

REPULIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Minier  
Mémoire de projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Essais d'enrichissement du Feldspath de la mine  
d'Ain Barbar**

Présenté et soutenu publiquement le 15/07/2021 par :  
**M. ABDESSEMED Chem's Eddine** et **M. MAIFIA Nabil**  
Sous la direction de Mr. Elabas MOUSSAOUI MAA ENP

Composition du Jury :

Président	Pr. Malek OULDHAMOU	Professeur ENP
Promoteur	M. Elabas MOUSSAOUI	MAA ENP
Examinatrice	Mlle. Amira MERCHICHI	MAA ENP

ENP 2021



REPULIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Minier  
Mémoire de projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Essais d'enrichissement du Feldspath de la mine  
d'Ain Barbar**

Présenté et soutenu publiquement le 15/07/2021 par :  
**M. ABDESSEMED Chem's Eddine** et **M. MAIFIA Nabil**  
Sous la direction de Mr. Elabas MOUSSAOUI    MAA ENP

Composition du Jury :

Président	Pr. Malek OULDHAMOU	Professeur ENP
Promoteur	M. Elabas MOUSSAOUI	MAA ENP
Examinatrice	Mlle. Amira MERCHICHI	MAA ENP

ENP 2021

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تثمين خام الفلسبار المستخرج من منجم عين بربر، من خلال تقليل محتواه من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  (الهيماتيت) والكوارتز  $SiO_2$ ، بحيث يمكن استخدامه في صناعة الزجاج وصناعة الخزف. تم تكسير المواد الخام وتفتيتها لتجهيزها لعمليات الفصل المستخدمة فيما بعد. تم إجراء إزالة الهيماتيت باستخدام عملية الفصل المغناطيسي الجاف عالي الشدة، والتي سمحت باستعادة مادة مغناطيسية تمثل 3.6% من كتلة العينة المعالجة. فيما يخص التخلص من الكوارتز، تم من خلال عملية التعويم التي أظهرت أن المجمع المستخدم، وهو ثلاثي إيثانول أمين  $C_6H_{15}NO_3$  لا يعطي نتائج جيدة، حيث أنه مع الأخذ في الاعتبار الاستهلاكات المستخدمة لهذا المتفاعل، فإن استرجاع الفلسبار من ناتج الرغوة لم يتعدى 10.25% من الكتلة الأولية للعينة المعالجة.

**الكلمات المفتاحية:** تعزيز، خام الفلسبار، عين بربر، الهيماتيت، الكوارتز، التحضير الميكانيكي، الفصل المغناطيسي، التعويم.

## Abstract

The aim of this work is to valorize the feldspar ore from the Ain Barbar mine, by reducing its iron oxide content  $Fe_2O_3$  (hematite) and quartz  $SiO_2$ , so that it can be used by the glass industry and the ceramic industry. The raw material was crushed and fragmented to prepare it for the separation processes used subsequently. Hematite removal was performed using the high intensity, dry magnetic separation process, which allowed the recovery of a magnetic material which represents 3.6% of the mass of the processed sample. The elimination of quartz, for its part, was done by the flotation process which showed that the collector used, namely Triethanolamine  $C_6H_{15}NO_3$  does not give good results, since taking into account the consumptions used of this reagent, the recovery of feldspars in foam product did not exceed 10.25% of the initial mass of the treated sample.

**Keywords:** enhancing, feldspar ore, Ain Barbar, Hematite, quartz, mechanical preparation, flotation, magnetic separation.

## Résumé

Le but de ce travail est de valoriser le minerai du feldspath de la mine d'Ain Barbar, en réduisant sa teneur en oxyde de fer  $Fe_2O_3$  (hématite) et en quartz  $SiO_2$ , afin qu'il soit utilisable par l'industrie verrière et l'industrie céramique. La matière première a été concassée et fragmentée pour la préparer aux procédés de séparation utilisées par la suite. L'élimination d'hématite a été effectuée en utilisant le procédé de la séparation magnétique à haute intensité et à voix sèche, qui a permis la récupération d'une matière magnétique qui représente 3.6% de la masse de l'échantillon traité. L'élimination du quartz quant à elle, a été faite par le procédé de la flottation qui a montré que le collecteur utilisé, à savoir le Triéthanolamine  $C_6H_{15}NO_3$  ne donne pas de bons résultats, vu que compte tenu des consommations utilisées de ce réactif, la récupération des feldspaths en produit de mousse n'a pas dépassé les 10.25% de la masse initiale de l'échantillon traité.

**Mots clés :** valorisation, minerai du feldspath, AIN BARBAR, Hématite, quartz, préparation mécanique, flottation, séparation magnétique.

## Remerciements

On tient à remercier tout d'abord « ALLAH » le tout puissant.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire.

On tient à exprimer notre profonde reconnaissance à notre promoteur **M. MOUSSAOUI Elabas**, pour ses conseils et son aide et sa disponibilité tout au long de la préparation de ce travail.

Nos remerciements les plus vifs à **Pr. OUELD HAMOU Malek** et **Mlle. MERCHICHI Amira** pour leurs conseils et son aide au niveau de laboratoire, nous les remercions également d'avoir accepté de juger ce travail. C'est un honneur de les compter parmi le jury de ce travail.

Nos remerciements vont également aux enseignants du département Génie Minier qui ont contribué à notre formation.

Et en fin nos meilleurs remerciements à nos parents, nos frères et sœurs et nos amies qui nous ont encouragé et aidé pour réaliser ce travail.

Merci à toutes et tous

# Table des matières

Liste des tableaux .....	7
Liste des figures .....	8
Listes des abréviations .....	9
Introduction générale.....	12
<b>I. PARTIE THEORIQUE.....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre 01 : Généralités sur les feldspaths .....</b>	<b>15</b>
1.1 Définition .....	15
1.2 Composition chimique.....	15
1.3 Pétrographie et Géologie .....	16
1.4 Propriétés de reconnaissance.....	18
1.5 Exploitation .....	19
1.6 Utilisations.....	19
1.6.1 Domaine de céramique.....	19
1.6.2 Domaine d'industrie verrière .....	19
1.6.3 Dans les émaux et les frits .....	20
1.6.4 Autres usages .....	20
1.7 Production en Algérie.....	21
<b>Chapitre 02 : Feldspath de la mine d'Ain Barbar .....</b>	<b>23</b>
2.1 Introduction .....	23
2.2 Présentation de l'unité.....	23
2.2.1 Fiche technique .....	23
2.2.2 Organigramme.....	24
2.2.3 Historique.....	25
2.3 Gisement du feldspath.....	25
2.3.1 Localisation géographique.....	25
2.3.2 Géologie .....	25
2.3.2.1 Niveau régional.....	25
2.3.2.2 Niveau local .....	27
2.3.2.3 Minéralisation .....	28

2.4	Consistance du projet.....	29
2.4.1	Découverte.....	30
2.4.2	Extraction.....	30
2.4.3	Traitement.....	30
2.4.4	Commercialisation.....	31
<b>Chapitre 03 : Traitement et valorisation du feldspath .....</b>		<b>33</b>
3.1	Introduction .....	33
3.2	Traitement mécanique .....	33
3.3	Traitement physico-chimique.....	34
3.3.1	La séparation magnétique .....	34
3.3.1.1	Principe .....	34
3.3.1.2	Type de séparateurs magnétique .....	35
3.3.1.3	Méthode utilisée pour le feldspath .....	36
3.3.2	La séparation par flottation.....	36
3.3.2.1	Principe.....	36
3.3.2.2	Les réactifs chimiques utilisés en flottation.....	37
3.3.2.3	Les exigences aux réactifs de flottation .....	41
3.3.2.4	Application de la flottation sur le feldspath .....	41
3.3.3	Lixiviation .....	42
3.3.3.1	Objectif .....	42
3.3.3.2	Agents de lixiviation .....	42
3.3.3.3	Types de lixiviation .....	42
3.3.3.4	Opérations de lixiviation du feldspath.....	43
<b>II. PARTIE PRATIQUE .....</b>		<b>44</b>
<b>Chapitre 04 : Méthodes de traitement appliquées .....</b>		<b>46</b>
4.1	Introduction .....	46
4.2	Echantillonnage .....	47
4.2.1	Introduction .....	47
4.2.2	Échantillonnage primaire .....	47
4.3	Préparation mécanique .....	49
4.3.1	Introduction .....	49
4.3.2	Concassage primaire et secondaire.....	49
4.3.3	Homogénéisation et échantillonnage secondaire .....	50

4.3.4	Analyse granulométrique par tamisage.....	51
4.3.5	Etude de broyabilité .....	54
<b>4.4</b>	<b>Traitement par séparation Magnétique .....</b>	<b>59</b>
4.4.1	Introduction .....	59
4.4.2	Conditions opératoires .....	60
4.4.3	Résultats et interprétation .....	61
<b>4.5</b>	<b>Traitement par Flottation .....</b>	<b>62</b>
4.5.1	Introduction .....	62
4.5.2	Conditions opératoires .....	63
4.5.3	Résultats et interprétations.....	67
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>69</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>72</b>

## Liste des tableaux

<b><u>Tableau 01 : Propriétés de reconnaissance du Feldspath</u></b> .....	18
<b><u>Tableau 02 : Composition moyenne des verres silicatés calcosodiques</u></b> .....	20
<b><u>Tableau 03 : Répartition de certains minéraux selon leurs susceptibilités</u></b> .....	35
<b><u>Tableau 04 : Caractéristiques de la flottation assisté</u></b> .....	37
<b><u>Tableau 05 : Principaux collecteurs utilisés en industrie</u></b> .....	38
<b><u>Tableau 06 : Principaux déprimants utilisés en industrie</u></b> .....	39
<b><u>Tableau 07 : Principaux activants utilisés en industrie</u></b> .....	39
<b><u>Tableau 08 : Principaux régulateurs du milieu en industrie</u></b> .....	40
<b><u>Tableau 09 : Moussants utilisés en industrie</u></b> .....	40
<b><u>Tableau 10 : Principaux minéraux silicoaluminates séparés par flottation</u></b> ....	41
<b><u>Tableau 11 : Niveau topographique des tas de prélèvement</u></b> .....	47
<b><u>Tableau 12 : Résultats du tamisage après concassage</u></b> .....	52
<b><u>Tableau 13 : Résultats du broyage-essai 01 (15min)</u></b> .....	55
<b><u>Tableau 14 : Résultats du broyage-essai 02 (17min)</u></b> .....	56
<b><u>Tableau 15 : Résultats du broyage-essai 03 (24min)</u></b> .....	57
<b><u>Tableau 16 : Résultats du broyage-essai 04 (17min)</u></b> .....	58
<b><u>Tableau 17 : Paramètres tirés des essaies de broyage</u></b> .....	59
<b><u>Tableau 18 : Résultats des essais magnétiques</u></b> .....	61
<b><u>Tableau 19 : Consommation des réactifs</u></b> .....	64
<b><u>Tableau 20 : Protocole de la flottation</u></b> .....	65
<b><u>Tableau 21 : Résultats du traitement par flottation</u></b> .....	67

## Liste des figures

<b><u>Figure 01 : Diagramme triangulaire de la série des feldspaths à 900°C.....</u></b>	<b>16</b>
<b><u>Figure 02 : Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien....</u></b>	<b>27</b>
<b><u>Figure 03 : Principe de la séparation magnétique .....</u></b>	<b>34</b>
<b><u>Figure 04 : Principe de la flottation.....</u></b>	<b>37</b>
<b><u>Figure 05 : Mécanisme de fonctionnement des collecteurs .....</u></b>	<b>37</b>
<b><u>Figure 06 : Plan de traitement du minerai de Feldspath.....</u></b>	<b>46</b>
<b><u>Figure 07 : Plan topographique du gisement de feldspath.....</u></b>	<b>48</b>
<b><u>Figure 08 : Quelques photos des échantillons prélevés.....</u></b>	<b>48</b>
<b><u>Figure 09 : Concasseur à mâchoire LGM.....</u></b>	<b>49</b>
<b><u>Figure 10 : Concasseur giratoire LGM.....</u></b>	<b>50</b>
<b><u>Figure 11 : Principe d'échantillonnage par quartage.....</u></b>	<b>50</b>
<b><u>Figure 12 : Tamiseuse électrique LGM.....</u></b>	<b>51</b>
<b><u>Figure 13 : Courbe granulométrique du passant cumulé-concassage .....</u></b>	<b>53</b>
<b><u>Figure 14 : Broyeur à boulets en acier LGM.....</u></b>	<b>54</b>
<b><u>Figure 15 : Courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 01 .....</u></b>	<b>55</b>
<b><u>Figure 16 : Courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 02 .....</u></b>	<b>56</b>
<b><u>Figure 17 : Courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 03 .....</u></b>	<b>57</b>
<b><u>Figure 18 : Courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 04 .....</u></b>	<b>58</b>
<b><u>Figure 19 : Séparateur magnétique à haute intensité (électroaimant).....</u></b>	<b>60</b>
<b><u>Figure 20 : Séparateur magnétique à haute intensité par voie sèche LGM .....</u></b>	<b>60</b>
<b><u>Figure 21 : Résultats de la séparation magnétique-basse position .....</u></b>	<b>61</b>
<b><u>Figure 22 : Résultats de la séparation magnétique-haute position.....</u></b>	<b>62</b>
<b><u>Figure 23 : Cellule de flottation LGM.....</u></b>	<b>63</b>
<b><u>Figure 24 : Schéma de la flottation appliquée .....</u></b>	<b>66</b>

## Listes des abréviations

**ENP : Ecole Nationale Polytechnique**

**LGM : Laboratoire de Génie Minier.**

**ENOF : Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux.**

**SONAREM : Société Nationale de la Recherche et de la Géologie Minières.**

**SOFELD : Société des Feldspaths d'Algérie.**

**HSE : Hygiène et Sécurité Industrielle.**

**RH : Ressources Humaines.**

**APPR : Approvisionnement.**

**NNO : Nord Nord-Ouest.**

**T : Tonne.**

**g : gramme.**

**kg : kilogramme.**

**m : mètre.**

**mm : millimètre.**

**l : litre.**

**ml : millilitre.**

**w : watt.**

**h : heure.**

**Min : minute.**

**PH : Potentiel Hydrogène.**

**SMHI : Séparation magnétique à haute intensité.**

**UTM : Universal Transverse Mercator.**

**C<sub>C</sub> : Coefficient d'uniformité.**

**C<sub>U</sub> : Coefficient de courbure.**

**D<sub>i</sub> : Diamètre correspondant à i% du passant.**

**T<sub>b</sub> : Taux de broyabilité.**

**m<sub>R</sub> : Masse de refus.**

**m<sub>E</sub> : Masse de l'échantillon.**

**A : Ampère.**

**PCN : point de charge nul.**

**COL : Consommation du collecteur.**

**DEP : Consommation du déprimant.**

**L : Liquide.**

**S : Solide.**

**C : Concentration.**

**V : Volume.**

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

L'Algérie est considéré parmi les principaux pays producteurs de feldspath, qui trouve son application dans plusieurs industries, mais la majeure partie exploitée du feldspath au niveau mondial est destinée vers l'industrie céramique et verrière.

Mais, pour que le feldspath soit prêt à l'utilisation par ces industries, il doit répondre à certaines exigences de qualité. A cet effet nous devons appliquer un ensemble de procédés minéralurgiques qui visent à éliminer les impuretés non désirables pour enrichir le produit.

Dans ce présent mémoire, l'étude que nous proposons de mener à la demande de l'entreprise ENOF, concerne la valorisation du minerai feldspathique provenant du gisement d'AIN BARBAR par la séparation magnétique pour éliminer les oxydes du fer (Hématite) et par la flottation afin d'éliminer le quartz. Notre plan de travail est constitué par :

- Une Partie théorique composée de trois chapitres :
    - Généralités sur les feldspaths
    - Feldspath de la mine d'Ain Barbar
    - Traitement et valorisation du feldspath
  - Partie Pratique contenant un seul chapitre qui est consacré à la description des différentes méthodes de traitement appliquées
- Et à la fin nous avons clôturé notre travail par une conclusion générale.

# I.PARTIE

# THEORIQUE

# **CHAPITRE 01**

## GENERALITES SUR LES FELDSPATHS

## Chapitre 01 : Généralités sur les feldspaths

### 1.1 Définition

Le mot feldspath est d'origine allemand-suédois composé de deux termes : feld (champ ou terre cultivable) et spat (cristal). [1,2]

C'est un Minéral à base de silicate, d'aluminium et d'un métal alcalin ou alcalino-terreux, qui entre dans la composition d'un grand nombre de roches cristallines et que l'on utilise dans l'industrie de la céramique et du verre. [3]

### 1.2 Composition chimique

Les feldspaths appartiennent à la classe chimique des tectosilicates caractérisés par un assemblage tridimensionnel de tétraèdre  $\text{SiO}_4$  et  $\text{AlO}_4$  dont l'équilibre de charge est assuré par l'adjonction de cations alcalins ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) ou alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$  plus rarement  $\text{Ba}^{2+}$ ). Leur composition chimique permet de distinguer deux sous-groupes :

- Feldspaths alcalins : s'étendent d'un pôle potassique ( $\text{K} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ) à un pôle sodique ( $\text{Na} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ). Ils constituent une série discontinue polymorphe avec une lacune de miscibilité à basse et à moyenne température. L'orthoclase et le microcline potassiques, sont les variétés les plus fréquentes, dont l'orthoclase est monoclinique tandis que le microcline est triclinique.
- Plagioclases : s'étendent d'un pôle sodique « l'albite » ( $\text{Na} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ), à un pôle calcique « l'anorthite » ( $\text{Ca}^{2+} [\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ ), qui constituent donc une série continue isomorphe triclinique. Entre ces deux pôles se trouve une variété de minéraux dont l'oligoclase, l'andésine, la labradorite et la bytownite. Ces minéraux sont définis par leur teneur en sodium. [4]

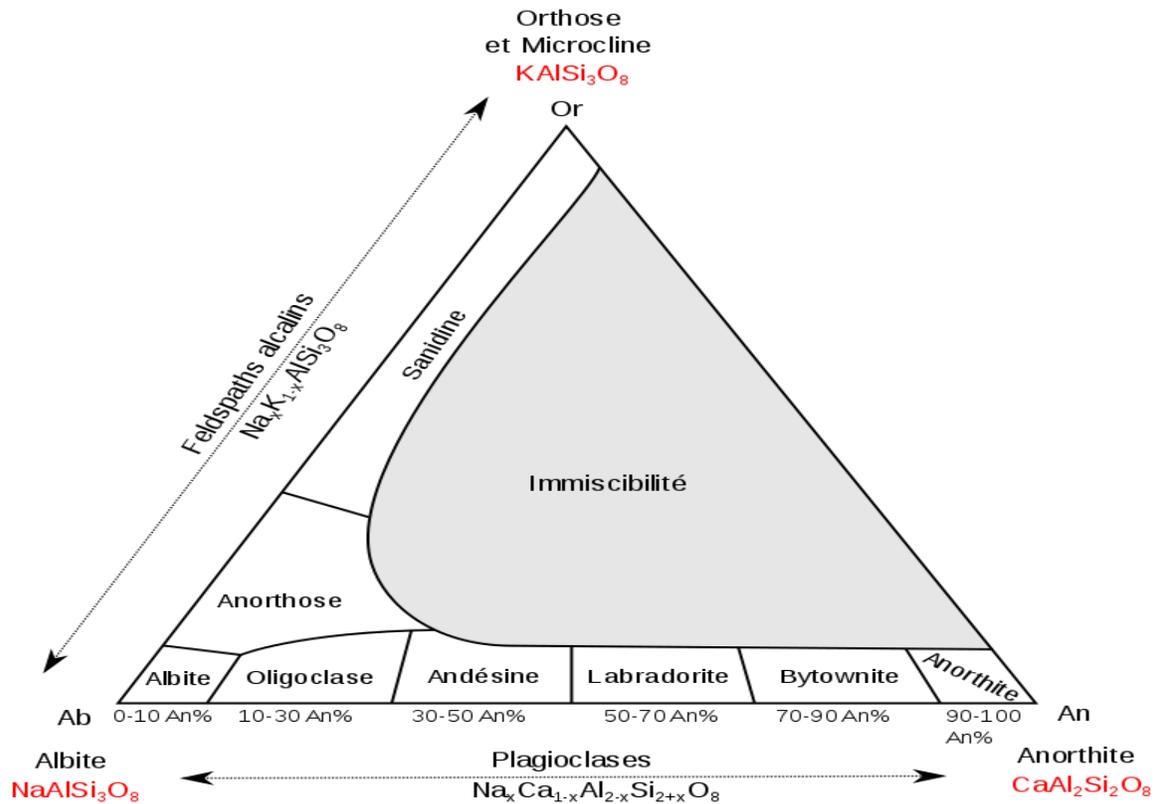


Figure 01 : Diagramme triangulaire de la série des feldspaths à 900°C. [5]

### 1.3 Pétrographie et Géologie

Les feldspaths forment le groupe des minéraux les plus abondants de la croûte terrestre [6], Constituants majeurs des roches magmatiques et de nombreuses roches métamorphiques, mais moins abondants dans les roches sédimentaires à cause de leur faible résistance superficielle à l'altération. [4]

En combinaison avec d'autres minéraux, les feldspaths alcalins (et particulièrement potassiques dont notamment l'orthose) participent à la composition minéralogique modale des roches plutôt acides, telles les syénites et les granites (grenues), ou les trachytes et les rhyolites (microlithiques). Les plagioclases participent quant à eux à la composition minéralogique modale des roches basiques comme les diorites, les gabbros, ou les andésites et les basaltes (microlithiques). [7]

Les roches ignées susceptibles de constituer une source de feldspath pour l'industrie sont en général des roches leucocrates de la famille des granites (leucogranite alcalin, pegmatite, aplite, rhyolite) dépourvues en minéraux ferromagnésiens. Ces roches sont caractérisées par un assemblage de quartz, feldspath alcalin (albite, microcline, orthose) fréquemment accompagné par des micas alumineux (muscovite, lépidolite). La teneur en fer dans ces roches est généralement faible et est associée à des minéraux accessoires parfois présents (biotite, grenat, tourmaline). [8]

Il y a deux catégories principales de gisements riches en feldspaths, on distingue :

- Les gites primaires : constitués par des roches en place dont le feldspath est le constituant dominant et parfois unique des pegmatites, souvent composés de cristaux géants (décimétriques). Elles forment des filons, des amas ou de petits massifs entourant des massifs granitiques. Les pegmatites sont de deux types :
  - Des pegmatites simples : sous forme de filons, composés presque uniquement de microcline et de quartz.
  - Des pegmatites composées : contenant de l'albite et de nombreux autres minéraux en plus : micas, spodumène, tourmaline. Ces pegmatites se trouvent sous forme des amas pouvant atteindre plusieurs kilomètres en longueur et plusieurs centaines de mètres en largeur.
- Les gites secondaires : constitués par des dépôts détritiques (sables alluviaux ou de plage) contenant une fraction suffisante du feldspath, et une autre kaolinique plus ou moins importante. Ces sables proviennent de la décomposition de roches feldspathiques diverses (comme le granite) qui ont été altérés, érodés et transportés. [9]

## 1.4 Propriétés de reconnaissance

Tableau 01 : Propriétés de reconnaissance du Feldspath [10]

<b>Densité</b>	2.5 à 2.8
<b>Dureté [échelle de Mohs]</b>	6 à 6.5
<b>Résistance aux chocs (ténacité)</b>	Fragile
<b>Résistance à la chaleur</b>	Bonne en général Infusible ou presque
<b>Réactions aux acides</b>	Insoluble sauf dans l'acide fluorhydrique
<b>Observations</b>	Le sodium colore la flamme en jaune et le calcium colore la flamme en rouge-brique
<b>Couleur</b>	Variable, incolore, blanc, rose, vert, bleu, marron, rougeâtre
<b>Couleur du trait</b>	Blanc
<b>Eclat</b>	Vitreux, terne, nacré sur les plans de clivage
<b>Structure</b>	Lamelleuse
<b>Système cristallin</b>	Monoclinique ou triclinique
<b>Clivage</b>	Uniforme (parfait)
<b>Cassure</b>	Conchoïdale, irrégulière
<b>Indice de réfraction (IR)</b>	1,513 à 1,590
<b>Magnétisme</b>	Aucun
<b>Radioactivité</b>	Aucune

## 1.5 Exploitation

L'extraction des feldspaths s'effectuent le plus souvent en souterrain et rarement à ciel ouvert. Les méthodes et les matériels utilisés sont adaptés aux caractéristiques du gisement concerné par l'exploitation.

D'un point de vue économique, seules les roches dans lesquelles les feldspaths se présentent sous la forme de très gros cristaux (la séparation des grains très petites devient difficile économiquement [9]) ou celles contenant très peu d'impuretés nocives comme les minéraux ferrifères (l'oxyde de fer peut colorer le verre et entraîner des problèmes de production lors de la fabrication du verre incolore [11]) sont utilisables.

D'autre part, seuls les feldspaths alcalins avec  $K_2O > 10\%$  et les feldspaths sodiques avec  $Na_2O > 7\%$  sont recherchés dans le secteur industriel [12].

L'abattage se fait généralement par explosif, vu la dureté du feldspath. Les tirs contribuent à la fragmentation des roches, et la fragmentation contribue à la libération des minéraux.

## 1.6 Utilisations

### 1.6.1 Domaine de céramique [13]

Le feldspath potassique trouve une très large gamme d'utilisation dans l'industrie céramique. Deux utilisations sont courantes, à savoir :

- Il est mélangé avec des argiles plastiques ou kaoliniques à granulométries fines pour obtenir des pâtes céramiques ;
- Il est incorporé dans un mélange pour émail (Silice, Talc, Kaolin...).

### 1.6.2 Domaine d'industrie verrière [14]

Les proportions des diverses matières employées dépendent dans une large mesure du type de verre produit. Les feldspaths ont un rôle à la fois de fondant (apport de Na et K), de stabilisant (apport d' $Al_2O_3$ ) et de colorants en fonction de leur teneur en fer. Des notions de coût des mélanges interfèrent avec celles de rendements des fours. La composition moyenne des verres silicatés calcosodiques, qui représentent le type le plus répandu (80 %) dans l'emballage, le verre plat et le flaconnage est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 02 : Composition moyenne des verres silicatés calcosodiques

Composition	Pourcentage
SiO <sub>2</sub>	72 %
Na <sub>2</sub> O	13 %
CaO	11 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 %
MgO	1 %
K <sub>2</sub> O	0,5 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03 à 0,5 % selon la couleur

L'usage développé de verre recyclé sous forme de calcin tend à réduire la consommation de matières premières, dont le feldspath. L'industrie verrière représente actuellement 25 à 30% de la consommation mondiale de feldspaths.

### 1.6.3 Dans les émaux et les frits [14]

Les frits sont un composite de sable et feldspath principalement ayant subi une opération de fusion incomplète donnant des granulats vitreux recristallisés destinés à l'émaillage.

- Le feldspath potassique est utilisé, de façon très courante dans le domaine des émaux céramiques. Par rapport au feldspath sodique, le feldspath potassique permet la production d'émaux plus résistants et qui ont moins tendance à former des écailles.
- Le feldspath sodique a l'avantage d'abaisser un peu plus la température de fusion d'un composite, que ne le fait le feldspath potassique. Ce dernier offre une meilleure homogénéité d'un composite à la fusion.

### 1.6.4 Autres usages [14]

Les feldspaths sont également utilisés en petite quantité dans un grand nombre d'industries, à savoir :

- Charge dans les caoutchoucs, les plastiques et peintures ;
- Abrasif doux dans certains savons et poudres à récurer ;
- Liant dans les réfractaires, vérification des meules, ...etc.
- Enrobage des baguettes pour soudure à l'arc ;
- Poudre de couverture, en sidérurgie sur les coulées continues ;
- Amendements siliceux et potassique pour les orthoclases ;
- Dans les isolants électriques, engrais, bijouteries, etc.

## **1.7 Production en Algérie**

Actuellement, il y a une seule mine active dans le secteur publique qui s'occupe de l'extraction et le traitement du feldspath qui est la mine de Ain Barbar à Annaba, l'une des filiales de l'entreprise algérienne ENOF.

Le type du feldspath qu'elle produit est le feldspath potassique (Orthose), avec une capacité de production de l'ordre de 60000 tonne/an et un prix unitaire variant entre 1200DA/tonne et 1900DA/tonne suivant la granulométrie du feldspath produit, donc selon sa destination ultérieure (céramique, verre...). [15]

En novembre 2020, cette unité a exporté 4500 tonnes de feldspath vers la Tunisie par voie maritime en un temps record. Ce qui confirme que l'ENOF contribue au développement économique, en diversifiant le revenu national par le biais des ressources minérales, qui représentent une alternative réelle aux hydrocarbures. [16]

# **CHAPITRE 02**

**FELDSPATH DE LA MINE**

**D'AIN BARBAR**

## Chapitre 02 : Feldspath de la mine d'Ain Barbar [17]

### 2.1 Introduction

L'unité d'Ain Barbar fait partie des unités substances utiles du groupe ENOF (Entreprise Nationale des Produits Miniers Non ferreux et des Substances Utiles).

L'ENOF est né en 1983 de la restructuration organique de la SONAREM (Société Nationale de la Recherche et de la Géologie Minières) créée en 1967.

L'ENOF a hérité de tout le patrimoine restant du secteur minier. Le patrimoine actuel se compose de 21 unités réparties sur tout le Nord du Territoire National.

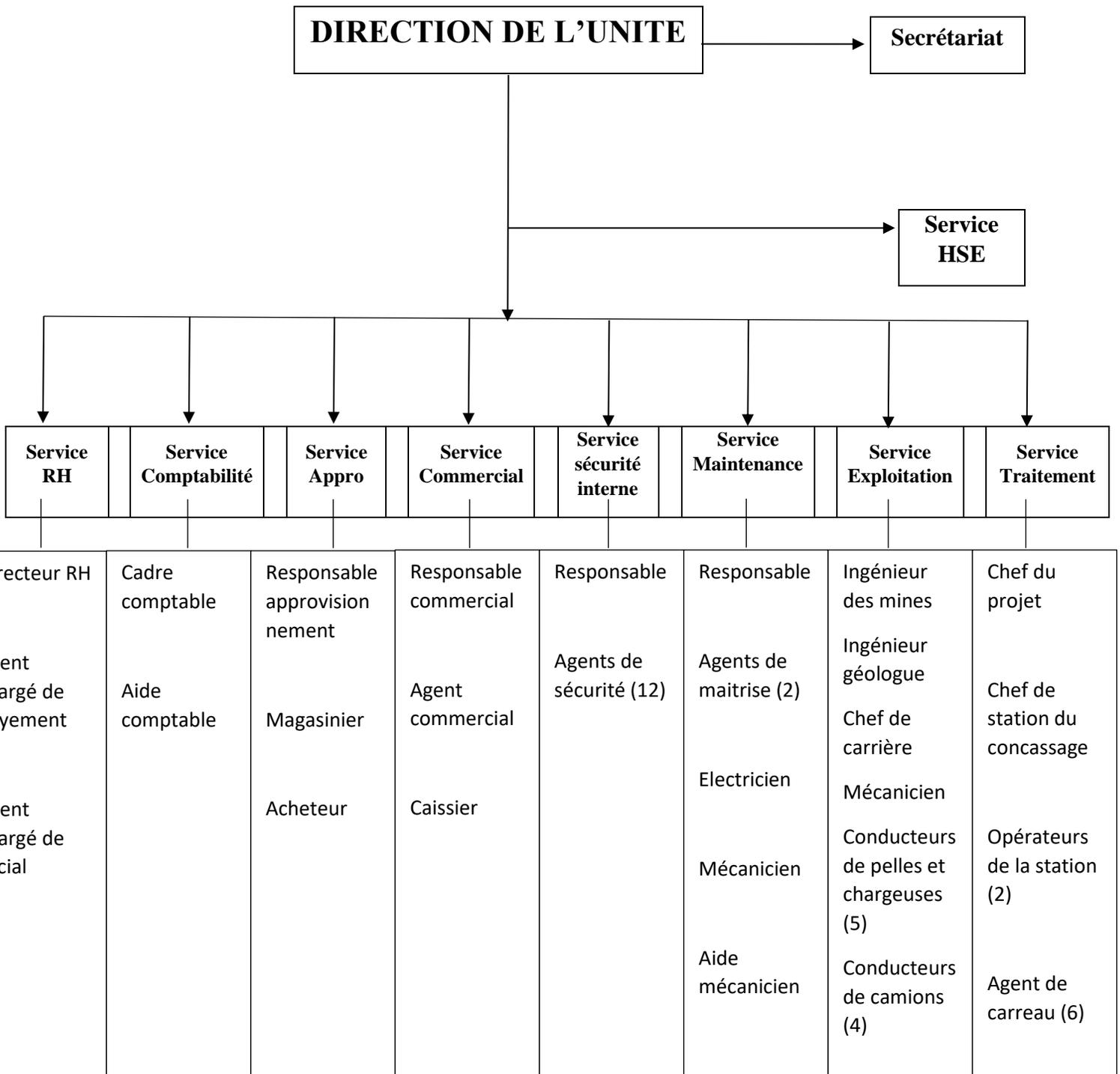
### 2.2 Présentation de l'unité

#### 2.2.1 Fiche technique

- Dénomination : ENOF unité Ain Barbar
- Tutelle : Ministère des industries et des mines.
- Statut juridique : Société par action.
- Capital social de l'entreprise ENOF : 1100.000.000 DA.
- Minerai exploité : Feldspath
- Effectif total : 59 dont :
  - 17 cadres.
  - 5 agents de maîtrise.
  - 37 agents d'exécution.
- Localisation : Route de l'Hôtel Seraidi Wilaya de Annaba.
- Mail : [enofainbarbar@gmail.com](mailto:enofainbarbar@gmail.com)
- Fixe : (+213) 038 47 35 68
- Mobile : (0213) 661 44 14 31

**2.2.2 Organigramme**

L'objectif principal de l'existence de l'organigramme de n'importe quelle entreprise, est de faciliter la procédure de distribution des différentes tâches entre les directions et les services.



### 2.2.3 Historique

Le gisement du feldspath d'AIN BARBAR a été mis en évidence par la division recherche SONAREM en 1974-1976, qui a fait la première évaluation des réserves de ce gisement, et les travaux préparatoires d'ouverture de la mine ont commencé en 1979. La mine a démarré en 1987 après la fermeture de la mine de (Cuivre -Plomb - Zinc) en 1984.

La mine de feldspath d'Ain-Barbar a fonctionnée jusqu'en 1995 et a été arrêtée pour des raisons sécuritaires. Initialement unité de l'ENOF, elle a été érigée en filiale SOFELD, qui a été dissoute au début des années 2000. Ceci a entraîné la liquidation de son patrimoine industriel, notamment la vente des matériels de la carrière et de l'installation de traitement (installation de concassage, criblage et broyage).

Le projet de réouverture de la mine a été inscrit dans le plan quinquennal 2012/2017 de l'entreprise ENOF. Il a prévu l'ouverture de la mine et l'installation d'une nouvelle unité de traitement d'une capacité de 60 000 T/an de produit finis destinés au marché local, éventuellement à l'exportation.

## 2.3 Gisement du feldspath

### 2.3.1 Localisation géographique

La région d'Ain Barbar est située dans la partie septentrionale du massif de l'Edough, à une distance de 35Km au Nord-Ouest de la ville d'Annaba. Elle est limitée au Nord par la méditerranée et au Sud par une série de dépressions, au Sud-Est par Djebel Boukantas et au Nord-Ouest par les reliefs de Djebel Chétaibi.

### 2.3.2 Géologie

#### 2.3.2.1 Niveau régional

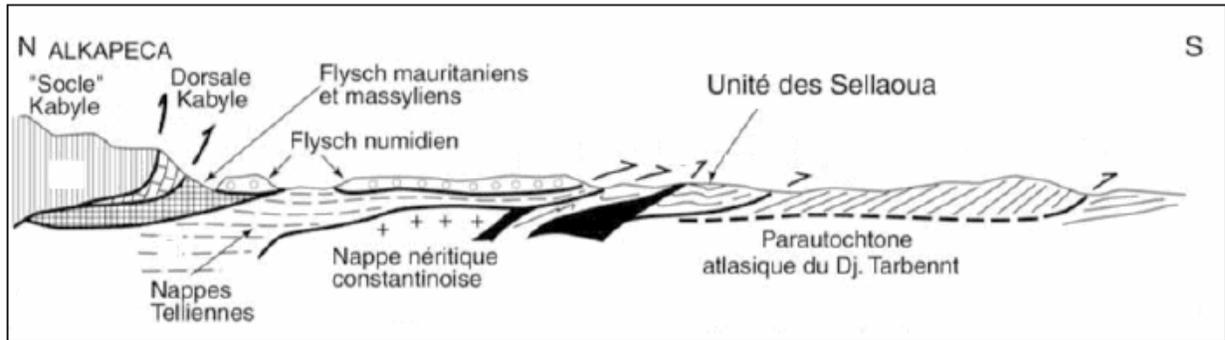
La chaîne alpine de l'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogénèse alpin périméditerranéen d'âge Tertiaire.

Dans ce domaine on distingue classiquement les zones internes, situées à l'intérieur et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne et les zones externes situées à sa périphérie.

Le domaine de la chaîne des Maghrébines a connu des phases de déformations méso-cénozoïques aboutissant à la mise en place de nappes de charriages ; ceci est le domaine des nappes ou domaine allochtone.

La chaîne des Maghrébines, dans la zone comprise entre Annaba et Skikda, montre du nord au sud les domaines suivants :

- Un domaine interne appelé aussi socle kabyle ou Kabylide : il est composé par de massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et par un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique. Du côté sud, un contact anormal sépare la Dorsale kabyle du domaine des flysch. Les formations du domaine interne chevauchent le domaine des flysch et le domaine externe tellien.
- Le domaine des flyschs : est constitué par des nappes de flysch créacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de longueur, entre Mostaganem et Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités. On distingue du Nord au Sud deux grands groupes de flysch, les flysch mauritaniens et les flysch massyliens auxquels s'ajoute un troisième groupe de flysch plus récent, les flysch numidiens d'âge Oligocène supérieur – Burdigalien inférieur. Les flysch mauritaniens sont relativement épais et occupent une position interne dans le domaine des flysch. Ils sont composés par une alternance de bancs argileux, calcaires et gréseux. Les flysch massyliens occupent une position externe dans le domaine des flysch et comportent une série périto-quartzitique d'âge Crétacé inférieur surmontée par une série périto-micro-bréchique d'âge Crétacé supérieur. Les flysch numidiens sont constitués par de niveaux gréseux d'âge Oligocène terminal–Aquitainien épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites versicolores oligocènes. Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes.
- Un domaine externe ou Domaine Tellien : constitué par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud. Dans la zone située entre Annaba et de Skikda, à la base des unités non métamorphiques du Domaine Tellien, un massif cristallin métamorphique est exposé (Massif de l'Edough). Le massif de l'Edough s'élève brutalement au-dessus de la mer et des plaines environnantes jusqu'à plus de mille mètres (1000m). Il est constitué par un empilement de plusieurs unités métamorphiques (gneiss œillés, migmatites, micaschistes, marbre) qui forment un dôme de foliation allongé selon la direction NE-SO.



**Figure 02 : Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien [17]**

### 2.3.2.2 Niveau local

La zone d'étude se situe dans le domaine des Maghrébides extérieures près de contact tectonique qui le soumet aux unités Maghrébides intérieures, représentées dans la zone par le Massif cristallin de la Petite Kabylie.

Les Maghrébides extérieures sont représentées, dans la zone de Annaba, par un massif cristallin (Edough Massif, Unité Tellien) qui est couvert tectoniquement par des sédiments de mer profonde d'Age créacée (Flysch "Massyliens"), à son tour recouvert par les sédiments turbiditiques de l'Oligocène-Miocène (Flysch Numidique).

Dans la zone du gisement affleurent les dépôts du Flysch numidique de l'Oligo-Miocène ; ils sont superposés aux dépôts du Crétacé du Flysch "Massyliens". Le Flysch Massylien a son tour est coupé par des dykes microgranithiques et rhyolitiques-felsiques ; ces derniers représentent le gisement objet du rapport.

### 2.3.2.3 Minéralisation

Le gisement de feldspath est représenté par un dyke rhyolitique long 2.200 m et large en moyenne 15 m, qui plonge d'environ 60° vers NNO. Les données structurelles collectées sur le terrain permettent de dire que le dyke se met en place sur une faille normale qui a enregistré du mouvement quand le dyke n'était pas encore complètement solidifié, en fait, la stratification magmatique du dyke présente un développement cohérent à celui d'une faille normale plongeant vers NNO. En général, la structure et la texture du corps rhyolitique sont très constantes ; on remarque une légère diminution de la taille des grains dans les premiers 50 cm, en contact avec la roche encaissante. Localement des petits filons feldspathiques parallèles au corps principal ont été observés, ceux-ci ont une épaisseur variable de 1 à 2 m.

La roche a une composition minéralogique suffisamment homogène, dominée par le feldspath potassique (de 51% à 53%) et le quartz (de 39% à 40%). Les minéraux secondaires sont : feldspath calcique, biotite, séricite, zircon, hématite et hydroxydes de fer. La teneur en feldspath sodique est insignifiante, en fait, les analyses chimiques montrent un taux élevé de K O (entre 27% et 41%). Le contenu en Fe<sub>2</sub>O varie de 0,08% à 2,60% mais dans la plupart des échantillons analysés par SONAREM (1976) est au-dessous de 1%. Le poids spécifique de feldspath est 2,31 t/m<sup>3</sup>.

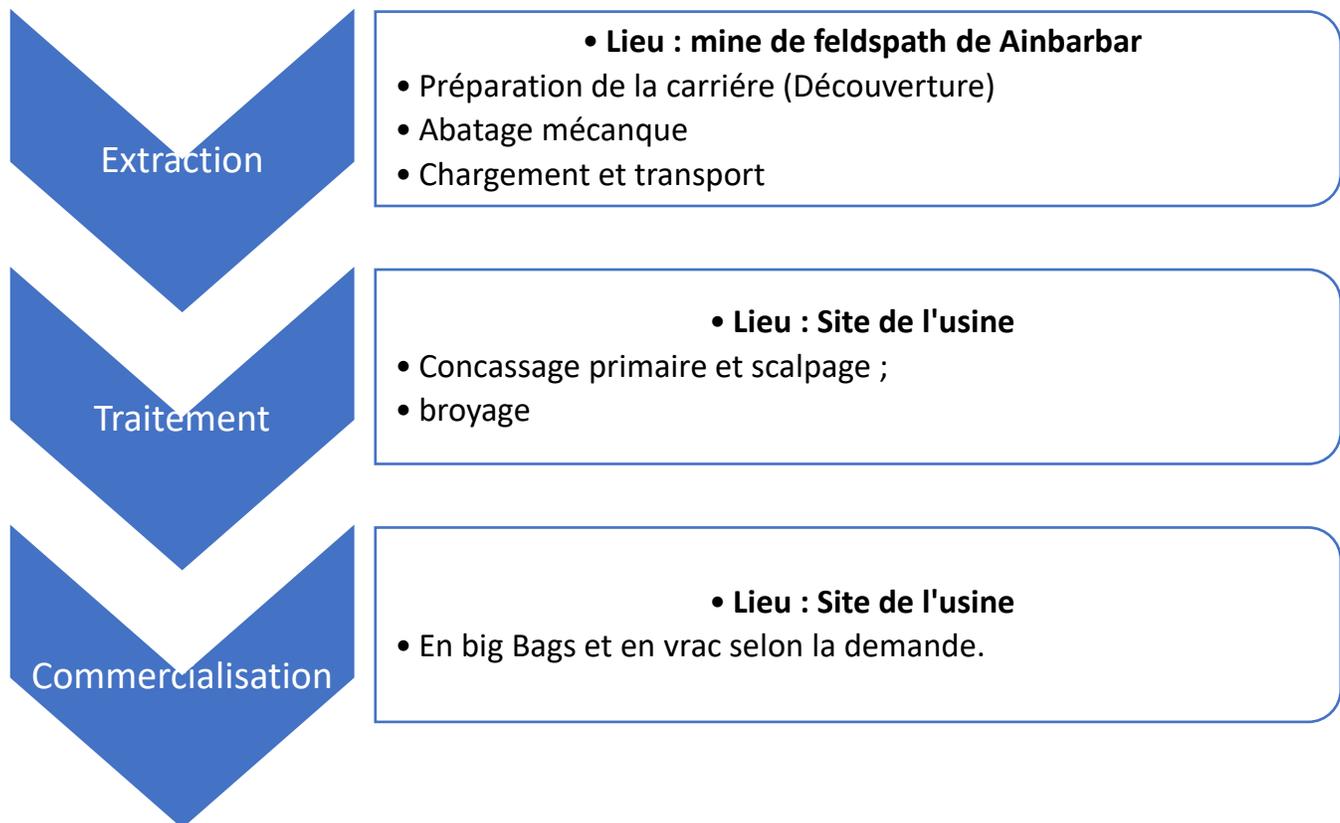
D'après les données de l'analyse minéralogique effectuée par l'entreprise SOFELD, le feldspath d'Ain Barbar est composé de :

Minéral	Pourcentage (%)
Albite	2.52
Anorthite	0.18
Orthose	58.21
Quartz	33.49
Phyllite	3.8
Apatite	0.47

## 2.4 Consistance du projet

Le projet consiste à l'extraction, le transport et le traitement du minerai de feldspath qui est destinée principalement à l'industrie notamment les industries céramiques et le verre. Le schéma synoptique du projet se présente comme suit :

Le schéma synoptique du projet se présente comme suit :



### 2.4.1 Découverte

L'abatage de stérile se fera par un bulldozer et pelle excavatrice. Pour une extraction de 112340 m<sup>3</sup>/an avec 230 jours ouvrables, soit 224 680 T/an. Cette capacité exigera la mobilisation des équipements suivant :

- 01 un bulldozer d'une capacité de 7m<sup>3</sup> (lame =1.69x3.94m) pour l'abatage et terrassement.
- 01 pelle excavatrice de 4 m<sup>3</sup> ou 02 à 2m<sup>3</sup> pour l'abatage de stérile.
- 01 Chargeur de 4 m<sup>3</sup> pour le chargement de stérile
- 02 Camion à benne de à 30T pour le transport.

### 2.4.2 Extraction

L'abatage de minerai sera réalisé avec un brise roche monté sur pelle en première phase dont l'avantage réside dans l'absence des complications et tracasseries liées à l'utilisation de l'explosif. Pour une capacité d'extraction de 66 000 T/an avec 230 jours ouvrables, l'extraction journalière sera de l'ordre de 287 T/jour. Cette capacité exigera la mobilisation des équipements suivant :

- 02 brise roche montés sur une pelle de 5T monté sur (02) pelles de 40T, avec un rendement de 43T/h soit 300T/J, qui servira à l'abatage de minerai et au débitage des hors gabarits.
- 01 Chargeur à godet de 2 m<sup>3</sup> chargement de minerai.
- 01 camion à benne de 20T pour le transport de tout-venant.

### 2.4.3 Traitement

Le minerai extrait est transporté par le camion vers l'usine de traitement, où il subit les différents procédés de préparation mécanique.

- Partie concassage : L'installation se compose d'un grand espace pour le stockage du feldspath tout venant ( $\pm$  600mm) provenant de la carrière; par l'intermédiaire d'une excavatrice le matériau est introduit dans un grand trémie équipée avec un extracteur qui décale-pousse le matériau au-dessus d'une puissante grille de dégrossissage dont les espaces permettent un tamisage primaire pour éliminer le petit calibre (<60 mm) ainsi que des impuretés et des contaminations qui sont ensuite enlevées latéralement à travers une bande.

Le tout-venant continu à descendre vers la bouche du grand concasseur primaire dont les mâchoires divisent les rochers massifs. Le matériau obtenu, définie de grande taille (<160 mm), tombe au-dessus d'une bande transporteuse, sur laquelle est disposé un séparateur de fer qui élimine toute contamination ferreuse. Le flux de matériau est ensuite transféré à la seconde station de concassage appelé Moulin secondaire : c'est ici que le flux est soumis à l'écrasement à bascule circulaire. La substance qui en dérive, appelé taille moyenne (<25 mm), est déplacé par d'autres bandes à la partie broyage.

- Partie broyage et séparation : Elle correspond au broyeur finisseur. L'objectif de cette ligne est de broyer le produit provenant de la ligne de concassage par un processus de compression réglé automatiquement afin d'obtenir un produit granulé fin homogène (<2 mm). Cette partie peut être géré de manière directe ou indirecte : direct lorsqu'on exclue le stockage intermédiaire et le flux passe de la ligne de concassage à la trémie d'alimentation du département ; indirect lorsque le matériau est déposé en tas et rechargé en ligne avec l'excavatrice, ce qui permet les opérations de manutention, mis en place plus fréquemment que dans les autres départements, sans bloquer les lignes précédentes. La force de broyage peut être adaptée à l'aptitude au broyage du feldspath traité. Le produit passe à un crible vibrant de haute efficacité pour séparer les fractions commercialisables. 0-700 $\mu$  0-3 mm et 700-3000 $\mu$ .

#### 2.4.4 Commercialisation

Enfin le feldspath traité est vendu pour le secteur de la céramique relatif aux carreaux, aux sanitaires, à la vaisselle ainsi que pour celui du verre.

Dans la production des mélanges pour la céramique, la structure typique est généralement composée comme il suit : 40% en argile, 10% en sables et 50% en feldspaths.

Sachant que la production algérienne en 2009, dans le seul secteur des carreaux en céramique, a atteint 30 millions de mètres carrés et supposant que moins de la moitié correspond à des produits en grès, la demande de feldspaths s'élève à environ 140.000 tonnes par an.

Dans le secteur du verre, le feldspath est utilisé en tant que substitut du quartz comme composante d'importance essentiel : ce matériel arrive dans ce cas-ci à englober plus de la moitié de la production. Par rapport aux feldspaths, ce secteur en consomme dans le seul territoire algérien plus de 100.000 tonnes par an.

**CHAPITRE 03**  
TRAITEMENT ET  
VALORISATION DU FELDSPATH

## Chapitre 03 : Traitement et valorisation du feldspath

### 3.1 Introduction

Le traitement minéralurgique varie suivant la nature du minerai et les applications industrielles envisagées. Dans la plupart des cas, il consiste en réductions granulométriques (concassage, criblage, broyage et classification).

Dans certains cas, ces procédés de fragmentation peuvent être complétés par des opérations ayant pour objectif d'épurer et/ou d'enrichir le minerai afin d'obtenir les spécifications physico-chimiques requises par l'application. Parmi les traitements les plus courants, il y a :

- ✓ La séparation magnétique.
- ✓ La flottation.
- ✓ La lixiviation.

### 3.2 Traitement mécanique [8]

La première étape comprend un concassage primaire réalisé avec des concasseurs à mâchoires ou à percussion.

L'étape suivante est le gravillonnage (concassage secondaire) à l'aide de concasseurs giratoires ou à axe vertical. Ces opérations de concassage sont associées à un criblage pour bien vérifier la granulométrie du produit concassé.

Le produit gravillonné entre 5 et 10 mm peut être directement vendu aux industries du carrelage, qui procède au broyage final après mélange avec l'argile.

Les sables (0,1-1 mm) obtenus par criblage peuvent être directement utilisés dans les industries céramiques et verrières.

Le broyage associé à une classification est souvent l'étape finale de fragmentation. Il est réalisé dans des broyeurs à boulets. La classification se fait aux moyens de tamis, des sélecteurs à air, statiques ou dynamiques ou de cyclones.

L'industrie du sanitaire, la vaisselle, les émaux et les frites nécessitent des produits broyés à 60 ou 80  $\mu\text{m}$ .

Le broyage ultrafin, ou micronisation, est destiné à l'obtention de poudres inférieures à 25  $\mu\text{m}$ , destinées aux charges minérales.

### 3.3 Traitement physico-chimique

#### 3.3.1 La séparation magnétique

##### 3.3.1.1 Principe [18]

La séparation magnétique exploite les propriétés magnétiques des matériaux afin d'effectuer leur séparation. La susceptibilité magnétique est la propriété d'un matériau qui détermine son comportement dans un champ magnétique. À partir de cette propriété, les matériaux peuvent être divisés en trois classes. La première classe est composée des matériaux ferromagnétiques dont la susceptibilité magnétique est très forte. La deuxième classe comporte des matériaux paramagnétiques qui présentent une susceptibilité magnétique faible. La troisième classe est constituée des matériaux diamagnétiques possédant une susceptibilité nulle.

La séparation magnétique est accomplie par entraînement des matériaux susceptibles lors de leur passage à travers un champ magnétique. Ce dernier peut être produit à l'aide d'un aimant permanent ou d'un électroaimant. L'utilisation des électroaimants comporte plusieurs avantages dont la possibilité d'ajuster l'intensité du champ magnétique en variant l'intensité du courant électrique.

De plus, le champ magnétique produit par les électroaimants peut atteindre une intensité plus élevée que l'intensité d'un champ engendré par des aimants permanents. La grosseur et la masse volumique des particules ou morceaux devant être séparés influencent le traitement. La séparation des grosses particules denses requiert un champ magnétique plus intense que la séparation des petites particules légères.

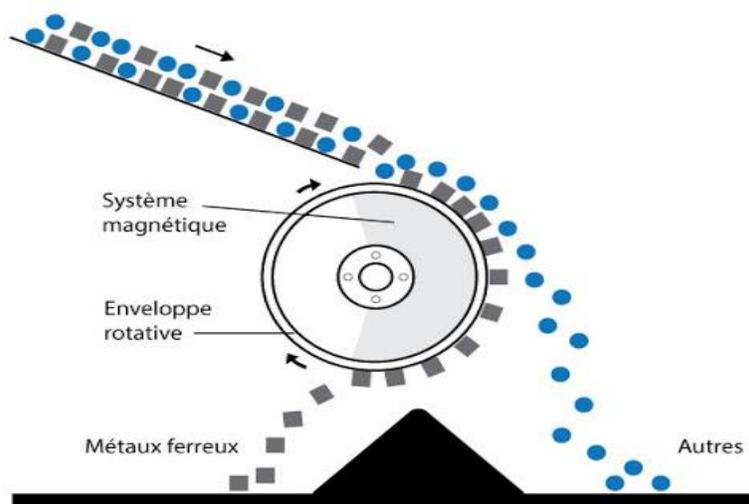


Figure 03 : principe de la séparation magnétique

Tableau 03 : Répartition de certains minéraux selon leurs susceptibilités [19]

Minerai	Susceptibilité $\gamma$ en $\left(\frac{10^{-6}m^3}{kg}\right)$	Minerai	Susceptibilité $\gamma$ en $\left(\frac{10^{-6}m^3}{kg}\right)$
Pyrite	0,004 à 0,013	Ilménite	0,2 à 1,5
Chalcopyrite	0,011 à 0,055	Magnésite	- 4,83
Sphalérite	- 3,27	Calcite	- 4,80
Molybdénite	- 6,05	Anhydrite	- 4,47
Argentite	- 3,71	Gypse	- 5,33
Cinabre	- 2,99	Barytine	- 3,84
Galène	- 4,40	Nickéline	0,005 à 0,011
Cuprite	- 1,76	Olivine	0,11 à 1,26
Zincite	- 4,29	Orthopyroxène	0,04 à 0,92
Cassitérite	- 2,83	Monopyroxène	0,08 à 0,80
Magnétique	0,36 à 0,50	Biotite	0,05 à 0,98
Chromite	0,32 à 0,38	Grenat	0,14 à 0,95
Limonite	0,25 à 0,76	Dioptase	0,106 à 0,111
Rutile	0,012 à 0,05	Garniérite	0,38 à 0,39

### 3.3.1.2 Type de séparateurs magnétique [17]

Il existe deux catégories d'équipements de séparation magnétique : les séparateurs à haute intensité et les séparateurs à basse intensité. Chaque catégorie peut être divisée en deux, soit les séparateurs humides et les séparateurs à sec. Les séparateurs à basse intensité sont utilisés pour séparer les matériaux ferromagnétiques et certains matériaux paramagnétiques hautement susceptibles.

Les séparateurs à haute intensité présentent des coûts d'achat et d'opération très élevés. En effet, la production d'un champ magnétique intense entraîne une consommation élevée d'électricité. La valeur des minerais traités par cette méthode justifie de tels coûts.

La séparation en voie humide est généralement employée chaque fois que la granulométrie du produit à traiter devient fine et que la séparation en voie sèche devient inopérante du fait de la gêne créée par l'attraction électrostatique entre les particules, ou que le produit à traiter est déjà sous forme de pulpe minérale.

Quant à la granulométrie des particules pour la l'alimentation du séparateur magnétique, elle est comprise dans l'intervalle [0.1mm-1mm] pour la séparation à basse intensité, et [0.06mm-0.6mm] à haute intensité. Donc on prend l'intervalle moyenne qui est [0.08mm-0.8mm]. [20]

### 3.3.1.3 Méthode utilisée pour le feldspath [8]

La séparation magnétique à haute intensité (SMHI) est utilisée pour éliminer les minéraux colorants contenant Fe, Ti, Mn et Mg. Dans la pratique cette séparation est réalisée en deux étapes :

La première, en basse intensité, permet d'éliminer la fraction la plus magnétique (magnétite, hématite, goéthite, ilménite et oxydes de Mn), puis la haute intensité pour traiter la fraction paramagnétique (biotite, muscovite, tourmaline, grenats, pyroxènes, amphiboles et chlorites).

Les rotors à aimants permanents remplacent de plus en plus les séparateurs électriques à rouleaux induits. La SMHI convient bien aux applications verrières et constitue une étape de purification importante pour la céramique et les charges. En revanche, il n'est pas possible d'éliminer des phases colorantes peu magnétiques (épidote, sphène, anatase).

## 3.3.2 La séparation par flottation

### 3.3.2.1 Principe [21]

La flottation est un procédé physico-chimique de concentration, utilisée pour séparer les particules solides ou liquides (phase dispersée) d'une phase liquide (phase continue). Le principe repose sur la capture de corps en suspension dans une pulpe à traiter, par des bulles d'air grâce à l'intervention des réactifs chimiques connus sous l'appellation des collecteurs qui sont capables de rendre sélectivement les minéraux hydrophobes. Ces réactifs comportent tous un groupement polaire permettant leurs adsorptions sélectives à la surface des minéraux par création des liaisons physiques ou chimiques. Ils possèdent également une chaîne hydrocarbonée hydrophobe qui permet à l'ensemble adsorbat-adsorbant de s'accrocher à une bulle d'air. Si les particules mises en contact avec les bulles sont captées par ces dernières, elles peuvent monter à la surface de la cellule, où ces agglomérats sont retenus dans une mousse qui est ensuite évacuée du procédé par déverse ou raclage. La séparation peut être sélective. Ce procédé fait appel à la différence de masse volumique entre les deux phases en présence. Plusieurs cas peuvent être distingués :

- **Flottation naturelle** : La masse volumique de la phase dispersée est nettement inférieure à celle de la phase continue, la séparation, qui s'effectue automatiquement.
- **Flottation assistée** : La masse volumique de la phase dispersée est légèrement inférieure à celle de la phase continue, la flottation est dite assistée, puisque des moyens extérieurs doivent être mis en œuvre pour améliorer la séparation.

Tableau 04 : Caractéristiques de la flottation assisté

Débit d'air utilisée $\text{l.m}^{-3}$	Taille des bulles (mm)	Puissance absorbée $\text{Wh.m}^{-3}$	Temps théorique de Séjours(min)
100 à 400	2 à 5	5 à 10	5 à 10

- **Flottation provoquée** : la masse volumique de la phase dispersée, à l'origine supérieure à celle de la phase continue, est artificiellement réduite, la flottation est dite provoquée. La qualité de la flottation provoquée dépend surtout des interactions physico chimiques et hydrodynamiques entre les trois phases solides, liquide, gaz.

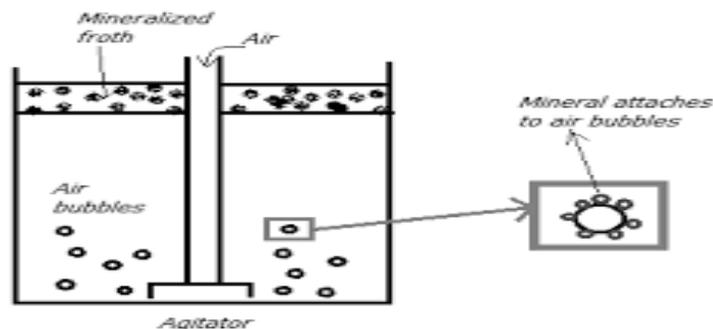


Figure 04 : principe de la flottation

### 3.3.2.2 Les réactifs chimiques utilisés en flottation [22]

- Le collecteur : est un agent chimique qui se lie de manière sélective à la surface des minéraux ciblés et confère une propriété hydrophobe aux particules minérales, qui est une condition nécessaire à l'attachement des bulles d'air. La molécule du collecteur doit comprendre d'un côté une partie non polaire pour assurer l'hydrophobie de la surface et de l'autre côté, une partie polaire pour se fixer sur a surface des minéraux.

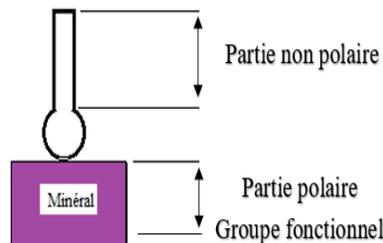


Figure 05 : Mécanisme de fonctionnement des collecteurs

Tableau 05 : Principaux collecteurs utilisés en industrie

Collecteurs utilisés	Minéraux (minerais)
Hydrocarbures <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kérosène, produits de pétrole</li> <li>- Kérosène, produits de pétrole</li> <li>- Kérosène et les huiles des hydrocarbures</li> <li>- Kérosène</li> <li>- Hydrocarbure liquide</li> </ul>	1/ minerais à haute flottabilité naturelle <ul style="list-style-type: none"> <li>- Minerai de soufre</li> <li>- Minerai de graphite</li> <li>- Minerai de charbon</li> <li>- Talc (<math>Mg_3(OH)_2(S_{14}O_{10})</math>)</li> <li>- Minerai de molybdène : Molybdénite <math>MoS_2</math></li> </ul>
Xanthates	2/ Métaux purs (Au, Ag) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuivre (Cu)</li> </ul>
Xanthates  Xanthates ou Aerfloats -----//-----    ---//---- Xanthates ou Aerfloats	3/Minerais sulfurés ---//----- cuivre sulfurés (Chalcopyrite $CuFeS_2$ , Chalcosine $Cu_2S$ , Bornite $Cu_5FeS_4$ , Covelline $CuS$ ) Minerais de plomb (Galénite $PbS$ ) Minerais de zinc (blende $ZnS$ ) Minerai de mercure (Cinabre $HgS$ )
Collecteur anionique : acide oléique et ses sels  -----//-----//-----//-----	4/ Minerais sulfureux oxydés (minéraux secondaires) Minerai oxydé de plomb (cérosite $PbCO_3$ , anglésite $PbSO_4$ )
Acide oléique et ses sels Collecteur cationique : Amines	5/Minerais de phosphate et d'apatite Matières premières chimiques Quartz-Kaolin...
Alkyl-sulfates ou acide oléique et ses sels	6/ Minerai de baryte
Alkyl-sulfates ou Alkyl-sulfonates	7/ Minerais de fer (Hématite, Sidérite...)
Acide oléique et ses sels	8/ Minerais de manganèse (pyrolite, manganite)

- Les déprimants : sont utilisées pour rendre hydrophiles les phases minérales qu'on ne veut pas flotter. Ils jouent un rôle important lors de la flottation sélective des minéraux qui ont les propriétés de flottation proches. Les minéraux qui se rapportent à la même classe (Minéraux sulfureux par exemple) flottent avec le même collecteur. L'utilisation de déprimant permet d'augmenter la sélectivité de l'action du collecteur aux minéraux appartenant à la même classe.

**Tableau 06 : Principaux déprimants utilisés en industrie**

Déprimants utilisés	Minéraux (minerais)
Alcalis [Ca (OH) <sub>2</sub> , NaOH]	1/ les sulfures contenant le fer
Cyanures [KCN, NaCN, Ca (CN) <sub>2</sub> ]	2/ les sulfures de fer et la blende (ZnS)
Sulfate de zinc [ZnSO <sub>4</sub> 7h <sub>2</sub> O]	3/la blende
Sulfure de sodium [Na <sub>2</sub> S]	4/ tous les sulfures, sauf la molybdénite (MoS <sub>2</sub> )
Les bichromates de potassium k <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) et de sodium (Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	5/ la galénite
Sel [H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ]	6/ la blende et la pyrite
Phosphate de sodium Na <sub>3</sub> Po <sub>4</sub> 11H <sub>2</sub> O	7/ le calcaire et l'apatite [Ca <sub>5</sub> (Po <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F]
Verre liquide	8/ les minerais au silicium

- Les activants : modifient la surface des minéraux de valeur afin de les rendre actifs avant l'ajout de collecteur. Il y a deux mécanises d'action des collecteurs :
  - 1- La formation sur la surface du minéral d'une combinaison superficielle qui active la surface du minéral à flotter.
  - 2- La dissolution de la couche hydrophile superficielle.

**Tableau 07 : Principaux activants utilisés en industrie**

Activants utilisés	Minéraux (minerais)
CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O	La blende
Na <sub>2</sub> S, K <sub>2</sub> S, CaS (sulfures)	Les minéraux oxydés

- Les régulateurs du milieu : leur fonction est la régulation du PH de la pulpe et l'élimination des schlamms. Donc ils influencent indirectement sur la flottabilité des minéraux, en changeant la composition ionique de la pulpe, qui déterminent l'action des réactifs (collecteurs, déprimants, activateurs) réagissant directement sur la flottabilité.

Tableau 08 : Principaux régulateurs du milieu en industrie

Régulateur du Ph	Dispersant	Coagulateur
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → milieu acide NaOH/Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> → milieu basique ou alcalin	Verre liquide → augmente l'hydrophilie des schlamms pour qu'ils ne collent aux bulles d'aires	Amidon polyacrylamide → augmente la dimension des schlamms pour qu'ils ne collent pas à la surface des minéraux

- Les moussants : Sont des réactifs organiques hétéro-polaires, c'est-à-dire qu'une extrémité de la molécule est polaire et hydrophile, et l'autre est non polaire et hydrophobe. Ils contribuent à la création d'une mousse stable, en augmentant la surface de séparation gaz-liquide, sur laquelle les minéraux se fixent. Cette surface dépend de deux principaux paramètres, qui sont le débit d'air passant à travers la cellule de flottation et les dimensions des bulles d'air. Les différents rôles du moussant sont :
  1. La diminution de la dimension moyenne des bulles d'air
  2. La diminution de la vitesse d'ascension des bulles d'air.
  3. L'augmentation de la solidité de la mousse.

Tableau 09 : Moussants utilisés en industrie

Moussants utilisés	Minéraux (minerais)
Moussants agissant sélectivement → qui ne possède pas l'action du collecteur : -Crésol CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> OH (alcool) -Cycloneosanol (Alcool cyclique)	Minerais polymétalliques
Moussants agissant non sélectivement → Possédant l'action de collecteur : -huile de pain (alcool aromatique)	Autres minerais

### 3.3.2.3 Les exigences aux réactifs de flottation [22]

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

### 3.3.2.4 Application de la flottation sur le feldspath [8]

La flottation permet de concentrer les feldspaths par élimination de la fraction quartzeuse dans les minerais à quartz comme les granitoïdes, pegmatites et arkoses. Dans ce cas l'acide fluorhydrique est employé classiquement pour déprimer le quartz, les feldspaths étant flottés avec un collecteur cationique, puis des amines pour une séparation des plagioclases et des orthoclases. Des solutions sans HF, très nocif, sont activement mises au point. Pour les minerais sans quartz, la flottation est plus classique car il s'agit d'éliminer les oxydes colorants (hématite, goethite, rutile) et/ou les micas et autres silicates ferromagnésiens dans un contexte moins agressif. Le broyage en voie humide jusqu'à la maille de libération des minéraux et la présence d'ultrafines qui nécessite le déschlammage du minerai induisent des coûts qui ne peuvent être compensés que par des utilisations à haute valeur ajoutée (frites, émaux, verre blanc).

**Tableau 10 : Principaux minéraux silicoaluminates séparés par flottation [23]**

Minéraux	Formule chimique
Orthose	$K(Si_3Al)O_8$
Albite	$Na(Si_3Al)O_8$
Néphéline	$Na_3KAl_4Si_4O_{16}$
Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
Muscovite	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$
Phlogopite	$KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$
Biotite	$K(Mg,Fe)_3(OH,F)_2(Si_3AlO_{10})$
Lépidolite	$K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$
Andalousite	$Al_2SiO_5$

### 3.3.3 Lixiviation

#### 3.3.3.1 Objectif [24]

La lixiviation consiste à mettre en solution, sous forme ionique, le ou les métaux recherchés. Le but est de déterminer le type de lixiviat optimal en termes de consommation et de coût de réactif, de solubilisation minimale d'impuretés et d'entretien du matériel.

#### 3.3.3.2 Agents de lixiviation [24]

En fonction du métal à extraire et du solide à traiter (impuretés présentes), différentes solutions de lixiviation peuvent être employées, comme :

- L'eau.
- Les acides.
- La soude.
- Des complexes.
- Des solutions oxydantes.
- Des solutions bactériennes.

#### 3.3.3.3 Types de lixiviation [24]

La lixiviation peut être réalisée de quatre manières différentes en fonction de critères tels que les conditions opératoires ou encore les coûts d'investissement :

- Lixiviation in situ : employée pour le traitement des minerais de cuivre à très basse teneur. Elle s'applique directement au minerai en place sans opération d'extraction ou de transport. Pour cela, il est nécessaire que le minerai soit très fragmenté pour assurer une surface de contact importante et qu'il soit isolé du réseau hydrographique pour empêcher toute contamination de ce dernier.
- Lixiviation en tas : Le principe est le même que celui de la lixiviation in situ, mais cette fois, le minerai est extrait, concassé et mis en tas sur un sol étanche muni d'un système de collecte des eaux d'infiltration.
- Lixiviation en réacteur agité : Cette technique est la plus employée dans le cadre du traitement de minerais riches ou de déchets. Le solide, sous forme pulvérulente, est mis en suspension dans la solution de lixiviation. La densité de pulpe est fonction du solide traité, du type de solution employé et de l'agitation qui permet d'accélérer le processus.
- Lixiviation en autoclave : Elle permet de travailler à une température d'ébullition supérieure à celle obtenue à pression atmosphérique, ce qui a pour effet d'améliorer la cinétique et les phénomènes de transfert.

### 3.3.3.4 Opérations de lixiviation du feldspath [25]

- a- Par addition d'hydrosulfite de sodium :** le principe consiste à extraire le fer par une lixiviation sélective à une température ambiante, en pulpe acide de  $\text{PH} \approx 2.2$ . L'hydrosulfite de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) est utilisé comme agent réducteur de  $\text{Fe}^{3+}$ , ce qui permet d'augmenter la solubilité du fer en milieu acide. Pour réaliser cette étape, on utilise un réacteur agité en verre équipé d'un couvercle non-étanche portant une sonde à résistance de platine pour le contrôle de la température, d'une électrode combinée pour la mesure du PH et d'une électrode de platine pour la mesure du potentiel d'oxydoréduction E Pt-Ag/AgCl. Au terme de la lixiviation, la pulpe est centrifugée ou filtrée, puis lavée par une solution aqueuse contenant  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dosé à 2Kg/t pour déplacer la solution ferreuse résiduelle.
- b- Lixiviation en pulpe acide chauffée :** la lixiviation se fait dans un réacteur agité à double paroi, équipé d'un condensateur pour minimiser l'évaporation. La pulpe est de 60% de solide, avec une température du milieu de  $90^\circ\text{C}$  ; la pulpe est acidifiée par addition d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) pour garder le PH à 0.85. La durée de lixiviation est de 60min. La lixiviation acide à chaud conduit à des performances d'épuration insuffisantes. Le procédé apparaît comme peu intéressant du fait du chauffage de la pulpe et des problèmes soulevés par des effluents fortement acides.
- c- Lixiviation par attaque acide :** elle s'effectue en deux procédés :
- **Attaque nitrique :** la lixiviation s'exécute dans un réacteur agité, équipé d'un couvercle muni d'un condensateur pour limiter l'évaporation de la solution d'attaque, constituée par un mélange de  $\text{HNO}_3$  et de bifluorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{F}$ , HF) à raison de 95 parties pondérales d'acide pur et 5 parties de bifluorure. Au terme de l'attaque, la pulpe acide est centrifugée, le solide résiduel est lavé par apports d'eau suivis de centrifugations (5 lavages) successives.
  - **Attaque sulfo-phosphorique :** l'attaque se fait dans une nacelle de platine, de volume utile  $65 \text{ cm}^3$ , chauffée par une plaque en céramique régulée en température ; la température étant comprise entre  $250$  et  $300^\circ\text{C}$ . Le produit de l'attaque phosphorique est repris par de l'eau et la pulpe centrifugée pour séparer la solution du résidu solide.

Dans la partie pratique, on va se limiter par la séparation magnétique et par la flottation, vu que les réactifs chimiques utilisés en lixiviation sont très chers, donc le coût de revient va être important par rapport au prix de vente du feldspath, ce qui n'est pas rentable.

# II. PARTIE PRATIQUE

# **CHAPITRE 04**

## METHODES DE TRAITEMENT APPLIQUEES

## Chapitre 04 : Méthodes de traitement appliquées

### 4.1 Introduction

Notre travail pratique consiste à faire dans un premier lieu un plan d'échantillonnage tenant compte des paramètres géométriques, quantitatifs et qualitatifs du gisement, des paramètres qui ont été tirés des études antérieures sur le site objet de notre étude.

Une fois l'échantillonnage effectué, nous avons commencé par la préparation mécanique afin de réduire les dimensions des roches à la granulométrie souhaitée et nécessaire pour effectuer les essais d'enrichissement prévus, à savoir la séparation magnétique et la flottation.

L'objectif de ce travail est d'interpréter les résultats des essais au laboratoire pour proposer la meilleure combinaison des paramètres des essais d'enrichissement appliqués.

Le plan présenté ci-dessous résume tous les procédés minéralurgiques qu'on a effectué durant la partie pratique.

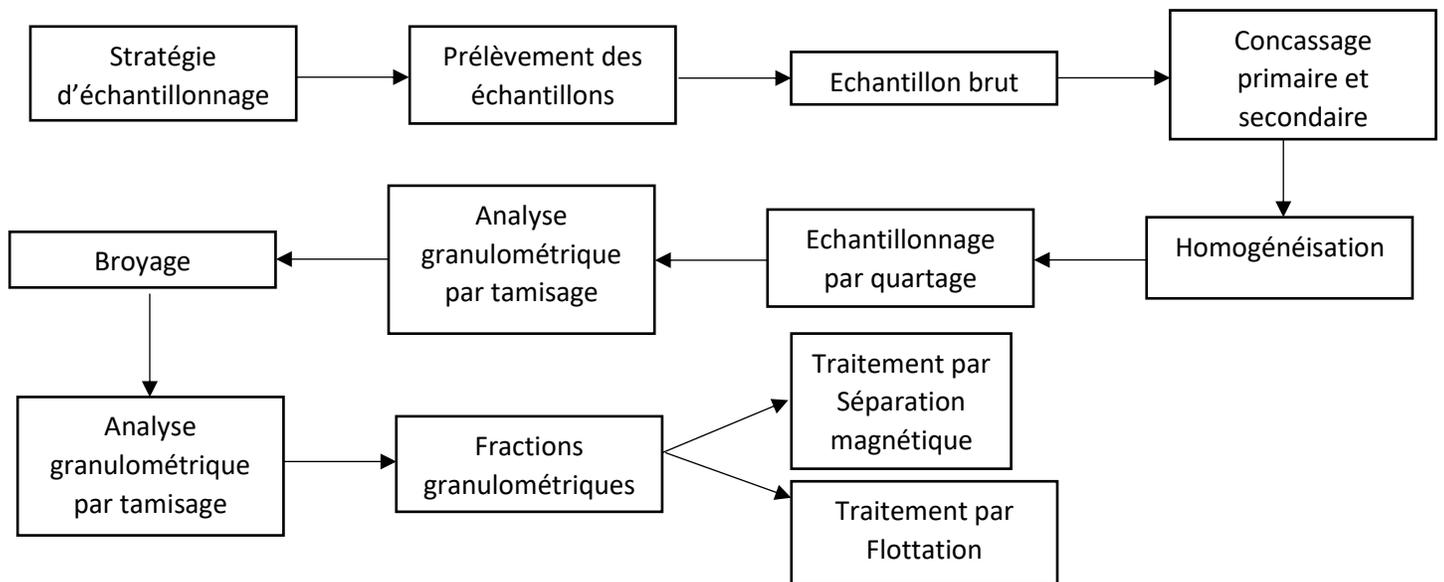


Figure 06 : plan de traitement du minéral de Feldspath

## 4.2 Echantillonnage

### 4.2.1 Introduction

L'objectif de l'échantillonnage au sens strict est la réduction non destructive de la masse. Cette réduction ne peut résulter que de la sélection d'un sous-ensemble d'éléments constitutifs (fragments, molécules, ions) qui doivent être représentatifs ; c'est-à-dire ayant des caractéristiques qui soient le plus possible identiques à celles de l'ensemble totale appelé par la population. On distingue deux types d'échantillonnage :

- Echantillonnage primaire « prélèvement ».
- Echantillonnage secondaire « partage ».

### 4.2.2 Échantillonnage primaire

La stratégie de prélèvement repose essentiellement sur le volume et le nombre des échantillons ainsi que sur le choix des stations d'échantillonnage. La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont effectués. Le choix de l'équipement utilisé pour prélever les échantillons est principalement effectué en fonction du type d'échantillon sec, liquide ou gaz, du volume requis et de la localisation du minerai.

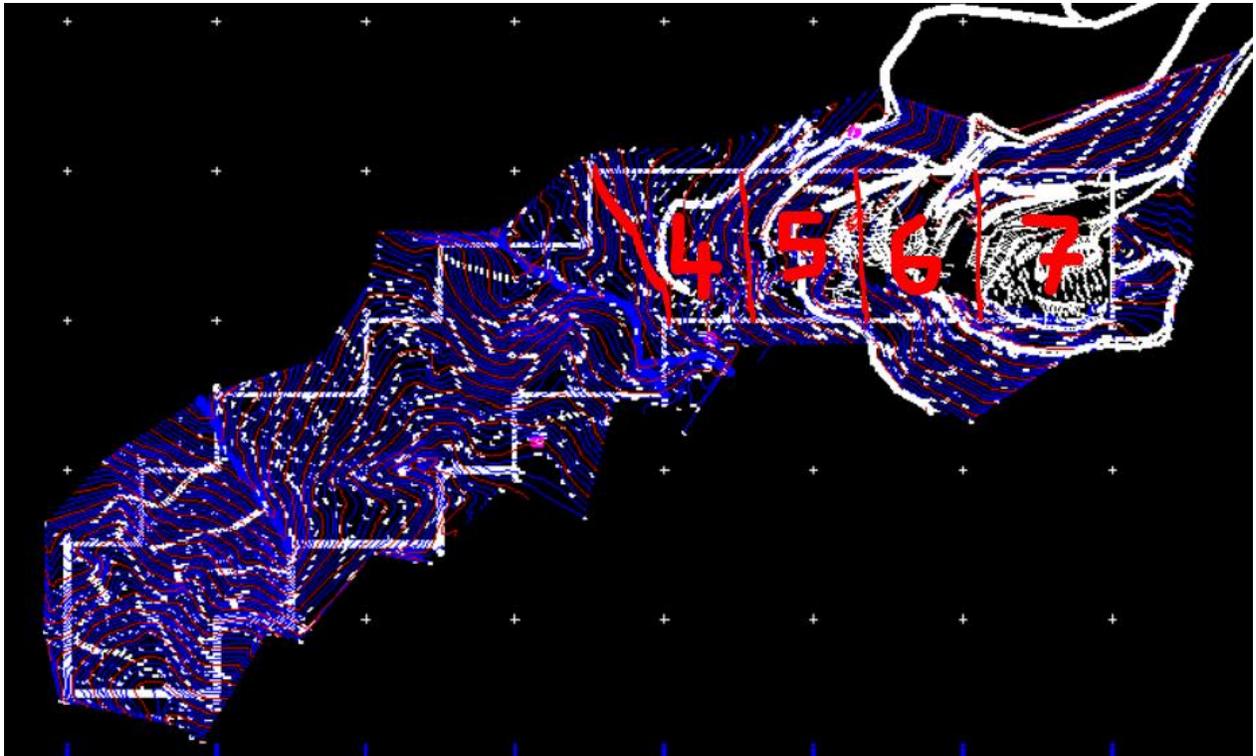
Le gisement du feldspath de Ain Barbar est un filon rhyolitique qui a été divisé par une série de failles en 7 blocs, numérotés par le rapport de SONAREM 1976 de l'ouest à l'est (bloc1-bloc7). La figure 08 montre un plan topographique du gisement établi par l'ENOF en utilisant le logiciel de COVADIS.

Au cours de notre stage pratique, on a prélevé à la main quelques échantillons du feldspath de quatre blocs différents (4,5,6,7). Les blocs 1,2 et 3 ne sont pas encore exploités et il n'y a même pas une piste d'accès à ces blocs.

Pour chacun des quatre blocs, les échantillons ont été prélevés à partir de plusieurs points issus du tas abattus. Le tableau suivant montre le niveau topographique où se trouve chaque tas.

**Tableau 11 : Niveau topographique des tas de prélèvement**

Emplacement du Tas	Niveau topographique [m]
Bloc 4	390
Bloc 5	510
Bloc 6	570
Bloc 7	640



**Figure 07 : Plan topographique du gisement de feldspath**



**Figure 08 : Quelques photos des échantillons du feldspath prélevés**

## 4.3 Préparation mécanique

### 4.3.1 Introduction

La minéralurgie ou le traitement des minerais, est la science qui étudie les techniques ayant pour objet d'enrichir un minerai, donc d'éliminer du celui-ci la plus grande part possible de gangue(refus) qui y est présente, avant de récupérer la substance utile. La première étape Pour arriver à cet objectif est de préparer le minerai mécaniquement. Cette préparation regroupe l'ensemble des opérations de comminution ou de fragmentation qui consiste en la réduction des blocs du minerai extraits d'un gisement à l'aide de concasseurs qui fonctionnent avec des cribles, et à l'aide des broyeurs fonctionnant avec des classificateurs.

### 4.3.2 Concassage primaire et secondaire

Le concassage primaire a été effectué à l'aide un concasseur à mâchoire du LGM, ce concasseur permet de réduire la taille de l'échantillon du feldspath d'une granulométrie de 200mm jusqu'à l'obtention d'une granulométrie de 20mm.



**Figure 09 : concasseur à mâchoire LGM**

Le concassage secondaire a été effectuer à l'aide d'un concasseur giratoire du LGM. Ce concasseur permet de réduire encore la taille granulométrique en passant 20mm jusqu'à 3mm.



Figure 10 : concasseur giratoire LGM

### 4.3.3 Homogénéisation et échantillonnage secondaire

Les échantillons concassés ont été mélangés dans un seul sac, puis homogénéisés selon le protocole suivant :

- 1- Verser le mélange sur un tapis en nylon.
- 2- Faire mobiliser les 4 coins du tapis 6 fois alternativement.

Maintenant que notre échantillon est homogène sous forme d'un tas conique, on passe à l'échantillonnage secondaire. La technique de partage qu'on a choisi d'adopter est le quartage qui est manuelle et simple à appliquer. C'est la plus ancienne méthode d'échantillonnage. Les étapes sont les suivantes :

- 1- Tasser ou étaler l'échantillon à l'aide d'une pelle en forme de galette.
- 2- Diviser cette galette en quatre portions égales (quarts).
- 3- Prendre 3 portions, chacun est réservé aux méthodes de valorisation qu'on a cité dans la partie théorique. Etant donnée qu'on n'a pas effectué la lixiviation.
- 4- Former une nouvelle galette avec le quadrant restant et répéter la division.
- 5- Cette fois ci, on prend deux quadrants opposés pour l'étude de broyabilité. 1 quadrant comme un échantillon témoin, et le quadrant qui reste pour la caractérisation de notre échantillon.



Figure 11 : principe d'échantillonnage par quartage

#### 4.3.4 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un échantillon.

Cette analyse a été effectuée sur 1Kg du produit obtenu par concassage des roches contenant le feldspath, par une tamiseuse électrique de type Retsch AS200 (Figure 12), sur laquelle des tamis sont superposés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures décroissent du haut vers le bas. Le diamètre du premier tamis en haut, est choisi de telle sorte que le pourcentage de refus doit être < 5%. Ensuite le classement des grains s'obtient par une combinaison des mouvements vibratoires horizontaux et des secousses verticales de cette tamiseuse.

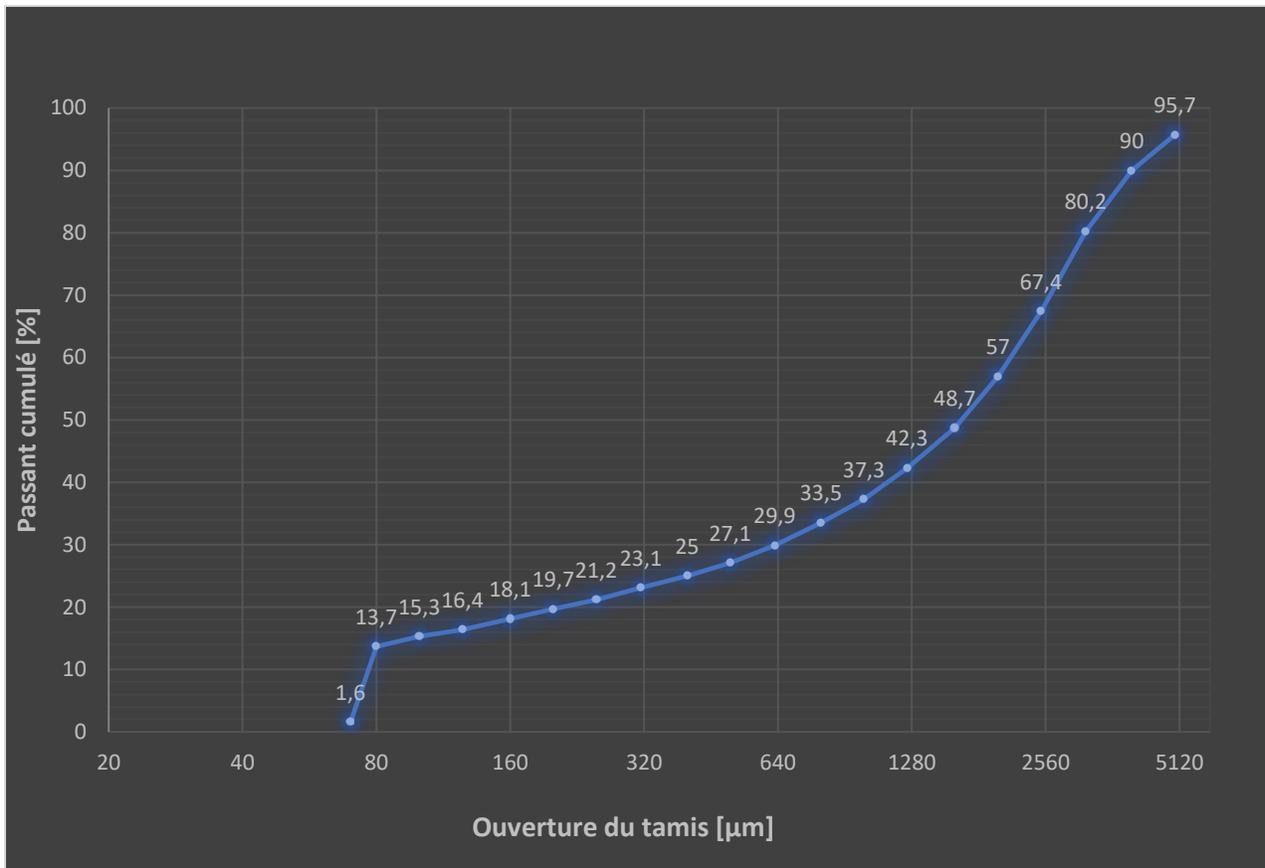
La série des tamis utilisés, ainsi que les résultats de pesage des refus/passants des tamis sont désignés dans le Tableau 12.



Figure 12 : tamiseuse électrique LGM

Tableau 12 : Résultats du tamisage après concassage

Ouverture du tamis [ $\mu\text{m}$ ]	Refus		Passant		Refus cumulé		Passant cumulé	
	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %
5000	43	4.3	957	95.7	43	4.3	957	95.7
4000	57	5.7	943	94.3	100	10	900	90.0
3150	98	9.8	902	90.2	198	19.8	802	80.2
2500	128	12.8	872	87.2	326	32.6	674	67.4
2000	104	10.4	896	89.6	430	43	570	57
1600	83	8.3	917	91.7	513	51.3	487	48.7
1250	64	6.4	936	93.6	577	57.7	423	42.3
1000	50	5.0	950	95.0	627	62.7	373	37.3
800	38	3.8	962	96.2	665	66.5	335	33.5
630	36	3.6	964	96.4	701	70.1	299	29.9
500	28	2.8	972	97.2	729	72.9	271	27.1
400	21	2.1	979	97.9	750	75	250	25
315	19	1.9	981	98.1	769	76.9	231	23.1
250	19	1.9	981	98.1	788	78.8	212	21.2
200	15	1.5	985	98.5	803	80.3	197	19.7
160	16	1.6	984	98.4	819	81.9	181	18.1
125	17	1.7	983	98.3	836	83.6	164	16.4
100	11	1.1	989	98.9	847	84.7	153	15.3
80	16	1.6	984	98.4	863	86.3	137	13.7
< 80	121	12.1	879	87.9	984	98.4	16	1.6



**Figure 13 : courbe granulométrique du passant cumulé-concassage**

Cette courbe granulométrique représente le pourcentage du passant cumulé après les procédés de concassage en fonction des diamètres des tamis.

L'interprétation nécessite le calcul de deux coefficients permettant de caractériser la granulométrie de notre échantillon.

- **Le coefficient d'uniformité** : permet d'exprimer l'étalement de la courbe

$$\text{granulométrique : } C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2125}{77} = 27.6$$

- **Le coefficient de courbure** : permet de décrire la forme de la courbe

$$\text{granulométrique : } C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} = \frac{640^2}{2.125 \cdot 77} = 2.5$$

Avec  $D_i$  : diamètre du tamis correspondant à  $i\%$  du passant cumulé.

On remarque que :

$20 < C_u < 200 \Rightarrow$  granulométrie étalée, donc il n'y a pas une prédominance d'une classe granulométrique particulière.

$1 < C_c < 3 \Rightarrow$  matériau bien gradué, ce qui explique le fait de la continuité de la courbe.

### 4.3.5 Etude de broyabilité

Après l'étude de concassage, vient l'étude de broyage. C'est l'étude de l'influence des paramètres technologiques qui sont la durée de broyage et la masse broyante (les boulets), sur la rentabilité de l'opération du broyage lui-même.

Dans ce but, On a effectué plusieurs essais de broyage avec un broyeur à boulets en acier sur le feldspath concassé. Pour ce type de broyeur, il faut que la masse des boulets soit 3 fois > celle de l'échantillon à broyer. Donc pour broyer une masse de 1Kg, il nous faut 3Kg de boulets. Ainsi la capacité maximale d'alimentation du broyeur est de 12Kg dont 3Kg de masse et 9Kg de boulets.

Pendant les essais, On fixe la masse des boulets en fixant celle de l'échantillon, et on change le temps de broyage. À la fin de chaque essai on calcule le taux de broyabilité de la manière suivante :

$$T_b = \frac{m_R}{m_E} \quad \text{s'il est } < 20\% \Rightarrow \text{le temps est efficace. Sinon on augmente le}$$

temps. Donc on essaye d'optimiser le temps (temps minimal => coût d'énergie minimal).

$m_R$  : masse de refus du tamis en haut (qui a la plus grande maille).

$m_E$  : masse initiale de l'échantillon (avant le tamisage).

Les différents paramètres de cette étude sont désignés dans le tableau ci-dessous.



Figures 14 : broyeur à boulets en acier LGM

Tableau 13 : Résultats du broyage-essai 01 (15min)

Ouverture du tamis [ $\mu\text{m}$ ]	Refus		Passant		Refus cumulé		Passant cumulé	
	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %
800	260	26.0	740	74.0	260	26.0	740	74.0
630	106	10.6	894	89.4	366	36.6	634	63.4
500	82	8.2	918	91.8	448	44.8	552	55.2
400	58	5.8	942	94.2	506	50.6	49494	49.4
315	41	4.1	959	95.9	547	54.7	453	45.3
250	42	4.2	958	95.8	589	58.9	411	41.1
200	66	6.6	934	93.4	655	65.5	345	34.5
160	40	4.0	960	96.0	695	69.5	305	30.5
125	21	2.1	979	97.9	716	71.6	284	28.4
100	19	1.9	981	98.1	735	73.5	265	26.5
80	34	3.4	966	96.6	769	76.9	231	23.1
< 80	226	22.6	774	77.4	995	99.5	5	0.5

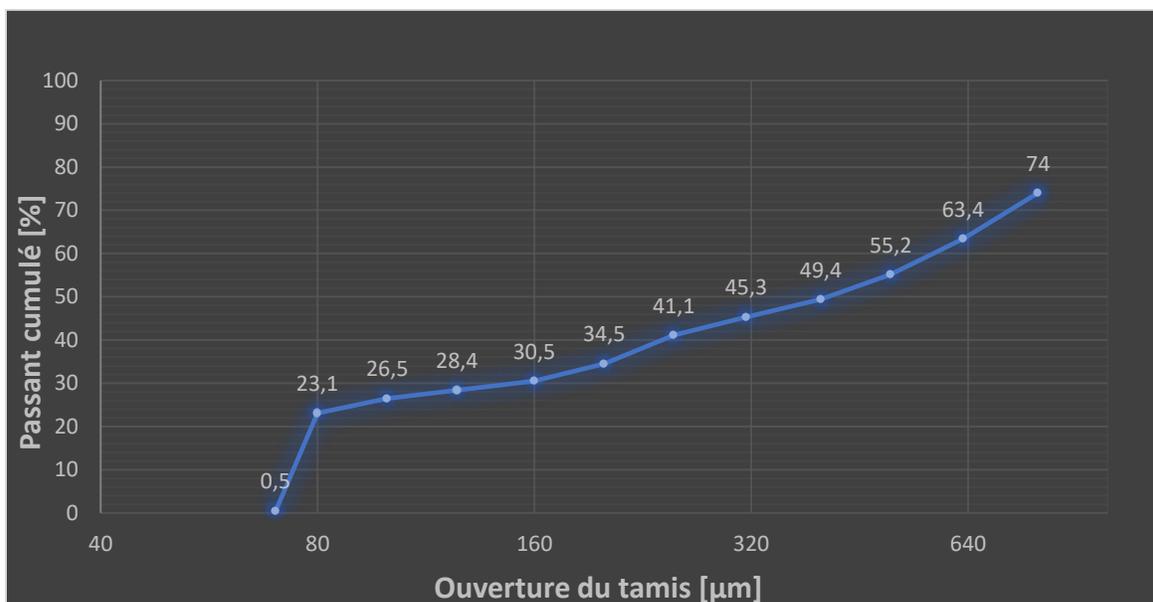


Figure 15 : courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 01

Tableau 14 : Résultats du broyage-essai 02 (17min)

Ouverture du tamis [ $\mu\text{m}$ ]	Refus		Passant		Refus cumulé		Passant cumulé	
	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %
800	62	6.2	938	93.8	62	6.2	938	93.8
630	76	7.6	924	92.4	138	13.8	862	86.2
500	88	8.8	912	91.2	226	22.6	774	77.4
400	116	11.6	884	88.4	342	34.2	658	65.8
315	67	6.7	933	93.3	409	40.9	591	59.1
250	80	8.0	920	92.0	489	48.9	511	51.1
200	180	18.0	820	82.0	669	66.9	331	33.1
160	160	16.0	840	84.0	829	82.9	171	17.1
125	14	1.4	986	98.6	843	84.3	157	15.7
100	7	0.7	993	99.3	850	85.0	150	15.0
80	17	1.7	983	98.3	867	86.7	133	13.3
< 80	89	8.9	911	91.1	956	95.6	44	5.0



Figure 16 : courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 02

Tableau 15 : Résultats du broyage-essai 03 (24min)

Ouverture du 3tamis [ $\mu\text{m}$ ]	Refus		Passant		Refus cumulé		Passant cumulé	
	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %
800	16	1.6	984	98.4	16	1.6	984	98.4
400	181	18.1	819	81.9	197	19.7	803	80.3
315	77	7.7	923	92.3	274	27.4	726	72.6
250	463	46.3	537	53.7	737	73.7	263	26.3
80	225	22.5	775	77.5	962	96.2	38	3.8
<80	38	3.8	962	3.8	1000	100	0	0

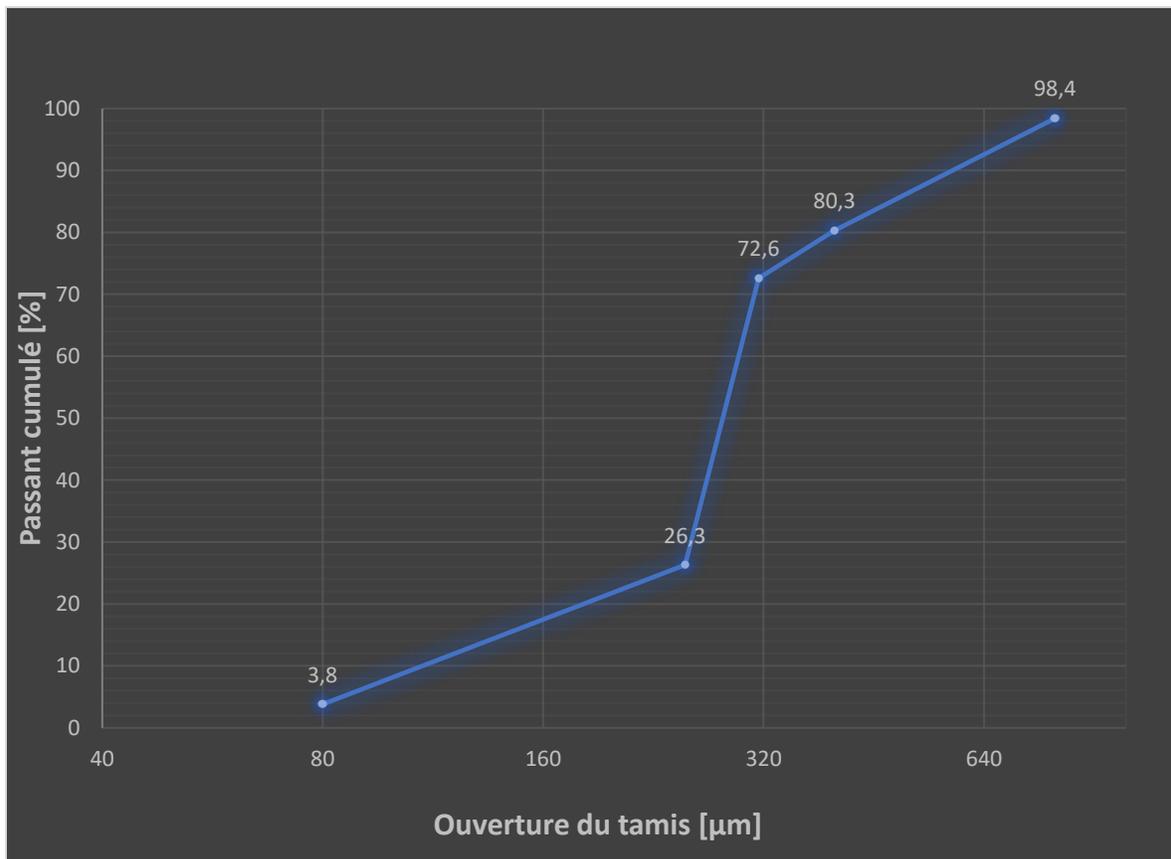


Figure 17 : courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 03

Tableau 16 : Résultats du broyage-essai 04 (17min)

Ouverture du tamis [ $\mu\text{m}$ ]	Refus		Passant		Refus cumulé		Passant cumulé	
	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %	En [g]	En %
800	75	7.5	925	92.5	75	7.5	925	92.5
400	227	22.7	773	77.3	302	30.2	698	69.8
315	56	5.6	944	94.4	358	35.8	642	64.2
250	60	6.0	940	94.0	418	41.8	582	58.2
80	231	23.1	769	76.9	649	64.9	351	35.1
<80	351	35.1	649	64.9	1000	100	0	0

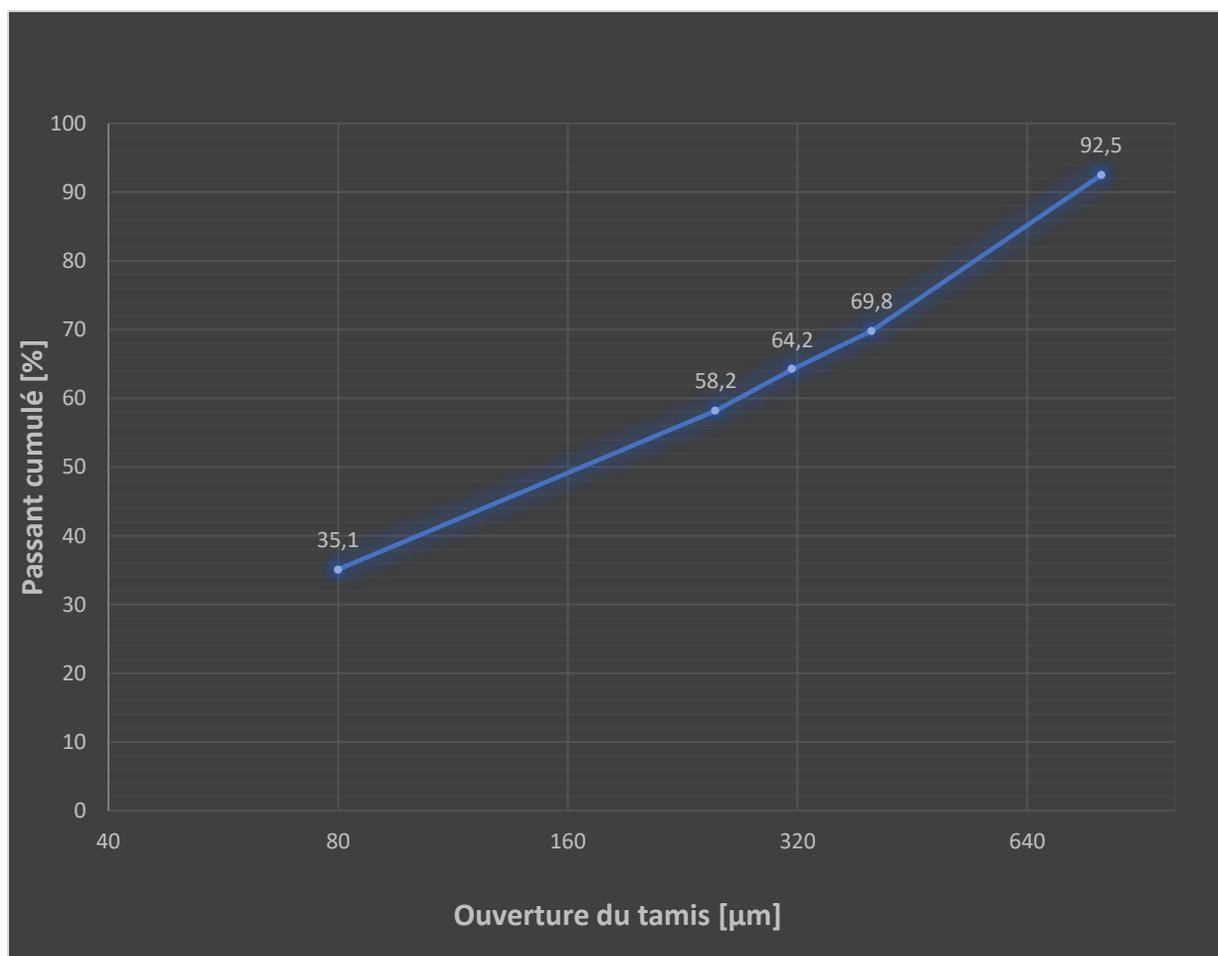


Figure 18 : courbe granulométrique du passant cumulé-broyage essai 04

Tableau 17 : Paramètres tirés des essais de broyage

Essais de broyage	Essai 01	Essai 02	Essai 03
Classe granulométrique [ $\mu\text{m}$ ]	-800 +80	-800 +80	-800 +80
Poids de l'échantillon [Kg]	1	1	1
Poids des boulets [Kg]	3	3	3
Temps de broyage [min]	24	15	17
$C_u$	2.42	7.25	4.16
$C_c$	1.84	0.55	1.50
$T_b$ [%]	1.6	26	6.2

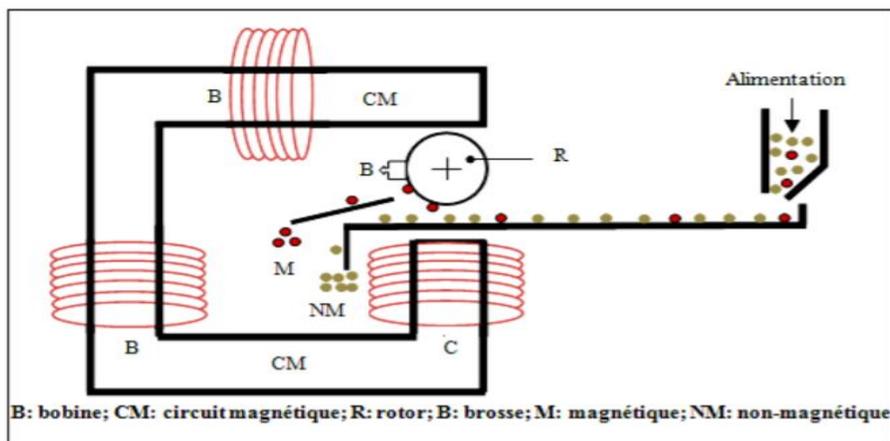
On a commencé l'essai 1 par 24min comme temps de broyage, et nous avons obtenus un taux de broyage très faible (1.6%) ce qui correspond à un broyage très poussé, donc on a décidé de réduire le temps de broyage et vérifier son impact sur le résultat de broyage. Dans le deuxième essai nous avons diminuer le temps jusqu'à 15 min et on a obtenus un taux de broyage qui dépasse 20%, donc 15min n'est pas suffisante. Dans le troisième essai nous avons augmenté le temps de broyage à 17min et nous avons obtenus un taux  $T_b$  [%]=6.2% qui est plus ou moins rentable en termes d'efficacité et coût.

Donc on doit opter pour une durée de 17min qui est plus intéressante économiquement, afin d'obtenir une meilleure libération du feldspath.

## 4.4 Traitement par séparation Magnétique

### 4.4.1 Introduction

L'industrie céramique et verrière utilise les feldspaths potassiques et sodiques comme ingrédient essentiel. Mais pour qu'ils soient utilisables, ces matériaux doivent contenir très peu d'impuretés nocives d'oxyde de fer (hématite) et surtout de silice (quartz), ce qui n'est pas notre cas. Pour cela on doit faire appel au procédé de la séparation magnétique dans le cadre d'élimination d'oxyde de fer. Dans ce travail, l'appareillage utilisé est un séparateur magnétique à haute intensité (SMHI) du LGM, travaillant en voix sèche est composé de Trois bobines entourant l'électroaimant.



**Figure 19 : Séparateur magnétique à haute intensité (électroaimant)**

L'alimentation du séparateur en minerai est effectuée par une trémie et à l'aide d'un alimentateur vibrant. La matière minérale est séparée par le rotor magnétique ; Les particules magnétiques adhèrent au rotor sous l'influence de la force magnétique, et sont portées par la rotation dans une zone de champ magnétique faible, où sont décollées par une brosse.



**Figure 20 : Séparateur magnétique à haute intensité par voie sèche LGM**

#### 4.4.2 Conditions opératoires

- Les essais de la séparation magnétique ont été effectués sur trois classes granulométriques :  $[-800+400] \mu\text{m}$  ;  $[-400+200] \mu\text{m}$  ;  $[-200+80] \mu\text{m}$ .
- Pour chaque classe on a préparé 3kg d'échantillon feldspath.
- Chaque classe a été soumise à trois intensités du courant (5A-10A-13A) et deux positions du clapet de séparation (basse et haute), c.-à-d. six essais par classe.
- Le séparateur a été alimenté par 500g d'échantillon pour chaque essai.

## 4.4.3 Résultats et interprétation

Tableau 18 : Résultats des essais magnétiques

Classe Paramètres		-800+400 $\mu\text{m}$		-400+200 $\mu\text{m}$		-200+80 $\mu\text{m}$	
		Concentré Magnétique [g]	Rendement Pondéral [%]	Concentré Magnétique [g]	Rendement Pondéral [%]	Concentré Magnétique [g]	Rendement Pondéral [%]
5A	Basse	11	2.2	7	1.4	5	1
	Haute	8	1.6	1	0.2	5	1
10A	Basse	9	1.8	11	2.2	8	1.6
	Haute	8	1.6	8	1.6	8	1.6
13A	Basse	15	3	6	1.2	17	3.4
	Haute	10	2	7	1.4	18	3.6

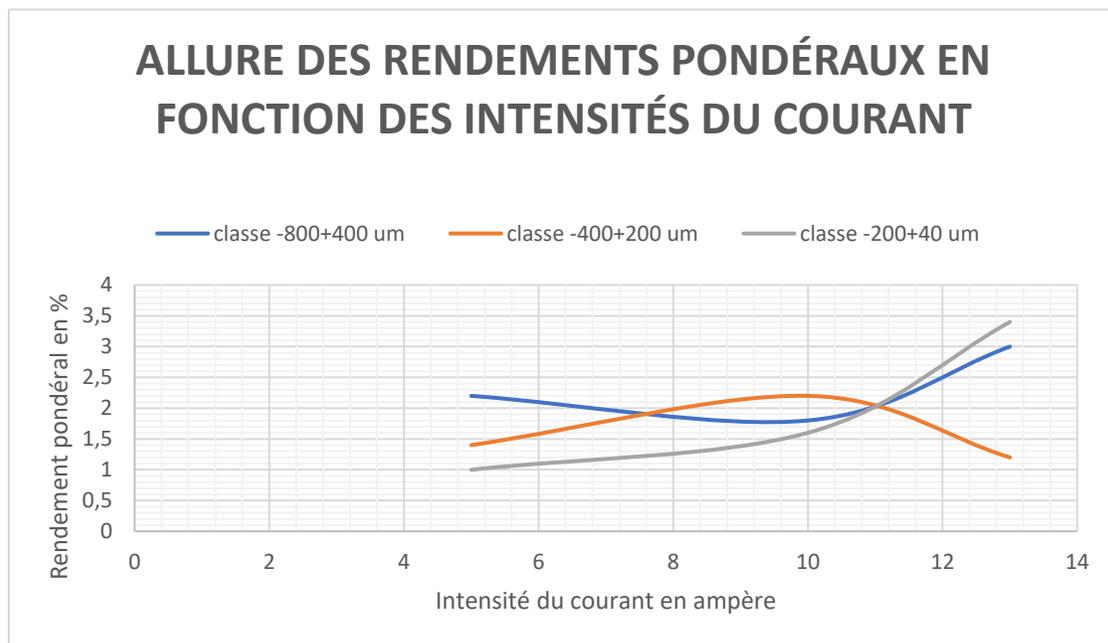
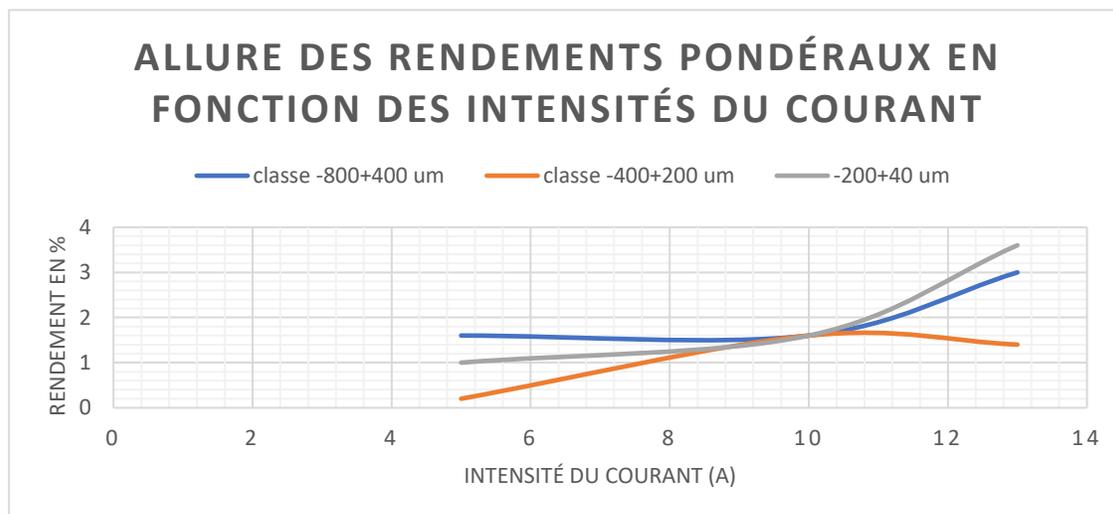


Figure 21 : résultats de la séparation magnétique-basse position



**Figure 22 : résultats de la séparation magnétique-haute position**

- Les rendements pondéraux pour la plupart des cas sont importants pour la position basse que haute.
- Pour des intensités du courant [5A – 10A] l'efficacité de séparation en terme pondéral est meilleure pour la classe [-800+400] µm que les autres classes.
- Pour une intensité de 13A l'efficacité en terme pondéral est meilleure pour la classe [-200+80] µm que les autres classes.

D'après ce qui précède, on peut dire que l'application de la séparation magnétique sur la classe [-800+400] µm en position basse et avec des intensités du courant compris entre 5A et 10A, donne les meilleurs résultats pour la séparation d'hématite  $Fe_2O_3$  du côté économique, Vu qu'on va réduire l'énergie électrique consommée par le broyeur et le séparateur magnétique. Malgré que la séparation soit maximale pour la classe [-200+40] µm à l'intensité de 13A et en haute position.

Mais en terme pondéral on ne peut pas prendre une décision précise. Puisque, on n'a pas fait la caractérisation de l'échantillon pour connaître le rendement métallique avant et après le traitement minéralurgique.

## 4.5 Traitement par Flottation

### 4.5.1 Introduction

Au chapitre précédent nous avons éliminé l'oxyde du fer qui est considéré comme impureté par la séparation magnétique. Au présent chapitre nous allons éliminer la silice (le quartz) par le procédé de flottation. Mais, la séparation du quartz du feldspath n'est pas simple, car ces deux minéraux se ressemblent étroitement dans leurs caractéristiques chimiques. Donc face à cette propriété, nous avons profité de la différence des caractéristiques électriques de surface de ces deux minéraux.

Le point de charge nul du quartz est  $PCN=2$ , tandis que celui du feldspath est  $PCN=1.5$  (Fuerstenau, 1982 ; Rao et Forsberg, 1993). A cet effet nous devons effectuer la flottation à un PH acide  $1.5 \leq PH \leq 2$ , où le feldspath est chargé négativement alors que le quartz est chargé positivement. En utilisant un collecteur cationique (collecteur amine à longue chaîne) qui possède une charge positive, il va s'adhérer sur la surface du feldspath et le rendre hydrophobe, ce qui facilite sa flottation.

#### 4.5.2 Conditions opératoires

Les essais de flottation de feldspath ont été réalisés dans une cellule de flottation de type Denver.



**Figure 23 : cellule de flottation LGM**

La méthode de flottation appliquée dans ce travail est la flottation directe du feldspath. Les essais de flottation ont été effectués sur des échantillons de 400 g de masse et de taille granulométrique  $[-250 + 40] \mu\text{m}$ , dont le rapport solide liquide est de 40 %. Les réactifs principaux sont :

- Le réactif de conditionnement de la pulpe : régulateur du milieu (l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
- Le réactif améliorant la sélectivité de la séparation : activant-déprimant (Acide fluorhydrique HF).
- Le réactif spécifique au solide à récupérer par flottation : collecteur (Triéthanolamine  $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$ ).
- Le réactif structurant de la mousse : moussant (huile de pin).

Tableau 19 : Consommation des réactifs

ESSAIS	Réactifs utilisée			
	C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub> [g/T]	HF [g/T]	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [g/T]	Huile de pin [Gouttes]
Essai 1	100	300	17 654.22	5
Essai 2	100	600	17 654.22	5
Essai 3	150	300	17 654.22	5
Essai 4	150	600	17 654.22	5
Essai 5	1000	300	17 654.22	5
Essai 6	1000	600	17 654.22	5

❖ Préparation d'une solution à partir du collecteur (Triéthanolamine M = 149g/mol) : Les consommations utilisées sont les suivantes : 100g/T - 150g/T - 1000g/T.

Donc pour 400g d'échantillon les consommations deviennent :

$$COL1 = \frac{100 \times 400}{1000000} = 0.04g$$

$$COL2 = \frac{150 \times 400}{1000000} = 0.06g$$

$$COL3 = \frac{1000 \times 400}{1000000} = 0.4g$$

En termes de la quantité de matière :

$$n_1 = \frac{COL1}{M} = \frac{0.04}{149} = 2.01 \times 10^{-4} mol$$

$$n_2 = \frac{COL2}{M} = \frac{0.06}{149} = 4.02 \times 10^{-4} mol$$

$$n_3 = \frac{COL3}{M} = \frac{0.4}{149} = 2.68 \times 10^{-3} mol$$

Etant donné la concentration de la solution C = 0.05 mol/L les volumes pour chaque essai qu'on doit verser sont :

$$V_1 = \frac{n_1}{C} = 4.02 ml$$

$$V_2 = \frac{n_2}{C} = 8.04 ml$$

$$V_3 = \frac{n_3}{C} = 53.6 ml$$

❖ Préparation d'une solution à partir du déprimant (acide fluorhydrique HF M=20g/mol) :

Les consommations utilisées sont : 300g/T – 400g/T.

Pour 400g d'échantillon les consommations seront :

$$\text{DEP1} = \frac{300 \times 400}{1000000} = 0.12\text{g} \quad ; \quad \text{DEP2} = \frac{400 \times 400}{1000000} = 0.16\text{g}$$

Donc en termes de la quantité de la matière :

$$n_1 = \frac{\text{DEP1}}{M'} = \frac{0.12}{20} = 0.006\text{mol} \quad ; \quad n_2 = \frac{\text{DEP2}}{M'} = \frac{0.16}{20} = 0.008\text{mol}$$

Etant donné que la concentration de la solution  $C' = 1.2 \text{ mol/L}$  les volumes pour chaque essai sont :

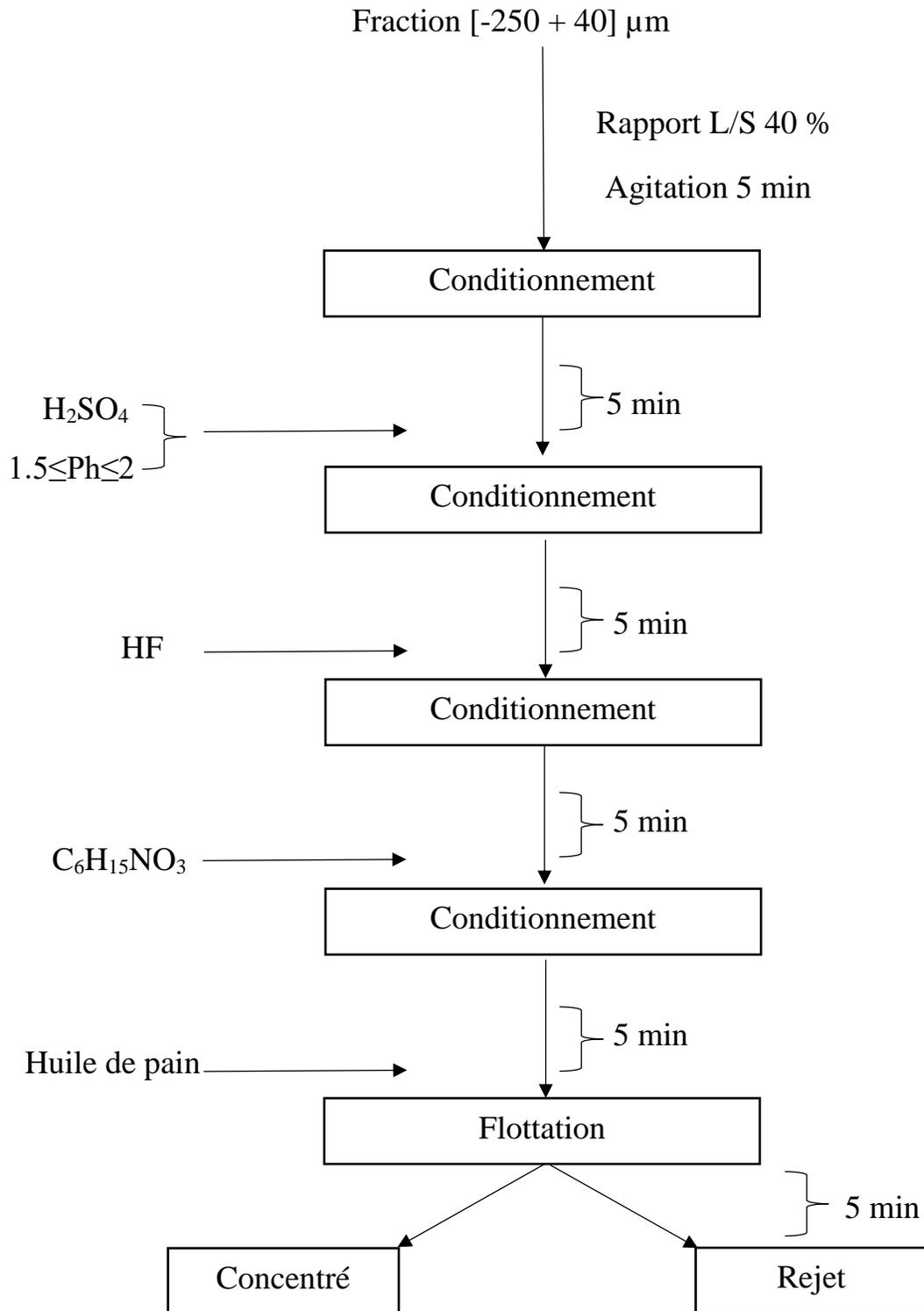
$$V'_1 = \frac{n_1}{C'} = \frac{0.006}{1.2} = 5\text{ml} \quad ; \quad V'_2 = \frac{n_2}{C'} = \frac{0.008}{1.2} = 6.67\text{ml}$$

Calcul de consommation du régulateur de milieu acide sulfurique :

$$\text{Consommation} = \frac{C' \times V' \times M' \times 10^6}{400} = \frac{1.2 \times 5 \times 20 \times 10^6}{400} = 17\,654.22\text{g/T}$$

**Tableau 20 : Protocole de la flottation**

Paramètres	Conditions
Température de milieu	25C°
Granulométrie	[-250 + 40] μm
Vitesse de rotor	1500 RPM
% Solide	40 %
PH	$1.5 \leq ph \leq 2$
Régulateur de milieu de pulpe	Acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Temps de conditionnement de pulpe	5min
Activant-déprimant	Acide fluorhydrique HF
Temps de conditionnement de modificateur	5 min
Type de collecteur	Triéthanolamine C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>
Temps de conditionnement de collecteur	5 min
Type de moussant	Huile de pain
Temps de conditionnement de moussant	5 min
Temps de flottation	5 min

**Figure 24 : schéma de la flottation appliquée**

### 4.5.3 Résultats et interprétations

Tableau 21 : Résultats du traitement par flottation

ESSAIS	Résultats	
	Concentré [g]	Rendement pondéral [%]
Essais 1	23	10.25
Essais 2	15	7.25
Essais 3	26	6.5
Essais 4	25	6.25
Essais 5	41	5.75
Essais 6	29	3.75

Pour tous les essais nous avons observé que le rendement pondéral en utilisant une consommation du HF de 300g/T et toujours supérieur à celui obtenu par une consommation de 600g/T. cela s'explique par l'abaissement de la valeur du PH à cause de la grande quantité d'acide fluorhydrique, engendre l'acquisition du feldspath d'une charge positive, ce qui empêche le collecteur cationique d'adhérer sur la surface du minéral.

Le rendement pondéral du concentré a été maximal lorsqu'on a utilisé une consommation du collecteur de 1000g/t. car le nombre de molécules du collecteur augmente donc il y'aura plus de liaisons collecteur-feldspath ce qui implique l'augmentation du rendement. Malgré la grande quantité du collecteur le rendement pondéral reste insuffisant en termes de récupération <11% ce qui s'interprète par :

- Soit le collecteur utilisé est déficitaire.
- Soit-il ne convient pas bien pour collecter le feldspath.

Pour prendre une décision claire sur ses essais en termes d'efficacité il nous faut une caractérisation pour connaître le rendement métallique.

# CONCLUSION GENERALE

## **Conclusion générale**

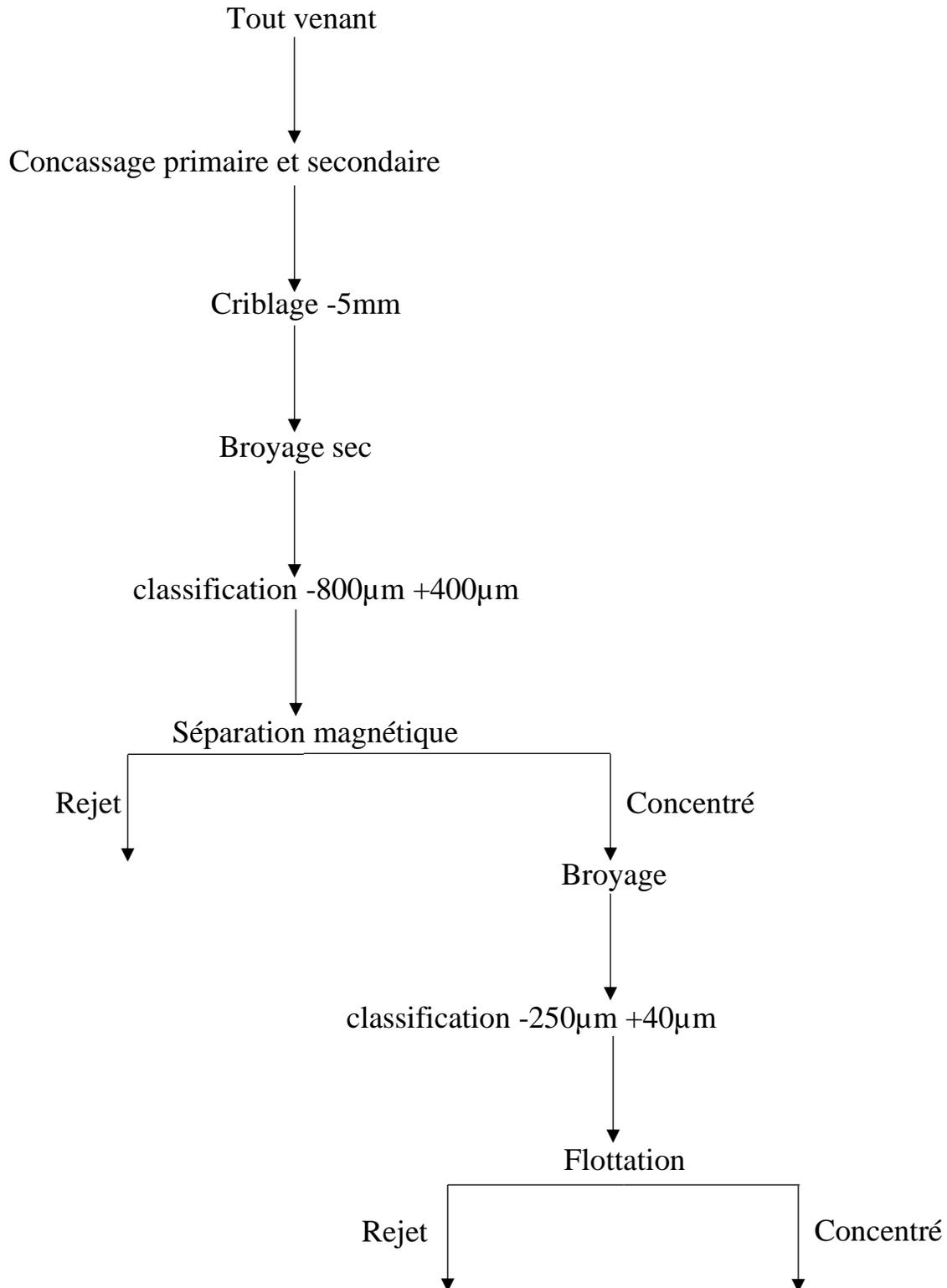
L'objectif de ce projet de fin d'étude, est de proposer un schéma de traitement qui permet d'améliorer la qualité du produit fini de feldspath de la mine d'Ain Barbar. Nous avons décidé d'appliquer deux méthodes d'enrichissement, à savoir la séparation magnétique et la flottation, afin d'éliminer le fer et le quartz respectivement.

À l'issue des essais effectués au laboratoire, nous avons obtenu les résultats suivants :

- ❖ L'élimination de l'hématite par la séparation magnétique a donné le meilleur résultat en termes de rendement pondéral pour les paramètres suivants :
  - ✓ Granulométrie de [-800 $\mu$ m +400 $\mu$ m].
  - ✓ Intensité du courant de 10A.
  - ✓ Clapet en position haute.
- ❖ L'élimination du quartz par la flottation n'a pas été concluante, et ce, à cause du type du collecteur qui a été utilisé, car même en changeant sa consommation lors des essais, la récupération pondérale des feldspaths n'a pas pu dépasser les 10%.

Malheureusement, et à cause de l'absence des moyens de caractérisation, il n'était pas possible de vérifier les rendements en métal des différents essais réalisés, ce qui nous empêche de vérifier concrètement à quel point les procédés d'enrichissement utilisés étaient efficaces.

### Schéma technologique proposé pour le traitement du feldspath



# BIBLIOGRAPHIE

## **Bibliographie**

- [1] **Dictionnaire de l'Académie Française, huitième édition (1932-1935)**  
« [https://fr.wiktionary.org/wiki/Wiktionnaire:Liste\\_des\\_références#Dictionnaires\\_de\\_l'Académie\\_française](https://fr.wiktionary.org/wiki/Wiktionnaire:Liste_des_références#Dictionnaires_de_l'Académie_française) ».
- [2] **Tilas (1740)** « <https://www.universalis.fr/encyclopedie/feldspaths/> ».
- [3] **Perraud 1963**
- [4] **HARBEN, P. W., 2002.** The Industrial Minerals HandyBook. A guide to markets, specifications & prices, 4th Edition.
- [5] **N.N. Greenwood et A. Earnshaw,** Chemistry of the elements, Oxford Oxfordshire New York, Pergamon Press, 1984, 1542 p. (ISBN 978-0-08-022056-7 et 978-0-080-22057-4), p. 357.
- [6] **L. Cordier, Acad. des sc.** Comptes rendus, t. LIV, p. 296.
- [7] **Alain Foucault,** Le guide du géologue amateur, Dunod, 2014, p. 57
- [8] **HARBEN, P. W. et M. KUZAVART, 1996.** Industrial Minerals. A global Geology. Industrials Information Ltd. Metal Bulletin, PLC London.
- [9] **BRGM,** Ressources Minières Françaises Tome 14 « Les gisements de sillimanite, d'andalousite, de disthène, de magnésite, de graphite, de feldspaths » (situation en 1983).
- [10] **Clef d'identification visuelle des minéraux communs**  
« <https://cours.polymtl.ca/PBedard/glq1100/mineraux/identification.html> ».
- [11] **Traitement des minéraux de Feldspath**  
« <https://armaz.com/fr/industries/minieres/feldspath/> ».
- [12] **Harben et al., 1996, Harben, 2002, Odent, 1994**
- [13] **LE DOUSSAL & VOUILLEMET (1997).**  
Techniques de l'ingénieur/Matériaux/Céramiques de bâtiment.

[14] **LEHMANN.** Techniques de l'ingénieur / Matériaux / formulation du verre et produits verriers.

[15] **L'ENOF unité Ain Barbar.**

[16] **Journal Liberté** « <https://www.liberte-algerie.com/est/exportation-de-4-500-tonnes-de-feldspath-vers-la-tunisie-349323> ».

[17] **ENOF unité Ain Barbar** « Etude de faisabilité Feldspath 2017 »

[18] **Pr. OUELD HAMOU Malek** (Cours de la séparation magnétique).

[19] **Technique de l'ingénieur / GILLET (G.).** – La séparation magnétique sous champs intenses en minéralurgie : Les systèmes cryoélectriques. Thèse de Doctorat d'État, INPL, Nancy, oct. 1988.

[20] **Barry A. Wills, Tim Napier-Munn.** Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral, 2006.

[21] **Thèse de doctorat : Efficacité de capteur dans les procédés de flottation par HUANG Zhujun** décembre 2009 TOULOUSE.

[22] **Pr. OUELD HAMOU Malek** (Cours de la flottation).

[23] **Bleier, A., Goddard, E.D., Kulkarni, R.D., 1977.** Adsorption and critical flotation conditions. Journal of Colloid and Interface Science 59 (3), 490–504.

[24] **Laurent RIZET, Pierre-Emmanuel CHARPENTIER.** Technique de l'ingénieur/matériaux/élaboration et recyclage des métaux.

[25] **HORIMEK, Mohamed** « contribution à la valorisation de la felsite d'Ain Barbar (Annaba) et de la pegmatite d'Abouda-Bouada (Tizi-Ouzou), par les procédés de séparation magnétique, flottation et lixiviation » (PFE, 2002) E.N.P Alger.