Chapitre I : Introduction au Milieux Poreux et Dispersés

I.1. Introduction

La connaissance des phénomènes de transport en milieu poreux et dispersé est d'une grande importance dans plusieurs activités de l'ingénieur :

- La production de l'énergie avec la production du gaz et du pétrole, piles à combustibles, géothermie,
- Le génie chimique pour les réacteurs à lits fixes, fluidisés ou transportés, le contrôle thermique des engins spatiaux pour les pompes capillaires ou encore
- La protection de l'environnement dans le cas de la dépollution du sol, stockage des déchets radioactifs, traitement des eaux ;
- Les domaines de l'agro-alimentaire, de la pharmacie, la chimie, et la cosmétologie etc...

Dans ces différentes situations, on est souvent confronté à :

- La caractérisation de ces milieux et à la modélisation des écoulements (monophasique, diphasique, voir polyphasiques) qui s'y produisent.

La complexité de ces écoulements tient au fait qu'une large gamme d'échelles de longueur et de vitesse interagissent par échanges de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

Aussi, selon leur état physique (de la poussière interstellaire aux particules solides), la connaissance de leurs propriétés demeure délicate.

Par exemple : ceci a été remplacé dans les cas des poudres par : à l'état stationnaire les particules sont solides, aérées et elles peuvent se comporter comme un liquide ou encore transportées comme un gaz.

• La taille des petites particules affecte les propriétés de différentes manières à l'exemple du temps de dépôt du ciment, le pouvoir du pigment, l'activité chimique du catalyseur, le goût des aliments etc...

• La mesure de la taille des particules pour la technologie des poudres peut être comparée à la thermométrie dans le cas de l'étude de transfert de chaleur.

Seulement dans le cas de sphère, nous avons une seule dimension or dans la réalité ce n'est guère le cas car nous avons des particules irrégulières et de plus de différentes dimensions dans un même échantillon.

Pour cela, le problème de l'échantillonnage doit être pris en considération et où le résultat du test final doit être représentatif de l'échantillon d'origine et où le risque d'erreurs peut être assez important. Aussi, dans les procédés de transformation, les produits utilisés sont très souvent sous forme de poudres ou de grains, à une ou plusieurs étapes de leur production.

L'objectif de ce cours est d'introduire les concepts de base de la caractérisation et de l'hydrodynamique des milieux poreux et dispersés.

On s'attachera en particulier à présenter :

- La caractérisation des particules (morphologie, granulométrie) ainsi que ;
- Leur dynamique lors de leur interaction avec un fluide et les modèles existants.

La majorité des opérations industrielles, pharmaceutiques, chimiques, pétrochimiques, alimentaires, et les opérations à la protection de l'environnement…etc. font généralement appel à au moins deux phases : solide-liquide, gaz-liquide et gaz-solide.

Ces phases peuvent être mobiles (concourantes ou encore à contre-courant), l'une des phases est stationnaire et l'autre mobile.

L'objectif de ces opérations étant en fait, de favoriser les différents transferts (masse, chaleur) entre les phases en présence et ceci en développant leur surface de contact. L'aire de la surface qui sépare les deux phases étant grandes par unité de volume.

Le système composé par ces deux ou trois phases en présence est caractérisé par sa structure (composition chimique et cristalline des phases) et sa texture qui est la description de la disposition géométrique d'une phase par rapport à l'autre :

La structure : elle représente la composition chimique et cristalline de chacun des phases.
La texture : elle représente la disposition géométrique des phases par rapport à l'autre
Parmi les différentes dispositions des deux phases on peut citer les suivants :

- Une phase dispersée l'autre continue
- Deux phases continues
- Deux phases dispersées.

I.2. Les milieux dispersion

Une dispersion est composée de deux phases distinctes. L'une des phases est assimilable continue (phase fluide), l'autre phase est discontinue et répartie sur forme d'élément de volume distincts (phase dispersée). Le tableau I.1 résume les 5 combinaisons possibles.

Font appel à la présence de mois de phase (S-L ; S-G ; G-L ; L-L).

Ces phases peuvent être mobile (Co-courant, contre-courant) ou l'une des phases étant stationnaire l'autre en mouvement.

Tableau I.1 : Les différentes dispersions.

Nature de la phase continue	Nature de la phase dispersée	Nom de la dispersion	Dimension des éléments de la phase dispersés
Liquide	Solide	• Suspension • Boue • Dispersion colloïdale	d>0,1 µm d<0,1 µm
	Liquide non miscible	• Emulsion	-
	Gaz	• Bouillon • Mousse	-
Gaz	Liquide	• Brouillard • Nuage • Aérosols	d<0,1 µm d>0,1 µm -
	Solide	• Suspension de poussières • Fumée	d>0,1 µm d<0,1 µm

I.3. Les milieux poreux

On appelle milieu poreux tout système dont l'une des phases est à la fois solide et continue l'autre phase fluide occupe le volume poreux et peut-être soit continue soit disperser.

Les matériaux naturels dans cette catégorie sont les sols, les couches sédimentaires, la plupart des roches ainsi que certains matériaux vivants.

Les milieux poreux sont définis par deux critères :

- Le matériau doit contenir de toute espèce espace vide appelé spores, délimités par une matrice solide
- Le matériau de perméable un écoulement (gaz ou liquide).

Un milieu poreux est un solide de forme quelconque englobant dés vides appelé spores. C'est un système a la capacité ou bien la propriété de laisser ou s'écouler un fluide à travers.

I.4. Milieux poreux naturels

Dans un milieu poreux naturel, la distribution des pores qui est fonction de la forme et de la taille est irrégulière. Les exemples sont nombreux et variés comme le sable de plage, le grès, le calcaire, le pain, le bois ou le poumon… À l'échelle du pore (échelle microscopique), les

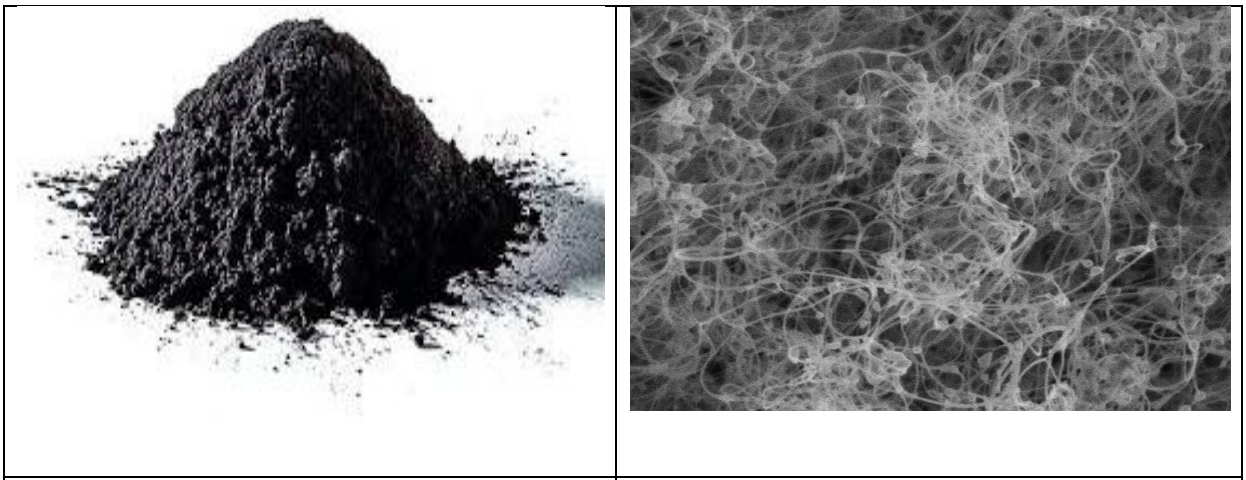
quantités telles que la vitesse ou la pression vont être très irrégulières. Mais en réalité, ces quantités sont mesurées sur des surfaces contenant plusieurs pores et ces valeurs macroscopiques moyennées en espace évoluent de manière régulière en fonction de l'espace et du temps et permettent d'effectuer un traitement théorique.

Gravier	Sable	Roche	Calcaire

Figure I.1: Exemples des milieux poreux naturels.

I.5. Milieux poreux artificiels

Les milieux poreux artificiels, contrairement aux milieux poreux naturels, sont spécialement conçus pour des besoins particuliers grâce à la création de matériaux poreux ou à la modification de la surface de ces matériaux. Les milieux poreux artificiels ont été largement utilisés dans de nombreux domaines tels que la biomédecine, le stockage de l'énergie, le charbon actif, les matériaux de construction, la catalyse, les matériaux mécaniques et le traitement de l'eau. Cependant, le colmatage dans les milieux poreux peut avoir de graves conséquences telles qu'une diminution de l'efficacité de la production, une augmentation des coûts énergétiques, un entretien fréquent des équipements, une diminution de la qualité des produits, une réduction de la durée de vie des équipements et des risques environnementaux.



(a) Charbon actif.	(b) Nanotubes de Carbone.

Figure I.2: Milieux poreux artificiels.

I.6. Description des milieux poreux

On distingue deux types des milieux poreux :

I.6.1. Les milieux poreux consolidés

Un milieu poreux consolidé est un milieu dont la matrice solide est compactée et ne peut pas se deviser en grains ou une fibre. La structure solde peut être continue et permanente ou elle peut être de particules soudées entre elles.

I.6.2. Les milieux poreux non consolidés

Un milieu poreux non consolidé est un milieu dont la phase solide est constituée de grains ou de fibres non soudées entre eux, se sont des milieux constitués de particules distinctes dont la structure solide est formée par des ponts de contact entre les particules.

Parmi les grains, on peut citer les graviers, les sables, les garnissages industriels.

Pour les fibres, on rencontre deux catégories : les fibres organiques (coton, laine, bois…..) et les fibres minérales (amiante, laine de verre…).

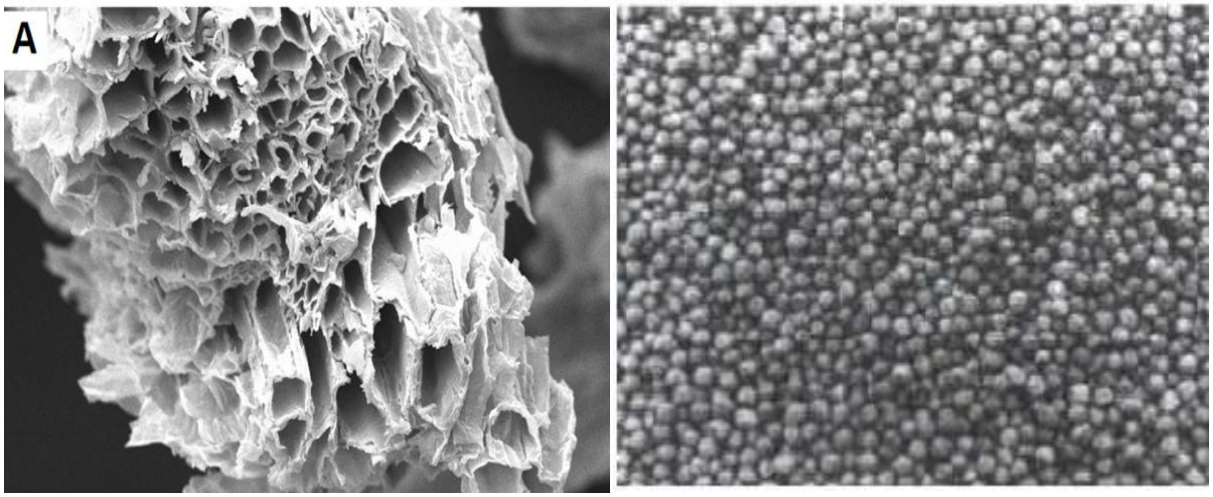


Figure I.2 : Structure consolidée (A) et non consolidée (B).

I.7. Opérations sur les solides

I.7.1. Broyage

Que ce soit pour augmenter la réactivité, faciliter le transport, conditionner le produit fini ou limiter le volume de stockage, il peut être nécessaire de réduire la taille de fragments de solide, c'est la fragmentation.

La fragmentation peut être réalisée selon quatre mécanismes essentiels :

- compression - écrasement (fragmentation assez grossière : 0,5 à 5 mm) ;
- impact - percussion (fragmentation jusqu'à 5 µm) ;

- coupure – cisaillement ;
- attrition – frottement.

Le principe de ces différents mécanismes est illustré sur la figure **I.2**.

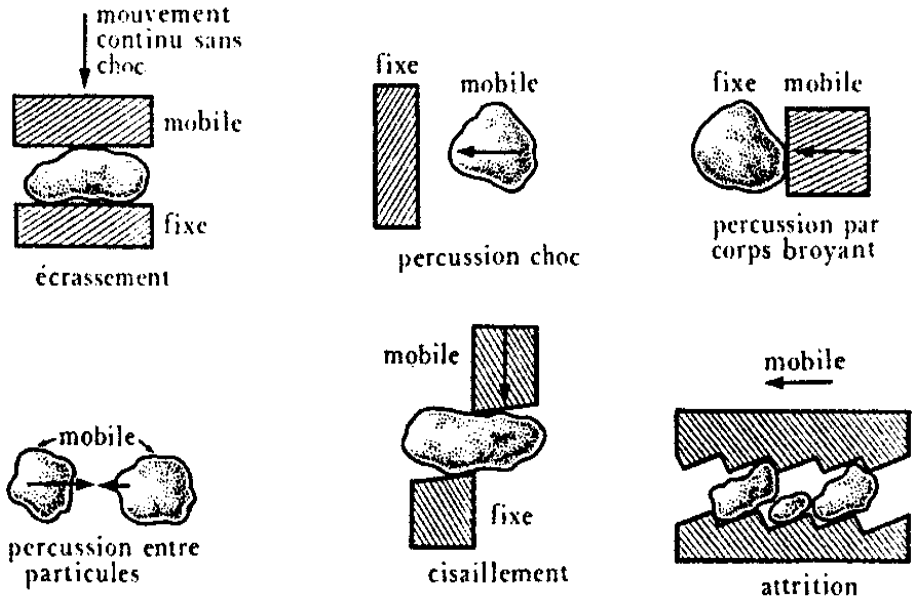


Figure I.3 : Mécanisme de fragmentation.

Pour caractériser une opération de broyage, on définit deux grandeurs spécifiques.

I.7.1.1. Taux de réduction

On définit le taux (ou rapport ou degré) de réduction : r = D/d. Les appareils de fragmentation ne permettant pas d'obtenir des taux très élevés, on effectuera plusieurs réductions en série pour obtenir un produit très fin.

I.7.1.2. Energie de fragmentation

L'énergie de fragmentation 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 :

La **loi de Rittinger**, où l'énergie dépensée est proportionnelle à la somme des nouvelles surfaces crées :

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

La **loi de Kick**, suppose que l'énergie dépensée est proportionnelle au volume du corps fragmenté :

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

La **loi de Bond**, est réputée plus précise que les deux précédentes :

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

Les "constantes" k_R, k_K et k_B sont caractéristiques du produit et de l'appareil.

En réalité, l'énergie nécessaire à la fragmentation n'est qu'une faible partie de l'énergie dépensée (moins de 3%), le reste sert à vaincre les frottements, déplacer les produits, absorber les déformations élastiques.

I.7.1.3. Appareillage

Le choix d'un appareil de fragmentation dépend :

✓ de la qualité de la matière à traiter (dureté, sensibilité à la chaleur, friabilité, …) ;

✓ des granulométries initiale et finale souhaitées ;

✓ de la production horaire. Pour une fragmentation grossière, on utilisera des concasseurs (2 à 20 mm), pour une fragmentation moyenne des broyeurs (0,1 à 2 mm), et pour une fragmentation fine des meules ou des pulvériseurs (< 1 mm).

Appareillage de fragmentations par compression –écrasement

Ces appareils permettent la réduction de solides durs jusqu'à 0,5 à 5 mm. Le plus simple est le **concasseur à mâchoires**, dont le mouvement est alternatif (Figure I.3).

Le **concasseur giratoire** (Figure I.4) permet de traiter des produits de plus faible dimension, il est animé d'un mouvement excentrique, et, à la différence du concasseur à mâchoires, son action est continue.

Enfin le **broyeur à cylindres** (Figure I.5) convient pour les matériaux friables ; les cylindres peuvent être lisses ou non (il y a alors attrition en plus de la compression), ils tournent en sens opposé, et généralement à la même vitesse.

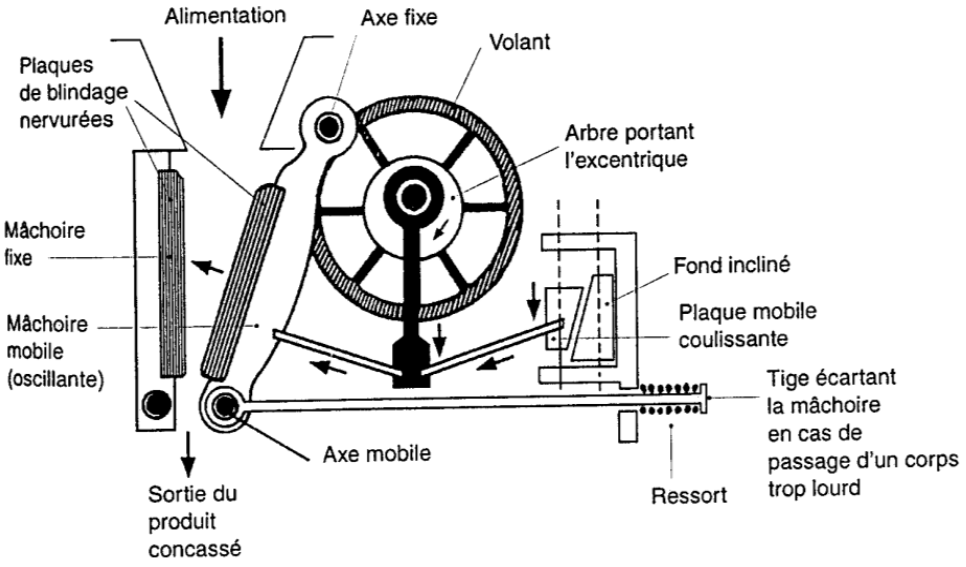


Figure I.4 : Concasseur à mâchoires.

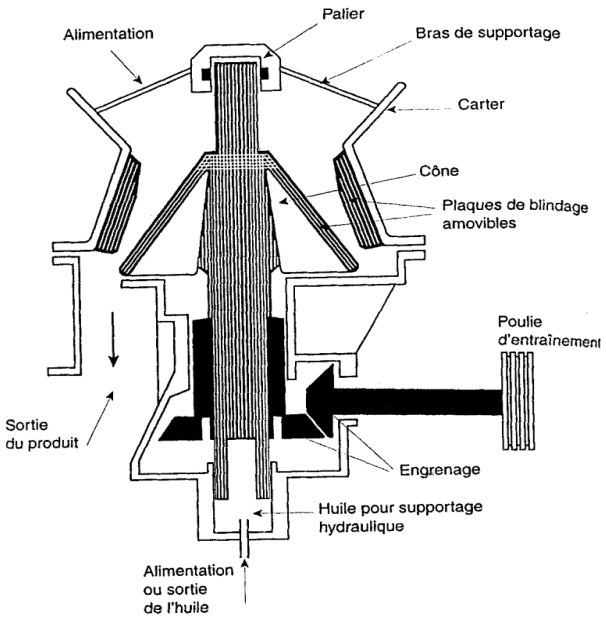


Figure I.5: Concasseur giratoire.

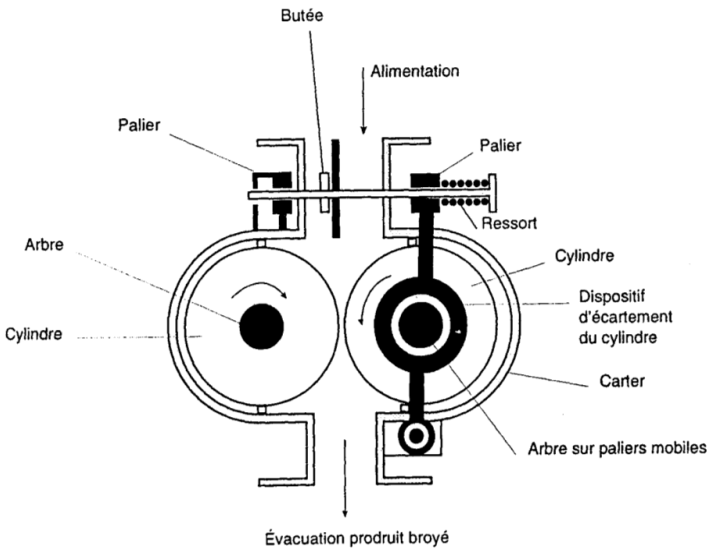
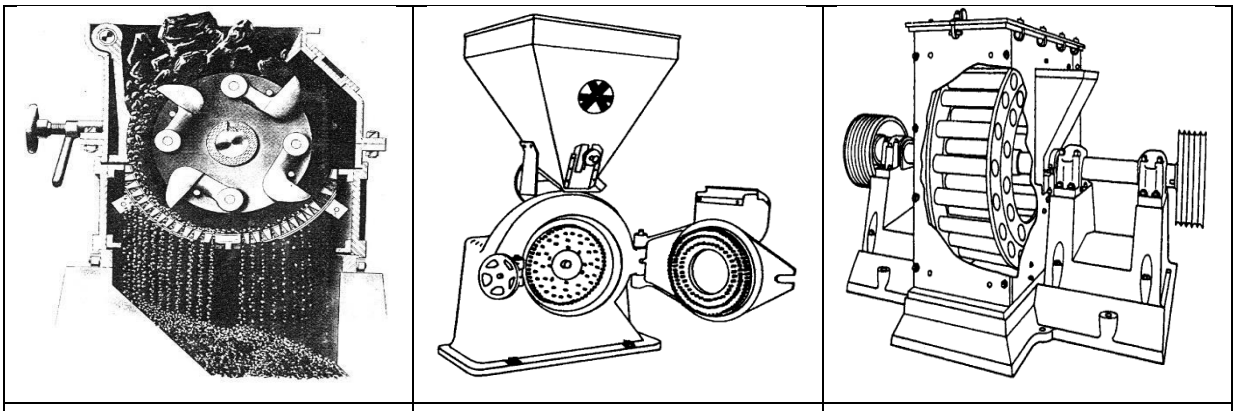


Figure I.6 : Concasseur à cylindres.

Appareillage de fragmentations par impact –percussion

La fragmentation dans le **broyeur à marteaux** (Figure I.6a) est obtenue par chocs répétés contre les parties fixes ou mobiles. Lorsque le produit est suffisamment fin, il est recueilli à travers la grille inférieure. Ce type de broyeur convient pour des produits friables. Le principe du **broyeur à broches** (Figure I.6b) est similaire, toutefois les broches sont fixes. Ce broyeur convient pour es matières fibreuses. Le **broyeur à barres** est représenté sur la Figure I.6c.



(a) Broyeur à marteaux.	(b) Broyeur à broches.	(c) Broyeur à barres.

Figure I.7 : Les appareillage de fragmentations par impact –percussion.

Le **broyeur à boulets** est très utilisé pour obtenir des produits fins. Son principe est représenté sur la Figure I.7. Pour un bon fonctionnement, le taux de remplissage ne soit pas excédé 30 %. Comme illustré sur la Figure I.8, la vitesse de rotation doit être judicieusement choisie afin que les chocs soient efficaces. Le broyeur à boulets est simple à mettre en œuvre, mais il consomme beaucoup d'énergie. Le matériau des boulets doit être compatible avec la charge à broyer, car leur usure provoque une pollution du produit. Enfin ce type de broyeur provoque un échauffement intense, que doit pouvoir supporter le produit.

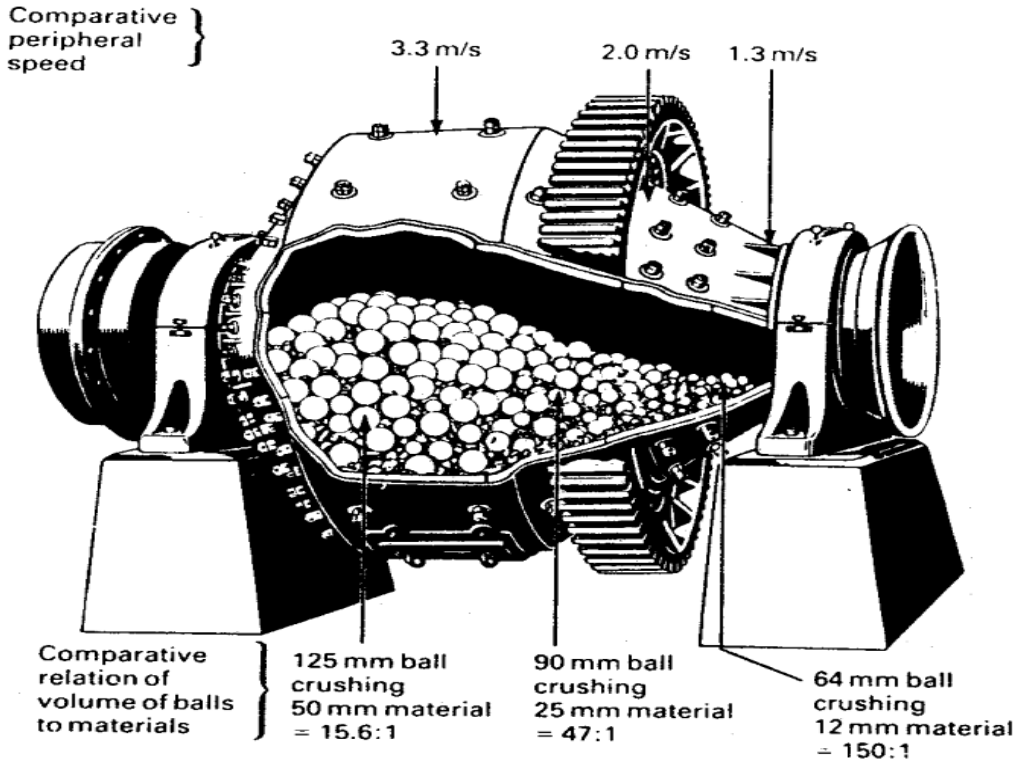


Figure I.8: Broyeur à boulets.

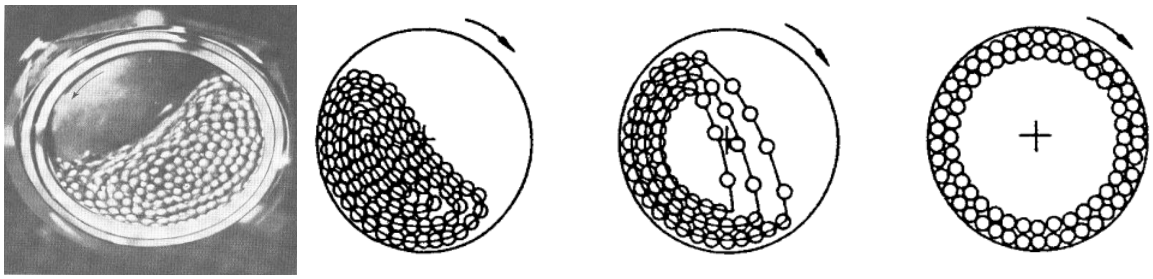
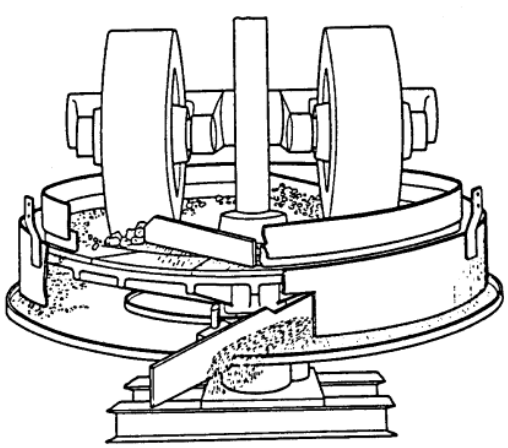


Figure I.9 : Mouvement des boulets dans un cylindre tournant.

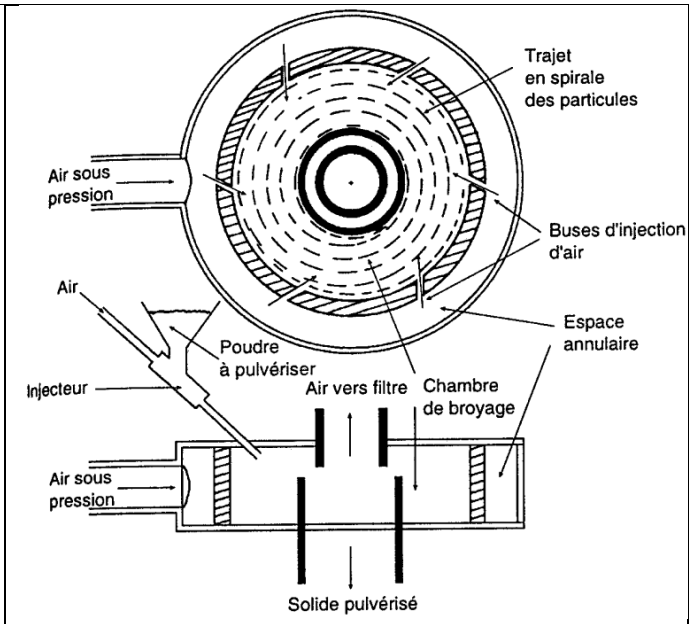
Appareillage de fragmentations par attrition – frottement

Le broyeur à meule (Figure **I.9a**) fonctionne en discontinu, par frottement et compression. Il permet d'atteindre des taux de réduction élevés.

Le broyeur à jet d'air (Figure **I.9b**) permet d'obtenir des poudres très fines (microniques).



(a) Broyeur à meule.



(b) Broyeur à jet d'air.

Figure I.10 : Les appareillage de fragmentations par attrition – frottement.

I.7.2. Criblage

Le criblage est une opération unitaire qui permet de séparer un volume de fragments de matière suivant leur dimension en deux (ou plusieurs) parties. Pour cela, on utilise une surface perforée (surface criblante) qui laisse passer les fragments de dimensions inférieures aux dimensions des perforations et qui retient les fragments de dimensions supérieures. Le but du criblage peut être assez divers :

– séparer les plus gros fragments avant de les retraiter pour améliorer une fragmentation insuffisante ;

– éliminer les fractions les plus fines qui peuvent être gênantes ou qui peuvent être traitées séparément (agglomération, par exemple) ;

– préparer des classes granulométries en vue de répondre à des exigences commerciales (granulats, charbon) ;

– permettre une meilleure efficacité d'un procédé de traitement physique (gravimétrie, par exemple) ou physico-chimique (flottation, par exemple) par un choix judicieux des tranches granulométries à traiter.

Comparé au tamisage, le criblage est la classification portant sur des granulométries comprises entre 1 et 100 mm et réalisés avec des cribles rotatifs (trommels), des cribles plans à secousses ou des cribles vibrants. Le produit alimentant un crible constitue le tout-venant : le criblage permet de séparer le tout-venant en passant (ou tamisat) et en refus. Le débit d'un crible (ou la capacité de criblage) correspond à la quantité horaire massique que peut recevoir cet appareil pour une efficacité de criblage déterminée. La maille désigne l'ouverture formée par l'entrelacement des fils disposés perpendiculairement sur la surface criblante. Un paramètre très important caractérisant cette surface est la surface utile de passage par unité de surface totale ; elle s'exprime en pourcentage de vide, ou transparence, et varie de 20 à 75 % selon la nature des surfaces et la dimension des ouvertures.

I.7.3. Tamisage

I.7.3.1. Tamisage à sec ou humide

Mouvement tridimensionnel combiné vertical et circulaire favorisant l'homogénéisation de l'échantillon sur la totalité du tamis pour un tamisage rapide et efficace. Il existe en fait : deux types de surface tamisante ; toiles tissées à maille carrées ; tamis et toiles perforées de trous ronds dénommées ; passoires. Pour les 2 types de surfaces tamisantes, la caractéristique essentielle est la dimension du vide que les fils du tissu ou les trous de passoires laissent entre eux.

Les normes existantes AFNOR, DIN (DIN ISO 3310.), BRITISH STANDARD, ISA, ASTME, TYLER fixent généralement les ouvertures de tamis. La méthode utilisée est celle correspondant à la plus petite ouverture réalisable et qui est de 0. 02 mm (20 µm).

A partir de celle-ci toutes les autres dimensions d'ouverture (mailles) sont les termes successifs de la progression géométrique de raison $10\sqrt{10} = 1,259$ (ou série de Renard).

Figure I.11 : Tamiseur vibrant.

I.8. Lit fixe

Un lit fixe est une masse poreuse constituée des particules consolidés ou non consolidés. Les particules ont des formes déterminées et dispersées dans une distribution orientée.

L'écoulement du fluide à l'intérieur du lit est accompagné par une dégradation de l'énergie, qui se manifeste par une perte de pression, ce phénomène se fait dans le sens ascendant ou descendant et la hauteur du lit restera constante pendant l'écoulement du fluide.

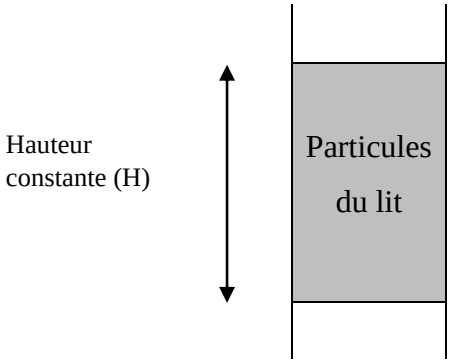


Figure I.12: Un lit fixe

I.9. Lit fluidisé

Un lit fluidisé, est un lit de particules dispersées sur une plaque poreuse, ce lit est traversé par un fluide ascendant dont on augmente progressivement la vitesse en fût vide (Uo). Au cours de la fluidisation, les particules sont individualisées et sujets à des mouvements variées dans toutes les directions, le lit a une hauteur H qui croit avec le débit du fluide.

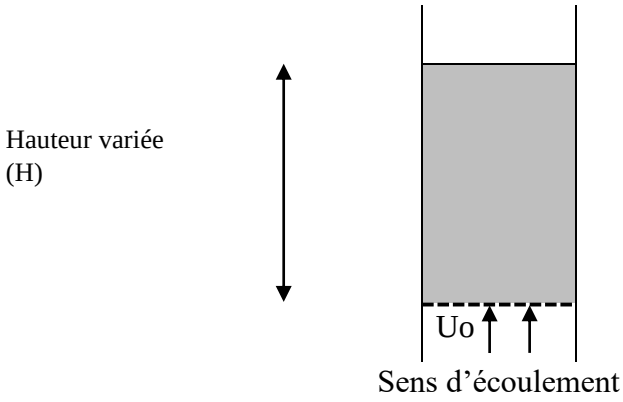


Figure I.13 : Un lit fluidisé.