

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Minier

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur

Essais de valorisation de la pegmatite d'Abouda Bouada
(Grande Kabylie) et du kaolin d'Adjarda (Jijel)

Présenté par :

Meïssa ABABOU
Isma OTMANE

Proposé par :

Ceramines Agency

Devant la commission d'examen :

Mr. A. SAADA	Président
Mr. R. AKKAL	Examineur
Mr. M. OULD HAMOU	Rapporteur
Mr. A. AFALFIZ	Invité

Promotion : Juin 2011

*A tous ceux qui ont su, savent et sauront retrouver
les merveilles enfouies sous la rudesse du métier
et qui ne manqueront pas de se reconnaître*
M.A.

À ma famille, pour avoir bien voulu supporter mon humeur bouvrue ;

À la famille Ababou, qui m'a si chaleureusement accueilli quand il était nécessaire ;

À Amel, Wafa, Sonia, Titif et mes amis, pour m'avoir si bien encouragée, conseillée, soutenue et aidée;

À mes camarades de spécialité, qui partagent ce goût pour l'aventure;

À tous ceux qui m'ont permis d'atteindre ce palier...

Isma

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement Mr. M. Ould Hamou, qui nous a initiées à ce vaste monde qu'est la minéralurgie et qui nous a donné l'opportunité d'effectuer un travail expérimental, Mr. A. Afalfiz et Ceramines Agency qui, en nous proposant ce sujet, nous ont offert matière à cogiter pour encore des années, et Mr. D. Belhai, sans qui rien de tout ceci n'aurait été possible.

Un grand merci à Mr. Ouiguini et au personnel du CRNA, ainsi qu'à celui du CETIM, qui ont fort sympathiquement recueilli nos échantillons lorsque des analyses ont été nécessaires.

Et enfin, notre reconnaissance la plus sincère aux enseignants et étudiants du département Génie Minier, et de l'ENP en général, grâce à qui nous avons pu en arriver là, ainsi qu'à Ammi Salah, père spirituel de tous les polytechniciens et qui n'a jamais refusé son aide à qui que ce soit.

Table des figures

- Figure 1.1.** : Photo d'échantillons de pegmatite d'Abouda Bouada.
- Figure 1.2.** : Photo d'autres échantillons de la même roche.
- Figure 1.3.** : Photo d'échantillons de kaolin d'Adjarda.
- Figure 1.4.** : Photo d'autres échantillons de la même roche.
- Figure 2.1.** : Schéma d'une table à secousses.
- Figure 2.2.** : Schématisation du principe de séparation par nappe pelliculaire fluante.
- Figure 2.3.** : Schématisation de la classification d'un minerai selon sa taille et sa densité.
- Figure 2.4.** : Schéma d'une spirale.
- Figure 2.5.** : Schéma d'un séparateur à tambour.
- Figure 2.6.** : Photo d'un cône Wemco.
- Figure 2.7.** : Schéma d'un séparateur Dyna-Whirlpool.
- Figure 2.8.** : Schéma illustrant le principe du collecteur.
- Figure 2.9.** : Schéma illustrant le principe d'adsorption du moussant.
- Figure 2.10.** : Schéma d'une coupe transversale d'une cellule de flottation.
- Figure 2.11.** : Schéma d'une coupe transversale d'une colonne de flottation.
- Figure 3.1.** : Courbe des passants de la pegmatite en fonction des diamètres des tamis.
- Figure 3.2.** : Courbe des passants du kaolin en fonction des diamètres des tamis.
- Figure 3.3.** : Graphe représentant les courbes des passants de la pegmatite et du kaolin en fonction des diamètres des tamis.
- Figure 3.4.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) des plongeants d'un essai de séparation par milieux denses de la pegmatite.
- Figure 3.5.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) des flottants d'un essai de séparation par milieux denses de la pegmatite.
- Figure 3.6.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) des plongeants d'un essai de séparation par milieux denses du kaolin.
- Figure 3.7.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) des flottants d'un essai de séparation par milieux denses du kaolin.
- Figure 3.8.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de mousse d'un essai de flottation directe au dodécylamine sur de la pegmatite.
- Figure 3.9.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de cellule d'un essai de flottation directe au dodécylamine sur de la pegmatite.
- Figure 3.10.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de mousse d'un essai de flottation directe au dodécylamine sur du kaolin.
- Figure 3.11.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de cellule d'un essai de flottation directe au dodécylamine sur du kaolin.
- Figure 3.12.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de mousse d'un essai de flottation directe à l'AP830 sur du kaolin.
- Figure 3.13.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de cellule d'un essai de flottation directe à l'AP830 sur du kaolin.
- Figure 3.14.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de mousse d'un essai de flottation directe à l'AP830 sur de la pegmatite.
- Figure 3.15.** : Photo prise au microscope binoculaire (x5) du produit de cellule d'un essai de flottation directe à l'AP830 sur de la pegmatite.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Cadre géologique et généralités	3
1 : Présentation géologique globale	4
1.1. : Pegmatite	4
1.2. : Kaolin	5
2 : Minéralogie	5
3 : Généralités sur les méthodes de séparation	6
Chapitre II : Méthodes de séparation	7
I : Séparation par nappe pelliculaire fluante	8
1. : Généralités et principe	8
2. : Table à secousses	9
2.1. : Généralités et principe	9
2.2. : Fonctionnement	9
3. : Spirales	11
3.1. : Généralités et principe	11
II : Séparation par milieux denses	12
1 : Généralités et principe	12
2 : Types et préparation des médiums	13
2.1. : Liqueur dense	13
2.2. : Pseudo solution	13
3. : Récupération et recyclage	14
3.1. : Liqueur dense	14
3.2. : Pseudo-solution	15
4. : Appareillages	15
4.1. : Appareils statiques	15
4.1.1. : Séparateurs à tambour	15
4.1.2. : Cônes ou bacs	16
4.2. : Appareils dynamiques	16
4.2.1. : Séparateur Dyna-Whirlpool	17
4.2.2. : Cyclones à eau	17
III : Flottation	18
1 : Généralités et principe	18
2 : Mécanismes	18
2.1. : Potentiel zêta	19
3 : Paramètres influant sur l'opération de flottation	20
3.1. : Influence du broyage	20
3.2. : Influence du pH	20
3.3. : Influence de la température	20
4 : Réactifs utilisés	21
4.1. : Collecteur	21
4.2. : Activant	22
4.3. : Dépressant	22
4.4. : Moussant	22
4.5. : Régulateur de milieu	23
5 : Types de flottation	24
5.1. : Flottation directe	24
5.2. : Flottation inverse	24
6 : Appareillage	25
6.1. : Cellule de flottation	25
6.2. : Colonne de flottation	26
Chapitre III : Partie expérimentale	27
I : Préparation mécanique	28
1 : Concassage	28
2 : Tamisage	28
3. : Echantillonnage	28

3.1. : Quartage manuel	28
3.2. : Diviseur à couloirs	29
II : Analyse granulométrique	31
1. : Courbes granulométriques	31
2. : Interprétation des résultats	35
III : Séparation par nappe pelliculaire fluante	36
1. : Table à secousses	37
1.1. : Mode opératoire	37
1.2. : Résultats et discussion	39
2. : Spirales	40
2.1. : Mode opératoire	40
2.2. : Résultats et discussion	40
IV : Séparation par milieux denses	41
1. : Préparation du médium	41
2. : Préparation du minerai	41
3. : Mode opératoire	43
4. : Rendement des récupérations	43
5. : Résultats et discussion	44
V : Flottation	46
1. : Flottation directe	47
1.1. : Mode opératoire	47
1.2. : Consommation en réactifs	49
1.3. : Rendement de la flottation	50
1.4. : Résultats et discussion	51
1.5. : Consommation en réactifs	54
1.6. : Rendement de la flottation	54
1.6. : Flottations de relavage	55
1.8. : Résultats et discussions	56
2. : Flottation inverse	58
2.1. : Flottation du feldspath	58
2.1.1. : Confection du collecteur	59
2.2. : Flottation du quartz	59
2.3. : Mode opératoire	59
2.4. : Consommation en réactifs	62
2.5. : Rendement de la flottation	63
2.6. : Résultats et discussions	65
3. : Conclusion	66
Conclusion générale	67

Introduction

Introduction

La pegmatite et le kaolin constituent généralement la matière première de base entrant dans la fabrication de la céramique silicatée. Ces minerais sont effectivement exploités pour leurs teneurs importantes en feldspath et en quartz, minéraux principaux utilisés pour ce type de céramique. Cependant, on note également dans ces minerais la présence non-négligeable de micas, blancs et noirs.

Les micas sont des minéraux silicatés. On les retrouve essentiellement dans les roches d'origine magmatique ou métamorphique, ainsi que sous forme détritique dans les roches sédimentaires. Ce sont des phyllosilicates ; ils se présentent donc sous la forme de feuillets facilement séparables. On en distingue principalement deux types : la muscovite, qui est un mica de couleur claire, généralement blanchâtre, et la biotite, où du fer et/ou du magnésium sont substitués à l'aluminium, lui conférant ainsi une couleur plus foncée. La muscovite est principalement présente en quantité dans les roches plutoniques, telles que la pegmatite et le granite, mais aussi dans les roches métamorphiques, comme le gneiss et le micaschiste.

La présence de ces micas pose un problème certain pour la fabrication de la céramique, et ce pour diverses raisons.

Tout d'abord, le mica est doté d'une grande stabilité thermique (il ne se décompose qu'à partir de 700°C) et possède des propriétés diélectriques qui en font un matériau très prisé par l'industrie électronique et électrotechnique. Il présente un inconvénient lors de la fabrication de la céramique en ce sens où il occasionne généralement pour le faire disparaître un traitement à haute température qui peut être évité s'il est préalablement séparé du reste des éléments entrant dans la composition de la céramique.

De plus, sa structure en feuillets rend tout tamisage fastidieux. En effet, le mica se fragmente en fines paillettes qui restent généralement prises transversalement dans les mailles des tamis où elles passent, ce qui a pour effet d'obstruer ces mailles et de réduire l'efficacité de l'opération de tamisage.

Enfin, la légèreté de ces paillettes fait que certains types de broyage conventionnels deviennent totalement inutiles. Les broyeurs à boulets par exemple, ne conduisent qu'à l'augmentation des particules fines de quartz et de feldspath sans effet sur le mica, étant donné que la charge broyante atteint les parois de la jarre avant les particules de muscovite, annulant ainsi leur fragmentation.

Par conséquent, on comprendra aisément que la séparation préalable du mica pour la fabrication de la céramique présente un enjeu économique intéressant, de par la réduction des dépenses occasionnées par ses désagréments, et l'amélioration de la qualité de la céramique.

Le travail que nous nous proposons d'effectuer portera sur la séparation du mica des autres fractions entrant dans la composition de la pegmatite d'Abouda Bouada (Grande Kabylie) et du kaolin d'Adjarda (Petite Kabylie). Pour ce faire, nous utiliserons trois méthodes de séparation des plus usitées dans le monde industriel, à savoir la flottation, les milieux denses et les nappes pelliculaires fluantes.

Chapitre I : Cadre géologique et généralités

Chapitre I – Cadre géologique et généralités

1. Présentation géologique globale

Les échantillons utilisés pour ce projet de fin d'étude proviennent de deux types de roches ; des pegmatites et des kaolins.

1.1. Pegmatite

Cette roche provient du gisement d'Abouda Bouada, dans la wilaya de Tizi Ouzou, en Grande Kabylie. Les terrains en place sont de type métamorphique et l'on peut observer que les roches sont peu altérées.

Les principaux minéraux entrant dans la composition de ces pegmatites sont le feldspath (à raison de 45 à 55%), le quartz (35 à 45%) et le mica (réparti en 12,5 à 14% de muscovite et 1 à 2% de biotite). On retrouve également des traces d'oxydes divers (fer, magnésium, manganèse, titane) à raison de 1 à 2%.



Figure 1.1.

Echantillons de pegmatite d'Abouda Bouada



Figure 1.2.

Echantillons de pegmatite d'Abouda Bouada

Comme on peut le constater sur les figures 1.1. et 1.2., la pegmatite est une roche massive mais inhomogène. En effet, elle est massive dans les zones où le quartz et le feldspath sont concentrés, mais devient friable au niveau des amas de micas et des zones oxydées (reconnaissables à leur couleur sombre).

1.2. Kaolin

Cette roche provient quant à elle du gisement d'Adjarda, situé dans la wilaya de Jijel, en Petite Kabylie, non loin de la ville de Chekfa. Elle résulte de l'altération de roches métamorphiques, situées au-dessus de granites à muscovite.

Les analyses par rayons X (diffraction et fluorescence) ont révélé la présence de feldspath (41%), de quartz (33,5%), de muscovite (13%) de kaolinite (12,5%), ainsi que des traces d'oxydes à raison de 1 à 2%.



Figure 1.3.
Echantillons de kaolin d'Adjarda



Figure 1.4.
Echantillons de kaolin d'Adjarda

Les figures 1.3. et 1.4. montrent que contrairement à la pegmatite, le kaolin est composé de zones majoritairement friables, qui correspondent aux zones fortement altérées. Cependant, l'altération n'étant pas non plus homogène, il est fréquent de retrouver des fragments encore massifs du granite dont est issu ce kaolin, ce qui explique pourquoi la fragmentation de cette roche se fait majoritairement entre les particules grossières et très fines (voir Analyse Granulométrique).

2. Minéralogie

Les micas forment une famille de minéraux silicatés appartenant au sous-groupe des phyllosilicates, de structure T-O-T (Tétraèdre-Octaèdre-Tétraèdre). Les micas les plus répandus dans l'écorce terrestre sont la muscovite et la biotite.

Dans le cadre de notre étude, nous porterons notre intérêt sur la muscovite, abondamment présente dans les minerais traités, bien que l'on constate un pourcentage relativement important de biotite et de phlogopite dans la pegmatite.

La muscovite est un mica de formule chimique $KAl_2[(OH,F)_2AlSi_3O_{10}]$. Il s'agit d'un minéral appartenant au système cristallin monoclinique, possédant un éclat nacré. De couleur blanche à argentée quand elle est pure, elle a une dureté de 2 à 2.5 et un clivage parfait. Sa structure en feuillets fait qu'elle est facilement séparable à l'ongle.

La muscovite se rencontre souvent dans les roches plutoniques et métamorphiques, sous la forme de plaques pouvant atteindre plusieurs mètres d'envergure. Ses principaux gisements se trouvent en Inde (régions de Rajputana et de Madras) qui, avec le Brésil, fournit 70 % de la production mondiale, le complément étant assuré principalement par l'Angola, la Tanzanie, l'Argentine, les États-Unis et la Chine.

Les propriétés de la muscovite font qu'elle est très utilisée dans différents domaines de l'industrie. Sa séparation et sa récupération pourrait donc s'avérer doublement rentable : d'un côté, cela contribuerait à l'amélioration certaine de la qualité de la céramique produite et de l'autre, cela alimenterait en partie l'industrie électronique et électrotechnique qui sont de friandes consommatrices de mica.

3. Généralités sur les méthodes de séparation

Nous nous proposons d'effectuer la séparation du mica de la fraction quartz-feldspath en utilisant trois méthodes différentes, à savoir la flottation, les nappes pelliculaires fluantes et les milieux denses.

La flottation est une opération de séparation qui fait appel aux propriétés chimiques surfaciques des minéraux, alors que les nappes pelliculaires fluantes et les milieux denses sont des méthodes exclusivement basées sur la gravimétrie. Ces trois méthodes faisant l'objet de notre étude, elles seront plus longuement développées dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Méthodes de séparation

I – Séparation par nappe pelliculaire fluante

1. Généralités et principe

La séparation par nappe pelliculaire fluante est une technique de concentration gravimétrique basée sur le comportement des particules sur un plan, sous l'effet d'un film fluide, et leur classification selon leur taille et densité.

D'après les caractéristiques du plan (fixe ou mobile, incliné ou horizontal) et le mode de soutirage (continu, périodique), on distingue plusieurs procédés, que l'on a regroupés dans le tableau 2.1. :

Plan incliné	Soutirage
Fixe	<i>Périodique</i> : sluice
	<i>Continu</i> : pinched sluice, cône Reichert et spirales
Mobile	<i>Périodique</i> : séparateur Bartles-Mozley, tables GEC
	<i>Continu</i> : table à secousses, concentrateur Crossbelt et séparateur multigravité

Tableau 2.1
Récapitulatif des appareillages de séparation par
nappe pelliculaire fluante

2. Table à secousses

2.1. Généralités et principe

Les tables à secousses (figure 2.1.) sont l'un des principaux appareillages utilisés pour la séparation gravimétrique, et plus précisément pour la séparation par nappe pelliculaire fluante, avec soutirage continu. Cette méthode est basée sur la longueur du parcours effectué par une particule sur un plan incliné à la surface duquel s'écoule, par gravité, un film liquide [1]. Les tables comprennent une alimentation et un système de récupération des particules classifiées (compartiments séparés).

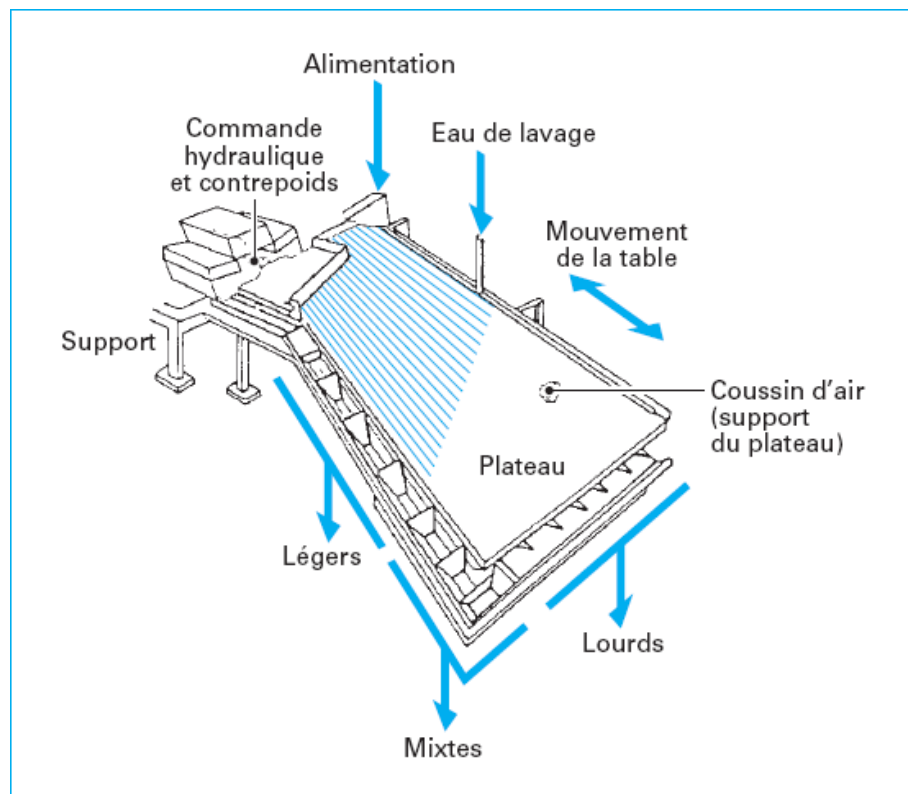


Figure 2.1.
Schéma d'une table à secousses

2.2. Fonctionnement

La trajectoire d'une particule évoluant sur un plan incliné sur lequel s'écoule un film liquide est liée à (figure 2.2.) :

- L'alluvionnement, qui est la sédimentation des grains lourds et gros piégés dans les riffles, et l'entraînement des légers et fins par le courant.
- La saltation, qui est le mouvement des grains piégés contre le support, dépendant moins de la vitesse d'entraînement que de la masse volumique des grains ; les grains ayant une masse volumique plus importante se déposent en premier [2].

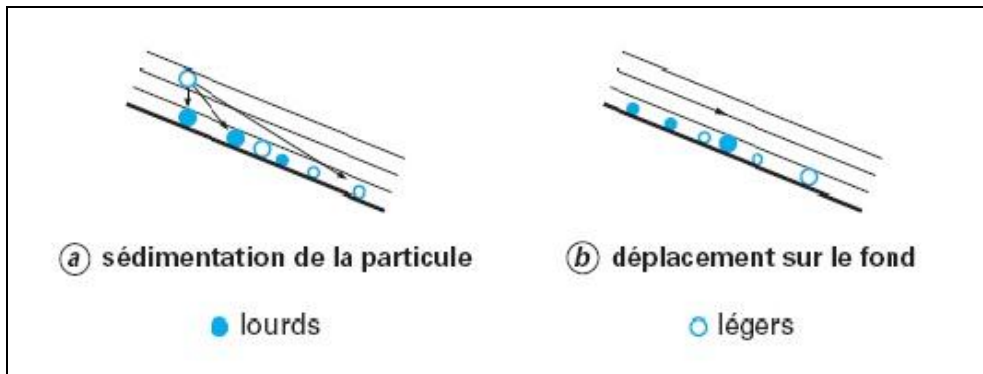


Figure 2.2.

Schématisme du principe de classification par NPF

De plus, le plan incliné est sujet à des secousses asymétriques et longitudinales : l'amplitude de l'aller est moins importante que celle du retour. Ce type de secousses améliore la classification, et permet aux grains similaires de se placer au même niveau et d'être récupérés par la même évacuation.

Le minerai est ainsi classé selon sa taille et sa densité, ainsi que le montre la figure 2.3.

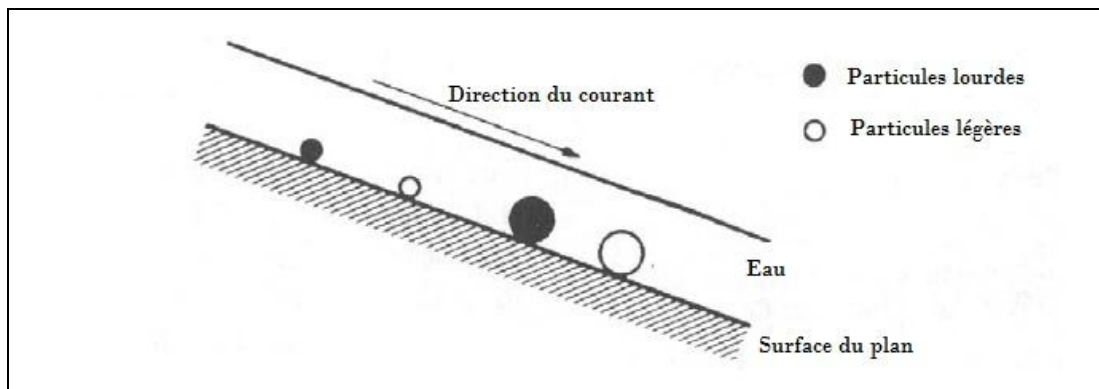


Figure 2.3.

Schématisme de la classification d'un minerai selon sa taille et sa densité

3. Spirales

3.1. Généralités et principe

Les spirales ont été développées en 1943 et ne cessent d’être améliorées depuis. Lors de ce procédé, on introduit une pulpe dans un canal hélicoïdal. En plus de la sédimentation, des forces centrifuges interviennent pour classer les particules. Les grains les plus fins et les plus lourds restent à proximité de l’axe central. Les plus gros et les plus légers sont entraînés dans le périmètre de l’écoulement le plus rapide (figure 2.4.). On améliore la classification par ajout d’un débit d’eau de lavage. Ce dernier permettra de débarrasser le lit des particules des fines, qui nuisent au rendement de l’opération. [2]

La récupération des concentrés séparés s’effectue à l’aide d’orifices de soutirage prévus à cet effet.

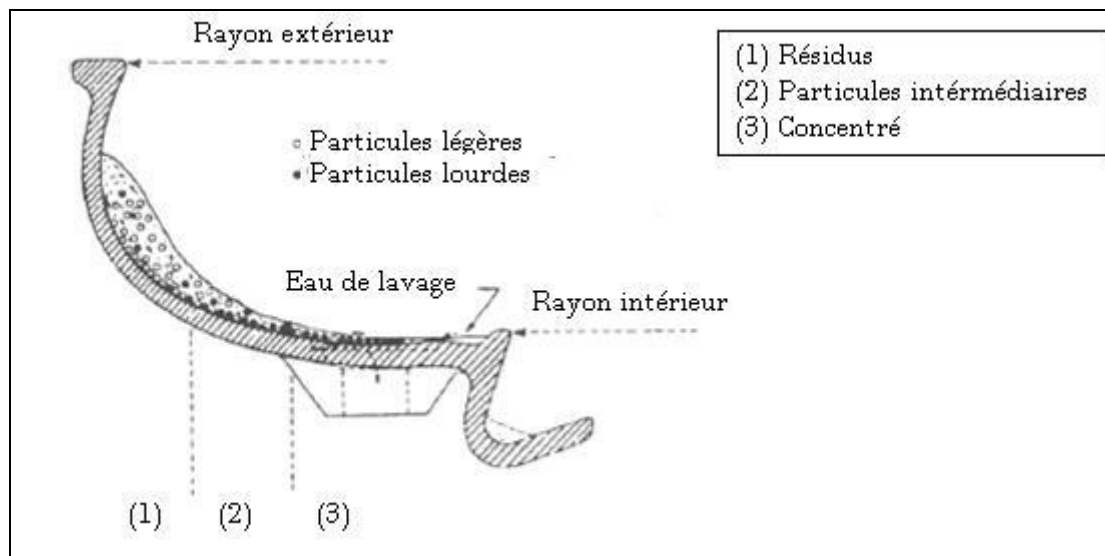


Figure 2.4.
Schéma d'une spirale

La pente d’inclinaison des étages est généralement variable. Elle est proportionnelle à la densité des particules. Ainsi, la séparation du charbon nécessitera de faibles pentes, alors que pour du quartz ou des minéraux lourds, elle sera plus conséquente.

On peut traiter efficacement des particules dont la taille varie entre 1mm et 50µm.

II – Séparation par Milieux Denses

1. Généralités et Principe

La séparation par milieux denses est une méthode de séparation gravimétrique qui a connu un essor fulgurant après la Deuxième Guerre Mondiale. Elle repose essentiellement sur les propriétés physiques du minerai à traiter, plus particulièrement de la densité des divers minéraux le composant (propriétés pondérales).

Après un broyage préalable à plus de $300\mu\text{m}$ (et jusqu'à 200mm dans le cas du charbon), un lavage et un égouttage, le minerai est plongé dans un médium de densité connue, intermédiaire entre celles des minéraux à séparer. Les minéraux dont la densité est inférieure à celle du médium flotteront à la surface du système obtenu. Les minéraux de densité supérieure plongeront au fond. Il devient ainsi facile de récupérer les deux phases et de recycler le médium dans un circuit fermé, de façon à réduire les coûts de l'opération.

Cette méthode de séparation se montre très efficace pour des différences de densité allant jusqu'à $\Delta\rho = 0.1$, voire 0.05 pour certains types de minerais et/ou d'appareillages. Concernant le médium utilisé, certaines conditions sont néanmoins exigées, notamment sur sa viscosité, qui ne doit pas être trop élevée sous peine de gêner l'évolution des particules qui s'y déplacent, ni trop faible car elle risquerait d'influer sur sa stabilité et transformerait la solution en un simple fluide newtonien.

Le procédé nécessite une connaissance poussée de la densité et de la maille de libération des minéraux. Cette maille de libération correspond à la granulométrie en-dessous de laquelle les particules minérales sont entièrement et parfaitement libérées, c'est-à-dire que chaque particule de minerai n'est formée que d'une seule espèce minérale. L'importance de la granulométrie est aisément compréhensible, dans la mesure où la séparation par milieux denses joue principalement sur les différences de densité entre les minéraux. Il est donc primordial d'avoir la meilleure séparation possible, de manière à optimiser le rendement de l'opération en modifiant le moins possible les densités des particules en suspension.

2. Types et préparation des médiums

2.1. Liqueur dense

C'est une solution de densité définie et fixe, obtenue dans des conditions spécifiques de température et de pression. Le plus souvent, les liqueurs denses sont des composés organiques de faible viscosité [3]. On pourra citer comme exemple de liqueurs le bromoforme (densité=2,89), le polytungstate de sodium ($d=3,1$), le liquide de Thoulet ($d = 3,19$), l'iodure de méthylène ($d=3,33$) et la solution de Clerici (d pouvant aller jusqu'à 5).

Le principal inconvénient de ces liqueurs est leur volatilité et leur toxicité, ce qui nécessite la prise de précautions spécifiques lors de leur utilisation (hotte aspirante, ventilation adéquate du lieu de travail, port obligatoire du matériel de protection...). Par ailleurs, elles sont le plus souvent très coûteuses et difficilement recyclables. Pour ces raisons elles sont généralement utilisées en laboratoire, pour des travaux de recherche ; dans l'industrie, on leur préférera plutôt les pseudo-solutions.

2.2. Pseudo-solution

Une pseudo-solution est préparée à base d'eau et d'une substance minérale finement broyée à un diamètre tel que les particules en suspension dans l'eau auront une vitesse de chute négligeable. Le minéral choisi pour ce faire est généralement ferreux (pyrite, ferrosilicium) pour en faciliter le recyclage par le biais d'une séparation magnétique. Dans le cas du ferrosilicium, qui est un eutectique de fer et de silicium, on devra maintenir le pourcentage de silicium aux environs de 15 à 15,5% ; au-dessous de ce pourcentage, le fer se corrode dans l'eau et au-dessus, ses propriétés magnétiques diminuent et rendent difficile sa récupération par séparation magnétique [1].

Selon le prix de revient, la disponibilité et la nature du minerai à traiter, on pourra utiliser d'autres matériaux que le ferrosilicium pour la confection d'une pseudo-solution, comme le sable de carrière, l'orthose ou la galène. Le solide choisi devra alors remplir certains critères, dans le but de ne pas entraver le bon déroulement de l'extraction :

- Etre suffisamment dur de façon à ne pas se surbroyer et se transformer en schlamms en conditions opératoires ;
- Etre chimiquement stable dans l'eau et ne pas réagir au contact du minerai à traiter ;
- Posséder une densité spécifique suffisamment importante pour fournir à la pseudo-solution la densité nécessaire en étant présent à moins de 35% en volume ;
- Etre facilement récupérable et nettoyable. [3]

Dans tous les cas, la pseudo-solution ne devra pas comporter plus de 35% en solide ; autrement, elle serait trop visqueuse, ce qui serait problématique pour la circulation des particules dans le médium, diminuant ainsi le rendement de la séparation.

3. Récupération et Recyclage

3.1. Liqueur dense

Une liqueur dense peut être réutilisée et réinjectée dans le circuit. Pour la récupérer, il suffit de laver et filtrer la solution, afin de la débarrasser du minerai. Elle est facilement réutilisable plusieurs fois. Cependant, il faut réviser sa densité régulièrement, car des effets de dilution suite au lavage sont généralement observés, ce qui est l'un des principaux inconvénients des médiums de ce type.

Indépendamment de ces risques, on doit également éviter le vieillissement de la solution et son altération suite à une exposition prolongée à l'air libre. Ainsi, le bromoforme a tendance à jaunir et à se décomposer à la lumière. Par ailleurs, certaines liqueurs comme la solution de Clerici sont hautement toxiques et/ou corrosives. Il convient donc de redoubler les mesures de sécurité en les manipulant.

3.2. Pseudo-solution

Généralement, les matériaux utilisés pour la préparation de pseudo-solutions sont ferreux, du fait de la facilité de leur récupération. En effet, le meilleur moyen pour récupérer un médium ferreux est de procéder à une séparation magnétique. Ainsi, on débarrassera aisément les fractions minérales séparées et le médium des particules ferreuses, qui seront réutilisées dans la préparation d'une nouvelle pseudo-solution de densité. La dilution n'est donc pas à craindre pour ces médiums, puisque l'on pourra maîtriser la confection de la nouvelle pseudo-solution, et par conséquent sa densité.

L'efficacité du procédé de récupération occasionnera des pertes en médium n'allant pas au-delà de 100 à 1000g/t [2].

4. Appareillages

Selon le principe de fonctionnement, on divise les appareils en deux catégories : statiques et dynamiques.

4.1. Appareils Statiques

Ce sont des appareils ne faisant appel à aucune force autre que celles exercées dans le système minéral-médium. Il s'agit des appareils les plus grands et les plus productifs, car ils sont efficaces même avec des granulométries grossières. On peut citer comme exemples :

4.1.1. Séparateurs à tambour

Comme l'indique la figure 2.5., ils sont munis d'une auge qui tourne et relève les plongeurs et la séparation est effectuée par soutirage continu de ceux-ci [2], [4].

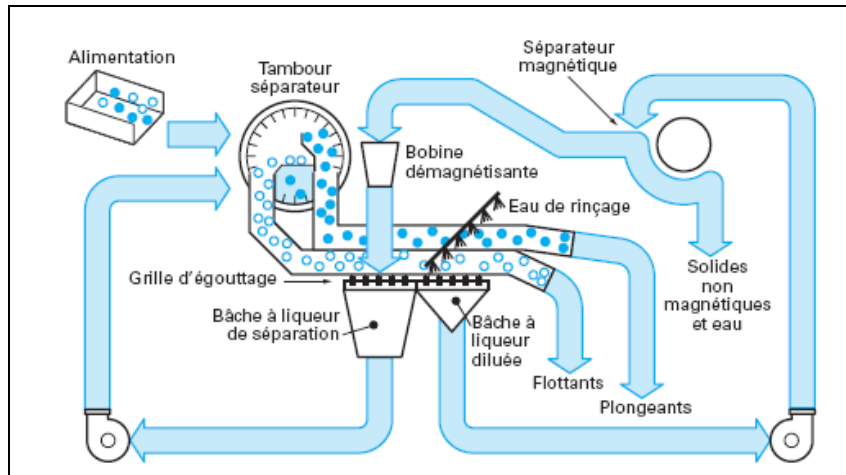


Figure 2.5.

Schéma d'un séparateur à tambour

4.1.2. Cônes ou bacs

Contrairement aux séparateurs à tambour, l'auge y est fixe. Dans ce cas, les plongeurs sont relevés soit à l'aide d'un courant de liqueur, soit à celle d'une roue (verticale ou inclinée). La figure 2.6. représente une photographie de cône Wemco.



Figure 2.6.

Photo d'un cône Wemco

4.2. Appareils Dynamiques

Ils font appel à une force centrifuge, pour une meilleure classification des particules en aidant à leur séparation, et en luttant contre la viscosité du médium. Ils présentent l'avantage d'être efficaces même à une densité de coupure supérieure à celle de la séparation. [2].

Pour ce type d'appareils, on pourra mentionner :

4.2.1. Séparateurs Dyna-Whirlpool

Ils sont constitués d'un cylindre incliné. Le minerai est injecté axialement, et la liqueur tangentielllement. Ces séparateurs admettent des débits d'au moins 100t/h, pour des particules allant jusqu'à 50mm. [2] La figure 2.7. représente une coupe transversale dans un séparateur Dyna-Whirlpool.

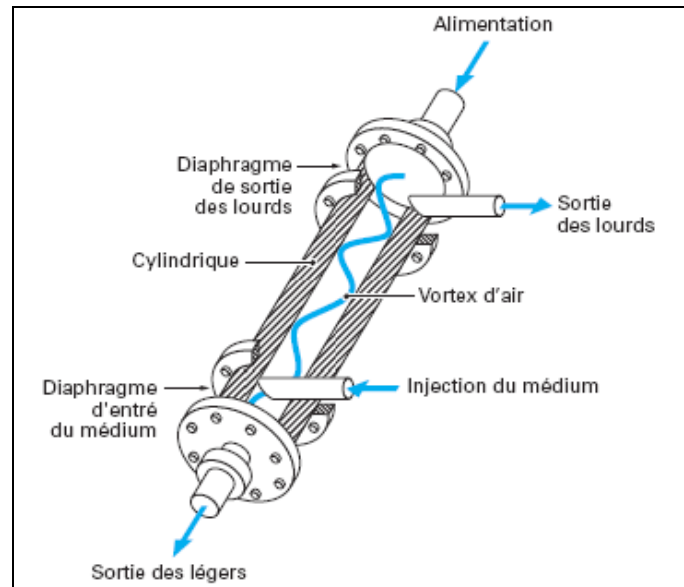


Figure 2.7.

Schéma d'un séparateur Dyna-Whirlpool

4.2.2. Cyclones à eau

Ce sont des cyclones classificateurs où le liquide séparateur est l'eau. L'intensité des forces intervenant lors de la séparation est inversement proportionnelle à l'angle d'inclinaison. Ils peuvent traiter des débits de 65t/h, pour des diamètres allant jusqu'à 30 mm.

Généralement utilisés pour le charbon, ils sont toutefois exceptionnellement utilisables pour la concentration de l'or.

III – Flottation

1. Généralités et principe

La flottation est un procédé de traitement physico-chimique basé sur les propriétés superficielles des particules minérales, selon qu'elles soient en contact avec de l'air ou de l'eau. Dans cette optique, on met en suspension dans de l'eau les particules de minerai finement broyées, puis on conditionne le mélange minerai/eau (ou pulpe) avec un réactif chimique appelé collecteur, dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface de la substance à flotter, afin que celle-ci soit plus encline à adhérer aux bulles d'air qu'aux particules d'eau.

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

2. Mécanismes

Le processus de récupération d'un minéral par flottation fait appel à trois mécanismes principaux [4] :

- Affinité sélective des particules pour les bulles d'air, autrement dit leur hydrophobicité, qui leur permettra de se fixer plus facilement sur les particules d'air ;
- Entraînement des particules dans l'eau passant à travers la mousse depuis le fond de la cellule, ce qui représente l'action du collecteur sur ces particules et la première étape de leur récupération proprement dite ;
- Piégeage des particules dans la mousse (ou agrégation), ce qui schématise l'action du moussant sur la stabilité de l'écume et constitue la dernière étape de la récupération du concentré.

Contrairement au premier mécanisme, où s'opère une sélectivité chimique des espèces minérales suivant leurs propriétés surfaciques, aussi bien la gangue que les minéraux utiles sont susceptibles d'être affectés lors de l'entraînement et du piégeage [4]. Les particules sont ainsi retenues dans la mousse, sans aucune forme de distinction, ce qui a pour effet de réduire le rendement de la flottation et sa sélectivité. Par ailleurs, la stabilité de la mousse joue également un rôle capital dans le bon déroulement de l'opération.

2.1. Potentiel Zêta

Appelé également potentiel surfacique, le potentiel zêta est un paramètre définissant la charge superficielle d'une particule.

Lors du broyage, la destruction de l'unité d'un minéral fait apparaître des charges à la surface des fragments libérés [5] ; ces charges définissent un potentiel surfacique, ou potentiel zêta, sur lequel reposent les bases de la flottation.

Comme il a été précédemment dit, le principe de la flottation est de rendre les surfaces des minéraux hydrophobes, de façon à ce que leur affinité sélective pour l'air soit plus importante que celle pour l'eau, et qu'ils puissent être entraînés en surface. Lorsque le potentiel zêta d'une solution ou d'une suspension est élevé (positivement ou négativement), celle-ci est stable et résistera à une éventuelle agrégation. En revanche, plus le potentiel zêta est faible, plus la suspension aura tendance à se rompre et à flocculer [4]. Et lorsque leur potentiel zêta est nul, les particules minérales deviennent hydrophobes.

Par conséquent, lors de l'opération de flottation, on tâchera d'influer sur le potentiel zêta par le biais du pH du milieu et du broyage des minéraux, notamment. Plus on se rapproche du potentiel nul, plus l'action du collecteur est facilitée et meilleur sera le rendement de l'opération.

3. Paramètres influant sur l'opération de flottation

3.1. Influence du broyage

La préparation mécanique d'un minerai avant sa flottation revêt une importance considérable, car le degré ainsi que le mode de broyage ont une influence directe sur le rendement de l'opération. En effet, il faut en premier lieu que la maille de libération du minéral à extraire soit atteinte, de façon à obtenir une récupération optimale du minéral avec un minimum de gangue. Par ailleurs, il est absolument nécessaire d'éviter le surbroyage du minerai qui aurait pour effet de créer un phénomène d'adagulation, ou *slime coating* (littéralement : recouvrement par les ultrafines) ; les ultrafines, ou schlamms, recouvrent les particules minérales, gênant ainsi la fixation du collecteur et diminuant le rendement de l'opération.

3.2. Influence du pH

De même que pour le broyage, le pH possède une influence certaine et non-négligeable sur le rendement d'une opération de flottation. De fait, le pH du milieu agit directement sur le potentiel surfacique des particules. Ainsi, on définit le Point de Charge Nulle (PCN ou PZC, *Point of Zero Charge*), pour lequel le potentiel zêta d'une particule minérale est nul, et qui est atteint à un pH déterminé. On comprendra aisément l'intérêt présenté par le PCN lors de la flottation, car il facilite l'action du collecteur, ce qui conduit à une réduction de sa consommation ; dans certains cas, on peut même se passer de l'utilisation du collecteur [5].

3.3. Influence de la température

Il est difficile de déterminer l'influence de la température sur un procédé de flottation. D'après Jdid et Blazy, elle peut affecter les interactions ion à flotter-collecteur, ou alors la stabilité du collecteur utilisé. Dans les deux cas, son action peut être bénéfique ou non, mais elle reste peu aisée à prévoir. [5]

4. Réactifs utilisés

4.1. Collecteur

C'est un réactif qui agit sur la surface des minéraux à valoriser afin d'augmenter son hydrophobicité, et ainsi faciliter la fixation des bulles d'airs dessus. Le collecteur est un composé chimique organique hétéropolaire, possédant un pôle chargé et une chaîne carbonée neutre. Le mécanisme d'action du collecteur est le suivant : la tête polaire va se fixer sur la surface de la particule dont la charge a été acquise lors du broyage, et la chaîne organique va, par adsorption, rendre la surface de la particule hydrophobe. Ce mécanisme est schématisé sur la figure 2.8.

Les collecteurs sont divisés en deux groupes :

- *Ioniques* : Se partageant eux-mêmes en collecteurs **anioniques** (comme les Xanthates, Aerofloats...), **cationiques** (Amines, Aeropromoters...) et **amphotères** (Amines acides...)
- *Non-ioniques* : Ils sont utilisés pour les minéraux possédant une flottabilité naturelle, dans le but d'optimiser leur récupération ; ce sont généralement des hydrocarbures [1]

Le collecteur est donc l'un des principaux réactifs entrant en jeu lors de la flottation. Son interaction avec les particules minérales fera que les bulles d'air auront plus de facilité à se fixer sur le minéral à flotter, et le faire ainsi remonter à la surface plus aisément.

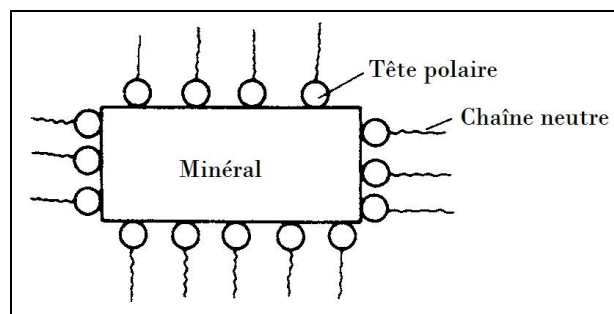


Figure 2.8.

Schéma illustrant le principe du collecteur

4.2. Activant

Un activant est un réactif qui altère la nature chimique de la surface des particules minérales pour la rendre hydrophobe suite à l'action du collecteur [4]. Il contribue donc à une meilleure fixation du collecteur sur les surfaces minérales.

Généralement, les activateurs sont des sels solubles qui s'ionisent en solution. Les ions réagissent alors avec les surfaces minérales pour former de nouveaux composés, peu solubles, qui se déposent de nouveau sur ces surfaces et forment avec le collecteur un film hydrophobe qui permettra la récupération des minéraux voulus.

4.3. Dépressant

Dans certains cas, il arrive qu'un collecteur agisse sur toute une famille de minéraux en présence dans un même minerai. Lorsqu'on veut procéder à une flottation sélective sur un tel type de minerai, on utilise alors un dépressant (ou déprimant).

Le rôle du dépressant est d'annuler l'effet du collecteur sur certaines surfaces minérales précises, et ainsi de faire plonger les minéraux que l'on ne veut pas flotter, en évitant par-là leur piégeage dans le produit de mousse. Le mécanisme d'action est donc de développer la charge superficielle d'une espèce minérale en particulier, et ainsi d'augmenter ses propriétés hydrophiles, ce qui conduit inmanquablement à la faire plonger au fond de la cellule.

Les dépressants peuvent être inorganiques ou polymères, quoique la plupart de ceux actuellement utilisés soient inorganiques.

4.4. Moussant

Le moussant est un surfactant permettant l'obtention d'une mousse stable, solide, mais aussi facilement abattable à son extraction. Il favorise la fixation et la minéralisation des bulles d'air sur la surface de la cellule, évitant ainsi qu'elles n'éclatent et que les particules minérales qui y sont collées ne retombent en fond de cellule.

Le moussant possède trois fonctions principales :

- Créer des interfaces liquide-gaz importantes en réduisant la taille des bulles et régularisant leur forme ; plus sphériques et plus petites, les bulles remontent plus facilement et plus lentement à la surface, et leur finesse augmente la surface de l'interface liquide-gaz.
- Faciliter la fixation des particules sur les bulles d'air par coadsorption avec le collecteur.
- Stabiliser la mousse à la surface de la cellule, ce qui permet une meilleure récupération du minerai à flotter, tout en évitant de le mélanger avec les autres minéraux en présence dans la pulpe. [4]

Même si quelques substances inorganiques peuvent donner de bonnes mousses, les moussants les plus efficaces restent organiques [6]. Quoiqu'il en soit, l'une des principales exigences sur ces réactifs est qu'ils doivent avoir une très faible capacité collectrice, pour conserver toute la sélectivité de la flottation et éviter de perturber son rendement.

Le mécanisme d'adsorption du moussant est schématisé sur la figure 2.9.

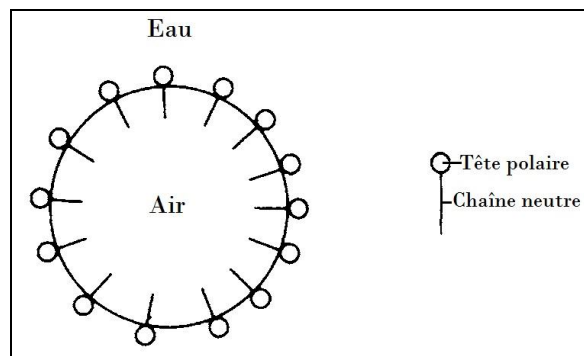


Figure 2.9.

Schéma illustrant le mécanisme d'adsorption du moussant

4.5. Régulateur de milieu

Un régulateur est un réactif déterminant le degré d'acidité ou d'alcalinité de la pulpe. Il s'agit d'acides ou de bases, utilisés pour régler le pH du milieu qui, comme indiqué précédemment, possède une grande influence sur le rendement d'une opération de flottation.

Pour certains types de minerais, on constatera ainsi qu'un même collecteur peut agir différemment sur une famille de minéraux à pH acide, et sur une autre à pH basique.

5. Types de Flottation

Selon les besoins de l'industrie concernée et l'intérêt économique pour telle ou telle substance minérale, on définira deux types de flottation : directe et inverse. Celles-ci se distinguent l'une de l'autre par le procédé selon lequel on cherche à récupérer les minéraux à concentrer. Ces derniers doivent donc être préalablement définis. Par souci de clarté, on appellera par la suite *substance utile* le produit à concentrer, et *gangue* le reste.

5.1. Flottation Directe

Lors de ce procédé, on cherche à extraire prioritairement la substance utile comme produit de mousse et on laisse la gangue plonger en produit de cellule. On effectuera donc une flottation directe du minéral utile. Cette flottation est généralement utilisée pour récupérer des petites quantités valorisables présentes dans une gangue importante, ou purifier le produit de cellule des impuretés qui y sont présentes.

5.2. Flottation Inverse

En revanche, ce procédé consiste à faire flotter la gangue, en laissant la substance utile en produit de cellule. Dépendamment des quantités à récupérer et des réactifs nécessaires, il peut parfois être plus intéressant d'effectuer une flottation inverse de la substance utile, notamment lorsque la flottation sélective de certains minéraux s'avère difficile à effectuer car demandant des conditions particulières qu'il est ardu d'obtenir et de conserver.

6. Appareillage

Selon le principe de création des bulles d'air, on distingue deux types d'appareils : *cellule* et *colonne* de flottation.

6.1. Cellule de flottation

Ce sont des machines à agitation mécanique. Elles sont généralement constituées d'une cuve parallélépipédique ou cylindrique et l'agitation est assurée par un ensemble rotor-stator. L'air est introduit dans la cellule par l'axe creux du rotor, via un tube extérieur à l'axe ou par un système de tuyauterie situé sous le rotor. La pulpe est en général introduite latéralement dans la cellule, les mousses sont récupérées soit par débordement, soit mécaniquement par des pales tournantes. Le produit non-flotté passe directement dans la cellule suivante.

La figure 2.10. représente une coupe transversale d'une cellule de flottation.

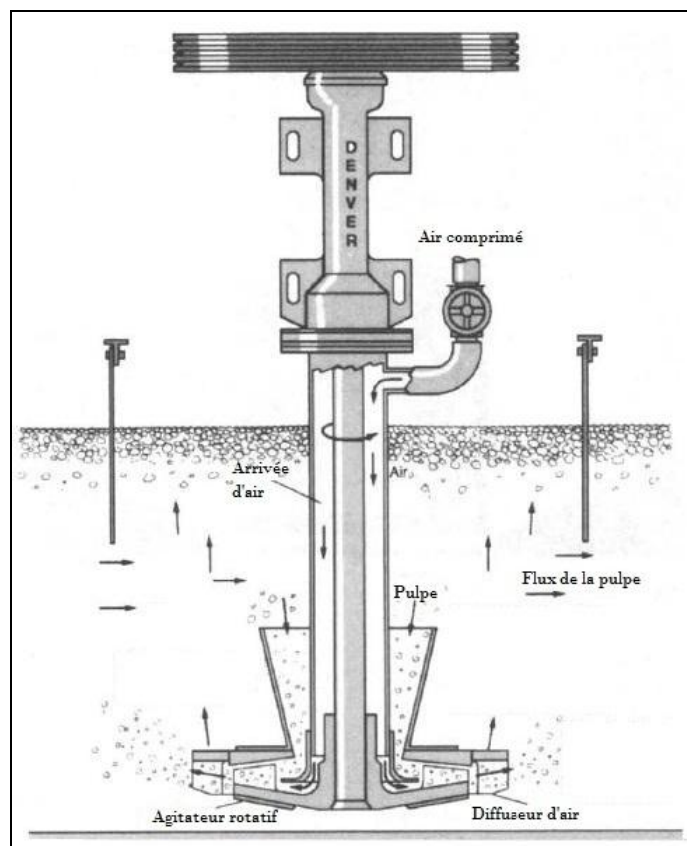


Figure 2.10.

Coupe transversale d'une cellule de flottation

6.2. Colonne de flottation

Ce sont des cellules ne comportant généralement pas d'agitation mécanique. L'air y est introduit par un générateur de bulles, en fond de cellule. Quant à la pulpe, elle est injectée à environ les deux tiers de la hauteur de la colonne [7]. Les particules solides cheminent à contre-courant du flux des bulles. Les mousses recueillies à la partie supérieure sont lavées par aspersion d'eau. La figure 2.11. représente une coupe transversale d'une colonne de flottation :

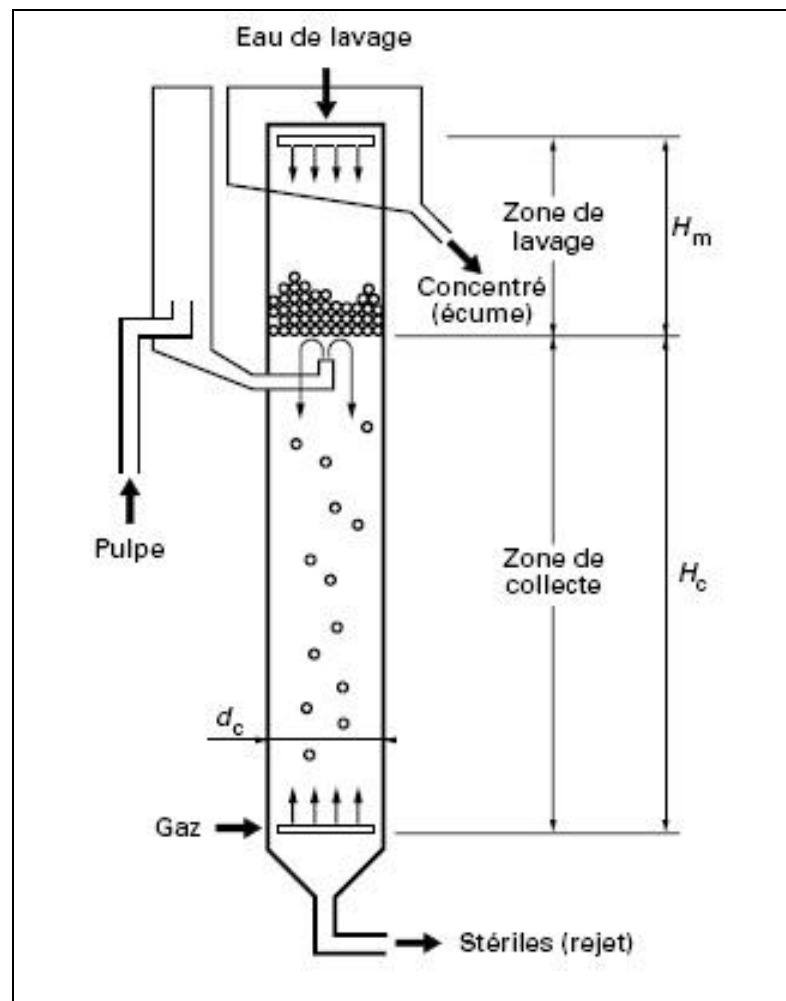


Figure 2.11.

Coupe transversale d'une colonne de flottation

Chapitre III : Partie expérimentale

I – Préparation mécanique

1. Concassage

Le concassage a été effectué à l'aide du concasseur giratoire du laboratoire de minéralurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique, après une réduction préalable au marteau des échantillons trop volumineux.

2. Tamisage

Après concassage, nous avons procédé à un tamisage préalable avec un tamis à maille carrée de 3,15 mm d'ouverture. Les passants feront l'objet des différents essais de valorisation dont il est sujet dans le présent travail.

3. Echantillonnage

L'échantillonnage nous permet de diviser une quantité donnée d'un minerai, de manière à en obtenir une partie représentative, tout en conservant ses propriétés initiales. Il se fait selon les méthodes suivantes :

3.1. Quartage manuel

On dispose le minerai sur une surface plane en formant un parallélépipède de faible épaisseur. Après brassage, on le partage en quatre quarts équitables, et on choisit deux quarts opposés que l'on gardera comme échantillons. Le reste constituera un stock témoin.

On peut aussi procéder en formant un cône que l'on aplatira de manière à obtenir un cylindre de faible épaisseur. On divisera de la même manière que celle décrite précédemment, par deux axes perpendiculaires.

On réitère l'opération jusqu'à ce qu'on atteigne la quantité voulue.

3.2. Diviseur à couloirs

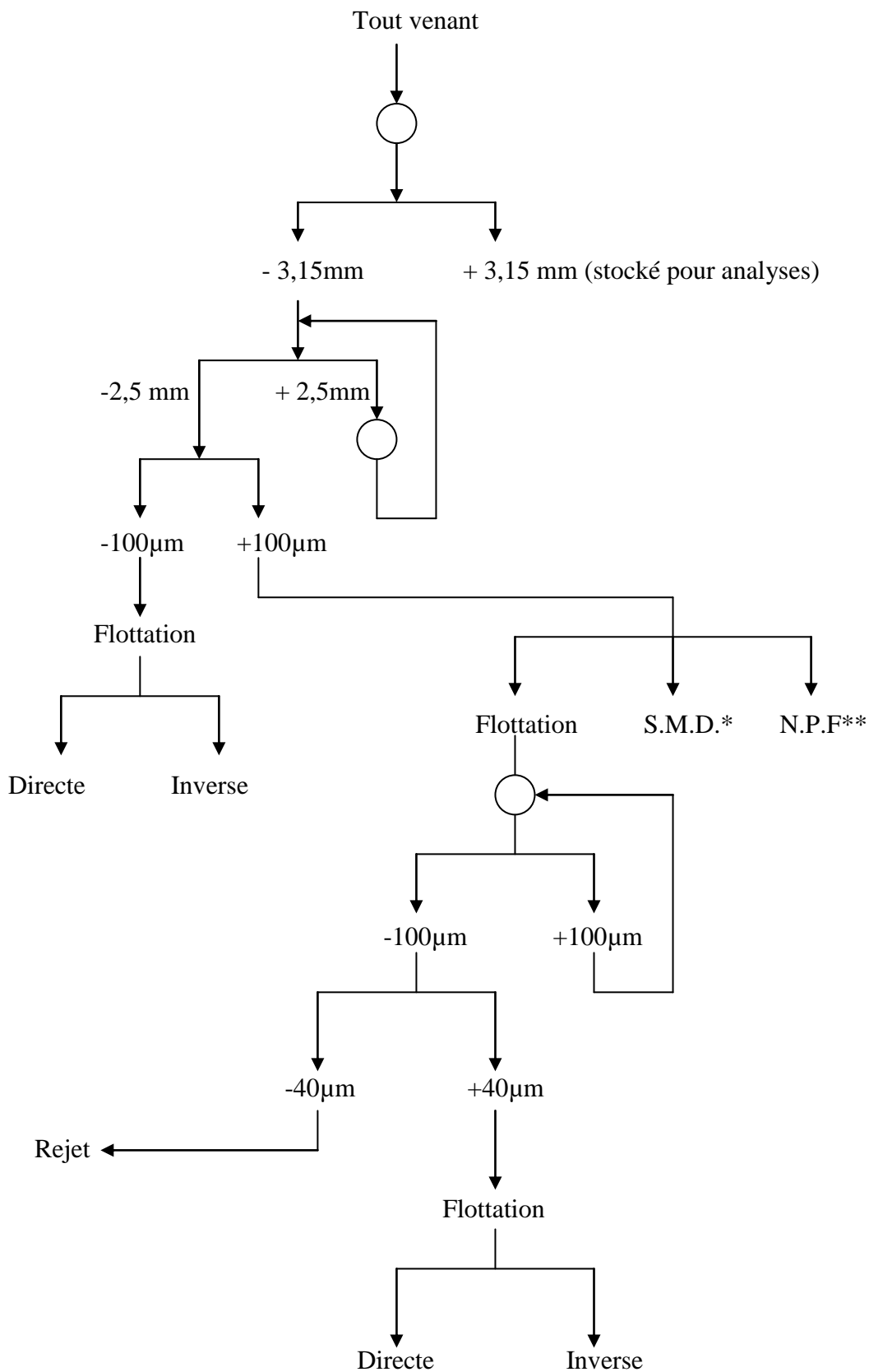
C'est un instrument qui divise une quantité d'un matériau donné (sec ou légèrement humide) en deux parties représentatives et homogènes. Une partie fera l'objet des analyses et diverses manipulations nécessaires, l'autre constituera un stock témoin.

La largeur des couloirs doit être supérieure à $2D$, où D est la dimension maximale des éléments. Le diviseur que nous avons utilisé au laboratoire a une ouverture de 12mm.

On verse l'échantillon en veillant à répartir la quantité bien au centre et sur toute la largeur du diviseur. Si la quantité est trop importante, on réitère l'opération jusqu'à obtention de l'ordre de grandeur nécessaire.

Les différentes étapes suivies par le minerai depuis son arrivée de la carrière sont représentées dans le flow-sheet ci-après :

Schéma technologique général



* : Séparation par Milieux Denses
 ** : Séparation par Nappe Pelliculaire Fluite

II – Analyse granulométrique

1. Courbes granulométriques

L'analyse granulométrique est préalablement nécessaire, dans le but de connaître la distribution granulométrique et le comportement de la roche lors du concassage.

A partir de ces résultats, on peut déterminer le degré de concassage, qui est un indice permettant de définir jusqu'où et comment concasser, et d'éviter les fractions qui ne sont pas exploitables.

L'analyse est effectuée par tamisage à l'aide d'une série de tamis Retsch ISO 3310, sur une tamiseuse Retsch AS200.

Le choix des tamis s'est fait à partir de la formule $D_{\text{inf}}=D_{\text{sup}}/1,189$ représentant la série normalisée américains de tamis Tyler, habituellement numérotés en mesh (voir Annexe 1).

Où D_{sup} : est l'ouverture du premier tamis de la colonne.

D_{inf} : est l'ouverture du tamis suivant. [8][9]

Nous avons considéré que le premier tamis avait une ouverture de 3,15 mm.

Le tamisage a été effectué en 3 séries de 5 tamis chacune, sur une durée de 15 mn.

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Diamètre du Tamis (mm)	Passant de P (g)	Passant de K (g)
+2.500	1424.7	1077.7
-2.500 à +2.000	1126.1	958.9
-2.000 à +1.600	798.5	798
-1.600 à +1.250	562.1	663.3
-1.250 à +1.000	408	566.2
-1.000 à +0.800	287.7	501
-0.800 à +0.630	211.8	432.5
-0.630 à +0.500	160.8	381.7
-0.500 à +0.400	124.5	342
-0.400 à +0.315	96.6	304.4
-0.315 à +0.250	72.2	265.1
-0.250 à +0.200	57.4	234.3
-0.200 à +0.160	45.1	203.4
-0.160 à +0.100	29.2	158.7
-0.100 à +0.080	22	129.4
-0.080 à +0.000	0	0
Poids Initial	1566.3	1124.8
Pertes	8.3	9.3

Tableau 3.1.

En pourcentages, les passants se présentent comme suit :

Diamètre du Tamis (mm)	Passant de P (%)	Passant de K (%)
+2.500	91.44	96.61
-2.500 à +2.000	72.28	85.96
-2.000 à +1.600	51.25	71.54
-1.600 à +1.250	30.08	59.46
-1.250 à +1.000	26.19	50.76
-1.000 à +0.800	18.47	44.91
-0.800 à +0.630	13.59	38.77
-0.630 à +0.500	10.32	34.22
-0.500 à +0.400	7.99	30.66
-0.400 à +0.315	6.20	27.29
-0.315 à +0.250	4.63	23.76
-0.250 à +0.200	3.68	21.00
-0.200 à +0.160	2.89	18.23
-0.160 à +0.100	1.87	14.23
-0.100 à +0.080	1.41	11.60
-0.080 à +0.000	0	0
Poids Initial	1566.3	1124.8
Pertes	8.3	9.3

Tableau 3.2.

Les courbes des passants, pour la pegmatite et le kaolin, se présentent comme suit :

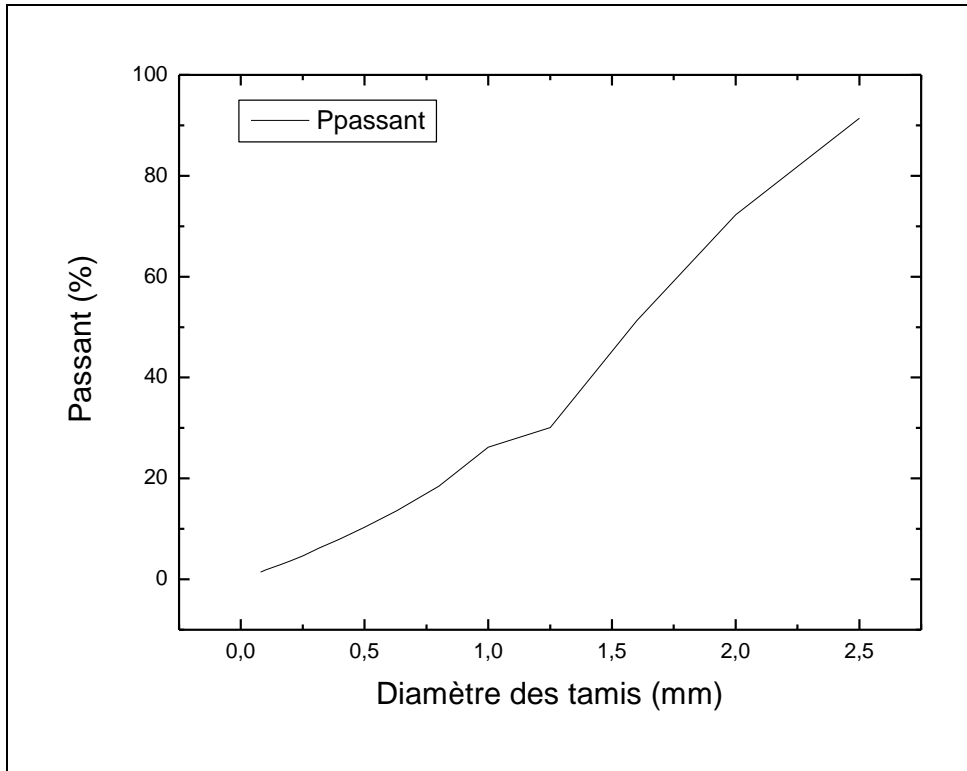


Figure 3.1

Graphe représentant la courbe des passants de la pegmatite en fonction des diamètres des tamis

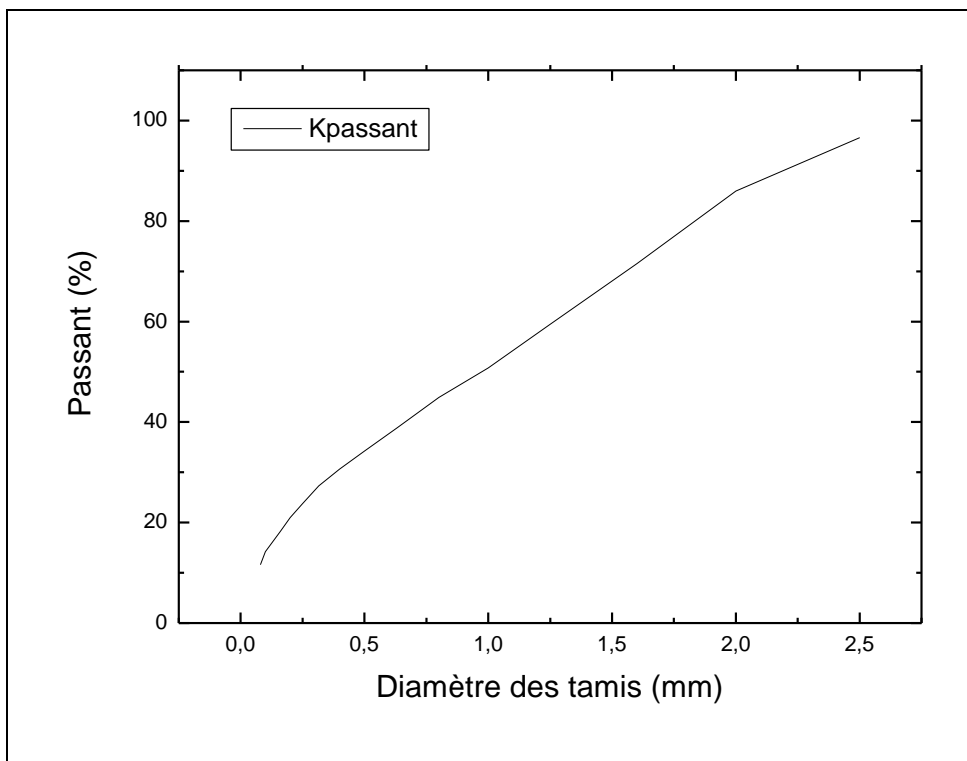


Figure 3.2.

Graphe représentant la courbe des passants du kaolin en fonction des diamètres des tamis

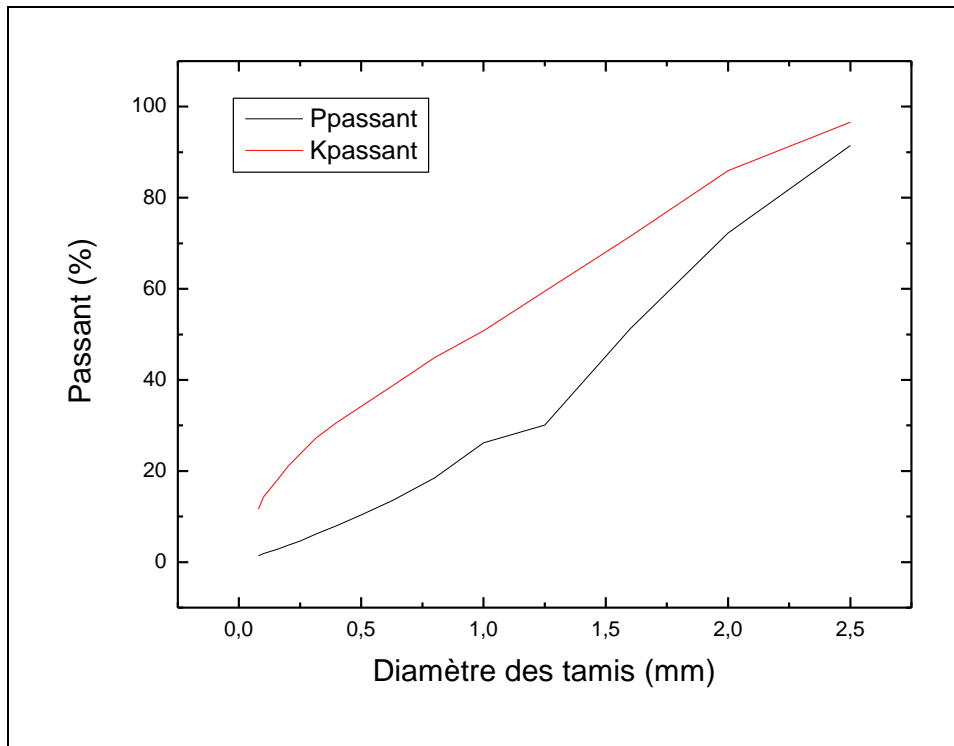


Figure 3.3.

Graphe représentant les courbes des passants de la pegmatite et du kaolin en fonction des diamètres des tamis

2. Interprétation des résultats

Les précédents graphes (figure 3.1. à 3.3.), représentent les courbes des refus par rapport aux diamètres des tamis utilisés. Ils nous renseignent sur la dureté et/ou la friabilité des roches étudiées. Dans notre cas, on constate que la répartition des refus de la pegmatite est principalement déplacée vers les grandes granulométries. La roche est donc dure, ce qui est par ailleurs confirmé par l'observation à l'œil nu. En revanche, la majeure partie du kaolin est répartie principalement entre les grandes granulométries et les très fines. On en conclut donc que la roche est inhomogène, contenant des inclusions dures et massives dans une matrice friable et altérée, ce qui est également confirmé par l'observation directe des échantillons.

Faute de moyens adéquats, il nous a été impossible d'effectuer une analyse granulochimique, qui aurait pu et dû compléter l'analyse granulométrique.

III – Séparation par nappe pelliculaire fluante

Comme il a été précédemment dit, la séparation des minéraux par nappe pelliculaire fluante est une méthode grandement utilisée en industrie, car elle ne demande pas d'autre préparation qu'un concassage et un éventuel broyage. En revanche, son principal inconvénient dans un pays comme l'Algérie réside dans sa très grande consommation en eau, bien que l'on puisse dimensionner l'usine de traitement de façon à ce qu'un circuit de recyclage et de recirculation de l'eau soit prévu.

Des quatre principaux modes de séparation par nappe pelliculaire fluante, nous avons pu tester au laboratoire de l'Ecole deux d'entre elles : la table à secousses et la spirale.

1. Table à secousses

Nous avons disposé au niveau du laboratoire de l'ENP d'une table à secousses de type KHD Humboldt Wedag. Il s'agit d'une Labor-Schnellstoßherd MN 936/3 dont les caractéristiques sont présentées en annexe.

1.1. Mode opératoire

Le datasheet stipule que la granulométrie pouvant être traitée sur cette table peut varier entre 1mm et 60 μ m, avec un débit d'eau d'environ 40L/mn. Après quelques manipulations préalables, nous avons choisi de fixer les pentes de la table à 2% pour la transversale, et 0,7% pour la longitudinale, ces deux pentes présentant une meilleure classification. Le débit d'eau maximal du robinet d'alimentation était fixé à 13 l/mn, ce qui correspond au débit fourni par le réseau de distribution communal. Nous avons effectué plusieurs essais à plusieurs granulométries comprises dans cette tranche, de façon à déterminer la fraction granulométrique optimale offrant le meilleur taux de récupération en muscovite. Les essais sont résumés dans les tableaux suivant :

1.1.1. Pegmatite

Echantillon	Granulométrie (mm)	Poids (g)
P01	1,6	30
P02	0,85	30
P03	0,5	30
P04	0,2	30
P05	0,1	30

Tableau 3.3.

1.1.2. Kaolin

Echantillon	Granulométrie (mm)	Poids (g)
K01	1,6	30
K02	0,85	30
K03	0,5	30
K04	0,2	30
K05	0,1	30

Tableau 3.4.

1.2. Résultats et discussion

On constate que pour les particules de granulométrie supérieure à 500 μm , il n'y a pratiquement pas de classification des minéraux ; le mica reste mélangé aux autres constituants des roches et est évacué avec eux à travers les sorties 1, 2 et 3 de la table (voir le datasheet présenté en annexe). En revanche, pour les particules de granulométrie inférieure, on constate une classification du mica vers l'extrémité des riffles. Néanmoins, il n'a pas été possible de le diriger vers une sortie donnée et lors de l'évacuation, il est rattrapé par les autres particules minérales. Pour des raisons indépendantes de notre volonté, il nous a été impossible de modifier le débit d'eau de lavage, mais il serait probable que son augmentation puisse aider à un meilleur contrôle de la trajectoire du mica.

On remarque également que pour des pentes supérieures à 2% transversalement et 0,7% longitudinalement, tous les éléments sont rejetés vers les sorties 2 et 3 de la table, sans distinction ni classification, et ce quelle que soit la granulométrie.

2. Spirales

Les spirales sont généralement utilisées lorsque le minerai à traiter comporte des minéraux dont les densités respectives sont passablement écartées les unes des autres. Nous avons malgré tout choisi d'observer la réaction de minerais de type pegmatite et kaolins, dans la mesure où le coefficient de forme des paillettes de mica intervient sur le poids des particules.

2.1. Mode opératoire

On possède au niveau du laboratoire une spirale Humphreys à 4 étages, de 65° de pente. L'alimentation se fait avec une pulpe à 40% en solide, de différentes granulométries, variant entre 2,5mm et 500µm. De plus, la spirale possède également une arrivée d'eau de lavage à débit variable, que l'on a fixé à 13 l/mn, ce qui correspond toujours au débit fixé par le réseau de distribution.

2.2. Résultats et discussion

Malgré les nombreuses tentatives sur de nombreuses granulométries comprises entre 2,5mm et 500µm, les résultats obtenus ne sont pas assez significatifs pour être interprétés. Quels que soient la granulométrie et le débit d'eau, on n'arrive pas à obtenir la moindre classification. Les paillettes de mica commencent à se rassembler vers l'intérieur de la spirale et sont rejointes par les autres particules au niveau du troisième étage, ce qui annule toute séparation des grains.

IV – Séparation par milieux denses

Il est généralement accepté dans le monde de la minéralurgie qu'une séparation par milieux denses peut se révéler efficace pour séparer des minéraux dont les différences de densité peuvent être de l'ordre de 0,1 à 0,05. Dans cette optique, nous nous sommes penchés sur cette méthode pour séparer le mica d'un tout-venant de pegmatite et de kaolin contenant majoritairement du quartz et du feldspath.

Les densités des minéraux à séparer sont les suivantes :

- Mica : 2,78 à 2,88 pour la muscovite et 2,8 à 3,2 pour la biotite ;
- Quartz : 2,65 ;
- Feldspath : 2,53 à 2,56 pour l'orthose et 2,61 à 2,77 pour le plagioclase.

On constate donc qu'il serait possible théoriquement d'avoir une bonne séparation en utilisant comme médium un milieu de densité intermédiaire entre 2,65 et 2,78. Pour diminuer les risques d'erreur, nous avons choisi d'utiliser un médium de densité égale à 2,70.

1. Préparation du médium

Pour des raisons de disponibilité, nous avons dû procéder à la séparation en utilisant du bromoforme, dont la densité spécifique est de 2,89 (voir fiche technique en annexe) que l'on a dilué avec du xylène jusqu'à atteindre une densité de 2,69, ce qui correspondait à 97% de bromoforme pour 3% de xylène.

2. Préparation du minerai

Nous avons procédé à divers essais sur différentes tranches granulométriques, et ce toujours dans un souci d'optimisation des résultats. Nous avons malgré tout été limités par le diamètre du robinet de l'ampoule à décanter utilisée pour la séparation (2,5mm) et par la taille minimale des grains tolérée pour une séparation par milieux denses (300 μ m [4]).

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-après :

2.1. Pegmatite

Echantillon	Granulométrie (mm)	Poids (g)
P01	1,6	30
P02	0,85	30
P03	0,5	30

Tableau 3.5.

2.2. Kaolin

Echantillon	Granulométrie (mm)	Poids (g)
K01	1,6	30
K02	0,85	30
K03	0,5	30

Tableau 3.6.

3. Mode opératoire

Dans une ampoule à décanter de 250mL de contenance, on verse 150 à 200mL de bromoforme dilué, puis on ajoute le minerai préalablement séché. Il faut bien faire attention à ce qu'il n'y ait pas la moindre présence humide dans le minerai ; le bromoforme n'étant pas miscible dans l'eau, il en résulterait l'apparition de deux phases liquides séparées, ce qui ne manquerait pas de gêner le bon déroulement de l'opération.

Une fois la séparation terminée, il suffit de récupérer les plongeants et flottants par simple soutirage. La liqueur dense est à son tour récupérée par filtration et les concentrés obtenus sont lavés avec de l'alcool pour les débarrasser de toute trace de bromoforme.

4. Rendement des récupérations

4.1. Pegmatite

Echantillon	Plongeants		Flottants	
	Poids (g)	Pourcentage (%)	Poids (g)	Pourcentage (%)
P01	3,01	10,03	26,17	87,23
P02	2,96	9,87	27,98	93,27
P03	3,08	10,27	26,89	89,63

Tableau 3.7.

4.2. Kaolin

Echantillon	Plongeants		Flottants	
	Poids (g)	Pourcentage (%)	Poids (g)	Pourcentage (%)
K01	2,84	9,47	27,13	90,43
K02	3,16	10,53	26,79	89,30
K03	3,02	10,07	25,89	86,30

Tableau 3.8.

5. Résultats et discussion

L'analyse à la binoculaire montre que les plongeants sont à 80% composés de micas des deux types (muscovite et biotite) et que le pourcentage restant peut être récupéré avec une seconde séparation. On constate cependant qu'une agitation est parfois nécessaire pour fournir une meilleure récupération des micas. Par conséquent, une séparation dans un système dynamique pourrait offrir des résultats plus intéressants.

Les figures suivantes montrent les différents résultats obtenus par cette méthode de séparation sur les deux échantillons de roches.

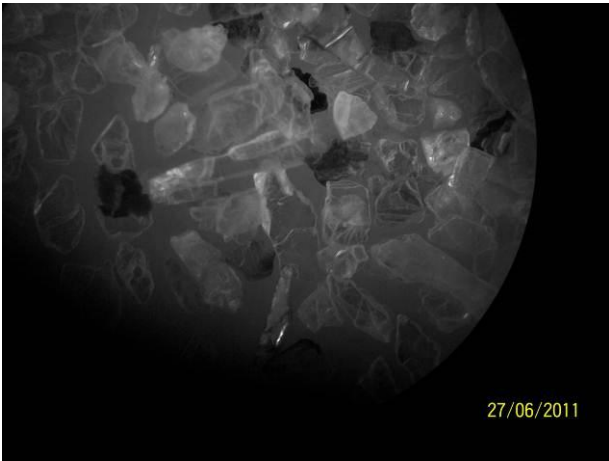


Figure 3.4.
Plongeants de pegmatite



Figure 3.5.
Flottants de pegmatite

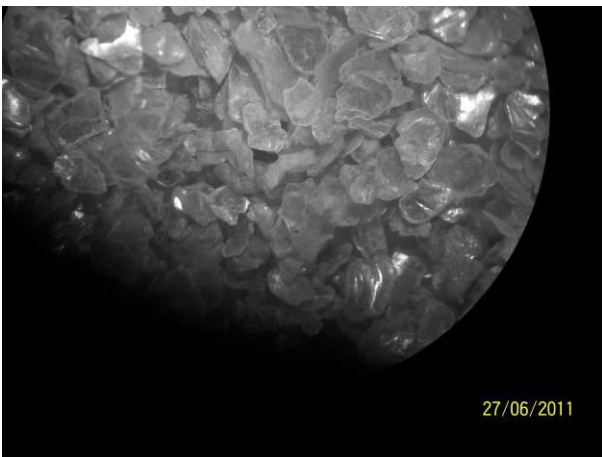


Figure 3.6.
Plongeants de kaolin

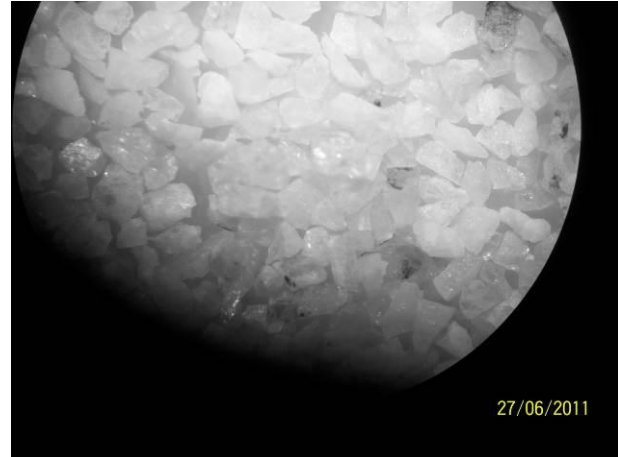


Figure 3.7.
Flottants de kaolin

V – Flottation

Comme il a été dit précédemment, la flottation est l'une des méthodes de séparations les plus utilisées en industrie, notamment parce qu'elle permet des taux de récupération élevés pour de faibles teneurs et de petites granulométries, et qu'elle ne nécessite pas des installations trop importantes.

Pour séparer le mica de la fraction feldspath-quartz, nous avons procédé aux deux types de flottation déjà cités, en choisissant le mica comme minéral à concentrer. Ainsi, nous avons effectué une flottation directe où celui-ci est récupéré directement dans la mousse, et une flottation inverse où on le fait passer en produit de cellule.

Lors des deux flottations, le minerai est concassé, séché, puis broyé à 100 μm et deschlammé à 40 μm par voie sèche par simple tamisage. On constate que la fraction de diamètre inférieur à 40 μm est plus importante pour le kaolin que pour la pegmatite. Il est donc préférable d'effectuer un deschlammage par voie humide car les ultrafines réduisent l'efficacité de la flottation. Par ailleurs, les analyses par diffraction des rayons X ont montré que pour les passants de 80 μm , la teneur en micas est faible. On pourra donc recycler les ultrafines dans le circuit de fabrication de la céramique si cela est jugé utile.

1. Flottation directe

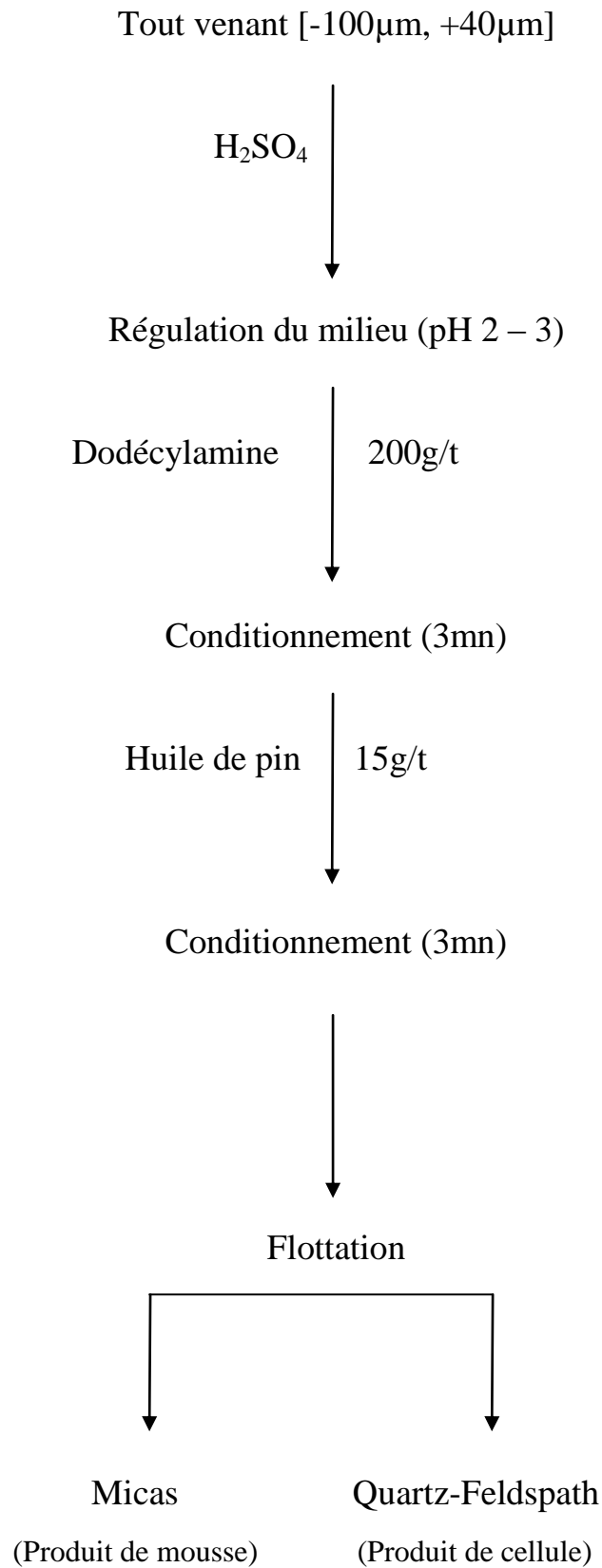
La flottation directe du mica nécessite l'utilisation d'un amine comme collecteur, et de l'acide sulfurique comme régulateur de milieu. Le moussant peut être un Aerofroth de la gamme proposée par la compagnie American Cyanamid, ou de l'huile de pin.

Pour des raisons de disponibilité, notre choix s'est porté sur le dodécylamine en tant que collecteur, et l'huile de pin en tant que moussant.

1.1. Mode opératoire

La cellule de flottation (type Denver D12) est remplie d'eau provenant du réseau de distribution communal, puis on ajoute le minerai de façon à obtenir une pulpe d'environ 25% en solide ; dans notre cas, l'essai comprend 250g de minerai pour 1L d'eau. Dans un premier lieu, l'on a effectué des essais sur du minerai brut, non broyé, en utilisant la fraction (+40 μ m, -100 μ m) issue du concassage préalable. 2 ou 3 minutes d'agitation sont nécessaires pour une bonne répartition du solide dans la pulpe. On ajoute alors 1mL de H₂SO₄ à 97%, de façon à réguler le milieu à pH = 2 à 3 ; le temps de conditionnement est de 2mn. Puis, on ajoute le dodécylamine à raison de 200g/t (0,05g pour notre essai) et après un conditionnement supplémentaire de 3mn, l'huile de pin à raison de 15g/t (2 gouttes pour notre essai). Après 3mn d'agitation, on procède à la flottation. On injecte l'air en maintenant la vitesse d'agitation de la cellule à 1200 tours/mn. Les différentes étapes sont représentées sur le flowsheet ci-après.

Schéma de flottation directe du mica



1.2. Consommation en réactifs

Pegmatite

Echantillons	Réactifs utilisés		
	H ₂ SO ₄ pur (mL)	Dodécylamine (g/t)	Huile de pin (g/t)
P 01	1	200	15
P 02	1	150	15
P 03	1	250	15

Tableau 3.9.

Kaolin

Echantillons	Réactifs utilisés		
	H ₂ SO ₄ pur (mL)	Dodécylamine (g/t)	Huile de pin (g/t)
K 01	1	200	15
K 02	1	150	15
K 03	1	250	15

Tableau 3.10.

1.3. Rendement de la flottation

Echantillons	Poids initial (g)	Produit de cellule		Produit de mousse	
		Poids (g)	%	Poids (g)	%
P 01	500	430,84	86,62	50,91	10,18
P 02	250	179,71	71,88	70,29	28,12
P 03	250	172,36	68,94	75,42	30,17
K 01	250	179,24	71,69	65,36	28,30
K 02	250	148,09	59,92	94,84	40,07
K 03	250	162,43	64,97	84,74	33,89

Tableau 3.11.

1.4. Résultats et discussion

On constate que ce schéma de flottation avec ces réactifs particuliers donne de très bons résultats lors de l'utilisation d'un minerai issu des passants du 100 μ m du concassage préalable. Cependant, lorsqu'on broie le minerai dans un broyeur à mortier type Pulverisette02.102 de Frisch, on ne note pas la moindre réaction de la pulpe lorsqu'on la traite avec le dodécylamine, et ce malgré un déschlammage par voie humide. On n'arrive à obtenir qu'une pseudo-écume peu stable, quasiment pas chargée en particules minérales, extrêmement fragile et éclatant dès qu'elle atteint la surface de la pulpe. L'opération a été réitérée plusieurs fois sur le même type d'échantillon broyé, sur les deux types de roches, en faisant varier les quantités de collecteur, de moussant, et le pH du milieu. Aucun changement dans la qualité de la pseudo-mousse n'a été remarqué.

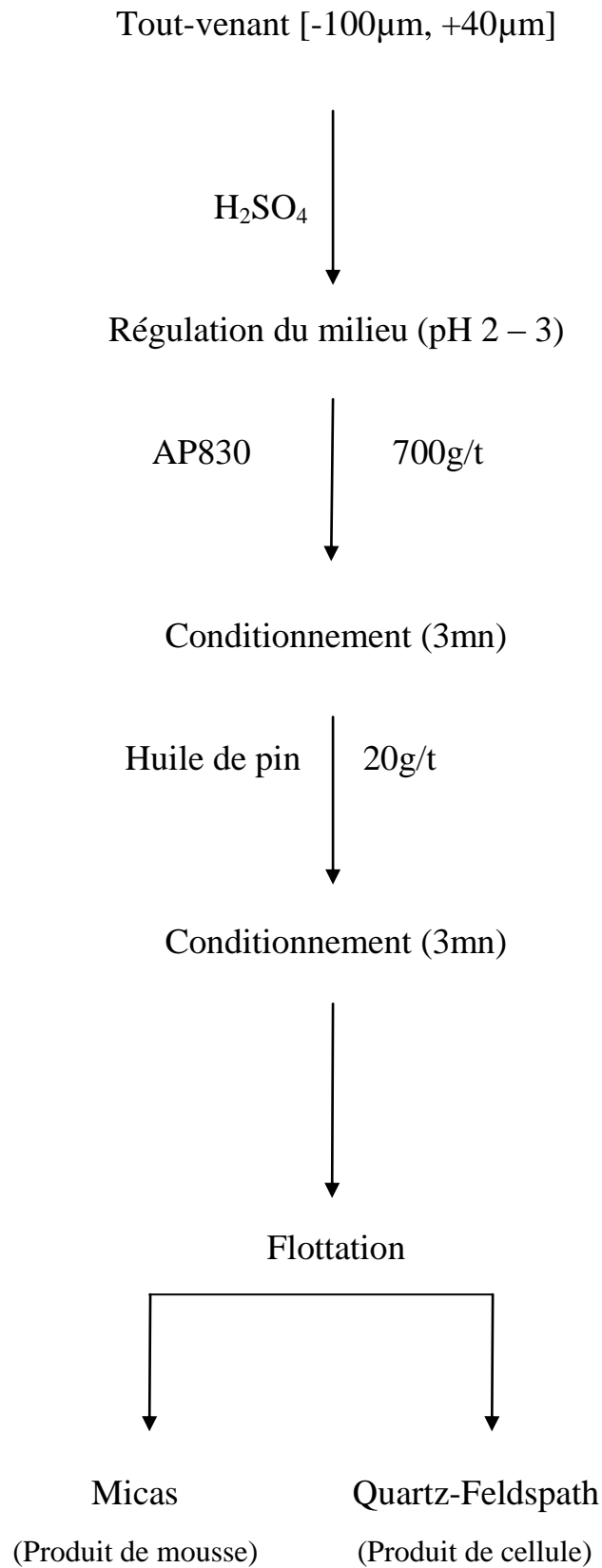
Par conséquent, en procédant par élimination, on en a conclu que ce type de broyage interfère avec les surfaces des particules minérales et modifie leur potentiel surfacique. Pour des raisons de temps et de non-disponibilité du matériel adéquat, il nous a été impossible d'approfondir les recherches en ce sens ; ces dernières pourront néanmoins faire l'objet de travaux futurs si cela est jugé utile.

En revanche, nous avons choisi de modifier le collecteur et d'utiliser, au lieu d'une amine, un amide, et plus précisément le disodium n-octadecyl sulfosuccinamate, commercialisé par l'entreprise American Cyanamid sous l'appellation Aeropromoter830. Ses caractéristiques sont présentées en annexe. D'après Cyanamid, l'Aeropromoter825 qui est un sulfonate de pétrole anionique, présente de bonnes propriétés collectrices pour le mica [10], cependant, pour des raisons de disponibilité, nous avons dû utiliser l'Aeropromoter830, qui est également un collecteur anionique. Des études plus poussées pourront aussi déterminer lequel des deux collecteurs s'avère le mieux adapté pour une récupération la plus optimale. Également, il pourrait être utile d'effectuer des recherches supplémentaires sur l'utilisation d'un mélange de collecteurs anioniques et cationiques qui, d'après les travaux de Hanumantha Rao et Forssberg [11], offrirait des possibilités d'augmentation du rendement de l'extraction des micas, voire de la sélectivité de la flottation de la muscovite par rapport à la biotite [12].

Lors de la nouvelle opération de flottation et dans le but d’avoir une meilleure récupération des micas, nous avons maintenu le pH de la pulpe entre 3 et 4, ce qui correspond au Point de Charge Nulle de la muscovite, et cela aura donc pour effet de contribuer à l’optimisation du rendement du collecteur [13].

Les opérations sont résumées dans le flowsheet suivant :

Schéma de flottation directe du mica



1.5. Consommation en réactifs

Pegmatite

Echantillons	Réactifs utilisés		
	H ₂ SO ₄ pur (mL)	AP 830 (g/t)	Huile de pin (g/t)
P 01	1	700	20
P 02	1	750	20
P 03	1	650	20

Tableau 3.12.

Kaolin

Echantillons	Réactifs utilisés		
	H ₂ SO ₄ pur (mL)	AP 830 (g/t)	Huile de pin (g/t)
K 01	1	700	20
K 02	1	750	20
K 03	1	650	20

Tableau 3.13.

1.6. Rendement de la flottation

Echantillons	Poids initial (g)	Produit de cellule		Produit de mousse	
		Poids (g)	%	Poids (g)	%
P 01	250	201,73	80,69	46,27	18,51
P 02	250	205,62	82,24	44,38	17,75
P 03	250	208,53	83,41	41,47	16,59
K 01	250	212,58	85,03	37,42	14,97
K 02	250	220,81	88,32	29,19	11,68
K 03	250	215,17	86,07	34,83	13,93

Tableau 3.14.

1.7. Flottations de relavage

Une fois les essais qualitatifs réussis, nous avons procédé à une série de flottations sur le même échantillon de minerai, dans le but de connaître le nombre d'opérations nécessaires pour isoler la majorité du mica en présence dans la roche. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

1.7.1. Pegmatite

Echantillon	Poids du produit en cellule (g)	Réactifs utilisés			Poids de mica récupéré (g)	Pourcentage de mica récupéré (%)
		H ₂ SO ₄ pur (mL)	AP 830 (g/t)	Huile de pin (g/t)		
P 01	250	1	750	20	44,21	54,72
P 02	205,79	1	750	20	29,62	36,66
P 03	188,38	1	750	20	17,41	21,54
P 04	182,83	1	750	20	5,55	6,86

Tableau 3.15.

1.7.2. Kaolin

Echantillon	Poids de l'échantillon (g)	Réactifs utilisés			Poids de mica récupéré (g)	Pourcentage de mica récupéré (%)
		H ₂ SO ₄ pur (mL)	AP 830 (g/t)	Huile de pin (g/t)		
K 01	250	1	750	20	40,16	40,70
K 02	219,07	1	750	20	30,93	31,34
K 03	188,14	1	750	20	22,87	23,18
K 04	165,27	1	750	20	4,72	4,78

Tableau 3.16.

1.8. Résultats et discussion

Mise à part l'influence du mode de broyage sur le rendement de la flottation lors de l'utilisation du dodécylamine, on constate que les mousses possèdent des aspects différents.

En effet, les mousses issues de la flottation avec le dodécylamine sont solides, stables et gardent leur forme même après étuvage. De couleur beige à blanchâtre, elles sont très chargées en particules minérales et parfois même, on notera la formation à la surface de la cellule d'une mousse solide avant même l'ajout du moussant ni l'injection de l'air. Ce phénomène peut s'expliquer par une floculation des fines en surface. La couleur beige reste cependant même après déschlammage par voie humide, ce qui nous conduit à penser que le produit de mousse ne contenait pas exclusivement du mica ; ces résultats restent néanmoins à confirmer par des analyses plus poussées (diffraction des rayons X et fluorescence X).

En revanche, les mousses issues de l'utilisation de l'AP830 sont beaucoup plus claires et brillantes, presque blanches ; l'analyse à la binoculaire montre que le produit récupéré est presque entièrement du mica. Un déschlammage par voie humide s'avère néanmoins nécessaire, à cause de la présence d'une grande quantité d'ultrafines issues du broyage du minerai et qui ne disparaissent pas par un tamisage à voie sèche.

Par ailleurs, on constate qu'au bout de 3 flottations successives, on arrive à récupérer la majeure partie du mica de la pulpe, il sera donc inutile d'en effectuer plus. Un dimensionnement ainsi qu'une étude économique comparative pourront faire l'objet d'études ultérieures, si le projet s'avère intéressant.

Les figures suivantes représentent les différents résultats obtenus pour la flottation directe.

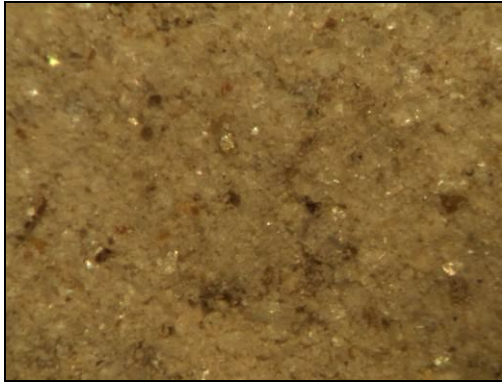


Figure 3.8.

Produit de mousse d'une flottation directe (dodécylamine) sur P

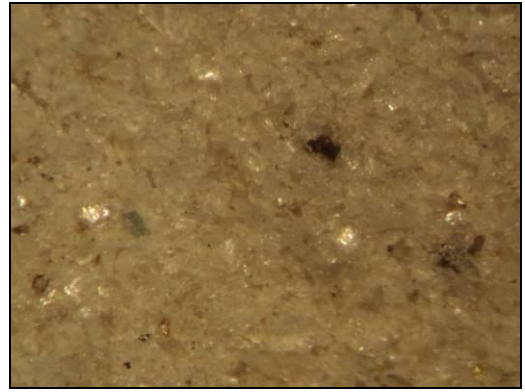


Figure 3.9.

Produit de cellule d'une flottation directe (dodécylamine) sur P



Figure 3.10.

Produit de mousse d'une flottation directe (dodécylamine) sur K



Figure 3.11

Produit de cellule d'une flottation directe (dodécylamine) sur K

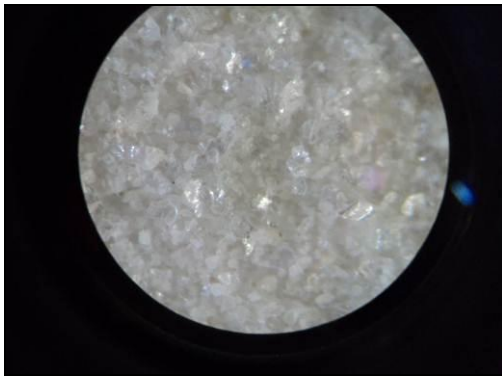


Figure 3.12.

Produit de mousse d'une flottation directe (AP830) sur K



Figure 3.13.

Produit de cellule d'une flottation directe (AP830) sur K

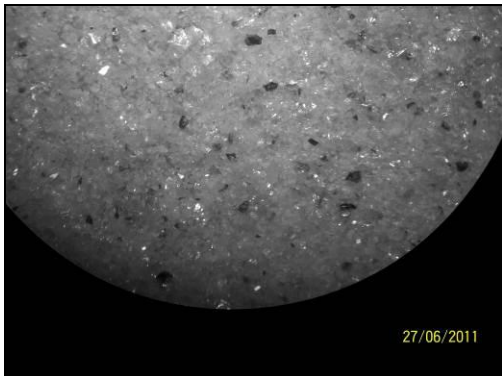


Figure 3.14.

Produit de mousse d'une flottation directe (AP830) sur P

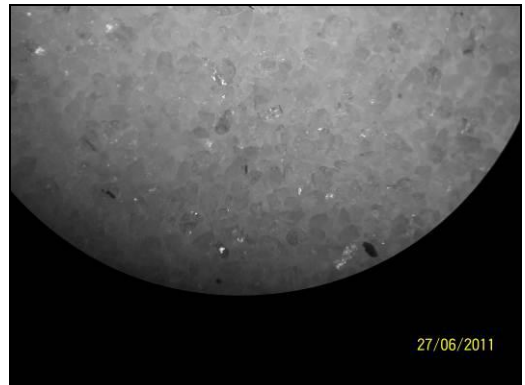


Figure 3.15.

Produit de cellule d'une flottation directe (AP830) sur P

2. Flottation inverse

Le but de cette opération est de faire plonger le mica et de flotter la fraction feldspath-quartz. Pour cela, on commencera par effectuer une flottation du feldspath, que l'on fera suivre d'une flottation du quartz.

2.1. Flottation du feldspath

Habituellement, la flottation sélective du feldspath par rapport au quartz se fait en pulpe fluorée [14], selon la méthode développée par O'Meara [15], et ce en utilisant de l'acide fluorhydrique (HF) comme régulateur de milieu, notamment pour abaisser le pH de la pulpe jusqu'aux environs de 2,5 et pour libérer l'ion F^- qui est un excellent dépressant du quartz et activant du feldspath. Cependant, cet acide posant divers problèmes (difficile à conserver, très polluant...), plusieurs études ont été effectuées pour la séparation du feldspath et du quartz sans y avoir recours.

Si l'on s'en tient à la méthode conventionnelle en milieu fluoré, la flottation du feldspath nécessite l'utilisation d'un sel d'amine à longue chaîne (acétate ou chlorure) comme collecteur, ainsi qu'un moussant de la gamme Aerofroth, proposée par Cyanamid [10]

En revanche, si l'on contourne l'utilisation de l'acide fluorhydrique, plusieurs approches sont proposées. Ainsi, Malghan préconise l'utilisation d'un sel di-oléate d'alkyl propylène diamine, commercialisé aux Etats-Unis sous l'appellation Duomeen TDO [14] ; il s'agit d'un composé contenant à la fois un acide gras, et deux groupes amine, primaire et secondaire. Katayanagi, de son côté, utilise un mélange d'amine et un sulfonate aliphatique ou aromatique [16]. Pour des raisons de disponibilité, nous avons préféré la méthode de Katayanagi à celle d'O'Meara. Ceci dit, quelle que soit la méthode, le moussant utilisé pour cette flottation est toujours un Aerofroth.

2.1.1. Confection du collecteur

Dans sa méthode brevetée en 1974, Katayanagi a utilisé un collecteur composé de 23% d'acétate d'amine et de 77% d'un sulfonate de pétrole sodique [16]. Nous nous en sommes inspirés pour confectionner une liqueur à partir de 23% de dodécylamine et de 77% d'alkyl succinamate sous la forme d'Aeropromoter830 de la marque Cyanamid.

Le dodécylamine étant soluble en milieu acide, nous l'avons dissout dans une solution de H₂SO₄ diluée à 50%, puis nous y avons ajouté, en agitant constamment, la dispersion d'Aeropromoter830 (celui-ci se présentant sous la forme d'une pâte dispersible dans l'eau).

2.2. Flottation du quartz

Une fois la flottation du feldspath effectuée, on procède à la flottation du quartz. Pour ce faire, on utilisera un collecteur cationique sous la forme d'un amine à longue chaîne (dodécylamine, dans notre cas) en pH basique. Les études de Fuerstenau et Miller [13] montrent que l'on peut utiliser des ions métalliques (plomb, zinc et cuivre notamment) en tant qu'activants du quartz, et il a été constaté un meilleur rendement de flottation pour un pH entre 6,8 et 7,5. Egalement, il est utile d'utiliser un dépressant du mica (par exemple de l'amidon, NaSiO₃, acide lactique, HF...). L'huile de pin s'avère être un excellent moussant.

2.3. Mode opératoire

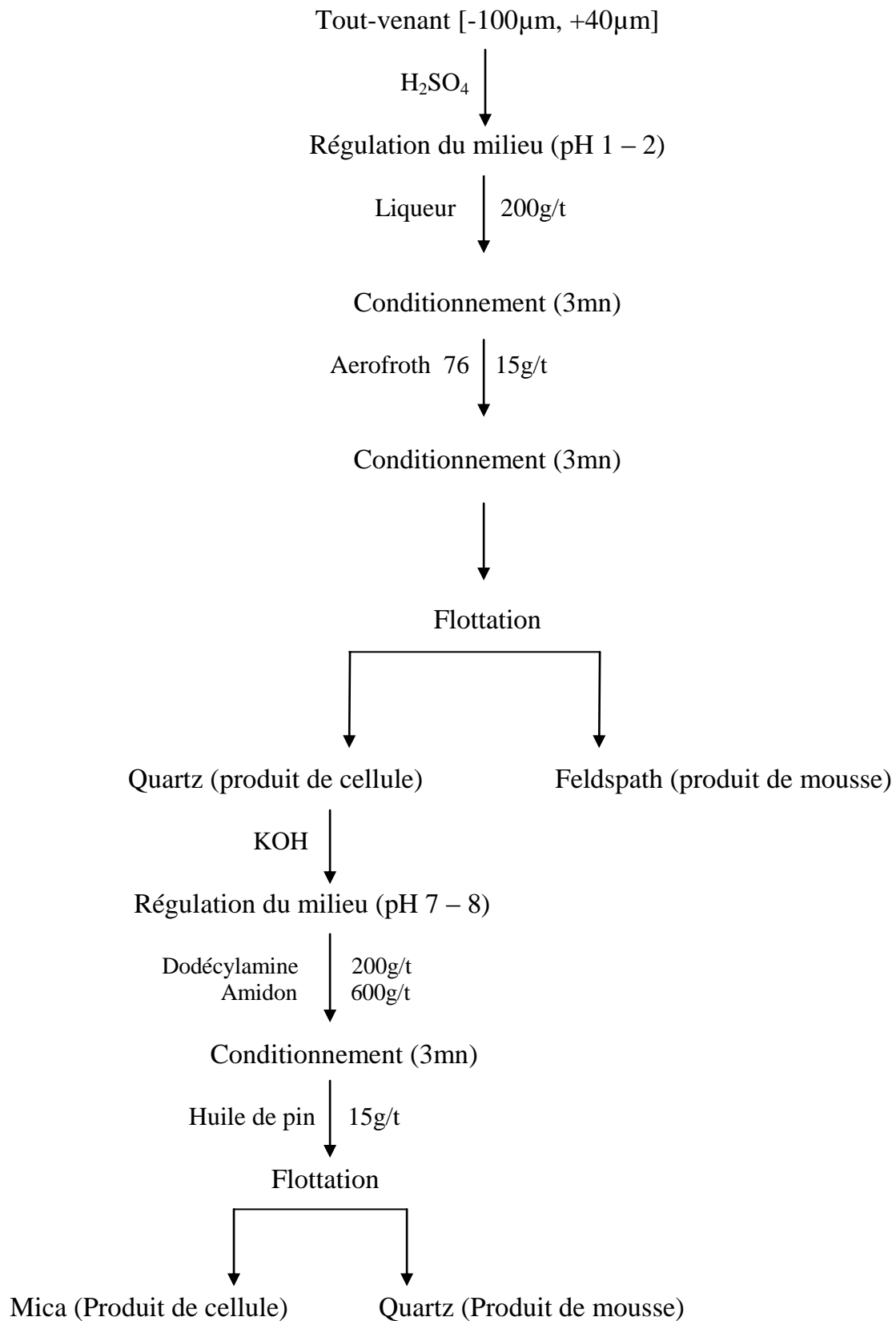
La cellule de flottation (toujours de type Denver D12) est, de même que pour la flottation directe du mica, remplie d'eau provenant du réseau de distribution communal, à laquelle on ajoute le minerai. La pulpe est, ici aussi, de 25% en solide (250g de minerai pour 1L d'eau). Après 3mn d'agitation, on ajoute 1 à 2mL de H₂SO₄ à 97%, de façon à réguler le pH du milieu à 1 ou 2. On conditionne pendant 3mn, puis on ajoute la liqueur à raison de 200g/t (0,05g pour notre essai) et après un conditionnement supplémentaire de 3mn, l'Aerofroth76 à raison de 15g/t (2 gouttes pour notre essai). Après 3mn d'agitation, on procède à la flottation.

Une fois la mousse épuisée, on arrête la cellule et après avoir laissé la pulpe reposer pendant une quinzaine de minutes, on siphonne l'eau et on remplit la cellule de nouveau, afin

de procéder à la flottation du quartz. Pour ce faire, on fait remonter le pH du milieu jusqu'à 7 ou 8 à l'aide de KOH, et après 3mn de conditionnement, on ajoute du dodécylamine et de l'amidon à raison de 200g/t et 600g/t respectivement. Après 3mn de conditionnement supplémentaire, on ajoute 15g/t d'huile de pin et on conditionne pendant encore 3mn. Le temps de flottation est dans ce cas de 4 à 5mn.

Les étapes de flottation sont représentées sur le flowsheet suivant :

Schéma de flottation inverse du mica



2.4. Consommation en réactifs

2.4.1. Pegmatite

2.4.1.1. Feldspath

Echantillons	Réactifs utilisés		
	H ₂ SO ₄ pur (mL)	Liqueur (g/t)	Aerofroth 76 (g/t)
P 01	1	700	20
P 02	1	750	20
P 03	1	650	20

Tableau 3.17.

2.4.1.2. Quartz

Echantillons	Réactifs utilisés		
	KOH pur (mL)	Dodécylamine (g/t)	Huile de pin (g/t)
P 01	1	200	15
P 02	1	250	15
P 03	1	150	15

Tableau 3.18.

2.4.2. Kaolin

2.4.2.1. Feldspath

Echantillons	Réactifs utilisés		
	H ₂ SO ₄ pur (mL)	Liqueur (g/t)	Aerofroth 76 (g/t)
K 01	1	700	20
K 02	1	750	20
K 03	1	650	20

Tableau 3.19.

2.4.2.2. Quartz

Echantillons	Réactifs utilisés		
	KOH pur (mL)	Dodécylamine (g/t)	Huile de pin (g/t)
K 01	1	200	15
K 02	1	250	15
K 03	1	150	15

Tableau 3.20.

2.5. Rendement de la flottation

2.5.1. Pegmatite

2.5.1.1. Feldspath

Echantillon	Poids de l'échantillon (g)	Réactifs utilisés			Poids de feldspath récupéré (g)	Pourcentage de feldspath récupéré (%)
		H ₂ SO ₄ pur (mL)	Liqueur (g/t)	Aerofroth 76 (g/t)		
P 01	200	1	700	20	26,35	13,18
P 02	200	1	750	20	28,56	14,28
P 03	200	1	650	20	25,07	12,54

Tableau 3.21.

2.5.1.2. Quartz

Echantillon	Poids de l'échantillon (g)	Réactifs utilisés			Poids de quartz récupéré (g)	Pourcentage de quartz récupéré (%)
		KOH pur (mL)	Dodécylamine (g/t)	Huile de pin (g/t)		
P 01	200	1	200	20	83,18	41,59
P 02	200	1	250	20	86,41	43,21
P 03	200	1	150	20	82,92	41,46

Tableau 3.22.

2.5.2. Kaolin

2.5.2.1. Feldspath

Echantillon	Poids de l'échantillon (g)	Réactifs utilisés			Poids de feldspath récupéré (g)	Pourcentage de feldspath récupéré (%)
		H ₂ SO ₄ pur (mL)	Liquueur (g/t)	Aerofroth 76 (g/t)		
K 01	200	1	700	20	17,61	8,80
K 02	200	1	750	20	19,02	9,51
K 03	200	1	650	20	16,12	8,06

Tableau 3.23.

2.5.2.2. Quartz

Echantillon	Poids de l'échantillon (g)	Réactifs utilisés			Poids de quartz récupéré (g)	Pourcentage de quartz récupéré (%)
		KOH pur (mL)	Dodécylamine (g/t)	Huile de pin (g/t)		
K 01	200	1	200	20	73,76	36,88
K 02	200	1	250	20	74,28	38,64
K 03	200	1	150	20	72,88	36,44

Tableau 3.24.

2.6. Résultats et discussion

On remarque que les mousses obtenues lors de la flottation du feldspath et du quartz sont stables, solides et chargées en particules minérales. Dans le cas du kaolin, la kaolinite est flottée en même temps que le feldspath ; ceci est dû au fait que les deux minéraux possèdent le même type de collecteur (cationique), leur flottation n'est donc pas sélective si, comme dans notre cas, on ne juge pas utile d'ajouter un dépressant de l'un ou de l'autre.

Lors de l'utilisation d'un minerai broyé au broyeur à mortier, le réglage du pH est primordial, sous peine de n'obtenir aucune mousse, ou au mieux une mousse totalement instable et irrécupérable.

Des études ultérieures pourraient éventuellement déterminer le meilleur mode de broyage pour une optimisation de la récupération, aussi bien en flottation directe qu'inverse.

3. Conclusion

La flottation directe offre certainement un meilleur rendement de récupération du mica que la flottation inverse, indépendamment du fait d'être plus rapide et de consommer moins de réactifs. Cependant, la flottation inverse permet de récupérer le quartz et le feldspath séparément, ce qui offre la possibilité de contrôler les teneurs en ces minéraux dans le circuit de fabrication de la céramique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Après cet aperçu non-exhaustif des divers procédés minéralurgiques applicables à la séparation du mica, on parvient aux conclusions suivantes :

- La préparation mécanique du minerai nécessite un équipement adapté à la nature du comportement des particules. Dans le cas du mica, nous préconisons l'utilisation de broyeurs dont le principe ne fait pas appel aux propriétés massiques des minéraux, tel que les broyeurs à mortier, les broyeurs à disque ou les broyeurs à couteaux. Il serait souhaitable cependant que des études plus poussées soient effectuées sur l'influence du type de broyage sur le minerai.
- La séparation par nappe pelliculaire fluante est un cas à étudier plus en détail, dans la mesure où les résultats pourraient s'avérer plus concluants si toutes les conditions étaient réunies. Cependant, la surconsommation d'eau qu'elle occasionne fait qu'elle peut poser quelques difficultés d'application, à moins d'envisager un système de recyclage de l'eau utilisée.
- La séparation par milieux denses présente de très bons résultats, mais il serait préférable d'utiliser un médium plus économique que le bromoforme, qui reste excessivement cher, en plus de sa difficulté à être recyclé. Une pseudo-solution au ferrosilicium est à envisager, étant facilement recyclable et séparable.
- La flottation reste le procédé le plus efficace et qui présente le meilleur taux de récupération du mica. Relativement économique, elle permet de traiter des granulométries fines et d'ainsi éviter les pertes en minerai occasionnées par un surbroyage. De même, la consommation en réactifs reste raisonnable.

Conclusion générale

- Une étude sur le dimensionnement d'une usine de traitement ainsi que son impact économique pourrait probablement être envisagée, si l'entreprise le juge nécessaire.

Références

- [1] Ould Hamou M., "Cours de Minéralurgie", Ecole *Nationale Polytechnique d'Alger*, 2009/2010
- [2] Blazy P., Joussemet R., "Classification par gravité", *Techniques de l'Ingénieur*, 2005
- [3] Jain S.K., "Ore Processing", *Indian Edition Series*, A.A. Balkema, 1987
- [4] Wills N. A., Napier-Munn T.J., Wills "Mineral processing technology" ed. *Elsevier*, 2008
- [5] Blazy P., Jedid E., Flottation, "Mécanismes et réactifs", *Techniques de l'Ingénieur*, 1992
- [6] Gaudin A.M., "Flotation", *McGraw-Hill Book Company*, 1957
- [7] Blazy P., Jedid E., "Flottation, Aspects pratiques", *Techniques de l'Ingénieur*, 2000
- [8] Blazy P., Jedid E., Yvon J., "Fragmentation", *Techniques de l'Ingénieur*, 2007
- [9] Blazy P., Joussemet R., "Criblage", *Techniques de l'Ingénieur*, 2009
- [10] Cyanamid, "Mining chemicals handbook", 1989
- [11] Hanumantha Rao K., Forssberg K.S.E., "Mixed collectors systems in flotation", *Elsevier*, 1997
- [12] Hanumantha Rao K., Forssberg K.S.E., "Flotation of mica minerals and selectivity between muscovite and biotite while using mixed anionic/cationic collectors", *Society of Mining Engineers*, 1990
- [13] Fuerstenau M.C., Miller J.D., Pray R.E., Perinne F., "Metal ion activation in xanthate flotation of quartz", *Society of Mining Engineers*, 1965
- [14] Malghan S.G., Selective flotation separation of feldspar in non-fluoride medium, *MRL Report 76-9-P*, 1976
- [15] O'Meara R.G., "Separation of feldspar from quartz", *US Patent n°2297689*, 1942
- [16] Katayanagi A., "Flotation separation of feldspar", *US Patent n°3844939*, 1974

Annexes

Annexe 1 : Equivalences Mesh-Microns-Pouces

US MESH	Microns (μm)	Pouces (inches)
4	4760	0,187
5	4000	0,157
6	3360	0,132
7	2830	0,111
8	2380	0,0937
10	2000	0,0787
12	1680	0,0661
14	1410	0,0555
16	1190	0,0469
18	1000	0,0394
20	840	0,0331
25	710	0,028
30	590	0,0232
35	500	0,0197
40	420	0,0165
45	350	0,0138
50	297	0,0117
60	250	0,0098
70	210	0,0083
80	177	0,007
100	149	0,0059
120	125	0,0049
140	105	0,0041
170	88	0,0035
200	74	0,0029
230	62	0,0024
270	53	0,0021
325	44	0,0017
400	37	0,0015
500	31	0,0012

Annexe 2 : Appareillages industriels de séparation gravimétrique

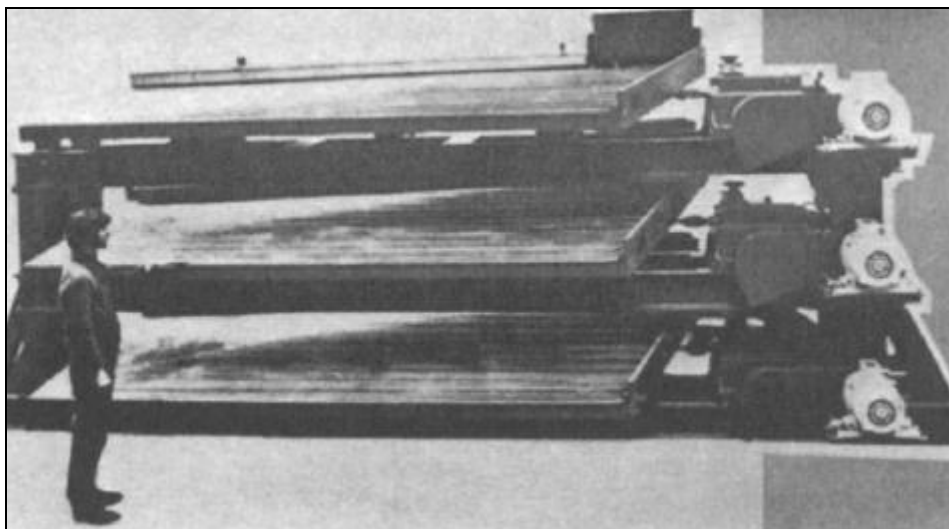
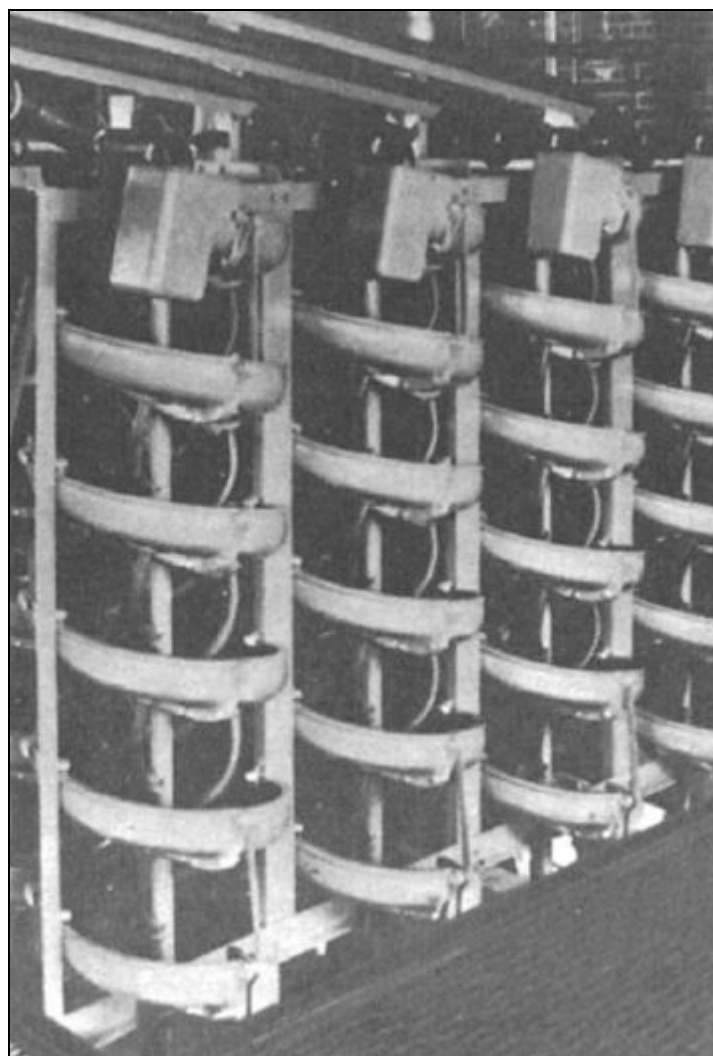


Table à secousses industrielle



Spirales industrielles

Annexe 3 : Récapitulatif des appareils de séparation par milieux denses selon leur principe de fonctionnement, leur modèle et leur constructeur

Types	Modèles	Constructeur(s)
Bac (cône) profond	Profond Wenco FCB Laveur Hirst	McNally-Wellman Wemco FCB National Coal Board
Tambour	Wemco OOSK 30 Teska Hardinge	Wemco CEI KHD, Humboldt-Wedag Variés
À transit	DSM Lo Flo Tromp Ridley Scholes OCC Heyl et Patterson	Stamicarbon – DSM McNally-Wellman
Mixte	Drewboy	FCB Norwalt
Centrifuge	Cyclones DSP Swirl Vorsyl Dyna-Whirlpool (DWP) Tri-Flo Cyclones à eau Visman-Tricone	Variés Osaka Shipbuilding National Coal Board Variés dont Allis-Mineral Systems Inpromin Variés dont DSM Osaka Shipbuilding, McNally-Wellman

Résumé

La fabrication de la céramique nécessite l'utilisation de matières premières généralement silicatées, telles que le quartz et le feldspath. Ces silicates sont présents dans des roches d'origine magmatique, fortement ou très peu altérées. Les pegmatites d'Abouda Bouada et les kaolins d'Adjarda en font partie. Cependant, ces roches présentent une forte teneur en micas, minéraux inappropriés pour la céramique.

Notre travail portera sur la valorisation de la pegmatite d'Abouda Bouada et du kaolin d'Adjarda dans le but d'en extraire les micas, et ce en utilisant trois des plus importantes méthodes de valorisation utilisées dans l'industrie : la flottation, les nappes pelliculaires fluantes et les milieux denses.

Abstract

Ceramic materials are generally silicate raw, such as quartz and feldspar. Those silicates are found in magmatic rocks in a very altered state, or barely altered. For instance, the pegmatite of Abouda Bouada and the kaolin of Adjarda are amongst those rocks. However, micas which are unsuitable minerals for ceramics, are also present in these rocks, in significant amounts.

The aim of our work was to valorize the pegmatite of Abouda Bouada and the kaolin of Adjarda by clearing the micas away. For this purpose, we have used three of the principal methods of industrial valorization : flotation, streaming currents and dense media separation.

ملخص

صناعة السيراميك تتطلب استخدام مواد خامة عموماً سيليكاتية، مثل الكوارتز والفلدسبات. هذه السيليكات موجودة في صخور ذات منشأ منصهر، كثيرة أو قليلة التغير. مثل بيغماتيت عبودة بوعدة وكاولين أجردة. ولكن هذه الصخور تحتوي على نسبة عالية من الميكا وهذا المعدن غير مناسب للسيراميك. يركز عملنا على إغناء بيغماتيت عبودة بوعدة وكاولين أجردة من أجل استخراج الميكا. سنستخدم لذلك ثلاثة أهم عمليات التقويم المستخدمة في الصناعة : التعويم، التدفق الحالي والأوساط الكثيفة

Mots-clés : Pegmatite – Kaolin – Céramique – Flottation – Milieux denses – Tables à secousses – Muscovite – Quartz – Feldspath – Mica