

Chapitre I. Introduction à la valorisation (minéralurgie)

I.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).

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.

I.2. Qu'est-ce qu'un minerai ?

- D'après la définition généralement acceptée, un minerai est un matériau solide naturel qui contient une substance utile dont l'extraction génère des profits.
- Masse rocheuse contenant des minéraux de valeur, en teneur (concentration) et en quantité suffisantes pour justifier l'exploitation.
- Élément de terrain contenant des minéraux utiles en proportion appréciable, et qui demandent un traitement pour être utilisés par l'industrie.

I.3. 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, distributions granulométrique, 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 (épaississage, filtration, séchage).

La classification de ces procédés et machines est présentée par le tableau 1. Ces procédés et machines jouent un rôle principal dans l'augmentation de la teneur en composant utile.

Tableau 1 : Classification des procédés minéralurgique

Procédés	Propriétés utilisées ou mode de destruction	Milieu où s'effectue le procédé	Machines utilisées
Concassage	écrasement, choc, flexion	air	concasseur
Broyage	écrasement, 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	Suseptibilité magnétique	air, eau	séparateurs magnétiques
Séparation électrique	Conductibilité électrique	air	séparateurs électriques
Epaississement	poids des particules	eau	épaississeurs
Filtration	différence des pressions	eau	filtres à vide, à pression
Séchage	haute température	air	séchoirs de divers types

I.3.1. 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.

I.3.2. 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.

- ✓ **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.

I.3.3. Procédés auxiliaires

L'ensemble des procédés auxiliaires comprend tous les procédés non essentiels pour la séparation, mais indispensables pour la réalisation de la technologie de séparation. Ce sont des procédés d'épaississage, de filtration, de séchage, de dépoussiérage, et le transport technologique. Chacun de ces procédés est exécuté par la machine correspondante.

Chapitre 2 : Fragmentation (Comminution)

2.1. Généralités

La fragmentation s'adresse aux solides dont la taille veut être réduite en des éléments ou particules de taille inférieure et de granulométrie déterminée. Dans l'industrie extractive, la fragmentation apparaît à toutes les étapes du traitement de la roche extraite en vue d'obtenir des produits pouvant être commercialisés tels quels ou ayant la granulométrie nécessaire à leur traitement ultérieur éventuel. L'opération de fragmentation consiste généralement en une ou plusieurs étapes de concassage et en une étape de broyage selon la granulométrie finale voulue.

L'objectif de fragmentation est soit :

- D'obtenir une réduction de la dimension des corps solides en vue de faciliter le conditionnement.
- Facilite les opérations purement physiques telles que le triage, mélange, dosage, dissolution.
- De permettre ou de faciliter les réactions physico-chimiques.
- D'obtenir une libération de minerai utile à celle de la gangue.

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

- **La fragmentation grossière** inclut essentiellement des opérations de concassage mais aussi des opérations d'émottage, tranchage et déchiquetage pour obtenir généralement un matériau avec une granulométrie supérieure à 10 mm,
- **La fragmentation fine** est composée d'opérations de broyage pour l'obtention d'un matériau avec une granulométrie inférieure à 10 mm,

Tableau 2 : classification des techniques 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	10-25mm
Broyage à barres	3,5-10mm
Broyage à boulets	0,045-3,5mm

2.2. Concassage

Le concassage constitue la première étape de la fragmentation. Son objectif n'est pas la libération des minéraux, mais simplement la réduction de dimension afin de faciliter la manipulation ultérieure du minerai. Il est normalement fait à sec en deux ou trois étapes. L'alimentation provient de la mine et à une dimension pouvant aller jusqu'à 1.5 m. Des fois on utilise aussi le concassage comme étape intermédiaire dans certains circuits de broyage autogène, donc le processus de concassage est caractérisé par le degré de concassage.

2.2.1. Degrés de concassage (réduction): est 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

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

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

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

c) $i = D_{80} / d_{80}$

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.

2.2.2. Types de concasseurs

2.2.2.1. Concasseurs à mâchoires

Il est constitué par une mâchoire fixe et une mâchoire mobile animée d'un mouvement de va et- vient autour d'un axe horizontal. Le produit à traiter est introduit à la partie supérieure de l'appareil. Lorsque la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe elle écrase les fragments solides. Lorsqu'elle s'écarte ceux-ci descendent 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 (fig 1)

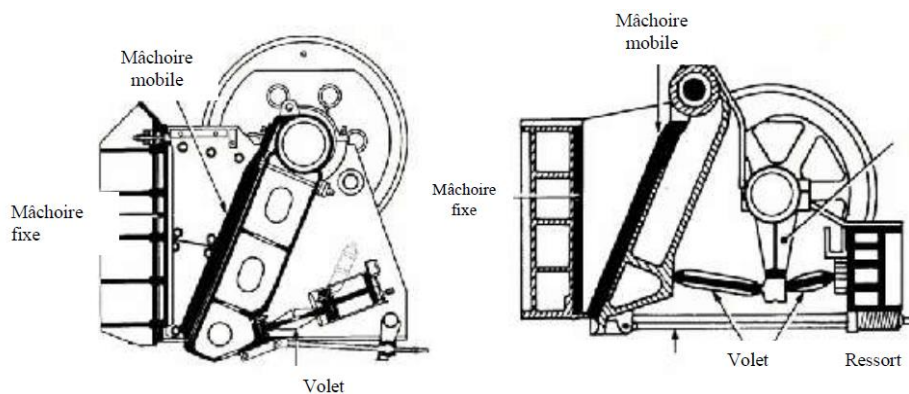


Figure 1. Concasseurs à mâchoires

2.2.2.2. Concasseurs giratoires

Ils réalisent également une compression obtenue par l'action d'une tête tronconique mobile à l'intérieur d'une chambre de concassage de forme tronconique inversée. La tête de concassage est montée sur un arbre décrivant autour de l'axe vertical des rotations imprimées par un excentrique situé à la base de l'arbre. L'arbre tourne fou sur lui-même.

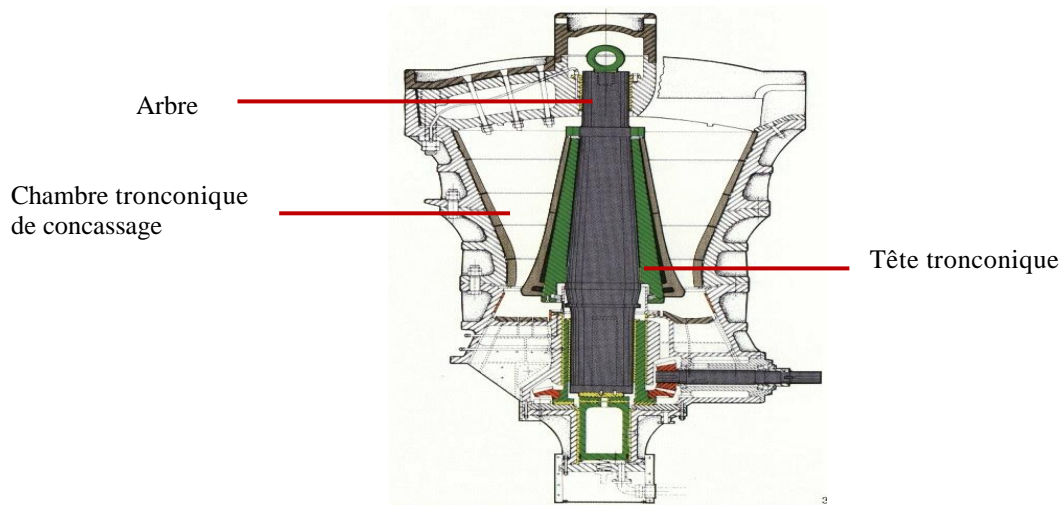
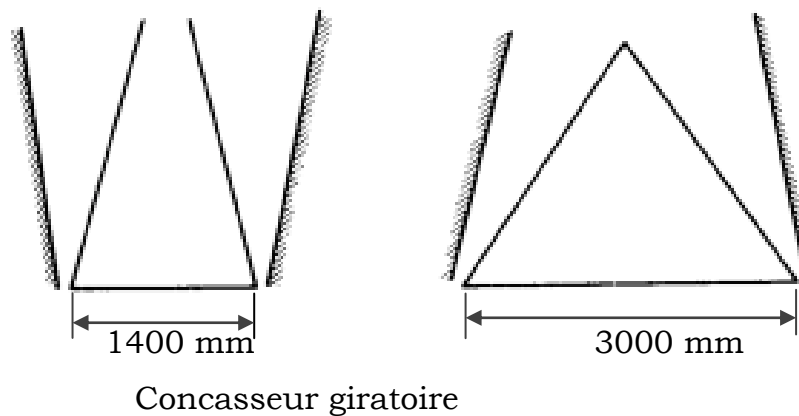


Figure 2. Concasseur giratoire

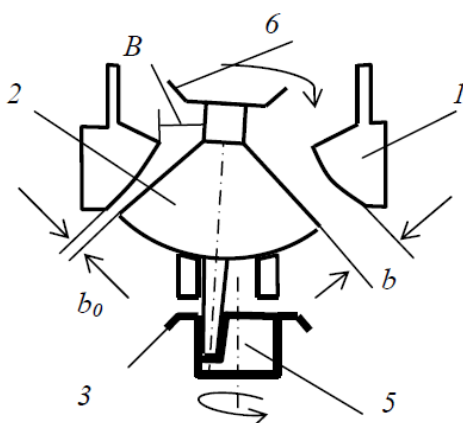
2.2.2.3 Concasseurs à cône

Sans doute l'appareil le plus utilisé actuellement, il n'est qu'une version modifiée du concasseur giratoire dans laquelle l'axe du concasseur, plus court, n'est pas suspendu mais supporté. Ci-dessous on montre une comparaison de forme du manteau et du concave de ces deux appareils.



Concasseur à cône

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.



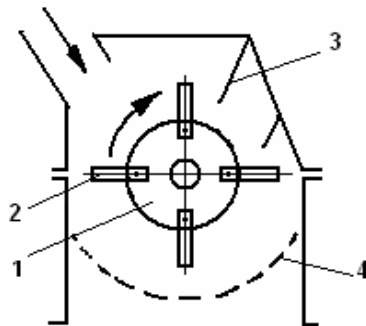
1 - cône fixe; 2 - cône mobile; 3 - commande; 4 - suspension articulée supérieure; 5 - suspension articulée inférieure; 6 - distributeur;

Figure 3. Schéma cinématique de concasseur à cône

2.2.2.4. Concasseurs à marteaux articulés.

Les concasseurs à marteaux sont applicables pour les roches fragiles de faible et moyenne dureté. Le concassage s'effectue par les coups des marteaux articulés fixés sur le rotor, tournant autour de l'axe horizontal et

par les chocs du matériau à concasser rejeté par les marteaux contre les plaques de revêtement fixées sur le bâti à l'intérieur du concasseur (fig 4).



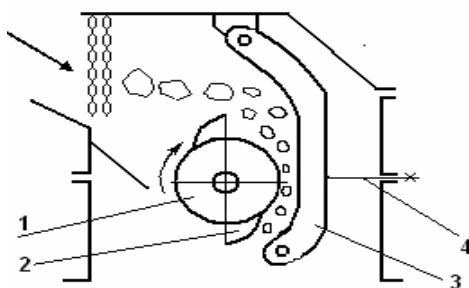
1 - rotor; 2 - marteau; 3 - blindage; 4 - grille

Figure 4. Concasseur à marteaux articulés

2.2.2.5. Concasseur à percussion à plaques de choc réglables

Dans ce type de concasseur, le concassage du minerai s'effectue grâce à une grande vitesse de rotation du rotor ce qui provoque une issue considérable par rapport au concasseur à mâchoire et giratoire.

Les Concasseur à plaques de choc réglables ne doivent être utilisés que pour le concassage des minerais contenant moins de 15% de silicate, ils sont utilisés pour le concassage des minerais relativement non abrasif et pour une production d'une grande quantité des particules fines.



1 - rotor; 2 - batte; 3 - plaque de choc réglable; 4 - tige de réglage

Figure 5. Schéma cinématique du concasseur à percussion.

2.2.2.6. Concasseurs à cylindres

Les concasseurs à cylindres sont les moins importants des concasseurs qui sont présentés ici. Leur principe est très simple. Ils sont constitués de

deux cylindres tournant en sens inverse autour de deux axes parallèles. Tous ces appareils ne diffèrent que par leur surface de travail. Dans ce type de concasseurs le concassage s'effectue par l'écrasement ininterrompu avec la trituration du minerai par les cylindres tournants dans les sens inverses (figure 6). On utilise ces concasseurs pour les minerais de petite et de moyenne dureté.

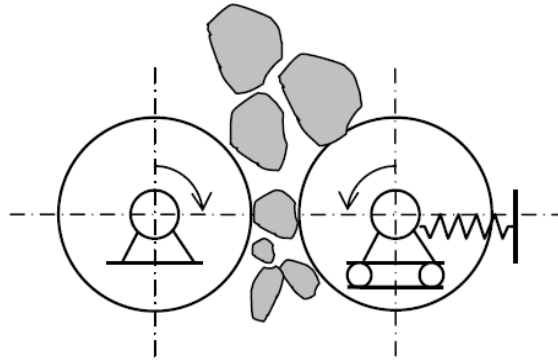


Figure 6. Schéma cinématique du concasseur à cylindres lisses.

2.3. Broyage

Le broyage est l'étape finale de la fragmentation consiste à la réduction des fragments obtenus au cours du concassage, au premier lieu en vue de la libération des particules essentiellement du de valeur (utile) 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.

Exemple : la figure 1a représente des particules grossières où aucune libération n'est visible, la figure 1b représente les mêmes particules qui ont été légèrement fractionnées par broyage : un début de libération apparaît. La figure 1c représente ces particules beaucoup plus fractionnées : une libération importante est observée.

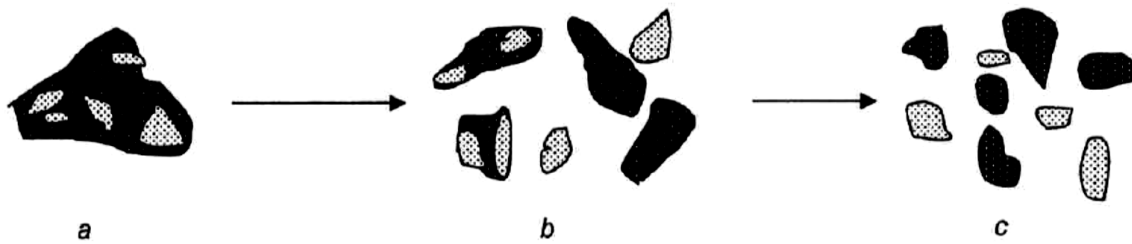


Figure 7. Libération des particules minérales (en blanc) de la gangue (en noir)

2. 3.1.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).

2.3.1.1. Broyeur à boulets

Les broyeurs à billes : ces appareils s'apparentent aux broyeurs classiques à boulets et sont constitués par des cuves cylindriques à axe horizontal et à revêtement spécial, les corps broyants sont généralement des boulets d'acier inoxydable, l'utilisation de boulets de différentes tailles permet de toucher et de fragmenter toutes les tailles de particules. En effet, pour chaque taille de particule, il existe une taille optimale de boulets. Ils travaillent en discontinu, à sec ou en milieu humide. La matière à broyer représente environ 25% du volume de la chambre lorsqu'on travaille à sec, et 50 à 60% lorsqu'on travaille en milieu humide.

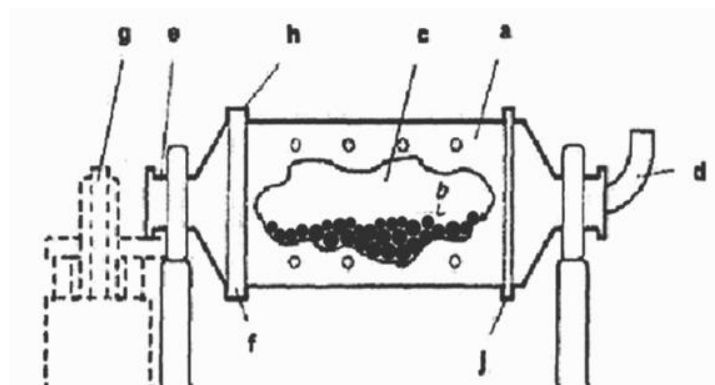


Figure 8.Schéma du broyeur à boulets

a : structure externe, b : boulets, c : revêtement, d : zone d'alimentation, e : orifice de décharge, f : engrenage, g : moteur et système d'entraînement, h : extrémité antérieure, j : extrémité postérieure.

2.3.1.2. 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 faite 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.

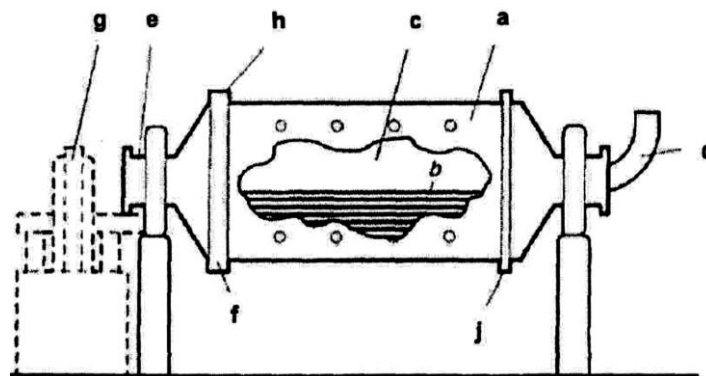


Figure 9. Schéma du broyeur à barres

a : structure externe, b : barres, c : revêtement, d : zone d'alimentation, e : orifice de décharge, f : engrenage, g : moteur et système d'entraînement, h : extrémité antérieure, j : extrémité postérieure.

2.3.1.3. 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.

2.3.2. 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 :

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

D est le diamètre interne du broyeur (m)

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**»)
- à vitesse de rotation normale (marche dite «en **cataractes**»)
- à vitesse de rotation trop grande (marche dite «en «**centrifuge**»)

Chapitre 3. Classement dimensionnel

3.1. Criblage

Le criblage est une opération unitaire qui permet de séparer une population de fragments de matière suivant leur dimension en deux (ou plusieurs) parties (figure1). 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 séparer le produit alimentant en passant (ou tamisât) et en refus.

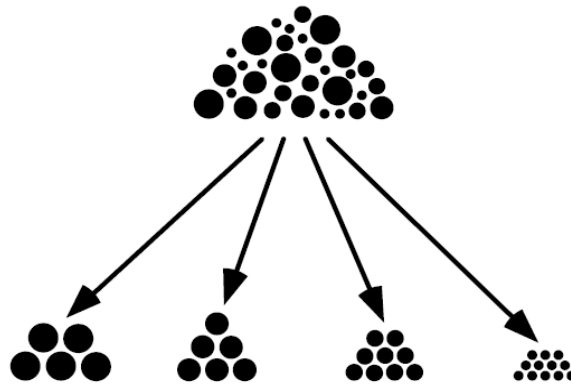


Figure 1 - Séparation d'un ensemble de particules en plusieurs fractions granulométriques.

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.

3.1.1. Principaux types d'appareil

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.

a) 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 (voir figure 2). 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.

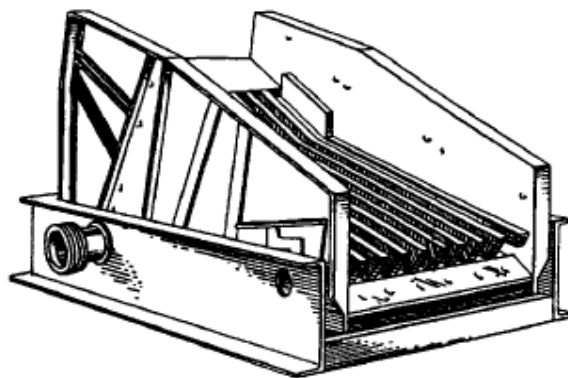


Figure 2- équipement de criblage : grizzly vibrant

b) 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 (voir figure 3). 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.

Comme illustré à la figure 4, 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.

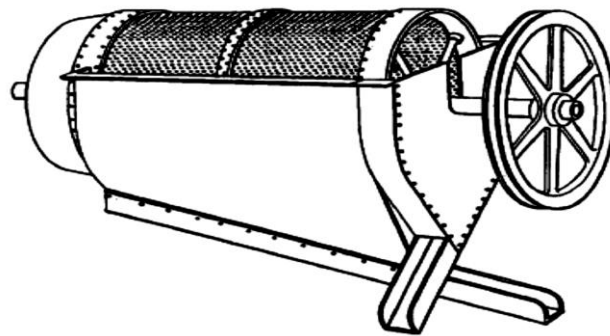


Figure 3- équipement de criblage : trommel

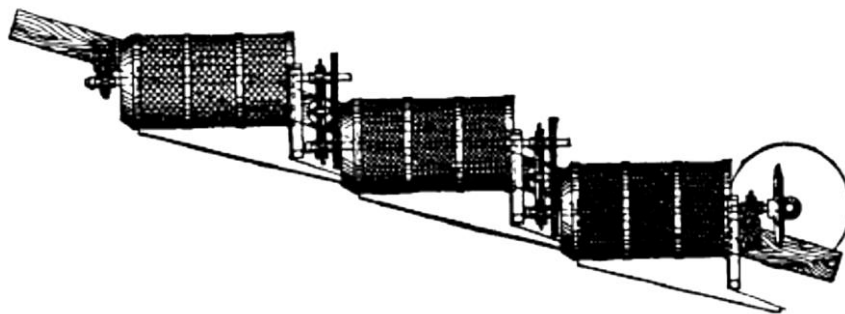


Figure 4- équipement de criblage : trommels en série

c) 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 6 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.

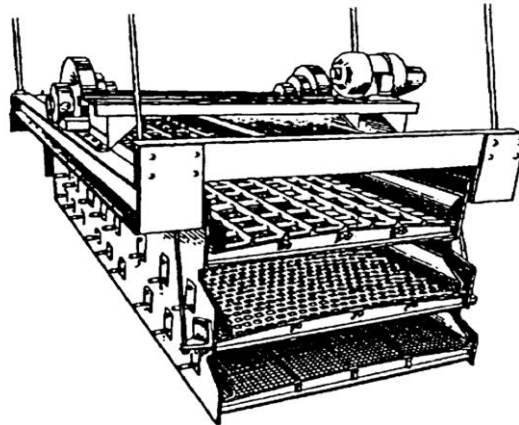


Figure 5 - crible vibrant à plusieurs étages

d) 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 7.

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.

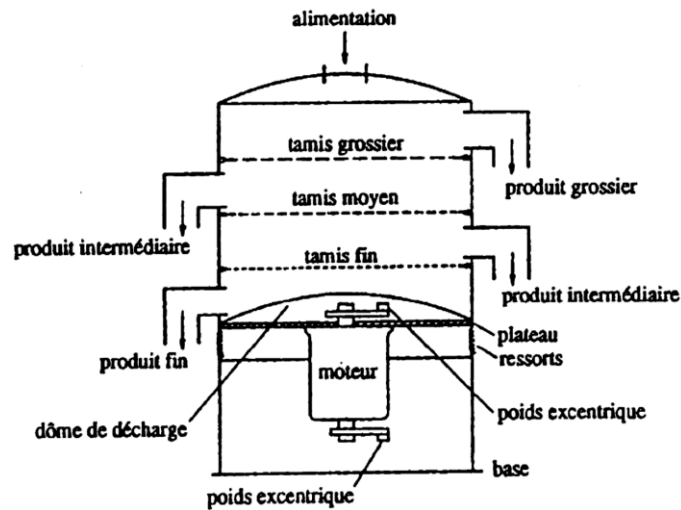


Figure 6- crible giratoire

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.

3.1.3. Méthodes de tamisage

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un 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.

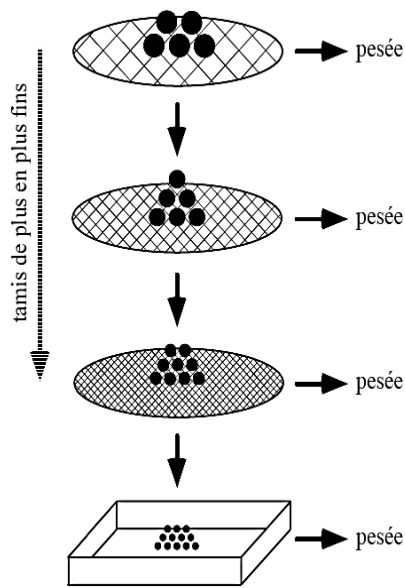


Figure 8-Procédure simplifiée de tamisage à sec

2.1. 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 (Tab 2).

Tableau 2 -Résultats d'analyse granulométrique

Mailles (mm)	Poids des fractions (g)	Poids des fractions (%)	Poids des refus cumulés (%)	Poids des passants cumulés (%)
$\phi 1$	M1	$P1 = M1/Mt$	P1	100-P1
$\phi 2$	M2	$P2 = M2/Mt$	$P1+P2$	$100-(P1+P2)$
$\phi 3$	M3	$P3 = M3/Mt$	$P1+P2+P3$	$100-(P1+P2+P3)$
$\phi 4$	M4	$P4 = M4/Mt$	$P1+P2+P3+P4$	$100-(P1+\dots+Pn)$
ϕn	Mn	$Pn = Mn/Mt$	$P1+\dots+Pn=100$	0

3.2. Classification

La sédimentation est une technique de classification basée sur le principe des vitesses terminales de chute différentes. Elle consiste en une séparation des particules solides en suspension de leur liquide porteur.

La classification s'applique lorsque qu'il n'est pas rentable au point de vue économique d'utiliser le tamisage.

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.

3.2.1. Principe de la sédimentation

Une particule discrète de volume et densité constants en chute libre dans le vide tombe avec une accélération $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. 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_L et de viscosité μ , les particules sont soumises à l'action de trois forces :

La force de gravité $F_g = m_p \cdot g = \rho_p \cdot V_p \cdot g$

F_A : la poussée d'Archimède $F_A = \rho_L \cdot V_p \cdot g$

F_t : la force de traînée $F_t = C_d \cdot A \cdot \rho_L \cdot \frac{v_p^2}{2}$

Où :

- V_p : volume de la particule
- ρ_p : masse volumique de la particule
- ρ_L : masse volumique du liquide
- A : aire de la section de la particule (surface de sa projection sur un plan orthogonal à l'écoulement)
- C_d : coefficient de traînée
- v_p : vitesse de chute de la particule
- g : accélération de la pesanteur.

3.2.1.1. vitesse limite de chute ou de sédimentation

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

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

avec:

U : 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 peut aussi être calculée en utilisant la même relation que pour les régimes laminaire de et turbulent avec pour coefficient de traînée:

$$C_d = \frac{24}{Re_p}$$

Cette relation est moins commode car elle nécessite une itération entre vitesse et Reynolds.

Nombre de Reynolds pour particules:

$$Re_p = \frac{\rho_f U D_p}{\mu}$$

avec:

ρ_f : masse volumique du fluide (kg/m³)

U : vitesse de la particule (m/sec)

D_p : diamètre de la particule (m)

μ : viscosité dynamique du liquide (Pa.sec)

3.2.1.2. Régime laminaire, loi de Stokes

La particule se déplace lentement dans un fluide visqueux. C'est typiquement le cas d'une particule solide ou liquide dans un liquide.

Les forces de viscosité sont élevées devant les forces d'inertie; cela se vérifie en calculant que $Re_p < 1$

Vitesse d'une sphère en régime de Stokes:

$$U = \frac{g|\rho_p - \rho_f|D_p^2}{18\mu}$$

avec:

U : 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)

μ : viscosité dynamique du liquide (Pa.sec)

g : accélération due à la force de pesanteur (m/s²)

3.2.1.3. Régime turbulent, loi de Newton

Cette relation est moins commode car elle nécessite une itération entre vitesse et Reynolds.

Les forces de viscosité sont faibles devant les forces d'inertie; cela se vérifie en calculant que:

$Re_p > 1000$

Vitesse des particules en régime de Newton:

La vitesse de déplacement de la particule, assimilée à une sphère, se calcule alors par:

$$U = \sqrt{3gD_p \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)}$$

U : 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)

g : accélération due à la force de pesanteur (m/s²)

Chapitre 4 : Séparation (concentration) des minerais

4.1. Principes

Dans la plupart des cas, la qualité du minerai doit être améliorée par l'élimination de quelques impuretés, l'enrichissement des minerais recouvre toutes les opérations simples ou complexes pour devenir un produit commercialisable et utilisable dans diverses industries. Plusieurs méthodes de séparation ont été développées pour l'enrichissement de minerais peuvent être utilisées seules ou en combinaison, ces méthodes sont basées sur les propriétés physiques et chimiques des minéraux, en particulier, la taille des particules, la différence de densité, de susceptibilité magnétique et des différences de tension superficielle.

Les méthodes de séparation minéralurgique se divisent en quatre grandes classes selon le principe de fonctionnement et les conditions d'utilisation (tableau 1). Les étapes préalables au traitement consistent à faire un tamisage et une classification granulométrique.

Tableau 1. Conditions d'application des méthodes minéralurgiques.

Conditions d'application	Concentration gravimétrique	Flottation	Séparation magnétique	Séparation électrostatique
Taille des particules	> 1 μm	5 à 212 μm	> 75 μm	60 à 500 μm
Degré de libération	élevé	moyen	moyen	élevé
Différence de masse volumique entre les minéraux	> 1	*	*	*
Propriétés des surfaces des particules	*	élevée	*	*
Propriétés magnétiques des minéraux	*	*	élevée	*
Différence de conductivité électrique entre les minéraux	*	*	*	élevée

* Propriété non applicable

4.2. La concentration gravimétrique

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.

La faisabilité de la séparation dépendra de la dimension des particules à séparer (voir tableau 2).

Tableau 2. 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

Exemple :

Silice / Charbon / eau : $C_T = \frac{2,6-1}{1,3-1} = 5,3$

Or / Silice / eau : $C_T = \frac{18-1}{2,6-1} = 10,6$

$$\text{Hématite/ Silice /eau} : C_T = \frac{5,2-1}{2,6-1} = 2,6$$

4.2.1. 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 1

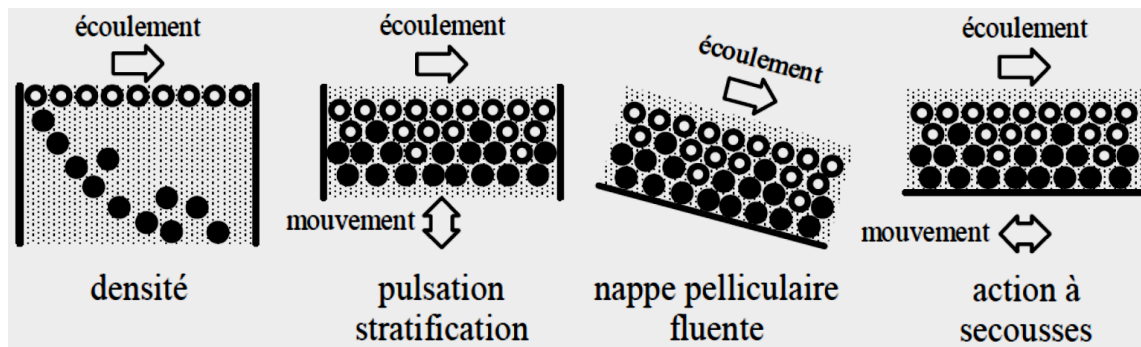


Figure 1 - Les mécanismes de séparation

4.2.2. Application des appareils de concentration gravimétrique

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 3. 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 µm à 4,75 mm	4 t/h	très faible
Spirale	75 µm à 3 mm	6 t/h	très faible

4.3. Séparation magnétique

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

4.3.1. Types de séparation magnétique :

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

4.3.1.1. 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.

4.3.1.2. 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 ($\mu_r = B/\mu_0H$ 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 (<

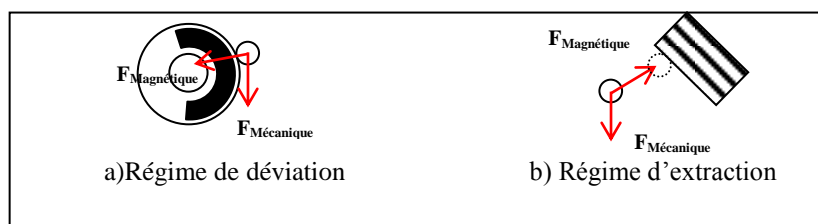
0,5 %). Il est souvent conseillé de faire passer préalablement l'alimentation dans un séparateur magnétique à basse intensité.

2.3.1.3. 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 :

a) 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)



b) 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.

2.3.2. Classification des corps magnétiques:

A l'état libre, nous disons qu'un atome est magnétique s'il est porteur d'un moment magnétique permanent représenté par un vecteur de module constant. Toute substance matérielle est formée d'un ensemble d'atomes qui

peuvent être soit non magnétiques soit magnétiques. On différencie les principaux types de comportements magnétiques :

a) Le diamagnétisme: Le diamagnétisme est une propriété commune à toutes les substances donc apparaît dans tous les matériaux mais il est masqué par les effets du paramagnétisme ou du ferromagnétisme lorsque ceux-ci coexistent dans le matériau.

Due aux déformations des orbitales atomiques sous l'influence d'un champ magnétique. Leur aimantation, induite par champ, est très faible et opposée à ce dernier. La susceptibilité magnétique, pratiquement indépendante du champ et de la température, est négative ($K < 0$) de l'ordre de 10^{-5} . Ce magnétisme trouve son origine dans la modification du mouvement orbital des électrons sous l'effet du champ appliqué. Comme exemples de minéraux diamagnétiques on peut citer la calcite, le quartz ou les feldspaths.

b) Le paramagnétisme: Le paramagnétisme apparaît dans les atomes, les molécules ou les ions contenant des électrons célibataires par exemple : éléments de transition, terres rares.... Il provient des moments magnétiques permanents portés par tout ou partie des atomes. En absence de champ magnétique, ces moments n'interagissent pratiquement pas entre eux et peuvent s'orienter librement dans n'importe quelle direction. Sous l'action d'un champ magnétique, la valeur moyenne de l'orientation des moments est modifiée et une aimantation induite parallèle au champ apparaît et de même sens. La susceptibilité est positive ($K > 0$) de faible intensité, indépendante du champ extérieur et inversement proportionnelle à la température.

c) Le Ferromagnétique: Ce sont des corps solides qui, comme Fe, Ni, Co, sont caractérisés par une susceptibilité magnétique positive très grande, dépendant de la température, du champ H et de l'histoire magnétique, thermique et mécanique de l'échantillon. Ces corps sont fortement attirés dans les zones de champs forts. Ils deviennent paramagnétiques au-delà d'une certaine température.

4.4. Séparation physico-chimique (flottation)

4.4.1. Principes

La flottation est, sans aucun doute, le procédé le plus important parmi les différentes techniques employées pour le traitement de minerai. Cette

technique polyvalente permet le traitement de plusieurs minerais complexes (plomb-zinc, cuivre-zinc, ...), de sulfures (cuivre, plomb, zinc, ...), d'oxydes (hématite, cassitérite, ...), de minéraux oxydés (malachite, cérusite, ...) et même de minerais non-métalliques (fluorite, phosphates, charbon, ...). Grâce à la flottation, il est possible de concentrer de façon économique des minerais pauvres dont le traitement ne serait pas rentable en utilisant les techniques de concentration gravimétrique.

Le principe de la flottation est basé sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des 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. Lorsque de l'air est introduit sous forme de petites bulles dans un tel milieu, il se produit un transport sélectif des particules hydrophobes. Les particules présentant des surfaces hydrophobes se fixent aux bulles d'air lorsqu'elles entrent en collision avec elles (figure 2).

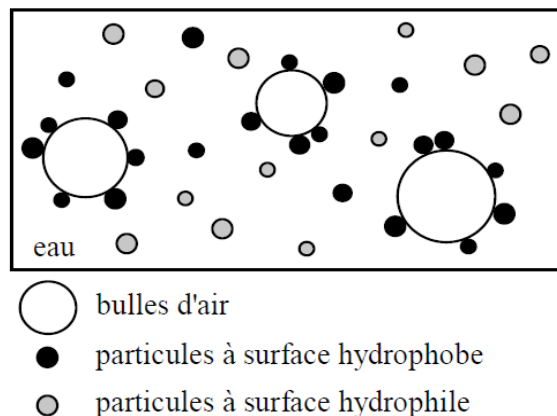


Figure 2. Fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air

4.1.2. Réactifs chimiques de flottation

Le rôle du collecteur est d'augmenter le pouvoir hydrophobe de la silice en s'adsorbant sur ce dernier, afin qu'un maximum de silice se place sur les bulles d'air en vue d'une récupération optimale. La concentration en agent moussant contrôle quant à elle la taille des bulles : plus sa concentration augmente, plus la taille des bulles diminue. Le pH permet de contrôler la charge à la surface des particules, ce qui joue un rôle sur leur dispersion. La taille des particules de silice est très susceptible d'influencer les réponses de la flottation. Ces réactifs comportent tous un groupement polaire permettant

leur adsorption sélective à la surface des minéraux par création des liaisons physiques ou chimiques.

4.5. La séparation par voie chimique (lixiviation)

L'essai de lixiviation est défini par la norme française NF X-31-210 (1992) comme étant l'extraction liquide-solide, dans des conditions définies, d'un échantillon solide par une solution aqueuse. Le terme « lixiviat », selon cette même norme, désigne la solution contenant les éléments solubilisés au cours de l'essai, sur laquelle sont effectuées les caractérisations analytiques. Le « lixiviant », lui, constitue le milieu chimique agressif de l'essai de lixiviation.

4.6. Terminologie générale et indices de la séparation:

D'habitude on obtient deux et plus rarement trois produits. Le matériau de départ est appelé brut (tout-venant). Les produits que l'on obtient après la séparation sont appelés concentré riche en composant utile et rejets pauvres en ce composant.

Chaque produit de séparation peut être caractérisé par les indices qualitatifs et quantitatifs. L'indice qualitatif c'est la teneur en composant utile. Celle-ci est le rapport de la masse de composant utile du produit à toute la masse du produit exprimé en fraction de l'unité ou plus souvent en pour-cent.

Les indices quantitatifs sont les rendements des produits obtenus après la séparation et les taux d'extraction du composant utile dans ces produits. Ainsi, le rendement d'un produit de séparation est le rapport de la masse de ce produit à la masse de tout-venant exprimé en fraction de l'unité ou en pourcent.

Le taux d'extraction du composant utile dans un produit de séparation est le rapport de la masse du composant utile dans ce produit à la masse du composant utile dans le tout-venant exprimé en - fraction de l'unité ou en pour-cent.

Habituellement, les teneurs en composant utile sont indiquées par α - teneur en composant utile dans le tout-venant, β - teneur en composant utiles dans le concentré et θ - teneur en composant utile dans les rejets. Pour le rendement on utilise d'habitude la lettre γ avec l'indice d'un produit. Par exemple, le rendement du concentré est indiqué par γ_c , celui des rejets

par γ_r . Le taux d'extraction du composant utile dans un produit est indiqué par ϵ avec l'indice correspondant.

Pour évaluer la qualité de ces deux produits (concentré et rejet) il est nécessaire de calculer les indices technologiques d'enrichissement.

Le rendement

- $\gamma = \gamma_c + \gamma_r = 100\%$
- $\gamma_c = (\alpha - \theta) / (\beta - \theta) \cdot 100$
- $\gamma_r = (\beta - \alpha) / (\beta - \theta) \cdot 100$

Le taux d'extraction ou de récupération

- $\zeta_c = (\gamma_c \beta / \alpha)$
- $\zeta_r = (\gamma_r \theta / \alpha)$
- $\zeta = \zeta_c + \zeta_r = 100\%$

La consommation en minerai brut pour l'obtention de 1 t du concentré

- $R = 100 / \gamma_c, t/t$