

Faculté des Sciences et Techniques Errachidia  
Université Moulay Ismail Meknès

Département de Chimie  
**MASTER EN SCIENCES ET TECHNIQUES**  
*(Chimie Appliquée)*  
*(Option physico-chimique des matériaux)*  
Cours du module M-18A

# ÉXPLOITATION & TRAITEMENT DES MINÉRAIS

## *(Partie TRAITEMENT DES MINÉRAIS)*

Année universitaire 2022-2023

Prof : A. Oubair

# TECHNOLOGIE DE VALORISATION DES MINERAIS (TVM)

## **1<sup>ère</sup> partie: PREPARATION MECANIQUE**

- \*Définitions et Généralités
- \*Principaux appareils de fragmentation (différents concasseurs...)
- \*Développement des techniques de fragmentation (broyage)
- \*Criblage ou classement direct
- \*Classification par sédimentation ou Classement indirecte

## **2<sup>ème</sup> partie: METHODES D'ENRICHISSEMENT**

- \*Triage manuel
- \*Méthodes basées sur la gravité (concentration par nappe pelliculaire fluente, concentration par accélération différentielle...)
- \*Méthodes basées sur le magnétisme
- \*Méthodes basées sur l'électrostatique
- \*flottation et l'étude des interfaces (méthode physico-chimique)
- \*Hydrométallurgie

## Chap 1

### **Définitions et Généralités**

**1.1. Minéral:** C'est une entité, élément ou composé chimique que l'on trouve dans la nature, c'est un composé inorganique solide constituant de l'écorce terrestre.

Les minéraux sont caractérisés par certains nombres de paramètres tels que la composition chimique, la couleur, la structure, la densité, les propriétés chimiques (la solubilité) et certaines propriétés particulières telles que le magnétisme, la radioactivité, comme on les distingue même par la dureté (échelle de Mohs).

Exp: dureté 1 pour le Talc, 2 pour le Gibbs, 3 pour la calcite, 7 pour le Quartz, et 10 pour le Diamand (plus dur).

**1.2. Minerai:** C'est une association de plusieurs minéraux contenant sous une forme combinée en métal que l'on isole par des procédés industriels.

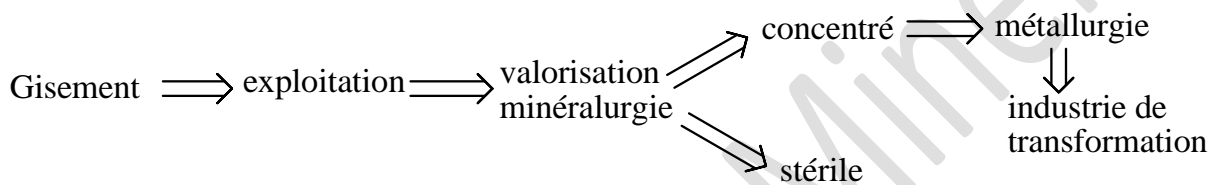
**1.3. Gisement:** C'est une formation géologique qui contient un minerai. Un gisement est valorisable s'il contient un ou plusieurs espèces minérales en quantités justifiantes une exploitation minière.

**1.4. Minéralurgie:** C'est le traitement ou valorisation des minerais en appliquant un ensemble d'opérations permettant la séparation entre les composés qui présentent un intérêt économique (éléments de valeurs) et des éléments qui n'ont pas de valeurs qui sont la gangue.

**1.5. Concentré:** la partie de minerai riche en métal a y on était séparé de stérile par des méthodes de la minéralurgie.

**1.6. Stérile:** la partie de minerai pauvre en métal. C'est une masse de matière qui serait illusoire (impossible de valoriser) de valoriser.

**1.7. Valorisable d'un minéral:** c'est de l'isolé de la gangue par des méthodes minéralurgiques. En général on récupère une seule espèce minérale mais parfois plusieurs. La minéralurgie est le seul moyen permettant d'exploiter des gisements en prenant en considération la coupure économique ainsi que les normes techniques du minéral à savoir la concentration, la dimension de l'élément (granulométrie), le pourcentage d'humidité



## **1.8. Méthodes de la minéralurgie**

### **1.8.1. Étapes de valorisations d'un minerai**

#### **1.8.1.1. Préparation mécanique des minerais (comminution)**

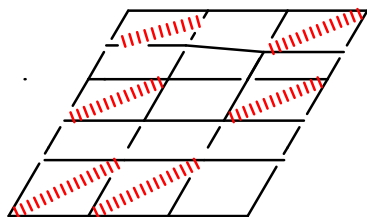
La préparation mécanique d'un minerai est la libération des espèces minérales valorisables des minerais de gangue. À partir d'un minerai donné, on obtient après fragmentation un mélange de trois sortes de grains.

- Des grains des espèces minérales valorisables;
- des grains de gangue non valorisables;
- des grains de mixtes: association dans le même grain de minerai valorisable et de la gangue (des mixtes minéralurgiques).

#### **1.8.1.2. Enrichissement des minerais**

Dans ce deuxième stade, les espèces à valoriser sont séparées des minerais de la gangue par des opérations basés sur les caractéristiques des minéraux. À la fin de ces opérations on obtient deux produits, le concentré et le stérile (rejet).

### 1.8.2. Libération des espèces minérales (préparation mécanique)



minerai provenant de la mine  
(tout-venant)

Lors de la fragmentation on cherche à obtenir le maximum de grains constitués par l'espèce valorisable pure et le minimum de mixte minéralurgique. En effet ce sont les mixtes qui perturbent l'enrichissement. En théorie on voudrait arriver à la maille de libération totale. La maille de libération totale est la dimension des grains après fragmentation pour laquelle on n'a pas de mixtes c.a.d la dimension où toutes les espèces minérales valorisables sont libérées de la gangue. En pratique pour des raisons de rentabilité économique, on cherche à obtenir la maille de libération dite (maille de broyage) pour laquelle on obtient au maximum 20 % en poids de mixte minéralurgique.

### 1.8.3. Procédés d'enrichissement

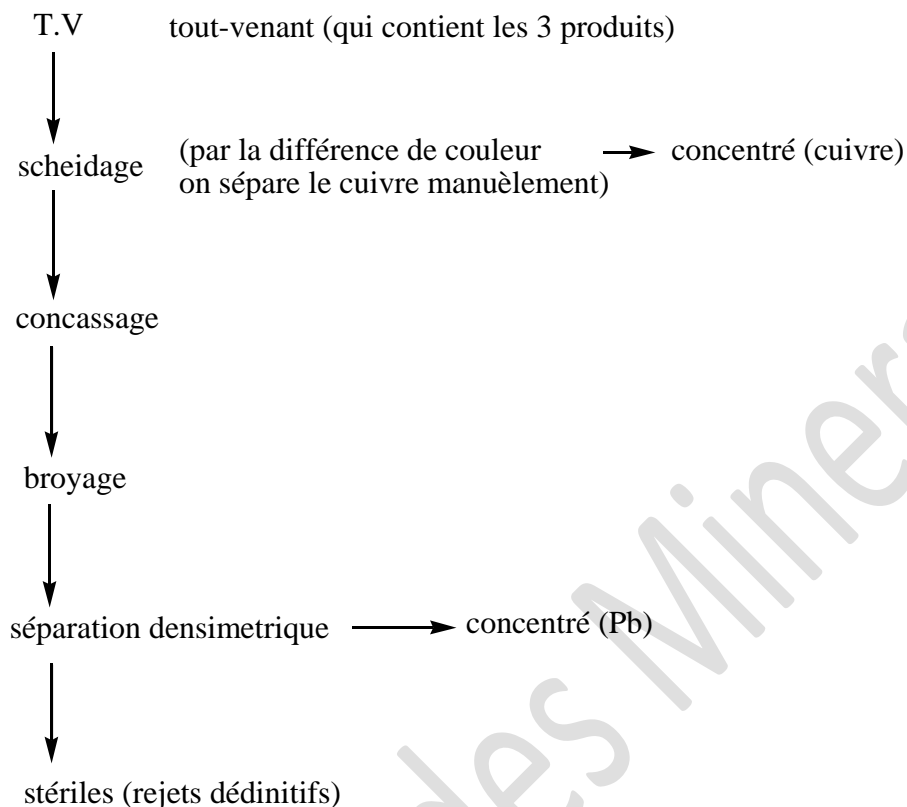
Une fois que les espèces minérales sont suffisamment libérées, il convient de les séparer pour obtenir un ou plusieurs concentrés. Pour différencier ces espèces, il est possible de faire appel à la densité, à la couleur, à la forme, aux propriétés magnétiques, aux propriétés chimiques ...

**Exp 1:** La séparation des minéraux d'un minerai constitué de trois éléments suivants.

Galène (PbS), Malachite ( $\text{CaCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), Quartz ( $\text{SiO}_2$ ).

	Couleur	densité	dureté	magnétisme	Radio activité
Galène	Grise (brillant)	7.6	Tendre ( $\approx 2$ )	//	//
Malachite	Verdâtre	4.2	Moyenne ( $\approx 4$ )	//	//

Quartz	translucide	2.6	7	//	//
--------	-------------	-----	---	----	----



Procédé de traitement de l'exemple 1

### Remarques

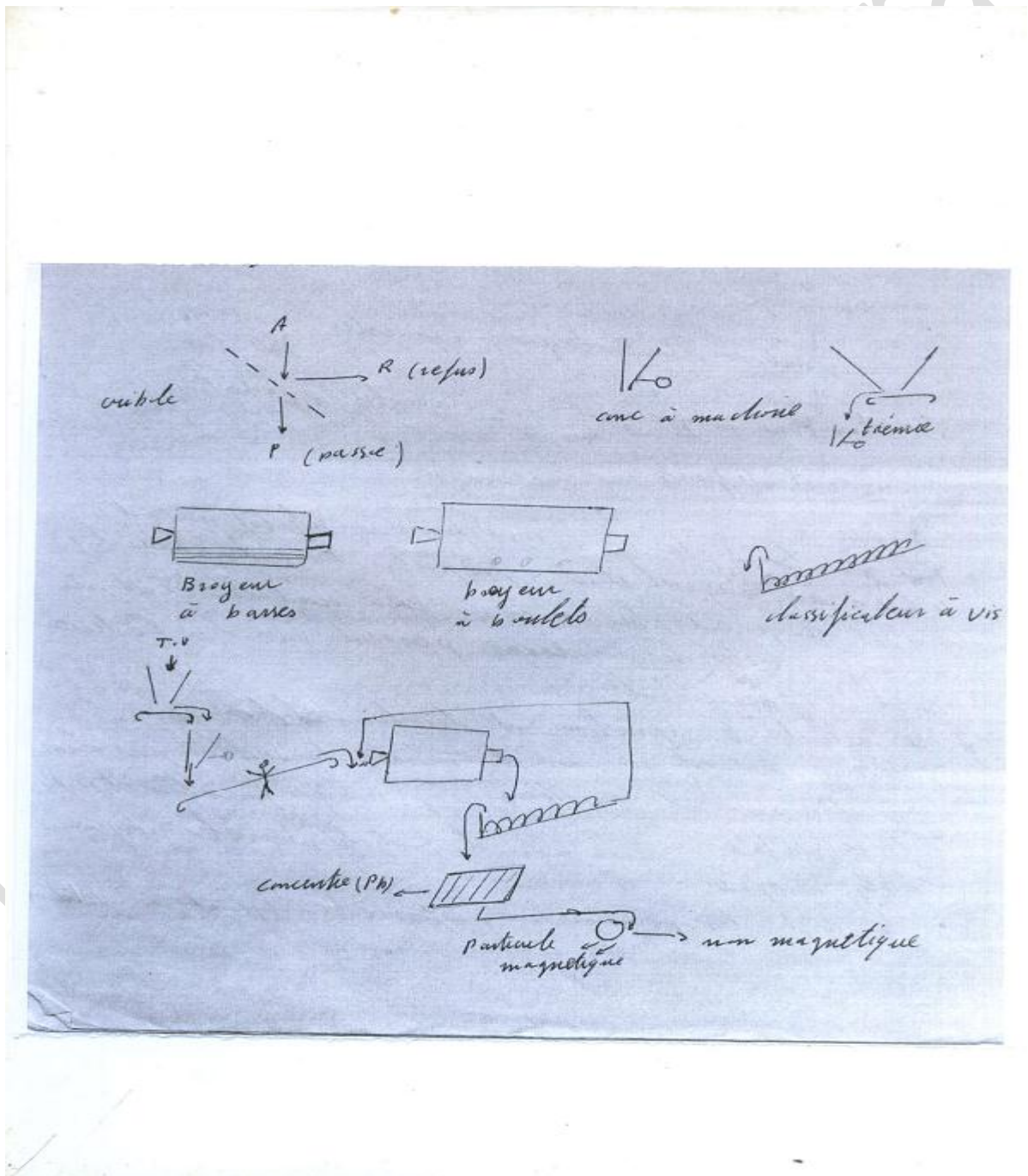
- ❖ Tout procédé est plus au moins efficace ou sélectif suivant le minerai auquel il est appliqué. En particulier, les mixtes réagissent plus au moins au traitement, de même les propriétés des minéraux peuvent varier à l'intérieur d'un gisement.
- ❖ Les méthodes de séparation ont des limites
  - Chaque méthode ne peut travailler que dans un domaine de taille bien précise (granulométrie);
  - La sensibilité. Il faut des propriétés physiques assez remarquées;
  - Le coût des opérations est parfois élevé (ex la flottation).

### 1.8.4. Représentation schématique des opérations de valorisation

La succession des opérations de valorisation est représentée par un schéma de traitement appelé flow-sheet. Il permet de lire rapidement la complexité des opérations qui subit la matière minérale et généralement accompagnées d'indications sur le tonnage, les teneurs, les caractéristiques des appareils, les dimensions des produits etc.

On peut aussi à l'aide d'un flow-sheet suivre les qualités de minerai ou de la pulpe (mélange entre l'eau et le minerai) lorsqu'il passe d'une étape à l'autre.

Généralement les appareils sont dessinés de la façon schématique suivante:



## ***Fragmentation des solides (Préparation mécanique)***

### **2.1. Comminution des substances minérales**

Def: la comminution est le terme général pour désigner les opérations de concassage, de broyage et de pulvérisation. Ces opérations consistent industriellement à réduire les dimensions des roches et des minerais par divers moyens mécaniques. Elles ont pour but de libérer les éléments valorisables (les minéraux) de la gangue ou de réduire la dimension de la matière minérale à des dimensions demandées par l'utilisateur, ou encore de faciliter la manutention (transport) d'un produit.

On distingue plusieurs stades de fragmentation:

- Stade d'abattage se situe au départ des opérations et a pour but d'obtenir, au moyen d'explosifs, des blocs généralement volumineux.
- Le concassage primaire: traite les gros blocs qui viennent de la mine ou de la carrière. Ces blocs qu'on appelle tout-venant dépassent souvent la dimension de mètre et sont divisés en morceaux de l'ordre de décimètre. Ils sont plus faciles à stocker et à transporter.
- Le concassage secondaire (par concasseur ou broyeur): réduit les blocs provenant de concassage primaire en morceaux de l'ordre du centimètre.
- La pulvérisation: est un broyage très fin inférieur à 0,1 mm (100  $\mu$ ) et qui se fait à sec.

Chaque type d'opération se fait pour des granulométries d'alimentation comprise entre des limites bien définies. Si la taille (dimension) est supérieure à 0,5m on applique ce qu'on appelle le stade d'abattage. Si la taille est supérieure à 100 mm c'est ce qu'on appelle le concasseur primaire. Si la taille est comprise entre 100 mm et 35 mm on a un concassage secondaire. Si la taille est comprise entre 35 mm et 10mm c'est le concassage tertiaire. Si la taille est



inférieure à 10 mm c'est le broyage et si la taille est inférieure à 0.1 mm c'est la pulvérisation ou la micronisation.

## **2.2. Aperçu théorique sur les déformations**

### **2.2.1. Comportement des roches**

Lors des opérations de fragmentation, les roches sont soumises à des forces qui suscitent dans la matière des contraintes de compression, de traction ou de cisaillement. Ces contraintes conduisent à des déformations et des ruptures. Les principaux facteurs pétrographiques d'une roche intervenant dans le phénomène de rupture sont:

- Degré d'altération et de fissuration;
- nature des matériaux constitutifs;
- forme et dimension de ces minéraux;
- microfissuration intra et intercristalline;
- hétérogénéité (répartition dans l'espace des minéraux);
- anisotropie (orientations préférentielles des minéraux ou des fissures).

Chaque roche peut subir plusieurs types de déformations:

- Déformation élastique réversible linéaire et instantanée;
- déformation élastique non réversible;
- déformation plastique qui entraîne une modification de la roche telle que le glissement dans les cristaux.

Ces déformations se produisent généralement au même temps. La rupture a lieu lorsque la déformation atteint une valeur limite.

### **2.2.2. Types de fragmentations**

- 1<sup>er</sup> type: c'est l'écrasement (cas de concasseur à mâchoire);
- 2<sup>ièm</sup> type: c'est la percussion (cas de concasseur à marteaux);
- 3<sup>ièm</sup> type: c'est cisaillement;
- 4<sup>ièm</sup> type: attrition (cas de concasseur à cylindre);

5<sup>è</sup>m type: percussion entre particules (cas de broyeur autogène);

6<sup>è</sup>m type: percussion par corps broyant (cas des broyeurs à boulets ou à barres).

### 2.3. Caractéristiques

Le concassage et le broyage traitent souvent des roches dures et abrasives (qui contiennent  $\text{SiO}_2$ ...). Se pendant, il faut des machines industriels puissantes, robustes relativement simples et moins coûteux. Les pièces d'usures peuvent se remplacer facilement. Le choix d'une machine est fixé par:

- La dimension maximale de produit à traiter;
- le tonnage à traiter;
- la nature de la substance à fragmenter (abrasivité caractère plus ou moins coulant);
- le rapport de réduction demandé.

Le rapport de réduction est théoriquement défini comme le rapport de la dimension de plus gros morceau alimenté à la dimension de plus gros morceau du concassé. Pratiquement la dimension de ses plus gros morceaux est mal définie car ils n'ont pas une forme bien régulière.

On définit actuellement le rapport de réduction en prenant la dimension de la maille à travers dû laquelle passe 80 % en poids des morceaux. C'est le cumul passant à 80 % de la courbe granulométrique et le rapport de réduction est alors

$$R_r = D_{80}/d_{80}$$

$D_{80}$  correspond à l'alimentation (avant la fragmentation);

$d_{80}$  correspond au produit concassé.

Alimentation (par analyse granulométrique de l'échantillon représentatif par un tamis qui nous donne 80% de passé à travers)

Appareil de fragmentation

Sortie (par analyse granulométrique de l'échantillon représentatif par un tamis qui nous donne 80 % de passé à travers)

Exp:

Alimentation		Sortie	
Maille en mm	Cumul passant %	Maille en mm	Cumul passant %
60	100.00	18	100
51	96.00	13.5	90
38	84.00	12.5	87
25.4	62.50	9.5	70
19	50.00	7.5	59
13	35.00	6.5	50
6.5	26.00	3.2	31

### Théoriquement

- Dimension du plus gros morceau à l'alimentation est 60 mm
- Dimension du plus gros morceau à la sortie est 18 mm

$$R_{Rt} = 60/18 = 3.34$$

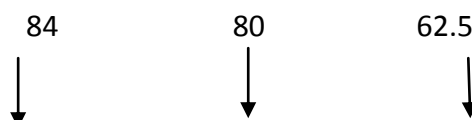
### Pratiquement

Alimentation: 80 % du produit  $\longrightarrow$  35.5 mm =  $D_{80}$

Sortie: 80 % du produit  $\longrightarrow$  11.1 mm =  $d_{80}$

### Remarque

Pour déterminer la valeur correspondant à 80 % par interpolation



Donc  $(X - 38) / (80 - 84) = (25.5 - 38) / (62.5 - 84)$  on déduit X

Avec X c'est la dimension de la maille qu'on cherche.

## 2.4. Appareils de fragmentation

### 2.4.1. Concassage primaire

Il est réalisé dans la majorité des cas par des concasseurs à mâchoires. Le concasseur à mâchoire comme son nom l'indique est un appareil constitué de deux mâchoires en forme de V disposées face à face dont l'une est fixe et l'autre mobile et animée d'un mouvement alternatif. La matière à concasser est introduite à la partie supérieure à l'aide d'une trémie. Le rapprochement de la mâchoire mobile fait éclater les blocs par compression (écrasement) et son écartement les libère à la partie inférieure.

Il existe plusieurs types de concasseur et diffère l'un de l'autre suivant le mécanisme utilisé pour le mouvement de la mâchoire mobile. Ces types de concasseurs sont utilisés pour fragmenter les gros blocs.

### 2.4.2. Concassage secondaire

Il est réalisé en général par des concasseurs giratoires qui sont des appareils robustes et qui fonctionnent par écrasement de la matière entre deux pièces : la paroi circulaire fixe et le tronc conique monté sur un arbre vertical entraîné par excentrique, selon que l'arbre décrit un cylindre ou un cône, l'appareil est dit à giration cylindrique ou à giration conique.

Ce type de concassage se classe après le concassage primaire.

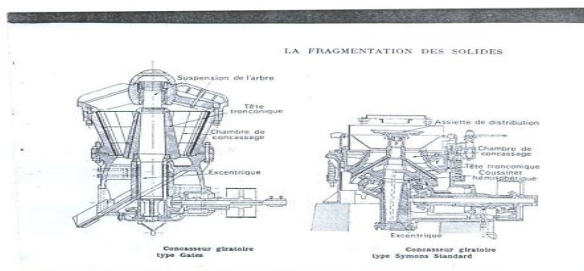
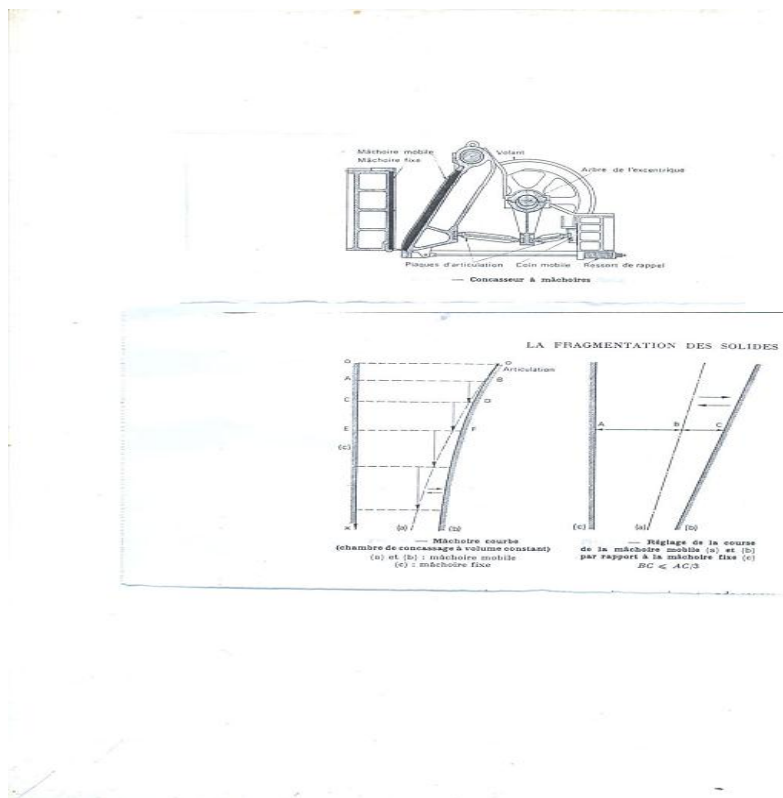
### 2.4.3. Concassage tertiaire

Il est réalisé en général par le concasser à cylindre. On peut trouver plusieurs types de ces concasseurs. Les produits à concasser ont une bonne régularité granulométrique, mais le rapport de réduction est faible. Il est de 2 à 4. Se pendant on peut obtenir avec de tels appareils des particules inférieures à 300 mm.

**Remarque:**

On peut trouver d'autres types de concasseur pour réaliser la fragmentation comme:

- Concasseur à compact;
- concasseur à choc;
- concasseur à marteaux.

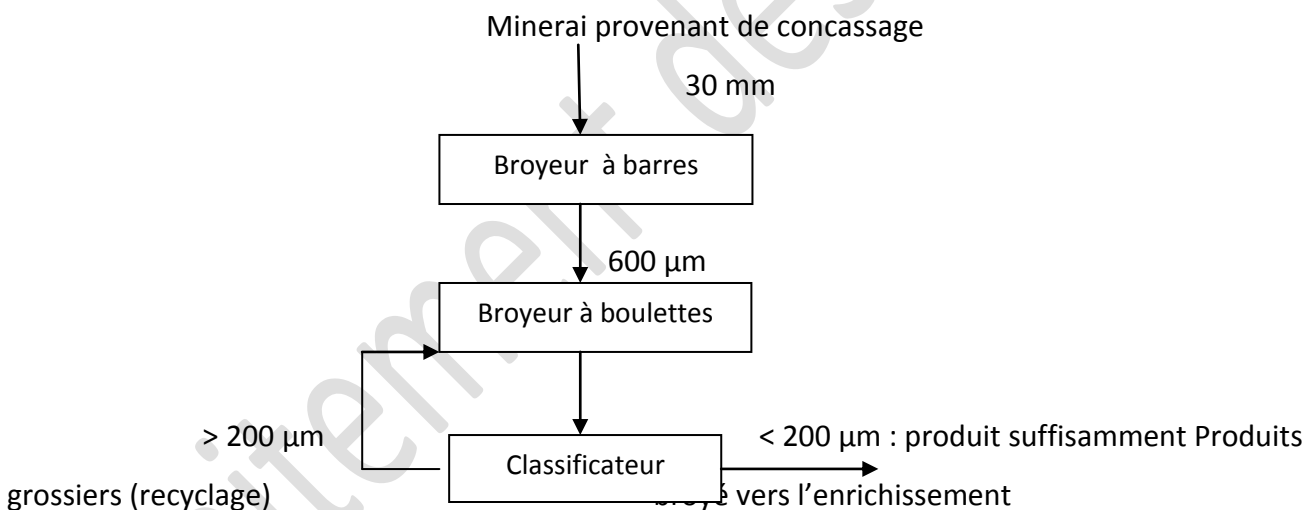


## 2.4.4. Broyage

### 2.4.4.1. Opération de broyage

Le broyage est l'opération la plus onéreuse (difficile) de la préparation mécanique des minéraux à cause de sa consommation d'énergie et d'acier par usure des corps broyant. Les frais de broyage représentent 40 à 60 % des frais d'exploitation. Le broyage peut s'effectuer en une ou plusieurs étapes en phase généralement humide. Le minerai provenant du circuit de concassage est mis en pulpe (mélange de minerais avec de l'eau) passe dans une série de broyage qui réduise sa granulométrie jusqu'à la dimension de libération (la séparation des éléments de valeurs et de la gangue). Un classificateur permet de renvoyer en tête de circuit les produits insuffisamment broyés et soustraire les produits suffisamment réduits pour éviter le surbroyage. Le broyage à sec a l'inconvénient de dépoussiérage mais il consomme moins de plaques d'usure et moins de corps broyant.

#### Exp d'un type de circuit de broyage



Le broyeur à barres réduit les particules de 30 mm à 600 μm alors que le broyeur à boulettes réduit cette dernière à la maille de libération.

Le classificateur a pour rôle d'extraire les particules ayant atteint la maille de libération d'une part et de recycler les particules insuffisamment broyées d'autre part. Les broyeurs sont en général des appareils cylindriques disposés horizontalement ou légèrement inclinés et tournent autour de leur axe. Les plus répandus dans l'industrie minière sont les broyeurs à

barres et à boulettes. Le roulement des barres ou des boulettes sur eux-mêmes provoqué par la rotation du cylindre permet de broyer par chocs frottement et attrition.

#### **2.4.4.2. Paramètres de broyage**

##### **2.4.4.2.1. Vitesse de rotation de tambour**

La trajectoire des corps broyant se compose en deux temps.

- Dans le premier temps, ils sont entraînés dans un mouvement ascendant contre la paroi et roulent sur eux-mêmes en une masse cohérente.
- Dans un deuxième temps, lorsque le poids n'est plus compensé à la force centrifuge les boulets quittent la paroi et tombent en chute libre. On a donc intérêt à faire tourner le tambour de façon à ce que le corps broyant monte le plus haut possible. À partir d'une certaine vitesse appelée vitesse critique la charge des boulets commencent à être centrifuge  $V_c = 42.3 / (D)^{1/2}$  t/mn.

D: Diamètre intérieur de l'appareil en (m).

##### **2.4.4.2.2. Corps broyant**

Le broyeur est chargé en premier lieu par une masse en acier appelée charge broyant. Elle est constituée soit des barres. Les barres sont utilisées pour un broyage grossier et les boulets pour un broyage fin. Plus les boulets sont grands plus le rendement est mauvais sur les matériaux fins. Les boulets doivent avoir des dimensions différentes en fonction de la granulométrie de minerai dans l'appareil.

##### **2.4.4.3. Appareils de broyage**

**1- Broyeurs à barres:** sont de formes cylindriques dont la longueur intérieure peut atteindre 2 à 3 fois le diamètre intérieur et ceci pour éviter le coinçage des barres. Ces types de broyeurs sont utilisés pour un broyage grossier, donc généralement ils sont utilisés pour le concassage tertiaire ou le broyage primaire. Leurs avantages c'est qu'ils peuvent traiter les morceaux de 40 mm en les réduisant à 2 mm. Ils limitent aussi la production des fines. Les broyeurs à barres travaillent souvent en circuit ouvert c.a.d sans charge circulante.

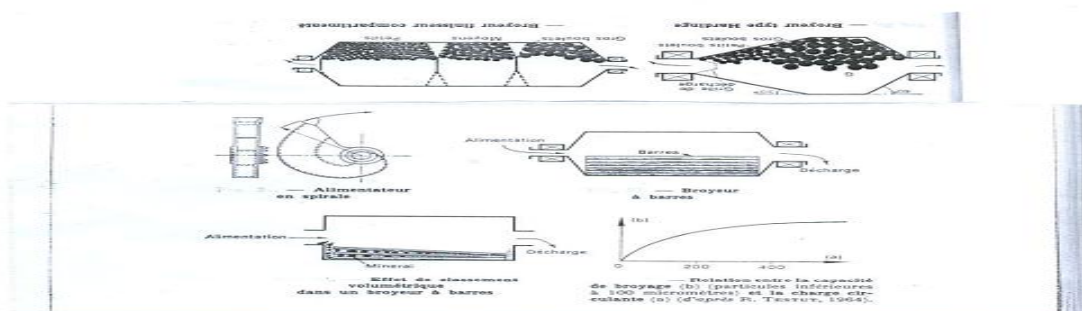
La décharge se fait par débordement. Le diamètre des barres est généralement compris entre 2 pouces  $\approx$  50 mm et 5 pouces  $\approx$  125 mm. La longueur d'une barre est inférieure à 20 ft  $\approx$  6.8 m.

Les broyeurs à barre sont souvent suivis par les broyeurs à boulets.

**2. Broyeurs à boulets:** Les broyeurs à boulets sont de formes cylindriques ou cylindroconiques. Ils sont remplis à moitié par le minerai et corps broyant constitué de boulets de différents diamètres en fonte ou en acier. Leurs formes sont plus ramassées que celles des broyeurs à barres. La longueur intérieure est égale ou un peut supérieure au diamètre intérieur. Le minerai est alimenté en continue par un tourillon et sort par l'autre tourillon sous forme de pulpe épaisse dans le cas de broyage en humide. La décharge se fait par débordement mais avec l'insertion d'une grille du côté de la sortie pour éviter la sortie des particules insuffisamment broyées.

Le diamètre d'un boulet est compris entre 1 pouce et 4 à 5 pouces.

Remarque: On peut rencontrer d'autres types de broyeurs tels que les broyeurs à galets, broyeurs à marteau, broyeurs autogènes et semi autogènes etc...





#### 2.4.4.3.1. Blindage et plaques d'usure

Les broyeurs sont garnis intérieurement de plaques d'usure en acier dure en fonte dure ou en caoutchouc. L'acier dur est utilisé dans les gros broyeurs utilisant les gros boulets. Les chocs étant très importants. Pour les boulets de diamètre inférieur à 3 pouces et demi (89 mm), on tend à utiliser le revêtement (la garniture) en caoutchouc plus économique outre leurs fonctions qui est de protéger les broyeurs contre les chocs. Ces revêtements d'usure ou blindage permettent par leur forme d'élever les boulets le plus haut et d'améliorer ainsi la puissance des chocs. Ces revêtements peuvent avoir des formes différentes au sein d'un même appareil.

#### 2.4.4.3.2. Facteurs ou paramètres du broyage

##### a) Vitesse de rotation

- 70 à 80 % de la vitesse critique ( $V_c = 42.3/(D)^{1/2}$ ) pour les broyeurs à boulets;
- 60 à 70 % de la vitesse critique ( $V_c = 42.3/(D)^{1/2}$ ) pour les broyeurs à barres.

##### b) Degré de remplissage

$$K = V_{\text{app. Ch.br}} / V_{\text{int br}}$$

$V_{\text{app. Ch.br}}$  (le volume apparent occupé par le corps broyant);

$V_{\text{int br}}$  (le volume intérieur du broyeur).

##### c) Dilution et concentration en solide

-La dilution  $D$  de la pulpe est le rapport du poids d'eau au poids de solide :

$$D_i = P_e / P_s$$

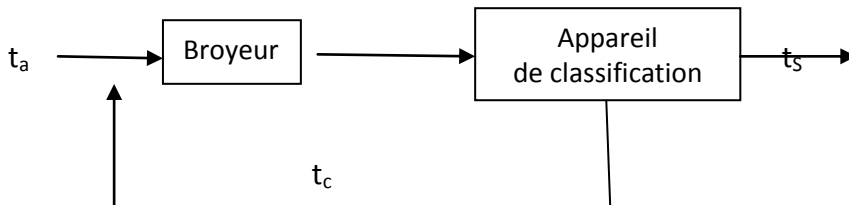
$P_e$  = poids d'eau contenue dans un litre de pulpe ;

$P_s$  = poids des solides contenus dans un litre d'eau (ou litre de pulpe).

-La concentration en solide est le rapport du poids du solide au poids de la pulpe :

$$C_s = P_s/P_p \text{ avec } P_p = P_s + P_e$$

#### d) Charge circulante et rapport de charge circulante



$R_{c.c} \% = (t_c/t_a) \times 100 = (t_c/t_s) \times 100$  à l'équilibre.

La charge circulante a les avantages suivants. Elle permet un meilleur contrôle de la granulométrie de produit broyé. Elle évite le surbroyage. Les particules broyées à dimension voulue sont immédiatement mises hors de circuit, ainsi les conditions de broyage se trouvent améliorées. La capacité de broyage peut être doublée par la charge circulante. Habituellement on travaille avec des charges circulantes comprises entre 150 à 400 %.

### 2.4.5. Criblage

#### 2.4.5.1. Généralités

La classification ou le classement comprend un ensemble de procédés dont le but est de séparer dans une alimentation constituée de grains de dimensions différentes d'un côté ceux dont la dimension est inférieure à une dimension de coupure et de l'autre côté dont la dimension est supérieure à cette dimension de coupure. Elle peut se faire par criblage ou tamisage (au laboratoire dm 5 mm). Soit par classification dans un fluide (classement indirect) basé sur la vitesse limite de sédimentation selon la taille des grains ou aussi par cyclonage.

#### 2.4.5.2. But de criblage

Peut-être soit de retirer les fines de l'alimentation d'un appareil de fragmentation pour faciliter son travail et augmenter sa capacité, soit de recycler à l'appareil de fragmentation

les produits qui n'ont pas atteint la dimension recherchée. Ainsi, de calibrer les produits fins après ou avant l'opération de fragmentation (concassage ou broyage).

### 2.4.5.3. Paramètres intervenant dans le criblage

#### 2.4.5.3.1. Largeur de la maille

Plus cette largeur est petite, plus la capacité est faible. Si la longueur est 3 à 4 fois la largeur, la capacité est de 15 % plus élevée que pour une maille carrée.

#### 2.4.5.3.2. Forme de la maille

La maille d'un crible peut être carrée, rectangulaire ou circulaire. Cependant, il existe un concept d'équivalence par rapport à la maille carrée qui est prise de référence.

$$\begin{array}{c} \square \\ \updownarrow \\ \square \end{array} d \equiv \square 1,1 d \quad \begin{array}{c} \circ \\ \swarrow \searrow \\ \circ \end{array} d \equiv \square 0,8 d$$

#### 2.4.5.3.3. Dimension des grains relativement à la maille

La fraction granulométrique comprise entre 0,5 et 1,5 fois la maille de crible est la fraction la plus difficile à cribler. Les grains appartenant à cette tranche sont appelés grains de dimension critique. Le bon fonctionnement d'un crible dépend beaucoup de la proportion de ces grains dans l'alimentation de crible.

#### 2.4.5.3.4. Humidité du minerai

Il est presque impossible de cribler un produit humide dont l'humidité  $[H = (P_e/P_p) \times 100]$  passe 3 à 4 % par suite du colmatage des ouvertures du crible ce qui diminue la capacité et l'efficacité du crible. Pour résoudre ce problème, il faut soit sécher le produit, soit l'arroser abondamment, on peut aussi faire un débouillage préalable.

#### 2.4.5.3.5. Épaisseur de la couche

L'épaisseur de la couche influe sur la capacité et l'efficacité du crible. Une couche épaisse aide les fines à passer, par contre une couche trop épaisse gêne le classement en empêchant les fines d'atteindre la toile. Une épaisseur optimum de 4 fois la maille est souhaitable.

#### 2.4.5.3.6. Pente du crible

Généralement les cribles sont en pente et ceci pour faciliter l'avancement des gros. Une pente très forte diminue le rendement de passage des fins et on se limite à maximum de 25°.

#### 2.4.5.4. Performances d'un crible

##### 2.4.5.4.1. Capacité

La capacité d'un crible est la quantité de minerai passant à travers le crible

$$T = 1.4 (\rho_s / \gamma) a^{0.6}$$

[T] = tonne/h/m<sup>2</sup> de surface;

$\rho_s$  = poids spécifique du minerai;

a = maille du crible en mm;

$\gamma$  = proportion des grains / difficiles ou critiques (en décimal).

##### 2.4.5.4.2. Surface d'un crible

$$A = (T / MCK) (1,6 / \rho_s)$$

A = surface en foot carré (ft<sup>2</sup>);

T = tonnage en scht/h;

M = coefficient relatif en % de refus à la maille dans l'alimentation;

K = coefficient relatif en % de refus à la demi (1/2) maille dans l'alimentation;

C = capacité spécifique donnée par le constructeur en scht /m<sup>2</sup>/h.

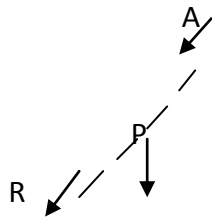
##### 2.4.5.4.3. Rendement d'un crible

Le rendement d'un crible exprime le % des produits fins de l'alimentation passant à travers le crible.

$$Rd = (P_p / A_a) 100$$

p: % passant cumuler à la maille dans le passant;

a: % passant cumuler à la maille dans l'alimentation.



Dans le cas où on ne connaît pas le tonnage P et A. On va utiliser les facteurs a, p et r

Avec r: % passé cumuler à la maille de refus.

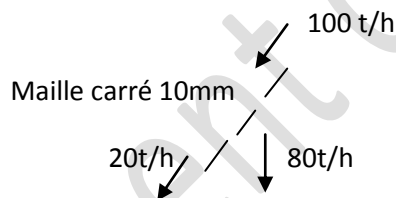
$$A = P + R \qquad 1 = P/A + R/A$$

$$P_p = pP + rR \qquad a = pP/A + rR/A$$

On obtient  $P/A = (r-a)/(r-p)$

Donc  $R_d = (p/a)(r-a)/(r-p)$

Exp:



Par analyse granulométrique

Alimentation		
maille	% passant	Passé cumulé
50 mm	20	20
30	10	30
20	10	40
10	30	70
5	15	85
2	15	15

Passant		
maille	% passant	Passé cumulé
50 mm	-	-
30	-	-
20	5	5
10	80	85
5	10	95
2	5	-

Donc  $a = 70$  et  $p = 85$  alors  $R_d = (85 \times 80 / 70 \times 100) \times 100 = 97,1 \%$ .

#### 2.4.5.4.4. Efficacité d'un crible

$$E = (\text{tonnage de refus théorique} / \text{tonnage de refus réel}) \times 100$$

avec le tonnage de refus théorique =  $R (1 - r/100) \times 100$

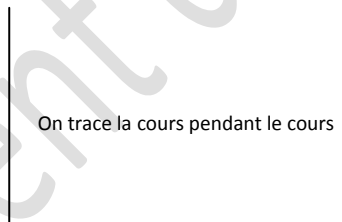
donc

$$E = 100 - r$$

#### 2.4.5.4.5. Coupure équivalente d'un crible

La coupure équivalente d'un crible correspond à la dimension des grains qui ont la même probabilité de se trouver dans le passé ou dans le refus de crible.

Cette coupure correspond au  $d_{50}$  de la courbe de partage du crible. Celle-ci est obtenue en prenant en abscisse la dimension moyenne des particules et en ordonné le % des grains d'alimentation se trouvant dans le passant.



#### 2.4.5.5. Appareils de criblage

Les appareils de criblage au niveau industriel peuvent être classés en quatre catégories:

Grilles fixes, grilles mobiles, Trommels et cribles vibrants.

##### 2.4.5.5.1. Grilles fixes

Elles sont utilisées pour le criblage grossier sur tout en amont de concassage primaire. Elles sont constituées par des barreaux parallèles et légèrement plus ouvert à l'entrée de concasseur, ceci pour éviter le blocage (ou l'obturation).

##### 2.4.5.5.2. Grilles mobiles

Ce sont des grilles à rouleaux destinées à effectuer de très pros criblages entre 150 à 500 mm et leur conception évite l'obturation.

#### **2.4.5.5.3. Trommels**

Ce sont des corps cylindriques ou tronconiques en tôle perforée ou en toile métallique tournant autour d'un axe incliné de 10 à 20 % par rapport à l'horizontale pour permettre l'avancement du produit.

#### **2.4.5.5.4. Cribles vibrants**

Ils ont des fréquences de vibration élevées 800 à 3600 vibrations par minute. Suivant le mécanisme, les vibrations peuvent être circulaires elliptiques ou simplement réduites à des chocs.

Remarque:

Chaque crible a ses performances et ses limites d'utilisation. On peut rencontrer au niveau industriel d'autres cribles.



## **Classification par sédimentation ou classement indirecte**

### **3.1. Généralités**

La séparation des solides par tamisage est un classement volumétrique direct qui n'est plus applicable lorsque les dimensions des particules sont inférieures à une dizaine de mm car les tamis deviennent trop fragiles et sont peu efficaces par suite du colmatage des mailles. Dans ce cas on a recours au classement au moyen du fluide. Cette opération de classification se réalise en se reposant sur l'un des deux principes.

- sédimentation différentielle des particules dans un fluide sous l'action d'une force constante (classement volumétrique);
- mise en œuvre de liqueur dense (classement densimétrique).

### **3.2. Sédimentation différentielle**

Elle est basée sur le mouvement relatif des solides dans un fluide. Lorsque, un solide se déplace dans un fluide au repos, celui-ci lui oppose une certaine résistance. Si le mouvement est lent, il est dit visqueux on parle alors de régime laminaire ou de stocks.

Si le mouvement est rapide l'influence de la viscosité du liquide diminue. On parle alors de régime turbulent. La résistance de fluide résulte de la différence de pression qui apparaît en avant et en arrière du mobile.

Dans le régime turbulent, on distingue deux phases:

- 1- A vitesse moyenne, il se forme des tourbillons stationnaires. Ce régime est appelé régime turbulent d'Allen.
- 2- A grande vitesse, les tourbillons deviennent libres et se déplacent dans le même sens que le solide. On est en régime turbulent de Newton.

### **4.3. Résistance offerte par un fluide au déplacement d'un solide de forme sphérique**

$$R = C.S.\rho.V^2/2$$



La valeur de la résistance opposée par un fluide au déplacement d'un solide dépend du régime d'écoulement du fluide c.a.d écoulement laminaire ou turbulent.

$P$  = poids spécifique de fluide (la masse volumique);

$V$  = vitesse de déplacement du solide et de fluide;

$S$  = section perpendiculaire au mouvement;

$C$  = coefficient de résistance dépendant de la nature de régime.

### 3.4. Vitesse limite de chute d'une sphère dans un fluide au repos (sous l'action de force de pesanteur)

Une sphère de diamètre  $d$  et de masse spécifique  $\rho_s$  placée dans un champ terrestre d'accélération  $\gamma$  et située dans un fluide de masse spécifique  $\rho$  est soumise à trois forces:

- La force de pesanteur  $F_p = \pi \cdot d^3 \cdot \rho_s \cdot \gamma / 6$ ;
- La poussée d'Archimède  $F_a = \pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot \gamma / 6$ ;
- La résistance offerte par le fluide  $F_f = C \cdot S \cdot \rho V^2 / 2$ .

L'équation du mouvement s'écrit:

$$m\gamma = m \frac{dV}{dt} = F_p - F_a - F_f$$

$m$  étant la masse de la particule.

La vitesse limite de la chute est atteinte pour  $Dv/dt = 0$  donc  $F_p - F_a - F_f = 0$  ou

$$(\pi \cdot d^3 \cdot \rho_s \cdot \gamma / 6) - (\pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot \gamma / 6) - (C \cdot S \cdot \rho V_{lim}^2 / 2) = 0$$

$$\text{On obtient } V_{lim} = (4(\rho_s - \rho) \gamma d / 3C\rho)^{1/2}$$

### 3.5. Cas des formes non sphériques

Retenons simplement que la vitesse limite de chute d'une particule est inférieure à celle d'une sphère de même nature (même densité) et de volume égale.

### 3.6. Sédimentation libre et sédimentation gênée

Il existe deux types de sédimentation appelés sédimentation libre et sédimentation gênée suivant l'abondance des particules solides dans la pulpe. Par définition, la limite entre la

sédimentation libre et la sédimentation gênée est donnée par une proportion égale à 5 % en volume de solide dans le fluide.

Si le % de solide en volume est  $< 5\%$  on dit que la sédimentation est libre;

si le % de solide en volume est  $> 5\%$  on dit que la sédimentation est gênée.

Pour obtenir un classement volumétrique, on a intérêt à ce que la densité  $\rho$  du fluide (ou la pulpe) tend vers un ( $\rho \rightarrow 1$ ) c.a.d on va travailler avec des dilutions assez grandes;

Pour obtenir un classement densimétrique, il convient d'opérer dans des pulpes relativement denses (25 % de solides en volume) afin de ne pas trop ressentir l'influence de la taille des particules.

### 3.7. Classificateurs industriels

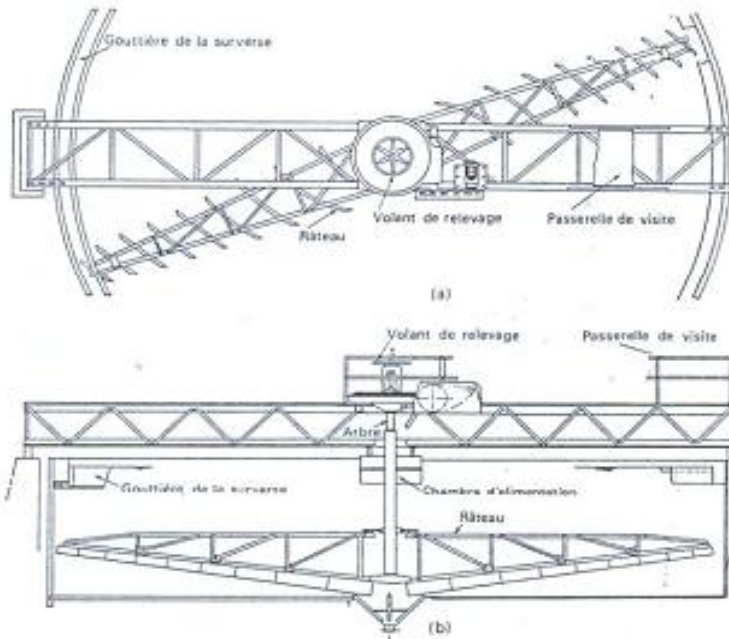
Un classificateur est un appareil qui permet d'opérer un classement par entraînement de certaines particules à l'aide d'un courant d'eau ou d'air, cette fraction s'appelle surverse ou overflow, alors que d'autres particules sédimentent, constituant la sousverse ou underflow.

Techniquement, les classificateurs sont divisés en appareils hydrauliques et en appareils pneumatiques suivant que le fluide est l'eau ou l'air. On peut distinguer quatre groupes de classificateurs industriels. Ces classificateurs sont en général formés de cuves.

✓ Classificateurs hydrauliques à courant d'eau horizontale et à sédimentation mettant en jeu uniquement les forces de pesanteur (Épaississeurs, class à vis)

Ces appareils donnent un trop-plein un liquide clair (hydro séparateur) ou une surverse tandis qu'à la base il donne un produit boueux ou sousverse. Les produits déposés au fond de la cuve sont raclés par une spirale ou par un râteau vers l'orifice de sortie et une pompe à diaphragme assure l'évacuation des produits sédimentés.

## LA PRÉPARATION DES MINÉRAIS

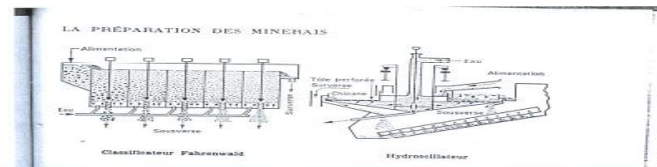


— Épaisseur

(a) : vue en plan ; (b) : vue en coupe

### ✓ Classificateurs à courant d'eau ascendante

Dans ces types d'appareils, le produit à classer abandonne les gains dont la vitesse de chute est supérieure à la vitesse ascensionnelle de l'eau. Ces appareils travaillent en général en condition de sédimentation gênée.



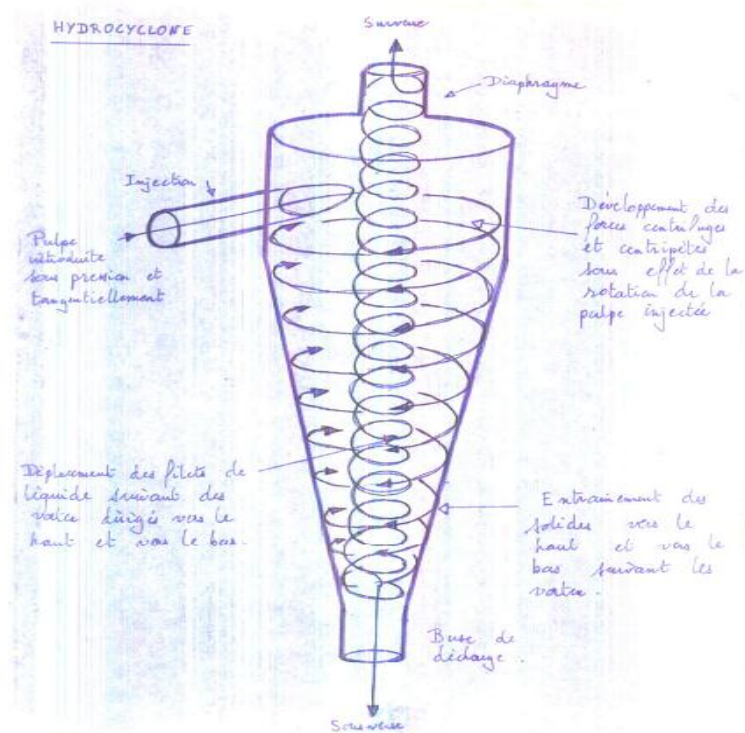
### ✓ Classificateurs hydrauliques à centrifugation

Dans ce type de classification, on trouve les hydrocyclones. Ces derniers sont constitués de trois parties fixes.

Une partie médiane cylindrique dans laquelle la pulpe est injectée tangentielle sous une pression de l'ordre de 0,5 à 1 kg/cm<sup>2</sup>.

Une partie inférieure qui est formée d'un cône, pourvu en sa partie terminale d'une buse de décharge.

Une partie supérieure cylindrique qui constitue une simple boîte d'évacuation dans laquelle débouche le diaphragme de décharge.



### ✓ Classificateurs pneumatiques

Leur rôle principal est d'enlever les poussières dans une alimentation relativement grenue (granulométrie assez grande). On les utilise souvent pour le dépeussierage complet.

La réussite d'un procédé de classification pneumatique nécessite en général un degré de siccité (qualité de ce qui est sec) de la matière à traiter.

### 3.8. Débourage

L'élimination des fines primaires et des argiles ou débourage peut être effectuée, en début d'opération, dans une usine de traitement. Dans un certain sens, l'opération de débourage correspond à une opération de classification puisqu'elle élimine des particules de taille réduite qui, parfois, représentent des produits sans valeur et qui gênent les opérations de concentration.

## **LES METHODES D'ENRICHISSEMENT**

**Rappel:** la maille de libération est la dimension ou la granulométrie à donner à un minerai tout venant pour pouvoir séparer les éléments de valeur des éléments de gangue. On distingue deux méthodes de la détermination de la maille libre à savoir la méthode théorique dont laquelle on applique la lame mince ou section polie et la méthode pratique qui comprend la flottation et liqueur dense.

### **I. Méthode de triage manuel**

Elle consiste à un triage à la main c.a.d retirer les produits qui ont une certaines caractéristique (qui se distinguent de reste par des propriétés appropriées, parmi ces caractéristiques on peut citer: la couleur, la forme, la densité, la fluorescence et les propriétés magnétiques.

### **II. Méthode basé sur la gravité**

Cette méthode profite des différences dues aux:

- ✓ variation des densités des grains;
- ✓ variation de volume;
- ✓ variation de forme.

Les trois méthodes sont mises en jeu par:

- ✓ la méthode de la nappe pelliculaire fluente;
- ✓ la méthode de séparation par accélération différentielle;
- ✓ la méthode de liqueur dense.

#### **II.1. Nappe pelliculaire fluente**

Il s'agit d'écoulement d'une nappe d'eau de faible épaisseur (quelques cm) sur un plan incliné pourvu ou dépourvu d'obstacles. Les particules, suivant leurs vitesses et leurs résistances au mouvement se séparent en classe densimétrique.

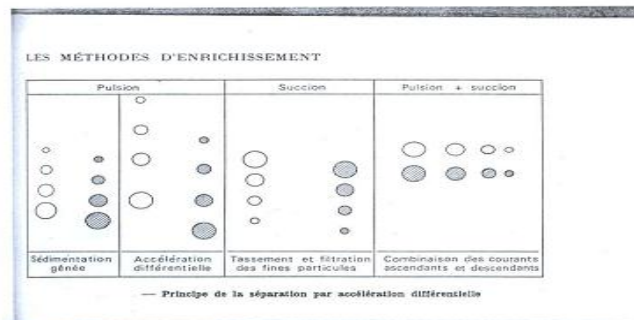
### II.1.1. Principe

La séparation par la nappe pelliculaire fluant est basée sur la longueur, la surface du parcours effectué par les grains sur un plan incliné, la pente de l'inclinaison et la rugosité de la surface. Comme, elle est basée aussi sur la densité, le volume et la forme des particules. Ainsi sur la nature de l'écoulement de la nappe fluente à savoir l'écoulement laminaire ou turbulent.

D'une manière générale, la séparation est provoquée essentiellement par deux facteurs:

- ✓ le temps que met un grain pour rejoindre le plan;
- ✓ la résistance des grains au mouvement.

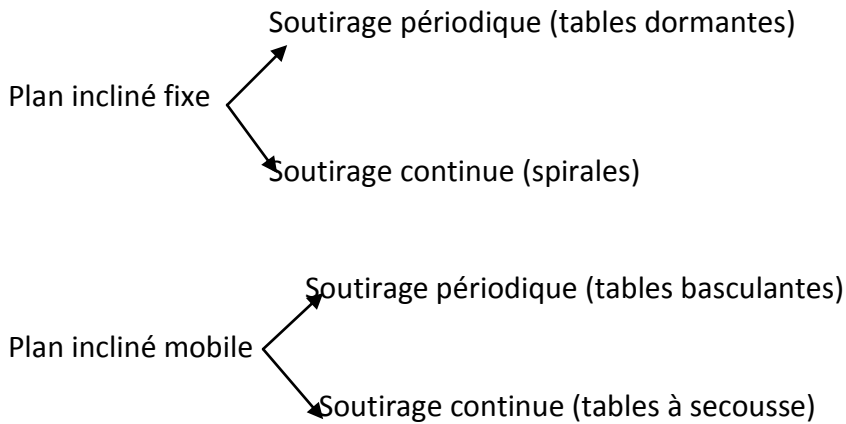




### II.1.2. Appareils

Il y a deux types d'appareillages: ceux qui travaillent à plan incliné fixe et ceux qui travaillent à plan incliné mobile.





### **II.1.2.1. capacité d'une table à secousse**

Elle dépend de la granulométrie du produit, de la différence des poids spécifiques (densité) des minéraux à séparer, le mode de traitement (ébauchage, épuisement ou lavage), de la proportion des mixtes (provoque les problèmes).

### **II.1.2.2. Paramètres de réglage d'une table à secousse**

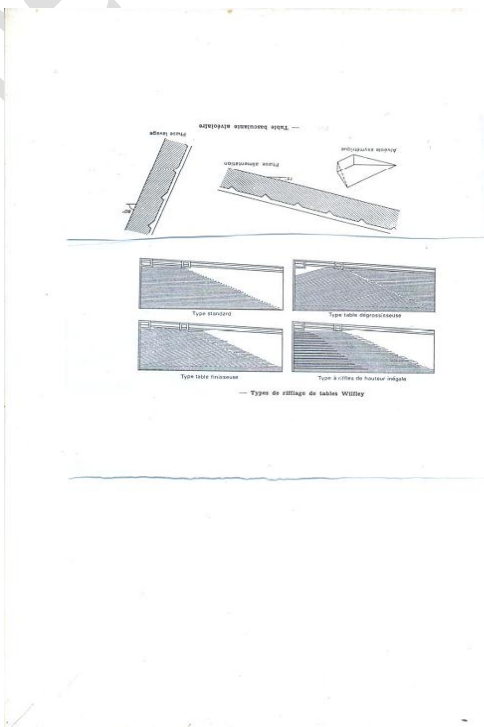
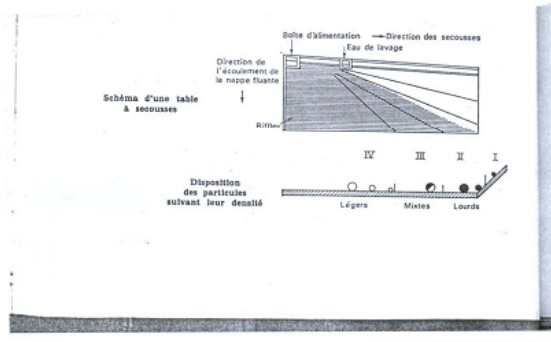
- ✓ Débit de pulpe alimentée;
- ✓ % de solide dans la pulpe (25 à 30 %);
- ✓ inclinaison de la table (2 à 19°);
- ✓ fréquence et amplitude des secousses (180 à 300 secousses par minute, par amplitude de 13 à 14 mm);
- ✓ débit d'eau d'entraînement de lavage;
- ✓ débit d'alimentation doit être maintenu constant temps que possible de même que le % solide.

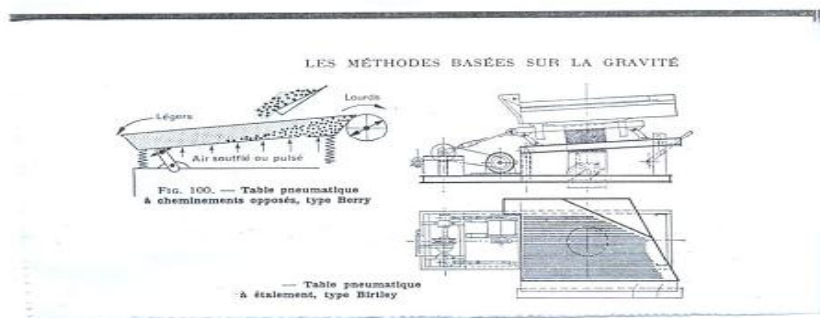
### **II.1.2.3. Mécanisme de séparation**

La table est alimentée en pulpe à la partie supérieure par une boîte d'alimentation, un débit contrôlé d'eau de lavage coule perpendiculairement aux rifles en suivant leurs inclinaisons et il doit être réparti uniformément sur toute la longueur de la table. La séparation se fait en trois phases.

- ✓ Dépôt sur la table;
- ✓ entraînement par les secousses;

✓ Puis entrainement par l'eau de lavage.





### II.1.3. Appareils pneumatiques

Ce sont des tables à secousses dont le principe consiste à passer un courant d'air soufflé ou pulsé sur une surface inclinée alimentée par un produit de granulométrie comprise entre (0.5 et 12 mm) dont l'humidité ne doit pas dépasser 3 %.

## II.2. Concentration par accélération différentielle

### II.2.1. Principe

Le principe de l'accélération différentielle consiste à soumettre pendant des cycles très brefs des particules minérales à des courants ascendants descendants assurés par des pulsions alternées données à un liquide par un piston ou par un diaphragme ou par le mouvement alternatif d'un crible dans un liquide ( exp d'appareils: le Jig).

La séparation des grains lourds et légers s'obtient par l'action combinée des courants ascendants et descendants. La sédimentation dans le liquide des particules de densités et de diamètres différents aboutit à une classification par équivalence.

### **II.2.2. Théorie de jiggage**

Dans le jiggage, la stratification en couche du poids spécifique différents est due à l'action combinée des trois causes suivantes:

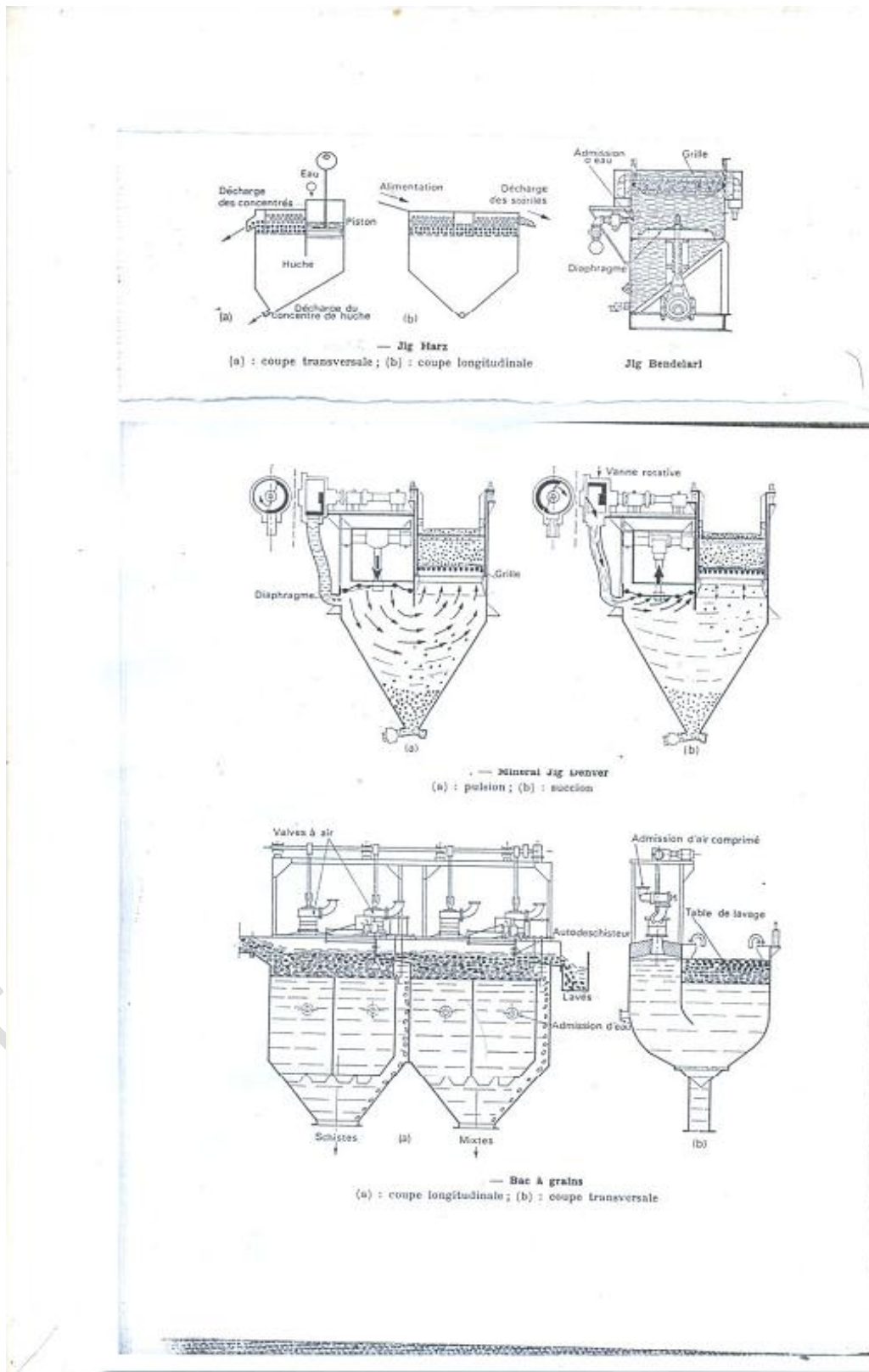
- ✓ L'accélération différentielle;
- ✓ sédimentation gênée;
- ✓ tassement.

- **Accélération différentielle:** Elle consiste sous l'action de pulsion à placer à la base du lit les particules grosses et lourdes, dans la partie médiane, les particules grosses et moins denses ainsi, que les particules petites denses, dans la partie supérieure les fines légères. Durant le mouvement descendant (pulsion) du piston, les grains tombent et sédimentent dans un temps très court. De ce fait, la vitesse limite de sédimentation n'est pas atteinte. La sédimentation se fait alors suivant la différence de densité. Elle peut être influencée par la différence de granulométrie.

- **Sédimentation gênée:** pendant la pulsion (mouvement ascendant de l'eau), les grains lourds par leurs énergies (poids dense) change moins leurs directions que les légers. Ils sont moins entraînés par le mouvement ascendant. La séparation entre les lourds et les légers qui sont amorcés en première phase s'accélère à la deuxième phase. Les gros lourds continuent à descendre. Les fins légers sont entraînés hors du bac par débordement.

- **Tassement:** Il permet aux particules fines de la partie médiane de rejoindre les lourdes et gosses qui se trouvent au fond.

En conséquence pour le jig la pulsion a pour rôle de créer le vide entre les grains afin de faciliter la sédimentation. La succion permet donc aux fines lourdes de rejoindre les grosses lourdes qui sont déposées lors de la pulsion, Donc, pour récupérer les fins lourds on augmente la succion et pour récupérer les gros lourds on augmente la pulsion.



### **II.2.3. Contrôle de l'opération de jiggage**

Le contrôle de l'opération, c'est le contrôle de la teneur et de la quantité du concentré riche, de la teneur et la quantité du mixte riche, de la teneur des rejets, par conséquent le contrôle du rendement métal de l'opération de jiggage.

Les paramètres essentiels du contrôle sont:

- ✓ le débit de l'alimentation en minerai;
- ✓ le débit d'eau alimenté;
- ✓ l'épaisseur et la densité du lit filtrant;
- ✓ l'amplitude et la fréquence des oscillations.

On doit diminuer le débit de minerai alimenté si les rejets sont trop riches. L'alimentation doit être si possible uniforme en teneur et en granulométrie. Si on veut un concentré bien riche, on travaille avec un lit plus dense et plus épais avec des oscillations rapides et courtes et avec beaucoup d'eau.

### **II.3. Concentration par milieu dense (Liquueur dense ou médium)**

Si l'on plonge dans un fluide de densité «d» un mélange de densité inférieure, égale ou supérieure à la densité de fluide, les particules de densité inférieure flottent à la surface, celles de densité supérieure plonge au fond, enfin celles de densité égale restent en suspension.

Ce phénomène de classement densimétrique est le principe d'enrichissement par liqueur dense ou milieu dense ou médium. Ce milieu dense peut être une solution vraie ou pseudo solution. Depuis long temps, les chercheurs se sont penchés vers l'étude du pseudo solution (mélange de solide finement broyé avec l'eau). Le succès de ce procédé réside dans deux facteurs principaux.

- Il traite des quantités de minerai importante (10000 t/j);
- Il est possible de séparer des minéraux dont l'écart entre les densités est seulement 0,1.

Ce procédé est en général une pré-concentration qui facilite l'enrichissement par les procédés ultérieurs par le fait qu'il donne un rejet définitif et un pré-concentré à retraiter.

Le procédé par milieu dense implique plusieurs stades:

- la préparation du minerai;
- la préparation et la récupération du médium;
- la séparation des produits flottants et plongeants.

### **II.3.1. Préparation de minerai**

La méthode de séparation par liqueur dense ne convient qu'aux particules relativement grosses (-100mm à 10mm), on arrive des fois jusqu'à 1mm. Cependant, le minerai ne doit pas contenir des particules très fines car elles augmentent la viscosité de milieu dense, pour ce faire, on doit laver le minerai énergétiquement sur crible puis l'égoutter.

### **II.3.2. Préparation de médium**

On peut étudier deux sortes de médiums.

- liquides homogènes;
- liquides hétérogènes.

a) Liquides homogènes: Ce sont des produits chimiques purs qui sont choisis de telle façon d'avoir des densités intermédiaires entre les éléments lourds et légers

exemple: Tétrabromoéthane ( $C_2H_2Br_4$ ) de densité  $d = 2,96$

Pentachloroéthane ( $C_2HCl_5$ ) de densité  $d = 1,68$

Iodure de méthyle ( $CH_2I_2$ ) de densité  $d = 3,33$

On peut faire des mélanges pour obtenir la densité voulue.

b) liquide hétérogènes: Ils sont obtenus en mélangeant en suspension dans l'eau des différents produits solides très finement broyés tels que le sable, l'argile, la barytine, les schistes, la galène. Dans ce cas, on a intérêt à broyer très finement ces produits pour que les

particules ne se déposent pas. Le médium est de temps plus stables qu'il y a des fines. La viscosité ne doit pas dépasser 35 % en volume.

### ***II.3.3. Récupération et régénération de médium***

Les produits lourds (plongeants) et légers (flottants) entraînent avec eux à la sortie de l'appareil de traitement du médium qui doit être récupéré, pour cela, il faut d'abord :

- égoutter ces produits, on obtient un médium de densité voisine que celle du bain.
- ensuite laver sur un crible aussi bien les plongeants que les flottants afin de récupérer le médium collé à la surface des grains. On obtient dans ce cas un médium dilué qu'il faut épurer et concentrer par le procédé approprié.

Les problèmes de densité de bain, de stabilité des grains de médium, de facilité de récupération ont conduit les utilisateurs à utiliser des médiums de magnétite et de ferrosilicium.

### ***II.3.4. Appareils de séparation***

Il ya plusieurs types d'appareils. On distingue

- séparateur à bac;
- séparateur à tambour;
- séparateur à cyclone.

### ***II.3.5. Limites d'utilisation***

Ce procédé est utilisé pour des minerais de granulométrie grossie. Il donne des concentrés définis à une granulométrie comprise entre 1 et 100 mm. L'inconvénient c'est le faible taux de récupération (30 à 60 %). Ce procédé reste encore utilisé à cause de coût très bas. Il peut être combiné avec d'autres procédés pour constituer une étape de concentration. Le minerai à séparer ne doit pas contenir des particules plus fines que la suspension. En conséquence on



est amené à obtenir, pour des minerais métalliques des mailles de broyage supérieur à la maille de libération. L'efficacité de la séparation se trouve réduite.

### III. Flottation

La flottation est un procédé d'enrichissement des minerais basée sur le comportement des surfaces des minerais émergés dans l'eau. Si la surface minerais est mouillée par l'eau, on dit que le minéral est hydrophile. Si la surface ne se mouille pas le minéral est hydrophobe.

Pour qu'une particule émergée dans l'eau puisse monter à la surface il faut:

- que le système solide, liquide et gaz ont une densité apparente inférieure à celle de l'eau;
- injecter de l'air qui servira comme moyen de transport;
- que la particule a un moyen de s'accrocher aux bulles d'air;
- que les bulles d'air aient une durée de vie longue (pour éviter l'éclatement des bulles, il faut diminuer la tension exercée sur ceux-ci en ajoutant certains produits chimiques).

#### III.1. Objet de la flottation

L'objet de la flottation consiste à rendre hydrophobes certains surfaces minérales toutes en laissant hydrophile les autres (gangue). Les minéraux hydrophiles restent au sein de la pulpe alors que les minéraux rendus hydrophobes montent et restent à la surface liquide gaz et sont ensuite récupérées par mousse (écume). Pour cela la flottation fait appel à des produits chimiques appropriés.

La compréhension du procédé de flottation implique une connaissance du mécanisme interne qui réagit l'adsorption des collecteurs (c'est-à-dire de produits formés en général d'une longue chaîne paraffinique (alcane) et d'une tête polaire (ex : les chlorures d'alkylamine =  $C_{10}H_{21}NH_3^+Cl^-$ ,  $C_{12}H_{25}NH_3^+Cl^-$ ,  $C_{14}H_{29}NH_3^+Cl^-$ ,  $C_{16}H_{33}NH_3^+Cl^-$ ,  $C_{18}H_{37}NH_3^+Cl^-$ ...)) sur la surface du minerais désiré (tension superficielle)

#### III.2. Champ d'application de la flottation

Quand le problème d'enrichissement d'un minerais se pose, on le résout par des études et par étapes distinctes.

a) Échantillonnage de minerais suivi d'une analyse chimique;

b) examen de minerai au microscopique pour la détermination des minerais utiles et de la gangue.

c) confirmation de la maille de libération par une étude densimétrique ou broyage.

La maille de libération est la dimension qu'il faut donner aux grains lors de la fragmentation. Elle peut s'obtenir par concassage s'elle est grossière ou par broyage s'elle fine.

- Si la maille de libération est supérieure à  $500\mu$  et que la densité des grains des minéraux utiles est très différente que celle des minéraux de gangue et que le minerai ne présente pas de susceptibilité magnétique satisfaisante. Le procédé d'enrichissement sera la gravimétrie.
- Si l'une des conditions précédentes n'est pas valable, on ne peut pas appliquer une séparation physique. Il faut donc appliquer une séparation physico-chimique.
- Si la maille de libération est grossière mais pas de différence de densité entre les constituants de minerai. La séparation physique est éliminée et pour une raison physico-chimique on ne peut pas appliquer la flottation, on est obligé d'appliquer l'hydrométallurgie (hydrominéralurgie) qui est une séparation chimique (attaque du minerai par un acide approprié).
- Si le minerai réfractaire (n'est pas attaquable) à l'hydrométallurgie c'est alors la pérométallurgie qui est applicable (attaque par la chaleur).
- Par contre, si le minerai présente une susceptibilité magnétique même si la maille de libération est assez fine c'est la séparation magnétique qu'il faut appliquée.

Le domaine d'application de la flottation est donc compris entre (0 et  $500\mu$ ) cependant la limite inférieure reste à optimiser car les ultras fines (particules inférieures à  $35\mu$ ) gênent la flottation à cause de leurs surfaces spécifiques.

### III.3. Réactifs de flottation

**III.3.1. Historique:** La flottation est un procédé qui est pris de l'importance à partir de 1920 ceci est dû de découverte d'agent collecteur organique. Avant, 1920, on procède par l'emploi de l'huile comme collecteur qui va être chargé des grains hydrophobes, cependant les machines étaient de capacité faible et la consommation d'huile était importante.

On peut envisager deux types de flottation:

✓ flottation globale qui consiste à recueillir des minéraux de plusieurs espèces dans un ou plusieurs mélanges (flottation de Bulk). On flotte au même temps tous les minéraux utiles.

✓ Flottation sélective (différentielle) consiste à récupérer chaque espèce séparément et moyennant un certain nombre d'opérations successives. Dans ce cas, il est nécessaire d'employer des agents activant (aident la fixation) et des agents déprimants (empêchent la fixation).

L'avantage de la flottation à l'aide des réactifs est de traiter les faibles teneurs.

Exp de 0,1 % jusqu'à 65 % pour  $WO_3$  (L'oxyde de tungstène).

Par les réactifs, on peut effectuer la flottation

- des sulfures (sulfure de Pb, sulfure de Zn, sulfure de Cu);
- des oxydes (oxyde de Pb, oxyde de Zn, oxyde de Cu);
- soient les oxydes et les sulfures au même temps.

Si le minerai contient une seule espèce minérale, on applique la flottation simple, mais s'il contient plusieurs espèces, on pratique soit la flottation sélective, soit la flottation globale.

A) flottation des sulfures simples (seule étape) (flottation simple) : Le T.V contient une seule espèce et après avoir qu'on connaît la maille de libération pour PbS (-250  $\mu$ ), on pratique un broyage jusqu'à -100  $\mu$  et déchlamé (< 5  $\mu$ ) et on ajoute les réactifs par étape:










**1) Collecteur:** C'est un produit organique qui est utilisé pour couvrir la partie minérale (adsorption) la rendre hydrophobe pour qu'elle flotte à la surface de la pulpe.

Parmi les collecteurs des minerais sulfurés on trouve les xanthates  $[RO-CS-SNa(K)]$  qui contient une chaîne carboné (R) (si la chaîne est plus longue, elle est plus puissante et verse versa). Dans notre cas (PbS) on aura comme collecteur l'éthyle xanthate (E.X) (R=  $C_2H_5$ ) avec un temps de conditionnement (3 à 5mn) avec ce temps lui-même dépend de la nature de minéralurgique et de la granulométrie.

Dans le cas des minerais non métalliques. Ces derniers peuvent être collectés par les acides gras ou leurs savons (dérivés des acides). Ils peuvent être également collectés par les amines ( $R_3N$ ) les sulfonates ( $R-SO_3^-$ ) les esters ( $RCOOR'$ ). Ces réactifs présentent la particularité

une fois dissoute dans l'eau. La partie polaire moléculaire est chargée soit positivement ou négativement.

— Collecteurs de minéraux non métalliques (oxydes et sels)

Collecteur	Formule	Ion	Type de collecteur	Electrolyte
Savon .....	RCOONa	R — COO <sup>-</sup>	anionique	faible
Alkylsulfate ...	RSO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub>	R — SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	anionique	fort
Alkylphosphate .	RPO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub>	R — PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	anionique	faible
Sel d'ammine primaire .....	RNH <sub>2</sub> Cl	R — NH <sub>2</sub> <sup>+</sup>	cationique	faible ou fort
Sel d'ammonium quaternaire ..	RN(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> Cl	R — N(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> <sup>+</sup>	cationique	fort
Sel de sulfonium	RS(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Cl	R — S(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	cationique	fort
Sel d'alkylpyridium .....	R —  — NHCl	R —  — NH <sup>+</sup>	cationique	fort
Acide alkylphosphonique ....	RPO(OH) <sub>2</sub>	R — 	anionique	faible
Acide arylphosphonique ....	R —  — PO(OH) <sub>2</sub>	R —  — 	anionique	faible
Acide arylarsonique .....	R —  — AsO(OH) <sub>2</sub>	R —  — 	anionique	faible

— Nature chimique des collecteurs appartenant à la famille des thioisels  
d'après E. C. Tvetter et F. W. McQuiston Jr. (1961)

Collecteur	Structure
Dithiophosphates (Aerofloat de l'American Cyanamid Co.)	
Mercaptobenzothiazole (réactif 494 de l'American Cyanamid Co.) .....	
Thiocarbamates (réactif Z 200 de la Dow Chemical Co.)	RHN — 
Xanthates (série Aero 300 de l'American Cyanamid Co. ; séries Z <sub>9</sub> à Z <sub>12</sub> de la Dow Chemical Co.) .....	RO — 
Formates de xanthogène (Minerec) .....	RO — 

2) **Moussons**: Il est possible de considérer la flottation comme un procédé de séparation faisant intervenir trois étapes principales:

- la modification des surfaces minérales;
- le contact entre des bulles et les particules minérales rendues hydrophobes;
- la séparation de la phase bulle-particule de la phase liquide-particule.

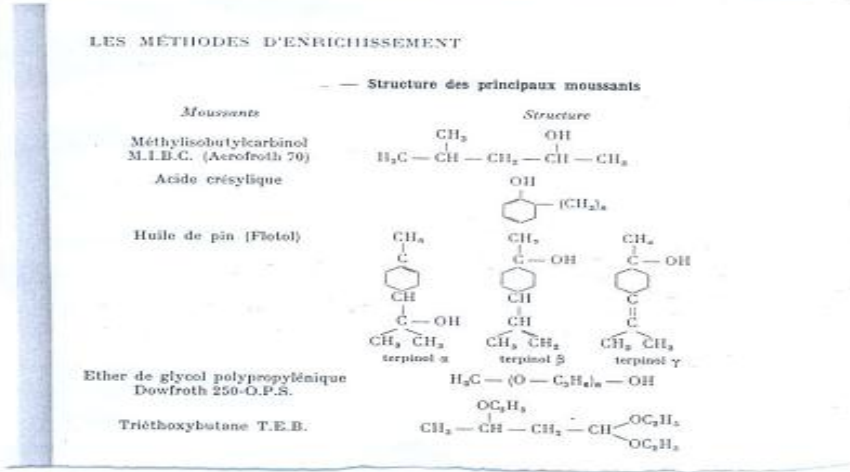
Les moussons interviennent dans la deuxième et la troisième étape.

Ce sont des corps dont l'utilisation correspond à la création d'une mousse et qui, de ce fait, permettent la séparation des particules hydrophobes et hydrophiles.

— Solubilité de quelques moussants dans l'eau  
(d'après R. B. Booth et W. L. Freyberger, 1964)

Moussant	Solubilité en g pour 100 g de solution	Température en °C
n-pentanol	21,9	25
Alcool isoamylique	26,7	25
n-hexanol	6,24	25
Alcool méthylamylique	17,0 [3]	20
n-heptanol	4,8	25
n-heptanol-3	4,5	20
n-octanol	0,586	20
Alcool caprylique (octanol-2)	1,28	25
Huile de pin	2,50 [5]	25
α-terpinéol	1,98 [5]	15-20
Bornéol	0,74	25
Acide crésylique	1,65	20
1, 1, 3 triéthoxybutane	8 [7]	20
Polypropylène glycol [poids mol. : 400 à 500]	totale	20

(\*) Solubilité en g/100 d'eau.



NATURE CHIMIQUE DES MOUSSANTS

Les résultats de l'expérience témoignent des propriétés moussantes d'une grande quantité de substances présentant des groupes polaires extrêmement variés qui peuvent être des groupes :

hydroxyle OH	amine — NH <sub>2</sub>
carboxyle — C(=O)OH	sulfate — OSO <sub>3</sub> OH
carbonyle = C=O	

La flottation c'est qu'on récupère les minéraux utiles sous forme de mousse à la surface de la pulpe.

### 3). Les activant et les déprimants

Certains produits chimiques dits encore modificateurs sont appelés activant lorsque une fois ajoutés dans une pulpe rend la surface d'un certain nombre de constituants plus aptes à l'adsorption d'un collecteur. A titre d'exemple, il se trouve que la blende (ZnS) est difficilement flottée par éthylxanthate et son activation se produit par le sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ), il se forme à la surface de la blende une couche très mince de sulfure de cuivre qui est très apte à subir l'action de l'éthylxanthate.

Les dépresseurs ou déprimants sont des modificateurs dont le rôle est inverse à celui des activateurs. Les déprimants agissent sur la surface d'un solide en la rendant inapte à subir l'action d'un collecteur. Les déprimants permettent d'obtenir ou de réaliser une flottation sélective ou différentielle dans le cas d'un mélange de plusieurs espèces minérales différentes ayant des propriétés chimiques identiques ou voisines.

C'est ainsi que la galène et la blende qui sont tous les deux flottés par xanthates se trouvent séparer par flottation sélective en ajoutant un déprimant tel que le sulfate de zinc ( $\text{ZnSO}_4$ ) ou bien cyanure de sodium ( $\text{NaCN}$ ) qui agit uniquement sur la blende.

Les principaux déprimants utilisés industriellement sont les sels des métaux comme  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ .

Remarque. Il ne faut jamais déprimer la galène car une fois déprimée on ne peut plus l'activer. La dépression de la galène est difficile à obtenir car c'est un sulfure de minéraux lourds, pour le déprimer, il faut employer des oxydants forts tels que le bichromate de potassium ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ).

### B) Flottation de deux sulfures (PbS et ZnS)

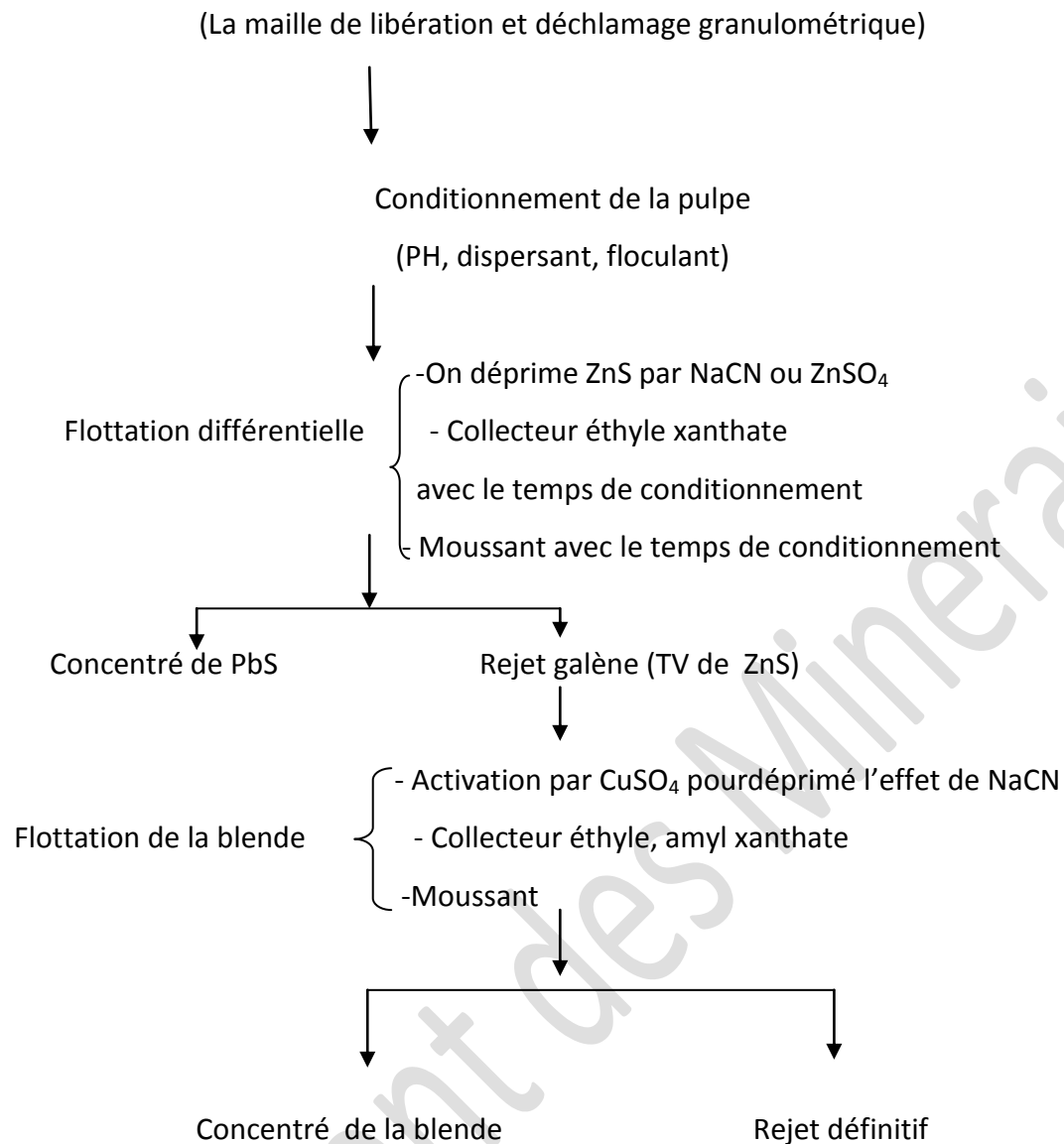
1) vérification de pH.

2) les dispersants : c'est de séparer les espèces minérales de la gangue.

3) Attaque des espèces minérales.

**Flottation globale:** consiste à récupérer tous les espèces minérales au même temps. Il faut qu'on sache le minerai qui a la grande teneur. Si c'était le PbS, on ajoute l'éthyle xanthate ( $\text{R} = \text{C}_2\text{H}_5$ ), si c'était ZnS on ajoute amyle xanthate ( $\text{R} = \text{C}_5\text{H}_{11}$ ) ou les deux au même temps





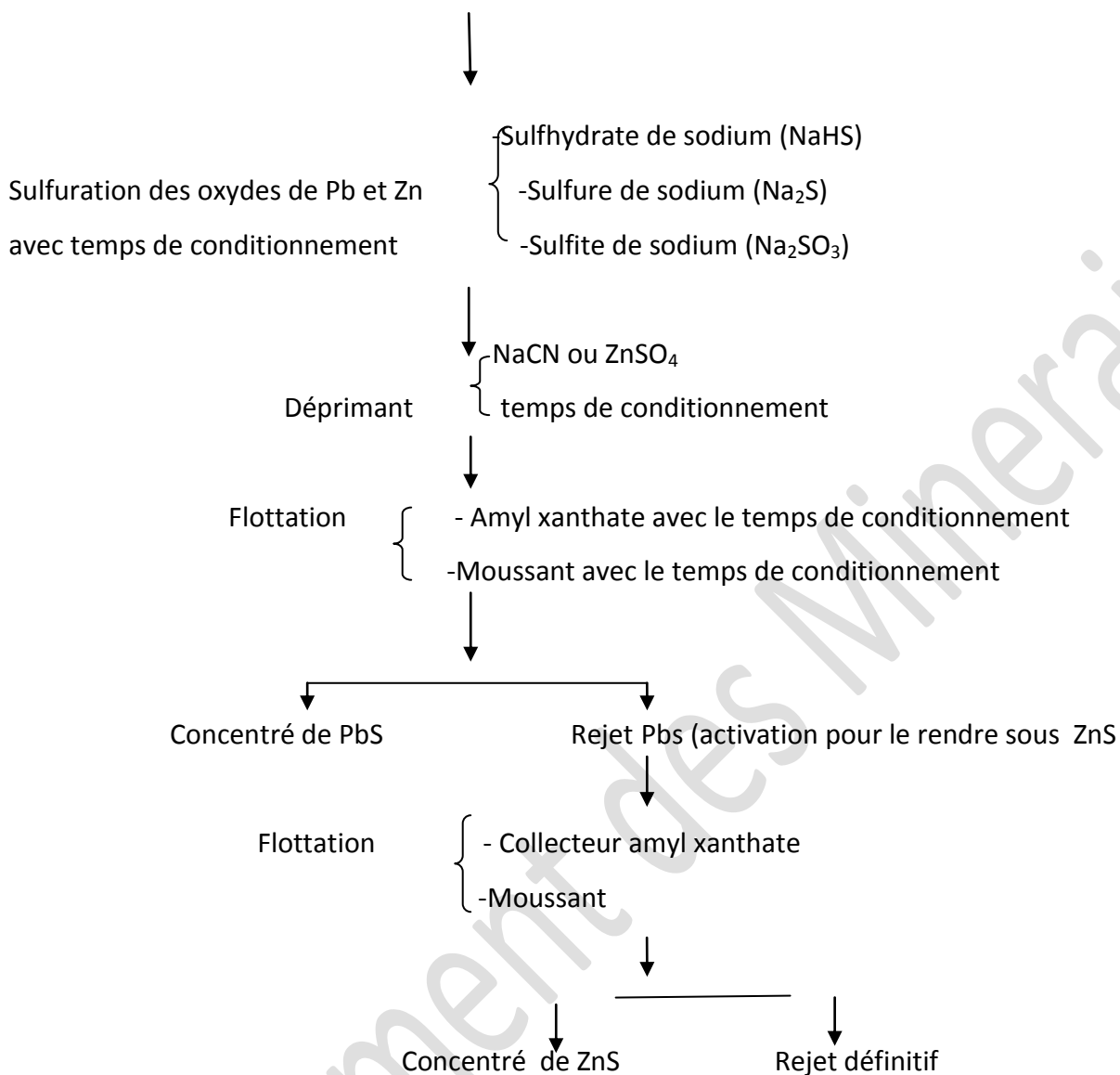
## B) Flottation de deux oxydes (oxyde de Plombe et oxyde de Zinc)

Dans ce cas de minerai les deux oxydes sont très hydrophiles, donc on ajoute d'autres réactifs qui servent pour la sulfuration à savoir le sulfhydrate de sodium (NaHS), sulfure de sodium (Na<sub>2</sub>S) et sulfite de sodium Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>.



TV préparation mécanique

(La maille de libération et déchlamage granulométrique)



## IV Hydrométallurgie

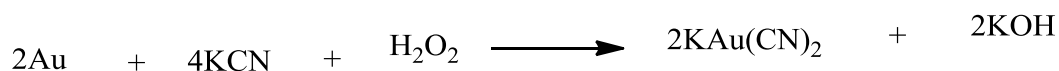
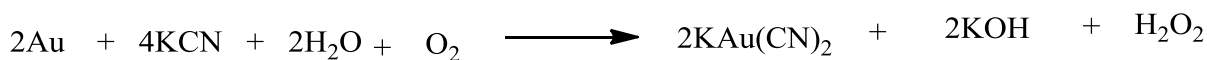
### IV.1 Introduction

C'est un procédé de traitement des métaux par voie liquide, d'où le nom d'hydrométallurgie. Elle consiste à mettre en solution les différents métaux contenus dans un minerai ou un concentré afin de les séparer. Cette technique est utilisée dans le traitement des métaux précieux tel que l'or, l'argent, l'uranium ainsi d'autres minéraux tel que le cuivre, tungstène...

Elle est basée sur la dissolution (lixiviation).

### IV.2 Chimie de la mise en solution des métaux précieux par le cyanure

Plusieurs équations chimiques ont été proposées pour rendre compte de la dissolution de l'or les équations suivantes :



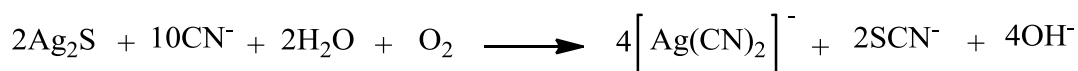
La dissolution de l'or et de l'argent est une action très lente lorsque l'on ne se trouve pas en présence d'oxygène suivant (B. Bopnstra (1943))

Le mécanisme de la dissolution des métaux dans le cyanure est mal connu. Des études de cinétique montrent que la vitesse de dissolution est:

- ✓ fonction de la surface spécifique du métal ;
- ✓ fonction de l'agitation ;
- ✓ fonction de la température

### IV.3 Dissolution des sulfures d'argent par le cyanure

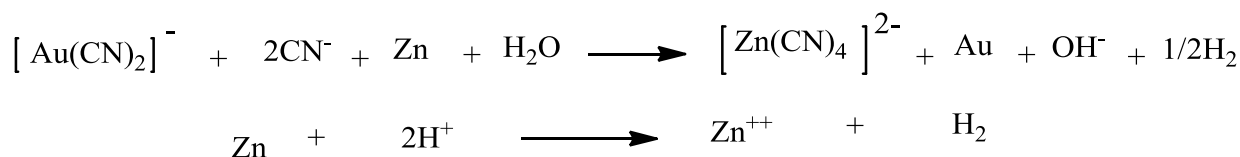
L'argentite (l'argentite est le minerai principal des gisements d'argent) se dissoudrait suivant la réaction :



Expérimentalement, on observe que la vitesse de dissolution est proportionnelle à la concentration en cyanure de la solution et à la pression de l'oxygène.

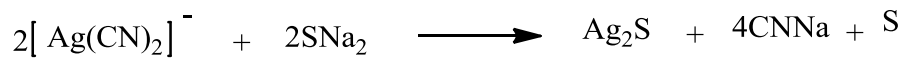
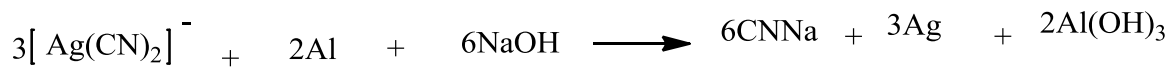
### IV.4 Reprécipitation et récupération des métaux précieux à partir des jus d'attaque

Selon Mac Farren, le zinc précipite l'or à partir du complexe cyanuré suivant l'équation ci dessous avec production d'hydrogène, cet hydrogène entraine une dissolution du zinc.



La quantité de zinc nécessaire est de l'ordre de 100g pour la production d'un gramme d'or.

Alors que le zinc l'aluminium et le sulfure de sodium précipitent l'argent sous forme de complexes cyanurés, suivant les réactions:



Remarque : il faut noter que le complexe cyanuré de zinc a une action sur l'argentite ( $Ag_2S$ ) et permet le passage de l'argent en solution avec précipitation de sulfure de zinc.

Comme on peut aussi récupérer l'or et l'argent cyanuré par des résines échangeuses. Le complexe contenant le métal est fixé sur la résine et il faut mètre en considération le PH de la résine.

### ***Amalgamation:***

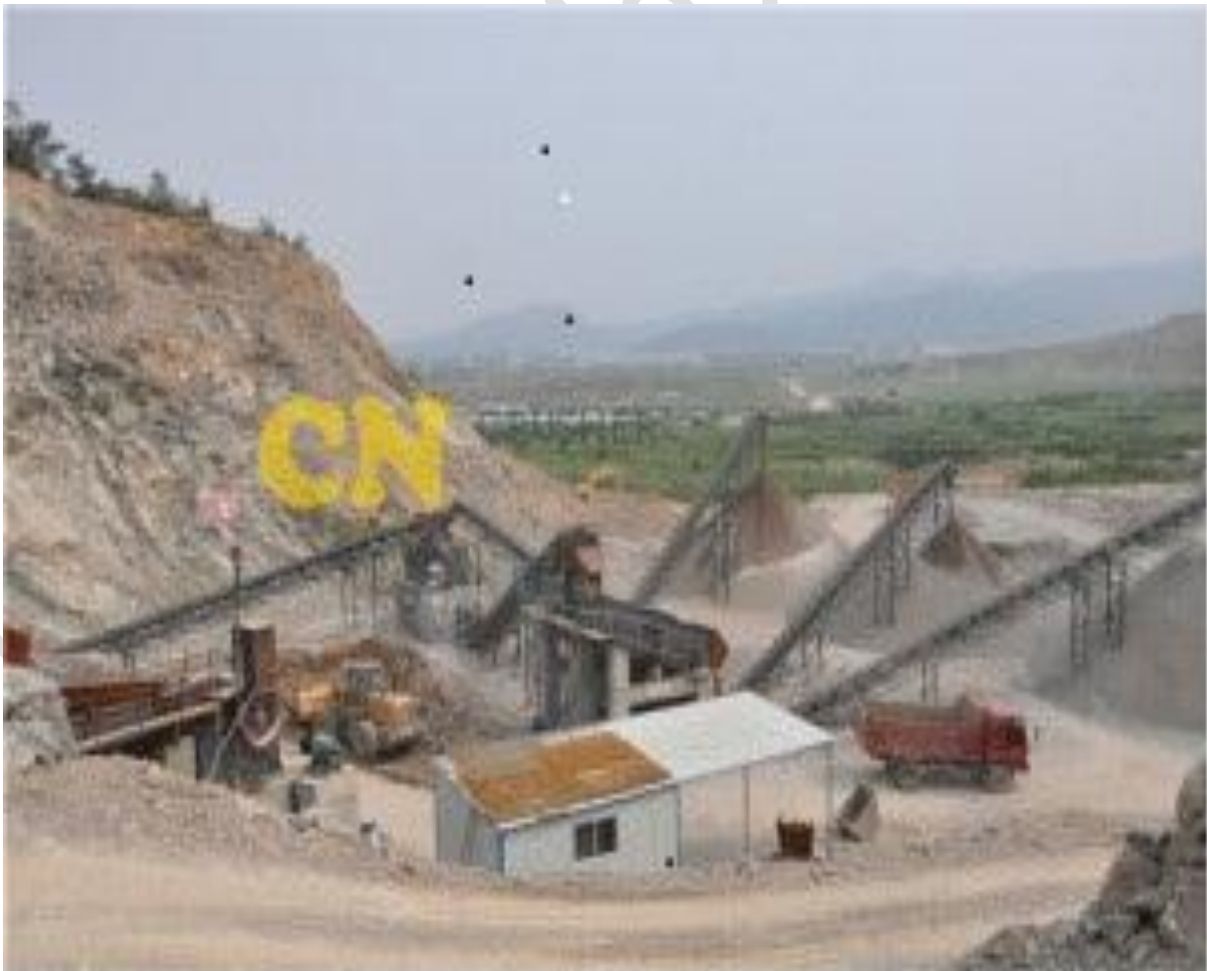
L'amalgamation consiste à exploiter industriellement la formation d'alliages entre le mercure et les métaux. Pour l'or et le mercure, il existe une série d'alliages allant d' $AuHg_2$  à  $Au_8Hg$ . Le mercure peut être particulièrement extrait de l'amalgame par pression et presque totalement par distillation.

Dans les installations modernes, l'amalgamation est exclusivement limitée à la récupération de l'or libre quand la minéralisation est grossière avec une concentration en solide de la pulpe ne doit pas excéder 20%. Mais le procédé est en régression par suites d'amalgame inhérente à la technique employée (fixation d'amalgame sur les parois du broyeur). Ainsi le mercure doit être dispensé d'impureté (manganèse, sulfate de fer, arséniures, antimoniures, tellurures, argile, huile ou graisse).

Traiter









Traitement des Minerais