

# Cours Milieux poreux et dispersés

Master 2 Génie des matériaux

Année universitaire 2022/2023

Réalisé par S. TOUZOUIRT

Chapitre 1 : Milieux poreux

Chapitre 2 : Broyage et fragmentation

Chapitre 3 : Ecoulement des fluides à travers un milieu poreux

Chapitre 4. Mouvement des grains dans les fluides

Chapitre 5. Sédimentation et Fluidisation

## 1. Milieu poreux

### 1.1. Définition

On désigne, usuellement par un milieu poreux, un solide dit matrice d'une certaine forme contenant des vides appelés pores. Ces vides peuvent être reliés ou non les uns aux autres. Une ou plusieurs phases fluides s'écoulent à l'intérieur et peuvent échanger, avec la matrice solide, de la matière et /ou de l'énergie. [1] [2]

### 1.2. Type des milieux poreux

Les milieux poreux sont de très vaste variété et de nature. Leur classification se fait selon : [1]

- ✓ la matrice solide : Selon la matrice solide, on distingue :
  - La matrice consolidée : Les particules de la phase solide sont très compactes, difficiles à diviser.



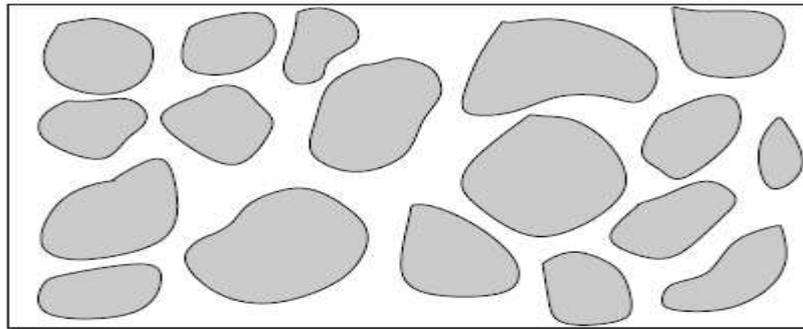
**Figure 1** : structure consolidée

- Matrice granulaire (non consolidée) : Dans ce cas, la matrice n'est formée que de grains ou particules non soudées entre elles (graviers, sable, etc.)



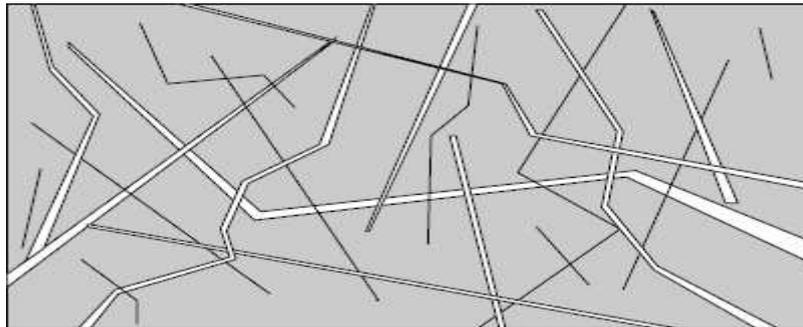
**Figure 2** : structure non consolidée

- ✓ Les pores : Selon les pores, on distingue :
  - Porosité d'interstice : La porosité d'interstice représente les vides autour des particules solides plus ou moins liés les uns aux autres.



**Figure 3 : porosité d'interstice**

- Porosité à fissure : La porosité à fissure correspond à des fractures (fissures) dans la matrice.



**Figure 4 : porosité à fissure**

**Remarque :** En général, ces deux types de porosité peuvent cohabiter comme dans les roches par exemple.

### 1.3. Porosité :

La Porosité est définie comme étant le rapport du volume des pores d'un milieu poreux sur son volume total :

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_T}$$

$V_T$  est le volume total d'un matériau poreux, il est constitué de la somme du volume des solides et du volume des pores (ou vides) présents dans le volume total du matériau :

$$V_T = V_V + V_S$$

$\varepsilon$  : varie donc entre 0 (solide plein) et 1 (volume complètement vide)

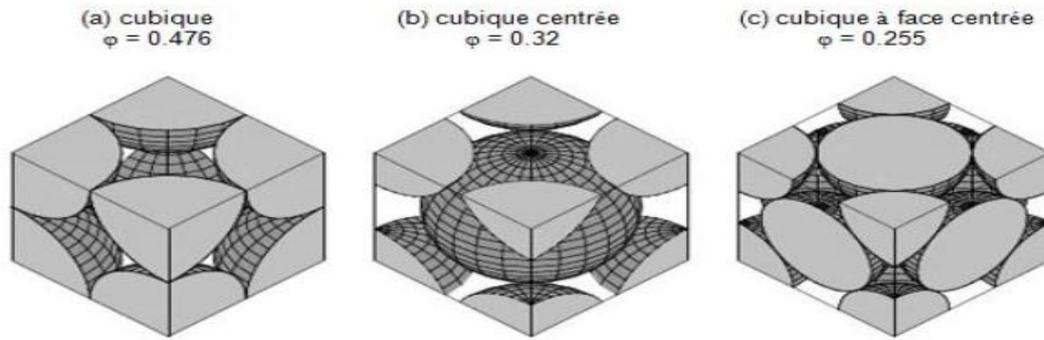
Un autre paramètre caractérisant la proportion des pores dans un matériau poreux est l'indice du vide  $e$ . Il est défini par le rapport du volume des vides sur celui des solides :

$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

Le lien entre la porosité et l'indice du vide est exprimé par :

$$\varepsilon = \frac{e}{e + 1}$$

La porosité dépend fortement de l'arrangement et de la taille des grains (Figure 5)[2]



**Figure 5 :** Arrangement réguliers de sphères de même diamètre avec la porosité associée.

Par ailleurs, on définit une porosité effective, ou porosité libre en relation avec la définition de l'eau libre par le rapport du volume d'eau ( $V_g$ ) que peut libérer le milieu poreux sous l'action des seules forces de gravité au volume total ( $V_t$ )

$$\varepsilon_e = \frac{V_g}{V_t}$$

$\varepsilon_e$ : Porosité effective

$V_g$ : Volume gravitaire du fluide qui s'écoule

$V_t$ : Volume totale

## 2. Morphologie d'un grain ou particule

Pour caractériser un milieu poreux, on doit tout d'abord définir un Volume Élémentaire Représentatif (VER) [4].

La taille d'un cube ou d'une sphère est donnée par un seul paramètre : la longueur d'arête ou le diamètre. La taille d'un cylindre est donnée par deux paramètres qui sont le diamètre de section et la longueur. En fait le nombre de paramètres nécessaires à la description de la taille d'un objet augmente avec la complexité de forme de celui-ci.

### 2.1. Définition de différents diamètres équivalents

On raisonne souvent en termes de diamètre équivalent des particules, en considérant un objet de forme simple qui aurait une même propriété que la particule elle-même : même surface ou même volume, par exemple.

On appelle « diamètre équivalent » le diamètre de la sphère qui se comporterait de manière identique lors de l'opération d'analyse granulométrique choisie.

On distingue trois groupes de diamètres équivalents : diamètres de sphère équivalente, diamètres de cercle équivalent et diamètres statistiques.

#### *Les diamètres de sphère équivalente*

	Nom	Propriété équivalente de la sphère	Expression
$d_v$	Diamètre en volume	Volume	$V = \frac{\pi}{6} d_v^3$
$d_s$	Diamètre en surface	Surface	$S = \pi d_s^2$
$d_{sv}$	Diamètre en surface	Surface/volume	$d_{sv} = d_v^3 / d_s^2$

	spécifique		
$d_d$	Diamètre de poussée	Résistance au déplacement dans le même fluide, à même vitesse (régime de Stokes)	$F_d=3\pi d_d \mu u$
$d_f$	Diamètre de chute	Vitesse de chute libre dans le même liquide et pour un grain de même masse volumique	$u_T=(\rho_s-\rho_l)gd_{stk}^2/18\mu$
$d_{stk}$	Diamètre de Stokes	Vitesse de chute libre suivant la loi de Stokes ( $R_{et}<0,2$ ) avec $R_{et}=\rho_l u_T d/\mu$	$d_{stk}=\sqrt{\frac{d_V^3}{d_d}}$

### Les diamètres de cercle équivalent

	Nom	Propriété équivalente du cercle	Expression
$d_a$	Diamètre de surface projetée	Surface projetée, particule stable	$A=\pi d_a^2/4$
$d_p$	Diamètre de surface projetée	Surface projetée, particule en position aléatoire	$S=\pi d_a^2$
$d_c$	Diamètre en périmètre	Périmètre extérieur	$P=\pi d_c$

### Les diamètres statistiques

	Nom	Dimension mesurée
$d_F$	Diamètre de Feret	Distance entre deux tangentes sur des côtés opposés de la particule
$d_M$	Diamètre de Martin	Longueur moyenne de corde sur la surface projetée de la particule

## 2.2. Facteurs de sphéricité :

La notion de sphère équivalente (ou cercle) qui permet de représenter des particules de formes quelconques par une seule valeur, est très utilisée mais cette pratique est dans certains cas beaucoup trop réductrice. Pour les particules de formes très irrégulières impliquées dans des procédés où la forme joue un rôle important, il est nécessaire d'affiner la description granulométrique et de décrire le grain non plus à l'aide d'un paramètre unique, mais en lui adjoignant des paramètres supplémentaires qui tentent de quantifier dans quelle mesure l'objet étudié s'éloigne de la sphère modèle : ce sont les facteurs de forme.

$$\Psi_V = \frac{\text{surface de la sphère de même volume que la particule}}{\text{surface de la particule}}$$

$$\Psi_S = \frac{\text{volume de la sphère de même surface que la particule}}{\text{volume de la particule}}$$

$$\Psi_a = \frac{\text{surface de la sphère de même surface spécifique que la particule}}{\text{surface de la particule}}$$

## 3. Analyse granulométrique

### 3.1. Définition

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon de granulats, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...).

Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres. Cependant, pour un granulat donné, tous les grains qui le constituent n'ont pas tous la même dimension.

## 3.2.Méthodes de mesure

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'analyse granulométrique des particules selon les tailles :

1. Tamisage : supérieur à 80  $\mu\text{m}$
2. Sédimentométrie : 1  $\mu\text{m}$  à 80  $\mu\text{m}$
3. Centrifugation analytique: 0,01  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$
4. Diffraction laser : 0,01  $\mu\text{m}$  à 3 mm
5. Microscopie : 50  $\mu\text{m}$  à 1 mm
6. Potentiel Zêta : 3 nm à 10  $\mu\text{m}$

### 3.2.1. Tamisage

C'est la méthode la plus ancienne et encore très largement utilisée car la plus économique. Elle consiste à mesurer le poids de matière qui passe au travers des mailles calibrées d'une toile de tamis. On superpose les tamis par maille décroissante et l'on mesure le poids de matière retenue sur chaque tamis. Cette opération peut se réaliser à sec, et en faisant vibrer l'ensemble de la colonne de tamis, pour des grains de taille relativement importante. Lorsque la population des grains comporte quelques éléments très fins, on associe une dépression d'air.

### 3.2.2. Sédimentation

La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules selon la loi de Stokes. C'est une loi liant la vitesse de chute d'une sphère dans un liquide par l'action de la gravité. Cette loi est utilisée pour calculer la vitesse de sédimentation, mesurer les viscosités des liquides, et analyser les particules en suspension.

$$v = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot \Delta\gamma}{9\mu}$$

- $v$  : vitesse de sédimentation (m/s) ;  $g$  : accélération de la pesanteur ( $\text{m/s}^2$ )
- $\Delta\gamma$  : différence de masse volumique entre les particules et le fluide ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  : viscosité (Pa s) ;  $r$  : rayon de la sphère (m)

### 3.2.3. Centrifugation analytique

Le principe de la centrifugation est identique à celui de la sédimentation, on utilise le fractionnement des particules ou gouttelettes dispersées dans un liquide porteur (phase continue) selon leurs différences de taille et de densité comme le décrit la loi de Stokes. Ici la valeur de  $g$  est variable et est calculée à partir de la vitesse angulaire de centrifugation, la masse de l'échantillon et la distance par rapport au centre de rotation. Cette technique est séparative, la centrifugation permet le fractionnement des particules et un dispositif optique permet de quantifier les différentes fractions. Chaque fraction séparée peut être analysée indépendamment des autres populations présentes dans l'échantillon.

### 3.2.4. Diffraction laser

Le granulomètre laser est basé sur le principe de la diffraction de la lumière. Les particules en suspension (dans l'eau ou dans un courant d'air) diffractent la lumière émise par un faisceau laser. La répartition spatiale de cette lumière, fonction de la taille des particules, est enregistrée par un

ensemble de photodiodes. L'analyse de cette distribution dans le plan focal permet de déterminer la proportion de chaque classe dimensionnelle.

### 3.2.5. Analyse d'image

Dans cette méthode, on réalise une photographie des grains à partir d'un microscope. L'image obtenue est analysée au moyen d'un logiciel spécialisé. Ce dernier procède au comptage et au dimensionnement (nombre de pixels) de chacune des particules, puis associe à chacune une ellipse (ou un carré, un losange, etc.) qui définit la forme générale du grain. On obtient ainsi une description numérique et géométrique de l'ensemble granulaire qui permet d'établir des distributions en nombre, en surface et en forme (granulomorphie). L'analyse d'image permet également de déterminer la couleur des grains, ce qui permet d'établir des courbes différenciées selon la nature des grains.

### 3.2.6. Compteurs de particules

Cet appareil permet de connaître le nombre et la taille des particules mises en suspension dans un liquide conducteur adéquat (électrolyte). Un système spécial assure la circulation de la suspension par un orifice, il se produit une modification de la résistance électrique du milieu qui entraîne une variation d'intensité du courant électrique entre les deux électrodes. Chaque impulsion est comptée électroniquement et son amplitude dépend de la taille de la particule.

### 3.3.Représentation des distributions granulométriques

Le mode de représentation, le plus classique et le plus fréquent, des distributions granulométriques est le diagramme semi-log. Les tailles sont représentées sur l'axe des abscisses en échelle logarithmique de base 10 (en général en  $\mu\text{m}$ ) et les ordonnées en échelle arithmétiques de 0 à 100 %.

On rencontre parfois des représentations log-normale (abscisses en lg et ordonnées en distribution normale gaussienne).

Une poudre (ou milieu granulaire, milieu divisé) contient un très grand nombre d'entités, si l'on considère par exemple un réacteur de plusieurs mètres cubes rempli d'une poudre fine. Les particules qui la constituent ont rarement toutes la même taille, ce qui complique considérablement leur caractérisation granulométrique et amène à définir des valeurs numériques représentatives.

### Chapitre 2. Broyage et fragmentation

#### Introduction

La fragmentation, dont le nom désigne un processus par lequel un objet est divisé en un grand nombre de petits morceaux, elle s'adresse aux solides dont la taille veut être réduite en des éléments ou particules de taille inférieure et de granulométrie déterminée.

Elle peut avoir divers objectifs parmi lesquels on peut citer de faciliter le stockage, le transport, le triage, le mélange ou la dissolution, la réactivité chimique.....

On distingue les termes suivants relatifs à cette réduction de taille:

- **débitage**: réduction des gros blocs issus de mine ou de carrière en éléments de dimensions supérieures à 100 mm
- **concassage**: réduction à des dimensions allant de 25 à 100 mm
- **granulation**: réduction à des dimensions allant de 6.3 à 25 mm
- **broyage**: réduction à des dimensions comprises entre 0.4 et 6.3 mm
- **pulvérisation**: production de particules inférieures à 0.4 mm
- **micronisation**: réduction à des dimensions de l'ordre du micron
- **défilage**: fragmentation des matières fibreuses (bois, végétaux, ...)
- **déchiquetage**: réduction par hachage des matières flexibles
- **découpage**: sciage ou cisaillement pour obtenir des fragments réguliers.[3]

#### 1. Fragmentation

La fragmentation mécanique des solides peut se définir comme l'ensemble des opérations (concassage, broyage,.....) ayant pour but de réaliser, grâce à l'application des contraintes mécaniques externes soit :

La division d'une masse solide en fragments de dimension maximale déterminée ; Soit la réduction d'une masse solide déjà fragmentée jusqu'à obtention des éléments de plus petit volume. C'est le processus par lequel un objet est divisé en un grand nombre de petits morceaux. L'efficacité de la fragmentation augmente beaucoup lorsqu'on intercale entre les concasseurs et les broyeurs par des appareils de classement (tamis et classificateurs).

La fragmentation a pour l'objectif :

- la facilité de la manutention et du conditionnement des solides grâce à la réduction de ces solides à des dimensions appropriées,
- faciliter des réactions physico-chimiques ou chimiques, dont la rapidité est normalement fonction de l'importance des surfaces exposées, c'est-à-dire du degré de division des matières solides.[4]

#### 2. Mécanisme de fragmentation

Suivant le matériau traité et le mode de fragmentation mis en œuvre, différents mécanismes de fragmentation restent possibles. On considère en général trois grands types de mécanisme de fragmentation qui compte tenu de l'inhomogénéité de la répartition des défauts structuraux des particules, interviendront souvent simultanément :

- l'**abrasion** consiste en une érosion de la surface des particules ; elle génère deux grandes populations : la première de taille voisine de la particule abrasée, la seconde constitué par

## Chapitre 2 : Broyage et fragmentation

les fragments arrachés étant une population de particules beaucoup plus fines que la population de départ.

- la **désintégration** résulte d'un apport énergétique suffisamment intense pour engendrer une contrainte qui dépasse largement le point de fracture. Les particules ainsi générées sont de petite taille devant celle de la particule mère et la distribution de taille de ces fragments est très étalée.
- le **clivage**, phénomène intermédiaire entre l'abrasion et la désintégration, engendre la production de particules du même ordre de grandeur que la particule mère, il résulte d'un apport énergétique juste suffisant à la propagation de fractures préexistantes dans le matériau traité.

### 2.1. Physique de la fracture

L'application d'une contrainte croissante à un solide, engendre dans celui-ci des déformations qui aboutissent à la fragmentation. Pour des cas idéaux, la courbe représentant la déformation en fonction de la contrainte (figure1) permet de distinguer deux grands domaines :

- dans une première zone, la déformation est une fonction linéaire de la contrainte, la déformation  $y$  est élastique et donc réversible.
- Si on augmente la contrainte et que l'on dépasse un point appelé limite d'élasticité, on entre dans un domaine dit de plasticité, dans lequel les déformations sont irréversibles. Ce domaine de plasticité se termine par un point de rupture; la cassure du matériau intervient au franchissement de ce point.
- Si le point de rupture est très proche du point de limite d'élasticité, la rupture est dite **fragile**, elle est alors brutale et se propage à grande vitesse suivant des surfaces de cohésion minimale. (Déformation élastique [4])
- Lorsque le point de rupture est situé après un large domaine de plasticité, la rupture est dite **ductile**, elle est progressive et nécessite le maintien de la contrainte jusqu'à la séparation des fragments. (Déformation plastique [4])

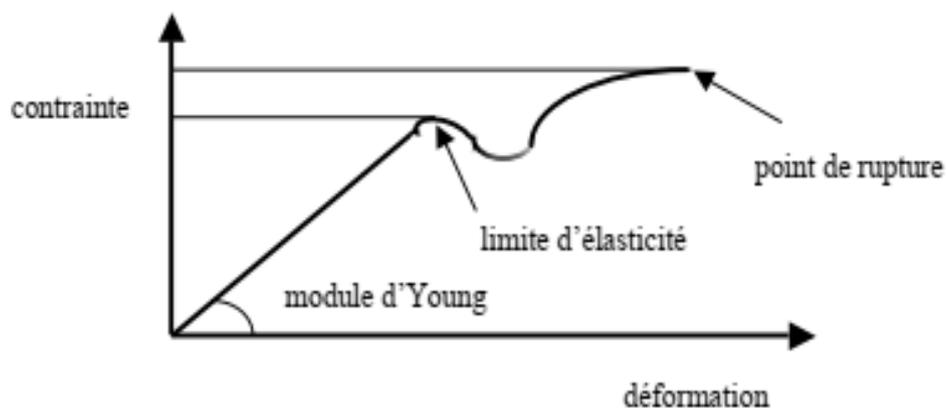


Figure 1. Contrainte =  $f$ (déformation).

Les courbes déformation-contrainte, permettent de classer les matériaux en trois grandes catégories :

- ✓ Les **matériaux " fragiles "** (cassants) ne présentent pas de domaine d'élasticité, ils se brisent au choc sans absorber beaucoup d'énergie ; les morceaux peuvent être réassemblés comme un puzzle pour redonner la forme initiale.

## Chapitre 2 : Broyage et fragmentation

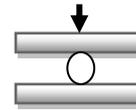
- ✓ Les **matériaux “ semi-fragiles ”** ces matériaux se cassent en présence de défauts (une entaille peut conduire à la rupture) avec un début de déformation plastique.
- ✓ Les **matériaux “ malléables ”** qui présentent une grande plasticité et présentent de grandes déformations avant d’atteindre le point de rupture.[5]

### 2.2. Principe de la fragmentation

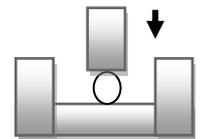
La fragmentation s’obtient par rupture de la cohésion des corps solides sous l’action de forces externes qui peuvent être appliquées sous l’une des formes suivantes :

Suivant le type de broyeur utilisé, les contraintes infligées au produit à broyer sont de nature différente:[5]

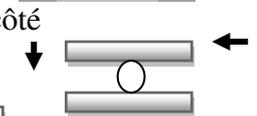
1- Ecrasement : exercer une pression progressivement sur un morceau



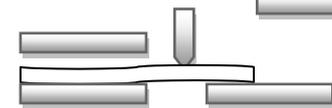
2- Choc ou coup : la force mécanique est appliquée par-dessus mais subitement



3- Trituration : la force mécanique est appliquée progressivement par-dessus et de côté



4- Le coupage : la force est appliquée par-dessus et subitement



## 3. Broyage

### 3.1. Définition

Le broyage est une opération unitaire visant à fragmenter un matériau pour en réduire la taille afin de lui donner une forme utilisable ou d’en séparer les constituants. À cette fin, le matériau est soumis à des sollicitations mécaniques qui entraînent une augmentation de son énergie libre.

Cette énergie, lors de la fragmentation peut être transformée suivant différents processus en énergie élastique (mettant en jeu les défauts de réseaux qui donnent naissance à la fissuration), en énergie de surface (progression des fissures et génération de fractures), et diverses autres formes d’énergie (avec comme possibles conséquences l’amorphisation superficielle ou massique des solides cristallins, l’agglomération, les transitions polymorphiques, les réactions mécano-chimiques).[5]

### 3.2. Energie de broyage

L’énergie de broyage dépend fortement des propriétés du solide à fragmenter, du taux de réduction et de l’appareil. On dispose de lois empiriques pour calculer l’énergie (E) requise par unité de masse pour passer d’un diamètre de particules (D) à un diamètre (d) après fragmentation :

$$E = k (1/d - 1/D) ; \quad k \text{ dépend du produit et du broyeur.}$$

#### a) Loi de Von Rittinger

Von Rittinger (1867), partant de l’hypothèse que l’énergie nécessaire au broyage d’un lot de particules est proportionnelle à la surface générée par la fragmentation, propose la relation :

$$E = K_R \times \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

## Chapitre 2 : Broyage et fragmentation

Les diamètres d'indices  $D$  et  $d$  caractérisant respectivement l'état initial et l'état final du lot de particules,  $K_R$  étant une constante liée à la résistance du matériau à l'opération de broyage et  $E$  étant l'énergie spécifique par unité de volume fournie au procédé.

Cette relation qui prend en considération la surface générée, s'utilise en broyage fin pour des particules de quelques dizaines de micromètres.

### b) Loi de Kick

En partant de l'hypothèse que l'énergie de broyage dépend du volume de particules à broyer, puisque l'énergie de déformation est proportionnelle au volume et que pour un volume unitaire chaque étape de rupture nécessite la même énergie, Kick propose en 1885:

$$E = K_K \times \ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

La constante  $K_K$  étant là aussi liée à la résistance du matériau considéré. Cette loi est principalement valable pour le broyage grossier impliquant la rupture par déformation.

### c) Loi de Bond

Sur la base de nombreux résultats expérimentaux (notamment en broyeurs à boulets) Bond (1952) propose de relier l'énergie nécessaire pour fragmenter des particules de taille  $d$  à la quantité  $d^{0.5}$ . Cela se traduit pour une variation de taille de  $D$  à  $d$  par une relation de la forme:

$$E = K_B \times \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right)$$

En pratique, ce sont les quartiles 80 (aussi appelés  $d_{80}$ ) qui sont utilisés pour décrire les états granulométriques  $D$  et  $d$ . Cette valeur peut être définie comme la dimension de la maille du tamis qui autorise 80 % de passant. Si  $P$  et  $F$  sont respectivement les quartiles 80 du produit broyé et de l'alimentation, l'énergie consommée en kWh par unité de masse peut s'exprimer par l'équation :

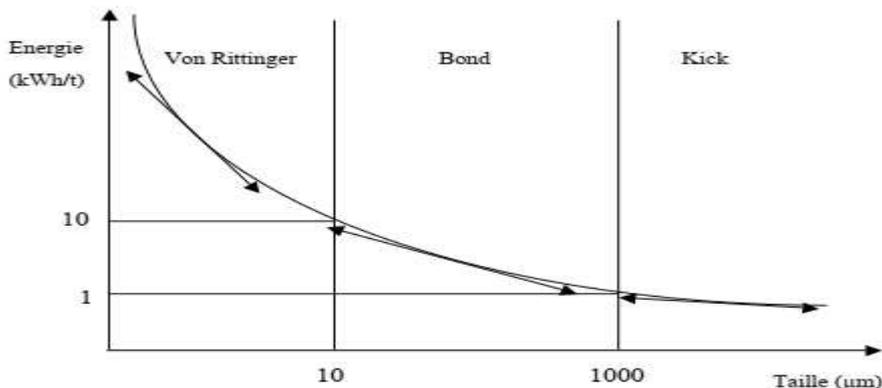
$$E = w_i \times \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)$$

Où  $W_i$  est l'indice de Bond caractéristique de la matière et du circuit de broyage. Le succès de la loi de Bond s'explique notamment parce que ces paramètres sont aisément mesurables en industrie. Mais,  $W_i$  peut aussi être calculé à partir de mesures réalisées dans un broyeur de laboratoire dimensionné par Bond à cet effet.

La loi de Bond est utilisable dans une gamme de taille intermédiaire entre les lois de Rittinger et de Kick [4].

#### • Limites et domaine de validité

La figure 4 donne un aperçu des domaines de validité des lois précédentes en termes de tailles de particules.



### 4. Opération de broyage

L'opération de broyage sert à réduire la taille des particules. Nous définissant ci-après le taux de réduction et le rapport de réduction.

- ✓ **Taux de réduction (Rapport de réduction)**: c'est le rapport des dimensions moyennes avant et après fragmentation. Le taux de réduction varie de 5 à 100 environ.

Rapport de réduction :  $n = D/d$  ; avec D dimension initiale caractéristique, et d dimension finale caractéristique. Chaque appareil est spécialisé pour une gamme de rapport de réduction déterminée.

#### 4.1. Opérations préliminaires :

Amener la matière première sous forme convenable pour la pulvérisation

- **La mondation** : consiste à débarrasser la matière première de toutes les parties inutiles
- **La division grossière** : nécessaire pour les substances de taille importante.
- **La dessiccation** : de certaines matière pour faciliter leur pulvérisation ultérieure.

#### 4.2. Appareils de broyage

##### a) Appareils de laboratoire

###### ■ *Le mortier*

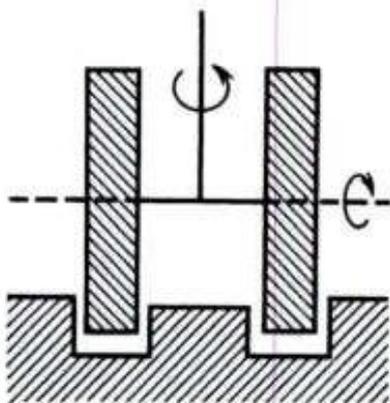


- **Porphyres** : ils sont constitués de plaques de silice très dure sur laquelle on frotte une molette en verre ou en pierre très dure et qui permet d'obtenir des poudres très fines.
- **Broyeur à hélices** : genre moulin à café.
- **Tamis et cribles** : pour les substances très friables

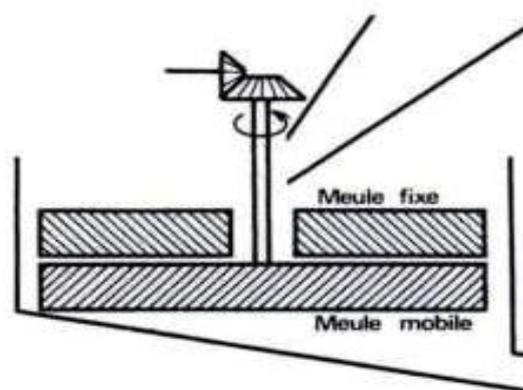


##### b) Appareils utilisés dans l'industrie

- ✓ **Broyeurs à meules** : Les meules se composent de deux cylindres lourds fabriqués en fonte d'acier, ou de granite. Ils tournent horizontalement ou verticalement avec une vitesse de 8 à 15tr/min et une capacité de 380 à 650Kg/h.



BROYEUR A MEULES VERTICALES

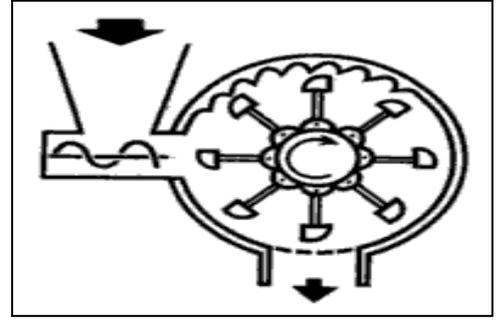


BROYEURS A MEULES HORIZONTALES

## Chapitre 2 : Broyage et fragmentation

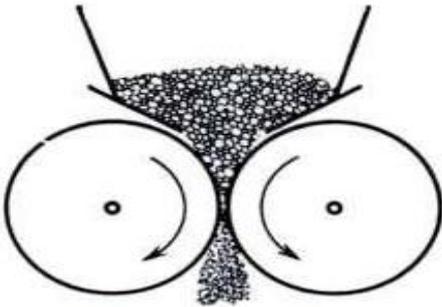
### ✓ Broyeur à marteaux :

L'axe de rotation porte des bras articulés en métal. Lancés à très grande vitesse (500 à 1000tr/min) ces marteaux viennent frapper les parois de l'enceinte cylindrique en pulvérisant la substance à broyer



### ✓ Broyeurs à cylindres :

La grosseur des particules est réglée par l'écartement des deux cylindres dont les cannelures viennent s'emboîter en tournant. Les substances sont entraînées et écrasées dans l'intervalle qui les sépare. Dans le cas de deux cylindres lisses, l'un des deux tourne plus vite que l'autre pour qu'il y ait à la fois compression et arrachement.



BROYEURS A CYLINDRES LISSES

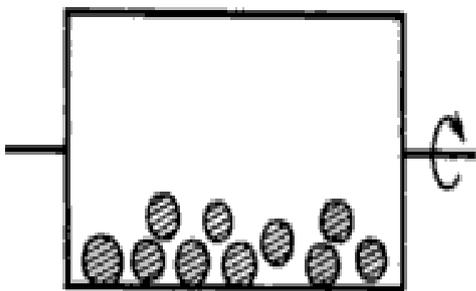


BROYEURS A CYLINDRES CANNELES

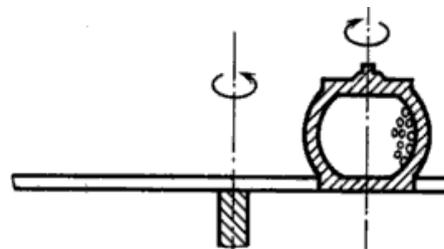
### ✓ Broyeurs à boulets et Broyeurs planétaire à boulets :

Constitués par des récipients cylindriques ou sphériques, en métal ou en porcelaine. Le produit à pulvériser est placé à l'intérieur de ces récipients avec un nombre convenable de boules de métal ou de porcelaine. Après fermeture on fait tourner l'ensemble autour d'un axe horizontal. Les frottements et les chocs entre boulets et parois réalisent une pulvérisation assez semblable à celle du pilon dans le mortier.

L'avantage de ces broyeurs c'est que l'opération se faisant en vase clos, il n'y a pas dissémination de poussière dans l'atmosphère ce qui est important pour les substances toxiques ; en plus ils permettent de réaliser simultanément le broyage et le mélange de plusieurs substances.



BROYEURS A BILLES



BROYEUR PLANETAIRE A BILLES

### 4.3. Facteurs influençant le choix des broyeurs:

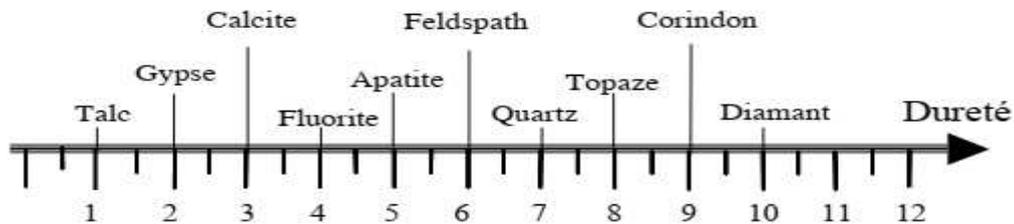
#### ✓ Propriétés de la substance à pulvériser :

Dureté, élasticité, friabilité, thermosensibilité.

- Dureté

## Chapitre 2 : Broyage et fragmentation

La dureté (ou inversement la fragilité) est vraisemblablement la propriété la plus couramment employée dans l'industrie. Elle traduit, au moyen de tests standardisés, la résistance du matériau à la propagation des fissures. On peut la définir comme l'aptitude d'une particule à résister à la pénétration d'une autre. Cette propriété est classiquement représentée sur l'échelle de Mohs qui permet de classer les différents matériaux des plus "fragiles" aux plus "durs".



### - *Abrasivité*

Cette propriété est intimement liée à la précédente : c'est l'aptitude d'un matériau à user une surface. Elle est d'une grande importance économique : elle conditionne l'usure du broyeur par le matériau à broyer et la contamination du produit qui en résulte.

### - *Adhésivité*

L'adhésivité traduit l'aptitude des particules à se coller entre elles (agglomération) ou aux parois du broyeur. Cette caractéristique est liée à la taille et à la nature des particules ainsi qu'à leur taux d'humidité.

### - *Forme*

La forme, ou plus généralement la structure des particules, joue un rôle fondamental dans les procédés de broyage. En effet, les propriétés d'usage des particules peuvent être liées à leur forme ; il conviendra alors de choisir le type de broyeur ayant le mode d'action convenable pour obtenir une forme donnée de particules.

### ✓ *Distribution de taille*

La distribution de taille des particules à broyer joue un rôle important dans le choix d'un broyeur, il sera notamment nécessaire d'envisager plusieurs étapes de fragmentation si le produit à broyer présente une distribution de tailles étalée. Par ailleurs il est rarement judicieux de vouloir broyer au maximum des possibilités d'une machine donnée ; en effet le "surbroyage" peut entraîner une ré-agglomération.

### ✓ *la quantité à traiter.*

1. [https://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/fragmentation\\_broyeur\\_boulets.html](https://www.azprocede.fr/Cours_GC/fragmentation_broyeur_boulets.html).
2. Riadh, B.A.S., *Concasseurs et broyeurs : Types et maintenance*, in *Génie mécanique 2020*, Université de M'Sila.
3. Alain CHAMAYOU, J.F., *Broyage dans les industries agroalimentaires*, in *Technologie des pulvérulents dans les IAA*, . 2003, Lavoisier,. p. p.375-406.
  
1. Ouahab, M., *Simulation numérique d'un écoulement diphasique eau-huile dans un milieu poreux*. 2016, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI OUZOU FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION.
2. Alia, K., *Milieux Poreux et Diépers*. 2010: Cours
3. [https://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/fragmentation\\_broyeur\\_boulets.html](https://www.azprocede.fr/Cours_GC/fragmentation_broyeur_boulets.html).
4. Riadh, B.A.S., *Concasseurs et broyeurs : Types et maintenance*, in *Génie mécanique 2020*, Université de M'Sila.
5. Alain CHAMAYOU, J.F., *Broyage dans les industries agroalimentaires*, in *Technologie des pulvérulents dans les IAA*, . 2003, Lavoisier,. p. p.375-406.