

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE A.MIRA-BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES MINES ET GEOLOGIE

Polycopie de cours

Valorisation des ressources minières

Cours destiné aux étudiants de 2^{ème} année licence (option
: Génie Minier) du Département des Mines et Géologie

Réalisé par

Dr. BOUABDALLAH Soufiane

Maitre de conférences classe A au département des mines et géologie de
l'Université A. Mira de Bejaia

Année 2024 – 2025

Table des matières

PRÉAMBULE.....	1
Chapitre 1 : Introduction à la valorisation (minéralurgie).....	2
Introduction.....	2
1. Définition.....	2
2. Classification des procédés minéralurgique.....	3
2.1. Procédés minéralurgique.....	4
Conclusion.....	6
Chapitre 2 : Fragmentation (Comminution).....	7
Introduction.....	7
1. La fragmentation.....	7
1.1. Définition.....	7
1.2. Types de fragmentation.....	8
1.3. Classification des appareils de fragmentation.....	8
2. Concassage.....	9
2.1. Définition.....	9
2.2. Degrés de concassage (réduction).....	9
2.3. Circuits de concassage.....	10
2.4. Types de concasseurs.....	11
3. Broyage.....	16
3.1. Définition.....	16
3.2. Libération.....	17
3.3. Types de broyeurs.....	17
3.4. La vitesse critique et les régimes de fonctionnements.....	20
Conclusion.....	21
Chapitre 3 : Classement dimensionnel.....	22
Introduction.....	22
1. Définition de criblage.....	22
2. But du criblage.....	23
3. Types de surfaces criblantes.....	23

4. Cribles industriels	24
4.1. Les grizzlys	24
4.2. Les trommels	25
4.3. Les cribles vibrants	26
4.4. Les cribles giratoires	27
4. 5.Conditions d'application	27
5. Méthodes de tamisage.....	28
5.1. Traitement des résultats.....	28
6. Classification.....	29
6.1. Définition	29
6.2. Loi du mouvement des solides dans un fluide.....	30
6.3. Types de classificateurs	32
Chapitre 4 : Méthodes gravimétriques	33
1. généralité	33
2. Les mécanismes de concentration gravimétrique	34
2.1. Séparation par milieu dense	34
2.2. Séparation par pulsation et la stratification (accélération différentielle)	35
2.3. Séparation par nappe pelliculaire fluente.....	37
2.4. Séparation par mécanisme combiné (mixte).....	38
2.5. Conditions d'application	40
Chapitre 5 : Méthodes magnétiques et électrostatiques	42
1. Méthodes magnétiques	42
1.1. Principe.....	42
1.2. Théorie	42
1.3. Les différents comportements magnétiques.....	42
1.4. Bases théoriques de la séparation magnétique	44
1.5. Types de séparation magnétique	45
1.6. Séparation magnétique par voie sèche	46
1.7. Séparation magnétique par voie humide	47
2. La séparation électrostatique.....	47
2.1. Les différents comportements électriques	48

Chapitre 6 : Traitement Physico-chimique « Flottation ».....	49
1. Définition.....	49
2. Système solide - liquide - gaz.....	50
2.1. Réactifs chimiques de flottation.....	51
3. Appareils de flottation.....	52
3.1. Les cellules de flottation.....	52
3.2. La colonne de flottation.....	53
Conclusion.....	54
Références bibliographiques.....	55

PRÉAMBULE

Ce document est un polycopié de cours de la matière «Valorisation des ressources minières», destiné aux étudiants de 2^{ème} Année de Licence, option Génie minière du Département des Mines et Géologie de l'université A. Mira de Bejaia. L'objectif de ce cours vise donc à bâtir les connaissances nécessaires sur les principes de base des opérations unitaires de la valorisation des ressources minières

Ce support de cours est divisé en quatre chapitres. A la fin de chaque chapitre, des exercices avec corrigés sont proposés.

- ❖ Le premier chapitre présente une introduction à la valorisation des substances minérales. Il expose les principaux objectifs de la valorisation ainsi que les méthodes couramment employées.
- ❖ Le deuxième chapitre, consacré à la comminution, se divise en deux parties : La première décrit les opérations de concassage, visant la réduction primaire de la taille des matériaux. La seconde aborde le broyage, étape essentielle pour affiner les particules et libérer les minéraux utiles. ;
- ❖ Le troisième chapitre traite du classement dimensionnel et de la classification par sédimentation, deux techniques qui permettent de séparer les particules selon leur taille ou leur vitesse de chute dans un fluide.
- ❖ Le quatrième chapitre est dédié à la séparation gravimétrique, une méthode basée sur la différence de densité entre les minéraux, et mettant en œuvre divers dispositifs tels que les jigs, les spirales ou les tables vibrantes.
- ❖ Le cinquième chapitre explore les méthodes de séparation magnétique et électrostatique, qui exploitent respectivement les propriétés magnétiques et électriques des constituants minéraux.
- ❖ Enfin, le sixième chapitre présente la flottation, technique physico-chimique permettant une séparation sélective des minéraux en fonction de leur hydrophobicité, à l'aide de réactifs spécifiques et d'équipements adaptés.

Chapitre 1 : Introduction à la valorisation (minéralurgie)

Introduction

La minéralurgie est une discipline dont la finalité est d'assurer le passage d'un minerai à l'état "brut" à une substance dite "marchande", autrement dit son enrichissement. La minéralurgie subdivisée en deux grandes étapes successives : celles de la préparation mécanique et du traitement subséquent. Lors du premier procédé, celui de la fragmentation, les minerais subissent généralement un ou plusieurs épisodes de concassage, de broyage, avec des criblages et des classifications. Lors du second procédé, celui de la séparation proprement dite, les phases minérales d'intérêt sont séparées de leur gangue stérile via des méthodes purement physiques (magnétiques, gravimétriques, optiques, électrostatiques,...etc.), physico-chimiques (flottation), chimique (lixiviation) ou biochimiques (action de bactéries), le concentré obtenu faisant souvent l'objet d'un conditionnement final.

1. Définition

La valorisation ou la minéralurgie traitement des minerais, est la science qui étudie les techniques ayant pour l'objet d'enrichir un minerai, donc d'éliminer du minerai naturel la plus grande part possible de gangue qui y est présente, avant de récupérer le minerai utile (redonner le minerai à une valeur marchande).

La valorisation des minerais consiste à éliminer, idéalement ou complet, les constituants stériles ou non-désirés, en ne laissant que les minéraux de valeur. Normalement on ne sera jamais capable d'effectuer cette séparation parfaite, de sorte qu'on se retrouvera à la fin de l'opération avec deux produits contenant tous les deux des minéraux de valeur et de la gangue stérile, mais en proportions différentes.

Le produit riche en minéraux de valeur s'appelle concentré tandis que celui riche en gangue s'appelle rejets. Le degré de perfection du procédé de (traitement) valorisation sera exprimé en termes du rendement de l'opération et/ou de la teneur en minéral de valeur du produit.

Le but du traitement des minerais est de transformer les produits bruts de la mine pour mieux les vendre. En effet, les minerais directement

commercialisables se font de plus en plus rares. Le traitement des minerais s'impose donc et permet d'accroître la valeur marchande. Il s'agit d'augmenter les teneurs en substance utile.

2. Classification des procédés minéralurgique

La minéralurgie comprend donc trois grandes étapes, la première étape consiste en la préparation mécanique du minerai, la deuxième de la minéralurgie consiste en la concentration du minerai et la troisième étape de la minéralurgie est l'enlèvement de l'eau ou la séparation solide-liquide.

a. Procédés de préparation mécanique

- ✓ Théorie de la fragmentation (concassage et broyage),
- ✓ distributions granulométrique (criblage),
- ✓ Classification.

b. Procédés d'enrichissement (séparation ou bien concentration) :

- ✓ Procédés physique (séparation magnétique, gravimétrique, électrostatique).
- ✓ procédés physico-chimique (flottation).
- ✓ procédés chimique (lixiviation).

c. Procédés auxiliaires (séparation solide liquide)

- ✓ Épaississage (décantation),
- ✓ Filtration,
- ✓ Séchage.

La classification de ces procédés et appareils est présentée dans le tableau 1.1. Ces procédés et machines jouent un rôle principal dans l'augmentation de la teneur en composant utile.

Tableau 1.1 : Classification des procédés minéralurgique

Procédés	Propriétés utilisées ou mode de destruction	Milieu du procédé	Machines utilisées
Concassage	Ecrasement, choc, flexion	air	Concasseur
Broyage	Ecrasement, trituration	air, eau	Broyeurs
Criblage	Dimensions des particules	air, eau	Cribles
Classification dimensionnelle	Poids des particules	air, eau	Classificateurs hydrauliques et pneumatiques,
Séparation gravimétriques	Densité	air, eau	Bac à piston, cyclones table à secousses, spirales
Flottation	Mouillabilité	eau	Machines à flottation
Séparation magnétique	Susceptibilité magnétique	air, eau	Séparateurs magnétiques
Séparation électrique	Conductibilité électrique	air	Séparateurs électriques
Epaississement	Poids des particules	eau	Epaississeurs
Filtration	Différence des pressions	eau	Filtres à vide, à pression
Séchage	Haute température	air	Séchoirs de divers types

2.1. Procédés minéralurgique

La minéralurgie englobe un ensemble de procédés techniques permettant de traiter les minerais afin d'en extraire les minéraux utiles tout en éliminant les impuretés. Ces procédés sont essentiels pour l'industrie minière, qui transforme les ressources naturelles en matériaux valorisables. La minéralurgie se divise en plusieurs étapes et sous-domaines clés (figure 1.1) :

2.1. 1. Procédés de préparation mécaniques.

Le but essentiel de ces procédés consiste à préparer les minerais à l'enrichissement: premièrement, au point de vue de la grosseur, car chaque appareil ou chaque machine d'enrichissement peut traiter des matériaux bien définis d'après la dimension, deuxièmement, au point de vue de la libération des grains des minéraux utiles et inutiles constituant le minerai.

Ce sont des procédés de concassage, de broyage, de criblage et de classification.

2.2.2. Procédés d'enrichissement (séparation)

Dans les procédés d'enrichissement (séparation) on se base sur la différence entre les propriétés spécifiques des minéraux à séparer. La séparation des minerais consiste à éliminer, idéalement ou complet, les constituants gangues ou non-désirés, en ne laissant que les minéraux de valeur. Normalement on ne sera jamais capable d'effectuer cette séparation parfaite, de sorte qu'on se retrouvera à la fin de l'opération avec deux produits contenant tous les deux des minéraux de valeur et de la gangue, mais en proportions différentes.

Le produit riche en minéraux de valeur s'appelle concentré tandis que celui riche en gangue s'appelle rejets.

Le produit riche en minéraux de valeur s'appelle concentré tandis que celui riche en gangue s'appelle rejets.

- ✓ **Gangue** : substance stérile associée au minerai ou qui entoure une pierre précieuse dans un gisement. Il s'agit donc des minéraux indésirables dont la valeur est négligeable.
- ✓ **Concentré** : produit obtenu à la sortie d'un procédé minéralurgique comportant la portion enrichie (minéraux de valeur).
- ✓ **Rejet** : produit obtenu à la sortie d'un procédé minéralurgique comportant la portion appauvrie.

2.2.3. Procédés auxiliaires (séparation solide liquide)

La séparation solide-liquide est un procédé permettant de séparer les particules solides d'un liquide dans un mélange hétérogène. Elle est essentielle dans de nombreux domaines industriels (traitement des eaux, industries minière, chimique, agroalimentaire, etc.) en contribuant à l'amélioration de la qualité des produits finis et à l'optimisation de la récupération des matériaux utiles.

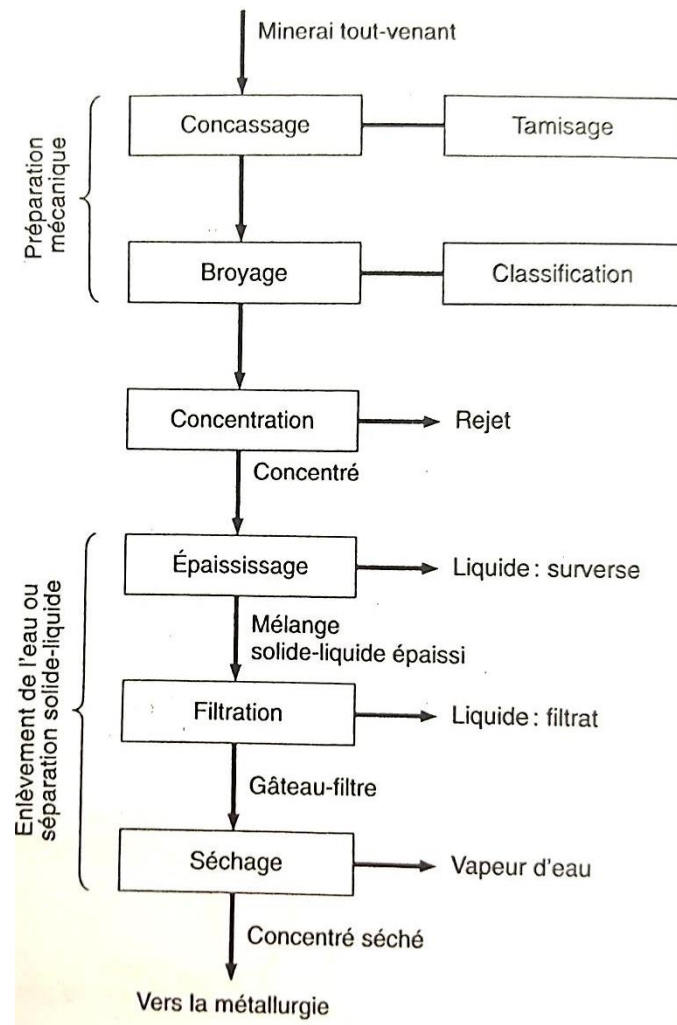


Figure 1.1. Procédés minéralurgique

Conclusion

La valorisation est une phase fondamentale dans l'industrie minière, regroupe un ensemble d'étapes essentielles de concassage, broyage, classification et la séparation des minerais. Ces opérations permettent de libérer les minéraux utiles de leur gangue et de préparer la matière première pour des procédés d'enrichissement plus poussés, tels que la séparation gravimétrique, la séparation magnétique, la flottation et la lixiviation.

Chapitre 2 : Fragmentation (Comminution)

Introduction

La fragmentation d'un produit peut se faire suivant plusieurs méthodes selon les propriétés physiques des minéraux et le type d'appareils utilisé. Ces techniques dépendent de la dureté, de la friabilité et de la texture du matériau à fragmenter. Pour les substances très dures, il est préférable d'opérer par percussion ou compression, alors que pour les substances friables, le cisaillement donne de meilleurs résultats. En pratique, plusieurs de ces procédés peuvent intervenir simultanément dans le même appareil et on obtient des produits de différentes tailles à la sortie d'opération.

1. La fragmentation

1.1. Définition

La fragmentation, ou comminution, est une opération essentielle dans le traitement des minerais. Elle consiste à réduire la taille des matériaux solides afin de libérer les minéraux utiles de leur gangue et de faciliter leur séparation ultérieure par les procédés de concentration. Cette étape a un impact direct sur l'efficacité de la séparation des phases minérales et sur la consommation énergétique du procédé global. L'opération de fragmentation consiste généralement en une ou plusieurs étapes de concassage et en une étape de broyage selon la granulométrie finale voulue.

La fragmentation des minerais désigne l'ensemble des opérations mécaniques visant à réduire la taille des blocs de minerai extraits de la mine, pour faciliter leur traitement et valorisation. Les principaux objectifs :

- ✓ Libération des minéraux : Faciliter la séparation des minéraux valorisables de leur matrice.
- ✓ Réduction granulométrique : Adapter la taille des particules aux exigences des procédés de concentration (flottation, séparation gravimétrique, magnétique, etc.).
- ✓ Augmentation de la surface spécifique : Favoriser les réactions chimiques dans le cas de procédés hydro-métallurgiques.

- ✓ Optimisation de l'énergie : Bien que la fragmentation consomme beaucoup d'énergie (surtout le broyage), une fragmentation optimale évite le sur-broyage, qui est coûteux et inutile.

1.2. Types de fragmentation

On distingue différents types de fragmentation selon la granulométrie de la matrice solide considérée :

a) La fragmentation primaire : est la première étape du processus, réalisée directement après l'extraction. Elle permet de réduire la taille des blocs bruts de minerai afin de faciliter leur transport et leur traitement ultérieur. Cette étape utilise principalement des concasseurs à mâchoires ou giratoires.

b) La fragmentation secondaire: succède à la fragmentation primaire et a pour objectif de réduire davantage la taille des matériaux afin d'obtenir une granulométrie plus fine, mieux adaptée aux opérations de traitement ultérieures. Elle est généralement réalisée à l'aide de concasseurs à cône ou de concasseurs à percussion, capables de traiter des matériaux déjà préalablement concassés.

b) La fragmentation tertiaire : concerne les étapes les plus fines de la réduction granulométrique. Elle vise à produire des particules très petites, souvent nécessaires pour les opérations de concentration ou de séparation des minéraux. On utilise pour cela des broyeurs à boulets, des broyeurs autogènes ou semi-autogènes.

1.3. Classification des appareils de fragmentation

Les appareils de fragmentation assurent la réduction dimensionnelle des matériaux en appliquant des forces mécaniques ciblées, telles que la compression, l'impact ou l'attrition, en fonction des propriétés du minerai.

Tableau 2.1 : classification des Appareils de fragmentation des minerais

Appareils	Tranches granulométrique concernées
Concasseur à mâchoires, concasseur giratoire	100-300 mm
Concasseur à cône, concasseur à percussion	25-100mm
Concasseur à marteaux, Concasseur à cylindre	10-25mm
Broyage à barres	3,5-10mm
Broyage à boulets	0,045-3,5mm

2. Concassage

2.1. Définition

Le concassage est un procédé mécanique de fragmentation des matériaux solides, consistant à réduire la taille des roches ou des minerais en morceaux plus petits à l'aide de appareils appelées concasseurs. Il est principalement utilisé dans les industries minières, du génie civil et du recyclage pour préparer les matériaux en vue de leur traitement ultérieur, comme le broyage ou la classification.

Le concassage s'effectue généralement en plusieurs étapes (primaire, secondaire et tertiaire), selon la taille initiale des blocs et la granulométrie finale souhaitée. Le processus de concassage est caractérisé par le degré de concassage.

2.2. Degrés de concassage (réduction)

Défini comme le rapport de dimension maximal des morceaux entrant dans le concasseur à la dimension maximale des morceaux sortant.

Pour déterminer le degré de concassage, il existe plusieurs formules

❖ d'après les morceaux maximale $i = D_{\max} / d_{\max}$

❖ d'après les morceaux moyenne $i = D_{\text{moy}} / d_{\text{moy}}$

$$D_{\text{moy}} = \sum \gamma_i D_i / 100, \quad d_{\text{moy}} = \sum \gamma_i d_i / 100.$$

❖ $i = D_{80} / d_{80}$

D_{80} ; est la dimension de la maille du tamis à travers lequel passé 80% du produit non concassé (avant concassage).

d_{80} ; est la dimension de la maille du tamis à travers lequel passe 80% du produit concassé.

2.3. Circuits de concassage

Le concassage peut se faire en circuit fermé ou ouvert; le choix dépend fondamentalement du produit final désiré. Si le concasseur alimente un broyeur à barres ou correspond à une étape intermédiaire, le circuit peut être du type "ouvert". Si par contre, le circuit produit une alimentation pour des broyeurs à boulets, il est convenable d'opérer en circuit fermé, où le produit du concasseur est déchargé sur un tamis dont le surdimensionné est recyclé vers le concasseur. Une autre raison pour opérer un circuit de concassage en boucle fermée est la plus grande flexibilité qu'on obtient.

2.3.1. Types de circuits : Comme mentionné déjà, Le concassage des solides peut avoir lieu en circuit ouvert ou en circuit fermé :

✓ En [circuit ouvert](#), les produits ne passent qu'une seule fois dans le concasseur.

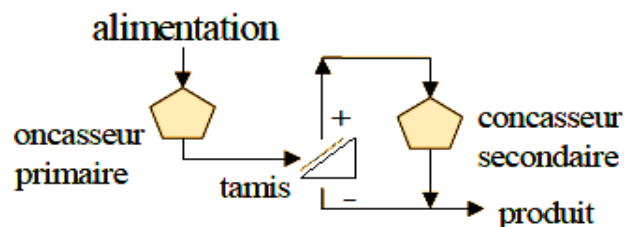


Figure 2. 1. Circuit de concassage ouvert.

✓ En [circuit fermé](#), la granulométrie des produits est contrôlée dès la sortie, et les produits dont la granulométrie est trop grosse sont aussitôt renvoyés pour être reconcassés. En pratique, le concassage en circuit fermé est la technique la plus fréquemment rencontrée. Les particules passent au travers d'un crible et comme précisé ci-dessus, celles qui sont insuffisamment réduites sont renvoyées pour être reconcassées.

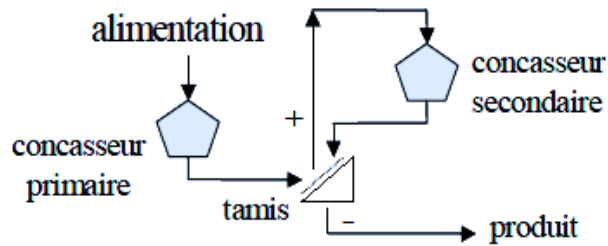


Figure 2.2. Circuit de concassage fermé.

2.4. Types de concasseurs

On appelle concasseur tout appareil ou équipement utilisés pour la réduction des diamètres ou le changement de la forme des particules .La réduction s'effectue en un seul ou plusieurs stades (le concassage primaire, secondaire et/ou tertiaire).

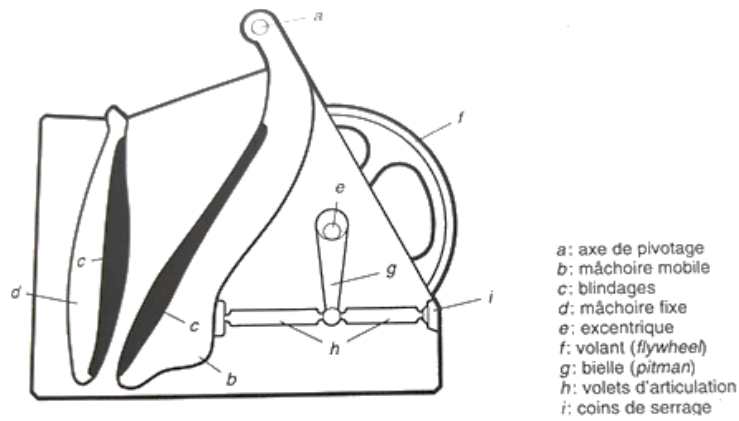
2.4.1. Concasseurs à mâchoires

La chambre de concassage est constituée par deux mâchoires disposées en V dont l'une est fixe, l'autre est mobile animée d'un mouvement de va et- vient autour d'un axe horizontal. Lorsque la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe elle écrase les fragments solides. Lorsqu'elle s'écarte ceux-ci descende dans une partie plus étroite ou ils sont à nouveau écrasés et ainsi de suite jusqu'à ce qu'ils atteignent l'orifice de sortie.

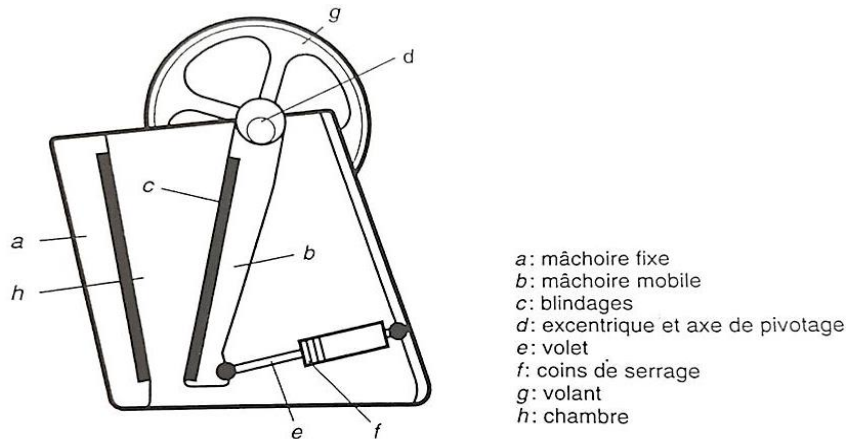
Les types les plus répandus de concasseurs à mâchoires verticales sont le concasseur à simple effet (ou plutôt simple volet) et le concasseur à double effet (ou plutôt à double volet). Mais actuellement dans l'industrie minière, seuls, sont utilisés les concasseurs à simple effet qui sont moins lourds que les concasseurs à double effet.

- ❖ Les concasseurs à double effet sont présentent un système de bielle excentrique (figure 2.3a). Deux volets ou plaques d'articulation communiquent le mouvement à la partie inférieure de la mâchoire suspendue. L'angle de prise est de 20 à 27° ;

- ❖ Les concasseurs à simple effet sont représentés sur la (figure 2.3b). Les battements sont obtenus par action d'un arbre à excentrique actionnant une mâchoire mobile dont la partie inférieure est rendue solidaire d'un volet. L'angle de prise du matériau varie de 22 à 27°.



(a)



(b)

Figure 2.3 : a) Concasseurs à mâchoires à double volet, b) Concasseurs à mâchoires à simple volet

2.4.2. Concasseurs giratoires

Le concasseur giratoire est un équipement de concassage par compression, utilisé en particulier comme concasseur primaire dans les mines et les carrières. Il comporte deux éléments principaux : une cuve fixe (ou « paroi concave ») et un cône central mobile (« manteau ») monté sur un arbre excentrique. Le manteau décrit un petit mouvement circulaire sans tourner complètement, comprimant le matériau introduit dans la chambre de concassage. Les blocs de minerai ou de roche sont ainsi écrasés entre le cône et la paroi concave à chaque déplacement excentrique du cône, jusqu'à ce qu'ils soient suffisamment petits pour tomber par gravité par l'orifice de sorti.

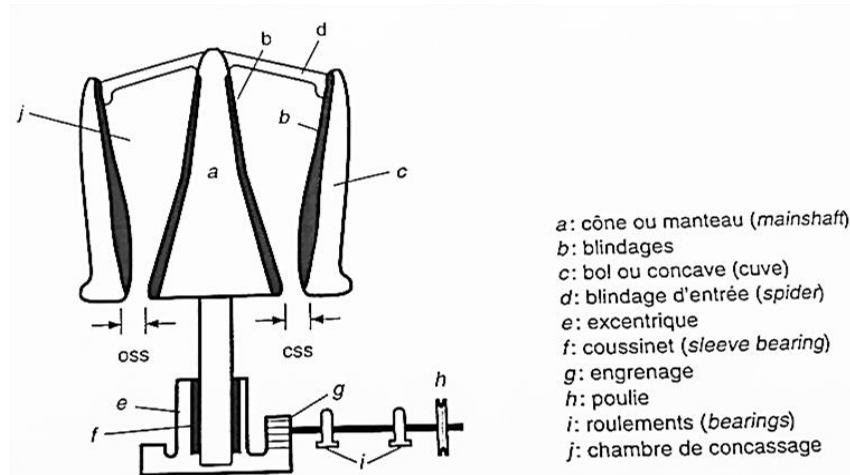
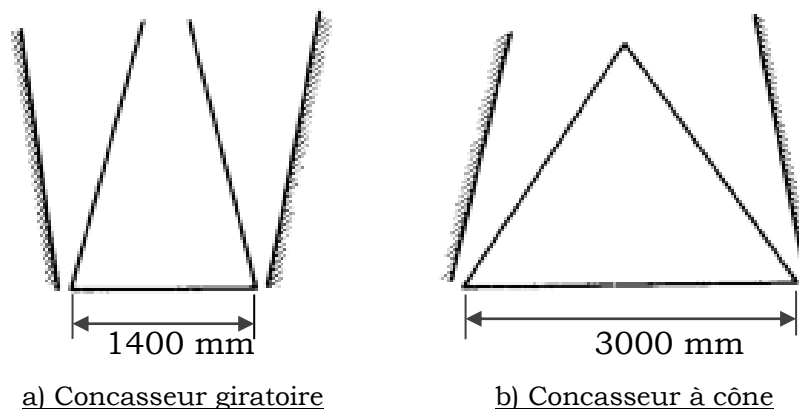


Figure 2.4. Concasseur giratoire

2.4.3. Concasseurs à cône

Le concasseur à cône est un équipement de fragmentation couramment utilisé dans les industries minières et les carrières. Bien qu'il présente des similitudes avec le concasseur giratoire, il s'en distingue par certaines caractéristiques techniques et applications spécifiques, il s'agit en réalité d'une version modifiée de ce dernier. La principale différence réside dans la conception de l'axe. Dans le concasseur giratoire traditionnel, l'axe est suspendu et effectue un mouvement de rotation excentré, tandis que dans le concasseur à cône, l'axe est plus court et non suspendu, étant supporté par un palier ou un système de roulements. Cette modification a pour effet d'offrir une machine plus compacte et plus stable, adaptée à des applications nécessitant une capacité de traitement plus élevée tout en maintenant une taille relativement réduite pour l'appareil. Ci-dessous on montre une comparaison de forme du manteau et du concave de ces deux appareils.



Ces appareils sont spécifiés par le diamètre de leur cône (de 560 mm à 3,1 m). La vitesse d'opération est aussi beaucoup plus élevée, ce qui fait que les particules sont soumises à une série d'impacts très fréquents plutôt qu'à une compression lente.

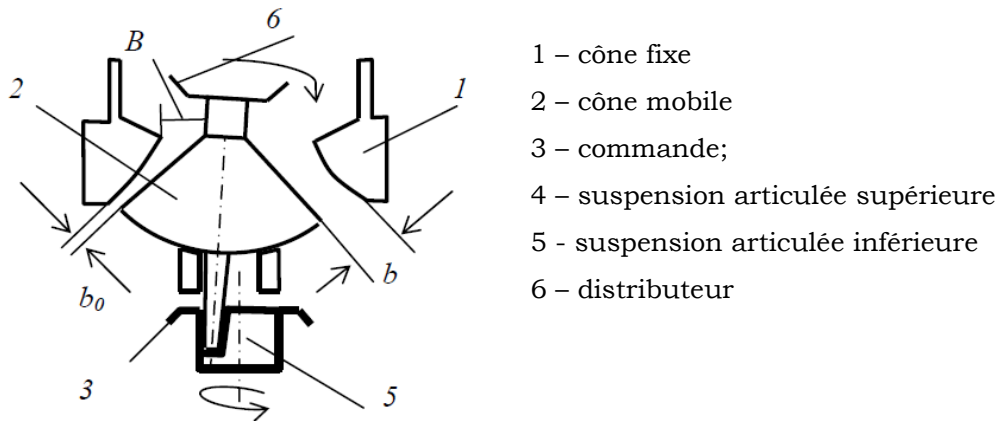


Figure 2.5. Schéma cinématique de concasseur à cône

2.4.5. Concasseurs à marteaux articulés

Les concasseurs à marteaux sont particulièrement adaptés au traitement des roches friables à faible ou moyenne dureté, telles que le calcaire, le gypse ou le charbon. Le processus de concassage repose sur une double action complémentaire : d'une part, les frappes successives des marteaux articulés montés sur un rotor en rotation autour d'un axe horizontal ; d'autre part, les impacts secondaires générés lorsque les fragments de matériau, projetés à grande vitesse, percutent les plaques de revêtement fixées à l'intérieur du bâti du concasseur. Cette combinaison d'impacts directs et de chocs contre les parois assure une fragmentation rapide et efficace du matériau.

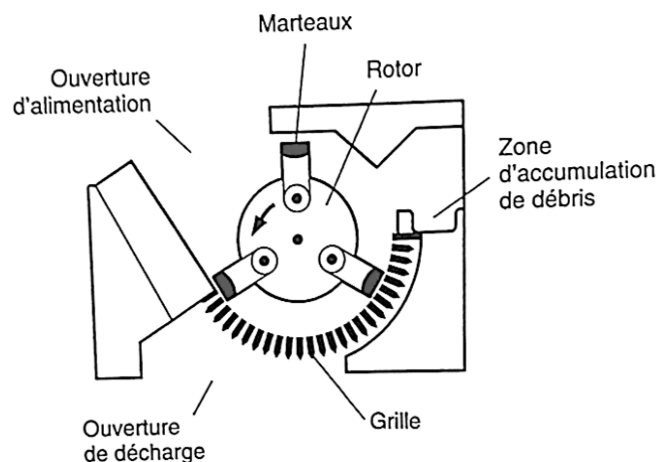


Figure 2. 6. concasseur à marteaux

2.4.6. Concasseur à percussion à plaques de choc réglables

Le concasseur à percussion à plaques de choc réglables est un équipement de fragmentation utilisé principalement pour le concassage secondaire et tertiaire de matériaux friables ou peu abrasifs (faiblement siliceux). Il fonctionne selon le principe de la percussion : le matériau est introduit dans la chambre de concassage où il est projeté à grande vitesse par un rotor en rotation contre des plaques de choc (ou battoirs) fixées sur le bâti du concasseur. Ces plaques de choc, dont la position peut être réglée, jouent un rôle essentiel dans le contrôle de la granulométrie finale : plus elles sont proches du rotor, plus le broyage est fin. Ce réglage permet ainsi d'adapter la fragmentation aux exigences du produit fini, notamment en favorisant la production de fines.

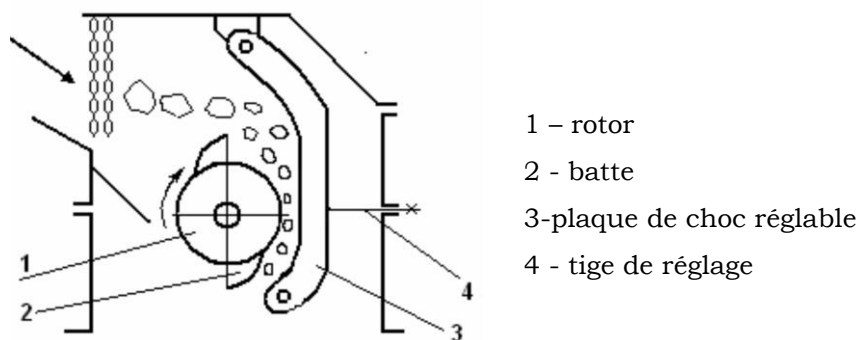


Figure 2. 7. Schéma cinématique du concasseur à percussion

2.4.7. Concasseurs à cylindres

Le concasseur à cylindres est un appareil de fragmentation utilisé principalement dans les processus de réduction de taille pour des matériaux de dureté modérée. Le matériau est alimenté et comprimé entre deux cylindres rotatifs qui tournent dans des directions opposées. Selon la configuration du concasseur, les cylindres peuvent être réglés pour ajuster l'écart entre eux, ce qui permet de contrôler la taille des particules produites. Ces cylindres peuvent être lisses ou cannelés, selon l'application et le type de matériau à traiter.

- **Cylindres lisses** : Ce type est utilisé pour le broyage de matériaux relativement tendres ou non abrasifs, comme le charbon, le gypse ou certains minerais.
- **Cylindres cannelés** : Utilisés pour des matériaux plus durs ou nécessitant une réduction plus importante de la taille, tels que les minéraux métalliques ou certains types de roches.

Les cylindres tournent à des vitesses relativement faibles, et la réduction de taille est obtenue par la pression exercée sur le matériau, entraînant la fracture des particules.

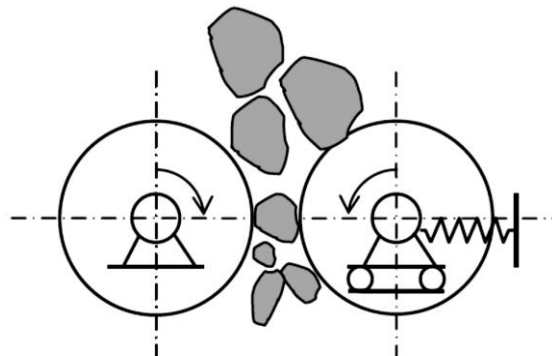


Figure 2.8. Schéma cinématique du concasseur à cylindres lisses.

3. Broyage

3.1. Définition

Le broyage est l'étape finale de la fragmentation consiste à la réduction des fragments obtenus au cours du concassage, le but de broyage est d'obtenir une taille de particule acceptable pour une utilisation spécifique et pour un traitement ultérieur à appliquer. Dans le traitement du minerai, le broyage vise également à obtenir une libération satisfaisante de différents minéraux pour mieux effectuer l'opération de séparation (libération des particules essentiellement de valeur et d'autres essentiellement de la gangue constituant le minerai). Le broyage peut être effectué soit par voie humide, soit par voie sèche. Le plus souvent, on l'applique par voie humide en circuit fermé avec un appareil de la classification dimensionnelle.

3.2. Libération

Le but de broyage est la libération des grains constituants du minerai. Les particules sont libérées quand elles ont une seule composition chimique, chaque particule libérée est donc constituée d'un unique minérale, bien qu'une libération complète ne soit pas exigée ni recherchée et qu'elle soit impossible à réaliser en pratique. La présence de mixtes dans un minerai rend les opérations de concentration beaucoup plus difficiles. Donc il est primordial de déterminer le degré de fragmentation correspond à une libération satisfaisante, la façon de faire s'appuie sur la notion granulométrique.

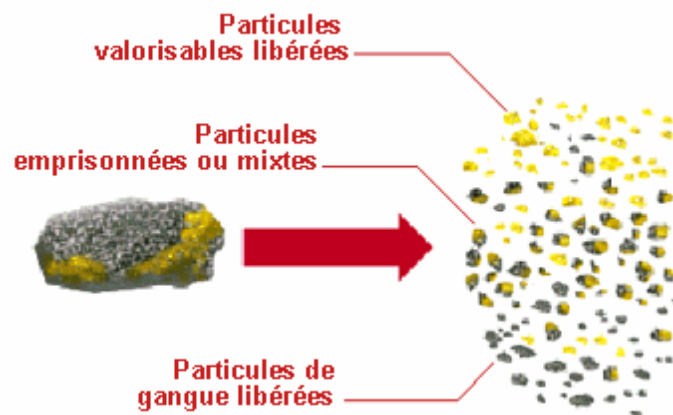


Figure 2.9. Libération des particules minérales (en jaune) de la gangue (en noir)

3.3. Types de broyeurs

D'après le caractère et la forme des corps du milieu broyant on distingue les broyeurs à boulets, à barres, à galets, les broyeurs autogènes (ce que l'on appelle «Auto-broyage» utilisait comme le milieu broyant les gros morceaux de minerai à broyer lui-même).

3.3.1. Broyeur à boulets

Un broyeur à boulets est un dispositif industriel utilisé pour la fragmentation des matériaux solides en fines particules, grâce à l'action combinée de chocs et d'abrasion exercée par des boulets en mouvement à l'intérieur d'un cylindre rotatif.

Son principe de fonctionnement repose sur la rotation d'un cylindre horizontal, partiellement rempli de boulets (en acier, céramique ou fonte), qui sont entraînés en mouvement par la rotation. Lorsque le cylindre tourne,

les boulets sont soulevés par la paroi interne jusqu'à un certain point avant de retomber sous l'effet de la gravité, frappant ainsi le matériau et le fragmentant en particules plus petites. Cette action de broyage est renforcée par l'abrasion provoquée par le roulement des boulets sur la surface des particules. Les broyeurs à boulets fonctionnent en mode discontinu, à sec ou en milieu humide, avec un taux de remplissage de 25 % du volume de la chambre à sec et de 50 à 60 % en milieu humide. Ils opèrent à des vitesses élevées (80-90 % de la vitesse critique), favorisant un mécanisme de fragmentation par impact (cataracte).

L'efficacité du broyage dépend de plusieurs paramètres, notamment la vitesse de rotation du cylindre, la taille et la densité des boulets, la durée du broyage ainsi que la nature du matériau traité. Certains broyeurs sont équipés de systèmes de classification permettant de contrôler la granulométrie du produit final

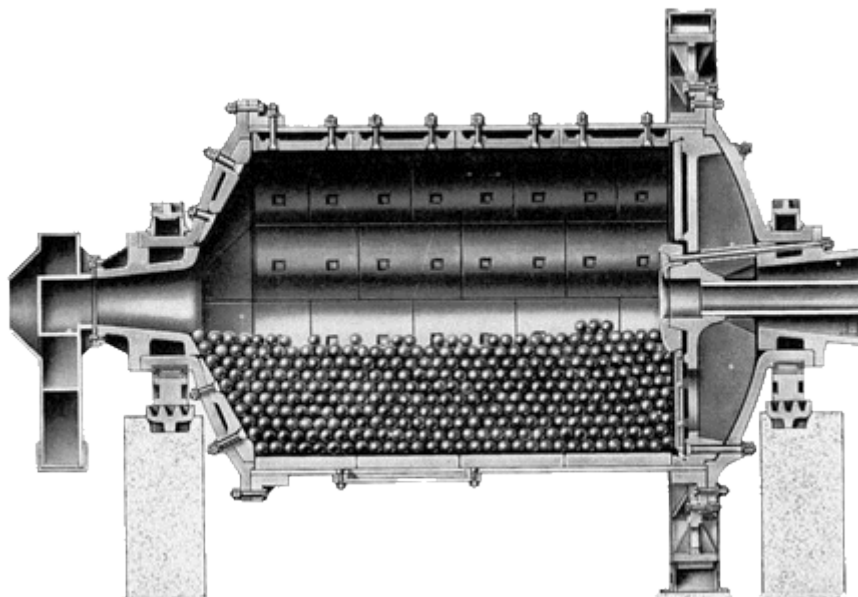


Figure 2.10. Schéma du broyeur à boulets

3.3.2. Broyeur à barres

Le broyeur à barres repose sur le même principe que le broyeur à boulets. La différence vient simplement de l'utilisation de barre plutôt que de boulet. Les barres sont généralement faites en acier très résistant. Vu la forme géométrique du corps broyant, ils sont considérés à la fois comme des

machines à concassage fin et comme des machines à broyage grossier. Ils peuvent traiter des particules aussi grossières que 50 mm et produire des particules de 300 μm et moins.

L'alimentation relativement grossière force les barres à se séparer du côté de l'entrée, ce qui augmente la tendance à concentrer le broyage sur les particules les plus grossières, limitant ainsi la production de particules trop fines. On parle alors d'un effet de classification des broyeurs à barres. La granulométrie des produits obtenus est beaucoup plus étroite.

Les broyeurs à barres sont normalement opérés entre 50 et 65% de leur vitesse critique, donc ils favorisent plutôt le mouvement en cascade par rapport à celui en cataracte.

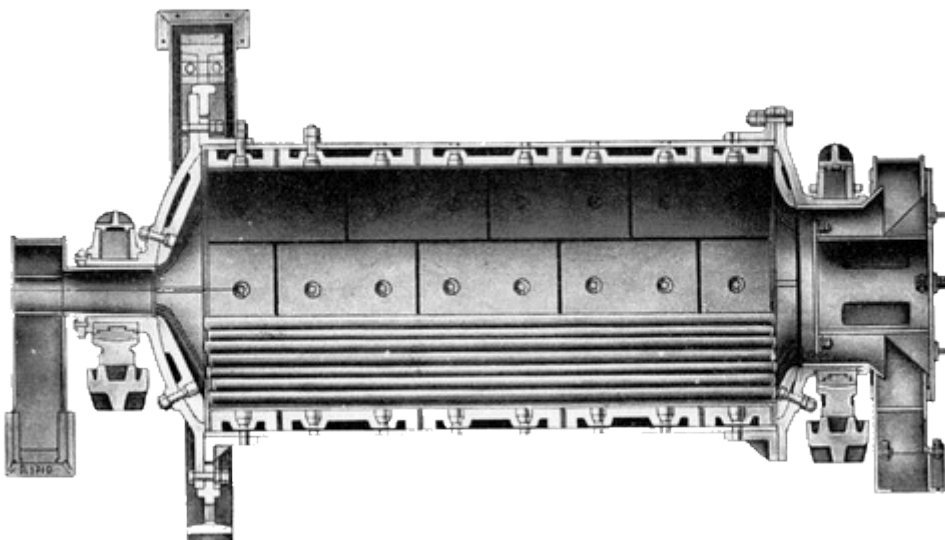


Figure 2.11. Schéma du broyeur à barres

3.3.3. Broyeurs autogènes

Comme son nom l'indique, le broyage autogène utilise le minerai lui-même pour effectuer la fragmentation. Donc, ils n'utilisent pas de charge broyante d'acier (boulets ou barres). En général, pour qu'un tel type de broyage soit possible, le minerai doit rencontrer certains critères, notamment ceux de *dureté* et de *compétence*, qui permettent aux gros morceaux de minerai de broyer les particules plus petites, tout en se broyant eux-mêmes contre le revêtement du broyeur. Le broyage autogène peut se faire en milieu sec ou humide. Lorsque la compétence du minerai est faible ou qu'elle varie trop, on utilise une charge réduite de boulets d'acier (6 à 10% du volume du broyeur)

de 4" à 6" de diamètre pour aider le broyage. On parle alors de broyage *semi-autogène* (SAG). La plupart des usines dernièrement construites sont munies de ce type de broyeurs pour l'étape de broyage primaire en raison de ses multiples avantages.

Les figures suivantes montrent les différents mécanismes de broyage en jeu dans ce type d'appareils.

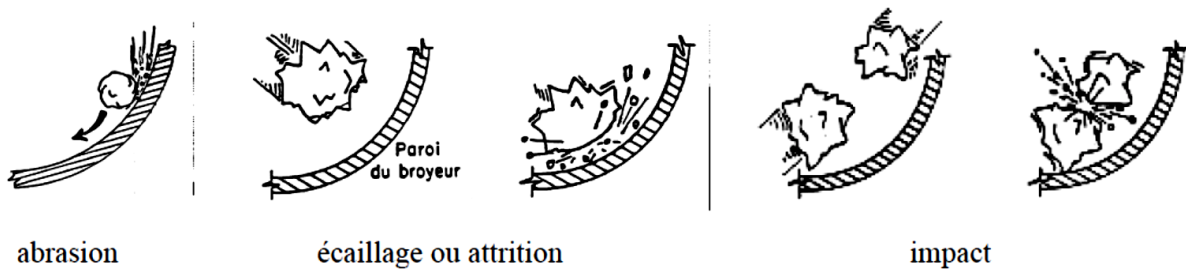


Figure 2.12. Modes de fracture dans le broyage autogène

- abrasion : des morceaux arrondis jusqu'à une taille assez petite
- écaillage : des aspérités des gros morceaux
- attrition : des petites particules à l'intérieur de la charge
- impact : entre corps broyants ou contre les parois

3.4. La vitesse critique et les régimes de fonctionnements

La vitesse de rotation du broyeur est exprimée comme un pourcentage de la vitesse critique (V_c), définie comme la vitesse de rotation à laquelle la charge se retrouve collée à la surface du blindage. La vitesse critique peut-être exprimée par les relations suivantes :

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} \text{ tours/min}$$

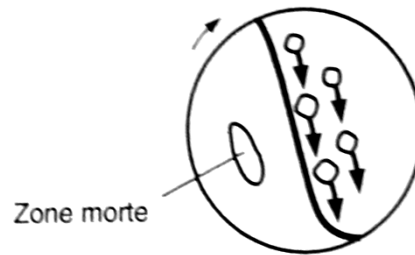
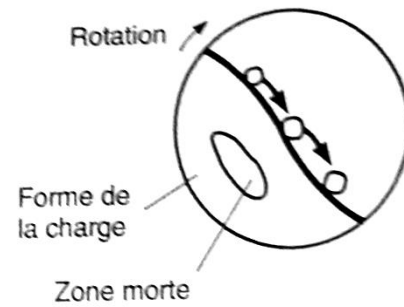
D est le diamètre interne du broyeur (m)

d :diamètr de la barre ou du boulet

La vitesse à laquelle le broyeur tourne est un élément déterminant du processus de broyage. C'est ce paramètre qui va déterminer le régime de fonctionnement du broyeur. La vitesse permet de déterminer à quel moment la masse broyante va se détacher de la surface du cylindre pour retomber sur les granulats solides. Les broyeurs à tambour peuvent fonctionner suivant trois régimes mécaniques:

-à vitesse de rotation lente (marche dite «en **cascade**») ne dépassant pas 50-70 % de la vitesse critique (voir la notion sur cela placée ci-après). Dans ce cas on n'obtient que le broyage par écrasement avec la trituration car la chute des corps broyants n'existe pas.

-à vitesse de rotation normale (marche dite «en **cataractes**») dont la valeur est égale à 80-90 % de la vitesse critique; ce type de marche est plus répandu. Ici le broyage se fait et par chocs des corps broyants grâce à leur chute, et par écrasement avec la trituration.



Conclusion

La comminution est la première phase de traitement du minerai et consiste en la réduction granulométrique des matériaux extraits de la mine, à savoir le « minerai tout-venant ». Cette étape va permettre de libérer les minéraux de valeur (porteur des métaux valorisables) des minéraux de la gangue (stérile), de générer des surfaces de grain fraîches, de réduire la taille des grains afin d'augmenter leur surface spécifique pour améliorer les cinétiques (vitesses) de transformation des procédés de traitement.

Chapitre 3 : Classement dimensionnel

Introduction

Après concassage et broyage, les produits sont généralement séparés simplement en fonction de leur taille. L'objectif principal est de produire des matières premières de taille appropriée pour un traitement ultérieur. Les matériaux surdimensionnés sont recyclés pour une réduction supplémentaire.

Les procédés de classement dimensionnel d'un matériau composé de mélange des morceaux ou particules de différentes dimensions en classes de grosseur s'appellent criblage et classification. La différence entre ces deux procédés consiste en ce que le criblage est réalisé au moyen d'une surface tamisant et la classification utilise les poids des particules qui donnent des différentes vitesses de ces particules dans un milieu.

1. Définition de criblage

Le criblage est une opération de classement dimensionnel de grains de matières en deux ou plusieurs fractions granulométriques (figure 3.1). Pour cela, on utilise une surface perforée qui laisse passer les fragments de dimensions inférieures aux dimensions des perforations et qui retient les fragments de dimensions supérieures. Donc le criblage permet de classer le produit alimentant en passant (ou tamisât) et en refus. Le débit d'un crible (ou la capacité de criblage) correspond à la quantité horaire massique que peut recevoir cet appareil pour une efficacité de criblage déterminée.

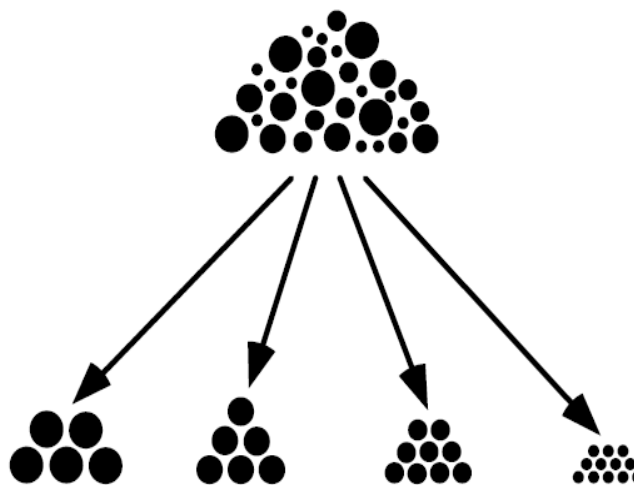


Figure 3.1. Séparation d'un ensemble de particules en plusieurs fractions granulométriques.

2. But du criblage

Le but du criblage peut être variable :

- séparer les plus gros fragments avant de les retraiter pour améliorer une fragmentation insuffisante ;
- inversement, éliminer les fractions les plus fines qui peuvent être gênantes ou qui peuvent être traitées séparément (agglomération, par exemple) ;
- préparer des classes granulométriques en vue de répondre à des exigences commerciales (granulats, charbon) ;
- permettre une meilleure efficacité d'un procédé de traitement physique (gravimétrie, par exemple) ou physico-chimique (flottation, par exemple) par un choix judicieux des tranches granulométriques à traiter.

3. Types de surfaces criblantes

Les surfaces criblantes peuvent être classées, au point de vue de leur construction, en tôles perforées, grilles métalliques et tissus métalliques (figure 3.2.). Elles sont fabriquées en acier, bronze, caoutchouc, plastique. Les surfaces criblantes de type a-f peuvent être fabriquées en caoutchouc ou plastique de grande résistance à l'usure.

Les tôles perforées sont utilisées dans de nombreuses installations, en particulier pour le criblage des produits lourds et de granulométrie supérieure à 70 mm. On utilise généralement les grilles métalliques, pour les granulométries comprises entre 1 et 70 mm et les tissus métalliques pour les granulométries inférieures à 1 mm.

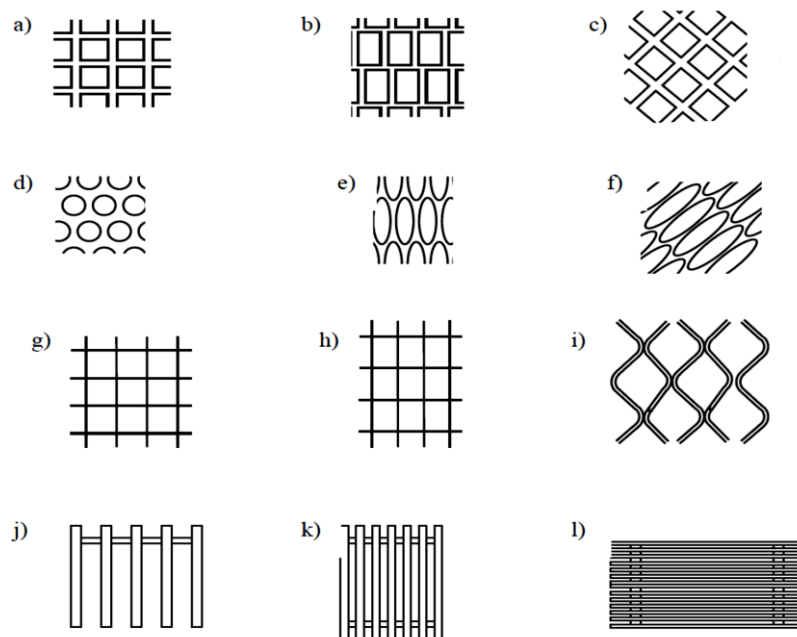


Figure 3.2. Surfaces criblantes: de a à f - tôles perforées; a – trous carrés; b - trous rectangulaires; c- trous carrés en diagonale; d - trous ronds; e – trous oblongs; f - trous oblongs en oblique; de g à i - tamis; g – toiles à mailles carrées à mailles carrées; h - toiles à mailles rectangulaires; i – toiles à fil-zig; j - à barreaux parallèles; k - à fentes à égouttage; l – à fentes transversales;

4. Cribles industriels

Parmi les nombreux équipements de criblage, les quatre appareils les plus fréquemment employés sont les grizzlys, les trommels, les cribles vibrants et les cribles giratoires. La description et les conditions d'application sont détaillées dans les sections suivantes.

4.1. Les grizzlys

Généralement, le matériel contenant une forte proportion de composantes grossières est séparé à l'aide d'un grizzly. Cet appareil est composé d'une série de barres parallèles robustes qui sont montées sur un cadre (figure 3.3). Il existe une version modifiée du grizzly dans laquelle les barres sont remplacées par des chaînes.

De plus, ces équipements peuvent être stationnaires ou vibrants. Leur surface est inclinée suivant un angle variant entre 20° et 50°. La capacité de l'appareil augmente avec l'angle mais son efficacité diminue par la même occasion. Le matériel à tamiser (sec ou humide) est introduit par le haut de la pente pour qu'il s'écoule dans la même direction que les barres parallèles.

Ces équipements sont recommandés pour des tailles de séparation qui varient entre 20 mm et 300 mm. De plus, ils sont caractérisés par une capacité très élevée (jusqu'à 1000 tonnes/heure) ainsi qu'une faible efficacité.

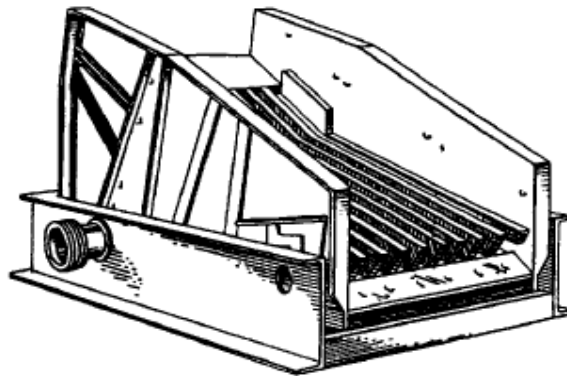


Figure 3.3. Équipement de criblage : grizzly vibrant

4.2. Les trommels

Les trommels sont principalement composés d'une surface de criblage de forme cylindrique dont l'axe de rotation est légèrement incliné par rapport à l'horizontale (figure 3.4). Le matériel à tamiser est alimenté par le bout le plus élevé du cylindre pour favoriser le déplacement du matériel qui est retenu par la surface de crible jusqu'à la sortie. Les particules retenues glissent sur la surface intérieure du trommel en suivant une trajectoire hélicoïdale causée par la rotation de la surface de crible cylindrique. Pour sa part, le matériel traversant la surface de tamisage est récupéré sous le cylindre.

Les trommels peuvent être disposés en série par ordre décroissant de grosseur des ouvertures des surfaces de criblage. Les particules qui ne sont pas retenues par la surface de crible servent à alimenter le trommel suivant. Les trommels sont recommandés pour des tailles de séparation qui varient entre 6 mm et 55 mm et le criblage peut être effectué à sec ou humide.

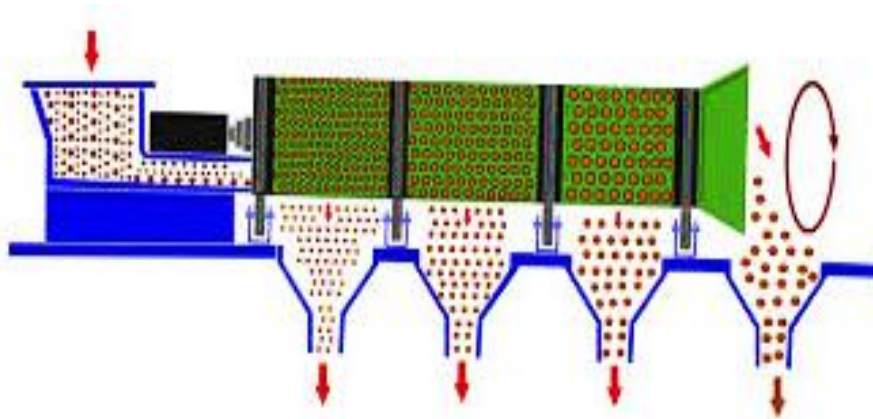


Figure 3.4.équipement de criblage : trommel

4.3. Les cribles vibrants

Les cribles vibrants sont les appareils de criblage les plus utilisés. Ils sont constitués d'une surface de criblage plane qui est inclinée selon un angle d'environ 35° par rapport à l'horizontale. La vibration peut être induite de façon circulaire, elliptique ou par chocs. En plus de favoriser le déplacement du matériel, elle sert à prévenir le colmatage des surfaces de criblage. Qu'ils soient suspendus ou montés sur une base à ressorts, les cribles vibrants occupent très peu d'espace. La figure 3.5 présente un exemple de crible vibrant à plusieurs étages. Il s'agit d'un système où les surfaces de criblage (trois dans ce cas) sont agencées par ordre décroissant de grosseur des ouvertures et sont actionnées par le même mécanisme vibratoire. Le matériel à tamiser est introduit par le haut de la pente du tamis supérieur. Les particules qui sont retenues par ce tamis sont récupérées au bas de la pente tandis que celles qui le traversent tombent sur le tamis inférieur.

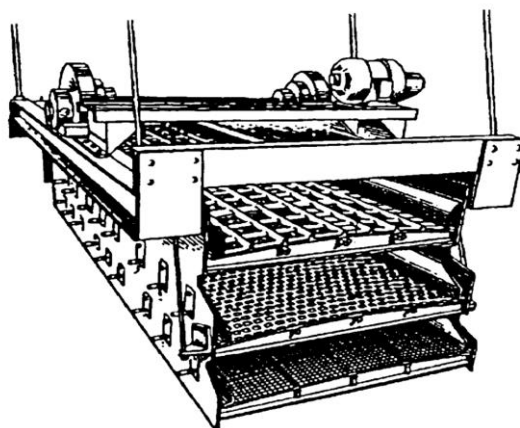


Figure 3.5 - crible vibrant à plusieurs étages

4.4. Les cribles giratoires

Les cribles giratoires sont composés d'une surface de tamisage de forme circulaire qui est animée d'un mouvement giratoire horizontal et d'un mouvement vibratoire vertical. Le système complet est généralement constitué de trois surfaces de criblage empilées verticalement en ordre décroissant de grosseur des ouvertures. L'ensemble repose sur une base à ressorts et le mouvement vibratoire est transmis grâce à un poids excentrique qui est fixé au moteur. Les crible giratoires peuvent être alimenté avec du matériel sec ou avec une pulpe. Le matériel qui est retenu sur le crible du haut est retiré tandis que celui qui passe le tamis tombe sur le crible inférieur. Un exemple de cet appareil est présenté à la figure 3.6.

Essentiellement destiné au criblage fin, ce type d'appareil est conçu pour séparer des particules dont la taille oscille entre 40 μm et 12 mm. Son efficacité est très élevée mais sa capacité est faible, soit un maximum de 40 tonnes par heure.

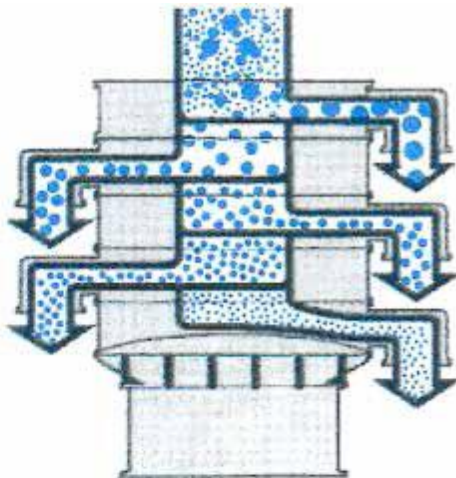


Figure 3.6. Crible giratoire

4. 5.Conditions d'application

Les sections précédentes ont fait état des tailles de particules en fonction de l'utilisation des appareils qui ont été décrits. Le tableau suivant résume ces conditions d'application en détaillant l'efficacité et la capacité de chaque appareil.

Tableau 3.1. Application typique des appareils de criblage

Appareil	Taille des particules	Efficacité	Capacité
Grizzly	20 mm à 300 mm	faible	très élevée
Trommel	6 mm à 55 mm	moyenne	faible
cribles vibrants	250 μm à 250 mm	élevée	élevée
cribles giratoires	40 μm à 12 mm	très élevée	faible

5. Méthodes de tamisage

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis (figure 8). Cette procédure expérimentale peut se faire dans un environnement sec, opération la plus courante, ou humide, sous aspersion d'eau.

Les grains retenus dans chaque tamis sont ensuite pesés afin de déterminer le pourcentage du poids original retenu dans chaque tamis.

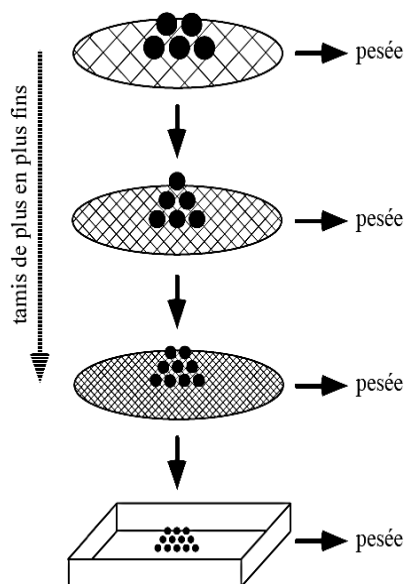


Figure 3. 7. Procédure simplifiée de tamisage à sec

5.1. Traitement des résultats

Les résultats du tamisage peuvent être compilés de trois différentes façons: a) en calculant le pourcentage massique de chaque fraction, b) en calculant

le pourcentage cumulatif retenu sur chaque tamis et c) en calculant le pourcentage cumulatif passant pour chaque tamis (Tableau 3. 2).

Tableau 3.2. Résultats d'analyse granulométrique

Mailles (mm)	Poids des fractions (g)	Poids des fractions (%)	Poids des refus cumulés (%)	Poids des passants cumulés (%)
ϕ_1	M1	$P_1 = M_1/M_t \cdot 100$	P1	100-P1
ϕ_2	M2	$P_2 = M_2/M_t \cdot 100$	P1+P2	100-(P1+P2)
ϕ_3	M3	$P_3 = M_3/M_t \cdot 100$	P1+P2+P3	100- (P1+P2+P3)
ϕ_4	M4	$P_4 = M_4/M_t \cdot 100$	P1+P2+P3+P4	100-(P1+...+Pn)
ϕ_n	Mn	$P_n = M_n/M_t \cdot 100$	$P_1 + \dots + P_n = 100$	0

Granulométrie : Mesure des dimensions des grains d'un mélange dont le résultat est présenté sous forme de répartition statistique (distribution).

Refus : Partie de l'échantillon qui n'est pas passée à travers les mailles du tamis, la partie des grains retenue dans un tamis.

Tamisât : Partie de l'échantillon passé à travers les mailles du tamis.

6. Classification

6.1. Définition

La classification est une opération fondamentale dans le traitement des matériaux, notamment dans les procédés de séparation granulométrique. Elle consiste à séparer un ensemble de particules solides en différentes fractions selon leur taille, en exploitant les différences de vitesse terminale de chute des particules dans un fluide, généralement de l'eau ou de l'air.

Le principe repose sur le fait que les particules de tailles et de densités différentes ne se déplacent pas à la même vitesse lorsqu'elles sont soumises à un écoulement fluide. Les particules plus fines ou de plus faible densité auront une vitesse de chute plus faible et resteront en suspension plus longtemps, tandis que les particules plus grossières ou plus denses auront une vitesse de chute plus élevée et se déposeront plus rapidement.

La classification s'applique lorsque qu'il n'est pas rentable au point de vue économique d'utiliser le tamisage. En effet, il a été vu que les équipements industriels de tamisage capables de séparer les particules de l'ordre des microns comme les tamis giratoires ont une très faible capacité. Généralement, la classification a pour but de restreindre l'alimentation d'un procédé de concentration à la gamme de tailles des particules qui est appropriée.

Les deux produits obtenus à la suite de la classification sont la surverse (overflow) et la sousverse (underflow). La surverse est composée des particules dont la vitesse terminale de chute est faible tandis que la sousverse est composée des particules dont la vitesse terminale de chute est élevée.

6.2. Loi du mouvement des solides dans un fluide

6.2.1. vitesse limite d'un corps solide (sphère) dans un fluide :

Une particule discrète de volume et densité constants en chute libre dans le vide tombe avec une accélération « g ». Quand cette chute a lieu au sein d'un fluide, il faut tenir compte de la poussée d'Archimède et d'une force de résistance au mouvement de la particule appelée force de traînée qui dépend essentiellement de la viscosité du fluide et de la vitesse de la particule.

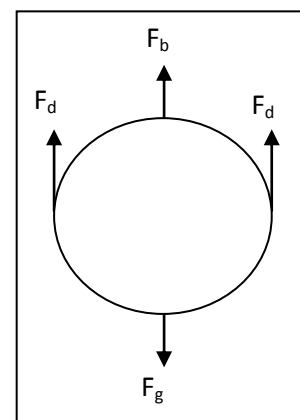
Lors de la sédimentation de particules solides de masse m, de diamètre d et de masse volumique ρ_s dans un milieu fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité μ , les particules sont soumises à l'action de trois forces :

La force de gravité (F_g) : (dirigée vers le bas)

$$F_g = m_p g = \rho_p V_p g \dots \dots \dots (1)$$

La poussée d'Archimède (F_b): fonction de la différence de masse volumique entre la particule et le milieu fluide et dirigée vers le haut.

$$F_b = \rho_f V_p g \dots \dots \dots (2)$$



La force de traînée (F_d): Les forces de frottement exercées sur la particule par le fluide, du fait de sa viscosité (ces frottements croissent avec le carré de la vitesse relative particule-fluide)

$$\mathbf{F}_d = C_d A \frac{1}{2} (\rho_f \mathbf{v}^2) \dots \dots \dots (3)$$

Où :

- V_p : volume de la particule (v=πd³/6)
- ρ_p : masse volumique de la particule
- ρ_L: masse volumique du fluide
- A : aire de la section en travers de la particule, perpendiculaire à son mouvement (particule sphérique A=πd²/4)
- C_d : coefficient de traînée
- v : vitesse de chute de la particule
- g : accélération de la pesanteur.

Lors du processus de sédimentation, une particule accélère jusqu'à atteindre une vitesse constante que l'on nomme vitesse limite de chute (v_{lim}). Une relation donne cette vitesse pour une particule sphérique de diamètre d :

$$V_l = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{D_p}{C_d} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)} \dots \dots \dots (4)$$

Avec:

- V_l: vitesse de la particule (m/s)
- ρ_p: masse volumique de la particule (kg/m³)
- ρ_f: masse volumique du fluide (kg/m³)
- D_p: diamètre de la particule (m)
- C_d: coef de traînée de la particule (0,44 pour une sphère)
- g: accélération due à la force de pesanteur (m/s²)

La vitesse terminale (limite) peut donc être calculée si on connaît le coefficient de traînée C_d

Coefficient de traînée C_d

L'ensemble des effets de viscosité et d'inertie sont rassemblés dans un *coefficient de traînée* symbolisé (C_d); plus il est grand, plus la

particule se déplace difficilement. Sa valeur est fonction du nombre de Reynolds, ce qui reflète la diversité des mécanismes en jeu.

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension

$$Re = \frac{\rho_f v_l D_p}{\mu} \dots\dots\dots(5)$$

avec:

ρ_f : masse volumique du fluide (kg/m³)

v_l : vitesse de la particule (m/s)

D_p : diamètre de la particule (m)

μ : viscosité dynamique du liquide (Pa.s)

6.3. Types de classificateurs

Il existe un grand nombre d'équipements de classification. Dans les classificateurs mécaniques, la séparation est effectuée par des moyens mécaniques tandis qu'elle est effectuée grâce aux forces gravitationnelles et centrifuges dans les classificateurs non mécaniques. Des exemples de ces types de classificateurs seront présentés dans les sections suivantes, il s'agit du classificateur mécanique à vis, de l'hydrocyclone et du classificateur hydraulique (ou à lit fluidisé). Il existe plusieurs autres équipements de classification (exemple: le classificateur conique et la centrifugeuse) mais ces trois équipements sont de loin les plus fréquemment employés.

Chapitre 4 : Méthodes gravimétriques

1. généralité

La concentration gravimétrique est une méthode qui consiste à séparer des minéraux de densité différente par la force de gravité ou par d'autres forces, par exemple la force centrifuge ou la résistance au mouvement qu'offre un fluide visqueux comme l'eau ou l'air. Le mouvement d'une particule dans un fluide dépend non seulement de sa densité, mais également de sa taille et de sa forme.

Les clés d'une séparation gravimétrique efficace sont à rechercher dans la connaissance parfaite des paramètres minéralogiques du minerai à traiter (masse volumique des divers constituants, répartition granulométrique des espèces minérales,...). En effet, il est possible d'estimer l'applicabilité d'une telle approche à l'aide de la formule suivante:

$$C_T = \frac{(\rho_L - \rho_f)}{(\rho_l - \rho_f)} \quad (1)$$

Où

CT: Critère de Taggart.

ρ_L : représente la masse volumique de la phase solide lourde,

ρ_l : la masse volumique de la phase solide légère et,

ρ_f : la masse volumique du fluide.

Comme la séparation est aussi influencée par la dimension des particules, l'efficacité du processus de séparation par gravité est meilleure pour des particules grossières que pour des petites particules; dans l'intervalle $1,25 < CT < 2,5$, la faisabilité de la séparation dépendra de la dimension des particules à séparer (tableau 4.1).

Tableau 4.1. Critère de concentration gravimétrique en fonction de la taille des particules

Critère	Applicabilité
$CT > 2,5$	Séparation facile pour toutes dimensions
$1,5 < CT < 2,5$	Séparation possible pour dimensions $> 0,2$ mm
$1,25 < CT < 1,5$	Séparation possible pour dimensions $> 1,7$ mm
$CT < 1,25$	Séparation presque impossible

2. Les mécanismes de concentration gravimétrique

Les équipements de concentration gravimétrique sont divisés en quatre groupes selon les mécanismes de séparation impliqués. Ces mécanismes sont illustrés à la figure 4.1

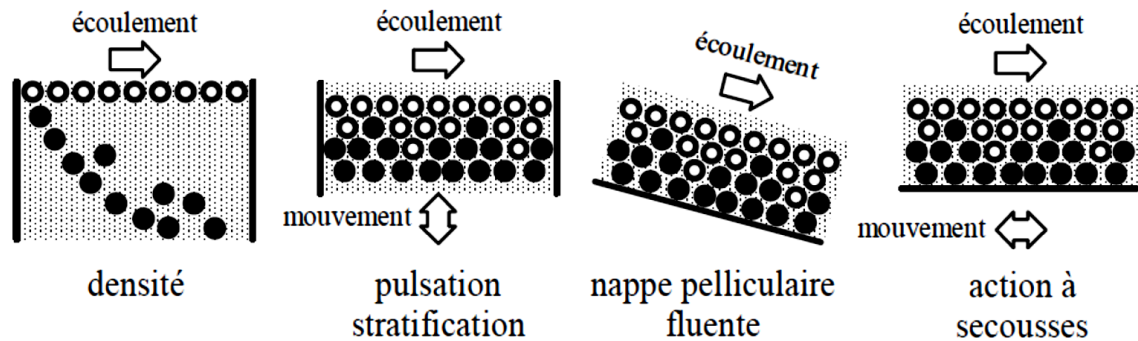


Figure 4.1. Les mécanismes de séparation

2.1. Séparation par milieu dense

Il est le plus simple de tous les processus de séparation gravimétrique et pour longtemps a été une méthode de laboratoire standard de séparation des minéraux à densité différentes. Le mécanisme par milieu dense impliquant la densité faite intervenir la masse volumique (densité) du fluide ou de la pulpe ainsi que la force gravitationnelle pour séparer les particules en deux produits, ceux qui flottent et ceux qui coulent.

Cette méthode se fait par immersion des minéraux dans un liquide de densité (ρ) est comprise entre celle des produits lourds et celle des produits légers, les minéraux ayant une densité faible (fraction légère) que celle de la liqueur flottent à la surface ($\rho_1 < \rho$) et ceux ayant une densité plus haute (fraction lourde) que celle de la liqueur se plongeant au fond ($\rho_2 > \rho$) (figure 4.2)

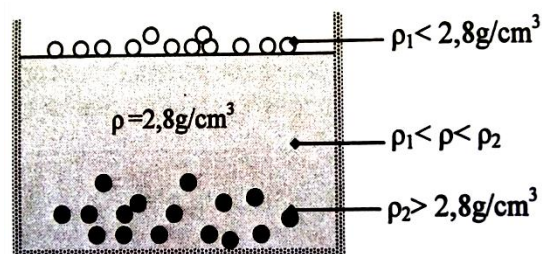


Figure 4.2. Principe de la séparation par milieu dense

2.1.1. Étapes d'un traitement par milieu dense

❖ Préparation du minerai

Il est débarrassé des fractions fines non traitables. En effet, la limite inférieure des procédés les plus performants est de 300 μm . Au-dessous, des problèmes de récupération du médium et de sédimentation du minerai (naturelle ou par centrifugation) se posent. La limite supérieure n'est déterminée que par la maille de libération du minerai et par la technologie du séparateur (elle peut atteindre 200 mm et plus dans le cas du charbon).

❖ **Les liqueurs denses** : Les liqueurs denses sont des solutions ayant de fortes densités dans lesquelles il est possible de faire "flotter" les minéraux ayant des densités inférieures. Il existe deux liqueurs qui sont couramment utilisées, soit le bromoforme (CHBr_3) et l'iodure de méthylène (CH_2I_2). Les liqueurs denses ont été proposées pour utilisation industrielle, mais pour des raisons de toxicité et le coût élevé, ceux-ci sont limités à l'utilisation à petite échelle au laboratoire, et même ici, ces matières toxiques.

2.2. Séparation par pulsation et la stratification (accélération différentielle)

C'est une des plus anciennes méthodes de séparation par gravité. On l'utilise plutôt dans le rang des particules grossières. Pour des particules assez homogènes en dimension (3 à 10 mm), on peut produire une assez bonne séparation même pour les minéraux dont la densité est très semblable (fluorite, 3.2 et quartz, 2.65). Lorsque la différence de densité est élevée, une bonne concentration est possible avec un intervalle large de dimension des particules.

Le mécanisme qui fait intervenir la pulsation et la stratification repose sur l'action de pulsations oscillatoires verticales d'un courant d'eau. Ce mécanisme engendre l'expansion du lit qui facilite le mouvement des particules les unes par rapport aux autres. Ce mouvement provoque la stratification des particules en fonction de leur masse volumique. Les jigs constituent les principaux équipements de ce groupe.

a) Les jigs

Le principe de fonctionnement des jigs repose sur l'action de courants d'eau successivement ascendants (pulsion) puis descendants (suction) qui circulent à travers un lit de particules. Dans un premier temps, le lit de particules qui repose sur une grille est soumis à un courant d'eau ascendant qui a pour effet de fluidiser le lit de particules tout en le dilatant. Ensuite, le courant d'eau descendant entraîne les particules vers la grille tout en produisant un compactage du lit.

Le résultat de la stratification consiste en la formation de deux couches distinctes dont l'une est composée des particules de masse volumique élevée (couche inférieure) et l'autre des particules de masse volumique faible (couche supérieure). Le principal phénomène responsable de la séparation des particules est donc la sédimentation entravée.

c) Types de jigs

Essentiellement, une jig est un réservoir ouvert rempli d'eau, avec une grille horizontale dans le haut et un apex en bas pour l'enlèvement du concentré.

Il existe deux types d'équipements industriels, soit les jigs à grille fixe et les jigs à grille mobile. Un diaphragme ou un piston assure la pulsion et la suction du liquide dans les jigs à grille fixe. Dans les jigs à grille mobile, la pulsion et la suction du liquide sont engendrées par le mouvement alternatif de haut en bas de la grille par un système mécanique. La figure 3 présente le fonctionnement d'un jig à grille fixe Denver durant la phase de pulsion en (a) et durant la phase de suction en (b).

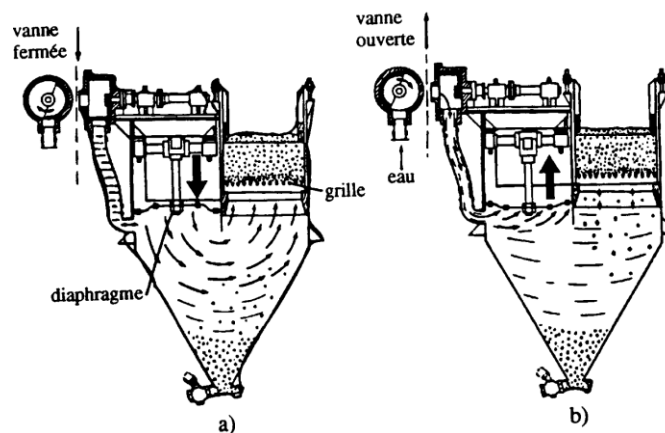


Figure 4.3. Jig à grille fixe Denver (a : pulsion ; b : suction)

2.3. Séparation par nappe pelliculaire fluente

Il s'agit d'une nappe d'eau de faible épaisseur (quelques mm à quelques cm) s'écoulant sur un plan incliné. Les particules, suivant leur vitesse de chute et leur résistance au mouvement, se séparent en plusieurs catégories densimétriques. Les particules de masse volumique élevée ont tendance à traverser le lit pour former une couche de particules inférieure qui s'écoule lentement le long du plan incliné. La couche supérieure qui est composée des particules de faible masse volumique s'écoule plus rapidement puisque ces particules sont facilement entraînées par le courant liquide. On utilise pour cela des spirales.

a) Spirales : la spirale de Humphreys introduites en 1943 (figure 5) est parmi les appareils de concentration gravimétrique à soutirage continu, les plus employés pour sa simplicité de fabrication, sa robustesse et son très faible cout d'exploitation. Elle est utilisée principalement pour le traitement de sables, fer, rutile, zircon, mica et ilménite.....

La pulpe, ayant entre 15 et 45% de solides dont la granulométrie se retrouve entre 3 mm et 75 μm , est introduite en haut de la spirale et descend suivant un mouvement hélicoïde. Sous l'effet de la sédimentation (sédimentation gênée et filtration interstitielle), plus la force ne centrifuge, les particules denses ont tendance à se tenir près de l'axe central de la spirale (zone de plus faible vitesse), tandis que les particules moins denses sont refoulées par centrifugation vers l'extrémité de la spire (zone des fortes vitesses d'écoulement).

L'eau de lavage qui est alimentée par le haut de la spirale contribue à balayer les particules les moins denses et à les entraîner au bas de la spirale où elles sont collectées. Les particules dont la masse volumique est élevée sont soutirées dans la partie supérieure de la spirale. Ces particules s'accumulent rapidement dans la bande située près du centre car leur mouvement est peu influencé par le courant d'eau de lavage. Elles sont donc soutirées de la pulpe en écoulement par des collecteurs situés près du haut de la spirale. Un mélange de particules mixtes comportant à la fois des particules légères et des particules lourdes est soutiré par des collecteurs situés dans la partie inférieure de la spirale.

La qualité de la séparation est supérieure lorsque la gamme de tailles des particules constituant l'alimentation est étroite et que la différence entre les masses volumiques des matériaux à séparer est égale ou supérieure à 1 g/cm³. En conséquence, il est important de procéder à une classification du matériel avant le traitement. La capacité des spirales à pente douce s'étend de 1 à 2,9 t/h et celle des spirales à pente plus prononcée s'étend de 2 à 6 t/h. La capacité est généralement augmentée en multipliant le nombre d'équipements.

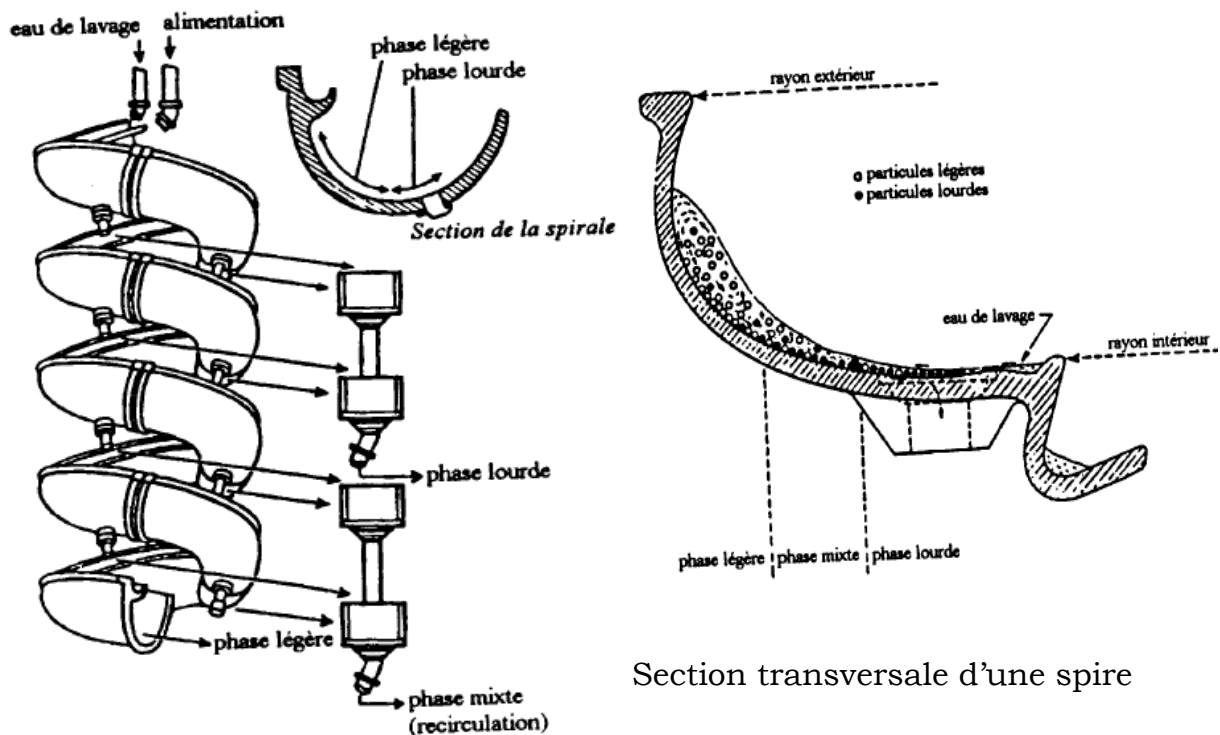


Figure 4.4. Séparateur à spirale de Humphrey

2.4. Séparation par mécanisme combiné (mixte)

L'action de secousses horizontales combinée à l'action de la nappe pelliculaire fluente contribue aussi à obtenir la stratification désirée. On utilise pour cela les tables à secousses.

a) Les tables à secousses

Les tables à secousses sont composées d'une table légèrement inclinée (réglable de 0° à 10°) dans le sens de la largeur et équipée d'un mécanisme qui lui communique longitudinalement un mouvement de va-et-vient asymétrique. L'amplitude et la vitesse de ce mouvement sont aussi réglables. La surface de la table est couverte de rilles longitudinales et parallèles dont

la profondeur diminue progressivement à partir du point d'alimentation de la pulpe jusqu'à la sortie qui est diamétralement opposée. L'eau de lavage qui s'écoule sur la table entraîne les particules légères dans la direction transversale (vers le bas).

La stratification des particules entre les riffles se produit sous l'action des secousses et du courant d'eau de lavage. Les secousses contribuent à dilater le lit de particules afin de permettre aux grosses particules denses de le traverser jusqu'à la surface de la table. L'effet des secousses entraîne la formation de deux couches de particules distinctes dont l'une est composée des particules de masse volumique élevée (couche inférieure) et l'autre des particules de masse volumique faible (couche supérieure). Les différentes phases décrivant la progression de la stratification sont illustrées à la figure 4.5.

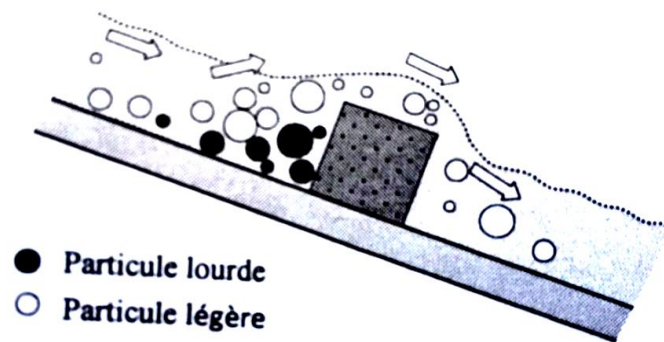


Figure 4.5. effet d'un riffle sur la séparation

Les particules lourdes sont acheminées longitudinalement à l'autre extrémité de la table grâce à la direction et à la nature asymétrique des secousses. La figure 4.6 présente une vue en plan d'une table à secousses accompagnée de la répartition des différents produits récupérés en fonction de leur masse volumique. À l'aide de collecteurs réglables, la bordure longitudinale permet de récupérer deux produits différents dont l'un consiste en un concentré de grosses particules de masse volumique faible et l'autre en un mélange de particules mixtes et de petites particules légères.

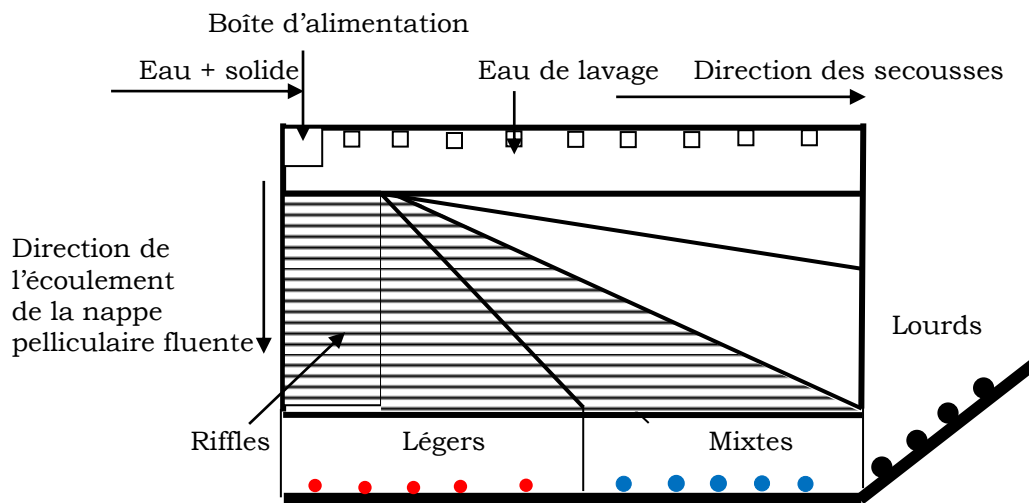


Figure 4.6. Table à secousses des différents avec produits récupérés

Les tables à secousses sont employées pour le traitement des particules dont le diamètre varie entre 75 mm et 4,75 mm. Leur capacité varie principalement en fonction de la taille des particules à séparer. Par exemple, la capacité d'une table Wilfley est d'environ 4 t/h pour des grains de 2,5 mm et d'environ 0,4 t/h pour des grains de 100 à 400 mm. Pour une séparation efficace, la différence entre les masses volumiques des particules denses et des particules légères doit être au moins de 1 g/cm³.

2.5. Conditions d'application

L'utilisation des équipements qui ont été décrits précédemment est limitée par des conditions spécifiques quant à l'intervalle granulométrique à l'intérieur duquel ces équipements fonctionnent de façon efficace. Le tableau suivant résume ces conditions d'application et présente la capacité maximale de chaque équipement accompagnée de son appréciation qualitative. Les unités de capacité dont il est question dans ce tableau doivent être interprétées comme des tonnes métriques de solide sec par heure. De plus, les valeurs de capacité s'appliquent uniquement au traitement de minerai.

Tableau 4.2. Application et capacité des appareils de concentration gravimétrique

Appareil Intervalle	granulométrique	Capacité maximale	Appréciation de la capacité
Séparateur par milieu dense	2,5 à 5 cm	500 t/h	élevée
Jig	0,5 à 200 mm	25 t/h	faible
Table à secousses	75 μ m à 4,75 mm	4 t/h	très faible
Spirale	75 μ m à 3 mm	6 t/h	très faible

Chapitre 5 : Méthodes magnétiques et électrostatiques

1. Méthodes magnétiques

1.1. Principe

Le principe de la séparation magnétique repose sur la différence de susceptibilité magnétique entre particules à traiter lorsque celles-ci sont soumises à un champ magnétique donné. En particulier, plus la susceptibilité magnétique d'une particule est faible, et plus l'intensité du champ magnétique à fournir est importante pour la séparer des particules non-magnétiques. Donc la séparation magnétique est une technique utilisée pour séparer des éléments magnétique d'élément non magnétique.

1.2. Théorie

Le sens physique de procédé de la séparation magnétique consiste en fait que le champ magnétique change la trajectoire gravitationnel des particules possédantes les propriétés magnétiques, de qui provoque leur extraction du mélange avec d'autre minéraux cette extraction est due au champ magnétique et au gradient de l'intensité qui exprime le changement de l'intensité du champ pur l'unité de distance.

1.3. Les différents comportements magnétiques

Toute substance matérielle est formée d'un ensemble d'atomes qui peuvent être soit non magnétiques soit magnétiques. Il convient avant tout de distinguer les matières diamagnétiques des matières paramagnétiques. Un champ magnétique induit des moments à l'intérieur des atomes constituant une matière diamagnétique et le repousse. Dans le cas d'une matière paramagnétique, le champ magnétique induit des moments magnétiques à l'ensemble des atomes et tend à les aligner dans la direction de son champ. On différencie les principaux types de comportements magnétiques :

a) Diamagnétisme : La susceptibilité magnétique des matériaux diamagnétiques est très faible et négative, autour de -10^{-5} ou -10^{-6} ($\chi_m < 0$).

L'intensité de l'aimantation induite est dans la direction opposée au champ inducteur. Les lignes de champ H ne pénètrent pas dans un matériau

diamagnétique parfait. La perméabilité est donc nulle. Tous les corps présentent un phénomène de diamagnétisme parce que son origine provient de la déformation des orbites électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur. Ce phénomène est réversible puisque lorsque le champ extérieur disparaît, l'action disparaît. Le quartz est diamagnétique.

La susceptibilité d'un matériau diamagnétique reste constante quand la température varie. C'est une différence majeure avec les matériaux paramagnétiques, qui ont une susceptibilité positive, plus importante et qui diminue lorsque la température augmente.

b) Paramagnétisme: Le paramagnétisme apparaît dans les atomes, les molécules ou les ions contenant des électrons célibataires par exemple. Certains atomes et certains ions (oxygène, air, sels de fer, etc.) possèdent un moment magnétique propre. En l'absence de champ \vec{H} , ceux-ci sont orientés au hasard, et de ce fait ne produisent pas de magnétisation macroscopiquement observable. Mais l'application d'un champ magnétique \vec{H} extérieur aura pour effet d'orienter ces moments magnétiques dans sa propre direction, faisant apparaître ainsi un moment magnétique macroscopique \vec{M} non nul. Cette orientation préférentielle cesse avec la disparition de \vec{H} , sous l'effet de l'agitation thermique du milieu.

Dans le cas où il n'y a pas d'interaction entre les différents moments magnétiques individuels, l'effet est appelé paramagnétisme et $\chi_m > 0$. Dans les cas usuels, \vec{M} est une fonction linéaire de \vec{H} . Le paramagnétisme dépend de la température

c) Ferromagnétique:

S'il existe un fort couplage entre les moments magnétiques individuels qui sont orientés localement dans une même direction, l'agitation thermique demeure impuissante à détruire cet alignement au-dessous d'une certaine température (température de Curie). Ce phénomène, appelé ferromagnétisme, s'observe à l'échelle macroscopique par la présence de domaines appelés domaines de Weiss, à l'intérieur desquels tous les moments sont orientés dans la même direction. Au sein d'une matière ferromagnétique n'ayant pas subi l'influence d'un champ magnétique

\vec{H} extérieur non nul, ces domaines s'orientent dans la direction du champ \vec{H} et développent ainsi une forte magnétisation macroscopique \vec{M} .

Le ferromagnétisme dépend de la température et de l'état ferromagnétique d'une substance dépend de son histoire (champs \vec{H} appliqués antérieurement, traitements thermodynamiques, etc.). Les principaux corps ferromagnétiques sont le fer, le cobalt et le nickel.

1.4. Bases théoriques de la séparation magnétique

Les techniques de séparation magnétique consistent à soumettre des particules de minerais à des forces magnétiques et mécaniques développées par le séparateur. Suivant la différence des propriétés magnétiques, les trajectoires des particules résultent avant tout de l'interaction des forces mécaniques et des forces magnétiques.

a) La force magnétique

Dans les opérations de tri magnétique (concentration ou épuration). La séparation est obtenue en appliquant à toutes les particules contenues dans un mélange une force magnétique d'expression générale

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 V_p \left[\frac{K_p}{1+DK_p} - K_f \right] \nabla \vec{H}^2$$

b) Les forces mécaniques

Parmi les forces concurrentes appliquées, on distingue :

- **La force de gravité**

$$\vec{F}_g = V_p (\rho_p - \rho_f) \vec{g}$$

- **La force centrifuge**

$$\vec{F}_c = \rho_p V_p \omega^2 R$$

- **La force d'entraînement par le fluide**

$$\vec{F}_f = 6\pi\mu R_p (\vec{v}_f - \vec{v}_p)$$

k_p est la susceptibilité magnétique d'une particule, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, V_p est le volume de la particule, D est le coefficient de démagnétisation des particules, $\nabla \vec{H}$ gradient du champ magnétique, ρ_p et ρ_f représentent respectivement la masse volumique de la particule et du fluide, « g » est la constante gravitationnelle, ω désigne la vitesse angulaire de

la particule, μ est la viscosité dynamique du fluide, R rayon du tambour rotatif, v_p et v_f sont utilisés respectivement de déplacement de la particule et du fluide tandis que R_p est le rayon de la particule.

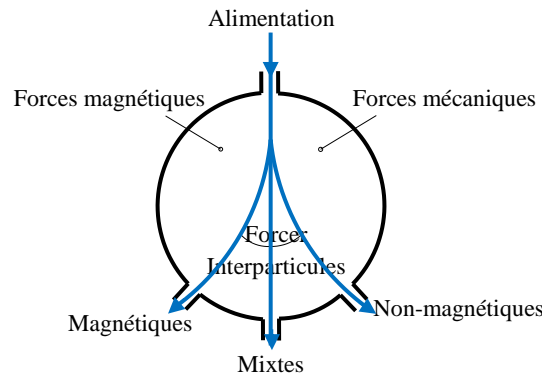


Figure 5.1.principe de séparation magnétique

D'une manière générale, il faut que, pour une fraction minéralogique du minerai, les forces magnétiques soient nettement supérieures aux forces mécaniques s'exerçant sur les particules appartenant à cette fraction pour espérer leur extraction, soit :

$$\vec{F}_m > \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_f$$

$$\frac{1}{2} \mu_0 V_p \left[\frac{K_p}{1+DK_p} - K_f \right] \nabla \vec{H}^2 > V_p (\rho_p - \rho_f) \vec{g} + \rho_p V_p \omega^2 R + 6\pi\mu R_p (\vec{v}_f - \vec{v}_p)$$

Hypothèse 1 : Chacune des particules possède une forme sphérique avec un volume :

$$V_p = \frac{4}{3} \pi R_p^3$$

Hypothèse 2 : Lors d'une séparation en voie sèche, pour tous les minéraux, la force d'entraînement par le fluide est négligeable par rapport aux autres.

1.5. Types de séparation magnétique

On fonction de l'intensité du champ magnétique les séparations sont classées comme suit :

1.5.1. Séparation magnétique à basse intensité (SMBI) : principalement utilisée pour la séparation des matériaux ferromagnétiques ou paramagnétiques de susceptibilité magnétique élevée, et/ou les matériaux de granulométrie plus ou moins grossière. Le dispositif généralement utilisé est un aimant permanent fonctionne normalement à champ magnétique

ouvert, c'est-à-dire que les lignes de force magnétique se referment dans un milieu magnétique peu perméable, air ou eau. L'aimant utilisé, a un champ magnétique profond (attire à distance) ou non (épuration ou concentration de minerais) suivant l'objectif de la séparation. L'intensité de champ varié de 80 à 160 KA/m.

1.5.2. Séparation magnétique à haute intensité (SMHI) : utilisée pour le traitement des matériaux faiblement magnétiques, brut ou fin, en modes humides ou secs, le générateur du champ magnétique est un circuit conventionnel (électroaimant composé d'une ou de deux bobines en cuivre résistif entourant un noyau de fer doux ($\mu_r = B/\mu_0 H$ très élevé)) à champ magnétique fermé d'une intensité allant de 400 kA/m à 1 600 kA/m, ou un aimant permanent à forte énergie spécifique (alliages en céramique).

L'alimentation des séparateurs à haute intensité ne doit pas comporter un trop fort pourcentage de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques (< 0,5 %). Il est souvent conseillé de faire passer préalablement l'alimentation dans un séparateur magnétique à basse intensité.

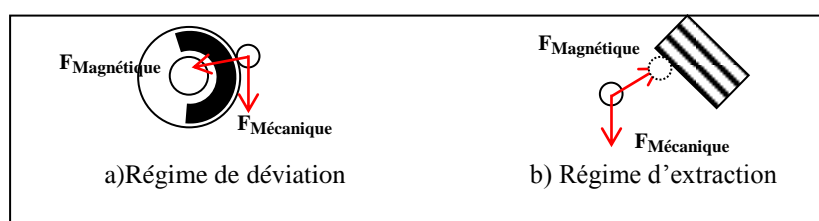
1.5.3. Séparation magnétique à haute gradient du champ : elle utilise des bobines en cuivre ou supraconductrices pour le traitement de particules ultrafines contenues dans une dispersion solide ou un fluide ainsi les matériaux qui ont des propriétés magnétiques très faibles.

D'après le milieu de séparation magnétique on distingue :

1.6. Séparation magnétique par voie sèche

Réservée en général aux traitements des produits grossiers (granulométrie de l'ordre du millimètre à quelques centimètres) elle s'effectue dans le champ magnétique suivant deux principaux régimes :

Régime d'extraction (retirer les particules magnétiques de la masse par force magnétique) et Régime de déviation ou de maintien (déviation des particules magnétiques de leurs trajectoires par effet du champ magnétique et une force mécanique)



1.6.1. Séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI)

- ✓ Equipements de protection et de déferraillage
- ✓ Séparateurs suspendus
- ✓ Poulies magnétiques
- ✓ Séparateurs à tambour

1.6.2. Séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI)

- ✓ Séparateurs à bandes transversales et à disques
- ✓ Séparateurs à rotor induit

1.7. Séparation magnétique par voie humide

On utilise ce type de séparation magnétique lorsque le minerai magnétique est difficilement séparable vu leur granulométrie très fine (-1mm à 40 μ m) ou lorsqu'il ya une formation d'agrégats créés par l'attraction électrostatique entre les particules en voie sèche, ou lorsque le produit à traiter est déjà sous forme de pulpe minérale et même lorsque on cherche à éviter les dégagements intenses de poussières.

1. 7.1. Séparateurs magnétiques à basse intensité (SMBI)

- ✓ Les séparateurs à courant parallèle (la pulpe circule dans le même sens que la rotation du tambour)
- ✓ Les séparateurs à contre-rotation (la pulpe circule dans le sens contraire de la rotation du tambour).
- ✓ Les séparateurs à contre-courant (mixage des deux précédents)

1.7.2 Séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI)

- ✓ Séparateurs Jones
- ✓ Séparateur Boxmag Rapid

2. La séparation électrostatique

La séparation électrostatique est une méthode qui utilise des forces exercées sur des corps chargés ou polarisés dans un champ électrique pour effectuer la concentration de minéraux. En fonction de leur conductivité, différentes particules minérales suivent différentes trajectoires au sein d'un champ électrique, ce qui permet de les séparer. Les facteurs principaux de ce procédé sont, entre autres, les caractéristiques mécaniques et électriques du

séparateur ainsi que la taille, la forme, la densité, l'état de surface et la pureté des particules minérales. Ces particules minérales doivent être absolument sèches et l'humidité de l'air ambiant doit être contrôlée. Les séparateurs électrostatiques

2.1. Les différents comportements électriques

2.1.1. Conducteur

Un conducteur est un matériau qui laisse facilement passer le courant électrique grâce à la présence d'électrons libres. Exemples : cuivre, aluminium, or, argent, métaux en général.

2.1.2. Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau qui a une conductivité intermédiaire, entre celle des conducteurs et des isolants. Sa capacité à conduire dépend de la température, de l'irradiation ou de l'ajout d'impuretés (dopage). Exemples : silicium (Si), germanium (Ge), certains oxydes métalliques.

2.1.3. Non-conducteur (ou isolant)

Un non-conducteur est un matériau qui ne permet pas le passage du courant électrique, car ses électrons sont fortement liés à leurs atomes. Exemples : quartz, feldspath, calcite, kaolinite.

Propriété	Conducteur	Semi-conducteur	Non-conducteur
Conductivité	Très élevée	Variable (faible à modérée)	Quasi nulle
Électrons	Très mobiles	Mobiles si excitation	Bloqués
Exemples	Cuivre, Pyrite	Silicium, Hématite	Quartz, Diamant

Chapitre 6 : Traitement Physico-chimique « Flottation »

1. Définition

La flottation est une technique de séparation des solides basée sur les différences existant entre leurs propriétés superficielles dans une solution aqueuse. Donc le principe de flottation est basé sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces de solides. Ces propriétés peuvent être naturelles ou stimulées à l'aide d'un réactif approprié qui est ajouté dans l'eau où baignent les particules solides. Les particules hydrophobes sont transportées sélectivement dans un milieu lorsque de l'air est injecté sous forme de bulles.

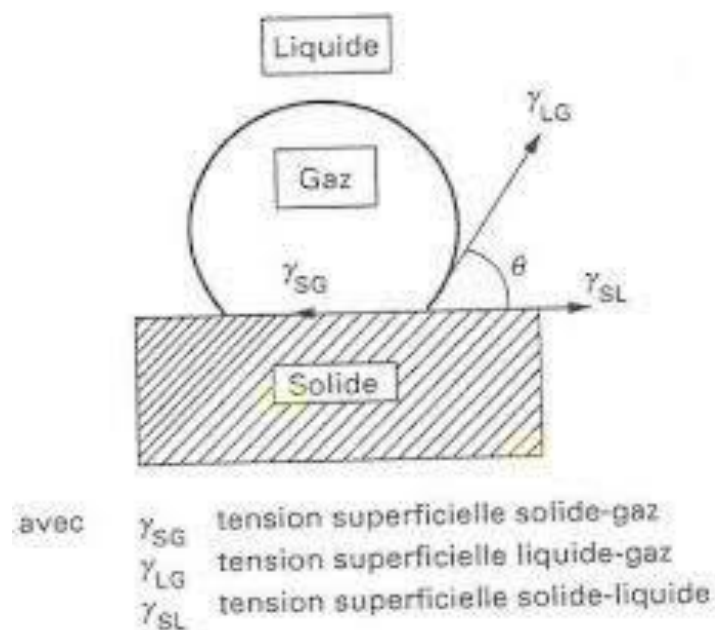
Le contact entre les bulles d'air et les particules ayant des surfaces hydrophobes provoque la fixation de ces dernières. Un tel phénomène est favorisé grâce à la grande affinité de l'air de nature non-polaire pour les surfaces hydrophobes. Pour obtenir ces conditions, il est normalement nécessaire d'utiliser certains réactifs chimiques connus comme réactifs de flottation.

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

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

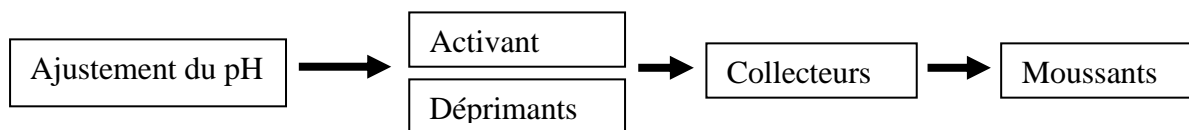
2. Système solide - liquide - gaz

La tension superficielle est définie comme étant une force opposée à une force que provoque la rupture de surface. Chaque fluide a sa tension superficielle propre et elle est constante. Dans le cas où un solide se trouve en présence d'un liquide et d'un gaz (ou air), les phénomènes superficiels sont régis par la détermination des valeurs relatives des diverses tensions superficielles entre les surfaces de séparation solide-gaz, solide-liquide, liquide-gaz et des angles des vecteurs qui représentent ces forces. L'un de ces angles, celui formé par le solide et le plan tangent à la surface du liquide en un point de contact du liquide, du solide et du gaz, a un intérêt particulier dans l'étude de ces phénomènes. Il est appelé « angle de contact » ou « angle de raccordement θ ». D'autre part, la notion d'hydrophobicité de surface a une importance majeure dans la compréhension du phénomène de la flottation, qui est le contact entre une bulle d'air et la surface d'un solide dans un liquide, elle peut être conçue relativement de manière simple lorsqu'on s'attache au modèle de la figure ci-après :



2.1. Réactifs chimiques de flottation

Le rôle des réactifs de flottation est de diriger le changement de l'énergie superficielle des interfaces, dans le but de changer les indices de flottabilité des minéraux à séparer et maintenir la quantité et les dimensions de bulles d'air et leur rigidité dans la pulpe. Les réactifs de flottation peuvent être d'origine organique ou bien non organique. La classification actuelle des réactifs est basée sur leurs rôles, on peut distinguer 5 groupes de réactifs :



2.1.1. Collecteur

Les collecteurs sont adsorbés sélectivement par certaines surfaces des particules afin de les rendre hydrophobes. Ils sont généralement des composés hétéro-polaires. Les collecteurs possèdent une partie polaire qui est adsorbée à la surface de la particule et une partie non polaire orientée vers l'extérieur afin d'exposer une surface hydrophobe (Figure 6.2).

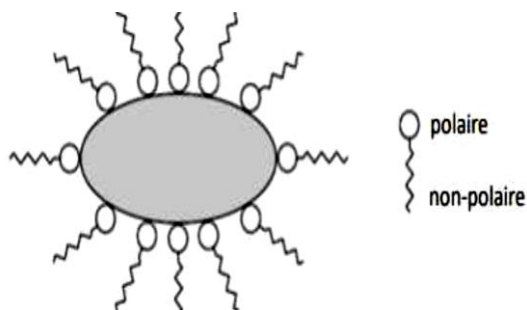


Figure 6.2. Mode d'action d'un collecteur

1.1.2. Moussant

Le moussant est un réactif, peu soluble dans l'eau, possédant une chaîne organique assez longue qui permet de diminuer la tension de surface de l'eau. L'addition de moussant favorise la production de bulles d'air fines et d'une écume stable. Idéalement le moussant ne doit pas réagir avec la surface des particules.

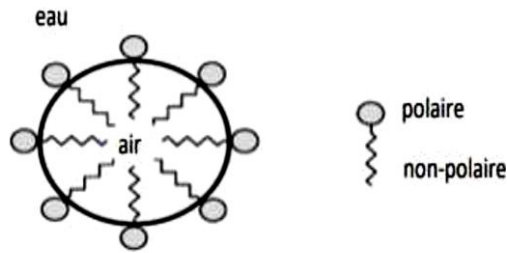


Figure 6.3. Mode d'action d'un moussant

2.1.3. Activant et déprimants

Les activant et déprimants sont utilisés pour modifier la réactivité de la surface des particules vis-à-vis du collecteur. Lorsque les collecteurs ne réagissent pas avec la surface des minéraux cibles, la séparation est impossible. Un activant permet de modifier la nature chimique de la surface de ce minéral favorisant l'adsorption du collecteur. Contrairement à l'activant, le déprimant empêche le collecteur de réagir avec la surface d'une particule de gangue qui conserve ainsi son caractère hydrophile.

2.1.4. Modificateur de pH

Les modificateurs de pH font partie des produits utilisés pour modifier les interactions minéraux /collecteur. Selon l'alcalinité de la pulpe de nouveaux composés se forment à la surface des minéraux et réduisent ou activent l'adsorption des collecteurs.

3. Appareils de flottation

3.1. Les cellules de flottation

Dans une cellule de flottation, la pulpe minérale est mise en agitation par un arbre qui va aussi servir à injecter l'air à l'origine de la formation de bulles. Les mousses ainsi formées, qui sont chargées en particules minérales, sont récupérées par débordement ou par un système d'écumoire

Les cellules de flottation font partie des équipements mécaniques de flottation. Elles sont composées d'un réservoir muni d'une turbine entourée de chicanes dont une des fonctions est d'assurer l'homogénéité de la pulpe (voir figure 6.4). L'air est alimenté dans le système par l'axe de la turbine. L'aération peut être effectuée de façon autonome grâce à la rotation très rapide de la turbine qui produit une pression négative et aspire l'air.

L'aération peut aussi être produite à l'aide d'une soufflante à faible pression. L'air qui est introduit dans le système est violemment dispersé la pulpe sous forme de fines bulles grâce à l'action de la turbine et des chicanes.

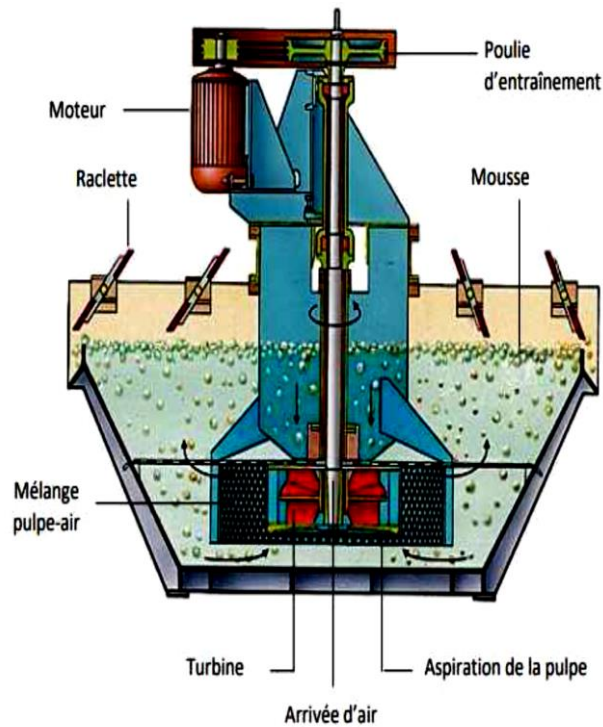


Figure 6.4. cellule de flottation

3.2. La 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. 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 I.4 représente une coupe transversale d'une colonne de flottation.

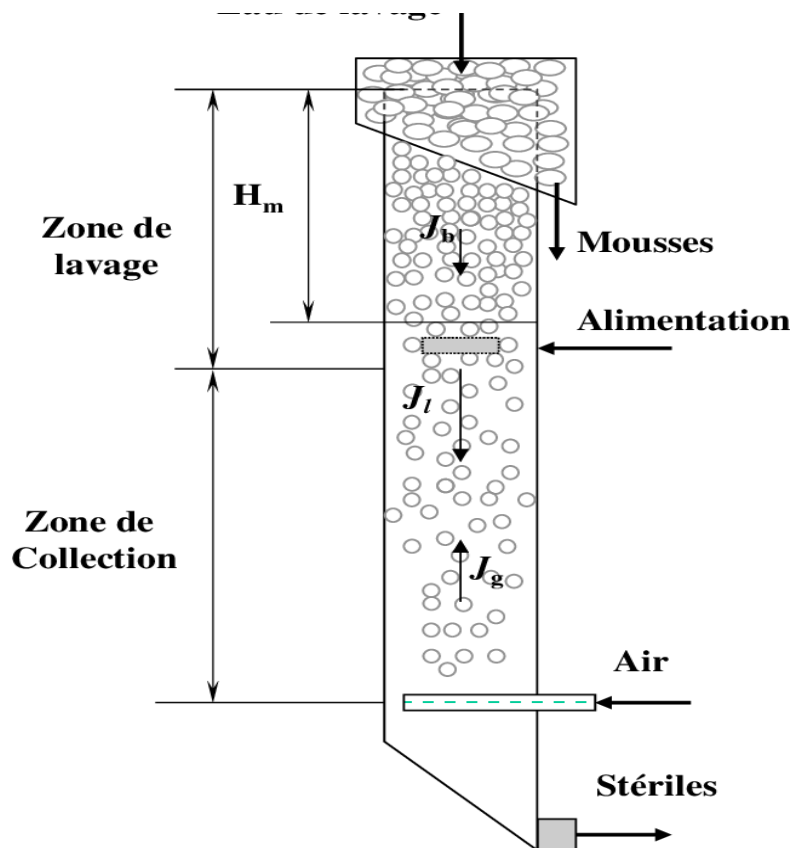


Figure 6.5. Schéma d'une colonne de flottation

Conclusion

Le traitement des minerais joue un rôle essentiel dans la valorisation des ressources naturelles, en permettant d'extraire et de purifier les substances d'intérêt économique. Il repose sur une série d'opérations physiques, chimiques et parfois biologiques, adaptées aux caractéristiques spécifiques de chaque minerai. L'objectif principal est d'améliorer la concentration du matériau utile tout en minimisant les pertes et en réduisant l'impact environnemental. Aujourd'hui, l'optimisation des procédés, l'innovation technologique et l'intégration de solutions durables deviennent des priorités pour répondre à la demande croissante en matières premières, tout en préservant les ressources naturelles et en limitant les déchets générés. Ainsi, le traitement des minerais reste un domaine stratégique et en constante évolution au cœur des enjeux industriels et écologiques mondiaux.

Références bibliographiques

1. Barry A. Wills, James A. Finch, FRSC, FCIM, P.Eng, Wills 'Mineral Processing Technology, Elsevier Ltd, 2016.
2. Barry A. Wills, Tim Napier-Munn, Mineral Processing Technology, Elsevier Science & Technology Books, 7th Edition, 2006.
3. Serge Bouchard, Traitement du minerai, édition le Griffon d'argile, 2001.
4. Blazy, P. La valorisation des minerais. Paris : Presses Universitaires de France, 1970.
5. Jones, M. H. et Woodcock, J. T. Principles of Mineral Flotation. Victoria, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1984.
6. BLAZY (P.), HOUOT (R.), JOUSSEMET (R.) et TRACEZ (J.). – Procédé d'enrichissement par flottation de minerais à gangue carbonatée et/ou silicate par des réactifs amphotères, 1981.
7. Serge Bouchard, Traitement du minerai, édition Modulo 2007
8. Gosselin A., Blackburn D., Bergeron M. Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à L'aide des technologies minéralurgiques, Direction de la Protection de l'Environnement, Sainte-Foy, Canada, 1999.