

## II-ANALYSE GRANULOMETRIQUE

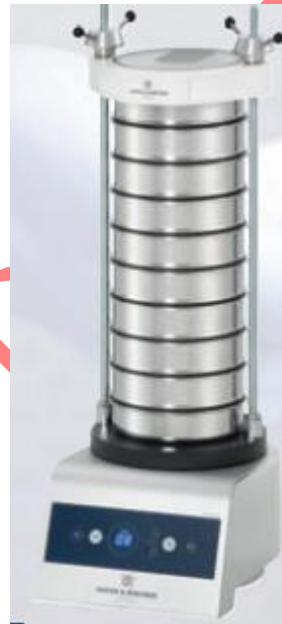
L'importance de la taille et de la répartition dans les phénomènes de fluidisation : amené l'utilisateur à contrôler la granulométrie du produit, généralement on définit la taille des particules par le diamètre, pour les grains non sphériques le diamètre est approximativement qui sera liée à la méthode de la mesure.

### II.1- METHODES DIRECTES :

- **Pied à coulisse.**



- **Tamisage.**



### II.2- METHODES INDIRECTES :

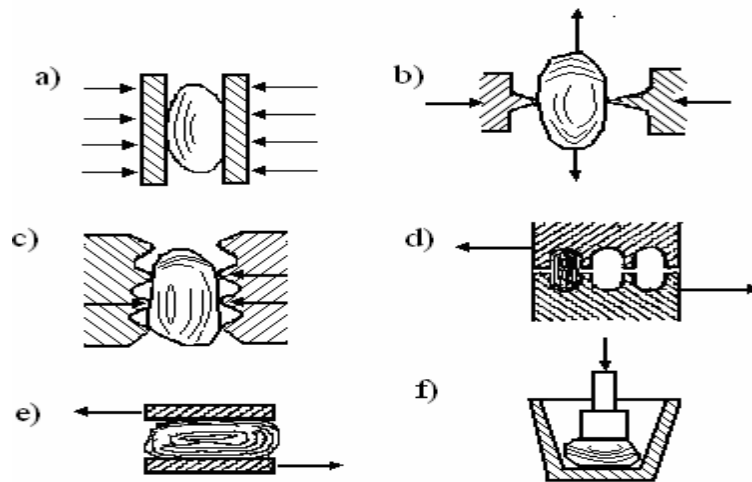
- ✓ **Filtration:** Cette méthode pour les particules de diamètre entre 1- 50 $\mu$ m.
- ✓ **Centrifugation:** Pour les particules de  $\varnothing$  0.5 $\mu$ m ou encore ultracentrifugation pour les particules de 0.01 $\mu$ m de diamètre.
- ✓ **Spectroscopie acoustique (ultrasonique):** Cette méthode est utilisée pour la mesure de la taille des particules dans les systèmes concentrés.

## II.3 BROYAGE :

### III.3.1. DEFINITION :

Le broyage c'est le concassage, il permet la libération des grains de matériaux pour l'obtention d'une composition granulométrique nécessaire des particules (roches) (fragmentation). Dans ce procédé la destruction des matériaux est réalisée par les forces extérieures mécaniques. Certain réductions peuvent être amélioré par l'élévation de  $T^\circ$  à titre d'exemple : Les produits humides sont fragmentés mieux par l'effet d'introduire un gaz chaud qui permettra le séchage des particules solides, donc fragmentation plus facile.

Les différentes méthodes de concassage sont: écrasement, spallation, cassure, coupe, trituration, choc



#### Méthodes de destruction des roches:

a) écrasement; b) spallation; c) cassure; d) coupe; e) trituration; f) choc.

Suivant les dimensions maximales des morceaux à concasser et à broyer, on distingue les stades suivants de la destruction des roches:

1. Concassage grossier (primaire): de 1200-500 à 350-100 mm;
2. Concassage secondaire (intermédiaire): de 350-100 à 100-40 mm;
3. Concassage fin: de 100-40 à 30-10 mm;
4. Broyage préalable: de 30-10 à 6-2 mm;
5. Broyage fin: de 6-2 à 1-0,5 mm;
6. Broyage surfin: de 1-0,5 à 0,1-0.005 mm.

### II.3.2. ENERGIE DE BROYAGE :

L'énergie généralement utilisées est très importante, elle varie selon la nouvelle surface à obtenir. Nous pouvons donner à titre d'exemple:

- a-  $\varnothing$  de 1m  $\rightarrow$  100 mm ;  $0.25 < \text{énergie} < 1 \text{ kWh/t}$ .
- b-  $\varnothing$  de 100mm  $\rightarrow$  10 mm ;  $0.5 < \text{énergie} < 2 \text{ kWh/t}$ .
- c-  $\varnothing$  de 10mm  $\rightarrow$  1mm ;  $1 < \text{énergie} < 5 \text{ kWh/t}$ .
- d-  $\varnothing$  de 1mm  $\rightarrow$  0.1 mm ;  $5 < \text{énergie} < 30 \text{ kWh/t}$ .
- e-  $\varnothing$  de 0.1mm  $\rightarrow$  10 $\mu$ m ;  $20 < \text{énergie} < 100 \text{ kWh/t}$ .
- f-  $\varnothing$  de 10 $\mu$ m  $\rightarrow$  1 $\mu$ m ;  $100 < \text{énergie} < 1000 \text{ kWh/t}$ .
- g-  $\varnothing < 1\mu\text{m}$ . énergie  $< 1000 \text{ kWh/t}$ .

Plusieurs lois ont été proposées pour estimer l'énergie nécessaire dans une opération de broyage.

### II.3.3. CLASSIFICATION DES EQUIPEMENTS SELON LA REDUCTION DE TAILLE :

La classification des équipements selon la réduction de taille (charge ou produit) est donnée dans le tableau suivant :

Tableau II.1

Type	Taille de la charge	Taille du produit
Broyage Grossier	1500 ÷ 40 mm	50 ÷ 5 mm
Broyage Intermédiaire	50 ÷ 5 mm	5 ÷ 0.1 mm
Broyage Fin	5 ÷ 2 mm	0.1 mm et moins

**II.3.4. Relation de RITTINGER :**

L'énergie nécessaire pour broyer une particule (grain) est:

$$E = K_R \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) \text{ en [J/Kg]}$$

Avec :  $d_1$  : diamètre initial de la particule (grain).  
 $d_2$  : diamètre final de la particule (grain).  
 $K_R$  : la constante de Rittinger en [ $\text{m}^4/\text{Kg}$ ].

**II.3.5. Relation de KICK :**

L'énergie nécessaire pour broyer une particule (grain) est donnée par :

$$E = K_K \ln \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \text{ en [J/Kg]}$$

Avec :  $d_1$  : diamètre initial de la particule (grain).  
 $d_2$  : diamètre final de la particule (grain).  
 $K_K$  : la constante de Kick en [ $\text{m}^3/\text{Kg}$ ].

**II.3.6. Relation de Bond :**

L'énergie nécessaire pour faire broyage un matériau est:

$$E = 2 \cdot C \left( \frac{1}{d_2^{1/2}} - \frac{1}{d_1^{1/2}} \right) \text{ en [J/Kg]}$$

Avec :  $d_1$  : diamètre initial de la particule (grain).  
 $d_2$  : diamètre final de la particule (grain).  
 $C$  : une constante.

**Application:**

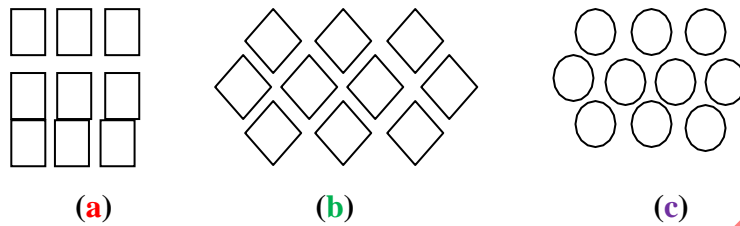
Un matériau est broyé de telle manière que le diamètre moyen est réduit de **50 à 10 mm** avec consommation d'énergie de **13 kW/(Kg/s)** en utilisant la loi de Rittinger :

Déterminer la consommation de l'énergie nécessaire pour broyer le même matériau de diamètre moyen **75 mm** à un diamètre de **25 mm**.

## II.4. CRIBLAGE ET TAMISAGE

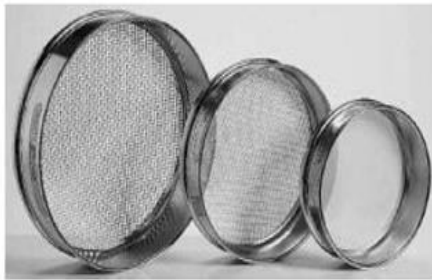
### II.4.1. CRIBLAGE

Les procédés de séparation d'un matériau composé de mélange des morceaux ou particules de différentes dimensions en classes de grosseur s'appellent criblage et classification. Donc, le criblage est une opération de classement dimensionnel de grains de matières, sur une surface tamisante.

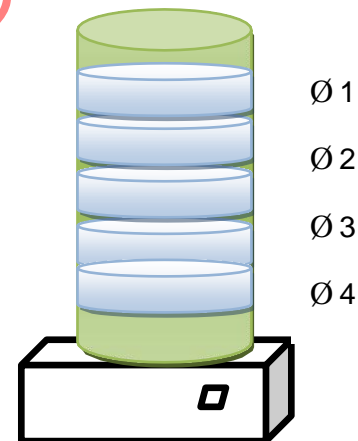


**Surfaces tamisantes:** **a:** trous carrés; **b:** trous carrés en diagonale; **c:** trous ronds;

### II.4.2. TAMISAGE :



Tamis



Tamisseus

Bien que cette méthode soit l'une des plus anciennes et aussi l'une des plus largement utilisées, elle permet de séparer les particules en catégorie d'après leur taille sans tenir compte de ces propriétés (nature du matériau). L'opération consiste à placer un échantillon de poudre sur un tamis à des ouvertures de taille déterminée.

$$d_{eq} = \left( \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)$$

Avec :  $\phi_2 < d_{eq} < \phi_1$

$\phi_1, \phi_2$  ouvertures des tamis successifs.

Toutes les opérations de tamisage sont influencées par les facteurs suivants:

- 1- Forme des ouvertures;
- 2- Chargement des tamis;
- 3- Méthode et vitesse d'agitation ou de vibration;
- 4- Durée de l'opération;
- 5- Forme des particules.

### II.4.3. EFFICACITE D'UN TAMISAGE

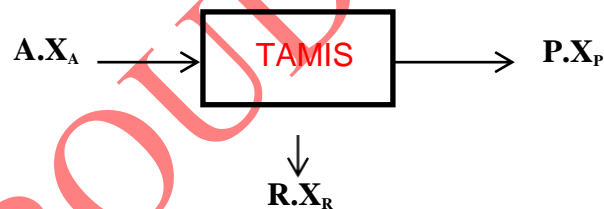
L'efficacité d'un tamisage industriel est la mesure de succès du tamis à séparer le matériau, donc on peut définir l'efficacité comme étant le produit de deux fractions celle du matériau désiré obtenu avec celle du matériau non désiré obtenue et éliminé.

$$E_T = X_{mdo} \cdot X_{mndo}$$

Avec : **mdo** : matériau désiré obtenu.

**mndo** : matériau non désiré obtenu.

Soit l'exemple suivant:



$X_A$  : fraction massique du matériau désiré obtenu dans l'alimentation A.

$X_P$  : fraction massique du matériau désiré obtenu dans le produit P.

$X_R$  : fraction massique du matériau désiré obtenu dans le rejet R.

Le bilan massique:  $A = P + R$

$$AX_A = PX_P + RX_R$$

On a :  $R = A - P$  et  $P = A - R$ .

- $X_{mdo} = ?$

$$AX_A = PX_P + (A-P)X_R$$

$$A(X_A - X_R) = P(X_P - X_R)$$

$$\Rightarrow \frac{P}{A} = \frac{X_A - X_R}{X_P - X_R}$$

On obtient donc pour  $X_{mdo}$  :

$$X_{mdo} = \frac{P \cdot X_A}{A \cdot X_A} = \frac{(X_A - X_R) \cdot X_P}{(X_P - X_R) \cdot X_A}$$

- $X_{mndo} = ?$

$$AX_A = (A-R) X_P + RX_R$$

$$A (X_A - X_P) = R (X_R - X_P)$$

$$\Rightarrow \frac{R}{A} = \frac{X_A - X_P}{X_R - X_P}$$

D'ou:

$$X_{mndo} = \frac{R \cdot (1 - X_R)}{A \cdot (1 - X_A)} = \frac{(X_A - X_P) \cdot (1 - X_R)}{(X_R - X_P) \cdot (1 - X_A)}$$

Alors :

$$E_T = X_{mdo} \cdot X_{mndo} = \frac{(X_A - X_R) \cdot X_P}{(X_P - X_R) \cdot X_A} \times \frac{(X_A - X_P) \cdot (1 - X_R)}{(X_R - X_P) \cdot (1 - X_A)}$$

En fin :

$$E_T = \frac{(X_A - X_R) \cdot X_P \cdot (X_P - X_A) \cdot (1 - X_R)}{(X_P - X_R)^2 \cdot X_A \cdot (1 - X_A)}$$

**Remarque:**  $E_T$  décroît si le tamis est fait trop rapidement ou encore trop lent, et si le matériau est humide.

#### II.4.4. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS :

Les résultats obtenues par tamisage peuvent être présenté sur différents diagrammes, ou en portant en abaisse la limite de la classe considérée et on ordonnée le % en masse ou en nombre des individus de la classe considérée dans l'échantillon.

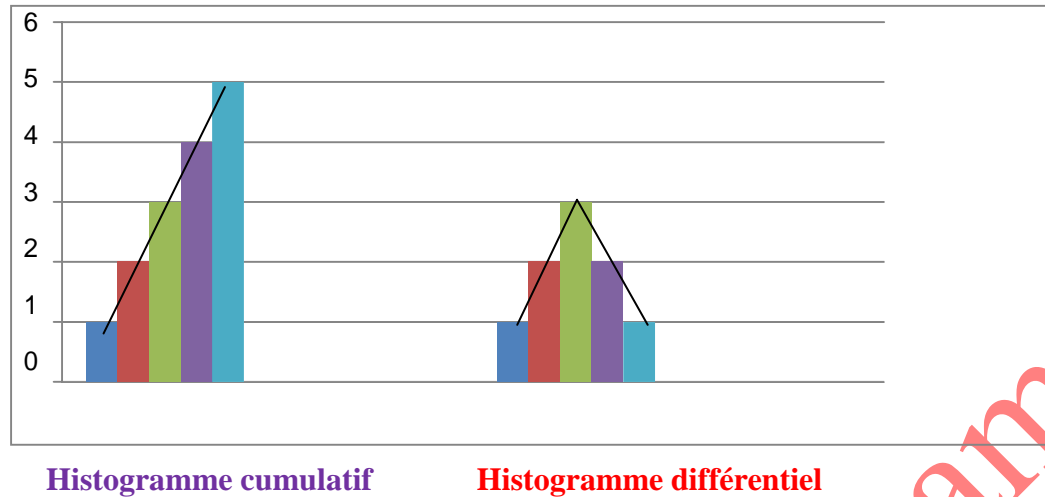


Figure II.7. Diagramme des pourcentages commutatifs et différentiel

On a :  $\emptyset_1 > \emptyset_2 > \emptyset_3 > \emptyset_4 > \emptyset_5$  et  $m_T = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5$ .

Les méthodes qui on vient de voir peuvent calculer le diamètre moyen de l'échantillon soit à la masse globale pour chaque classe des particules, ou bien au nombre des particules dans chaque classe.

$$\overline{d_m} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^N m_i}$$

Avec :

$d_i$  :  $\emptyset$  moyen pour la classe  $i$  des particules.

$m_i$  : Poids des particules de la classe  $i$  des particules.

$\overline{d_m}$  :  $\emptyset$  moyen de l'échantillon.

$$\overline{d_n} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

Avec:

$d_i$  :  $\emptyset$  moyen pour la classe  $i$  des particules.

$n_i$  : nombre des particules.

$\overline{d_n}$  :  $\emptyset$  moyen de l'échantillon.



**Application :**

La perte de charge à travers un lit de particules peut être utilisée pour déterminer la surface spécifique des grains. La mesure expérimentale de cette perte de charge à travers un lit de **80 cm** de diamètre, constitué de grains de sable non sphériques à donné  $\Delta P=26400 \text{ Pa}$ , lorsqu'on fait passer un courant d'air ayant un débit volumique de **3.925 L/s**.

Les résultats de tamisage d'un échantillon de **300 g** de sable sont les suivant :

Taille d'ouverture des tamis ( $\mu\text{m}$ )	315	250	200	160	125	100	80	63	50	40	32	Fond
Masse retenue (g)	Néant	12.04	19.50	28.50	43.57	43.44	45.00	38.97	28.48	19.48	21.02	Néant

1- En utilisant les résultats de tamisage d'un échantillon de ce sable, calculer le diamètre moyen en surface,  $\overline{d_A}$ . (Avec : A=surface de la particule).

2- En suppose que le facteur de sphéricité ( $\psi_v$ ) est le même pour toutes les particules, démontrer la relation suivante :

$$a_p = \frac{6}{\Psi_v \cdot \overline{d_A}} \quad (\text{Avec : } a_p = \text{Surface spécifique de la particule}).$$

3- En supposant le régime laminaire, Déterminer la surface spécifique ( $a_p$ ) de ces particules.

4- En déduire le facteur de sphéricité ( $\psi_v$ ).

5- Vérifier votre supposition, concernant l'hypothèse d'un régime laminaire.

**Les données :**

$$h_{K-C} = 4.5 \quad ; \mu_F = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Poiseuille} \quad ; \varepsilon = 0.35 \quad ; \rho_F = 1.29 \text{ g/l} \quad ; \text{Hauteur de lit } H = 80 \text{ cm}$$

$h_{K-C}$  : Constante de modèle Kozeny – Carman

$\varepsilon$  : Porosité de lit