

Chapitre I : Technologie de la fragmentation des matériaux

1) Définitions

La fragmentation est l'opération par laquelle on cherche à réduire et/ou à augmenter la surface développée de l'unité de masse (surface spécifique) de particules solides. Son efficacité est toujours évaluée par une mesure de l'accroissement de la finesse (particules plus petites qu'une certaine dimension).

La fragmentation cherche toujours à satisfaire des exigences relatives à des utilisations ultérieures. Elle vise, généralement, au moins un des buts suivants :

- réduire les dimensions soit pour faciliter la manutention, le conditionnement ou l'utilisation ; soit pour libérer les constituants avant une opération séparative,
- éliminer, avant une mise en œuvre, des zones de rupture potentielle (libération d'unités quasimonocristalline) ;
- augmenter la réactivité de processus dont la cinétique dépend de la finesse ou du degré de désordre ;
- homogénéiser (mélanges, dilution solide, dosages)
- conférer des spécifications de forme, de texture de distribution granulométrique ;

2) Choix d'une technologie

Les modes de fragmentation classiques consistent à soumettre le solide à fragmenter à une contrainte créée par des forces de contact.

La technologie des appareils de fragmentation tient compte des observations et des déductions suivantes :

- paramètres intrinsèques du matériau ;
- énergie requise pour fracturer le matériau ;
- vitesse de déformation ;
- réduction des dimensions du matériau.

Toutefois, les opérations de fragmentation sont limitées (granulométrie d'entrée, débit,...) et l'on pourra rarement se contenter d'un seul appareil en pratique.

Il sera nécessaire de fragmenter le produit en plusieurs stades successifs impliquant différents appareils qui travaillent en série. Les critères pouvant guider le choix d'une technologie sont :

- la consommation énergétique ;
- la capacité d'admission, qui est fonction de la dimension des plus gros blocs ;
- le rapport de réduction optimal, établi entre la dimension correspondant à 80 ou 85% en masse des produits à l'entrée (D_{80} ou D_{85}) et celle correspondant au même pourcentage des produits à la sortie (d_{80} ou d_{85}) ;
- l'étalement des granulométries à la sortie ;
- le coefficient de forme moyen des fragments ;
- le coût de maintenance, qui est fonction de la robustesse, de l'efficacité des dispositifs de sécurité, des facilités d'entretien et de la durée de vie des pièces d'usure ;
- la nature de la substance à traiter, selon sa sensibilité aux contaminations possibles lors de la fragmentation (notamment l'usure des outils, mais aussi l'eau ou l'air).

3) Appareils de la fragmentation mécanique :

Ils peuvent se classer en :

- **Concasseurs** : Opérant une fragmentation grossière, (jusqu'à des calibres 25 et 150 mm) ;
- **Granulateurs** : Opérant une réduction en fragment de calibre pouvant aller de 6.3 jusqu'à 25 mm ;
- **Broyeurs** : Donnant des produits de calibre allant de 0.2 jusqu'à 6.3 mm ;
- **Pulvérisateurs ou moulins** : opérant une réduction en poudre de calibre de 0 à 200 μ m ;
- **Atomiseurs** : Pouvant donner des calibres descendant jusqu'à l'ordre de μ m ;

4) Aspects physique de la fragmentation

1. **Phénomène de rupture** : La fragmentation des solides résulte de l'action de champ de contraintes engendrée par des forces de contacts (compression, cisaillement, torsion, flexion, attrition,...). Ce champ varie donc avec l'intensité et la distribution des forces, avec la nature, la forme et les discontinuités structurales du solide.

2. **fragilisation** : Un matériau est dit fragile quand il se rompt avant de dépasser sa limite élastique. Dans la pratique, il existe diverses modes de fragilisation (mécanique, thermique, électrique, électromagnétique et chimique).

3. **Adjuvants de mouture** : Les conditions de broyage peuvent être améliorées en ajoutant, en faibles quantités, certaines substances au milieu de fragmentation sous forme solide, liquide ou vapeur. Il est ainsi possible de réduire le temps ou d'augmenter la capacité de broyage, de prévenir le colmatage et d'obtenir des produits plus facilement manipulables

5) Procédés de la fragmentation

La fragmentation consiste en la rupture de la cohésion des corps solides sous l'action des forces externes qui peuvent être expliquées sous l'une ou l'autre des formes suivantes :

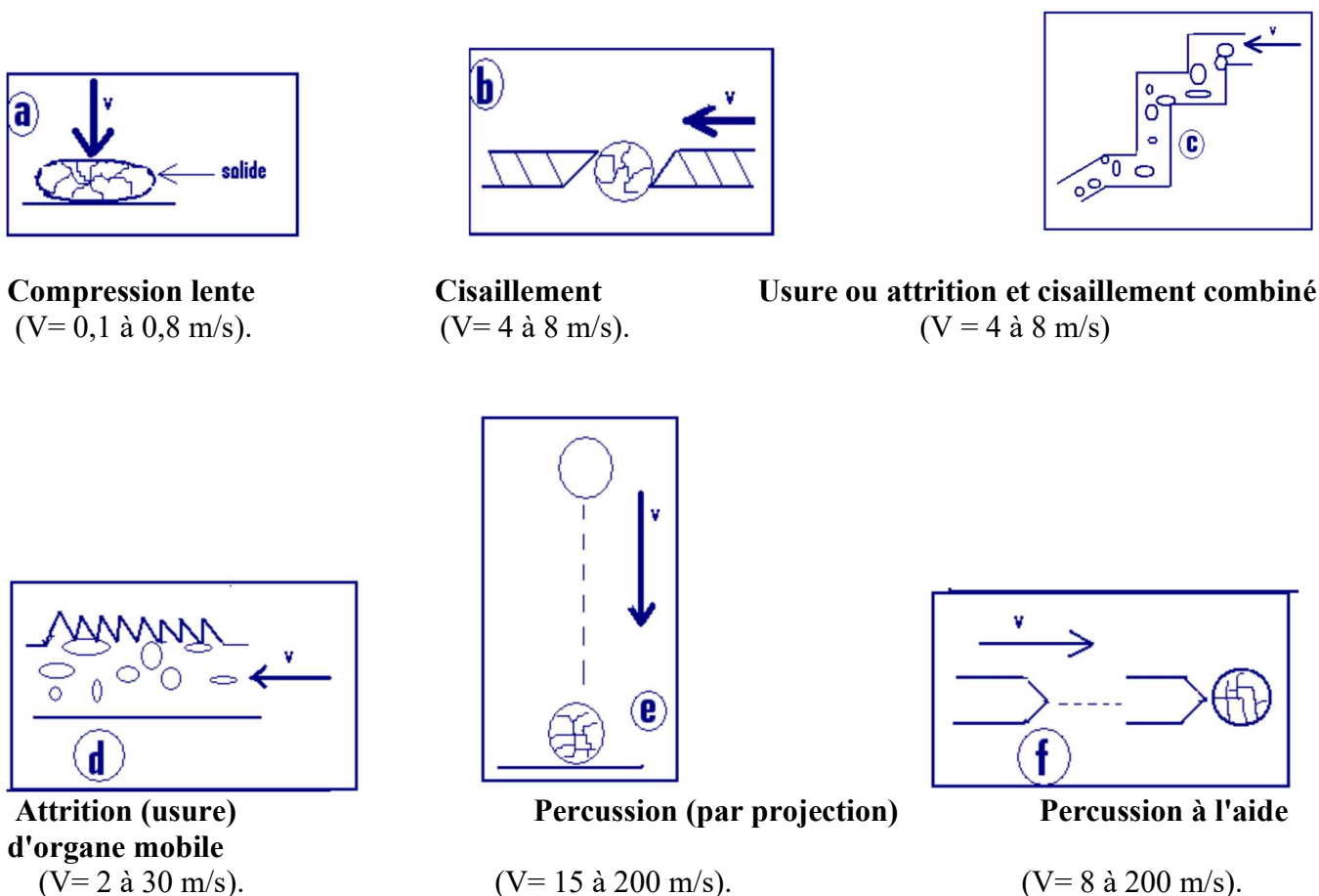


Figure 1 : Modes d'action de la fragmentation

g. Percussion entre particules : ($V = 10$ à 300 m/s).

h. L'explosion sous l'effet de forces internes : d'origine thermique, thermoélectrique.

Il faut noter que d'autres modes d'action peuvent être utilisés pour la fragmentation :

- Par apport d'énergie électromagnétique, sonore, chimique
- Par interaction avec le fluide environnant (changement de pression et/ou de température).

6) Applications des appareils de fragmentation

- · **Carrières** : pour la fabrication des granulats, pour viabilisation et construction.
- · **Liants hydrauliques** : chaux, ciment, plâtre ... etc.
- · **Briques, tuiles, céramiques.**
- · **Minerais métallurgiques.**
- · **Combustibles solides** : (houille, lignite, tourbe, bois, charbon de bois... Etc.).
- · **Industries chimiques** : fabrication d'engrais, produits pharmaceutiques, matières cosmétiques, matières plastiques... etc.
- · **Récupération** : ordures ménagères, déchets industriels, déchets d'abattoirs, emballage... etc.
- · **Industries agroalimentaires** : minoteries, semouleries, huileries, préparation d'aliments pour bétail.

7) Quantification des phénomènes de la fragmentation :

D'un point de vue pratique, la quantification des phénomènes de fragmentation est établie à l'aide de lois énergétiques, d'indices caractérisant l'aptitude à la fragmentation, de la distribution granulométrique.

Le principal aspect de la recherche porte sur l'évaluation des quantités d'énergie théoriquement nécessaire pour obtenir, sur une matière donnée, une fragmentation de type déterminé. *Concernant les lois énergétiques*, il en existe trois que l'on se contentera de citer :

7.1 Lois énergétiques : Trois principales théories ont été émises pour décrire la relation qui existe entre l'Energie consommée E par le matériau et la réduction de la dimension D de ce matériau lors de la fragmentation. Néanmoins ; ces hypothèses ne permettent pas de mesurer la quantité d'énergie réellement absorbée par les particules au cours de leur fragmentation. On ne peut mesurer que l'énergie totale consommée par l'appareil de fragmentation.

a. Lois de Rittinger : Von Rittinger (1867) postule que l'énergie consommée E est directement proportionnelle à la quantité de surface nouvellement créée. Il écrit alors la relation :

$$E = K_r(S_2 - S_1) \dots \dots \dots (1)$$

avec K_r : constante qui dépend à la fois du matériau et de l'appareil de fragmentation ;

S_1 et S_2 surfaces des particules, respectivement avant et après fragmentation.

Si l'on considère l'énergie spécifique E' par unité de volume, on peut écrire :

$$E' = E/V = K_r(S_2/V - S_1/V) \dots \dots \dots (2)$$

$$E' = K_r(1/D_2 - 1/D_1) \dots \dots \dots (3)$$

Avec D_1 et D_2 : dimensions initiale et finale des particules

V : Volume du matériau

L'inconvénient de cette loi réside dans le fait que Rittinger n'a pas tenu compte de la déformation du matériau avant sa fragmentation.

b. Loi de Kick : Pour Kick (1885), l'énergie nécessaire pour fragmenter un matériau homogène est proportionnelle à la variation du volume, donc au rapport de réduction $R = D_1/D_2$. Cette deuxième loi de fragmentation s'écrit alors :

$$dE = -K_k dV \dots \dots \dots (4) \text{ soit}$$

$$dE' = -K_k dV/V = K'_k dD/D \dots \dots \dots (5)$$

et l'on obtient alors après intégration

$$E' = K'_k \ln D_1/D_2 = K'_k \ln R \dots \dots \dots (6)$$

Le travail nécessaire pour réduire une tonne de matériau est donc le même pour un rapport de réduction donné ; quelle que soit la dimension initiale du matériau. Cela n'est évidemment pas compatible avec la pratique. De plus le matériau n'est pas homogène et la fragmentation dépend alors de ces imperfections (fissures, dislocations, etc...)

c. Lois de Bond : Comme aucune des deux précédentes lois ne s'accordait bien avec l'ensemble des résultats observés lors des opérations de fragmentation industrielles, bond (1951) a proposé une troisième loi qui postule que l'énergie spécifique requise est inversement proportionnelle à la racine carrée de la nouvelle surface produite. La forme générale de la loi s'écrit :

$$W = W_i [(100/D_2)^{0.5} - (100/D_1)^{0.5}] \dots \dots \dots (7)$$

$$W = 10 W_i (1/D_2^{0.5} - 1/D_1^{0.5}) \dots \dots \dots (8)$$

D_1 et D_2 : dimensions (um) ; des grains respectivement avant et après fragmentation choisies comme correspondant à la dimension D80 de la maille carrée laisser 80% en masse du matériau. W_i une constante appelée « indice énergétique » (work index) que l'on détermine expérimentalement par des essais de fragmentation.

d. Autres relations : L'insuffisance des lois de Rittinger, Kick et Bond et leur nature contradictoire ont conduit à rechercher d'autres relations entre la réduction dimensionnelles et l'énergie consommée. Ainsi, **Svensson et Murkes** (1957) considèrent que dans l'expression de Bond l'exposant de $100/D$ n'est pas une constante et contestent le choix de D80. Ils proposent alors une relation plus générale de forme :

$$E' = K_{sm} [(100/D_2)^n - (100/D_1)^n] \dots \dots \dots (9)$$

Avec $D(\mu m)$ dimension moyenne des particules qui peut être obtenue en première approximation par la moyenne géométrique des dimensions D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{70} et D_{90} .

K_{sm} : constante Svensson et Murkes

n : paramètre à déterminer pour chaque matériau et pour un mode de fragmentation donné.

Charles propose (1957) propose une loi générale de la forme :

$$dE = -K_c (dD/D^n) \dots \dots \dots (10)$$

avec K_c : Constante. Après intégration de la relation 10, on retrouve :

$n=1$ $dE = -K_c dD/D$ $E = -K_c \ln(D_1/D_2)$ la loi de kick

$n=1.5$, ... loi de bond

$n=2$, ... loi de Rittinger

Pour **Hukki** (1961) : la relation qui lie l'énergie à la réduction des dimensions des particules est une relation composite de celles établies par Rittinger, kick et bond qui s'écrit :

$$dE = -K_h dD/D^{f(D)} \dots \dots \dots (11)$$

avec K_h : constante

En plus des hypothèses proposées par les auteurs des trois premières lois énergétiques, il prend en compte la **probabilité de fragmentation $f(D)$** des grains en fonction de leurs dimensions initiales

$F(D)=1$ pour les grosses particules

$F(D)=0$ pour les particules ultrafines

Toutefois, les nombreux essais de fragmentation effectués sur différents matériaux montrent que :

- la **loi de Rittinger** est compatible avec une **fragmentation fine à ultrafine**
- la **loi de kick** s'applique bien dans le cas d'une **fragmentation grossière**
- la **loi de Bond** couvre les domaines de **broyage grossier à fin**. cette dernière est d'ailleurs utilisée pour le dimensionnement des broyeurs.

Une autre représentation de ces lois consiste à tracer la création de surface par unité d'énergie consommée $\Delta S/E$ (m^2/j) en fonction de cette énergie E , voir figure 2.

Cependant, ces approches ne sont valables que pour des cas particuliers et ne prennent pas en compte la complexité du problème. En particulier, citons l'existence de déformations plastiques avant fragmentation, et le fait que le matériau est rarement homogène et possède toujours des imperfections. Par ailleurs, l'énergie réellement nécessaire pour l'opération de broyage est nettement supérieure à celle qui peut être déterminé par ces lois empiriques. En effet, il faut en outre de la fragmentation, vaincre les forces de

frottement, fournir de l'énergie pour les déformations élastiques et surtout pour mettre en fonctionnement la machinerie du broyeur.

En fin de compte, moins de 10% de l'énergie totale consommée par un broyeur sera effectivement utilisée pour la fragmentation des particules. Dans le cas des broyeurs à jet d'air, l'efficacité est encore plus faible et peut être inférieure à 5%

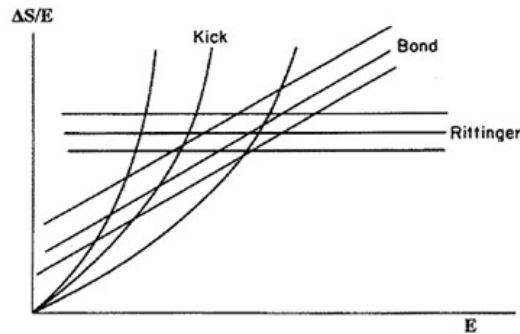


Figure 2 : Evolution du paramètre $\Delta S/E$ en fonction de la loi énergétique choisie

