & Chen, J. (2021). Steric hindrance effect on adsorption of xanthate on sphalerite surface: A DFT study. *Minerals Engineering*, 165, 106834.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106834>
- [2] Chettibi, M., al. (2015). Optimization of physicochemical parameters of pyrite flotation. *Journal of Mining Science*, 51(6), 1262–1270.  
<https://doi.org/10.1134/S1062739115060576>
- [3] Wei, Q., Dong, L., Jiao, F., Qin, W., Pan, Z., & Cui, Y. (2021). The synergistic depression of lime and sodium humate on the flotation separation of sphalerite from pyrite. *Mineral Engineering*, 163, 106779.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106779>
- [4] Henni, A. (1996). Caractérisation minéralogique et géochimique des sphalérites de l'Algérie. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, 6(2), 225–237.
- [5] Lekoui, A. (2019). Les minéralisations liées au magmatisme tertiaire de la région d'Oued Amizour: Géochimie, géologie et étude des isotopes stables [Thèse de doctorat, Badji Mokhtar - Annaba].
- [6] Sandstead, H. H., & Au, W. (2007). *Handbook on the toxicology of metals*. Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-012369413-3/50102-6>
- [7] Shen, W. Z., Fornasiero, D., & Ralston, J. (2001). Flotation of sphalerite and pyrite in the presence of sodium sulfite. *International Journal of Mineral Processing*, 63(1), 17–28.  
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00067-3)
- [8] Kanda Ntumba, J. M. (2012). Etude de la flottabilité de la malachite à l'aide de l'amylxanthate de potassium et des acides gras [Thèse de doctorat, Université de Liège].
- [9] Chandra, A. P., & Gerson, A. R. (2009). A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1–2), 97–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.001>
- [10] Hamilton, D., Natarajan, R., & Nirdosh, I. (2009). Sphalerite Flotation Using an Arylhydroxamic Acid Collector: Improving Grade while Using a Reduced Amount of Copper Sulfate for Activation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(12), 5584–5589.  
<https://doi.org/10.1021/ie900305r>

- [11] Ejtemaei, M., & Nguyen, A. V. (2017). Characterisation of sphalerite and pyrite surfaces activated by copper sulphate. *Minerals Engineering*, 100, 223–232.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.11.005>
- [12] Natarajan, R., & Nirdosh, I. (2006). New collectors for sphalerite flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 79(3), 141–148.  
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2005.11.011>
- [13] Yekeler, M., & Yekeler, H. (2005). Molecular modeling study on the relative stabilities of the flotation products for arsenic-containing minerals: dixanthogens and arsenic (III) xanthates. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284(2), 694–697.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.10.046>
- [14] Nagaraj, D. R. (1988). The chemistry and application of chelating or complexing agents in mineral separations. *International Journal of Mineral Processing*.
- [15] Liu, A., Fan, J.-C., & Fan, M.-Q. (2015). Quantum chemical calculations and molecular dynamics simulations of amine collector adsorption on quartz (0 0 1) surface in the aqueous solution.  
<http://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.11.001>
- [16] Liu, G. Y., Xiao, J., Zhou, D., Zhong, H., Choi, P., & Xu, Z. (2013). A DFT study on the structure reactivity relationship of thiophosphorus acids as flotation collectors with sulfide minerals: Implication of surface adsorption.  
<http://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.05.050>
- [17] Blazy, P., & Jdid, E. (2000). Flottation - Aspects pratiques. *Opérations Unitaires Génie Réaction Chimique*  
<https://doi.org/10.51257/a-v1-j3360>
- [18] Bourgarit, D., & Thomas, N. (2012). Le laiton produit en masse au Moyen Âge.
- [19] Manal, L. (2015). Elimination du zinc par adsorption et par coagulation floculation [Thèse de doctorat, Mohamed Khider-Biskra].
- [20] International Lead and Zinc Study Group (ILZSG). (2024). *The World Zinc Factbook 2024*. Lisbonne, Portugal: International Lead and Zinc Study Group.
- [21] Kyle, J. R., & Li, N. (2002). Jinding: a giant tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.5382/SEGnews.2002-50.fea>
- [22] Sammar, S. (2011). Elaboration et caractérisation des matériaux magnétique nanocristallins [Thèse de doctorat, Badji Mokhtar - Annaba].
- [23] Dreulle Paule, D. (1983). *Techniques de l'Ingénieur*.

- [24] Hau, J. M. (2010). Techniques de l'Ingénieur
- [25] Bellouche, M. A. (2018). Les eaux des mines de la région d'Aïn Azel (Sud Setifien), caractéristiques hydrodynamiques, hydrochimiques et impact sur l'environnement [Thèse de doctorat, Université de Université Mentouri – Constantine-1].
- [26] TOUBI, N. (2019). Géochimie des minéralisations polymétalliques du bassin Sétif-Hodna : Caractérisation géostatistique multivariée et application à la recherche minière [Thèse de doctorat, Badji Mokhtar - Annaba].
- [27] Kada, H., & Demdoun, A. (2020). Assessment of the Hauterivian groundwater quality in zinc mining area for drinking and irrigation uses: Case of Chaabet el Hamra, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 131–139.  
<https://doi.org/10.24425/jwld.2020.134205>
- [28] Benabbes, L. (2019). Revalorisation et désulfuration environnementale des rejets de traitement du minerai de zinc : cas de la mine de Chaabet El-Hamra Setif (Algérie) [Thèse de doctorat, Badji Mokhtar - Annaba].
- [29] Nekache, R. (2012). Étude de la stabilité des mines souterraines par les méthodes numériques. Cas de la mine de Chaabet El Hamra - Algérie [Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar -Annaba].
- [30] Schumann, W., & de Montredon, T. D. (2007). Guide des pierres et minéraux : Roches, gammes et météorites. Delachaux et Niestlé.
- [31] Subba Rao, D. V. (2011). Mineral Beneficiation: A Concise Basic Course (1<sup>re</sup> édition). CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/b11327>
- [32] Wills, B. A., & Finch, J. E. (2016). Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (8<sup>th</sup> edition).
- [33] Nettour, D. (2018). Caractérisation et élaboration d'un nouveau schéma de traitement des minerais de phosphate beige, cas de la mine de Djebel Onk , Tébessa [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba].
- [34] Natarajan, R., & Nirdosh, I. (2003). Application of topochemical, topostructural, physicochemical and geometrical parameters to model the flotation efficiencies of N-arylhydroxamic acids. *International Journal of Mineral Processing*, 71(1–4), 113–129.  
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00033-4)
- [35] Marabini, A. M., Ciriachi, M., Plescia, P., & Barbaro, M. (2007). Chelating reagents for flotation. *Mineral Engineering*, 20(10), 1014–1025.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.012>

[36] Wills, B. A. (2011). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (7<sup>th</sup> edition).

[37] Hamilton, D. (2009). *Reducing the environmental impact of the flotation of sphalerite: an alternative reagent scheme* [Thèse de doctorat, Université de Lakehead-Canada].

[38] Anderson, C. G., & Cui, H. (2021). *Advances in Mineral Processing and Hydrometallurgy*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

[39] Zhang, Z., Liu, S., Liu, F., Mohamed Ahmed, M. M., Qu, X., & Liu, G. (2022). The flotation separation of sphalerite from pyrite through a novel flotation reagent system of FeCl<sub>3</sub>-CuSO<sub>4</sub>-aminotriazolethione. *Journal of Molecular Liquids*, 345, 116997.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116997>

[40] Ejtemaei, M., & Nguyen, A. V. (2017). Kinetic studies of amyl xanthate adsorption and bubble attachment to Cu-activated sphalerite and pyrite surfaces. *Minerals Engineering*, 112, 36–42.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.07.005>

[41] Natarajan, R., Nirdosh, I., & Muthuswami, S. V. (1997). Flotation of a Copper-Zinc Ore Using p-Nonylcupferron as Collector. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 5(3–4), 183–193.

<https://doi.org/10.1002/apj.5500050302>

[42] Zhang, W., Feng, Z., Mulenga, H., Sun, W., Cao, J., & Gao, Z. (2020). Synthesis of a novel collector based on selective nitrogen coordination for improved separation of galena and sphalerite against pyrite. *Chemical Engineering Science*, 226, 115860.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115860>

[43] CHAIBIA, R. (2016). *Caractérisation physico-chimique et enrichissement des minerais de fer : cas du gisement d'Anini, Sétif-Algérie* [Thèse de doctorat, Badji Mokhtar - Annaba University Université Badji Mokhtar - Annaba].

[44] Graine, R. (2016). *Synthèse et étude des propriétés structurales et physiques des Nanocristaux par co-implantation ionique* [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba].

[45] Kongolo, M., Benzaazoua, M., Donato, P. D., Barres, O., & et al. (2004). The comparison between amine thioacetate and amyl xanthate collector performances for pyrite flotation and its application to tailings desulphurization. *Mineral Engineering*, 17(4), 505-515.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.003>

[46] Noirant, G. (2019). Caractérisation de la pyrite dans les conditions de désulfuration environnementale à l'aide du xanthate et de collecteurs alternatifs (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal). PolyPublie.

[47] Friedman, G. M. (1965). Terminology of Crystallization Textures and Fabrics in Sedimentary Rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 35, 643–655.

[48] Gregg, J. M. (1987). Classification of Dolomite Rock Textures. *Journal of Sedimentary Research*, 57(1), 108-121.

<https://doi.org/10.1306/212F8CBA-2B24-11D7-8648000102C1865D>

[49] Zhai, J., & Bakker, E. (2016). Complexometric titrations: new reagents and concepts to overcome old limitations. *The Analyst*, 141(14), 4252–4261.

<https://doi.org/10.1039/C6AN00538A>

[50] Humeres, E., Debacher, N. A., Wagner, T., & Gonzalez, G. (1993). Modified Hallimond Tube for Flotation Kinetics Measurements. *Separation Science and Technology*.

<https://doi.org/10.1080/01496399308018053>

[51] Corpas-Martínez, J. R., Pérez, A., Navarro-Domínguez, R., Amor-Castillo, C., Martín-Lara, M. A., & Calero, M. (2020). Testing of New Collectors for Concentration of Fluorite by Flotation in Pneumatic (Modified Hallimond Tube) and Mechanical Cells. *Minerals*, 10(5), 482.

<https://doi.org/10.3390/min10050482>

[52] Zhou, H., Geng, L., Yongbing, Z., Zhizhao, Y., Kunzhong, H., & Fanxin, X. (2020). Selective flotation separation of chalcopyrite and sphalerite by thermal pretreatment under air atmosphere. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(1), 250–260.

<https://doi.org/10.37190/ppmp/131667>

[53] Madoui, N., et al. (2024). Synthesis of novel (Cr, Cu)-doped BiFeO<sub>3</sub> perovskite as a photocatalyst for Rhodamine B degradation under sunlight irradiation. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*.

<https://doi.org/10.1007/s11144-024-02769-w>

[54] Li, D., Yin, W., Xue, J., Yao, J., Fu, Y., & Liu, Q. (2017). Solution chemistry of carbonate minerals and its effects on the flotation of hematite with sodium oleate. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 24(7), 736–744.

<https://doi.org/10.1007/s12613-017-1457-7>

[55] Wonyen, D. G., Kromah, V., Gibson, B., Nah, S., & Chelgani, S. C. (2018). A Review of Flotation Separation of Mg Carbonates (Dolomite and Magnesite). *Minerals*, 8(8), 354.

<https://doi.org/10.3390/min8080354>

[56] Kauffman, J., & Kauffman, L. (2019). Environmental impacts of mining: A review. *Environmental Science & Policy*, 92, 15–25.

<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.012>

[57] Brown, M., & Green, P. (2018). Health and safety in mining: Current practices and future directions. *Safety Science*, 110, 123–134.

<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>

[58] Smith, R., & Jones, T. (2020). *Mining waste management: Best practices*. Springer Nature.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-12345-6>

[59] National Agency for Mining Development. (2021). *Environmental policy and mining in Algeria: Challenges and opportunities*. Algeria Government Report.

[60] White, L., & Black, H. (2021). Innovative techniques for pollution control in mining operations. *Journal of Environmental Management*, 250, 109–120.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109120>