



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et de la géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Génie minier

Option : Minéralurgie

Valorisation et traitement de rejets miniers. Caractérisation et impacts environnementaux : Cas de la mine de Kherzet Youcef - Setif -

Présenté et soutenu par

AKACHE Aymen

BEDGHIOU Kaouther

Devant le jury:

		Grade	Etablissement
Président :	AMIRECH Abdkrim	MCB	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Encadreur :	AOUATI Mourade Salim	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs :	KRIM Mansour	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2020-2021



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم: 121 مؤرخ في: 2021/05/20
يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،
- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا
لجامعة العربي التبسي - تبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09
- 08 المؤرخ في: 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي
يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة
7 منه،

- وبموجب القرار رقم 357 المؤرخ في 15 جوان 2020، المعدل للملحق القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015
و المتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات التسجيل الوطني بعنوان السنة الجامعية 2015-2016 بجامعة تبسة، اختصاص
دراسة المعادن.
- وبموجب المقرر رقم 070 المؤرخ في 2021/05/19 و المتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،
و بعد الاطلاع على تقرير لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: يُرخصُ للطالب(ة) كوثر بدغيو، المولود (ة) بتاريخ 18/04/1998 ب خنشلة، بمناقشة مذكرة الماستر
والموسومة ب

**Valorisation et traitement de rejets miniers. Caractérisation et impacts environnementaux:
Étude de cas.**

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني
بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمن نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملفّ البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة
العربي التبسي.

جُرز ب تبسة، في: 2021/05/20

جامعة العربي التبسي تبسة
عن المدير، ويتفويض منه
مدير معهد المناجم والجيوتكنولوجيا
مدير معهد المناجم والجيوتكنولوجيا



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم 070 مؤرخ في : 2021/05/19
يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة.

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،

- وبموجب القرار رقم 357 المؤرخ في 15 جوان 2020، المعدل للملحق القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات التسجيل الوطني بعنوان السنة الجامعية 2015-2016 بجامعة تبسة، اختصاص دراسة المعادن.

- وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في 2021/05/09،

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضّرة من طرف الطالب (ة):

كوثر بدغيو، المولود (ة) بتاريخ 1998/04/18 بـ خنشلة، وأيمن عكاش، المولود (ة) بتاريخ 1997/10/07 بـ أريس- باتنة،

والموسومة بـ

Valorisation et traitement de rejets miniers. Caractérisation et impacts environnementaux: Étude de cas.

والمسجلين بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصّفة
1	مراد سليم عواطي	أستاذ محاضر-أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مؤطرا
2	عبد الكريم عميرش	أستاذ محاضر-ب	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
3	منصور كريم	أستاذ مساعد-أ	جامعة العربي التبسي - تبسة	مناقشا

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كلّ من الطالب المعني والمُشرف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُزّر ب تبسة، في: 2021/05/19

مدير المعهد المناجم بالمناجم
والتفويض منه
لـ: مدير المعهد المناجم





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة



مقرر رقم: 1% مؤرخ في: 2021/05/20

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إن مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 و المؤرخ في 05 ماي 2021 المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل ويتم المرسوم التنفيذي رقم 09-08 المؤرخ في: 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي بتبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

- وبموجب القرار رقم 357 المؤرخ في 15 جوان 2020، المعدل للملحق القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات التسجيل الوطني بعنوان السنة الجامعية 2015-2016 بجامعة تبسة، اختصاص دراسة المعادن.

- وبموجب المقرر رقم 0.7.0 المؤرخ في 2021/05/19 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،

- وبعد الاطلاع على تقرير لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرخ في

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى: يُرخصُ للطالب(ة) أيمن عكاش، المولود (ة) بتاريخ 1997/10/07 ب أريس- باتنة، بمناقشة مذكرة الماستر والموسومة بـ

**Valorisation et traitement de rejets miniers. Caractérisation et impacts environnementaux:
Étude de cas.**

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملفّ البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرر ب تبسة، في: 2021/05/20

عن المدير
المدير
مدير معهد المناجم
بـ عولمي زولبير

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) عكاش أيمن الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : م.أ.ب.

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 1509077725 و الصادرة بتاريخ 05-18-2016

المسجل بمعهد المناجم قسم تدريس موارد كالتربة

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

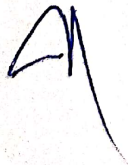
Valorisation et traitement de rojets miniers caractérisation et impacts

environnementaux

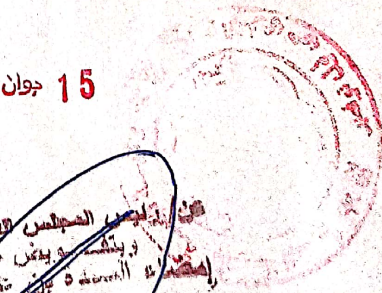
أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

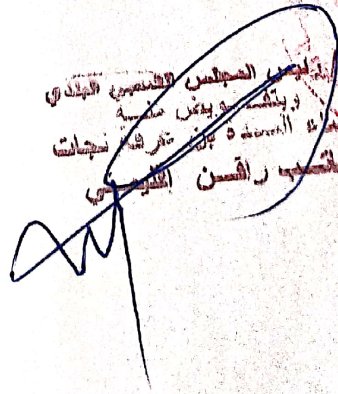
التاريخ:

إمضاء المعني (ة)



15 جوان 2021


مجلس التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة العربي التبسي
ت.ب. 34000 تبسة
الجزائر



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) كورثي الصفه : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالبه

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 1.00.49.843.7 و الصادرة بتاريخ 2016-04-09.

المسجل بمعهد لمتزا قسم تمش للبحر و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

..... مذكرة تخرج عنوان

Valorisation et traitement de sujets miniers... Coopération et impacts environnementaux

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:

إمضاء المعني (ة)

16 جوان 2021

عن رئيس مجلس التفتيش العلمي
م. عبد الحميد
م. عبد الحميد
م. عبد الحميد
م. عبد الحميد



Remerciement

Nous remercions beaucoup, et avant tout, le seul, le puissant et le grand Allah, pour la force et la puissance qui nous adonné tout au long de nos années d'étude.

*Nous exprimons notre grande reconnaissance et nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. Aouati Salim** pour la confiance qu'il nous témoigné en nous diriger tout au long de ce mémoire sa disponibilité ses encouragements et sa patience qui nous permis de finaliser ce modeste travail.*

Nous tenons à remercier les enseignants de l'institut des mines qui ont participé à notre formation au cours de toutes nos années d'études.

Nous tenons aussi à remercier Mr BENGHAZI Ziad

Nous tenons à remercier également les membres de jury d'avoir accepté de juger notre présent travail.

*Nous voudrions également adresser nos plus sincères remerciements à **Mr. AOULMI Zoubir** le directeur de l'institut des mines.*

*Tous les travailleurs de la mine de Kherzet Youcef- Sétif en particulier **Mme FADHLI Hayat, Mme. MAIOUF Maryam, M. Karim et M. Yacin et M. Fouad***

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont soutenu et aider de près ou de loin pour la réalisation de ce travail

Dédicace

Je dédie ce travail

*A Mon très cher père Mostapha, qui me nourrit
toujours de ses sages conseils.*

*A celle qui m'a donnée la vie et que ma vie n'est
rien sans elle, à ma tendre mère Saida, qui
m'a soutenu d'amour et de bonheur ; tout ce
que je suis, je le doit à elle.*

*A ma chères grand-mère en que j'ai trouvé
La tendresse de ma mère*

A mes chères sœurs Ritadg et Sihame .

Et à mon seul frère Ayoub.

A mes meilleurs amis:

Oussama vidal, Amare, Rida, Adnane, Sife

Toute la famille Akacche.

A mon binôme Badghiou Kaouther.

A tous ceux qui m'aiment de près ou de loin.

Akacche Aymen

Dédicace



Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour ;

A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour

Incessible, à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ces

*Prières **Soraya** ma mère*

A mon support dans ma vie, qui m'a appris m'a supporté et ma dirigé

*Vers la gloire **Hassan** mon père*

*A ma grande sœurs **Imane** et leur enfants **Mirale** et **Haythem**, la source de joie et bonheur*

*A mon bras droit mon seul frère **Amine** et mes petites anges mes sœurs **Anfel** et **Lina***

A toutes les personnes de ma grande famille

*A mes meilleures amies lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur, qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années **Mariama**, **Marwa**, **Nour el Houda**, **Nehad**, **Amira**, **Bouchra**, **Loubna***

*A mes amis **Sief**, et **Aymen** mon binôme merci pour votre amitié et votre respect*

A tous mes professeurs

*et mes amis de promotion universitaire 2021 **Génie minier**
Institut des mines Université Larbi Tébessi - Tébessa*

Kaouther Badghiou

Résumé

Les résidus de la mine Chaâbet El Hamra contiennent des sulfures tels que la pyrite (FeS_2), galène (PbS), chalcopryrite (CuFeS_2), ils sont alentours. Minéraux sulfurés sous l'action de l'oxygène et de l'eau Produire un phénomène de drainage minier acide (DMA). A cette fin, l'échantillon extrait du site des déchets miniers sulfurés de la mine Chaabet El Hamra et soumettre Analyse chimique ; la teneur moyenne en soufre est titrée à 9%. L'analyste au diffractomètre par rayons X a confirmé la présence d'un grand nombre d'inclusions de pyrite qui contient des minéraux secondaires tels que la sphalérite et la galène. Afin de résoudre le problème Drainage minier acide, Un test de processus de désulfuration environnementale, par flottation de la partie riche en pyrite dans le substrat sous pression négative Minéraux à faible teneur en soufre contenant des métaux lourds zinc et plomb. Cette Par conséquent, les résultats obtenus par flottation sont utilisés pour récupérer le soufre de la pyrite pour lutter contre Les émissions qui contiennent une proportion considérable de métaux lourds, en particulier de minéraux mélange (ZnS). De plus, il est recommandé de recouvrir la partie riche en pyrite Le matériau calcaire neutralise le potentiel acide. Déchets miniers à faible teneur en soufre Il doit être recyclé, d'une part pour récupérer le zinc, d'autre part pour réduire Teneur en métaux lourds (ETM) pour éviter de polluer l'eau et le sol. La protection de l'environnement en proposant la construction des bassins de sédimentation par chaulage et le Traitement conventionnel de DMA ainsi le BHD pour traiter des rejets liquide et solides.

Mot clés: Rejets miniers, Minerais sulfurés, DMA, Caractérisation, Désulfuration, , Flottation, pollution environnementale, environnemente

Abstract

Mining waste from the Chaabet El Hamra mine contains sulfides such as pyrite (FeS₂), galena (PbS) and chalcopyrite (CuFeS₂) Which pose a threat to the environment. Sulphide minerals under the effect of oxygen and in the presence of water cause a phenomenon of acid mine drainage. Samples taken at the site of the sulphide mine waste at the Chaabet El Hamra mine and subsequently subjected to chemical analyzes offered an average sulfur content of 9%. X-ray diffractometer analyzes confirm the presence of a considerable inclusion of pyrite containing secondary minerals of sphalerite, and galena. To do this, the tests were directed to an environmental desulphurization process by flotation of the pyrite-rich fraction with depression of the low sulfur mineralogical matrix containing heavy metals of zinc and lead. The results also obtained by flotation are notable in recovery of pyrite sulfur against wastes containing a considerable proportion of heavy metals, in particular the mineral of blende (ZnS). In addition, it is recommended to recover the pyrite-rich fraction with limestone materials to neutralize the acid potential. Sulfur-poor mine wastes must also be recycled to recover zinc and to reduce the heavy metal content (MTE) to prevent contamination of water and soil.

Environmental protection by proposing the construction of sedimentation basins by liming and conventional DMA treatment as well as HDB to treat liquid and solid discharges.

Keywords: *Mining waste, Sulphide ores, AMD, Characterization, Environmental desulfurization, flotation, Environment.*

تحتوي النفايات المنجمية لشعبة الحمرا على الكبريتيدات مثل البايريت، الجلينا والكلكوبيريت والتي تشكل خطرا على البيئة. المعادن الكبريتية تحت تأثير الأوكسجين وفي وجود الماء ، تسبب ظاهرة التصريف المنجمي الحمضي، وللقيام بذلك، أخذت عينات من موقع النفايات المنجمية الكبريتية من منجم شعبة الحمرا ثم خضعت لتحليلات كيميائية ؛ يبلغ متوسط محتوى الكبريت 9٪ . تحاليل أجهزة تحليل الأشعة السينية تؤكد وجود قدر كبير من إدراج البايريت والمحتوي على معادن ثانوية عن الجلينا و البلاندا، ولمواجهة مشكلة التصريف المنجمي الحمضي ، تم توجيه الاختبارات نحو عملية ازالة الكبريتات البيئية ، عن طريق تعويم الجزء الغني بالبايريت و اخفاض المصفوفة المعدنية الفقيرة من الكبريت التي تحتوي على المعادن الثقيلة من الزنك والرصاص، النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق التعويم هي ملحوظة لاستعادة الكبريت و البايريت ضد التصريفات التي تحتوي على نسبة كبيرة من المعادن الثقيلة ، ولا سيما المعدنية من البلاندا. علاوة على ذلك ، يوصي بتغليف الجزء الغني من البايريت بمواد الحجر الجيري لتحديد إمكانية التحمض. يجب عادة تدوير المخلفات الفقيرة للكبريت لاستعادة الزنك وتقليل نسبة المعادن الثقيلة لمنع تلوث المياه والترربة.

حماية البيئة من خلال اقتراح إنشاء أحواض الترسيب عن طريق الجير ومعالجة DMA التقليدية بالإضافة إلى HDB لمعالجة التصريفات السائلة والصلبة.

الكلمات المفتاحية التفرغ المنجمي ، خامات الكبريتيد ، التصريف المنجمي الحمضي، الترسيب ، التخلص من الكبريت البيئي .

Abréviations et sigles utilisés

% : Pourcentage

AXK: Amylxsanthate de potassium

BHD : Procédé de boues à haute densité

CEBC : couvertures à effets de barrières capillaires

DMA : drainage minier acide

DRX : Diffraction des rayons X

ETM : éléments de traces métalliques

g : Gramme

h : Heure

HCl : Acide chlorhydrique

kg : Kilogramme

PA : Potentiel de production d'acide

pH : potentiel d'hydrogène

PN : potentiel de neutralisation

PNN : potentiel net de neutralisation

SAA : Spectrométrie d'Absorption Atomique

T : Température (°C)

t : Temps (s)

tr/min (ou rpm) : tours par minute

V : Volume (m³)

θ : Angle (°) / (rad)

μm : Micromètre

USG : United States Geological Survey

Patm : Pression atmosphérique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

EDTA : acide éthylène-diamine-tétracétique

E° : potentiel standard d'une réaction d'oxydoréduction

Eh : potentiel d'oxydoréduction

Abréviations et sigles utilisés

H.P : huile de pin

K : constante thermodynamique

P : pression

V : volume générateur de drainage minier acide

Γ_m : quantité de moussant adsorbée

ΔG : Variation de l'énergie libre de l'interphase solide-liquide-gaz

$\Delta F^{\circ}_{\text{réaction}}$: Variation de l'énergie libre des produits finals

$\Delta F^{\circ}_{\text{pf}}$: Variation de l'énergie libre des produits initiaux

ζ : potentiel Zêta

Θ : angle de particule-eau

γ_{LG} : tension superficielle liquide-gaz

γ_{SG} : tension superficielle solide-liquide

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
Chapitre I: Etat actuel de la mine	
I.1 INTRODUCTION.....	03
I.2 Bref aperçu géographique.....	03
I.3 Caractéristique géologique.....	04
I.3.1- GEOLOGIE LOCALE DU GISEMENT DE KHERZET YOUCEF.....	04
I.3.2. MINERALOGIE DU GISEMENT DE KHERZET YOUCEF.....	07
I.3.2.1 La sphalérite (ZnS) :.....	07
I.3.2.2 La galène (PbS) :.....	07
I.3.2.3 La marcasite (FeS ₂) :.....	07
I.3.2.4 La pyrite (FeS ₂) :.....	07
I.3.2.5 La Barytine.....	07
I.3.2.6 La dolomie.....	08
I.4. Hydrogéologie de la zone de kherzet youcef.....	08
I.5. Etudes hydrogéologiques sur la mine de kherzet youcef.....	08
I.6. Géologie locale de la mine de chaabet el hamra.....	10
I.6.1. STRUCTURE ET MINERALISATION DE GISEMENT.....	11
I.6.2. MINERALISATION.....	12
I.6.3. HYDROGEOLOGIE DE LA MINE DE CHAABET EL HAMRA.....	12
I.7. Reserves géologiques.....	14
I.8. Technologie de traitement du minerai.....	15
I.8.1. TRAITEMENT MECANIQUE :.....	17
I.8.1.1. Section de concassage et de criblage.....	17
I.8.1.2. Section de broyage et classification.....	19
I.8.2. PROCEDE DE TRAITEMENT DU MINERAI.....	21
I.8.2.1. Section de flottation et filtration.....	22
I.8.2.2. Circuit de flottation.....	22
I.8.2.3. Flottation Dégrossissage.....	23
I.9. CONCLUSION	26
Chapitre II Hydrométallurgie et métaux lourds	
II.1. INTRODUCTION.....	27
II.2. Traitement par flottation des sulfures.....	27
II.2.1 REACTIFS DE FLOTTATION DES SULFURES.....	28
II.2.2. ACTIVANTS ET DEPRIMANTS.....	29
II.3. Lixiviation chimique et bactérienne des sulfures et techniques d'extraction par solvant	31
II.3.1. GENERALITES SUR LA LIXIVIATION.....	31
II.3.2. TYPES DE LIXIVIATION.....	31
II.3.2.1. Lixiviation chimique.....	31
II.3.2.2. Lixiviation bactérienne.....	33
II.3.3. TECHNIQUE D'EXTRACTION LIQUIDE-LIQUIDE.....	34
II.3.3.1. Extraction par solvant du zinc.....	35
II.4. EFFLUENT.....	36
II.4.1. DEFINITION.....	36
II.4.2. LES DIFFERENTS TYPES D'EFFLUENTS.....	36

II.5. Notion de la toxicité.....	37
II.5.1. LES FORMES D'INTOXICATION.....	37
II.5.2. COMMENT EVALUER UN EFFET TOXIQUE ?.....	38
II.5.3. L'EFFETS DES ACTIVITES MINIERES SUR LES EAUX.....	38
II.6. Concepts sur les metaux de base (zinc, plomb, cuivre).....	39
II.6.1. LE ZINC.....	39
II.6.1.1. Caractéristiques physico-chimiques du zinc.....	39
II.6.1.2. Utilisations et application du zinc.....	40
II.6.1.3. Toxicité du zinc.....	41
II.6.2. LE PLOMB.....	41
II.6.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du plomb.....	41
II.6.2.2. Production mondiale de plomb.....	42
II.6.2.3. Utilisation du plomb.....	43
II.6.2.4. Toxicité du plomb.....	44
II.6.3. LA PYRITE.....	44
II.6.3.1 Caractéristiques physico-chimiques.....	44
II.6.3.2 Utilisation du pyrite.....	46
II.6.3.3. Réaction d'oxydation de la pyrite.....	46
II.6.3.4. Phénomène d'altération des sulfures et impact sur la flottation.....	47
II.6.4. LE CUIVRE.....	48
II.6.4.1 Propriétés de cuivre.....	49
II.6.4.2. Les types de Minerai de cuivre.....	50
II.6.4.3. Impact de cuivre sur la santé et l'environnement.....	51
II.6.4.4. Propriétés biologiques et écotoxiques.....	53
II.7. CONCLUSION.....	54

Chapitre III : résultats et interprétations

III.1. INTRODUCTION.....	55
III.2. Analyse granulométrique et mesures physico-chimiques.....	55
III.2.1. MATERIELS ET METHODE.....	55
III.2.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	55
III.3. Caractérisation des rejets miniers par diffraction des rayons X.....	56
III.3.1. MATERIEL ET METHODE.....	58
III.3.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	58
III.4. Composition chimique des rejets.....	60
III.4.1. MATERIELS ET METHODES.....	60
III.4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	60
III.5. Desulfuration environnementale et son application industrielle.....	62
III.5.1 DETERMINATION DU POTENTIEL GENERATEUR D'ACIDE (PA).....	63
III.5.2 DETERMINATION DU POTENTIEL DE NEUTRALISATION (PN).....	64
III.6. Paramètres optimaux de flottation de la pyrite.....	64
III.6.1 INFLUENCE DU PH SUR L'ETAT DE SURFACE DE LA PYRITE.....	65
III.6.2. DETERMINATION DU PH D'EQUILIBRE DU SYSTEME « SOLIDE-LIQUIDE ».....	67
III.6.2.1 EQUATIONS ET EXPRESSIONS UTILISEES LORS DES OPERATIONS.....	68
III.6.2.3. PH D'EQUILIBRE DU SYSTEME « FE(OH)3 – EAU ».....	69
III.6.2.4 PH D'EQUILIBRE DU SYSTEME « FE(OH)2 – EAU ».....	70
III.6.2.5. PH D'EQUILIBRE DU SYSTEME « FE(OH)2 – EAU ».....	71
III.6.3. Détermination de la potentielle thermodynamique.....	71
III.6.3.1. EQUATIONS ET EXPRESSIONS UTILISEES LORS DES OPERATIONS.....	71
III.6.3.2 SYNTHÈSE, DISCUSSIONS ET INTERPRÉTATION DES RESULTATS.....	73

III.6.3.3. INFLUENCE PH SUR LA FLOTTABILITE DE LA PYRITE.....	74
III.6.3.4 DETERMINATION DU PH OPTIMAL DE FLOTTATION DE LA PYRITE.....	75
III.7. Impact environnemental de la flottation.....	76
III.8. Le drainage minier acide (DMA).....	78
III.8.1. OXYDATION DES MINERAIS SULFURES ET LES REJETS MINIERS ACIDES.....	78
III.8.2. MECANISME DE FORMATION DU DMA.....	79
III.8.3. METHODES USUELLES DE CONTROLE DU DMA.....	80
III.9.1Reactivation des sulfures deprimés.....	82
III.9.1.1 REACTIVATION DES SULFURES DEPRIMES PAR PROCESSUS MECANIQUES.....	83
III.9.1.2. REACTIVATION DES SULFURES DEPRIMES PAR PROCESSUS CHIMIQUES.....	83
III.10. Utilisation de rejets desulfures dans les recouvrements.....	84
III.11. Processus de neutralisation dans les rejets miniers.....	85
III.11.1. TRAITEMENT EN BASSIN DE SEDIMENTATION.....	87
III.11.2. TRAITEMENT CONVENTIONNEL.....	88
III.11.3. PROCEDE DE BOUES A HAUTE DENSITE (BHD) :.....	89
III.12CONCLUSION.....	90
Conclusion générale.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

TABLEAU I.1: NATURE DE LA MINERALISATION DU GISEMENT DE KHERZET YUCEF.....8

Chapitre II

TABLEAU II.1 : LES PRINCIPAUX MINERAUX POUVANT ETRE SEPARES PAR FLOTTATION.....28
TABLEAU II.2 : PRINCIPAUX COLLECTEURS DES MINERAUX SULFURES (R = RADICAL ALIPHATIQUE).29
TABLEAU II.3 : LES FORMES D'INTOXICATION.....38
TABLEAU II.4: PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU ZINC.....40
TABLEAU II.5 : PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU PLOMB.....42
TABLEAU II.6 : PRINCIPAUX SULFURES METALLIQUES.....45

Chapitre III

TABLEAU III.1 : RESULTAT DE REPARTITION GRANULOMETRIQUE DES REJETS DE TRAITEMENT DE MINERAI ZINC.....56
TABLEAU III.2 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES CLASSES GRANULOMETRIQUES DE LA DIGUE DE CHAABET-EL-HAMRA (SETIF).....59
TABLEAU III.3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DE LA DIGUE DE CHAABET-EL-HAMRA (SETIF).....59
TABLEAU III.4 : ANALYSES CHIMIQUES DES REJETS MINIERS DE CHAABET EL HAMRA DE LA FRACTION.....61
TABLEAU III.5 : EXIGENCES AU POINT DE REJET DE L'EFFLUENT FINAL.....61
TABLEAU III.6 : TENEURS EN CO2 ET EN S TOTAL DES ECHANTILLONS DES REJETS.....62
TABLEAU III.7 : SYNTHESE DES REACTIONS CHIMIQUES SUR LA SURFACE DE LA PYRITE.....66
TABLEAU III.8 : REACTIONS CONSIDEREES POUR LA DETERMINATION DE PH OPTIMAL DE LA PYRITE.69

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

FIGURE I.1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA MINE DE CHAABET-EL-HAMRA.....	4
FIGURE I.2: CARTE GEOLOGIQUE DU GISEMENT DE KHERZET YUCEF, W. DE SETIF (EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE D'AIN AZEL (1/5000).....	5
FIGURE I.3 : COLONNE LITHO-STRATIGRAPHIQUE DE LA MINE DE KHERZET YUCEF. (ENOF 1990).....	7
FIGURE I.4 : COUPE HYDROGEOLOGIQUE SCHEMATIQUE DE LA REGION DE KHERZET YUCEF (ATTOUCHEK, 2006).....	9
FIGURE I.5 : DEVELOPPEMENT DU CONE DE DEPRESSION DEC. 1975 - MARS 1976 (SONAREM).....	10
FIGURE I.6 : CARTE GEOLOGIQUE DE LA MINE DE CHAABET-EL-HAMA EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE AU 1/50.000 D'AÏN-AZEL, SONATRACH, (1977).....	11
FIGURE I.7: COUPE HYDROGEOLOGIQUE PROFIL 0 – PROFIL 15 (D'APRES ENOF 2003ET 2006).....	14
FIGURE I.8: DISTRIBUTION DES TENEURS EN ZN DES CORPS MINERALISEES DE CHAABET EL-HAMRA (D'APRES LE BUREAU D'ETUDE CANADIEN SIDAM, IN NEKACHE 2012) [9].....	15
FIGURE I.9 : USINE DE TRAITEMENT DE KHERZET YUCEF, 2021.....	16
FIGURE I.10 : SCHEMA DE LA LAVERIE DE KHERZET YUCEF.....	17
FIGURE I.11 : VUE DE LA SECTION DE CONCASSAGE ET CRIBLAGE DE L'USINE DE KHERZET YUCEF, 2021.....	18
FIGURE I.12: VUE DE LA SECTION CONCASSAGE A MACHOIRE, USINE DE KHERZET YUCEF, 2021.....	18
FIGURE I.13: VUE DE CRIBLE VIBRANT DE KHERZET YUCEF, 2021.....	19
FIGURE I.14 : VUE DE LA SECTION CONCASSAGE A CONE, KHERZET YUCEF 2021.....	19
FIGURE I.15 : VUE DE BROYEUR A BOULET.....	20
FIGURE I.16: VUE DE CLASSIFICATEUR A VIS.....	20
FIGURE I.17: SECTION DE LA PREPARATION MECANIQUE.....	21
FIGURE I.18 : CELLULE DE FLOTTATION TYPE DENVER.....	23
FIGURE I.19: FILTRATION DE CONCENTRE DE FLOTTATION DE BLENDE ZN.....	24
FIGURE I.20 : SCHEMA DE TRAITEMENT PAR FLOTTATION D'UN MINERAI DE BLENDE A GANGUE SULFUREE ET CARBONATEE.....	25

Chapitre II

FIGURE II.1 : PRODUCTION MINIERE MONDIALES DE PLOMB, PAR PAYS EN 2015, SELON LE GROUPE D'ETUDE INTERNATIONAL DU PLOMB ET DU ZINC.....	42	
FIGURE II.2 : RESERVES MONDIALES DU PLOMB, PAR PAYS EN 2015 D'APRES L'USGS (U.S. GEOLOGICAL SURVERY).....	43	
FIGURE II.3 : PYRITE	FIGURE II.4 : MARCASSITE.....	46
FIGURE II.5 : CUIVRE NATIF.....	49	
FIGURE II.6 : LA CHALCOPYRITE.....	50	
FIGURE II.7 : LA BORNITE.....	51	
FIGURE II.8 : LA COVELLINE.....	51	
FIGURE II.9 : LA CHALCOCITE.....	51	

Chapitre III

FIGURE III.1 : COURBE DE LA REPARTITION GRANULOMETRIQUES DES REJETS MINIER Sulfures DE LA DIGUE DE CHAABET-EL-HHAMRA.....	56
FIGURE III.2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE LA DIFFRACTION X.....	57
FIGURE III.3 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DES REJETS MINIER DE LA FRACTION INFERIEUR 0,45MM.....	58
FIGURE III.4 : GESTION INTEGREE DES REJETS DE TRAITEMENT PAR DESULFURATION ENVIRONNEMENTALE (MERMILLOD-BLONDIN, 2005).....	62
FIGURE III.5 : SCHEMA ILLUSTRANT LE PRINCIPE A LA BASE DE LA DESULFURATION ENVIRONNEMENTALE D'UN REJET DE TRAITEMENT.....	63
FIGURE III.6 : INFLUENCE DES VALEURS DE pH ET Eh SUR L'ETAT DE SURFACE DE LA PYRITE.....	66
FIGURE III.7 : INFLUENCE DU pH SUR LA CONCENTRATION DES IONS [OH-, Fe ³⁺ , Fe(OH) ²⁺ , Fe(OH) ²⁺].....	70
FIGURE III.8 : INFLUENCE DU pH SUR LA CONCENTRATION DES IONS [OH-, HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ , Fe ²⁺].....	70
FIGURE III.9 : INFLUENCE DU pH SUR LA CONCENTRATION DES IONS [OH-, Fe ²⁺ , Fe(OH)-].....	71
FIGURE III.10 : VARIATION DU POTENTIEL THERMODYNAMIQUE DU Fe(OH) ₃ EN FONCTION DU pH.....	72
FIGURE III.11 : VARIATION DE LA POTENTIELLE THERMODYNAMIQUE DE FeCO ₃ EN FONCTION DU pH.....	72
FIGURE III.12 : VARIATION DU POTENTIEL THERMODYNAMIQUE DE Fe(OH) ₂ EN FONCTION DU pH.....	73
FIGURE III.13 : INFLUENCE DU pH SUR LA FLOTTABILITE DE LA PYRITE.....	74
FIGURE III.14 : pH OPTIMAL DE FLOTTATION DE LA PYRITE.....	75
FIGURE III.15 : SCHEMA GENERAL DU FONCTIONNEMENT DES MINES ET LEUR IMPACT SUR LES EAUX SOUTERRAINES ET LES EAUX SUPERFICIELLES. (BOUNOUALA ET AL., 2000).....	78
FIGURE III.16 : EXEMPLE SCHEMATIQUE DU PROCESSUS DE FORMATION DU DMA SUR LA DIGUE.....	79
FIGURE III.17 : FORMATION DE DRAINAGE MINIER ACIDE KHERZAT YOUSSEF 2021.....	80
FIGURE III.18 : CYCLE HYDROLOGIQUE PROPOSE A LA DIGUE D'ENTREPOSAGE DE RESIDUS MINIER CHAABET EL HAMRA (RECOUVREMENT MONOCOUCHE).....	82
FIGURE III.19 : MODELE DE SCHEMA TECHNOLOGIQUE DE FONCTIONNEMENT DES MINES.....	85
FIGURE III.20 : ETAPES GENERALES DU TRAITEMENT DES ACIDES.....	87
FIGURE III.21 : BASSIN DE SEDIMENTATION AVEC CHAULAGE.....	87
FIGURE III.22 : TRAITEMENT CONVENTIONNEL DE DMA.....	88
FIGURE III.23 : PROCEDE AVEC BOUES A HAUTE DENSITE.....	89

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction :

L'exploitation des mines et le traitement des minerais génèrent des volumes considérables de divers types de rejets qui, malheureusement, ne sont pas gérés de façon rationnelle et sécuritaire afin de protéger l'environnement. La société a mis en service des concentrateurs qui utilisent la flottation afin d'enrichir ces minerais en minéraux valorisables tels que la malachite, la chalcopryrite, la bornite, la brochantite, la carrollite, la chalcosine, la covelline et la sphalérite. Ces opérations ont généré d'énormes quantités de rejets acheminés sous forme de pulpe vers des bassins artificiels pour la décantation des eaux. Le remplissage progressif de ces bassins a donné lieu à des stocks de rejets solides (digue). Ces rejets étaient stockés en surface dans l'espoir d'une éventuelle récupération future des métaux contenus dans le minerai.

Le présent travail concerne la digue de Chaâbet-El-Hamra où on stocke les rejets miniers produits par flottation différentielle de minerais zincifères à dépression de la pyrite. Ils contiennent de nombreux éléments traces métalliques (arsenic, cuivre, cadmium, indium, germanium, gallium, plomb, zinc, etc.) sous forme de sulfures, associés à la pyrite non flottée lors du traitement de séparation des minéraux. Les éléments valorisables sont à des teneurs d'environ 0,5 % Cu et 2 à 3 % Zn qui peuvent être revalorisés par des technologies minéralogiques. Sur le plan environnemental, l'impact le plus important de ces résidus miniers est la mobilité des éléments traces métalliques (ETM) qui présentent un risque important pour le milieu environnant. Tous ces rejets étaient placés sans aucune stabilisation dans des aires de stockage situées en surface. L'instabilité physique et chimique a un impact négatif sur les milieux environnants les plus proches (rivières naturelles, sols sous-jacents, nappes souterraines, etc.) par la migration et la dispersion d'ETM tels que l'arsenic, le cadmium, le cobalt, le cuivre, le plomb, le zinc. Dans le cas de Chaâbet-El-Hamra, il a été démontré par des tests de lixiviation menée en 2007 que les ETM ne sont pas chimiquement stables et qu'un relargage de ces polluants est possible quel que soit le Ph.

En principe, les rejets oxydés sont moins dangereux pour l'environnement que les rejets sulfurés. Les premiers proviennent de minerais extraits près de la surface et sont souvent stables chimiquement au contact de l'air et de l'eau. Par contre, les minerais sulfurés sont extraits de mines souterraines.

Leur extraction de la mine où ils étaient dans un milieu anaérobique stable vers la surface, a un impact non négligeable si aucune précaution n'est prise pour empêcher leur

oxydation au contact de l'air et de l'eau. Cette oxydation entraîne en effet le déclenchement de réactions responsables du drainage minier acide (DMA) qui génère des solutions acides et oxydantes, chargées en cations métalliques (dont le fer ferrique) et en anions (tels que sulfates et arséniates).

Sachant que le drainage acide mobilise des sulfates et oxydes métalliques avec comme conséquence la dispersion des ETM dans l'environnement. Il y a possibilité de DMA dans la digue de Chaâbet El Hamra suite à la présence de la pyrite et de certains sulfures résiduels. Des études ont démontré qu'il y avait neutralisation du DMA par les dolomites présentes dans les rejets. Il est observé sur le terrain que cette neutralisation des eaux acides contribue au durcissement des eaux de la nappe.

Un autre problème lié à l'instabilité physique pendant la saison des pluies est l'érosion par les eaux de ruissellement qui contribuent à la pollution des eaux des rivières naturelles par les particules solides entraînées. Pendant la saison sèche, l'érosion éolienne provoque l'envolement de fines particules de la digue vers les sols d'agriculture paysanne et parfois même vers des zones habitées, exposant ainsi la population aux risques d'inhalation de métaux lourds toxiques (arsenic, cadmium, plomb...).

Pour résoudre ce problème environnemental, le but de notre étude est de caractériser les effluents sortant de la chaîne de traitement flottation du cuivre zinc ces rejets qui nuisent à l'environnement en contaminant les ainsi que les différentes nappes aquifères qui répondaient aux exigences de la protection de l'environnement en proposant la construction des bassins de sédimentation par chaulage et le Traitement conventionnel de DMA ainsi le BHD pour traiter des rejets liquide et solides.

CHAPITRE I
ETAT ACTUEL
DE LA MINE

I.1 Introduction

Parmi les types des gisements les plus importants en Algérie, On peut citer les gisements polymétalliques de plomb-zinc. Les gisements les plus fameux dans la région d'Ain Azel de la wilaya de Sétif sont ceux Kherzet Youcef et de Chaâbet El Hamra. Actuellement, le gisement de zinc de Chaâbet El Hamra est la seule mine en production. Le minerai provenant de cette mine est traité au niveau du complexe minier de Kherzet Youcef. La description géologique a été faite sur la base de recherche bibliographique. [1]

Il existe diverses méthodes pour l'exploitation des gisements souterrains. Elles ont toutes en commun le creusement de puits et de galeries d'accès au gisement et l'emploi de machines ou d'explosifs pour l'extraction du minerai.

Le choix de la méthode d'exploitation se fait de manière à obtenir un débit maximal à un coût minimal, avec le moins de risque possible pour les mineurs. Il faut évidemment tenir compte, d'une part, des caractéristiques de la mine : sa forme, ses dimensions, sa continuité, la position de la masse de minerai ; d'autre part, des caractéristiques minéralogiques et physiques du minerai et de celles des roches encaissantes, et enfin des communications du gisement avec la surface.

I.2 bref aperçu géographique

Les gisements de Chaâbet El Hamra et de Kherzet Youcef de la région d'Ain Azel appartiennent au domaine méridional des hauts plateaux. Ils se situent à 250 km au Sud-est d'Alger et à 50 km au Sud de la ville de Sétif. La mine de Chaâbet el Hamra se trouve à 12 km au Nord-Ouest du complexe minier de Kherzet Youcef. Le gisement de Chaâbet El-Hamra est situé à vol d'oiseau, à environ 250 km au Sud-Est d'Alger et à 50 km au Sud de Sétif, dans la région de Chouf-Bouarket à 4,5 km d'Ain-Azel et à 12 km au Sud-Est du complexe minier de Kherzet Youssef (Figure I.1).

Les coordonnées géographiques du point central sont : 35°45'N et 5°30'E. L'altitude du site varie de 950 à 1200 mètres. [2]

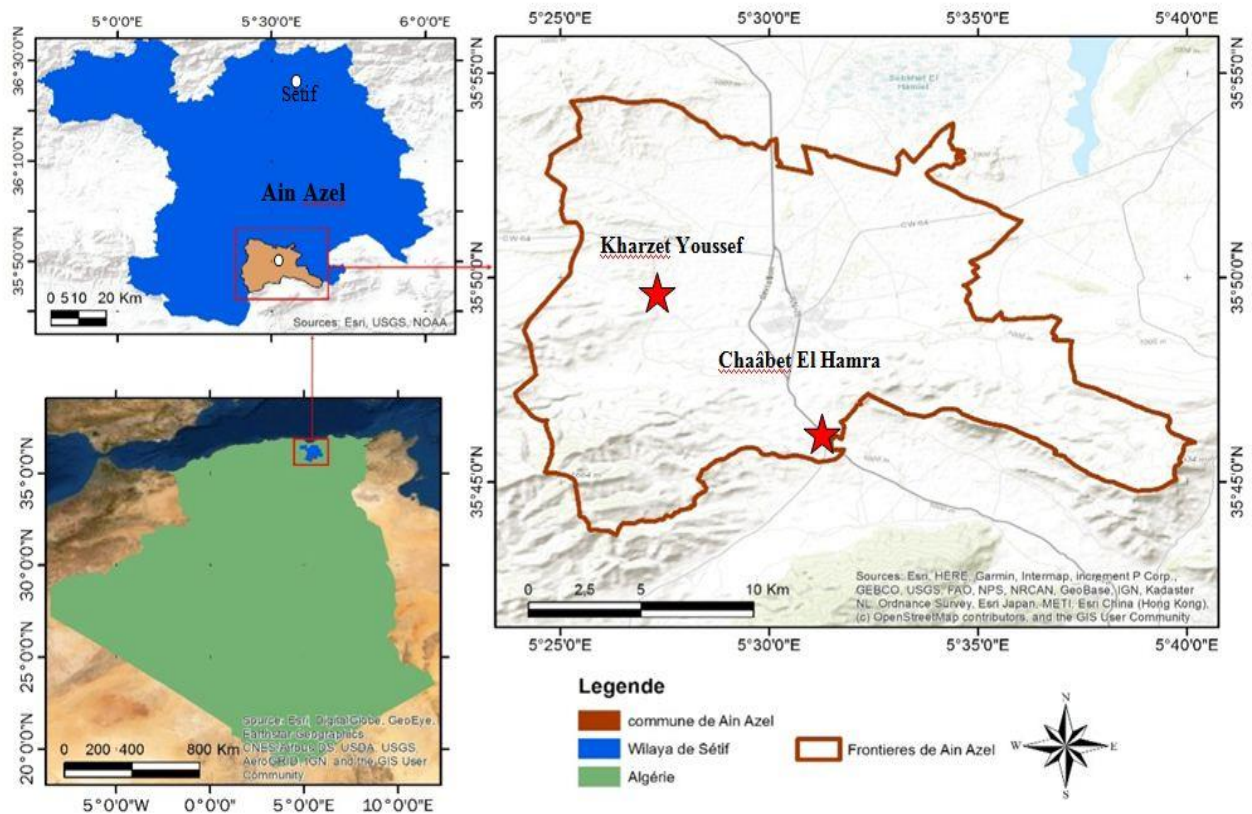


Figure I.1 : Situation géographique de la mine de Chaâbet-El-Hamra.

I.3 Caractéristique géologique :

Les gisements de Chaâbet El Hamra et de Kharzet Youcef font partie de la limite septentrionale des Monts du Hodna qui renferme d'importante minéralisation en Pb-Zn. Le gisement de Kharzet Youcef est situé dans une zone d'affaissement dans la région d'Ain Azel.

Du point de vue litho stratigraphique de cette région deux formations ont été identifiées :

- (1) La plaine d'Ain Azel à l'est qui est une formation alluvionnaire d'une épaisseur de 250 m d'âge mio-plio-quaternaire et qui est constituée de sable, gravier, galets, grès, argiles et conglomérats ;
- (2) des formations carbonatées et gréseuses du Barrémien (la dolomie, marne, argile) d'environ 700 m d'épaisseur à l'ouest. [4]

I.3.1- Géologie locale du gisement de Kharzet Youcef

Le gisement de Kharzet Youcef est associé à une série dolomitique de plateforme instable et subsidente d'épaisseur de 170-190 m. Cette série est composée de bancs de dolomie, marnes, de dolomie marneuse et de laminâtes. Notant que les faciès dolomitiques passent à des calcaires en

allant vers l'Ouest. Le gîte est constitué de vingtaine des couches minéralisées à des intensités variables. Le gisement est limité par la faille de Kherzet Youcef à l'est. (Figure I.2)

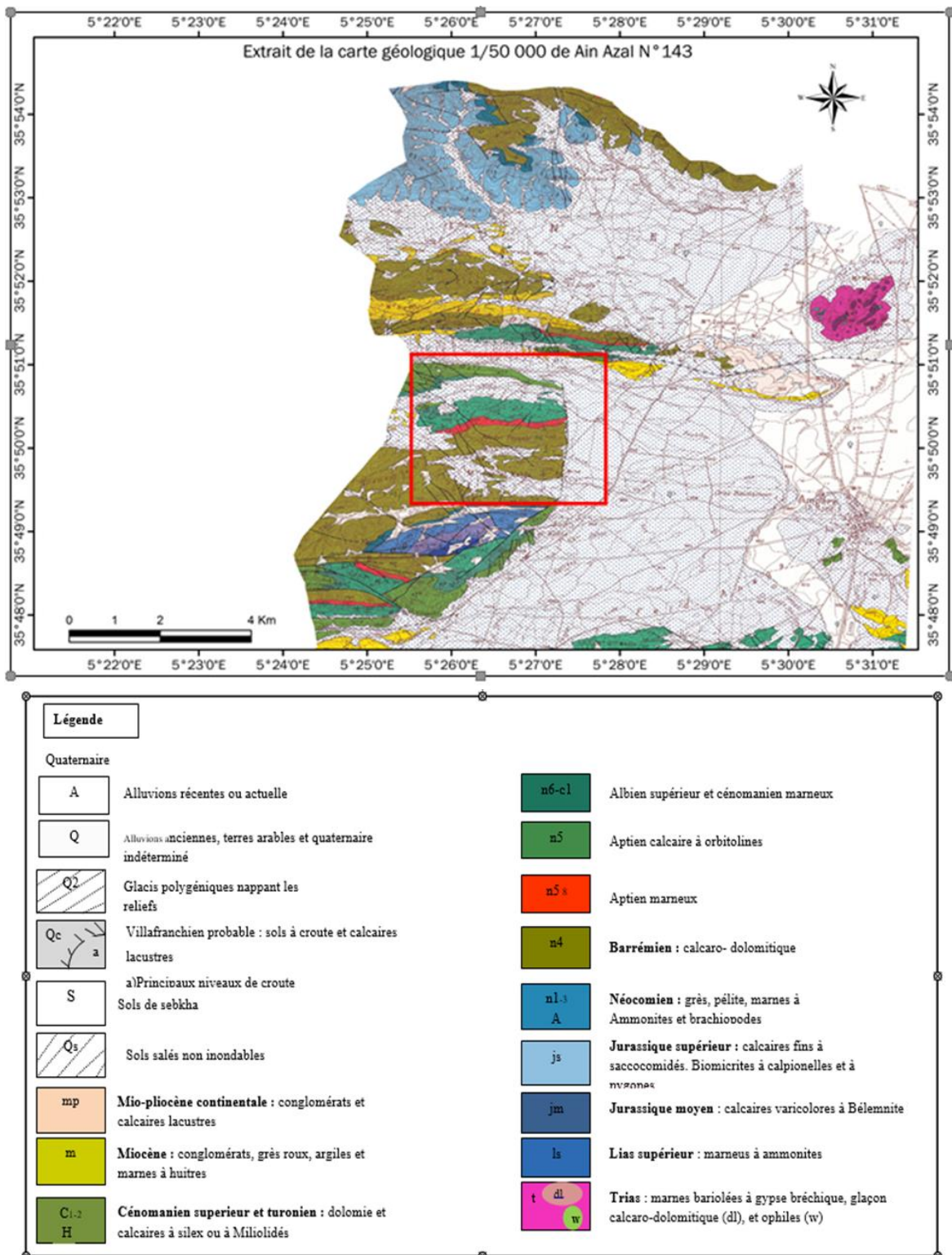


Figure I.2: Carte géologique du gisement de Kherzet Youcef, W. de Sétif (Extrait de la carte géologique D'Ain Azel (1/5000).

➤ **L'Albien** : correspondant à une alternance marno-calcaire généralement recouverte par le quaternaire, présente une épaisseur de 175 m. Le passage stratigraphique Aptien-Albien est marqué par des niveaux de condensation à faunes variées et un changement lithologique net.

➤ **Le Cénomanién** : il est constitué par trois ensembles :

-Un ensemble inférieur d'une épaisseur de 60 m rapporté au Vraconien formé par des grés grossiers à la base, surmonté par des marnes jaunes à ammonites (Villa, 1977) et à intercalations de calcaires gréseux.

-Un ensemble médian de 300 m d'épaisseur correspondant au Cénomanién constitué par une alternance de marnes et de calcaires marneux qui se termine par des bancs de calcaires fossilifères.

-Un ensemble supérieur d'une épaisseur de 120 m, représentant le Turonien, et des calcaires à débris de rudistes auxquels succèdent des niveaux dolomitiques massifs à rognons de silex.

➤ Le Miocène :

Le Miocène d'une épaisseur de 200m, est constitué de la base au sommet par :

- ✓ Des conglomérats à fragments de calcaires et de dolomies.
- ✓ Un ensemble de calcaires gréseux avec des intercalations marneuses
- ✓ Des dolomies en bancs métriques
- ✓ Des calcaires à silex en bancs centimétriques et décimétriques de couleur grisâtre.

➤ Le Quaternaire :

Le Quaternaire inférieur est constitué par des marnes lacustres insignifiantes et des calcaires.

Le Quaternaire supérieur est représenté par des proluviaux à gros blocs et galets avec des intercalations de limons sableuses et limons (10 à 15 m) et par des colluvions dégrés et de galets (1 à 2m), des galets alluviaux et des interlits de limons sableux d'argile et de sable à grains fins (Figure I.4). (ENOF 1990)

Age	Lithologie	Caractères hydrogéologiques probables
Mio-Plio-Quaternaire	Sables, graviers, galets et conglomérats	Formation perméable
Miocène	Calcaires, calcaires gréseux dolomies et conglomérats à la base	Formation perméable
Turonien	Dolomies à silex et calcaires	Formation perméable à semi-perméable
Cénomanién	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Vraconien	Marnes, calcaires gréseux et grès	Formation perméable
Albien	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Aptien supérieur	Alternance de calcaires, grès, marnes et marneux calcaire	Formation perméable à semi-perméable
Aptien inférieur	Alternance de marnes, calcaires et dolomies	Formation perméable à semi-perméable
Barrémien supérieur	Alternance de calcaires, marnes gréseux et dolomies	Formation perméable
Barrémien inférieur	Alternance calcaro-marneuse, dolomies et grès	Formation perméable

Figure I.3 : Colonne litho-stratigraphique de la mine de Kherzet Youcef. (ENOF 1990).

I.3.2. Minéralogie du gisement de Kherzet Youcef

La minéralisation du gisement de Kherzet Youcef est sous forme stratiforme pour le minerai de zinc et massive ou veinée pour Plomb. Elle est représentée essentiellement par :

I.3.2.1 La sphalérite (ZnS) : on marque l'abondance de la sphalérite (sulfure de zinc) pouvant atteindre 40-60%. En plus du zinc, la sphalérite renferme également le germanium et le cadmium. [5]

I.3.2.2 La galène (PbS) : Ce minéral est présent avec une teneur de 10-15% pouvant parfois atteindre 25-30%.

I.3.2.3 La marcasite (FeS₂) : Elle constitue le sulfure le plus précoce, bien répandu au voisinage immédiat de la faille où il cimente les brèches dolomitiques. La marcasite est irrégulièrement distribuée dans les couches minéralisées.

I.3.2.4 La pyrite (FeS₂) : La pyrite est rare et observée dans la roche argilo-carbonatée sous forme d'individus microscopiques (1-5 m).

Les minéraux secondaires sont la calcite (CaCO₃), la barytine (BaSO₄), la fluorite (CaF₂), l'hématite et les minéraux qui se présentent avec des faibles proportions tels que le Cuivre gris et la pyrite (FeS₂) associé aux roches argilo-carbonatées. [5]

I.3.2.5 La Barytine : Elle se rencontre rarement, elle se présente sous la forme de félonnets de composition monominérale formant des vides dans les minerais pyriteux de couloir blanchâtre, elle forme des agrégats avec une structure tubulaire en masse lamellaire.

I.3.2.6 La dolomie : elle constitue une teneur importante dans la constitution de la gangue des corps minéralisés et formant des roches encaissantes.

On distingue deux générations de dolomies : la dolomie I, précoce et la dolomie II, tardive (cristaux plus grands).

Elle présente des formes bien en filonnets, de couleur blanche, elle est postérieure à la formation de la blende Elle fait partie des roches encaissantes.

Les textures des minéralisations sont très nombreuses, bréchiques, zébrées ou rubanées, disséminations, remplissages de vacuoles de dissolution ou de fractures et des textures de remplacement. La mise en place de la minéralisation est épigénétique. [2]

Tableau I.1: Nature de la minéralisation du gisement de Kherzet Youcef (EREM, 1992).

Roche encaissante- Age	Minéralisation	Type de minéralisation	Réserves en minerais
Dolomie à grains fins poreuses d'âge Barrémien (Crétacé inférieur)	Galène Sphalérite Marcasite Pyrite Calcite Barytine Anhydrite	Stratiforme caverneux pour minerais Zn et massive ou veineux pour minerais Pb	1.6 MT avec 18.4% de Zn et 3.6%Pb

I.4. Hydrogéologie de la zone de Kherzet Youcef :

Comme la digue se trouve dans la zone de Kherzet Youcef, il est très intéressant de connaître son hydrographie. Le secteur d'étude présente trois unités hydrogéologiques importantes sont comme suite :

- **La nappe Barrémienne :** situé dans la partie Ouest de la faille de Kherzet Youcef son épaisseur est de 700 m, elle est constituée essentiellement de calcaire, marne, dolomie et grès en alternance, cette formation renferme les minéralisations. La nappe est affectée par un réseau de failles et fractures qui permettent la circulation des eaux souterraines dans les formations.
- **La nappe Albo-Aptienne :** La nappe albo-aptienne est située dans la partie Est de la faille de Kherzet Youcef. Elle est constituée essentiellement par des calcaires karstiques avec des intercalations gréseuses, des calcaires marneux. Cette nappe se trouve sous un niveau

argileux-sableux semi-perméable qui sert à l'isoler hydrauliquement de la nappe mio-plio-quadernaire.

- **La nappe Mio-Plio-Quadernaire** : elle est située dans la partie Est de la faille de Kherzet Youcef son épaisseur est de 250m, elle est constituée par des conglomérats en intercalation avec des grès, argiles, marnes, calcaires lacustres et des galets avec des intercalations de limons sableux. Cette nappe est alimentée par les eaux de ruissèlement et par précipitation. La faille de Kherzet Youcef formant une barrière étanche qui isole hydrauliquement cette nappe de la nappe Barrémienne. (Figure. I.4).

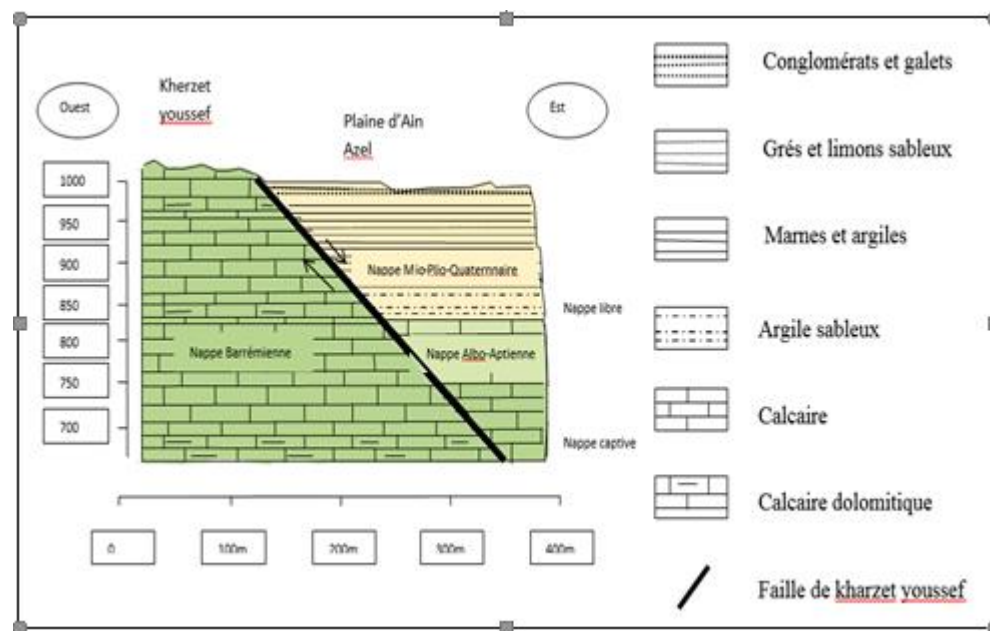


Figure I.4 : Coupe hydrogéologique schématique de la région de Kherzet Youcef (Attouchek, 2006).

I.5. Etudes hydrogéologiques sur la mine de kherzet youcef

Dans les piézomètres le long de la faille, que dans les piézomètres à l'ouest pendant les essais de pompage Pendant l'exploitation minière, 3 études hydrogéologiques ont été exécutées :

SONAREM : «Rapport sur les travaux hydrogéologiques exécutés de 1973 à 1977 sur le gisement polymétallique de Kherzet-Youcef ».

BULGARGEOMIN : «Rapports sur les résultats du dénoyage réalisé et les observations hydrogéologiques de la mine de Kherzet Youcef pour la période du 15 Décembre 1975 au 30 Avril 1979 ».

ENOF : «Rapport sur les études hydrogéologiques menées lors de l'exploitation du gisement de Kherzet Youcef pendant la période Mars 182 – Mars 1987».

Les résultats les plus importants sont résumés brièvement ci-après :

❖ SONAREM

L'étude montre que la faille méridionale Kherzet Youcef est une barrière hydraulique, dont le pendage est de $65 - 80^\circ$. Les mouvements tectoniques ont causé une zone de fissuration élevée tout au long de la faille. Cela a provoqué des remontées plus rapides et plus élevées. Le mouvement de l'eau a lieu dans les zones fissurées qui peuvent être agrandies à cause de la karstification.

La limite inférieure de la zone fissurée et karstifiée de l'assise carbonatée est limitée par les cotes +700 à 750 m, conformément aux cotes minimales de la base d'érosion d'ante Miocène. En profondeur, la fissuration et la karstification de l'assise carbonatée diminue. L'étude constate : «Il n'existe pas dans la région du gisement, de grandes formes karstiques (grottes, entonnoirs karstiques etc.)».

Finalement, l'étude conclue que les zones fissurées sont connectées hydrauliquement dans les formations carbonatées. L'analyse des essais de pompage donne une transmissivité moyenne de $169.43 \text{ m}^2/\text{d}$ et une conductivité hydraulique de $0,903 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. [4]

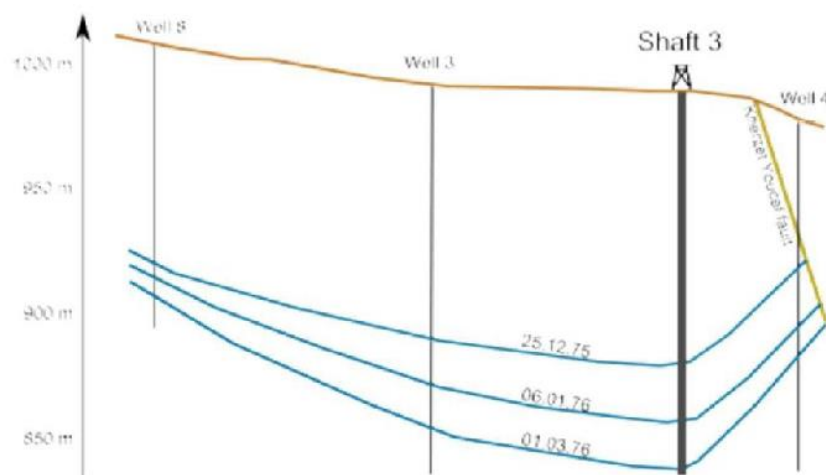


Figure I.5 : Développement du cône de dépression Déc. 1975 - Mars 1976 (SONAREM).

I.6. Géologie locale de la mine de Chaâbet El Hamra

Le gisement de Chaâbet El Hamra fait partie de district de Fourhal qui constitue la limite septentrionale des monts de Hodna qui renferment d'importantes minéralisations en Pb-Zn. Il est associé au Horst anticlinal de Rahbat-Talkhempt (Figure I.6).

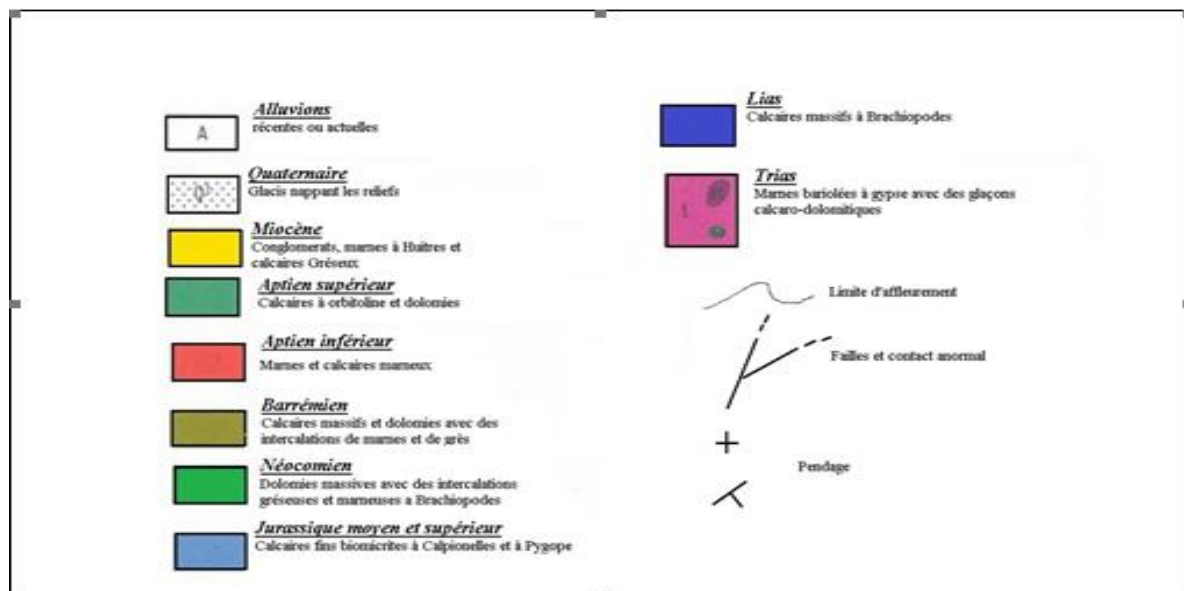
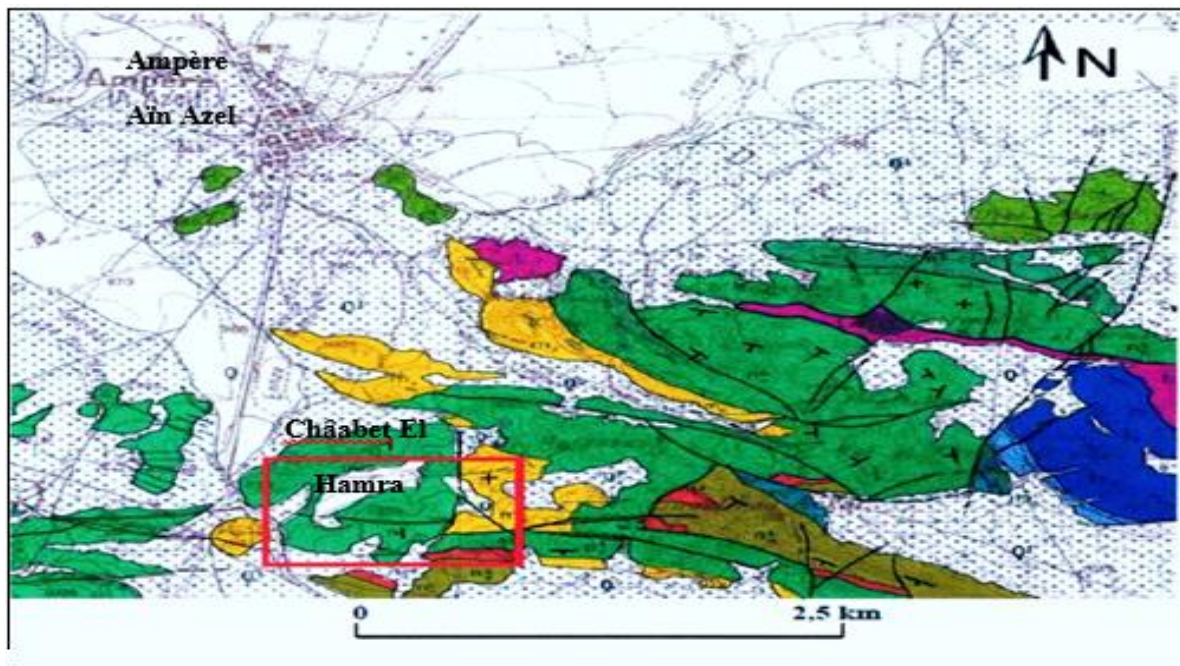


Figure I.6 : Carte géologique de la mine de Chaâbet-El-Hama Extrait de la carte géologique au 1/50.000 d'Aïn-Azel, Sonatrach, (1977).

I.6.1. Structure et minéralisation de gisement

Le minéral zincifère du gisement de Chaâbet El-Hamra est composé de deux corps principaux appelés corps n° 1 pour le corps supérieur et corps n° 2 pour le corps inférieur. Ces corps sont allongés en bande sur une longueur de 2700 m en pendage et 100 à 400 m en direction. Les corps de minéral plongent d'un pendage de 10° vers le Nord-Ouest. Les deux corps de minéral sont stratiformes, subparallèles et séparés l'un de l'autre par le banc de dolomie blanchâtre à minéralisation pauvre et parfois stérile, de 6 m de puissance.

Le minerai est encaissé dans une dolomie poreuse ou béchique située dans la partie inférieure de l'étage Hauterivien (Crétacé inférieur). Le toit du corps supérieur (corps n° 1) est une dolomie à lits marneux tandis que le mur du corps inférieur (corps n° 2) est une dolomie massive à concrétions (dolomie tachetée).

La puissance moyenne du corps n°1 (corps supérieur) est de 5 mètres et celle du corps n°2 (corps inférieur) est de 4 mètres. [6]

L'étude pétrographique des échantillons de la mine a permis de distinguer les principales minéralisations suivantes :

- ❖ **La sphalérite** : Elle se présente en général sous forme d'agrégats monocristallins, de dimension 10 mm ou en cristaux classiques isolés de dimension 0.08 à 0.3 mm.
La répartition sphalérite dans les dolomies encaissantes est irrégulière. Elle est présente dans les trois principaux corps porteurs de minéralisation..
- ❖ **La galène** : est peu fréquente, on la trouve parfois associée à la barytine.
- ❖ **La pyrite** : Elle apparaisse sous trois formes en grains fins xénomorphes 0.050 mm, disséminés dans la dolomie, en agrégats (0 - 0.5 mm) en filonnets de 10 à 15 cm de longueur.

I.6.2. Minéralisation

La minéralisation du gisement de Chaâbet El-Hamra est observée en faisceaux sous forme de lentilles minéralisées de composition tantôt monominérale, tantôt mixte.

Elle est représentée essentiellement par la sphalérite, la pyrite, la marcassite. Les minéraux secondaires sont la galène et l'hématite.

Les minéraux de gangue sont la calcite, la barytine, la dolomie et plus rarement le quartz et le gypse. Les minéraux d'oxydation sont principalement la smithsonite, la cérusite et la limonite.

La minéralisation de pyrite, marcassite, blende et rarement la galène est intimement liée aux roches dolomitiques hauteriviennes, en se localisant indépendamment aux structures tectoniques affectant ce niveau porteur de la minéralisation. [6]

I.6.3. Hydrogéologie de la mine de Chaâbet El Hamra

L'importance de l'eau d'exhaure est assez connue dans la région. Le "coup d'eau" catastrophique du 02 juin 1990 a entraîné la fermeture définitive de la mine de Kherzet Youssef. Cette eau est récupérée pour les besoins agricoles et sa présence est un obstacle à l'avancement des travaux d'exploitation de la partie inférieure du gisement de Chaâbet El Hamra.

Les données géologiques et hydrogéologiques marquent l'existence de deux nappes libres sont les suivantes :

- Une nappe contenue dans les formations hauteriviennes carbonatées à perméabilité de fissure située dans la partie centrale de gisement.
- Une nappe aquifère est reconnue dans les formations barrémiennes dans la partie Nord-Ouest de gisement. Cet aquifère est associé aux grés dolomitiques (Figure I.7)

❖ **Nappe Barrémienne :**

Elle est connue particulièrement dans la partie Nord-Ouest du gisement et elle est associée aux grés et dolomies gréseuses ayant pour cote piézométrique 959,48 m à 967,93 m.

La charge des eaux souterraines est en général de directions Est-ouest et Nord-Ouest : les venues d'eau ont une vitesse de $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s et la pente de la surface piézométrique est de 5%.

Les caractéristiques hydrogéologiques de cette nappe ne sont pas connues et il est nécessaire de les étudier. [6]

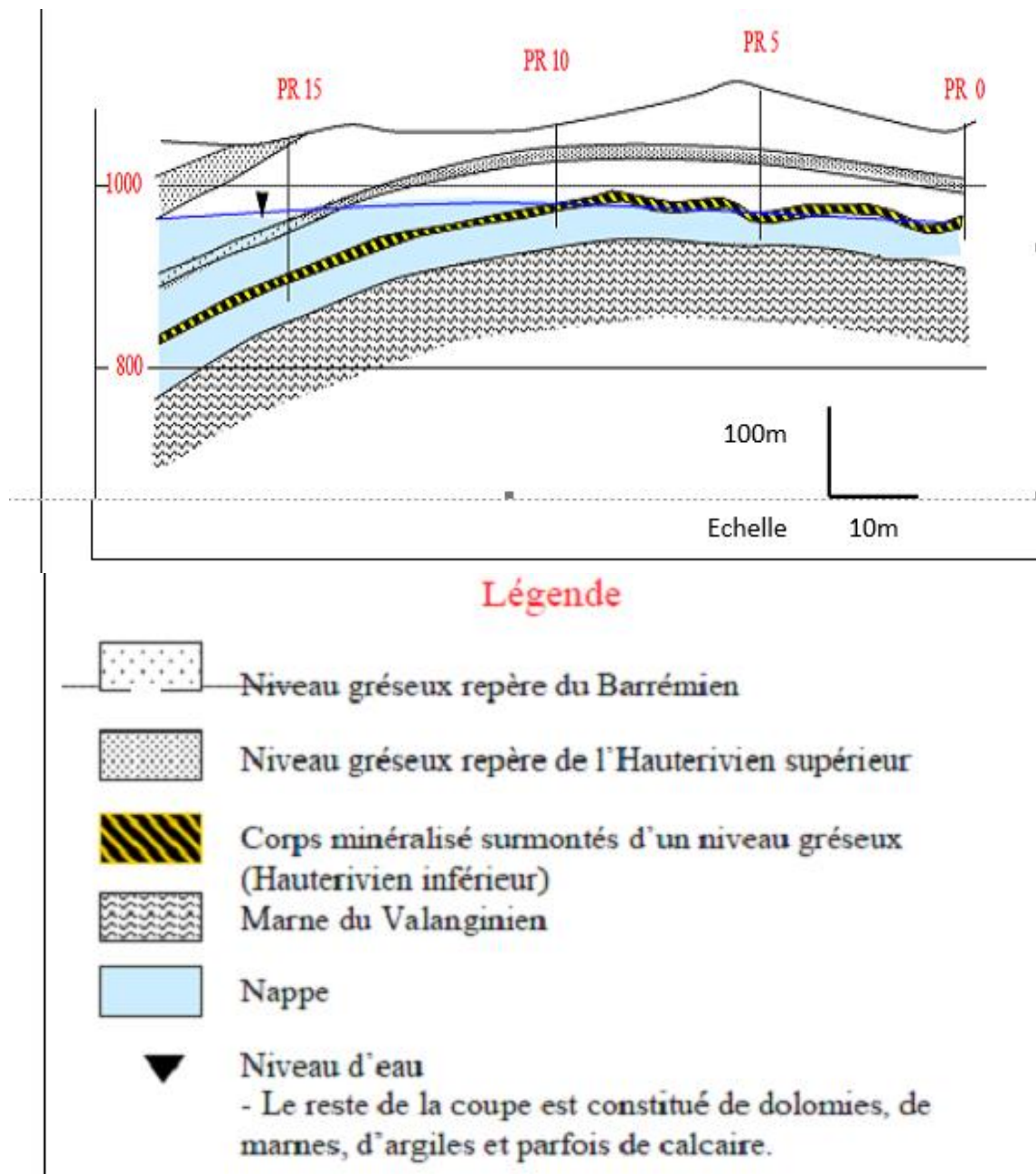


Figure I.7: Coupe hydrogéologique Profil 0 – Profil 15 (d'après ENOF 2003 et 2006).

I.7. Réserves géologiques

Le projet d'exploitation des réserves de Chaâbet El-Hamra retenu par l'ENOF n'a pris en considération que les réserves situées entre les profils 0 et 15 pour les raisons suivantes entre les profils 16 et 24, il existe un secteur d'environ 800 m de longueur à l'intérieur duquel les corps minéralisés sont absents ou présentent des teneurs et des épaisseurs insuffisantes pour justifier leur exploitation figure.I.8.

Au-delà du profil 15, les données hydrogéologiques sont plus contraignantes. La partie du gisement située entre les profils 15 et 31 plonge vers le Nord-Ouest avec un angle plus prononcé que la moyenne (approximativement 15 °). Cette particularité causera de plus grandes difficultés d'ouverture et d'exploitation. [6]

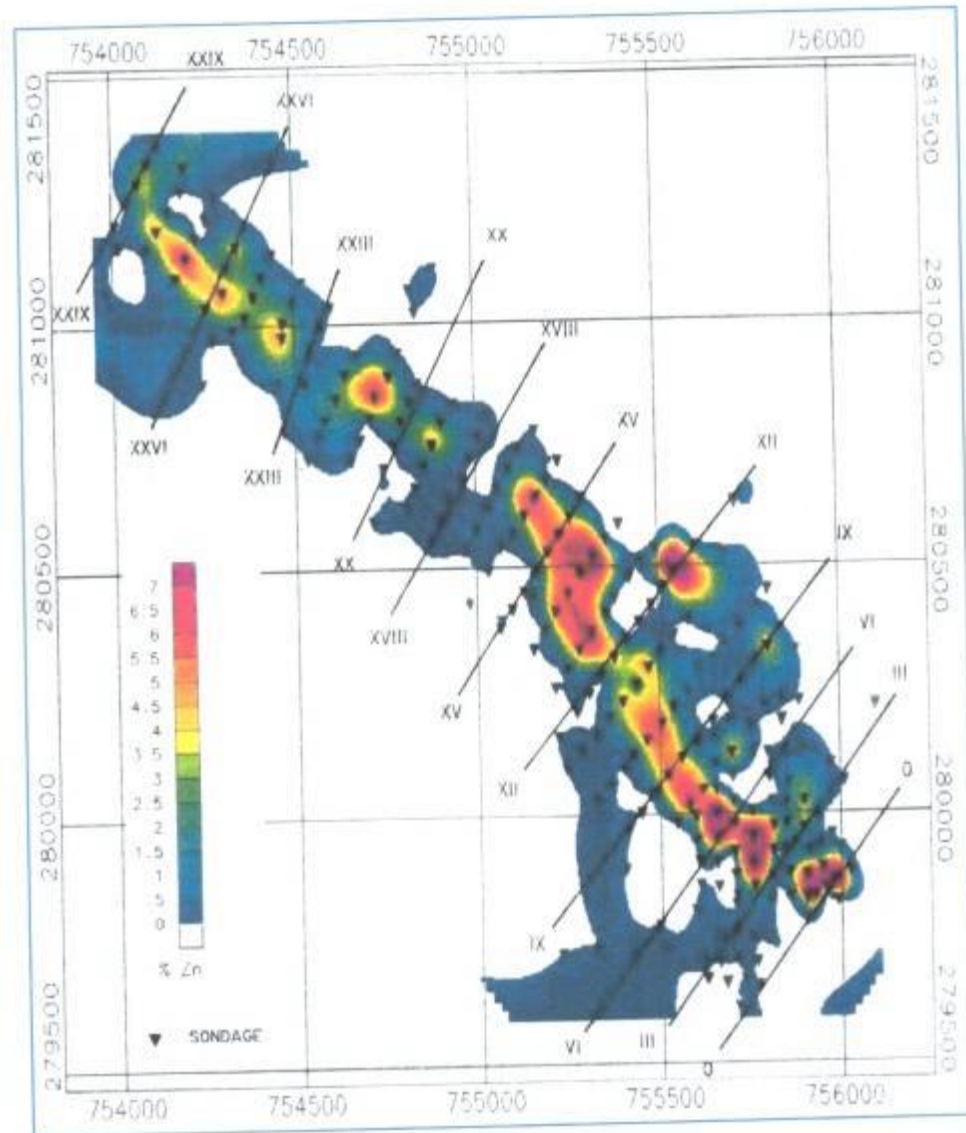


Figure I.8: Distribution des teneurs en Zn des corps minéralisés de Chaâbet E1-Hamra (D'après le bureau d'étude canadien SIDAM, in Nekache 2012) [6]

I.8. Technologie de traitement du minerai

Après avoir fait l'exploitation et l'extraction des roches pour leur richesse en minerais valorisables, ces derniers ont rarement une pureté suffisante pour pouvoir être transformés directement en produits finis, il est donc nécessaire de modifier l'état du minerai extrait au concentré métallique.

L'ensemble des procédés et techniques de la mise en forme et de traitements physiques et physico-chimiques ayant pour objet d'obtenir des produits ayant une valeur commerciale et transformable par la métallurgie à partir de minerai concentré sont effectués au niveau de la laverie de Kherzet Youcef.

Le tout-venant de la mine de Chaâbet-El-Hamra est traité à l'usine de traitement de Kherzet-Yousef. Cette usine utilise la méthode d'enrichissement par flottation pour produire seulement un concentré de zinc.

Durant la vie de l'exploitation de la mine qui a été estimée de 15 à 17 ans, 1 318 657 tonnes avec une teneur moyenne de 5,92% en Zn, seront traitées avec une cadence annuelle de 77 500 tonnes.

L'usine d'enrichissement du complexe minier de Kherzet Youcef, qui a servi à l'enrichissement du minerai de plomb et de zinc de l'ancienne mine, s'adapte convenablement pour le traitement du minerai de zinc provenant de la mine de Chaâbet-El-Hamra. Les essais de traitement, à l'échelle industrielle, ont montré que la flottabilité du minerai du gisement de Chaâbet-El-Hamra est assez simple, tandis que son broyage est relativement lourd, car il est contenu dans une gangue dolomitique d'une dureté comprise entre 8 à 9 sur l'échelle Protodiakonov. [6]



Figure I.9 : Usine de traitement de Kherzet Youcef, 2021

Les différentes méthodes et les principaux procédés d'enrichissement de ces minéraux utiles se présentent dans les sections suivantes :

- La section de concassage et de criblage se fait par deux concasseurs à mâchoire et à cône.
- La section de broyage et classification constituée de deux broyeurs à boulets.
- Le cycle de flottation qui contient une opération de contrôle et trois d'épuration.
- La section de filtration et d'épaississement. [3].

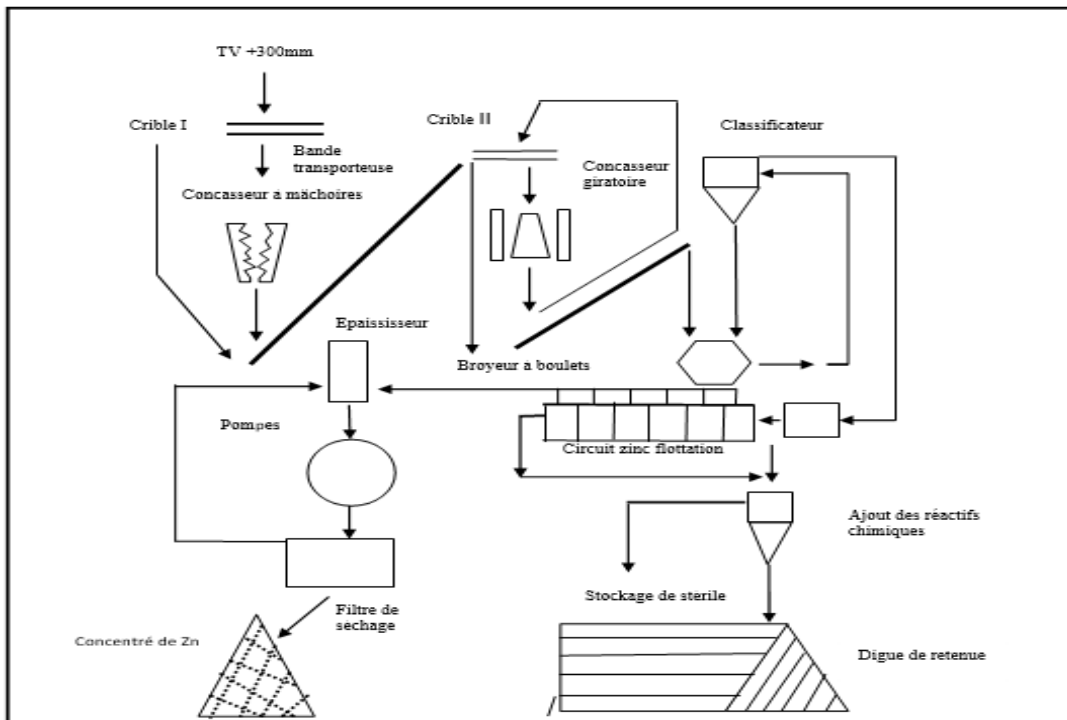


Figure I.10 : Schéma de la laverie de Kherzet Youcef

I.8.1. Traitement mécanique :

I.8.1.1. Section de concassage et de criblage :

L'installation de préparation du minerai est conçue pour fonctionner avec une cadence de l'ordre de 300 t/j.

Le concassage c'est l'action de déduire en petites parties la matière dure et sèche. Cette étape permet de ramener le minerai à une granulométrie où les minéraux économiques pourront être séparés de la gangue. La réduction du tout-venant de (0 à 300mm) jusqu'à (0 à 15 s) est effectuée à l'aide d'un outil appelé le concasseur (à mâchoire et à cône) en deux étapes :

A -Première étape : Le produit abattu est transporté dans des camions et déversé dans la trémie de récupération d'un volume de 30 m³. Le minerai est introduit dans un concasseur à mâchoires, et sort avec une dimension de 0 - 40 mm.

B -Deuxième étapes : Les produits issus du concasseur à mâchoires et du crible sont acheminés à l'aide d'un convoyeur ou transporteur à bande N°01 d'une longueur de 82 m, vers le crible vibrant de type (SIMONS) à maille (15*160 mm) ; la classe granulométrique supérieure à 15 mm est introduite dans le concasseur à cône, qui fonctionne en cycle fermé avec le crible vibrant.

La fraction qui passe par le crible (0 – 15 mm) est déversée dans deux trémies métalliques d'une capacité de 25 tonnes chacune de ces trémies. Le minerai est acheminé vers le corps principal de laverie par l'intermédiaire du convoyeur à bande par suite vers la section broyage à l'aide de la bande N°02 (ENOF, 2014).



Figure I.11 : Vue de la section de concassage et criblage de l'usine de Kherzet Youcef, 2021

Les caractéristiques techniques des équipements de la section de concassage et de criblage sont :

- Le concasseur à mâchoire :
- Type VB-75 ;
- Ouverture 380 X 570mm avec vidange 40mm ;
- Capacité 75 T/h.



Figure I.12: Vue de la section concassage à mâchoire, usine de Kherzet Youcef, 2021

- le crible vibrant :
- Type (SYMONS-NORBERG).
- Dimension de la maille 20 mm.
- Capacité de production 150T/h



Figure I.13: Vue de crible vibrant de Kherzet Youcef, 2021

- le concasseur à cône
- Type KCT-1200 ;
- Diamètre 1200 mm ;
- Orifice d'évacuation 10 mm ;
- Capacité de production 45 T/h.



Figure I.14 : Vue de la section concassage à cône, Kherzet Youcef 2021

I.8.1.2. Section de broyage et classification

Le broyage et classification visent à révéler les particules minérales et ce qui garantit les conditions optimales à obtenir une récupération au maximum des parties intégrantes utiles avec la qualité la plus haute possible et une consommation d'énergie et de réactif minimale. [7]

A- Le procédé de broyage s'effectue par deux broyeurs

Par un broyeur à boulets N1 fonctionnant en cycle fermé un classificateur mono spirale me broyage et la classification s'effectuent dans les limites. Ceci dans le but d'assurer la capacité nécessaire de production et les paramètres technologiques.

B- Equipement et installation de la section de broyage et classification

- Broyeur à boulets
- $\phi 2100$ mm et longueur 2200 mm
- Capacité 6.2 m³

C- Calcul de capacité de production des broyeurs

$$Q = (V \cdot q \cdot 100) / (B1 - B2) \quad (\text{t/h})$$

$$V = 6,2 \text{ m}^3$$

$$q : \text{production du broyeur} = (0,95 \text{ t/m}^3 \text{ H})$$

$$B1 : \text{Teneur de la classe (0,08 mm) dans le minerai broyé } 70 \%$$

$$B2 : \text{Teneur de la classe (0,08mm) dans le minerai broyé } 11\%$$

$$Q = (6,2 \cdot 0,95 \cdot 100) / (70 - 11) \quad Q = 9,98 \text{ (t/h)}$$



Figure I.15 : Vue de broyeur à boulet



Figure 1.16: Vue de Classificateur à vis

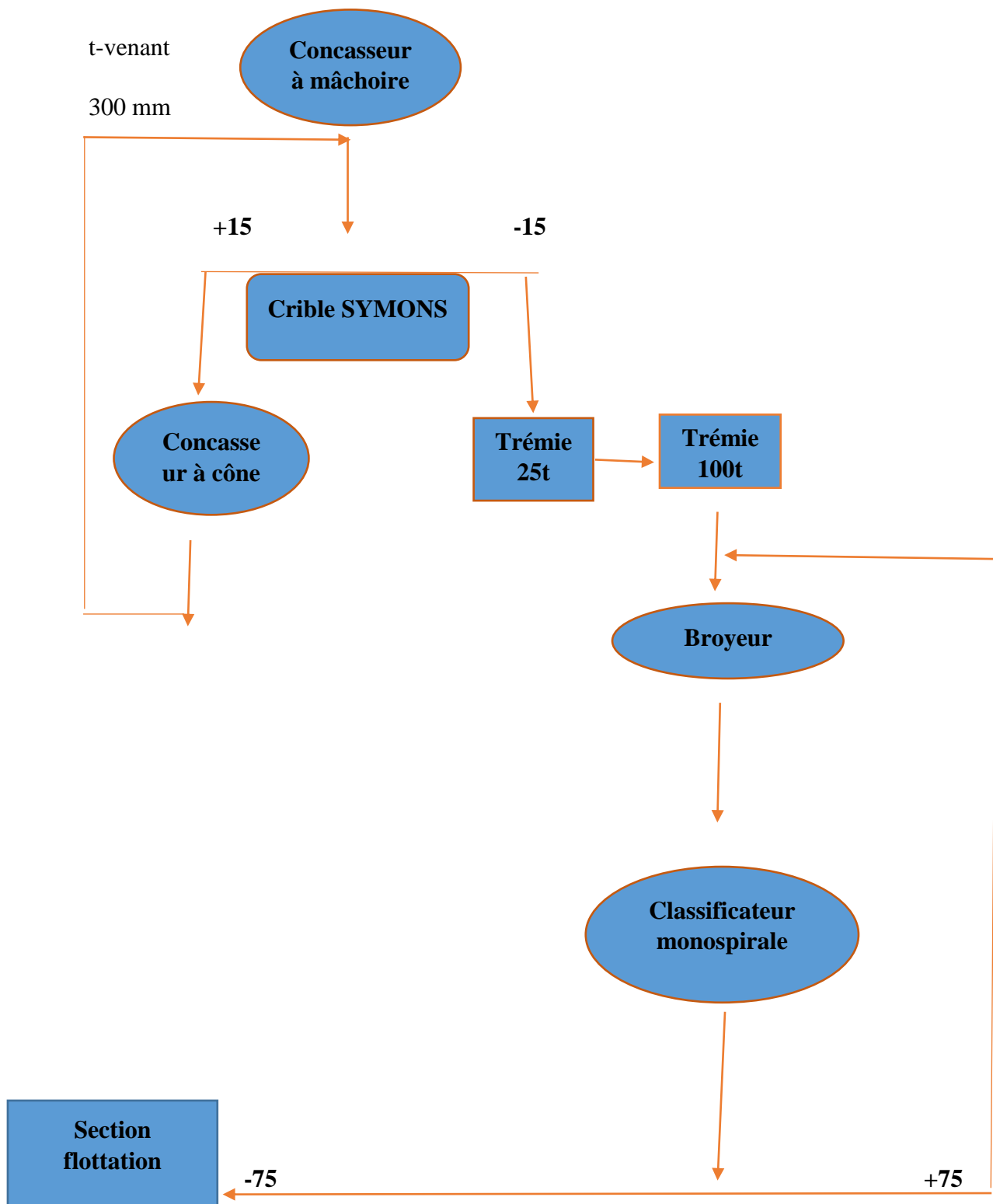


Figure I.17: Section de la préparation mécanique.

I.8.2. Procédé de traitement du minerai

La flottation est une méthode qui permet de séparer des minerais broyés de forme de particules en les immergeant dans le milieu liquide ou ces particules, fixant les bulles d'air, voient leur densité diminuer. [10]

Au niveau de cette section, le processus de traitement de minerai du zinc se fait avec un ensemble de réactifs chimiques, présentés principalement par :

- Collecteur : amyloxanthate
- Activant : sulfate de cuivre (CuSO_4)
- Régulateur du milieu : la Chaux (CaO)
- Moussant : l'huile de pin
- Régulateur de PH

I.8.2.1. Section de flottation et filtration

Le schéma de flottation actuel est composé du cycle de Zinc est procédé par une agitation, en vue de permettre au sulfate de cuivre de libérer les grains minéraux de Zinc et l'xanthate de collecter les grains périphérique des bulles d'air. Le cycle comprend une opération principale, une de contrôle et trois épurations.

La flottation est effectuée dans une cellule de type «Denver ». Elle se compose de :

- Une cuve de forme parallélépipédique.
- Un agitateur.
- Un dispositif pour l'injection de l'air.
- Une raclette.
- Un bac pour la récupération des mousses chargées des particules.

Les indices qualitatifs et les concentrés sont portés sur le bilan annuel.

I.8.2.2. Circuit de flottation :

Les circuits de flottation sont une technologie courante pour la concentration d'une large gamme de minéraux et de traitements des eaux usées. La flottation par mousse est basée sur les différences de capacité des bulles d'air à adhérer à des surfaces minérales spécifiques dans une suspension solide / liquide. Les particules avec des bulles d'air attachées sont transportées à la surface et éliminées, tandis que les particules qui ne sont pas attachées aux bulles d'air restent dans la phase liquide.



Figure I.18 : Cellule de flottation type Denver.

I.8.2.3. Flottation Dégrossissage

C'est la première opération de flottation effectuée, le résultat donne un concentré de mauvaise qualité qui doit être relavé. Ensuite, l'épuisage est consacré au rejet de dégrossissement, son but est de récupérer le maximum de zinc perdu dans ce rejet. Il donne le rejet final du circuit de flottation, et son concentré est recyclé vers le dégrossissement.

Puis le relavage, il traite le concentré de dégrossissage dont la teneur n'est pas à la valeur requise. Les rejets du circuit de relavage sont recyclés vers le circuit principal. Le nombre de cellules de relavage est faible, car le but de cette étape est de produire un concentré riche. Il donne un concentré de zinc de 53%.

Le concentré de zinc subit deux autres opérations de relavage dans le but est de laver le concentré contenant des réactifs et d'éliminer l'eau dans laquelle il se trouve pour obtenir le concentré de zinc dans un état de gâteau par moyen d'égouttage.

Lors de l'épaississement les particules sont soumises à loi de la chute des particules ou des solides dans un milieu liquide ou bien fluide, où la vitesse de chute des particules augmente en fonction leur dimension et de leur densité et les épaisseurs donnent une surverse tandis qu'à la base ils donnent un produit boueux ou une sous verse.

Une pompe à diaphragme assure l'évacuation des produits sédimentés. Le pourcentage de solide peut atteindre 60 % en poids dans un épaisseur alimenté avec une pulpe à 30 % en poids de solide. Les produits, déposés au fond de la cuve, sont raclés par une spirale ou un râteau vers l'orifice de sortie en liaison avec la pompe.

Enfin, la filtration est la séparation d'une phase continue liquide ou gazeuse et d'une phase dispersée (solide ou liquide) initialement mélangées. Alors on cherchera à récupérer soit la phase continue débarrassée au maximum de la phase dispersée (filtration de l'air ou de l'eau...), soit la phase dispersée (récupération d'un précipité cristallin, de poussière de métal précieux dans une fumée etc.).



Figure I.19: Filtration de concentré de flottation de blende Zn.

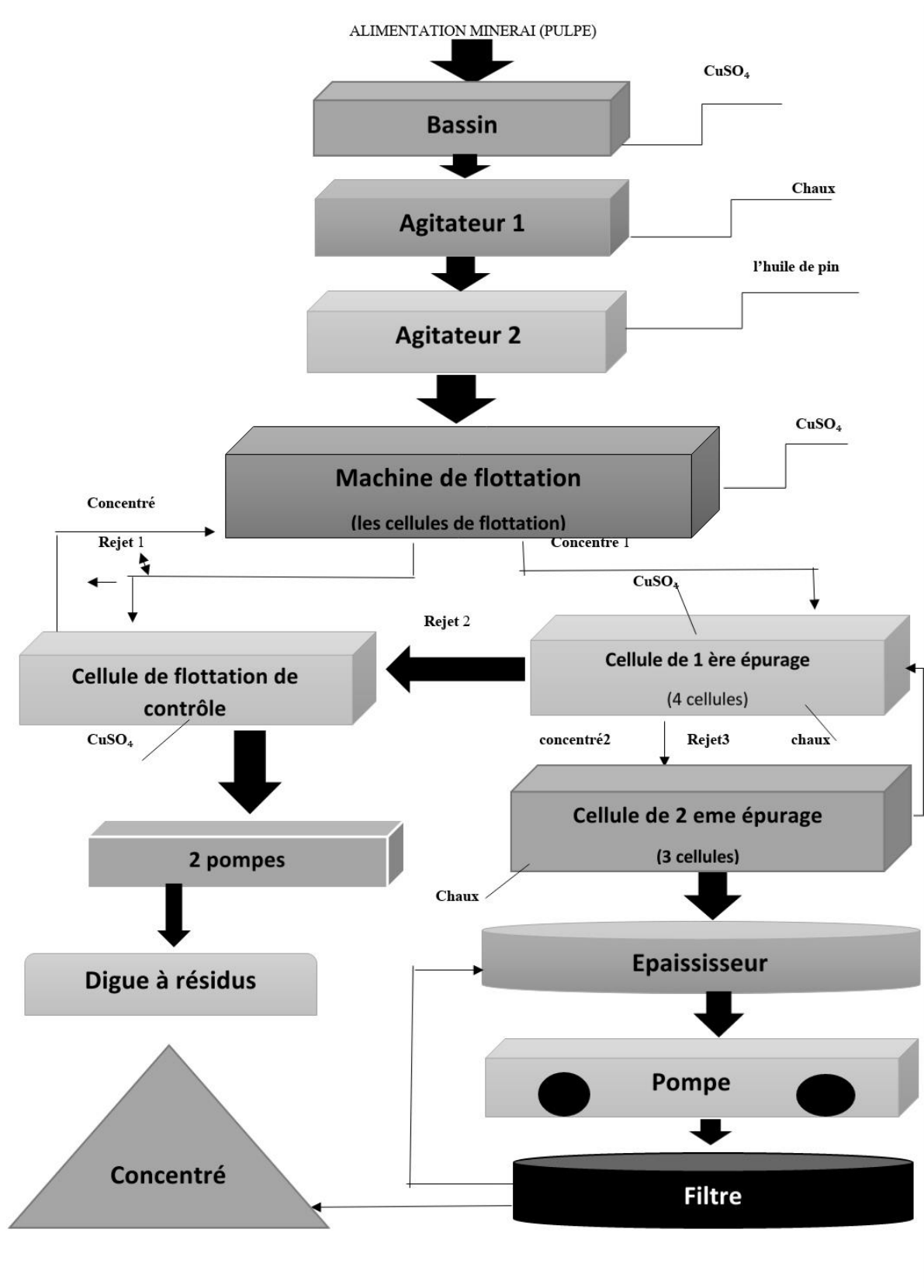


Figure I.20 : Schéma de traitement par flottation d'un minerai de blende à gangue sulfurée et carbonatée.

I.9. Conclusion :

En fait, l'ensemble de la chaîne de traitement des minéraux qui concentre les sulfures de métaux à valeur économique contribue à façonner la chimie de surface de la pyrite dans les émissions concentrées. Dans la Province géologique de l'Ain Azel, les gisements sont principalement de type sulfure massif de plomb-zinc. L'exploitation de tels gisements nécessite des lignes de traitement du minerai pour le broyage du minerai et la flottation du zinc, et ce dernier est le seul minéral recherché. Le broyage s'effectue en milieu humide et en conditions alcalines, avec un excès de chaux. La flottation au sulfure de zinc comprend une étape d'activation avec du sulfate de cuivre, puis l'ajout de collecteurs de xanthate ou de dithiophosphate. La flottation est effectuée sur l'établi, et il y a deux étapes en série : la séparation grossière et l'échappement. Une étape supplémentaire de lavage est effectuée sur le concentré à deux étages en série. Les émissions de l'usine d'enrichissement sont constituées de divers résidus de l'étape de flottation.

CHAPITRE II
HYDROMÉTALLURGI
E ET MÉTAUX
LOURDS

II.1. Introduction

L'hydrométallurgie est un Procédé de purification des métaux qui consiste à mettre en solution les différents métaux contenus dans un minerai ou un concentré afin de les séparer pour les valoriser.

Le procédé hydrométallurgique typique se décompose des opérations suivantes. Dans un premier temps, on met en solution les différents matériaux (lixiviation ou dissolution) puis on les sépare (purification). Les différents métaux traités par hydrométallurgie sont le zinc, le nickel, le cuivre, le cobalt, l'uranium, le chrome, le manganèse.

Le terme métaux de base s'appréhende par opposition aux métaux précieux. Ce sont les métaux communs que l'on trouve généralement en plus grande quantité dans la nature que les métaux précieux comme l'or ou l'argent. Dans cette catégorie, on retrouve les métaux ferreux comme le fer, l'acier doux, la fonte, et les métaux non ferreux comme l'aluminium, le zinc, le cuivre et le plomb. Après neutralisation, ces derniers résidus ne présentent plus aucun caractère toxique : ils peuvent être stockés dans des fosses non imperméabilisées et l'eau peut être recyclée.

II.2. traitement par flottation des sulfures

Après extraction du minerai, celui-ci subit un traitement physique consistant à éliminer une grande partie de la gangue. La flottation consiste à séparer d'une part les parties valorisables d'un minerai et d'autre part la gangue, en jouant sur leurs propriétés de surface et plus particulièrement sur le caractère hydrophobe ou hydrophile (mouillant) de celles-ci.

Avant de pouvoir séparer les constituants du minerai, il faut "libérer" les particules valorisables par broyage qui sera d'autant plus poussé. Ainsi la flottation est réalisée dans des bacs dans lesquels le minerai broyé est mis en suspension aqueuse. Des ajouts éventuels sont effectués pour ajuster le pH, modifier les propriétés de surface des particules à l'aide de collecteurs, former des mousses stables. D'autres ajouts permettent de moduler l'action des agents collecteurs : des déprimants augmentent le mouillage, des activant annihilent les effets des déprimants. Par ailleurs, une arrivée d'air permet de former des bulles qui entraînent en surface les éléments valorisables qui se retrouvent dans les "mousses". Ces dernières, après séchage, donnent des concentrés. Il est également possible de séparer sélectivement divers sulfures métalliques d'une part de la gangue et d'autre part entre eux. [11]

Tableau II.1 : Les principaux minéraux pouvant être séparés par flottation

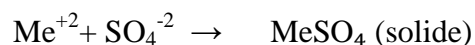
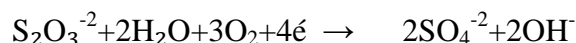
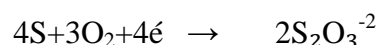
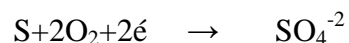
Nom du minerai de Sulfure	Minerai
Galène	PbS
Blende	ZnS
Marmatite	MoS ₂
Molybdénite	MoS ₂
Pentlandite	Ni _{1-x} Fe _x S
Chalcocite	Cu ₂ S
Covellite	CuS
Chalcopyrite	CuFeS ₂
Bornite	Cu ₅ FeS ₄
Enargite	Cu ₃ AsS ₄
Tennantite	(Cu, Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃
Tétrahédrite	FeS ₂
Pyrite FeS ₂	FeS ₂
Pyrrhotite	Fe _{1-x} S
Mispickel	FeAsS

II.2.1 Réactifs de flottation des sulfures

a- Propriétés des sulfures

Les propriétés fondamentales des sulfures, qui ont une influence prédominante sur leur comportement en flottation concernent :

- Leur très grande insolubilité (les pKs des réactions $\text{MeS} \rightarrow \text{Me}^{+2} + \text{S}^{-2}$ sont de l'ordre de 20) ;
- Leur instabilité en présence d'eau et d'air ; les réactions suivantes :



En raison de la présence de gaz carbonique dissous et en fonction de la solubilité relative des carbonates par rapport aux sulfates, thiosulfates, hydroxydes, etc., le composé de

surface peut se transformer, par un mécanisme d'échange d'ions, en un carbonate de surface. Les temps de contact entre les phases (air, solution aqueuse, minéral) sont relativement courts (de l'ordre de quelques dizaines de minutes lors des opérations de broyage, par exemple) et les cinétiques relativement lentes, ce qui conduit à n'envisager que la formation de quantités faibles de composés oxydés (en règle générale, inférieures à la quantité nécessaire pour couvrir la surface des particules du sulfure). [12]

b-Principaux collecteurs des sulfures

Les collecteurs actuels appartiennent à la famille des thiols RS est représenté sur le (tableau II.2), ci les plus répandus sont les «dithiocarbonates et les dithiophosphate» plus connus respectivement sous leur dénomination de xanthates et d'Aeroflot. Les groupements alkyls sont généralement courts [C₂ (éthyle) à C₈ (hexyl)]. Les produits commerciaux sont généralement des sels de sodium ou de potassium.

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

Colporteur	Formule	pH de mise en œuvre
<i>Allkyldithiocarbonates(xanthate)</i>	<i>R-O-CSS⁻, K⁺</i>	8-13
<i>Dialkyldisulfures(dixanthogène)</i>	<i>R-O-CSS-SSC-O-R</i>	1-11
<i>Dialkyldithiophosphates</i>	<i>(R-O)₂PSS⁻, K⁺</i>	4-12
<i>Dialkyldithiocarbamate</i>	<i>(R)₂N-CSS⁻,K⁺</i>	5-12
<i>Isopropylthionocarbamate</i>	<i>(CH₃)₂-CH-O-CS-NH- C₂H₅</i>	4-9
<i>Mercaptobenzothiazole</i>	<i>C₆H₄-N=CSS⁻, Na⁺</i>	4-9

II.2.2.Activants et déprimants

a- Activation des sulfures

Les sulfures ne flottent pas ou flottent mal avec les thiols à courte chaîne. Pour le flotter, il est nécessaire de transformer sa surface en un autre sulfure susceptible d'adsorber un thiol selon une réaction du type : $ZnS + Me^{2+} \longrightarrow MeS + Zn^{2+}$

Cette réaction est possible thermodynamiquement pour les ions Ag⁺, Cu²⁺ Pb²⁺ et Hg²⁺, mais les deux seuls cations utilisés industriellement sont Cu²⁺ et Pb²⁺, car ils sont soit présents dans les minerais de zinc (en particulier Pb²⁺), soit ajoutés volontairement pour activer la blende. [12]

- **Activation par Cu^{2+}**

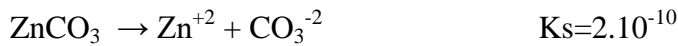
La constante d'équilibre de la réaction à 25 °C est :

$$K = \frac{\text{Zn}^{2+}}{\text{Cu}^{2+}} = 9 \times 10^{10}$$

La structure formée à la surface correspond à une covelline orientée sur la blende, qui joue le rôle de cristal hôte. Cette réaction hétérogène est relativement rapide au départ (environ 30 min pour les trois premières couches) puis elle est bloquée par les mécanismes de diffusion à l'état solide. En présence des thiols et d'oxygène, il se forme sur la surface activée un film continu de CuS partiellement recouvert de CuRS et de RSSR adsorbés.

- **Activation par Pb^{+2}**

La faible valeur de la constante d'équilibre $K = (\text{Zn}^{+2} \div \text{Cu}^{+2}) = 10^3$ permet de contrôler la réaction (en déplaçant l'équilibre vers la gauche) avec des quantités relativement faibles de réactifs En particulier. L'ajout d'ions carbonates contrôle le sens de la réaction par les concentrations d'équilibre des réactions suivantes :



b-Dépression des sulfures

On peut donner quelques principes généraux sur la dépression des sulfures car les possibilités sont nombreuses et dépendent de cas particuliers.

- Une oxydation poussée et sélective de certains sulfures, dont la surface est transformée en un composé oxydé, est un moyen de les déprimer.
- Étant donné que O_2 est nécessaire à la flottation des sulfures par les thiols, une maîtrise du pouvoir oxydant de la pulpe permet de moduler l'adsorption.

La faible conductivité de la blende se prête mal à ce type de contrôle, car les réactions électrochimiques de surface sont difficiles, que ce soit des réactions de réduction de l'oxygène et d'oxydation du sulfure, ou des réactions d'adsorption des thiols (avec oxydation des sulfures ou des thiols).

- Les composés de surface métal-thiol ou RSSR peuvent être détruits à pH très acide.
- Il est possible, dans le cas de la pyrite, de bloquer la réaction de formation de RSSR, ce qui revient à déprimer la pyrite.
- Il est enfin possible d'utiliser le cyanure pour déprimer la blende, en se plaçant à un Ph basique. Le cyanure complexe le cuivre, qui est l'activant naturel de la blende comme on vient

de le voir précédemment, que ce dernier se trouve en solution dans la pulpe ou adsorbé sur la surface. [12]

II.3. Lixiviation chimique et bactérienne des sulfures et techniques

d'extraction par solvant :

La lixiviation est l'art d'extraire les métaux de leurs minerais. Les minerais contiennent généralement les éléments métalliques à l'état oxydé. La majorité parmi eux sont des sulfures, des oxydes, des chlorures ou des carbonates. Cette technique est souvent utilisée pour des métaux lourds et précieux comme le cuivre, le zinc et l'uranium ; elle est basée sur des réactions chimiques visant à absorber spécifiquement la substance à extraire. Dans ce chapitre en va présenter une généralité sur la lixiviation.

II.3.1. Généralités sur la lixiviation

L'obtention du métal en métallurgie extractive se fait par deux voies, soit par l'hydrométallurgie (voie humide) ou soit par la pyrométallurgie (voie sèche).

L'hydrométallurgie commence par la lixiviation, qui est un procédé consistant en une mise en solution sélective d'un concentré ou d'un minerai par un solvant (acide ou base), l'objectif de cette opération est de dissoudre une grande quantité des métaux utiles [13].

Parmi les principales étapes du traitement du gisement, mentionnons : le concassage et le broyage, la séparation chimique ou physique. Le concassage et le broyage du gisement visent à libérer physiquement les minéraux nécessaires avant de les séparer des résidus par des procédés physiques et chimiques. Le concassage, effectué à sec, sert à simplifier le gisement en particules primitives. Le broyage, effectué pour obtenir des particules plus minces, se fait en milieu humide, parfois avec l'ajout de substances chimiques comme le carbonate de sodium, le cyanure de sodium et le dioxyde de soufre dans le circuit de broyage, en vue de la séparation du minerai.

II.3.2.Types de lixiviation

Les types de lixiviation sont classés suivant les agents lixivants utilisés [14]. On distingue :

II.3.2.1.Lixiviation chimique [14]

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

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

A. Lixiviation acide :

Cette lixiviation est utilisée pour les minerais à gangue acide, le milieu solvant est constitué de l'acide. On distingue dans cette catégorie :

➤ **Lixiviation acide et oxydante**

Il y a lixiviation oxydante lorsqu'il y a montée d'état d'oxydation de l'élément dans la solution que dans le solide. Ce type de lixiviation s'applique aux minerais mixtes (oxyde et sulfures). L'acide sulfurique est le solvant le plus utilisé. Les conditions oxydantes peuvent être réalisées par l'air (oxygène) ou par les ions ferriques présents (provenant des minerais ou ajoutés intentionnellement) [14].

➤ **Lixiviation acide et réductrice**

Dans ce types de lixiviation, la solution lixivants est rendue réductrice par un agent réducteur tels que le SO_2 , le fer ferreux, le NO_2 , le metabisulfite de sodium. La réduction permet la dissolution des oxydes tels que MnO_2 et CO_2O_3 qui ne sont pas solubles dans l'acide sulfurique dilue.

B. Lixiviation ammoniacale

La lixiviation ammoniacale est utilisée pour les minerais à gangue dolomitique (CaO , MgO) qui se prêtent mal à une attaque acide. Pour les minerais sulfurés, la lixiviation ammoniacale se fait en présence d'oxygène comme agent lixiviation.

C. Lixiviation par cyanuration

Ce type de lixiviation est applique essentiellement au traitement des métaux précieux. On utilise une solution diluée de cyanure de potassium (KCN) en milieu basique pour éviter l'hydrolyse du cyanure.

D. Lixiviation par les chlorures

Cette lixiviation est utilisée pour les minerais sulfurés mais l'utilisation de l'acide chlorhydrique est exclue compte tenu de son prix qui est élevé, cependant on emploie une solution acide de FeCl_3 .

E. Lixiviation par la soude caustique

Cette lixiviation est pour dissoudre les oxydes tels que la bauxite.

II.3.2.2. Lixiviation bactérienne

Elle est utilisée pour la mise en solution des minerais sulfurés, pauvres et complexes. Les microorganismes comme les thiobacilles et les ferrobacilles possèdent des propriétés catalytiques permettant d'augmenter la cinétique de lixiviation.

A. La biolixiviation

La biolixiviation ou lixiviation bactérienne est une technique d'extraction de métaux à grands intérêts économiques d'une roche, mettant en jeu des micro-organismes capables de convertir ces métaux de la forme solide à la forme soluble, qui pourront ensuite être extraits. Ces processus peuvent être dissociés dans les eaux des sites à déshydratation minière acide (bactéries mésophiles) ou des sources hydrothermales (bactéries thermophiles). Cette technique s'effectue sans rejet de SO₂ dans l'atmosphère [44], et naturelle, économique et important sur le plan environnemental. Elle s'effectue à des températures et pressions faibles avec une vitesse de réaction lente, mais leur inconvénient est l'obtention des solutions diluées.

On a trois catégories des bactéries suivant qu'elles procèdent à température faible, moyenne ou exagérée sont :

- Les bactéries mésophiles largement connus par leur activité métabolique à température faible et moyenne (30°C à 35°C) sont *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxydans* (thermo tolérant up to 50°C) et *Thiobacillus caldus* ;
- Les bactéries thermophiles moyenne (biolixiviation de 50°C à 55°C) : *Thiobacillus caldus*, *Sulfobacillus* (tolérant jusqu'à 63°C), *Sulfobacillus thermosulfidooxydans*, *Sulfobacillus acidophilus* et *Acidimicrobium* ;
- Les bactéries thermophiles exagérées (60°C à 85°C) : *Sulfolobus* (*sulfolobus metallicus*, *sulfolobus acidocaldarius*), *Acidianus brierleyi*.

Les solutions de biolixiviation de la chalcopirite produisent du soufre qui tend à recouvrir les particules minérales et à interférer dans le transfert d'électrons, la formation du soufre à la surface des particules se produit dans les processus chimiques et microbiens.

B. La biosorption

La biosorption est un terme utilisé pour décrire tous les processus reliés à la récupération des métaux en présence des absorbant, qui sont des cellules vivantes ou morte. La biosorption se fait avec des bactéries active ; lorsque les interactions métaux-bactéries se fait avec des cellules vivantes (précipitations, oxydation-réduction, ...), passive ; lorsque les métaux sont transformé suite à des réactions physico-chimiques (complexation par des substances. produites par les cellules, absorption du métal sur la paroi cellulaire) [14].

C. La précipitation

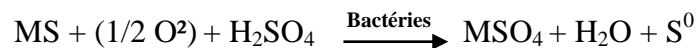
Le processus se fait sous des conditions anaérobies (qui se déroule en l'absence de l'oxygène) et performe une oxydation complète des sulfures à l'aide des bactéries sulfato-réducteur.

II.3.2.2.1 Mécanismes de la lixiviation bactérienne

Plusieurs mécanismes sont proposés dans la littérature sans que tous les autres soient en accord. Les mécanismes les plus décrits dans la littérature sont les mécanismes direct et indirect. Ce dernier par la production de l'agent oxydant chimique le Fe^{+3} . Trois mécanismes par lesquels les microorganismes pourraient être en interaction avec un minéral sulfuré :

A. Le mécanisme de contact direct

Les bactéries en contact avec le minéral sulfuré oxydent la phase sulfurée en sulfate par des moyens biologiques directs sans exiger la présence d'ions ferriques ou ferreux.

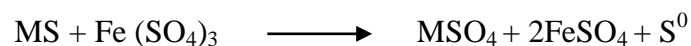


La réaction se passe donc à l'interface entre le solide et la phase aqueuse où sont inoculées les bactéries. La réaction se passe par contact de la bactérie avec le minéral sulfuré solide de sorte que la cinétique dépend de la surface spécifique du minéral et des produits qui se forment en surface, qui tendent souvent à gêner ce contact. Le soufre qui se forme par l'équation chimique a tendance à passiver les particules solides et arrêter la dissolution des sulfures. Il est éliminé en surface par oxydation catalysée par les bactéries selon la réaction :



b. Le mécanisme indirect

Les bactéries oxydent les ions ferreux en ions ferrique et les ions ferriques oxydent ensuite le minéral sulfuré. La réaction principale de dissolution des sulfures métalliques est une réaction chimique entre le fer ferrique et les sulfures :

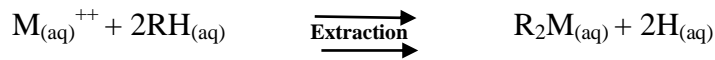


La bactérie régénère constamment le fer ferrique en solution par la réaction catalytique et le soufre formé par la réaction est, comme dans le premier mécanisme, oxydé par la bactérie en acide sulfurique.

II.3.3. Technique d'extraction liquide-liquide

L'extraction liquide-liquide, appelée aussi extraction par solvant, est une méthode physico-chimique de séparation et de concentration d'éléments chimiques. Elle est basée sur la distribution d'un soluté métallique entre deux phases liquides non miscibles dont l'une est aqueuse et l'autre organique. La phase organique constituée par un ou plusieurs extractants dissous dans un diluant est encore appelée solvant. [14].

L'extraction et le strippage utilisent la même réaction chimique dont l'équilibre est contrôlé principalement par le pH du milieu. L'extraction est réalisée à un pH plus élevé qu'au strippage.



$M_{(aq)}^{++}$: ion métallique en solution aqueuse

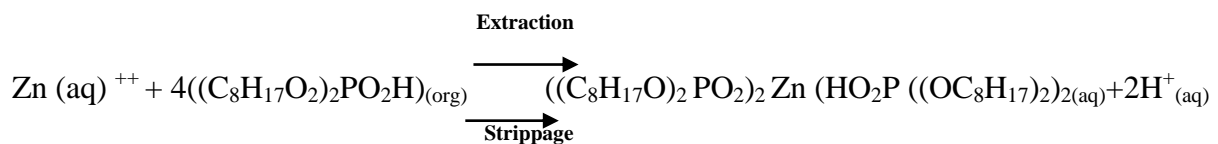
$2RH$ (org) : extractant dissous dans la phase organique

R_2M (org) : complexe métal/extractant dans la phase organique

L'extraction par solvant est utilisée en hydrométallurgie pour la purification et/ou la concentration des solutions. Combinée à l'électrolyse. [14]

II.3.3.1. Extraction par solvant du zinc

Le zinc forme des complexes stables avec les extractions organophosphoriques qui sont des dérivés de l'acide phosphorique. Le plus commercialisé est le di (2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA). L'équilibre d'extraction-strippage est représenté par :



Le complexe est stable aux pH supérieurs à 2,5. Un problème qui limite l'utilisation de ces extractants acides est leur sélectivité limitée pour plusieurs métaux et leur forte affinité pour l'extraction du Fe^{3+} . L'extraction du Zinc exige l'élimination au préalable de ces ions en solution. Pour améliorer sa sélectivité, le D2EHPA est parfois utilisé en mélange avec le TBP (Tri-Butyl phosphate) qui modifie ses propriétés.

A notre connaissance, il n'existe pas encore d'usine utilisant l'extraction par solvant du zinc avec le D2EHPA. Par contre, cette extraction est très développée pour la purification de solutions, comme c'est le cas pour le cobalt à Kasese Cobalt en Ouganda, Mopani Copper Mines, Chambishi Metal Plc en Zambie et Knightsbridge Cobalt en Afrique du Sud.

La lixiviation des sulfures est plus difficile que celle des oxydes. Pour cette raison, la métallurgie classique commence par un grillage qui transforme les sulfures en sulfates ou oxydes. Deux inconvénients majeurs de cette technique sont d'ordre économique lorsqu'il s'agit d'un minerai ou concentré pauvre, et d'ordre environnemental car les gaz contiennent du SO_2 et parfois de l'arsenic polluant pour l'atmosphère.

Des problèmes peuvent se présenter suite à la formation de produits insolubles tels que le soufre, les polysulfures, les jarosites sur les particules minérales qui tendent à bloquer la lixiviation. Pour éviter la passivation par le soufre, ce dernier est oxydé par le soufre, ce dernier est oxydé pressions élevées. Dans les procédés qui utilisent la lixiviation bactérienne,

l'élimination du soufre de la surface minérale est effectuée par son oxydation en ions sulfates par l'usage des bactéries.

Comparée aux autres technique effectuées en milieu sulfate, la biolixiviation des sulfures est utilisé la capacité de certaines bactéries à oxyder les minéraux sulfurés suivant un mécanisme de contact direct ou un mécanisme indirect lequel se caractérise par la régénération constante de fer ferrique dans le milieu réactionnel et la solubilisation des sulfures par l'action chimique du Fe^{3+} sur les sulfures. Les bactéries les plus employées jusqu'à récemment sont les bactéries acidophiles mésophiles opérant à moins de 40°C. [14]

II.4. Effluent

II.4.1. Définition

Un effluent désigne le fluide résiduaire d'origine industrielle, issu du secteur de l'agroalimentaire, de la chimie et pétrochimie, de la métallurgie, du secteur pharmaceutique ou cosmétique, mais aussi de l'industrie minière de l'aéronautique, automobile ou du transport ferroviaire. Pour les rejets domestiques, l'épuration des eaux usées est nécessaire. Mais l'extrême diversité des eaux résiduaires industrielles (ERI) nécessite une intervention propre à chaque type d'industrie via des procédés spécifiques.

II.4.2. Les différents types d'effluents

Quatre grandes catégories de rejet peuvent être distinguées dans l'industrie :

- Les effluents de fabrication :

La plupart des procédés industriels engendrent des rejets polluants qui proviennent du contact de l'eau avec des gaz, liquides ou solides. Ces rejets sont soit continus, soit discontinus. La présence de bassins d'homogénéisation est donc indispensable.

- Les effluents particuliers :

Certains effluents sont susceptibles d'être ségrégés afin de subir un traitement spécifique. La récupération de matières premières et/ou d'eau en fabrication est alors possible. Dans un second cas, ces effluents sont dirigés vers un bassin de stockage pour être réinjectés à débit pondéré dans le circuit de traitement, après avoir subi au besoin un prétraitement. C'est le cas des bains de décapage et galvanoplastie ; soudes usées ; eaux ammoniacales de cokerie ; condensats de papeterie, « eaux mères » des industries agroalimentaires et chimiques ; rejets toxiques et rejets concentrés.

- Les effluents des machines :

Ce sont les fluides qui découlent des cuves et tuyauteries comme les eaux de vannes, les eaux de chaufferie comme les purges de chaudière ou de réfrigération, ou encore les boues du traitement des eaux d'appoint.

- Les rejets occasionnels :

Il s'agit de tout fluide qui survient suite à une fuite accidentelle de produits lors de la manutention ou du stockage des eaux de lavage de sols ou d'outils de production par exemple ; mais aussi des eaux polluées. [7]

II.5. Notion de la toxicité

La toxicité est la mesure de la capacité d'une substance toxique, à provoquer des effets néfastes et mauvais pour la santé ou la survie chez toute forme de vie, qu'il s'agisse de la vitalité de l'entité ou d'une de ses parties.

II.5.1. Les formes d'intoxication

Selon que l'on distingue la rapidité d'apparition des symptômes, leur sévérité, leur durée ou la rapidité d'absorption de la substance toxique, nous avons affaire à des intoxications : suraiguës, aiguës, subaiguës, subchroniques ou chroniques. Lors d'études de la toxicité d'une substance chimique, d'un point de vue opérationnel :

- Toxicité suraiguë : l'intoxication suraiguë correspond à une exposition de très courte durée. L'absorption est toujours très rapide, la dose toujours unique et la mort survient rapidement. Exemple : la guerre chimique.

- Toxicité aiguë : administration unique du toxique ou en plusieurs fois dans délais ne dépassant 24 heures. L'apparition de la toxicité est de courte durée. L'absorption du toxique et les manifestations d'intoxication sont rapides. Exemple : intoxications alimentaires ; intoxications médicamenteuses ; intoxications par les plantes et champignons.

- Toxicité subaiguë : toxicité réitérée pendant au maximum 28 jours. L'intoxication subaiguë correspond à des expositions fréquentes et répétées sur une période de plusieurs jours ou semaines pour que les symptômes d'intoxication apparaissent. Exemple : les effets secondaires des médicaments.

- Toxicité subchronique : toxicité réitérée pendant plus de 28 jours et moins de 90 jours. Exemple : les effets secondaires des médicaments comme les pilules de la contraception.

- Toxicité chronique : toxicité réitérée pendant plus de 90 jours. Dans le cas d'une intoxication chronique, les expositions sont répétées sur de longues périodes, la manifestation de l'intoxication dépend soit du poison qui s'accumule, soit des effets engendrés qui s'additionnent. [15]

II.5.2. Comment évaluer un effet toxique ?

L'évaluation de la toxicité s'appuie sur des études qualitatives (non mesurables) ou quantitatives (mesurables) adéquates. Il existe plusieurs types d'études qui nous permettent d'évaluer les effets d'un toxique. On peut les classer dans quatre catégories :

- les études épidémiologiques, qui comparent plusieurs groupes d'individus ou les études de cas ;
- les études expérimentales in vivo, qui utilisent des animaux (ex. : lapin, rat et souris) ;
- les études in vitro, effectuées sur des cultures de tissus ou des cellules ;
- les études théoriques par modélisation (ex. : structure-activité).

On utilise fréquemment une terminologie pratique mais arbitraire pour désigner les diverses formes d'intoxication selon la fréquence et la durée de l'exposition. [16]

Tableau II.3 : Les formes d'intoxication

Forme d'intoxication	Fréquence d'administration	Durée de l'exposition
AIGÜE	Unique	< 24 heures
SUBAIGÜE	Répétée	≤ 1 mois
SUBCHRONIQUE	Répétée	de 1 à 3 mois
CHRONIQUE	Répétée	> 3 mois

II.5.3. L'effets des activités minières sur les eaux

L'impact est également qualitatif en raison de l'usage de produits chimiques dans les phases de forage, d'extraction puis de concentration des minerais.

Une mine exploitée est les voies de contact entre le minerai et l'eau ou l'oxygène offrant des conditions oxydantes aux minerais ciblés par les permis en cours qui sont des sulfures. Que ce soit en fond de mine par lessivage sur les parois ou en percolation sur les matériaux stockés en extérieur, ce phénomène d'oxydation s'auto-entretient et s'amplifie tant qu'il y a des sulfures exposés à l'air et à l'eau. S'en suivent des écoulements acides, les drainages miniers acides (DMA), qui sont une source de pollution acide et métallique (métaux lourds) pour les milieux aquatiques.

Les eaux acides peuvent entraîner une mortalité importante, des perturbations de la croissance, de la reproduction et des dommages chroniques aux organes et aux tissus. Ainsi, à titre d'exemple, le zinc, le cadmium et le cuivre sont particulièrement toxiques en milieu acide et agissent en synergie pour inhiber la croissance des algues.

Le minerai recherché est extrait par broyage de la roche et concentration chimique. De nombreuses études pointent que l'efficacité des équipements de forage nécessite l'injection de boues lubrifiantes, dont la composition ne se résume pas à de l'argile et de l'eau. Les mélanges utilisés font appel à des matières argileuses spécifiques mais aussi des additifs de synthèse : fluidifiants, plastifiants, antiagglomérants... Ces composés se disperseront inévitablement dans l'environnement et le contaminées. [17]

II.6. Concepts sur les métaux de base (zinc, plomb, cuivre)

Le terme de métaux lourds est utilisé pour un ensemble d'éléments ayant une densité élevée de plus de 5 kg/dm^3 . Dans le domaine de la pratique ce terme englobe les métaux toxiques réellement lourds à d'autres l'étant moins. La notion d'éléments traces métalliques, ou ETM tend à remplacer celle de métaux lourds. [18]

II.6.1. Le zinc

Le zinc est un élément chimique qui appartient aux éléments de transition de la classification périodique et qui est moyennement abondant dans l'écorce terrestre .

Le minerai qui est le plus utilisé est appelé sphalérite ou autrefois blende (ZnS) qu'est le plus répandu dans la lithosphère dont il représente le principal minerais de zinc et cristallise dans des filons hydrothermaux, de haute et moyenne température recoupant de nombreux types de roches, parfois dans les pegmatites. Les minerais de zinc sont souvent associés à ceux du plomb, de cuivre, de fer, dont divers gisements ont une origine magmatique, ou bien sédimentaire. Et sont réparties principalement en Chine et en Australie. [19]

II.6.1.1. Caractéristiques physico-chimiques du zinc

Le zinc est un métal brillant, gris bleuté à blanc légèrement teinté en bleu-gris, de blanc bleuâtre à gris blanc métallique. Sa texture cristalline est nette, le cristal a une maille hexagonale compacte, sa densité avoisine $7,14$ avec une masse atomique de 65 .

Le zinc réagit avec l'eau bouillante sous pression, à une température supérieure à $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ou bien avec la vapeur d'eau surchauffée en libérant de l'hydrogène. Il est moyennement réactif et se combine avec l'oxygène et d'autres non-métaux. Se caractérise par des isotopes stables qui sont : ^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn et ^{70}Zn . [20]

Tableau II.4: Propriétés physico-chimiques du zinc.

Numéro atomique	30
Famille d'élément	Métal de transition
Masse atomique	65.38 u
Rayon atomique	1.38
Point de fusion	419.58 °C
Point d'ébullition	907
Système cristallin	Hexagonal
Dureté	2.5
Couleur	Gris-bleuté

II.6.1.2. Utilisations et application du zinc

Le zinc entre dans plusieurs domaines et des différents secteurs a cause de ses propriétés physiques et chimiques qui lui permettant d'être associé.

A. Galvanisation

Le zinc sous forme métallique est principalement utilisé comme revêtement protecteur contre la corrosion du fer et des aciers, à cause de sa température de fusion relativement basse, une couche de zinc est obtenue par immersion de l'acier dans un bain de zinc fondu, alors l'acier est dit galvanisé.

B. Electrozingage

L'électrozingage en continu concerne principalement les tôles destinées à l'automobile, il y a dépôt électrochimique sur la pièce métallique à traiter qui est en cathode.

C. Bâtiment

Le zinc laminé est utilisé pour la couverture (toiture) dans le bâtiment du fait de sa bonne résistance à la corrosion. Il est aussi employé pour construire des accessoires d'évacuation des eaux pluviales et les gouttières.

D. Alliage

Le zinc intervient également dans la composition des piles alcalines et des alliages utilisés pour les tôles destinées à l'automobile, électricité et dans les bâtiments pour une bonne résistance à la corrosion de la toiture.

E. Autres utilisations

La poussière de zinc est utilisée pour la cémentation des métaux précieux, la purification des solutions d'électrolyses, et comme agent réducteur dans la fabrication du formaldéhyde. Les chlorures de zinc entrent dans l'industrie du bois pour protéger contre l'attaque des

insectes. Les sulfates de zinc entrent dans la composition d'induit de télévision et utilisé comme électrolyte de piles, pigments blanc destinés à la peinture. [21]

II.6.1.3. Toxicité du zinc

A. Sur l'humain

Le zinc est un élément le plus abondant chez l'être humain il joue un rôle important pour la croissance, le développement osseux et cérébral, la production et la survie du corps humains. Lorsque de faibles doses de zinc sont absorbées, des risques de perte de l'appétit, de diminution des sensations de goût et d'odeur peuvent survenir à la santé humaine, trop de zinc peut provoquer des problèmes de santé importants, comme des crampes d'estomac, des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie. [19]

B. Sur la faune et la flore

Le zinc provenant des activités humaines peut entrer dans la pollution de l'environnement. Les eaux usées industrielles riches en zinc polluent les sources d'eau propres, ce qui nuit à la vie de la faune et de la flore aquatique [20]

II.6.2. Le plomb

Le plomb est l'élément chimique le plus lourd des éléments stables, il est relativement abondant dans la croûte terrestre et l'un des métaux les plus anciennement connus.

Le plomb se présente surtout sous forme de sulfure, tel que la galène (PbS), qui en contient 86,6 % en masse. D'autres variétés communes sont la cérusite (PbCO₃) et l'anglésite (PbSO₄). Il peut exister en association avec d'autres éléments tels que le Zn (la blende), l'arsenic, l'antimoine, l'argent et le cuivre. Le plomb natif pur est rare.

Le plomb constitue des gisements primaires dans les roches éruptives et métamorphiques, dont les grands gisements de ce dernier sont souvent situés dans des roches calcaires. [22]

II.6.2.1. Caractéristiques physico-chimiques du plomb :

C'est un métal gris bleuâtre, brillant, mou et ductile, frotté entre les mains, il a une odeur sensible, le cristal à une maille cubique à faces centrées, il est rayé par les ongles et par presque tous les autres corps, sa densité avoisine 11,35. Le plomb est rarement sous sa forme élémentaire. Il existe sous forme métallique, inorganique et organique.

Il possède 38 isotopes connus, de nombre de masse variant de 178 à 215, quatre de ces isotopes stables sont les suivants : ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb et ²⁰⁸Pb.

Il peut subir différents mécanismes de contrôle de sa solubilité. En milieu réducteur, sa solubilité est limitée par la précipitation du sulfure de plomb (la galène). En conditions

oxydantes, le plomb est nettement plus soluble et précipite sous forme de sulfate de plomb (anglésite) ou de carbonate de plomb (cérusite) en milieu carbonaté. Avec les ions carbonates, il forme des complexes, ce qui augmente sa solubilité aux pH élevés. [23]

Tableau II.5 : Propriétés physico-chimiques du plomb.

Numéro atomique	82
Famille d'élément	Métal pauvre
Masse atomique	207.2 u
Rayon atomique	1.75 à 1.81
Point de fusion	327 °C
Point d'ébullition	1740
Système cristallin	Cubique à faces centrées
Dureté	1.5
Couleur	Blanc-gris

II.6.2.2. Production mondiale de plomb

La production minière mondiale de plomb en 2015 a été estimée de 4,6 millions de tonnes (Mt), dont 42 % est produit par la Chine. La Chine, l'Australie, les États-Unis, le Pérou et le Mexique représentaient plus de 75% de la production minière mondiale de plomb en 2015 (Figure II.1). [24]

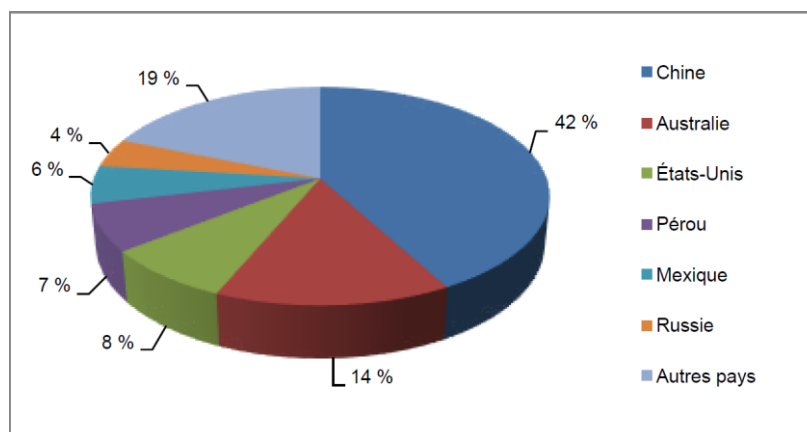


Figure II.1 : Production minière mondiale de plomb, par pays en 2015, Selon le Groupe d'étude international du plomb et du zinc.

Les réserves mondiales de plomb, selon l'U.S. Geological Survey, atteignait environ 89 Mt.

- L'Australie s'est classée au premier rang avec 35 Mt de plomb, soit 39 p. 100.
- La Chine arrivait au deuxième rang (15,8 Mt, soit 18 p. 100).
- La Russie arrivait au troisième rang (9,2 Mt, soit 10 p. 100) (Figure II.2).

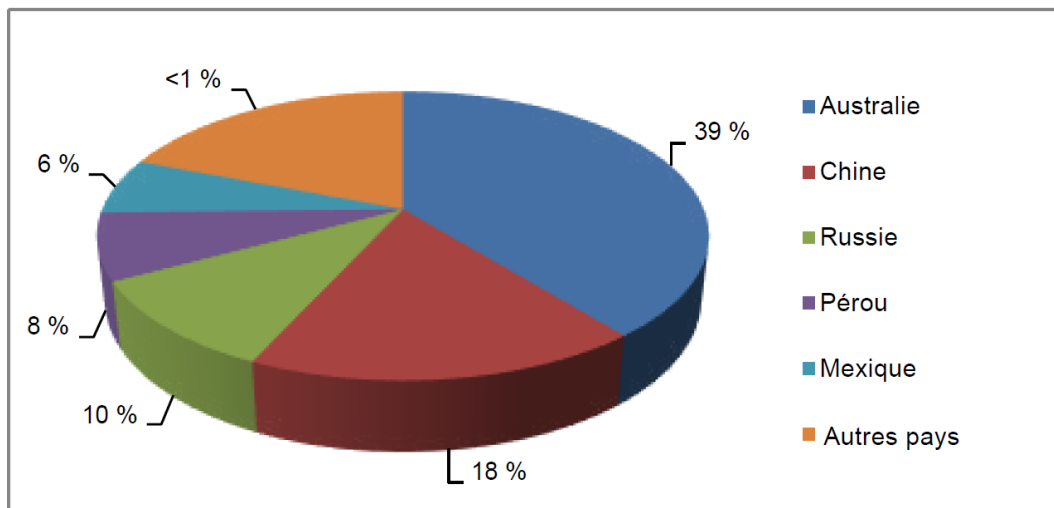


Figure II.2 : Réserves mondiales du plomb, par pays en 2015 d'après l'usgs (U.S. Geological surveyry).

II.6.2.3. Utilisation du plomb

Il est très utilisé comme additif dans les produits pétroliers, comme l'essences, ou bien pour les tuyauteries ou encore les peintures.

Le plomb est utilisé dans la fabrication de batteries d'accumulateurs, de munitions, de dispositifs de protection contre le rayonnement nucléaire et les rayons X, de gaines pour câbles utilisés dans l'industrie de production d'énergie et dans celle des communications, de revêtements de plomb pour les toitures, de matériaux de restauration des bâtiments anciens, de revêtements résistant aux produits chimiques, de matériaux antibruit, d'équipement électrique et électronique, d'équipement de véhicules à moteur et d'autres moyens de transport et dans la composition de roulements. Il entre aussi dans des compositions comme les alliages de laiton et de bronze, dans les métaux de fonderie, les verres, les glaçures céramiques, les stabilisants pour plastiques, et dans des produits extrudés utilisés en construction comme les siphons et les coudes, dans les réservoirs à combustible et de stockage. [25]

II.6.2.4. Toxicité du plomb

A. Sur l'humain

L'exposition au plomb peut entraîner des effets nocifs sérieux sur la santé, La présence du plomb dans le corps humain peut provoquer de l'hypertension, l'anémie, les maladies du cœur et des reins, et parfois le cancer. [26]

B. Sur l'environnement :

Les activités humaines peuvent aussi provoquer des risques d'empoisonnement au niveau du sol et des eaux superficielle à cause de l'accumulation de sels de plomb dans les corps des organismes aquatiques, et les particules fines du plomb sont transportées sur des longues distances ou restent dans l'atmosphère. [26]

Le plomb migre à faible distance dans l'air Les sols du voisinage autoroutier ou du réseau routier sont contaminés. [21]

II.6.3. La pyrite

La pyrite, sulfure de fer, de formule FeS_2 , le plus répandu sous forme minérale. Cristallisant dans le système cubique, la pyrite se présente fréquemment sous forme de cristaux bien définis ainsi qu'en masses amorphes. Ce minéral est de couleur jaune cuivre ; il est opaque et présente un éclat métallique.

La marcasite présente la même composition que la pyrite. Elle est opaque, avec un éclat métallique, et elle est jaune bronze pâle ou presque blanche à la cassure. Elle a une dureté identique à celle de la pyrite et sa densité relative varie de 4,85 à 4,90. On distingue la marcasite de la pyrite par les différences de couleur et de forme cristalline, et en les soumettant à des tests chimiques. La marcasite se décompose plus facilement que la pyrite et elle est plus rare. Elle est employée, dans une proportion moins importante que la pyrite, dans la fabrication de l'acide sulfurique. [27]

II.6.3.1 Caractéristiques physico-chimiques

Du point de vue macroscopique, les cristaux de pyrite prennent souvent des formes dodécaédriques aux faces pentagonales appelées pyritoèdres. De façon générale, la pyrite forme des cristaux d'habitus cubique, octaédrique ou pyritoédrique, dont les faces peuvent être striées.

D'éclat métallique brillant et opaque, la pyrite a une couleur dorée pâle. Son trait est vert-noir à marron et dégage une odeur de soufre.

Sa dureté est entre 6 et 6,5 sur l'échelle de Mohs. Sa cassure est irrégulière et parfois Conchoïdale.

La pyrite est faiblement soluble dans l'acide nitrique. Elle devient magnétique lorsqu'elle est chauffée ; lors de la fusion entre 1177 °C et 1 188 °C, elle forme une boulette magnétique.

Les minéraux sulfurés sont l'un des constituants mineurs des plus communs de la croûte terrestre. Dans certaines formations géologiques, les sulfures constituent le composant majeur de la roche, particulièrement dans les gisements métalliques de cuivre, de plomb, de zinc, d'or, de nickel et de fer. Tel que mentionné précédemment, l'exposition de ces minéraux à l'oxygène peut entraîner l'oxydation du soufre et la formation d'acide sulfurique. En 1904, Blowes et al. ont proposé un classement des sulfures métalliques susceptibles d'être trouvés dans les résidus miniers selon leur réactivité, Le Tableau suivant présente en ordre croissant de réactivité les principaux sulfures métalliques ainsi que leur composition chimique. [27]

Tableau II.6 : Principaux sulfures métalliques.

Minéraux	Composition
Chalcopyrite	CuFeS ₂
Arsénopyrite	FeAsS
Pyrite	FeS ₂
Marcasite	FeS ₂
Millerite	NiS
Sphalérite	ZnS
Chalcocite	Cu ₂ S
Galène	PbS
Pyrrhotite	Fe _{1-x} S

La pyrite (FeS₂) et la pyrrhotite (Fe_{1-x}S) sont les minéraux les plus fréquemment rencontrés et le DMA est généralement associé à ceux-ci. La pyrite se retrouve sous deux formes, soit la pyrite dont le réseau cristallin est cubique ou la marcassite dont le réseau est orthorhombique.



Figure II.3 : Pyrite



Figure II.4 : Marcassite.

II.6.3.2 Utilisation du pyrite

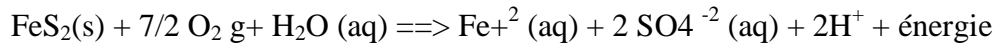
- La pyrite fut plus exploitée comme source de soufre que de fer. Cette industrie très polluante tend cependant à être remplacée par d'autres procédés. En 1985, 18% du soufre était obtenu à partir de ce minerai. La quantité extraite est de moins de 8 % actuellement, soit 6,6 millions de tonnes extraites par an, dont 6 millions rien qu'en Chine, Elle n'est pas utilisée comme source de fer pour la fabrication de l'acier car le cout d'extraction est supérieur par rapport à l'hématite (Fe_2O_3) ou à la magnétite (Fe_3O_4). L'extraction du fer à partir de la pyrite permet également l'obtention d'une fonte, qui doit cependant être soufflée à l'oxygène pour éliminer le soufre en solution. Les derniers procédés de biolixiviation ont permis l'extraction du chrome à partir de la pyrite.
- Elle reste le minerai de base de la fabrication de l'acide sulfurique par le procédé des chambres au plomb. Elle est exploitée dans beaucoup de gisements pour le traitement métallurgique des poudres (pelletisation) dans la production de l'or, du cuivre, du cobalt, du nickel...
- Le récepteur à pyrite connu sous le nom de poste à pyrite est un récepteur radio à modulation d'amplitude extrêmement simple qui historiquement permet la réception des ondes radioélectriques pendant la Seconde Guerre mondiale.
- Son utilisation dans le remblai autour des fondations de diverses constructions, notamment au Québec, a été à l'origine de critiques en raison de l'affaiblissement des fondations dû aux fissures provoquées par le gonflement de la pyrite en présence d'eau. [28]

II.6.3.3.Réaction d'oxydation de la pyrite

La réaction d'oxydation de la pyrite a été largement décrite par plusieurs auteurs. L'oxydation biotique a lieu en présence de microorganismes tandis que l'oxydation abiotique est définie comme l'oxydation chimique. De plus, l'oxydation biotique et abiotique peuvent

être occasionnées par l'oxygène seulement (oxydation directe) ou par l'oxygène et le fer (oxydation indirecte).

Des réactions chimiques sont communément utilisées pour représenter ces mécanismes d'oxydation. Dans les processus d'oxydation directe abiotique et biotique, l'oxygène oxyde directement la pyrite :



Les équations chimiques suivantes décrivent les trois étapes de ce processus, telles que proposées par Ferguson et al. [27]

Étape 1 :



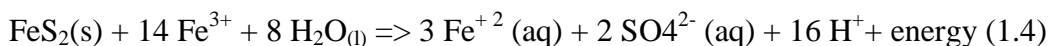
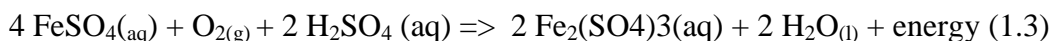
A un pH supérieur à 4,5, la pyrite est surtout directement et lentement oxydée par l'oxygène. Il y a ainsi formation de fer ferreux et d'acide sulfurique, ce qui occasionne une diminution du pH si aucun composé alcalin n'est présent dans le milieu.

Étape 2 :

Cette deuxième étape implique les mêmes réactions que l'étape 1, excepté qu'entre un pH de 3,5 et 4,5, le taux d'oxydation est accéléré par l'activité bactérienne et l'on observe une baisse de l'énergie d'activation du processus d'oxydation.

Étape 3 :

Par la suite, à un pH inférieur à 3,5, le fer ferreux est oxydé en fer ferrique. À partir de ce moment, le fer ferrique peut oxyder directement la pyrite.



L'oxydation de la pyrite par le fer ferrique génère du fer ferreux qui peut être réoxydé via la réaction 1.3. Ainsi, les réactions 1.3 et 1.4 permettent l'oxydation de la pyrite par le fer ferrique qui est à son tour transformé en fer ferreux. Théoriquement, le seul moyen de l'arrêter est d'augmenter le pH ou de couper l'apport d'oxygène. A un pH de 3, la réaction de l'oxydation de la pyrite par le fer ferrique (1.4) est de 10 à 100 fois plus rapide que l'oxydation directe par l'oxygène (réaction 1.2). L'abondance du fer ferrique est directement influencée par le pH. [27]

II.6.3.4. Phénomène d'altération des sulfures et impact sur la flottation

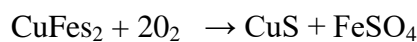
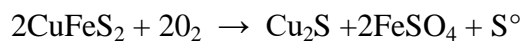
L'altération des minéraux sulfurés est un processus d'oxydation des sulfures en présence d'oxygène et d'eau. Elle est influencée par la présence des sulfures de fer (pyrite, marcassite, pyrrhotite) qui conduisent à la formation du sulfate ferrique ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) oxydant

qui accélère la dégradation des autres sulfures difficilement oxydables (chalcopryrite par exemple). Les réactions qui interviennent sont les suivantes [29] :

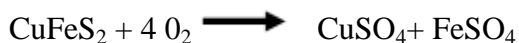
Marcasite et pyrite (altération facile)



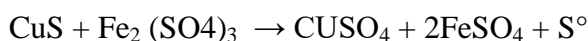
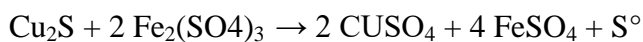
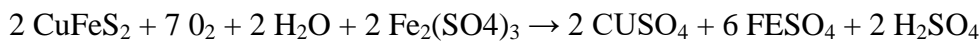
La chalcopryrite (altération difficile)



Une altération poussée de la chalcopryrite, la chalcosine et la covelline conduit à la formation de CuSO_4 .



Altération des sulfures avec participation du sulfate ferrique



L'altération des minerais sulfurés contenant de la pyrite conduit à la formation de sulfate de fer à la surface des minéraux de cuivre, de zinc,... qui les déprime lors de la flottation. Cette altération conduit également à la formation des couches superficielles des minéraux oxydés (azurite, malachite, smithsonite, cérussite,...) qui flottent plus difficilement que les sulfures avec les collecteurs sulfhydriques.

La flottation des minerais sulfurés altérés nécessite une activation des grains et l'utilisation des collecteurs puissants. Cette activation peut être réalisée par le nettoyage de la surface en faisant une attrition des particules. Certains auteurs préconisent l'activation des sulfures de fer déprimés par la chaux ou le cyanure par l'utilisation de l'acide sulfurique. [28]

II.6.4. Le cuivre

Le cuivre est un des premiers métaux utilisés par l'homme pour fabriquer, entre autres, des armes et des outils. En 1998, des chercheurs découvrent dans la vallée de Lurin, au Pérou, des Preuves que des hommes y ont travaillé le cuivre et l'or. Celles-ci ont 1000 ans de plus

que les Preuves attestant d'une telle activité jamais trouvées jusqu'à ce jour. Avant cette découverte, Les preuves les plus anciennes découvertes dans les Andes dataient de 600 à 200 ans avant Notre ère. Avec la mise au point de nombreux alliages de cuivre aux propriétés améliorées, le Nombre d'utilisations de ce métal a considérablement augmenté.

Le cuivre est un des rares métaux qui existe à l'état natif. Ce fait d'ailleurs expliquant probablement qu'il fut le premier métal utilisé par les hommes. On le trouve le plus fréquemment sous forme de sulfure ou de sulfo-sel. On le trouvait en quantités importantes dans l'île de Chypre (d'où le nom donné à ladite île) surnommée l'île aux mille mines. [30]



Figure II.5 : cuivre natif.

Le cuivre se trouve généralement dans des gisements renfermant certains autres métaux, dont le zinc, le nickel, le molybdène et l'or. Le cuivre se combine au soufre et au fer et forme ainsi des minéraux sulfurés qui peuvent s'ajouter à ces métaux dans des gisements sulfurés massifs ou constituer des gisements disséminés connus sous le nom de «porphyres».

Les gisements de cuivre sont le plus souvent des accumulations de sulfures massifs découlant d'une activité volcanique ou magmatique et des porphyres d'origine magmatique. Les gisements de sulfures massifs présentant un intérêt économique contiennent normalement des concentrations (ou teneur) en cuivre et autres métaux qui sont plus élevées que les Concentrations des gisements de porphyres, lesquels ont en règle générale un volume beaucoup plus élevé.

Les gisements de surface sont habituellement exploités à ciel ouvert. Quand un gisement est situé en profondeur, il faut avoir recours à l'extraction souterraine.

II.6.4.1 Propriétés de cuivre

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique 29 .C'est un Métal de couleur rougeâtre, il possède une excellente conductivité thermique et électrique Sa couleur rougeâtre le diffère au même titre que l'or par la couleur généralement grise des métaux il présente une bonne résistance A la corrosion, bien que lorsque qu'il est exposé aux

éléments, la surface du métal s'oxyde pour former une patine vert pâle ou une couche d'oxyde noir .

Voici quelques propriétés :

❖ Symbole : Cu

-Masse volumique 8,9 g. cm⁻³ à 20°C

- Dureté : 3 (Mohs)

- Température de fusion 1084°C

- Température ébullition : 2305° C à p_{atm}

- Présence moyenne dans l'ensemble de l'écorce terrestre : 55 g à la tonne.

- Présence dans les organismes vivants : 1 à 10 milligrammes par kg.

- Éclat métallique

- Système cristallin cubique à face centrée

II.6.4.2. Les types de Minerai de cuivre [31]

II.6.4.2.1. Sulfures

❖ La chalcopirite : CuFeS₂ : (Cu₂S, Fe₂S₃)



Figure II.6 : La chalcopirite.

La chalcopirite est une espèce minérale composée de sulfure double (35 % massique), de cuivre (34,5 %) et de fer (30,5 %), de formule CuFeS₂. Avec des traces de Ag ; Au ; In ; TI ; Se ; Te.

❖ **La Bornite** : Cu₅FeS₄: (5Cu₂S, Fe₂S₃)



Figure II.7 : La Bornite.

❖ La covelline : CuS



Figure II.8 : La covelline.

❖ La chalcocite : Cu_2S

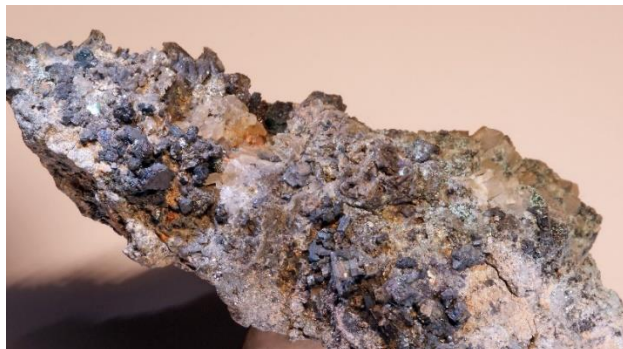


Figure II.9 : La chalcocite.

II.6.4.3. Impact de cuivre sur la santé et l'environnement

Bien que le cuivre soit toxique à des niveaux élevés d'absorption et d'exposition, il est essentiel à la santé de l'être humain. En 1993, l'OMS inclut le cuivre dans un groupe de produits chimiques dont la présence dans l'eau potable est importante pour la santé et recommande une teneur cible de 2 mg/l. On considère cette recommandation provisoire en raison des incertitudes quant à la toxicité du Cuivre chez les humains. À la suite de

discussions scientifiques menées à l'échelle Internationale, l'OMS révisé en 1997 sa recommandation en définissant la teneur cible en cuivre de 2 mg/l par rapport aux possibilités de troubles gastro-intestinaux aigus. La recommandation demeure provisoire compte tenu des incertitudes relatives à la toxicité du Cuivre chez les humains. [31]

❖ Impact sur l'environnement

Le cuivre est naturellement présent dans la plupart des sols, ainsi que dans les fruits et les Légumes. La production mondiale de cuivre est toujours en augmentation. Ce qui signifie que de plus en plus de cuivre se retrouve dans l'environnement. Les fleuves déposent sur leurs rives des boues contaminées par du cuivre, du fait du rejet d'eaux usées. Le cuivre pénètre dans l'air principalement lors de la combustion de combustibles fossiles. Il reste dans l'air pendant une période assez longue avant de se déposer lorsqu'il pleut. Il se retrouve alors essentiellement dans le sol. Par conséquent, les sols peuvent contenir une grande quantité de cuivre après que le cuivre de l'air se soit déposé.

Le cuivre peut être relâché dans l'environnement par des sources naturelles et par les activités humaines. On peut citer quelques exemples de sources naturelles : poussières soufflées par le vent, pourrissement de la végétation, feu de forêt, et dispersion de gouttelettes d'eau de mer.

Quelques exemples d'activité humaine contribuant à la dispersion du cuivre ont déjà été donnés, on peut citer d'autres exemples : l'exploitation minière, la production de métaux, la production de bois et la production de fertilisants aux phosphates.

Comme le cuivre est dispersé à la fois par des procédés naturels et humains ; il est très énormément diffusé dans l'environnement. On le trouve souvent près des mines, des installations industrielles, des décharges et des broyeurs d'ordure.

Quand le cuivre se retrouve dans le sol, il se lie fortement aux matières organiques et aux minéraux. Par conséquent, il ne voyage pas très loin et il ne pénètre presque jamais dans les eaux souterraines. Dans les eaux de surface, le cuivre peut parcourir de longue distance, que ce soit suspendue sur le cuivre ne se détruit pas dans l'environnement et, de ce fait, il peut s'accumuler dans les plantes et les animaux quand il est présent dans le sol. Sur les sols riches en cuivre, seul un nombre limité de plantes a des chances de survivre. C'est pourquoi, il n'y a pas beaucoup de diversité de plantes près des industries rejetant du cuivre. Du fait des effets sur les plantes, le cuivre est une sérieuse menace pour la production des terres agricoles. Le cuivre peut sérieusement influencer ce qui se passe sur les terres agricoles, suivant l'acidité

du sol et la présence de matière organique. Malgré cela, les engrais contenant du cuivre sont toujours utilisés.

Le cuivre peut interrompre l'activité du sol, car il influence de façon négative l'activité des micro-organismes et des vers de terre. La décomposition de la matière organique est sérieusement ralentie de ce fait. Quand le sol des terres agricoles est pollué par du cuivre, les animaux absorbent des concentrations importantes leur causant des problèmes de santé. Les moutons, surtout, souffrent beaucoup de l'empoisonnement au cuivre car les effets du cuivre chez les moutons se manifestent même à de très faibles concentrations. [30]

II.6.4.4. Propriétés biologiques et écotoxiques

Le cuivre, à très faible dose est un oligo-élément indispensable à la vie. Il est notamment nécessaire à la formation de l'hémoglobine et remplace même le fer pour le transport de l'oxygène chez une espèce d'arthropode, la limule, dont le sang est bleu. Chez l'homme et les mammifères, régulés par le foie, le cuivre intervient dans la fonction immunitaire et contre le stress oxydant. Il est stocké, excrété via la bile ou distribué vers les organes. Ses propriétés anti-infectieuses étaient déjà connues et utilisées dans l'Égypte antique.

Associé au plomb, il semble pouvoir aggraver le risque de maladie de Parkinson. Le taux osseux moyen « normal » chez l'homme au XXe siècle a été estimé à 4.2 mg/kg. On connaît des contaminations humaines et animales dès l'âge du bronze, autour notamment des anciennes mines de cuivre et plomb de l'actuelle Jordanie.

Le cuivre est aussi à dose plus élevée et sous ses formes oxydées (vert-de-gris, oxyde cuivreux), un puissant poison pour l'Homme, comme à des doses parfois infimes pour de nombreux organismes (algues, mousses, microorganismes marins, champignons microscopiques). Ce fait connu depuis l'antiquité a justifié son utilisation comme pesticide ou comme biocide, ses vertus bactériostatiques et antifongiques et sa ductilité ont aussi, comme pour le plomb (qui est lui bien plus toxique) justifié son utilisation dans les canalisations d'eau et dans certains pays pour les toitures et gouttières (ni mousse ni plantes ne s'y installent, mais l'eau y charge de cuivre). Le cuivre a été utilisé pour les cuves et tuyauteries, comme pour les marmites à confiture et pour la fabrication de fromages à pâte cuite. Sa résistance à la corrosion et sa toxicité empêchant la prolifération et la fixation d'algues et d'organismes marins a encouragé ses usages dans la marine, sous forme de cuivre ou plus souvent de laiton (clous, hublots, serrures, charnières, etc.). Les sels de cuivre, comme le sulfate ou l'oxychlorure, présentent des propriétés fongicides mises à profit pour la viticulture et l'agriculture. [31]

II.7. Conclusion

Actuellement, plus des 3/4 du zinc produit dans le monde sont obtenus par hydrométallurgie et cette proportion augmente chaque année. Le sulfure de zinc n'étant pas soluble dans H_2SO_4 , les composés sulfurés doivent être grillés préalablement à la lixiviation qui met le zinc en solution sous forme de sulfate. Les minerais oxydés sont abondants surtout dans le bassin méditerranéen. La concentration par flottation, faite par sulfuration et collection aux amines. La concentration métallurgique permet d'obtenir des concentrés riches, souvent destinés à la fabrication d'oxyde de zinc.

L'importance de métaux lourds est primordiale pour plusieurs secteurs économiques. Le plomb et le zinc sont parmi ces éléments qui sont produits par plusieurs pays (la Chine, USA et Australie). Leur traitement pose problème et surtout avec un enrichissement par flottation ou simplement par lixiviation qui nécessitent des réactifs toxiques qui polluent les sols et l'environnement la toxicité des métaux lourds tel que zinc, cuivre, et plomb risquent de s'infiltrer et contaminent sols et probablement des nappes phréatiques.

CHAPITRE III
MATÉRIELS,
MÉTHODES,
RÉSULTATS ET
INTERPRÉTATIONS

III.1 Introduction

Le présent chapitre a pour but de décrire les rejets et de les caractériser du point de vue physico-chimique et minéralogique. Cette caractérisation permet de mettre en évidence leurs propriétés intrinsèques qui déterminent leur comportement environnemental.

Les principales caractéristiques retenues dans ce chapitre sont la distribution granulométrique, la composition chimique et minéralogique. Toutes ces informations sont nécessaires à la compréhension, à l'interprétation et à la prédiction des résultats sur le comportement environnemental des rejets.

Les sulfures de fer sont les minéraux les plus abondants dans les rejets miniers Chaâbet el Hamra et leur récupération peut atteindre jusqu'à 90 %. La désulfuration pourra être gérée plus facilement du fait de son moindre volume, par exemple en l'incorporant comme remblai en pâte souterrain, soit par stockage en surface localisée dans des zones aménagées en fonction de son haut potentiel de génération, ou bien encore en tant que matière première à la production d'acide sulfurique.

III.2. Analyse granulométrique et mesures physico-chimiques

III.2.1. Matériels et méthode :

Echantillon de 600g des rejets de Chaâbet El-Hamra a été prélevé de la digue II a été séché à l'étuve à une température de 70° à 80°C pour éliminer l'humidité. L'analyse granulométrique a été effectuée au moyen d'une série de tamis de dimensions des mailles comprises entre 4 mm et 0,045 mm. [32]

III.2.2. Résultats et interprétations

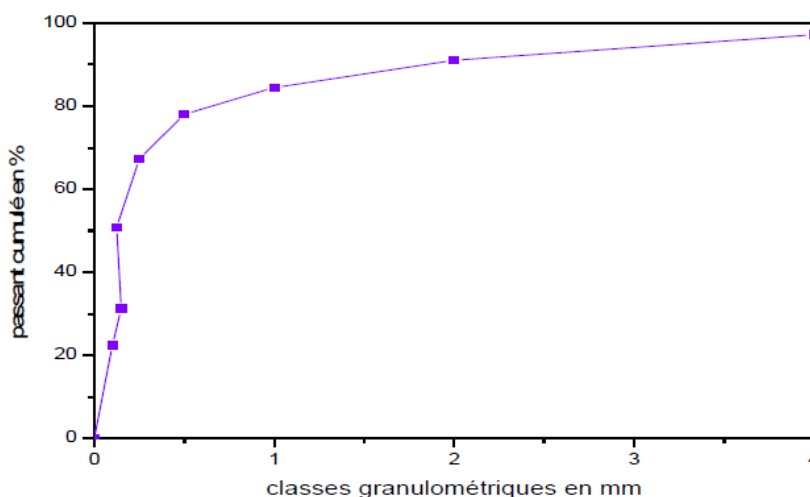
a) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des rejets de la digue a été réalisée et les résultats sont présentés dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Résultat de répartition granulométrique des rejets de traitement de minerai Zinc.

Tranche granulométrique (mm)	Rendement poids (g)	Rendement (%)	Refus cumulé Rc (%)	Passant cumulé Pc (%)
>4	16.70	2.78	2.78	97.22
-4 +2	37.1	6.18	8.96	91.04
-2 +1	39.29	6.54	15.5	84.50
-1 +0.5	38.70	6.45	21.95	78.05
-0.5 +0.25	64.60	10.76	32.71	67.29
-0.25 +0.125	98.96	16.49	49.2	50.80
-0.125 +0.063	117.44	19.57	68.77	31.23
-0.063 +0.045	52.67	8.77	77.54	22.46
<0.045	134.54	22.42	100	0
	600	100		

Les résultats obtenus sont présentés dans le schéma de la figure III.1.

**Figure III.1** : Courbe de la répartition granulométriques des rejets miniers sulfurés de la digue de Chaâbet-El-Hamra

Selon la courbe granulométriques, on remarque que plus de 80% des particules des rejets miniers sont inférieures à 1mm ce qui présente une population homogène.

III.3. Caractérisation des rejets miniers par diffraction des rayons X

La technique de diffraction des rayons X (DRX) d'étude sans contact, est couramment utilisée pour identifier les espèces minérales d'une matrice solide. Elle permet entre autres de distinguer les structures des espèces minérale de même composition chimique mais de structures cristallines différentes, telles que l'aragonite et la calcite. Elle est aussi utilisée pour

déterminer la nature et parfois quantifier les minéraux cristallins contenus dans un solide. Elle peut aussi être utilisée pour déterminer le degré de cristallinité dans certaines phases.

Lorsqu'un faisceau de rayon X est diffracté par une famille de plans cristallographiques, il s'en suit un phénomène d'interférences constructives et destructives en fonction de la structure cristallographique considérée, de la longueur d'onde et de l'angle du faisceau incident.

L'analyse minéralogique a donc été réalisée dans le but de déterminer les phases minéralogiques présentes dans les échantillons. Cette analyse peut permettre d'identifier les phases majeures de la gangue et celles porteuses des éléments suivis. L'identification des phases minérales cristallisées a été réalisée par diffraction de rayon X.

Le réseau cristallin est constitué de plans parallèles et équidistants appelés plans réticulaires. Les distances inter-réticulaires, $(dhkl)$, i.e. Les distances entre les plans d'une même famille (hkl) où h , k et l sont les indices de Miller, sont caractéristiques du cristal considéré. [33]

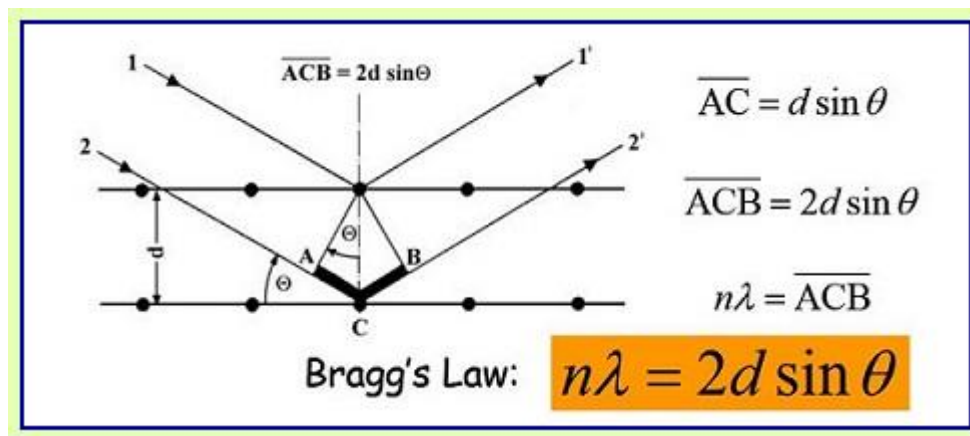


Figure III.2 : Dispositif expérimental de la diffraction X

Un faisceau monochromatique de longueur d'onde λ est envoyé sur le système cristallin selon un angle incident θ par rapport à la surface de l'échantillon, et l'intensité réfléchie (2θ) est séculairement mesurée. Les interférences sont constructives si elles répondent à la méthode de diffraction des rayons X qui repose sur la loi de Bragg :

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

Où : n : Nombre entier qui est l'ordre de diffraction.

λ : Longueur d'onde du faisceau incident.

$dhkl$: Distance interréticulaires.

θ : Angle de faisceau incident par rapport au plan réticulaire.

III.3.1. Matériel et méthode

L'identification des phases minérales cristallisées a été réalisée par diffraction des rayons X (DRX) sur poudres désorientées à l'aide d'un diffractomètre Bruker modèle D8 opérant par réflexion sous incidence $K\alpha_1$ du cobalt et muni d'un détecteur à scintillation. La préparation a été faite sous forme de poudre désorientée afin de diminuer les phénomènes d'orientation préférentielle. Ce type de préparation favorise l'interaction entre le faisceau incident et un plus grand nombre de cristallites, ce qui permet de mieux rendre compte de toutes les phases présentes dans l'échantillon. [32]

III.3.2. Résultats et interprétations

Les principales observations d'après les diffractogrammes sont résumées dans la figure 3, On constate que les rejets de la digue montrent que les principaux minéraux contenu dans ces résidus sont : marcassite, molybdénite, greenockite, scotlandi et covellite.

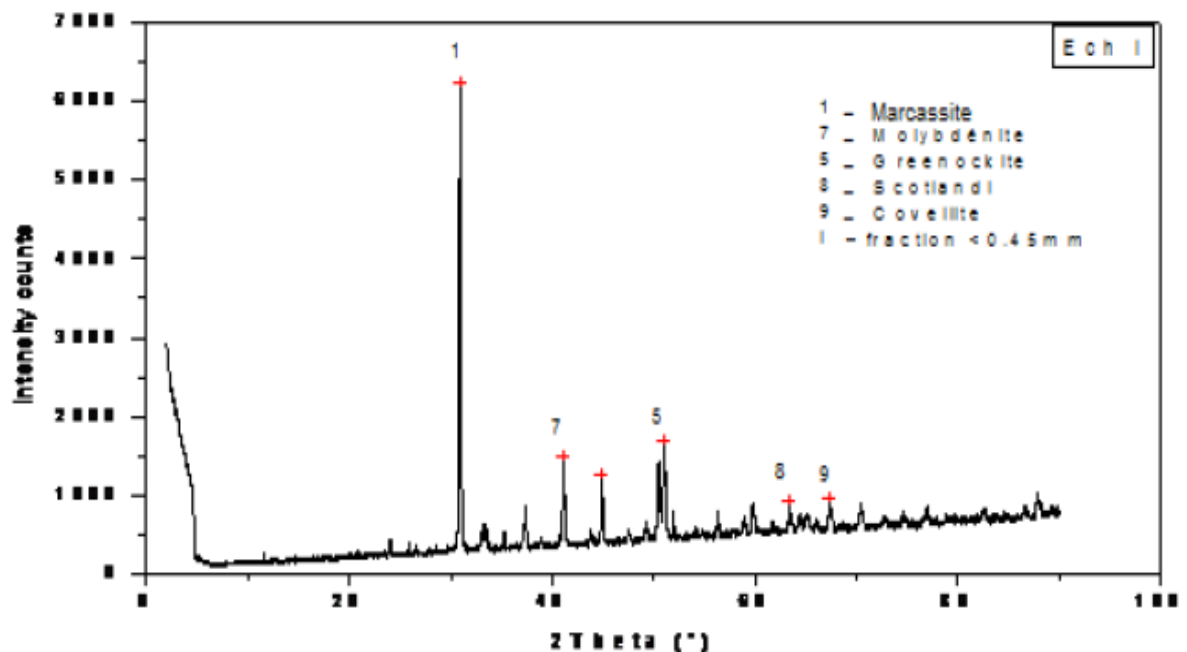


Figure III.3 : Composition minéralogique des rejets miniers de la fraction inférieure 0,45mm.

D'après la caractérisation granulométrique et minéralogique réalisée par diffractomètre à rayons X sur le site de la digue, les résultats obtenus par DRX sont donnés dans le tableau 2.

Tableau III.2 : Composition minéralogique des classes granulométriques de la digue de Chaâbet-El-Hamra (Sétif)

N°	Echantillons par classe	Minéraux identifiés
1	> 4	Marcassite(FeS ₂), Réalgar (AsS), covelline (CuS)
2	-4 +2	Marcassite(FeS ₂), Réalgar (AsS), bornite (Cu ₅ FeS ₄)
3	-2 +1	Marcassite(FeS ₂), Réalgar (AsS), sphalérite (ZnS)
4	-1 +0.5	Marcassite(FeS ₂), Anglesite (PbSO ₄), chalcosine (Cu ₂ S)
5	-0.5 +0.25	Marcassite(FeS ₂), chalcopyrite (CuFeS ₂)
6	-0.25 +0.125	Marcassite(FeS ₂), Greenockite (CdS) , bornite (Cu ₅ FeS ₄)
7	-0.125 +0.63	Marcassite(FeS ₂), chalcopyrite (CuFeS ₂), Linnaéite (CoS), sphalérite (ZnS), chalcosine (Cu ₂ S)
8	-0.63 +0.45	Marcassite(FeS ₂), chalcopyrite (CuFeS ₂), covelline (CuS), chalcosine (Cu ₂ S)
9	< 0.45	Marcassite(FeS ₂), Molybdénite (MoS), Greenockite (CdS), Covellite (CuS),

Tableau III.3 : Composition minéralogique de la digue de Chaâbet-El-Hamra (Sétif)

Classes	Minéraux principaux	Minéraux accessoires
Sulfures	Bronite	Arsénopyrite
	Covelline	Digénite Cu ₂ S
	Chalcopyrite	Tennantite (Cu,Fe,Zn,Ag) ₁₂ As ₄ S ₁₃
	Galène	Réniérite
	Marcassite	Tétraédrite (Cu,Fe,Zn,Ag) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃
	Pyrite	
	Sphalérite	
Carbonates	Calcite	Malachite Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂
	Dolomite	
Oxydes	Chlorite (Mg,Fe) ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀	Goethite FeOOH
	Muscovite KAl ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	
	Quartz	

III.4. Composition chimique des rejets

III.4.1. Matériels et méthodes

Les analyses chimiques des rejets ont été réalisées par Spectrométrie d' Absorption Atomique et par Spectrométrie d'Emission Atomique utilisant un Plasma à Couplage Inductif. Pour la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA), les échantillons solides ont été broyés à 63 μ m, mis en solution par dissolution dans l'acide chlorhydrique (HCl) précédée d'une fusion au peroxyde de sodium (Na₂O₂), les échantillons solides fondus au métaborate de lithium (LiBO₂) et dissous dans l'acide nitrique (HNO₃) avant d'être analysés. L'appareil utilisé est de type Jobin-Yvon JY 70Type II, Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur l'émissivité. Tout élément est émissif par excitation lorsqu'il est porté à une température suffisamment élevée (environ 8.000°C). L'étude spectrale des échantillons repose sur la mesure du rayonnement émis. [32]

L'échantillon à analyser est nébulisé dans un plasma d'argon entretenu par induction électromagnétique. L'intensité du rayonnement émis selon une longueur d'onde correspondant à l'élément à doser permet d'en déterminer la concentration dans l'échantillon.

La mise en solution est une étape très importante de l'analyse chimique des échantillons solides. Quelle que soit la sensibilité de l'appareil ou la précision des mesures, si la mise en solution n'est pas complète on ne peut pas obtenir des résultats corrects. Dans notre étude, la mise en solution des échantillons solides a été réalisée par fusion alcaline et dissolution dans Hcl ou HNO₃.

III.4.2. Résultats et interprétations

Les analyses panoramiques ont été réalisées par Spectrométrie d'Absorption Atomique et par Spectrométrie d'Emission Atomique sur 10 échantillons et ont permis la recherche de 13 éléments. Les résultats sont présentés dans le tableau 4, quant aux analyses chimiques quantitatives effectuées par SAE et par spectrométrie d'absorption atomique SAA, mis en solution dans l'acide chlorhydrique (HCl) précédée d'une fusion au peroxyde de sodium (Na₂O₂).

- les éléments majeurs : présents à des concentrations supérieures à 0,1% en masse;
- les éléments mineurs : présents à des concentrations inférieures à 0,1% ;
- les éléments traces et ultra-traces : de l'ordre de 0,01% (100 ppm) à la limite de détection (30 à 50 ppm).

Tableau III.4 : Analyses chimiques des rejets miniers de Chaâbet El Hamra de la fraction

Zn	Fe	S	Ca	Cu	Pb	Cd	As	K	Na	Mg	CO ₂	SO ₄ ⁻²
1,38	8,75	9,33	16,49	0,50	0,09	0,02	0,03	0,40	0,40	2,69	6,73	12,66

Au vu de ces résultats les rejets miniers de Chaâbet El Hamra sont porteurs des métaux lourds (Cu, Cd, As, Pb) et le zinc d'une valeur élevée. Le teneur de 9% soufre est susceptible de présenter un danger probable de drainage minier acide (DMA) en présence d'air et de l'écoulement des eaux superficielles.

Cependant la directive Canadienne (019) relative à l'industrie minière et l'environnement, les concentrations en ETM ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes dans le rejet final (Tableau 5).

Tableau III.5 : Exigences au point de rejet de l'effluent final

PARAMÈTRE	CONCENTRATION MOYENNE MENSUELLE ACCEPTABLE	CONCENTRATION MAXIMALE ACCEPTABLE
Arsenic extractible	0,2 mg/l	0,4 mg/l
Cuivre extractible	0,3 mg/l	0,6 mg/l
Fer extractible	3 mg/l	6 mg/l
Nickel extractible	0,5 mg/l	1 mg/l
Plomb extractible	0,2 mg/l	0,4 mg/l
Zinc extractible	0,5 mg/l	1 mg/l
Cyanures totaux	1 mg/l	2 mg/l
Hydrocarbure (C10-C50)		2 mg/l
Matières en suspension	15 mg/l	30 mg/l

L'analyse du CO₂ permet d'évaluer la teneur en carbonate et donne une indication sur la nature de la gangue. Celle du soufre donne une indication sur la nature du minerai (oxydé ou

Sulfuré). [32]

Les deux analyses peuvent permettre d'évaluer le caractère acidogène du rejet. Le tableau 6 donne les teneurs en CO₂ et soufre total des échantillons analysés.

Tableau III.6 : Teneurs en CO2 et en S total des échantillons des rejets

Echantillon	Teneur en pourcentage	
	CO2 total	S total
A1 +4	0.59	0.19
B2 -4 +2	0.25	0.07
C3 -2 +1	1.28	0.10
D4 -1 +0.5	0.50	0.04
E5 -0.5 +0.25	0.14	0.03
F6 -0.25 +0.125	1.95	0.10
G7 -0.125 +0.63	6.73	3.33
H8 -0.63 +0.45	5.81	3.18
I9 -0.45 +0	1.07	1.20
J10 Représentatif	3.03	9.33

Les résultats du tableau 10 confirment les données recueillies auprès des entreprises et relatives à la nature de minerais ayant générés les rejets. Les valeurs élevées des teneurs en CO2 (échantillons G7 et H8) indiquent une gangue carbonatée et les valeurs faibles (échantillons E5, A1 et B2).

Les valeurs élevées en S (échantillons G7 à J10) indiquent que le rejet est sulfuré, tandis que les valeurs relativement moins élevées (échantillons A1 à F6) se rapportent au rejet d'un minerai mixte. Au vu de ces résultats, seuls les échantillons G7 et H8 sont susceptibles de présenter des risques de drainage minier acide.

III.5. Désulfuration Environnementale et son application industrielle

Le rejet désulfuré peut être valorisé dans des couvertures de type CEBC (Figure III.4)

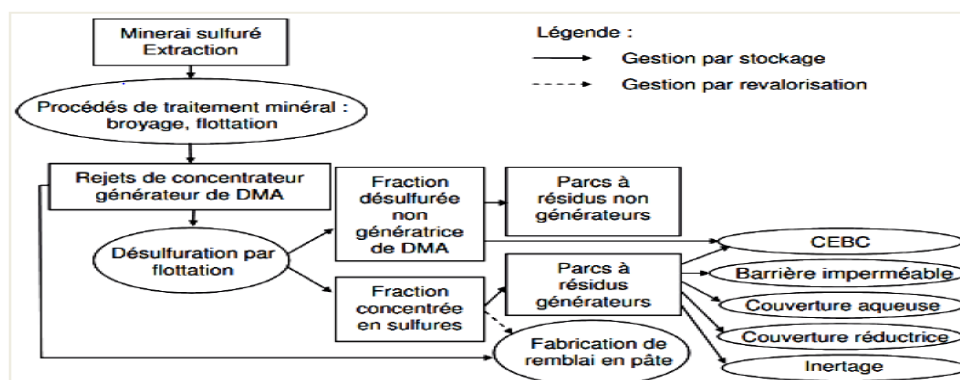


Figure III.4 : Gestion intégrée des rejets de traitement par désulfuration environnementale (Mermillod-Blondin, 2005).

La principale technique consiste à extraire la quantité optimale de minéraux

responsables de la génération du drainage acide et de la pollution métallique des effluents (les sulfures), avant la sortie du circuit de traitement du minéral, et donc avant son dépôt en surface dans les aires d'accumulation.

Il s'agit de retirer suffisamment de sulfures pour que le résidu final possède un équilibre PA versus PN, tel qu'il ne soit pas générateur d'acide. Cette technique est appelée « désulfuration environnementale ».

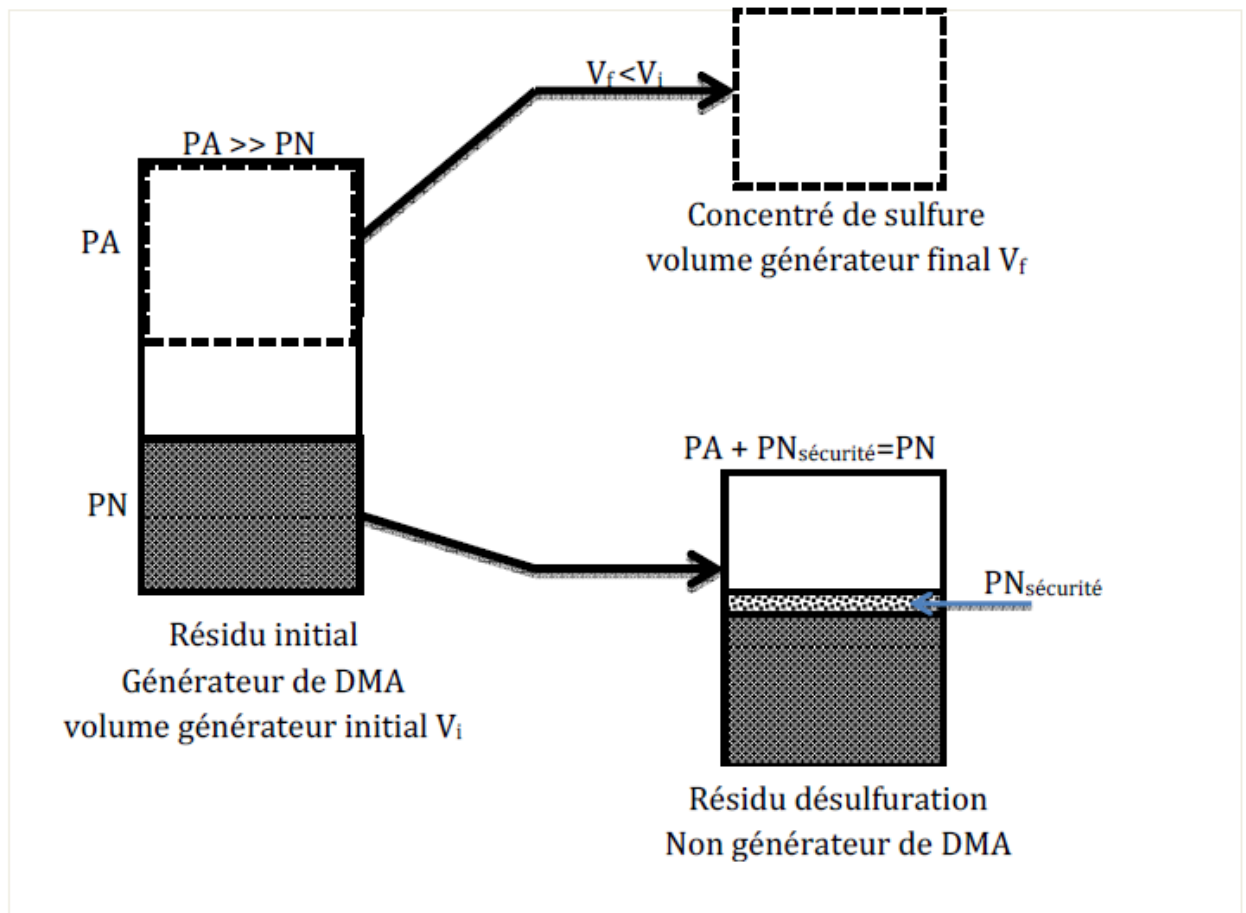


Figure III.5 : Schéma illustrant le principe à la base de la désulfuration environnementale d'un rejet de traitement

Synthétise la place centrale de la désulfuration dans le cadre d'une stratégie globale de gestion intégrée des rejets de traitement sulfurés, en association avec la chaîne traditionnelle de traitement des minerais.

III.5.1 Détermination du potentiel générateur d'acide (PA)

Tous les rejets de traitement ne sont pas générateurs de drainage acide. En effet, certains minéraux comme les carbonates, les hydroxydes ou les silicates peuvent neutraliser, totalement ou en partie, l'acidité produite par l'oxydation des sulfures.

Il s'établit un équilibre de dissolution des minéraux neutralisants, pouvant aussi entraîner la reprécipitation et la fixation des ions métalliques solubles. Leur réaction

acidobasique avec l'acide sulfurique neutralise la solution acide résultant de la percolation des rejets. Le potentiel acide (PA) représente la quantité de CaCO_3 nécessaire à la neutralisation de l'acide produit par la seule dissolution de la pyrite (sulfure généralement le plus abondant).

La détermination du potentiel d'acidité se mesure avec le pourcentage de soufre dans l'échantillon. Le pourcentage de soufre détermine par une méthode de dosage chimique. Le potentiel d'acidité se calcule à partir du résultat de soufre. [34]

III.5.2 Détermination du potentiel de neutralisation (PN)

Etalonnage de la solution d'acide sulfurique, introduire à l'aide d'une pipette 40ml de la solution de Na_2CO_3 dans un bécher de 250ml puis diluer à environ 100ml avec de l'eau et tirer avec la solution d'acide sulfurique jusqu'à pH 5,0 et noter le volume ajouté et puis peser une portion de 2g d'échantillon préalablement homogénéisée et sèche à 105°C

Dans un bécher et ajouter 100ml d'eau (l'échantillon doit être tamisé à $500\mu\text{m}$) et agiter pendant 15 minutes avec barreau aimanté, après cette étape, mesurer le pH initial de l'échantillon et tirer avec la solution d'acide sulfurique jusqu'à un pH de $3,5 \pm 0,1$ tout en gardant une agitation constante.

Ce tirage peut s'effectuer d'une façon manuelle (ajout d'acide sulfurique à environ toutes les 30 minutes jusqu'à ce que soit de $3,5 \pm 0,1$ pendant 4 heures), et noter le volume final.

III.6. Paramètres optimaux de flottation de la pyrite :

La flottation utilise la différence des propriétés superficielles des particules pour effectuer leur séparation. Ces propriétés dépendent des espèces chimiques présentes sur la surface minérale selon les conditions dans lesquelles elles se trouvent.

Les variables qui influent sur les opérations de flottation sont nombreuses, à savoir : le pH, la nature et la concentration des espèces à séparer, la nature et la concentration du collecteur, la force ionique, la température et le mode de bullage.

Le pH du milieu est de loin le paramètre le plus important, il peut affecter la nature des espèces ioniques en solution, la nature du collecteur et le type de flottation.

La connaissance des propriétés chimiques et électrochimiques des espèces à flotter peut, généralement, permettre d'orienter le choix du collecteur, dans un premier temps, et, dans un deuxième temps, de réaliser des séparations sélectives entre éléments.

Le degré d'oxydation de l'espèce que l'on veut flotter peut être déterminant dans la réussite d'une opération de flottation. Il affecte plus particulièrement le comportement du collecteur en solution. Ainsi, en fonction de leur degré d'oxydation, les espèces à séparer vont former ou non des complexes avec le collecteur utilisé. [34]

III.6.1 Influence du pH sur l'état de surface de la pyrite

L'analyse thermodynamique de l'état de surface de la pyrite, démontre que l'oxydation de la pyrite et du soufre présente de nombreux composés dérivés du fer et du soufre, principalement les éléments suivants : Fe_2O_3 , FeO , Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{FeO}(\text{OH})$, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, HFeO_2 , FeO_2^{2-} , FeO_4^{2-} , FeCO_3 , FeSO_4 , SO_4^{2-} , HSO_4^- , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, S^0 , S^{2-} , HS^- , H_2S .

Ils démontrent, aussi que les produits d'oxydation de la pyrite les plus probables (à n'importe quelle variante de l'oxydation du soufre des minéraux) sont : Fe_2O_3 et Fe_3O_4 . Cependant, d'après les travaux indiquent que lors de la précipitation du fer des solutions de ses sels, on obtient non seulement le Fe_2O_3 et Fe_3O_4 mais aussi par rapport à ceux-ci il se produit une réduction de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et le $\text{Fe}(\text{OH})_3$, réagissant avec une grande sensibilité au changement des valeurs de pH et Eh - potentiel du milieu.

Cependant, on peut présenter l'oxydation de la pyrite en FeCO_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$ avec le dégagement de SO_4^{2-} , HSO_4^- .

Le tableau N°6 synthétise les différentes réactions d'oxydation de la pyrite en présence d'eau, d'oxygène et aussi en fonction du pH. Ces réactions peuvent se produire simultanément, en différents endroits de la surface, dépendamment de la réactivité induite par la cristallinité. Ces types de réactions possèdent chacune des caractéristiques thermodynamiques et cinétiques (la thermodynamique contrôle l'état final de la réaction à l'équilibre alors que la cinétique contrôle la notion de vitesse des réactions). Ces deux aspects sont très importants dans le cas de la flottation des sulfures non valorisables telle que la pyrite est donc capital.

Tableau III.7 : Synthèse des réactions chimiques sur la surface de la pyrite

	Réactions	ΔF^0 des réactions, Kcal	E^0 , Kcal/mol
6.1	$\text{FeS}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{SO}_4^{2-} + 18\text{H}^+ + 14\text{e}$	+134,94	+0,418
6.2	$\text{FeS}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{HSO}_4^- + 16\text{H}^+ + 14\text{e}$	+129,74	+0,402
6.3	$\text{FeS}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 19\text{H}^+ + 15\text{e}$	+141,20	+0,408
6.4	$\text{FeS}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{HSO}_4^- + 17\text{H}^+ + 15\text{e}$	+136,00	+0,393
6.5	$\text{FeS}_2 + \text{CO}_3^{2-} + 8\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{FeCO}_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}$	+102,29	+0,317
6.6	$\text{FeS}_2 + \text{CO}_3^{2-} + 8\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{FeCO}_3 + 2\text{HSO}_4^- + 14\text{H}^+ + 14\text{e}$	+97,09	+0,300
6.7	$\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}^+ + \text{e}$	+6,26	+0,271
6.8	$\text{FeCO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{CO}_3^{2-} + 3\text{H}^+ + \text{e}$	+38,91	+1,68
6.9	$\text{Fe}(\text{OH})_2 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	+20,08	
6.10	$\text{FeCO}_3 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	+14,54	

Les résultats de l'activité des composants ioniques du fer : $[\text{Fe}^{3+}]$, $[\text{Fe}(\text{OH})^{2+}]$, $[\text{Fe}(\text{OH})_2^+]$, $[\text{Fe}^{2+}]$, $[\text{Fe}(\text{OH})^+]$ et $[\text{HFeO}_2^-]$, se trouvant en équilibre avec FeS_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et FeCO_3 , montrent que, dans tous les cas l'ion principal issu de l'oxydation de la pyrite est l'ion du fer bivalent (Fe^{2+}). [34]

Les résultats de l'analyse thermodynamique permettent d'établir les variations de l'état de la surface de la pyrite suivant des valeurs de pH et du potentiel Thermodynamique de la solution (figure III.6) :

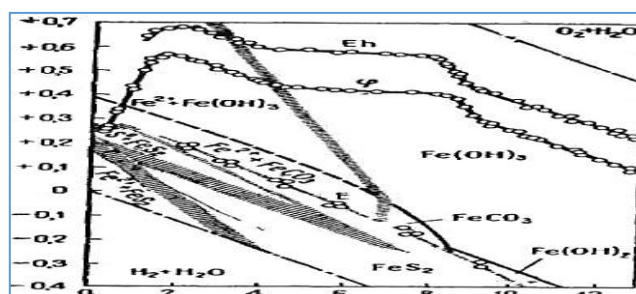


Figure III.6 : Influence des valeurs de pH et Eh sur l'état de surface de la pyrite

- Pour les valeurs hautement positives du potentiel Redox de la solution, le principal produit d'oxydation est présenté par $\text{Fe}(\text{OH})_3$;
- Pour les valeurs moins positives (ou plus négatives) du potentiel redox de la solution, il peut avoir formation du FeCO_3 (jusqu'à $\text{pH} < 8,6$), ou formation du $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (à $\text{pH} > 8,6$). Si le milieu est réglé, alors dans ce cas $\text{Fe}(\text{OH})_2$ sera remplacé par FeCO_3 ;
- Le degré d'oxydation des sulfures de fer doit augmenter avec l'augmentation des valeurs de pH ;
- Plus le potentiel Redox est négatif, la dissolution des produits d'oxydation de la surface de la pyrite s'effectue avec réduction rapide des valeurs de pH , Il faut aussi remarquer la possibilité de la décomposition de la pyrite dans les milieux acides sous l'effet des alcalins ;
- L'oxydation des sulfures de fer avec le dégagement de l'élément de soufre est réalisable seulement au pH moins 1,5 ;

III.6.2. Détermination du pH d'équilibre du système « solide-liquide »

Pour une espèce chimique considérée, la détermination du pH d'équilibre avec l'eau s'effectue en mettant en jeu les différentes réactions de dissociation et d'hydrolyse qui sont directement ou indirectement liées à l'espèce considérée.

Elle s'effectue en plusieurs séries d'étapes de calculs qui sont dépendants les uns des autres, elle consiste à déterminer successivement :

- L'énergie libre ($\Delta F^\circ_{\text{réaction}}$) de chaque réaction de dissociation et d'hydrolyse considérée ;
- La constante d'équilibre (k) de chaque réaction ;
- La concentration de chaque ion issu des réactions de dissociation et d'hydrolyse en fonction des constantes d'équilibres et de la concentration de l'ion $[\text{H}^+]$.
- Ensuite ces concentrations (c) sont représentées graphiquement en fonction du pH (méthode graphique) en utilisant la fonction suivante :

$$\text{Log}(c) = f(\text{pH}) \quad [6.11]$$

- Le pH d'équilibre est déterminé par la méthode du maximum des minimums : cela consiste à tracer les droites $\text{log}(c)=f(\text{pH})$; ensuite le pH d'équilibre est déterminé en prenant la valeur du pH du point d'intersection le plus haut entre deux droites.

III.6.2.1 Equations et expressions utilisées lors des opérations

Soit la réaction chimique suivante :



On définit K : LA constante thermodynamique de la réaction [6.13] par :

$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

Où

[A], [B], [C] et [D] sont respectivement les activités (concentration) des produits (ions) A, B, C, et D ;

a, b, c, et d sont les coefficients stœchiométriques de A, B, C, et D.

Remarque :

Pour un solide S, sa concentration [S]=1.

L'énergie libre d'une réaction chimique est déterminée par la formule suivante :

$$\Delta F_{réaction}^0 = \sum \Delta F_{pf}^0 - \sum \Delta F_{pi}^0; Kcal / mol \quad [6.14]$$

Dans le cas où la valeur de l'énergie libre est donnée, la constante thermodynamique peut être déterminée par la formule suivante :

$$\Delta F_{réaction}^0 = -RT \log(k); Kcal / mol \quad [6.15]$$

Où R : constante universelle des gaz rares (R=8,314 j/mol) ;

T : la température (T=25°C) ;

D'où l'expression [6.15] devient :

$$\Delta F_{réaction}^0 = -1,364 \log(k); Kcal / mol \quad [6.16]$$

Le tableau III.7 illustre les réactions qui seront considérées pour la détermination des différents pH d'équilibres, avec la valeur des constantes thermodynamiques déterminées, ainsi que les énergies libres des différentes réactions.

Tableau III.8 : Réactions considérées pour la détermination de pH optimal de la pyrite.

	Réactions et équations	K	ΔF^0 Réaction , Kcal..	E^0 , V
7.17	$\text{Fe(OH)}_3 \Leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^-$	$6,93 \cdot 10^{-38}$	50,69	
7.18	$\text{Fe(OH)}_2 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	$1,89 \cdot 10^{-15}$	20,08	
7.19	$\text{FeCO}_3 \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	$2,19 \cdot 10^{-11}$	14,54	
7.20	$\text{Fe(OH)}_2^+ \Leftrightarrow \text{Fe(OH)}^{2+} + \text{OH}^-$	$4,95 \cdot 10^{-10}$	12,695	
7.21	$\text{Fe(OH)}^{2+} \Leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$	$2,68 \cdot 10^{-12}$	15,79	
7.22	$\text{Fe(OH)}^+ \Leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{OH}^-$	$4,41 \cdot 10^{-6}$	7,31	
7.23	$\text{H}_2\text{CO}_3 \Leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	$4,26 \cdot 10^{-7}$	8,69	
7.24	$\text{HCO}_3^- \Leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	$4,677 \cdot 10^{-11}$	14,09	
7.25	$\text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	$\cdot 10^{-14}$	19,095	
7.26	$[\text{Fe}^{2+}] + [\text{Fe(OH)}^+] = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$			
7.27	$3 \text{Fe}^{3+} + \text{Fe(OH)}_2^+ + 2 \text{Fe(OH)}^{2+} + \text{H}^+ = \text{OH}^-$			
7.28	$2\text{Fe}^{2+} + \text{Fe(OH)}^+ + \text{H}^+ = \text{OH}^-$			
7.29	$2\text{Fe}^{2+} + \text{Fe(OH)}^+ + \text{H}^+ = \text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-} + \text{OH}^-$			
7.30	$\text{Fe} + 3\text{OH}^- \Leftrightarrow \text{Fe(OH)}_3 + 3\text{e}^-$		-53,22	-0,769
7.31	$\text{Fe} + 2\text{OH}^- \Leftrightarrow \text{Fe(OH)}_2 + 2\text{e}^-$		-80,38	-1,743
7.32	$\text{Fe} + \text{CO}_3^{2-} \Leftrightarrow \text{FeCO}_3 + 2\text{e}^-$		-34,84	-0,755
7.33	$E = +0,057 + 0,059\text{pH}$			
7.34	$E = -0,917 + 0,059\text{pH}$			
7.35	$E = -0,755 - 0,059 \cdot \lg[\text{CO}_3^{2-}]$			

III.6.2.3. pH d'équilibre du système « Fe(OH)₃ – eau »

Pour la détermination du pH d'équilibre du Fe(OH)₃-eau on a utilisé les équations [7.17], [7.20], [7.21] et [7.25] du Tableau 7. Le graphe obtenu est illustré par la figure III.5.

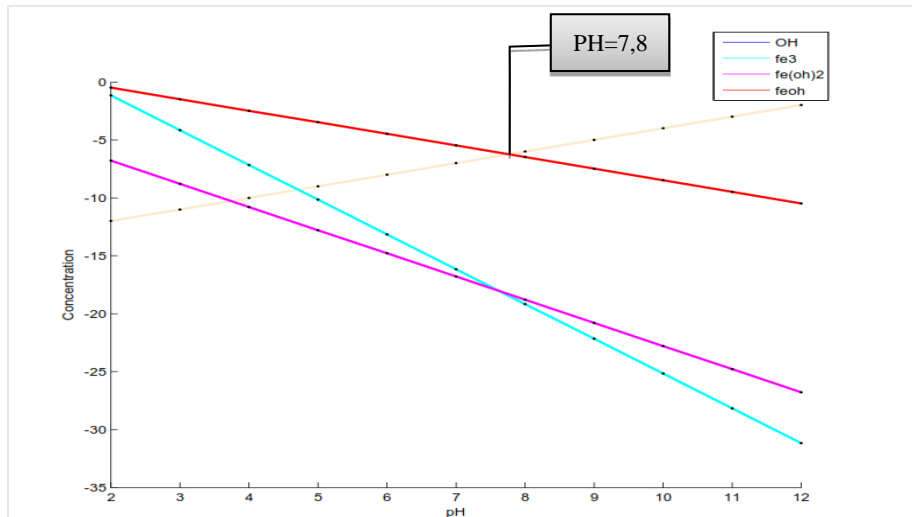


Figure III.7 : influence du pH sur la concentration des ions [OH⁻, Fe³⁺, Fe(OH)₂⁺, Fe(OH)₂]

Les résultats des calculs montrent que : La valeur de pH d'équilibre du système «Fe(OH)₃ – eau» est égale à **7,8**.

III.6.2.4 PH d'équilibre du système « FeCO₃ – eau »

Pour la détermination du pH d'équilibre du FeCO₃-eau on a utilisé les équations [7.19], [7.23], [7.24] et [7.25] du Tableau 7. Le graphe obtenu est illustré par la figure III.8.

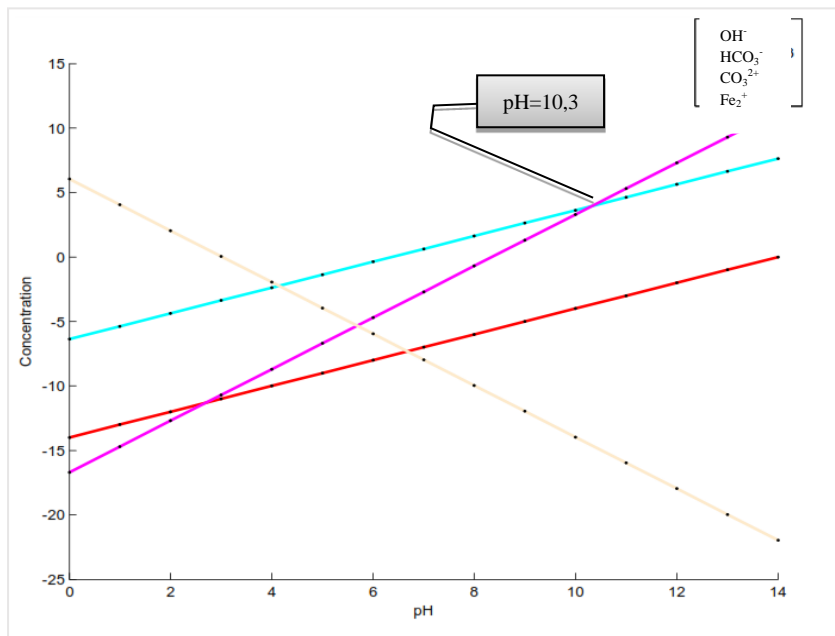


Figure III.8 : influence du pH sur la concentration des ions [OH⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Fe²⁺]

Les résultats des calculs montrent que : La valeur de pH d'équilibre du système «FeCO₃ – eau» est égale à **10,3**.

III.6.2.5. PH d'équilibre du système « Fe(OH)₂ – eau »

Pour la détermination du pH d'équilibre du Fe(OH)₂ eau on a utilisé les équations [7.18], [7.22] et [7.25] du Tableau III.7. Le graphe obtenu est illustré par la figure III.9.

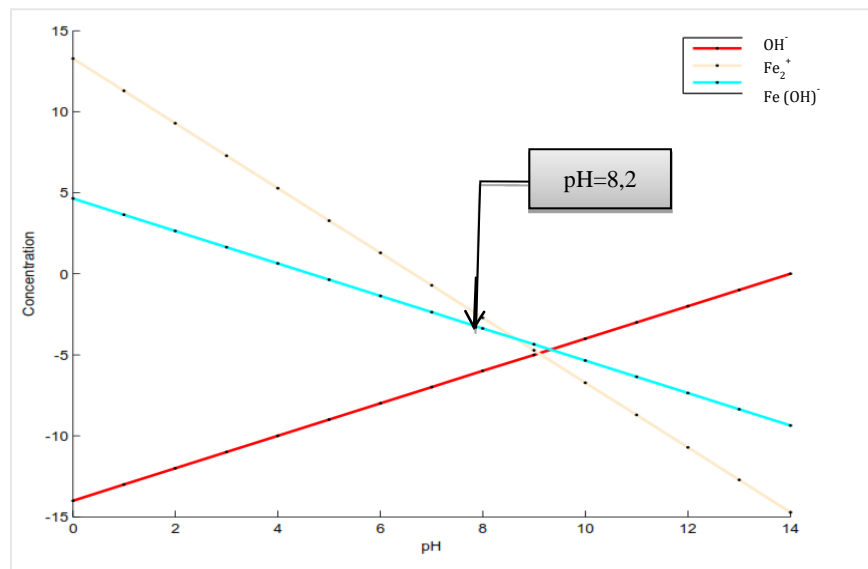


Figure III.9 : influence du pH sur la concentration des ions [OH⁻, Fe²⁺, Fe(OH)⁻]

Les résultats des calculs montrent que : La valeur de pH d'équilibre du système «Fe(OH)₂ – eau» est égale à **8,2**.

III.6.3. Détermination de la potentielle thermodynamique

La détermination de la potentielle thermodynamique nous permet de connaître les composants majoritaires pendant l'équilibre « produit – eau », et aussi de connaître quels sont les types de réactions qui se déroulent à cet instant précisément.

III.6.3.1. Equations et expressions utilisées lors des opérations

Considérons toujours la réaction [6.12], à l'aide des équations [6.14], [5.15] et [5.16] on détermine le potentiel standard par la formule suivante :

$$E_{réaction}^0 = \frac{\Delta F_{réaction}^0}{nF}; V \quad [7.36]$$

Le potentiel thermodynamique (E) de la surface d'un produit est ainsi déterminé par la relation suivante :

$$E = E_{réaction}^0 + \frac{RT}{nF} \log(k); V \quad [7.37]$$

Où R : constante des gaz rares ($R=8,314 \text{ j/mol}$) ;
 T : la température ($T=25^\circ\text{c}$ ou 275k) ;
 n : le nombre d'électrons mis en jeux pendant la réaction ;
 F : nombre d'AVOGADRO ($F=23,06 \text{ kcal/v}$)

Le tableau III.7 illustre les réactions qui seront considérées pour la détermination de différentes potentiels thermodynamiques, avec la valeur des constantes thermodynamiques déterminées, ainsi que les énergies libres des différentes réactions.

❖ Potentiel thermodynamique du Fe(OH)_3

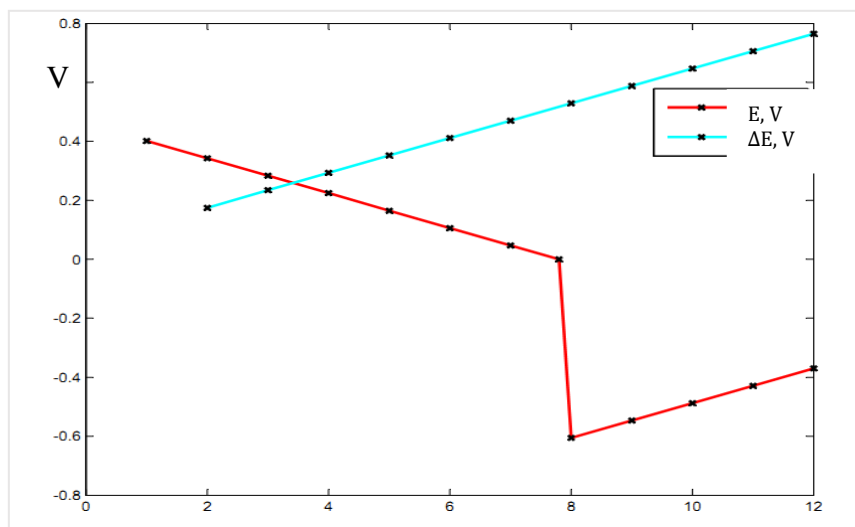


Figure III.10 : Variation du potentiel thermodynamique du Fe(OH)_3 en fonction du pH.

❖ Potentiel thermodynamique du FeCO_3

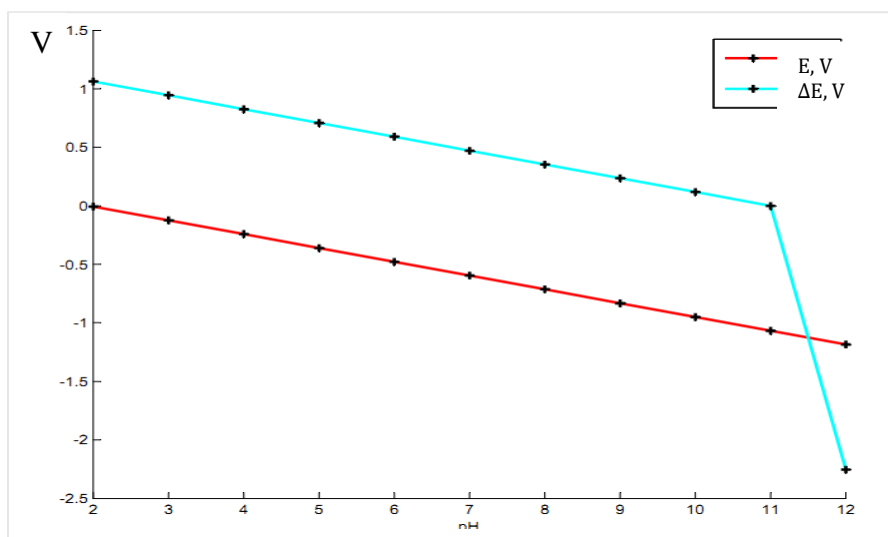


Figure III.11 : Variation de la potentielle thermodynamique de FeCO_3 en fonction du pH

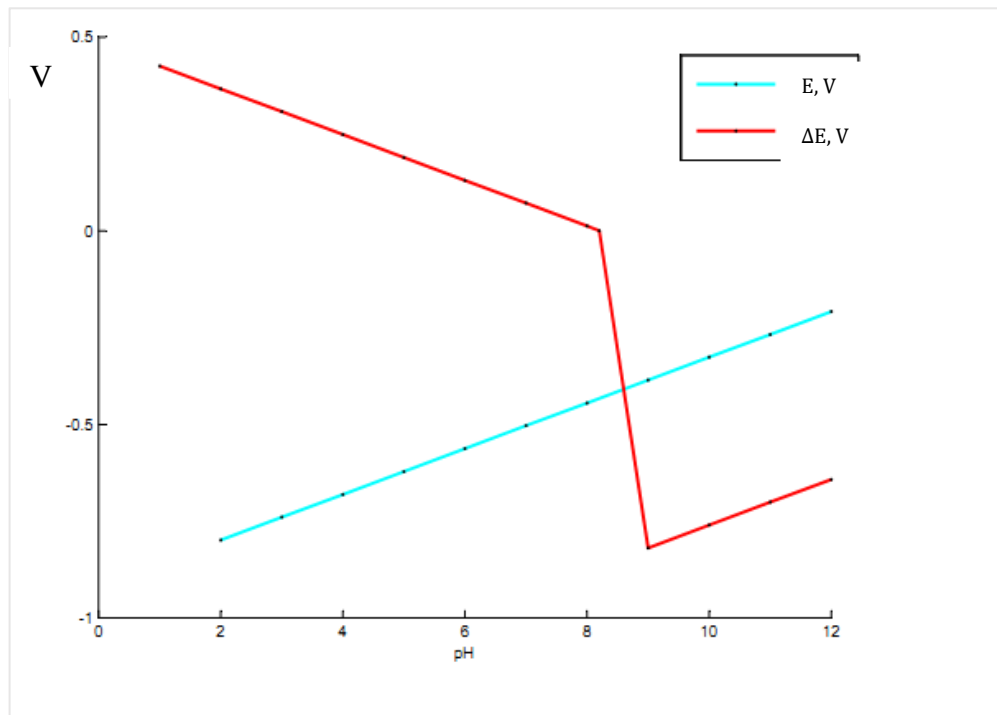
❖ Potentiel thermodynamique du $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 

Figure III.12 : Variation de la potentielle thermodynamique de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ en fonction du pH

III.6.3.2 Synthèse, discussions et interprétation des résultats

Les résultats des calculs montrent que : La valeur de pH d'équilibre du système «produit - eau» donne :

- pour le $\text{Fe}(\text{OH})_3$ – 7,8;
- pour FeCO_3 – 10,3 ;
- pour le $\text{Fe}(\text{OH})_2$ – 8,2.

La véracité des résultats obtenus sera confirmée par des résultats expérimentaux qui représentent : l'influence du pH sur la valeur cumulée du potentiel la superficie de la pyrite (ΔE), la sorption du xanthate (Γ_0, Γ) et la flottabilité de la pyrite (γ_0, γ) avant et après l'éloignement des molécules de xanthate adsorbées sur la superficie (θ) (la concentration initiale butyle de xanthate de potassium dans les expériences - 10 mg/l.). [34]

III.6.3.3. Influence pH sur la flottabilité de la pyrite

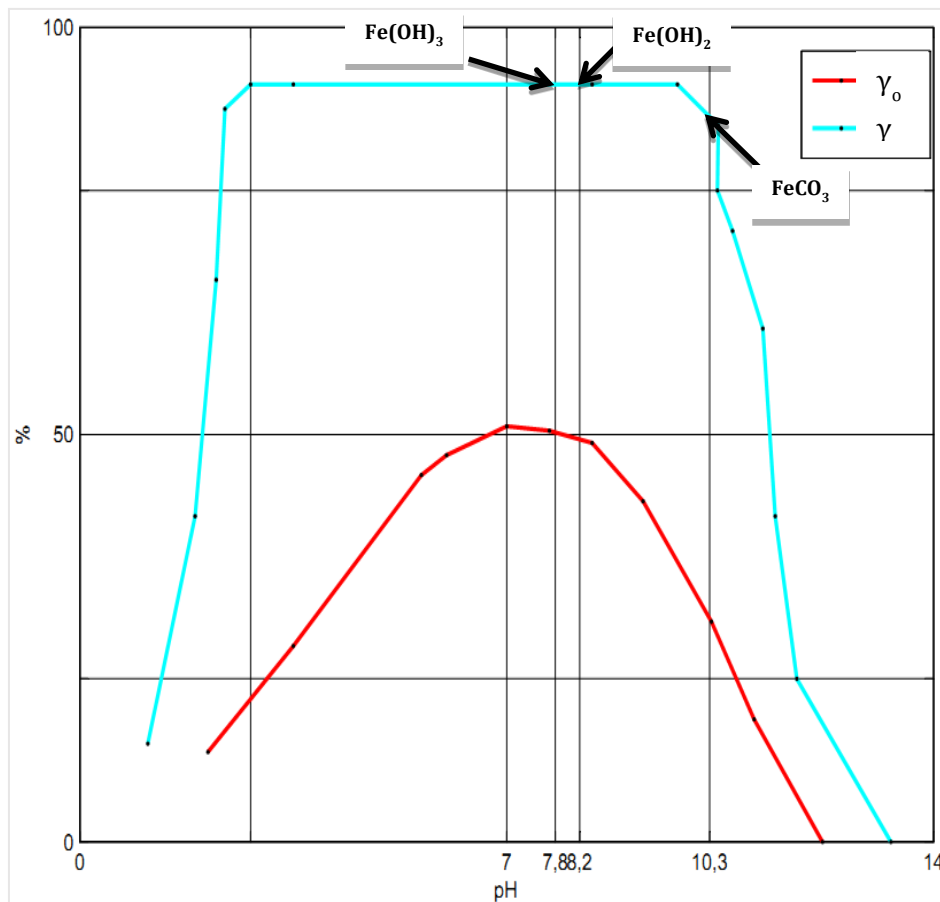


Figure III.13 : Influence du pH sur la flottabilité de la pyrite.

Où γ_0 : flottabilité de la pyrite avant l'éloignement des molécules de xanthate adsorbées sur la surface minérale.

γ : flottabilité de la pyrite après l'éloignement des molécules de xanthate adsorbées sur la surface minérale.

✚ Interprétation du graphe [III.13]

Il présente flottabilité de la pyrite en fonction du pH avant et après adsorption du xanthate, chacune des courbes présente aussi trois parties :

- La première partie montre une augmentation de la flottabilité jusqu'à une valeur optimale.
- Dans la deuxième partie on observe une régularisation de la flottabilité
- Et une décroissance de la flottabilité dans la troisième partie

III.6.3.4 Détermination du pH optimal de flottation de la pyrite

Il est déterminé à partir de la représentation graphique des cumuls de potentielle thermodynamiques des trois espèces minérales considérées.

Ainsi on représente en fonction du pH, le cumul de la potentielle thermodynamique (ΔE) des différentes espèces, selon leur intervalle de pH de présence sur la surface minérale. Cette représentation sera comme la suivante (figure III.14) :

- Le $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sera représenté dans l'intervalle [3-8,6] ;
- Le FeCO_3 sera représenté dans l'intervalle [8,6-10,2] ;
- Le $\text{Fe}(\text{OH})_2$ sera représenté dans l'intervalle [10,2-12].

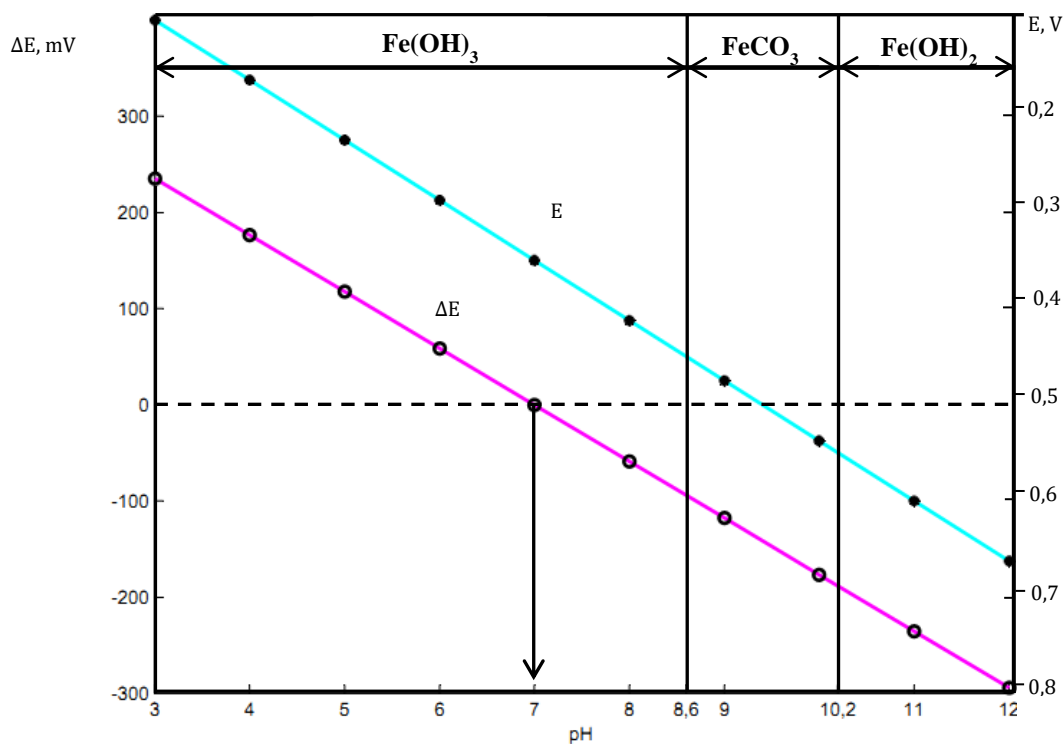


Figure III.14 : pH optimal de flottation de la pyrite

La droite obtenue représente donc le ΔE de chacune des espèces par portion. Le pH optimal de flottation de la pyrite sera donc la valeur du pH de là où la droite (ΔE) passe par le point de charge nulle. Dans notre cas le pH optimal de flottation de la pyrite obtenu est 7.

$$\text{pH}_{\text{optimal}} = 7$$

III.7. Impact environnemental de la flottation

III.7.1. Impacts sur l'eau

L'exploitation de la mine n'aura aucun impact sur les eaux ; en effet L'exploitation de la mine n'aura pas pour conséquence une modification de l'écoulement hydrique, ni déviation de cours d'eau. cependant une modification du niveau piézométrique de la nappe du fait du pompage de la nappe hauterivienne pendant les travaux d'exploitation pour assécher la zone souterraine jusqu'au profil 15 (Niveau 830). Cette eau de bonne qualité est destinée à alimenter les besoins en eau domestique de la population d'Ain Azel.

L'enrichissement du minerai tout venant de Chaâbet El Hamra se fait par voie humide. Les rejets liquides industriels qui proviennent de l'usine d'enrichissement sont transportés par une canalisation vers la digue de rejet. Après décantation de ces rejets l'eau claire rejoint l'oued.

Il est recommandé cependant d'effectuer périodiquement des analyses de contrôle des eaux rejetées dans l'oued et tenir à jour un registre sur lequel seront inscrits les différentes analyses.

III.7.2. Impact sur le sol

L'exploitation de la mine de Chaâbet El Hamra, objet de la présente étude se fera par la méthode de chambres et pilier, selon les règles de l'art dans le domaine de l'exploitation minière souterraine. Le risque d'un affaissement en raison des vides créés par l'exploitation souterraine existe. L'affaissement est un phénomène progressif lié à la présence de cavités à moyenne ou grande profondeur. La rupture de ces cavités se propage vers la surface en provoquant un tassement des terrains qui se traduit par la formation d'une cuvette d'affaissement.

L'impact est plus fortement ressenti au niveau des habitations en limite de cuvette car elles peuvent être soumises à des contraintes importantes.

Bien que dans la zone d'étude et précisément dans la zone possible d'affaissement il n'existe aucune habitation ou infrastructure socio-économique ENOF envisage de mener, une étude géotechnique pour dimensionner les piliers résiduels au fond afin d'éviter les affaissements en surface...

III.7.3. Impact sur les cultures et forêts

Au niveau de la mine de Chaâbet El Hamra il est projeté lors de l'exploitation de la mine de pomper l'eau de la nappe hauterivienne. Du fait de la potabilité de cette eau, cette dernière est destinée à alimenter le barrage d'Ain Azel.

S'agissant des rejets de la laverie, il convient de souligner que ces demies sont acheminées par canalisation vers une digue de stockage de résidus et après décantation, l'eau claire est déversée dans l'oued. En définitive ces deux paramètres n'ont aucun impact sur les cultures et les sols.

III.7.4. Impact sur le milieu naturel

L'impact que peut avoir la reprise de l'exploitation minière dans la région n'a aucun impact sur la faune et la flore. Il convient de signaler que cette activité existe depuis 1979.

Le site de la mine de Chaâbet El Hamra possède un couvert végétal important, à noter qu'on ne nous signale aucune espèce écologiquement protégée dans cette zone.

III.7.5. Impact sur le paysage

L'exploitation de mine se faisant en souterraine l'activité n'a aucun impact sur le paysage.

III.7.6. Impact lie aux bruits

L'exploitation souterraine de la mine de Chaâbet El Hamra, l'impact lié au bruit est négligeable. Le faible impact lié aux bruits est le fait essentiellement

- Du transport du tout venant de Chaâbet El Hamra jusqu'à la laverie situé à Kherzet Youcef.
- Du concassage du matériau par le concasseur primaire situé en amont de l'usine d'enrichissement.

Toutes ces sources, compte tenu de la législation internationale en matière de conception et de normes des équipements fixes et mobiles, dont que très peu d'effet sur l'environnement.

III.7.7. Impact lies aux vibrations

En souterrain, les seules sources de vibrations proviennent des tirs à l'explosif. Comme les quantités utilisées sont faibles (150kg/jours) et du fait de la profondeur des travaux souterrains l'impact lié aux vibrations en surface est insignifiant.

III.7.8. Impact lies aux poussières

En surface la production de poussière est négligeable. Le transport du tout-venant sur 4 km de Chaâbet Et Hamra jusqu'à la laverie située à Kherzet Youcef est effectué sur des itinéraires asphaltés réduisant au minimum la production de poussière excepté un tronçon non asphalté sur 200 m.

Dans la laverie, le traitement étant fait par voie humide il n'y'a pas de production de poussière. En souterrain le chargement du minerai ne produira pas de poussière du fait que le minerai est humidifié. [36]

III.8. Le drainage minier acide (DMA)

La littérature scientifique fait état de nombreuses recherches et avancées sur le phénomène de drainage minier acide. Toutefois, elle se caractérise par un manque de données sur ce phénomène pour les régions tropicales et équatoriales. [37]

III.8.1. Oxydation des minerais sulfures et les rejets miniers acides

Les écoulements acides se forment par percolation d'eau sur les tas de solides excavés contenant des sulfures et ou dans les galeries en fonction du mouvement de la nappe phréatique. Sur le terrain, les deux phénomènes sont liés. En effet, il est courant qu'une gestion irréfléchie laisse se former des stocks de solide à l'aplomb ou en amont des galeries.

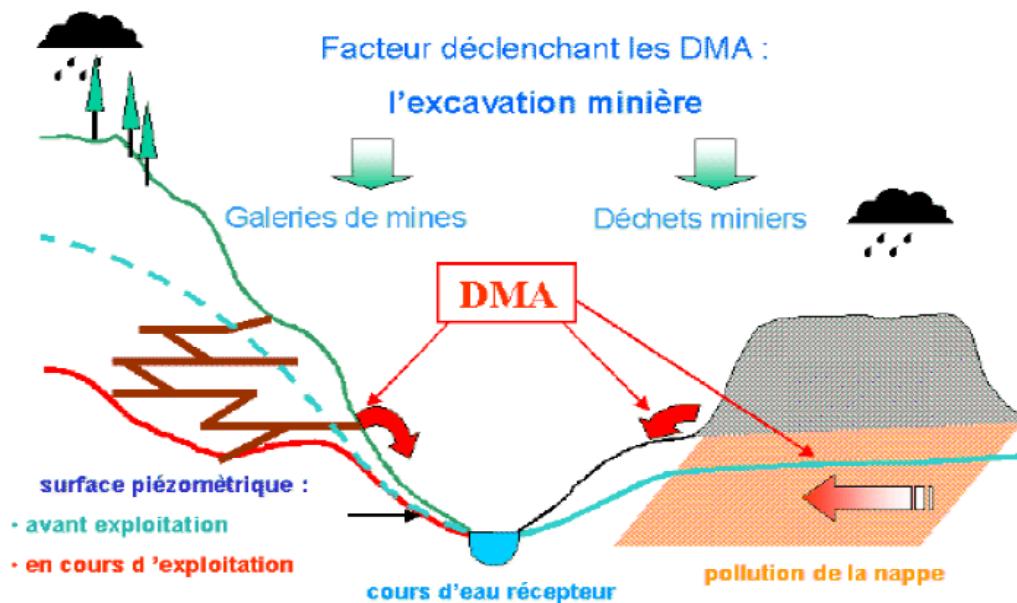


Figure III.15 : Schéma général du fonctionnement des mines et leur impact sur les eaux souterraines et les eaux superficielles. (Bounouala et al. 2000)

Les matériaux situés sur le trajet des eaux souterraines (galeries de mines, anciennes mines à ciel ouvert remblayées par des stériles) ou stockés au sein des haldes, sont sujets à une forte instabilité chimique dans les nouvelles conditions d'oxydo-réduction auxquelles ils sont soumis puisqu'ils contiennent naturellement plusieurs pour cent de sulfures de métaux instables en conditions oxydantes. Cette altération, phénomène universel dans les haldes ou les anciennes galeries, est très rapide (de quelques mois à quelques années ou dizaines d'années après l'ouverture des travaux). Elle conduit à la libération métaux et de grandes de quantités d'ions sulfate.

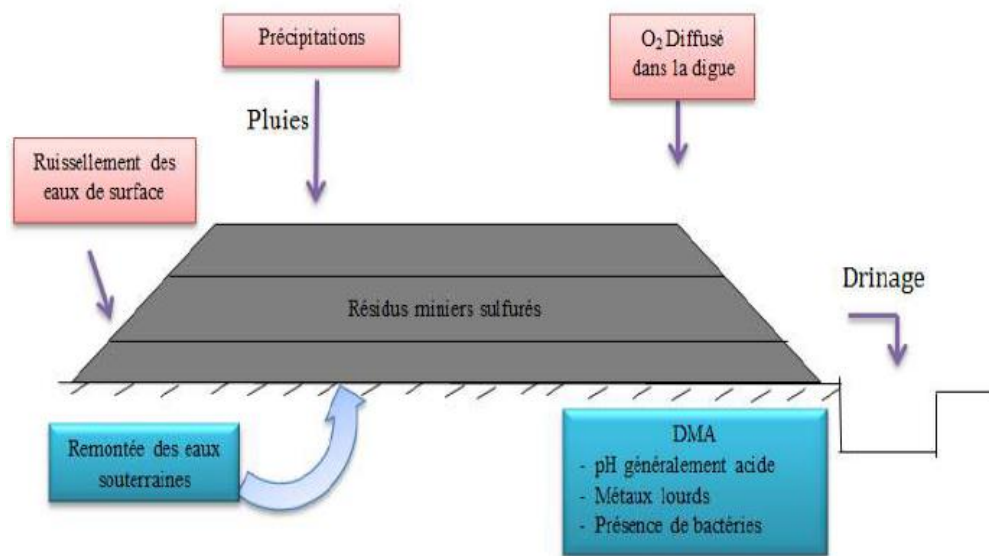


Figure III.16 : Exemple schématique du processus de formation du DMA sur la dige à
III.8.2. Mécanisme de formation du DMA

Au-delà des modifications physiques que subissent les matériaux d'exploitation et qui accélèrent considérablement ce phénomène naturel en rendant accessibles les surfaces contenant des sulfures, des mécanismes chimiques et biologiques sont à l'origine de la formation, de la propagation et de la particularité du DMA, son auto entretien. [37]

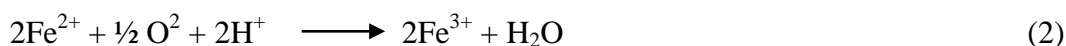
Deux types d'oxydation peuvent être distingués : l'oxydation directe et l'oxydation indirecte :

1 - La pyrite mise en contact avec une eau dont le pH est normalement proche du point de neutralité (pH ~ 7) subit en premier lieu une oxydation chimique lente dite oxydation direct :



Le milieu s'acidifie graduellement autour des sulfures et la deuxième étape du processus s'amorce.

2 - La deuxième étape est marquée par la transformation du fer ferreux en fer ferrique :

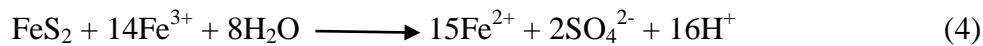


Il y a alors précipitation d'un hydroxyde de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)



Cette précipitation contribuera à acidifier davantage le milieu, engendrant ainsi un Ph de plus en plus bas. En deçà de 3,5 environ, le fer ferrique reste en solution et devient un agent oxydant pouvant oxyder la pyrite, c'est l'étape de l'oxydation indirecte.

Cette réaction marque le phénomène d'auto entretien de la formation du DMA par l'établissement d'un processus cyclique mettant en jeu les réactions (2) et (4) (sans passer par la réaction (3))



Les réactions qui contribuent à la formation du DMA peuvent alors s'exprimer sous la forme générale suivante :

- minéral sulfuré + O₂ + H₂O sulfate + acidité + métaux
- minéral sulfuré + Fe³⁺ + H₂O sulfate + acidité + métaux

Dans la nature, le phénomène DMA donne ensuite lieu à des réactions d'oxydation, de dissolution, de précipitation et de recristallisations successives qui produisent de nombreux minéraux secondaires. (Hydroxydes, sulfates, carbonates ...).

Les processus géochimiques intervenant lors de la précipitation des minéraux secondaires à l'intérieur des pores des matériaux contaminés par le DMA et contribuant ainsi à la production et à la consommation de métaux seront alors :

- La précipitation des hydroxydes qui génère une acidité du milieu et consomme des métaux.
- La dissolution et la précipitation des sulfates qui auront une incidence sur la quantité de métaux dissous.
- La dissolution des carbonates, silicates, et hydroxydes qui diminuent l'acidité du milieu.
- La coprécipitation qui pourrait aussi être un mécanisme qui contrôle la concentration des métaux en solution.
- Les mécanismes de sorption et d'échanges ioniques n'auront qu'une incidence temporaire.

[42]



Figure III.17 : Formation de drainage minier acide KHERZAT YOUSSEF 2021

III.8.3. Méthodes usuelles de contrôle du DMA

L'industrie minière fait face au problème du drainage minier acide lorsque les rejets sont sulfurés et déficitaires en minéraux neutralisants. La compréhension des réactions d'oxydation des sulfures a amené l'industrie minière, les consultants et les centres de recherche œuvrant dans le domaine à développer des techniques de gestion et de contrôle pour les rejets de traitement visant à éliminer une des trois composantes indispensables au DMA : les sulfures, l'oxygène et l'eau

synthétise l'ensemble des méthodes de gestion et/ou de contrôle pour les rejets de traitement. Les approches incluent les techniques suivantes :

➔ **Couverture à effet de barrière capillaire (CEBC)**

La superposition d'une couche de sable grossier, d'une couche de matériau fin (généralement silteuse) et d'une autre couche de sable crée ce qu'on appelle un bri capillaire, ce dernier permet le maintien d'une saturation en eau élevée dans la couche de matériau fin, l'oxygène diffusant faiblement dans l'eau fera que l'oxydation des rejets de traitement sous-jacents sera nulle ou très limitée. [37]

➔ **Recouvrement en eau**

La faible diffusion de l'oxygène dans l'eau permet de limiter l'oxydation des rejets de traitement par ennoiement sous une certaine épaisseur d'eau stagnante. Cette dernière est calculée selon les paramètres climatiques du site minier en question et les caractéristiques des rejets de traitement.

➔ **Couverture réductrice**

L'oxygène est consommé pour limiter sa diffusion jusqu'aux rejets de traitement sous-jacents. La couverture réductrice peut être faite à partir de matières organiques : copeaux de bois ou rejets de pâte à papier, par exemple.

➔ **Barrière à l'infiltration**

En milieu aride, les couvertures à effet de barrière capillaire sont utilisées pour limiter la percolation d'eau jusqu'aux rejets de traitement ; la couche de matériau fin agit comme couche de rétention d'eau. Cette dernière disparaît ensuite par évaporation. En milieu humide, on utilise plutôt des matériaux imperméables (géo membrane, géo composites, etc.)

➔ **Remblayage**

C'est la technique de valorisation des rejets de traitement la plus utilisée dans l'industrie minière consiste à fabriquer un remblai minier en pâte. Un remblai minier en pâte est constitué principalement de rejet auquel est ajouté un ciment. Il sert principalement de soutènement souterrain et permet l'accès à de nouvelles zones d'un gisement. Il peut être aussi entreposé en surface et permettre la stabilisation d'un rejet de traitement en limitant son oxydation.

➔ **Barrières à l'oxygène**

Comme le montrent les équations chimiques qui décrivent le processus d'oxydation des minéraux sulfureux, l'oxygène est un des réactants du processus menant à la production de DMA ou de certains types de DNC.

La réduction de l'apport en oxygène est considérée, comme la méthode la plus efficace pour prévenir la génération de DMA (et de DNC, en présence de sulfures) de résidus miniers

On sait toutefois que sous certaines conditions, des réactions menant à la formation d'eaux acides peuvent parfois se produire en conditions anaérobies, soit en utilisant d'autres réactants tels le fer ferrique Fe^{3+} , soit par l'action directe des

Pour limiter l'apport en oxygène au point de ramener la production d'acide à des niveaux négligeables (du moins dans des rejets peu ou pas oxydés préalablement), on peut installer des recouvrements ayant une perméabilité au gaz extrêmement faible ou encore un recouvrement qui consomme l'oxygène.

L'eau, les sols, les matériaux synthétiques et des combinaisons de ces matériaux peuvent être utilisés pour créer un recouvrement à faible perméabilité au gaz, alors que les matériaux organiques sont généralement utilisés comme composante des recouvrements à consommation d'oxygène.

Pour les climats arides et semi-arides (Chaâbet El Hamra), des couvertures avec effets de barrière capillaire ont été proposées pour limiter l'infiltration d'eau dans les résidus miniers. Lorsque des pluies surviennent, la couche de matériau à granulométrie fine doit pouvoir empêcher la percolation en stockant le nouvel apport d'eau, jusqu'à la période d'évaporation suivante. [37]

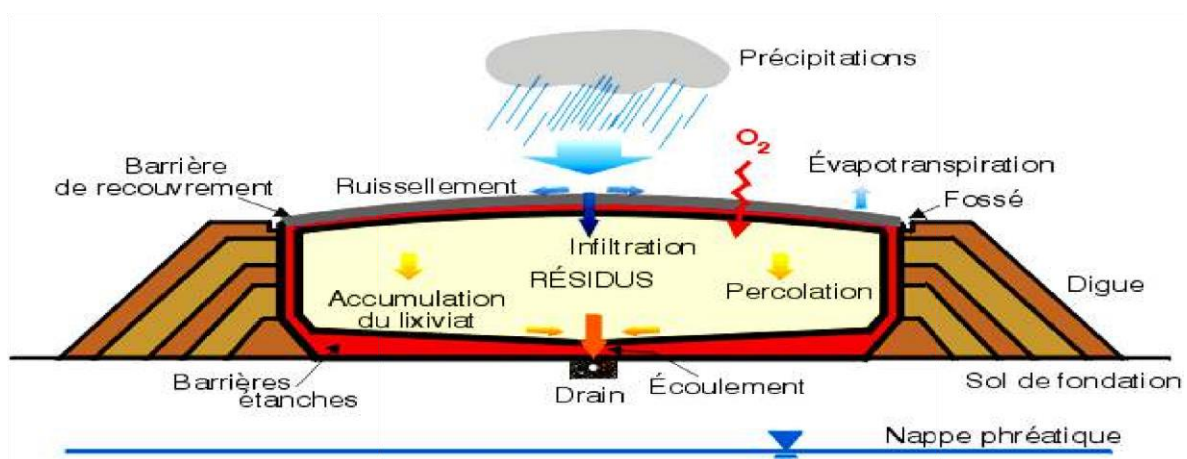


Figure III.18 : cycle hydrologique proposé à la digue d'entreposage de résidus miniers Chaâbet El Hamra (recouvrement monocouche)

III.9.1 Réactivation des sulfures déprimés

Ajoutés à la difficulté de la flottation des fines, la plupart des sulfures contenus dans les rejets sont déprimés, et il convient donc de les réactiver. Différents travaux mettent en

évidence que les surfaces acquises lors du broyage ne sont pérennes que si les conditions physicochimiques sont relativement stables. Ainsi, une attaque chimique ou physique peut réactiver des sulfures précédemment déprimés. [38]

III.9.1.1 Réactivation des sulfures déprimés par processus mécaniques

Dans le domaine des processus mécaniques d'activation, le conditionnement de la pulpe aux ultrasons permet d'augmenter la récupération par flottation des sulfures de cuivre et de plomb.

L'utilisation du quartz comme agent nettoyant des surfaces des sulfures a été aussi abordée dans la littérature. Le mode d'action a d'abord été considéré comme une adsorption préférentielle des hydroxydes métalliques déprimant les sulfures. Puis, l'effet d'attrition des surfaces des sulfures par les grains de quartz a plutôt été retenu.

Un rebroyage des résidus est aussi une possibilité. Cependant leur granulométrie fine rend l'opération délicate pour la suite du traitement, car la flottation de particules ultrafines est difficile en raison des faibles probabilités de collision et une flottation indifférenciée.

III.9.1.2. Réactivation des sulfures déprimés par processus chimiques

Les processus chimiques de réactivation des sulfures déprimés peuvent être pratiqués par ajout de différents composés à vocation de nettoyage des surfaces : H_2SO_4 , CO_2 , Na_2CO_3 , EDTA, NH_4^+ ou d'activation des surfaces : Na_2S , Cu_2SO_4 . Les mécanismes d'attaques des surfaces peuvent être classés en trois catégories : la dissolution des espèces superficielles par variation du pH (H_2SO_4), l'activation par adsorption ($Cu [II]$, Na_2S) et l'extraction des composés de surface.

La méthode de contrôle du pH est basée sur le principe de mise en condition de la pulpe en dehors des pH de stabilité des hydroxydes métalliques. De plus, à l'état naturel, la pyrite flotte mieux à pH bas ; ainsi, une diminution du pH de 11 à 4 pourrait faciliter sa récupération. Cependant, ce conditionnement est plus efficace pour empêcher la formation et la précipitation des hydroxydes métalliques plutôt que de retirer les composés déjà présents en surface des sulfures. De plus, la formation de dixanthogène en surface de la pyrite est d'autant plus aisée que le pH imposé au broyage est acide, et ce, qu'elles que soient les conditions ultérieures. [39]

Les travaux de Xiaojun et Kelebek (2000) ont montré qu'une pyrite déprimée par de la chaux $Ca(OH)_2$ peut être réactivé par l'ajout d'ions ammonium NH_4^+ . La flottation de la pyrite en présence de NH_4^+ est passée de 10 % à 85 %. En plus d'être un réducteur de pH, l'ion NH_4^+ met à jour les sites actifs de la pyrite à l'origine de la fixation du xanthogène. Les mécanismes d'activation de la pyrite par l'ion NH_4^+ sont doubles : le NH_4^+ agirait au niveau superficiel par

désorption des ions et hydroxydes de Ca et Fe en surface de la pyrite tout en servant de catalyseur à l'oxydation du xanthate en xanthogène en surface de la pyrite.

Dans des essais de désulfuration en cellule Denver de rejets de traitement (pH 8, %S initial de 13 % massique), ont donné une légère augmentation de la récupération en soufre par ajout de sulfure de sodium (Na_2S), on constate aussi une augmentation de récupération des fines de chalcopirite par sulfuration au NaHS. Cependant, le risque de dépression par formation de thiosulfates est possible à haute concentration.

Une certaine réactivation des sulfures de fer déprimés par la chaux s'obtient également par vieillissement naturel du résidu ; la flottation après vieillissement de 14 jours est équivalente à une flottation par conditionnement à pH 7.

III.10. Utilisation de rejets désulfurés dans les recouvrements

Une des options de gestion du rejet désulfuré non générateur de DMA est son utilisation pour la restauration de sites miniers générateurs de DMA. Ce rejet peut être utilisé comme matériau de recouvrement jouant le rôle de barrière à l'oxygène. Dans ce qui suit, quelques outils permettant d'évaluer l'impact du soufre résiduel sur la performance du recouvrement sont présentés.

Lorsque des rejets sont identifiés comme potentiellement générateurs de DMA ou de DNC, il est essentiel de prendre des mesures qui limiteront les impacts environnementaux de ceux-ci. Une des façons pour atteindre cet objectif consiste à contrôler la production du DMA ou du DNC par la prévention. On entend par prévention les mesures qui visent à inhiber la réaction d'oxydation des sulfures à la source.

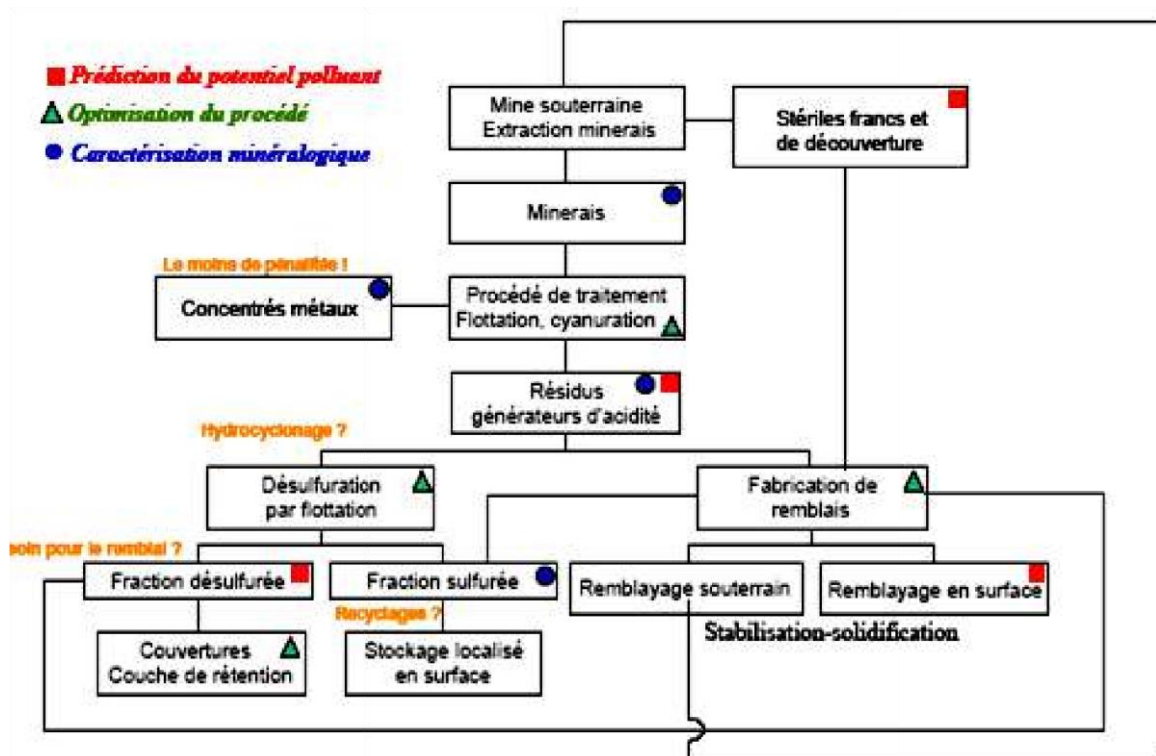


Figure III.19 : Modèle de schéma technologique de fonctionnement des mines

Les méthodes visant à prévenir la production de DMA ou de DNC ont pour objectif d'éliminer, ou de réduire à des niveaux très faibles, la présence de l'oxygène atmosphérique, d'eau ou de sulfures.

Comme ces trois éléments sont les composantes principales des réactions d'oxydation qui causent le DMA et aussi le DNC (dans plusieurs cas), en éliminant un ou plusieurs de ces éléments, on peut réduire la production de contaminants à des niveaux très faibles.

L'industrie minière fait face au problème du drainage minier acide lorsque les rejets sont sulfurés et déficitaires en minéraux neutralisants.

La compréhension des réactions d'oxydation des sulfures a amené l'industrie minière, les consultants et les centres de recherche œuvrant dans le domaine à développer des techniques de gestion et de contrôle pour les rejets de traitement visant à éliminer une des trois composantes indispensables au DMA : les sulfures, l'oxygène et l'eau.

III.11. Processus de neutralisation dans les rejets miniers

Un autre aspect important, concernant la qualité du drainage minier, est la présence ou non de minéraux acidivores dans l'environnement immédiat.

L'acide sulfurique produit par l'oxydation des minéraux sulfurés est neutralisé par le carbonate, pour produire des ions bicarbonates, des sulfates et des ions calcium (et magnésium pour la dolomite).

Tout comme pour l'oxydation des minéraux sulfurés, un des aspects clés de la neutralisation est la vitesse avec laquelle la réaction peut se produire.

Il est cependant difficile de classer cette réactivité pour l'ensemble des conditions pouvant être retrouvées dans une aire d'entreposage de rejets (pH, température, conditions géochimiques, cristallographie, etc.). [35]

Il est toutefois reconnu que les minéraux carbonatés sont nettement plus réactifs que les silicates ; parmi ces familles de minéraux, on retrouve différents niveaux de réactivité.

La hiérarchie suivante de la réactivité relative des carbonates a été proposée par (Blowes et Ptacek, 1994) : calcite \gg dolomite > ankérite magnésienne > ankérite > sidérite. (Strömberg, 1997) a également tiré de la littérature des taux de dissolution pour différents minéraux.

Les résultats, pour un pH de 7 et une température de $25 \geq C$, montrent que le taux de dissolution de la calcite (2×10^{-5} mole $m^{-2} s^{-1}$) serait 106 fois plus grand que ceux de la biotite, de l'anorthite et de l'albite (1×10^{-12} mole $m^{-2} s^{-1}$) et 107 fois plus grand que celui des feldspath-K (1×10^{-13} mole $m^{-2} s^{-1}$).

En comparant les résultats présentés par (Lawrence et al. 1997) (à pH=5) à ceux de Strömberg (à pH=7), on observe que le pH a une influence majeure sur l'écart des taux de dissolution entre les carbonates et les silicates.

Pour un pH neutre, la différence, en termes de taux de dissolution, est de l'ordre de 106, alors qu'il est à peine de 2,5 à pH 5.

L'impact des silicates sur la qualité de l'eau est donc pratiquement négligeable à pH près de la neutralité mais devient significatif lorsque le pH devient faible

En terminant cette brève description des phénomènes menant à la formation de DMA, il est important de mentionner que d'autres réactions chimiques (autres que l'oxydation et la neutralisation) sont susceptibles de se produire dans les rejets miniers et que ces dernières vont modifier le comportement géochimique du système.

Par exemple, l'oxydation des minéraux sulfurés génère des ions sulfates, alors que la neutralisation par les carbonates, tels que la calcite et la dolomite, génère des ions calcium.

Si les concentrations de ces deux éléments sont suffisamment élevées, il est possible qu'il y ait précipitation de minéraux secondaires dans les rejets (tel le gypse).

Ces précipitations vont affecter la qualité de l'eau (en réduisant les concentrations de ces deux éléments et en produisant certains autres éléments) et peuvent également affecter les propriétés des rejets (baisse de la porosité, par exemple).

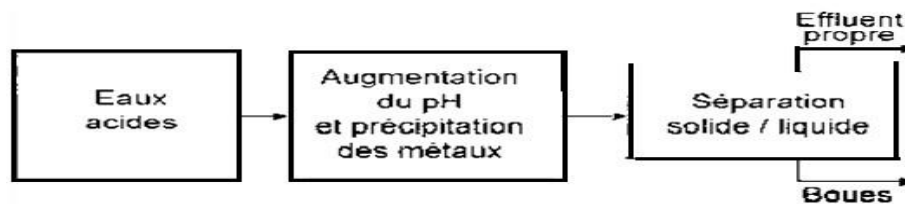


Figure III.20 : Etapes générales du traitement des acides

Dans les paragraphes qui suivent, nous allons décrire plus en détail les caractéristiques spécifiques de différents procédés destinés à traiter l'eau acide dans l'optique des normes environnementales en vigueur.

III.11.1. Traitement en bassin de sédimentation

Dans les cas où une grande superficie est disponible pour le traitement, il est possible d'accumuler les eaux acides dans un grand bassin auquel on ajoute la chaux directement à l'eau pour rehausser le pH à un niveau suffisant afin d'assurer la précipitation des métaux.

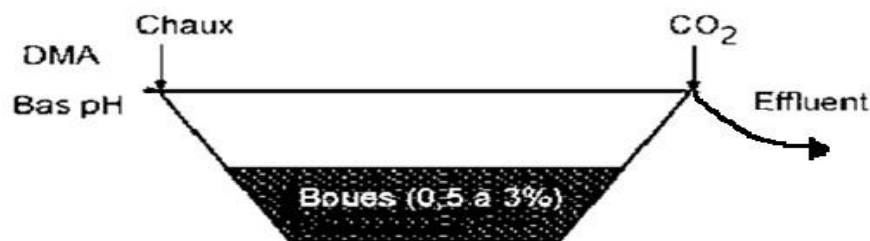


Figure III.21 : Bassin de sédimentation avec chaulage

Ce procédé de neutralisation est peu dispendieux et bien adapté lorsque les débits ne sont pas trop élevés et que la construction d'un tel bassin est possible. Il ne nécessite habituellement pas de flocculant puisque le temps de rétention est suffisamment long pour permettre de décanter tous les précipités dans le bassin. [35]

Un premier inconvénient de ce procédé est le fait qu'il n'est pas facile d'oxyder le fer ferreux (s'il y en a). L'aération dans ce genre de bassin peut en effet nuire à la sédimentation et engendrer une grande concentration de solides en suspension dans l'eau. De plus, les boues produites sont alors de très faible densité.

On doit donc les pomper de façon régulière afin d'empêcher la surverse des éléments solides. L'efficacité du chaulage est aussi beaucoup moins grande que dans la plupart des

autres procédés puisque la chaux, qui est souvent ajoutée dans un fossé, ne subit pas d'agitation mécanique pour favoriser sa dissolution.

Un second inconvénient est la difficulté de bien contrôler les réactions. Puisque l'écoulement est assuré par gravité, il est en outre ardu de bien contrôler le débit de l'eau acide si l'usine de chaux doit ralentir ou s'arrêter, par exemple.

Une variante du procédé de traitement en bassin de sédimentation est pratiquée par certaines mines en opération, soit la Co déposition boues-résidus miniers. Il s'agit de combiner les eaux acides aux résidus et à un débit contrôlé de lait de chaux à la sortie du moulin.

Cette pratique permet de neutraliser le DMA et de Co déposer des boues produites avec les résidus du moulin (rejets du concentrateur).

Les mécanismes de neutralisation pour ce genre de procédé de traitement ne semblent pas avoir fait l'objet d'études détaillées, mais il est possible qu'une certaine portion des solides formés précipitant sur la surface même des résidus miniers.

Le grand avantage de cette pratique réside dans les coûts, qui sont minimes puisqu'il faut de toute façon acheminer les rejets du concentrateur vers le parc à résidus et qu'il n'y a pas de bassin spécifique destiné à l'entreposage des boues.

La Codéposition des boues et des résidus miniers minimise les besoins en volume d'entreposage puisque les boues comblent les pores (interstices) présents dans les résidus miniers. Par contre, cette pratique n'est pas applicable à plusieurs sites miniers générateurs de DMA, notamment, bien sûr, aux sites qui ne sont plus en opération. [35]

III.11.2. Traitement conventionnel

Le procédé de traitement conventionnel consiste à neutraliser le DMA dans un réacteur où l'aération permet aussi d'oxyder le fer ferreux (figure III.19).

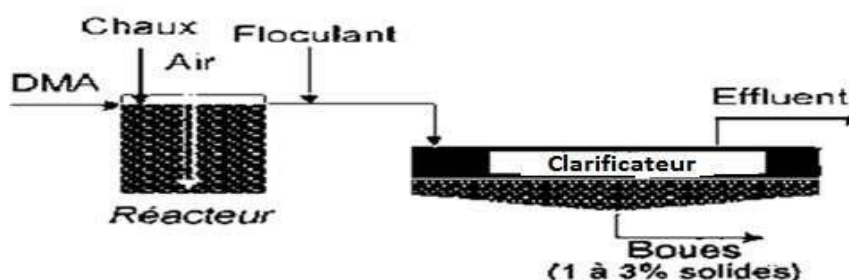


Figure III.22 : Traitement conventionnel de DMA

La séparation des solides est typiquement réalisée dans un clarificateur qui produit un effluent propre et une boue contenant de 1 à 5 % de solides. Comme on peut le voir à la

figure 5.36, on peut ajouter un flocculant à l'entrée du clarificateur ou à la surverse du réacteur de neutralisation et d'oxydation.

Ce procédé permet de traiter l'eau acide efficacement et avec un bon contrôle et de produire une boue sans hydroxydes ferreux. Les coûts d'opération liés à ce procédé sont certes plus élevés

III.11.3. Procédé de boues à haute densité (BHD) :

Le procédé BHD, qui existe depuis la fin des années 1960, est maintenant utilisé régulièrement pour le traitement du DMA. Sa principale caractéristique est le recyclage d'une portion des boues, ce qui permet de produire des boues à plus haute.

Ce procédé est notamment employé sur plusieurs sites afin de produire des boues plus denses et ainsi minimiser le coût d'entreposage. Il permet notamment de produire des boues dont la densité de pulpe P varie de 10 à 40 % selon les caractéristiques du DMA et des composantes de l'usine.

Comme le montre la (figure 20) le procédé consiste à traiter l'eau acide à l'aide d'un mélange de boues recirculées et de lait de chaux. Un clarificateur est nécessaire afin de décanter les précipités et de récupérer une partie des boues produites [35]

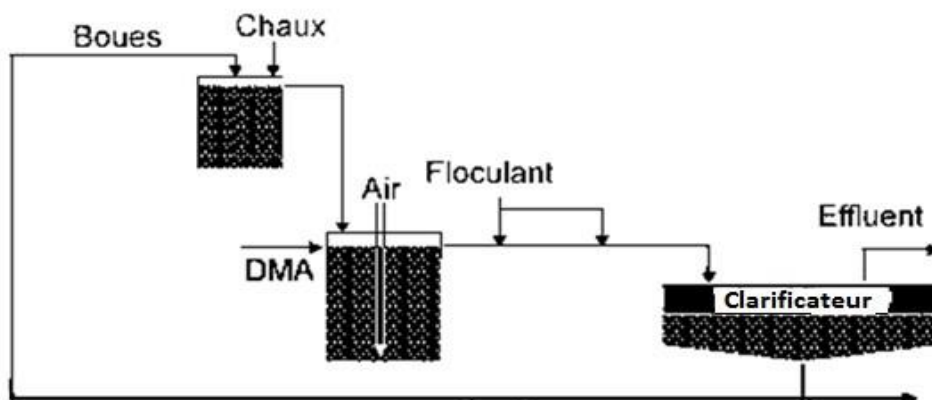


Figure III.23 : Procédé avec boues à haute densité

Conclusion

L'analyse chimique élémentaire donne la composition chimique totale sans renseigner sur la minéralogie. Ceci ne suffit pas à caractériser un échantillon de rejet solide.

L'analyse minéralogique a donc été réalisée dans le but de déterminer les phases minéralogiques présentes dans les échantillons. Cette analyse peut permettre d'identifier les phases majeures de la gangue et celles porteuses des éléments suivis.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

En fait, l'ensemble de la chaîne de traitement des minéraux qui concentre les sulfures de métaux à valeur économique contribue à façonner la chimie de surface de la pyrite dans les émissions concentrées.

Dans la Province géologique de l'Ain Azel, les gisements sont principalement de type sulfure massif de plomb-zinc. L'exploitation de tels gisements nécessite des lignes de traitement du minerai pour le broyage du minerai et la flottation du zinc, et ce dernier est le seul minéral recherché. Le broyage s'effectue en milieu humide et en conditions alcalines, avec un excès de chaux.

La flottation au sulfure de zinc comprend une étape d'activation avec du sulfate de cuivre, puis l'ajout de collecteurs de xanthate ou de dithio-phosphate. La flottation est effectuée sur l'établi, et il y a deux étapes en série : la séparation grossière et l'échappement. Une étape supplémentaire de lavage est effectuée sur le concentré à deux étages en série. Les émissions de l'usine d'enrichissement sont constituées de divers résidus de l'étape de flottation.

Actuellement, plus des 3/4 du zinc produit dans le monde sont obtenus par hydrométallurgie et cette proportion augmente chaque année. Le sulfure de zinc n'étant pas soluble dans H_2SO_4 , les composés sulfurés doivent être grillés préalablement à la lixiviation qui met le zinc en solution sous forme de sulfate. Les minerais oxydés sont abondants surtout dans le bassin méditerranéen. La concentration par flottation, faite par sulfuration et collection aux amines. La concentration métallurgique permet d'obtenir des concentrés riches, souvent destinés à la fabrication d'oxyde de zinc.

L'importance de métaux lourds est primordiale pour plusieurs secteurs économiques. Le plomb et le zinc sont parmi ces éléments qui sont produits par plusieurs pays (la Chine, USA et Australie). Leur traitement pose problème et surtout avec un enrichissement par flottation ou simplement par lixiviation qui nécessitent des réactifs toxiques qui polluent les sols et l'environnement la toxicité des métaux lourds tel que zinc, cuivre, et plomb risquent de s'infiltrer et contaminent sols et probablement des nappes phréatiques.

L'analyse chimique élémentaire donne la composition chimique totale sans renseigner sur la minéralogie. Ceci ne suffit pas à caractériser un échantillon de rejet solide.

L'analyse minéralogique a donc été réalisée dans le but de déterminer les phases minéralogiques présentes dans les échantillons. Cette analyse peut permettre d'identifier les phases majeures de la gangue et celles porteuses des éléments suivis.

Références

- [1] **Guiraud R. (1990)** : Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Bulletin du Service Géologique d'Algérie, Alger. **Glaçon J. (1967)** : Recherches sur la géologie et les gîtes métallifères du Tell Sétifien. Public. Serv. Géol. D'Algérie
- [2] **Touahri. (1991)** : géochimie et métallogénie de minéralisations à Plomb et Zinc du nord de l'Algérie.
- [3] **Berkane Ch. (2016)** : Evaluation du comportement géochimique de stériles présents sur la mine.
- [4] **(IMC) Bureau d'étude (1947)** : Global Services to the Mining and Energy Industry since.
- [5] **Henni A. (1998)** : minéralogie, géochimie du gisement Pb-Zn de Kherzet Youssef Article.
- [6] **Khalfi A. et Taleb C. (2014)**: Contribution à l'étude d'impact environnemental de l'exploitation minière souterraine et de rejets de traitement (cas de la mine de Chaâbet-El-Hamra. Ain Azel. Sétif).
- [7] <http://www.legarrec.com/entreprise/effluent-definition/>
- [8] **De M. Krim (2019-2021)** : cours de métallurgie, séparation par flottation.
- [9] **EREM (1992)**: Rapport final sur les travaux d'évaluation du gisement de Chaâbet-El-Hamra Avec calcul de réserve.
- [10] **E.N.O.F. (2012)** : Rapport sur la méthode de traitement d'un minerai polymétallique cas de Chaâbet El Hamra.
- [11] **Muller, P. (1997)** : Gestion des déchets minéraux industriels de l'inertage à la valorisation matière : application aux effluents et boues d'hydroxydes à base de fer, zinc et nickel (Doctoral dissertation, Université Paul Verlaine-Metz).
- [12] **Benzaazoua, M., Bussière, B., & Lelièvre, J. (1998)** : Flottation non sélective des minéraux sulfurés appliquée dans la gestion environnementale des rejets miniers. In 30th Canadian Mineral Processors Symposium, Ottawa (pp. 682-695).
- [13] **Alvayai C. (2006)** : Traitement hydrométallurgique de minerais cupro-cobaltifère du Katanga, D.E.A., Université de liège, 2006.

[14] **NOUIOUA Asma (2018)** : LIXIVIATION ET EXTRACTION DU FER A PARTIR DE LA ROCHE FERRIQUE DE LA MINE DE L'OUENZA (Chapitre II).

[15] [https://fsnv.univ-setif.dz/images/telecharger/BIOCH/3eme%20biochimie%202019-2020%20Bouzidi%20A%20L3%20Bioch%20cours%20Toxicologie%20\(2\).pdf](https://fsnv.univ-setif.dz/images/telecharger/BIOCH/3eme%20biochimie%202019-2020%20Bouzidi%20A%20L3%20Bioch%20cours%20Toxicologie%20(2).pdf)

[16] <https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/toxicologie/notions-toxicologie/Pages/08-comment-evaluer-effet-toxique.aspx>

[17] <https://www.eau-et-rivieres.org/http%3A//www.eau-et-rivieres.org/mines consequences-eau>

[18] **BENBOUDA M. (2015)** : Synthèse et comportement spectroscopique et électrochimique d'un nouveau composé ionique. Détection et activité biologique de ses complexes métalliques comme agents antibactériens et antifongiques (Doctoral dissertation).

[19] **Mouni L, Merabet D, Bouzaza A et Belkhiri A (2013)** : «Removal of Pb (II) from aqueous solution by adsorption using activated carbon developed from Apricot stone» *Desalination and Water Treatment*, 276, p148–153.

[20] **Badr N. (2013)** : «Treatment of wastewater containing arsenic using *Rhazya stricta* as a new adsorbent», *Environ Monit Assess* ; 185(12): p9669–9681.

[21] **Boulkrah H. (2008)** : «Etude comparative de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants» *mémoire de Magister* *université de Skikda*.

[22] **Casas S. (2005)** : Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *Mytilus Galloprovincialis*, en milieu méditerranéen. Thèse : Océanologie biologique, Environnement marin, Université du Sud Toulon Var, 363 p.

[23] **Alslaibi T. M, Abustan. I, Ahmad.M et Abu A.F. (2013)** : «Kinetics and equilibrium adsorption of iron (II), lead (II), and copper (II) onto activated carbon prepared from olive stone waste», *Desalination and Water Treatment*, 52(40-42): pp7887-7897.

[24] **Lepesant, G. (2018)** : La Transition Énergétique face au défi des métaux critiques. Études de l'Ifri.

[25] **Bouchelki, N. & Mouni, L. (2015)** : Etude de l'élimination du plomb, du zinc et du cadmium par adsorption sur un charbon actif préparé à base des noyaux de jujuba (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane Mira-Bejaia).

[26] **Minceva M, Fajgar F, Markovska et Meshko V. (2008)** : Comparative Study of Zn²⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺ Removal From Water Solution Using Natural Clinoptilolitic Zeolite and Commercial Granulated Activated Carbon. *Equilibrium of Adsorption, Separation Science and Technology*, 43:8, p2117-2143.

[27] **Divet, L. (1996)** : Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats Synthèse bibliographique. *BULLETIN-LABORATOIRES DES P*

[28] **Derycke, V. (2012)** : Optimisation de la désulfuration de produits miniers en vue de la diminution de leur potentiel polluant : effet de la granulométrie, du type de sulfures et évaluation de la qualité des eaux de drainage post-traitement.

[29] **Banks et al., 1997 ; Jambor et Blowes, 1998 ; Yigit et Safat, 2004 ; Consas et al., (2005)**: Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings.

[30] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cuivre>

[31] <https://www.lenntech.fr/data-perio/cu.htm>

[32] **BENABBES Lamia (2019)** : Les expériences sont réalisées au laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement du département des mines (LAVAMINE) de l'université d'Annaba.

[33] **Dc .M. Laraba et Pf. M.Sara soltani (2019-2021)** : cours de métallurgie, diffraction des rayons X. Institut des mines Tébessa.

[34] **BENABBES Lamia (2019)** : Revalorisation et désulfuration environnementale des rejets de traitement du minerai de zinc : cas de la mine de Chaâbet El-Hamra – Sétif (Algérie)

[35] **Dc. Aouati et M.Dieb aberkane Yasmine (2014)** : réduction de la toxicité des effluents des mines des métaux de bases à l'aide de méthode de traitement Institut des mine Tébessa.

[36] Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaâbet El-Hamra (Ain Azel, Wilaya de Sétif). Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Géologie 2007/2008.

[37] **Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G. J., Potvin, R., & Benzaazoua, M. (2005, May)** : Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées. In *Proceedings of the Symposium 2005 sur L'environnement et les Mines* (pp. 1-29).

Références

[38] **Klimpel, R. R. (1995)** : The influence of frother structure on industrial coal flotation
Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO (United States).

[39] **Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., & Marion, P. (2000)** :
Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation.
International journal of mineral processing, 60(1), 57-74

ANNEXES

Valeurs de concentration des ions données par le logiciel MATLAR

❖ pH d'équilibre « Fe(OH)₃-eau »

Oh =

Columns 1 through 4

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 11

0.0010 0.0100 0.0001

Fe³ =

Columns 1 through 4

0.0693 0.0001 0.0000

0.0000 Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 11

0.0000 0.0000 0.0000

Teoh₂ =

1. 0e-006*

Columns 1 through 4

0.1627 0.0016 0.0000

0.0000 Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 11

0.0000 0.0000 0.0000

feoh =

Columns 1 through 4

0.3293 0.0329 0.0033 0.0003

ANNEXES

Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 11

0.0000 0.0000 0.0000

❖ pH d'équilibre « FeCO₃-eau »

oh =

Columns 1 through 4

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 9 through 12

0.0000 0.0000 0.0001 0.0010

Columns 13 through 15

0.0100 0.1000 1.0000

hco3 =

1.0e+007 *

Columns 1 through 4

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 12

0.0000 0.0000 0.0004

0.0043 Columns 13 through 15

0.0002 0.0199 1.9937

fe2 =

1.0e+006 *

Columns 1 through 4

1.0985 0.0110 0.0001

0.0000 Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 12

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 13 through 15

0.0000 0.0000 0.0000

❖ pH d'équilibre « Fe(OH)₂-eau »

oh =

Columns 1 through 4

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 12

0.0000 0.0000 0.0001

0.0010 Columns 13 through 15

0.0100 0.1000 1.0000

fe² =

1.0e+013 *

Columns 1 through 4

0.0190 0.0002 1.9000

0.0000 Columns 5 through 8

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 9 through 12

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 13 through 15

0.0000 0.0000 0.0000

fe^{oh}

1.0e+004 *

ANNEXES

Columns 1 through 4

4.3084 0.4308 0.0431

0.0043 Columns 5 through 8

0.0004 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 9 through 12

0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 Columns 13 through 15

0.0000 0.0000 0.0000