







# table des matières

<b>introduction</b>	<b>1</b>
<hr/>	
<b>Chapitre 1 : caractérisation des solides pulvérulents</b>	<b>3</b>
1.1. caractérisation d'une particule unique	3
1.1.1. taille	3
1.1.2. forme	4
1.1.2.1. facteur de forme	4
1.1.2.2. indices d'allongement et d'aplatissement	4
1.1.3. résistance mécanique	5
1.1.4. porosité et surface spécifique	5
1.2. caractérisation d'une population de particules	5
1.2.1. granulométrie	5
1.2.1.1. méthodes de mesure	5
1.2.1.2. distribution granulométrique	8
1.2.2. masse volumique	10
1.2.3. surface spécifique	11
1.2.4. distribution de taille de pores	11
1.2.5. propriétés liées à l'écoulement	11
1.2.5.1. angles caractéristiques	11
1.2.5.2. évaluation de la coulabilité	12
1.3. échantillonnage	13
<hr/>	
<b>Chapitre 2 : fragmentation &amp; agglomération</b>	<b>15</b>
2.1. réduction de taille : fragmentation	15
2.1.1. mécanismes de fragmentation	15
2.1.2. grandeurs caractéristiques	15
2.1.2.1. taux de réduction	16
2.1.2.2. énergie de fragmentation	16
2.1.3. appareillages	17
2.1.4. conclusion	21
2.2. augmentation de taille	21
2.2.1. granulation	21
2.2.2. agglomération par compression	22
<hr/>	
<b>Chapitre 3 : classification &amp; mélange</b>	<b>23</b>
3.1. classification	23
3.1.1. classification par taille et/ou par masse volumique	23
3.1.2. classification par une propriété magnétique ou électrostatique	27
3.2. mélange	27
<hr/>	
<b>Chapitre 4 : transport &amp; stockage</b>	<b>29</b>
4.1. transport	29
4.1.1. transport discontinu	29
4.1.2. transport continu	30
4.1.2.1. bande transporteuse	30
4.1.2.2. vis de transfert	30
4.1.2.3. transporteur à chaînes	30
4.1.2.4. élévateur à godets	31
4.1.3. transport pneumatique	32
4.2. stockage	32
4.2.1. distinction et analogies des poudres avec les fluides	32

4.2.2. répartition des pressions dans un silo	32
4.2.3. vidange d'un silo	33
4.2.3.1. vidange naturelle des silos	34
4.2.3.2. vidange mécanique des silos	35
<b>conclusion</b>	<b>36</b>
<b>📖 références bibliographiques</b>	<b>37</b>
<b>📌 ce qu'il faut retenir...</b>	<b>38</b>

## liste des exercices

 exercice 1-1 : taille et forme d'un anneau de Raschig.....	4
 exercice 1-2 : distribution granulométrique et diamètres moyens d'une poudre.....	9
 exercice 2-1 : puissance de broyage .....	16
 exercice 2-2 : broyeur à boulets .....	19
 exercice 3-1 : efficacité d'un tamis .....	25
 exercice 4-1 : calcul d'un silo.....	34

# introduction

La Figure 1 rappelle les dimensions caractéristiques correspondant aux différentes appellations : poudres, solides divisés, milieux granulaires. On peut également rencontrer le terme générique de (solide) pulvérulent.

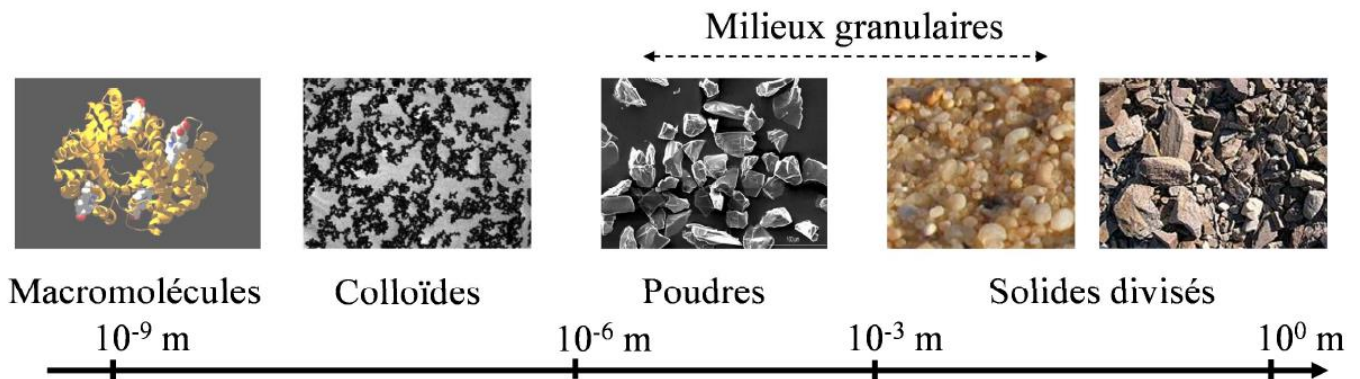


Figure 1 : Poudres, solides divisés et milieux granulaires. 📖 Thierry RUIZ

La transformation de matières premières en produits finis implique toujours des processus purement mécaniques : découpage, triage, comptage, transport, mise en contact ... Toutes ces opérations sont regroupées sous le vocable d'Opérations Unitaires Mécaniques (OUM) dans la mesure où elles ne mettent en jeu que des phénomènes mécaniques, par opposition aux transferts de chaleur ou encore aux transferts de matière entre phases (mis en jeu dans les Opérations Unitaires de Transfert : OUT). Comme le montre le Tableau 1, on peut distinguer trois types d'opérations fondamentales : **modification de taille, séparation, mélange**. Ces opérations mécaniques peuvent intervenir isolément (fragmentation, tamisage, décantation, filtration, ...), mais également au sein d'autres opérations unitaires (agitation de la cuve d'un réacteur, écoulement à travers le garnissage d'une colonne à distiller, fluidisation pour le séchage, ...). Ainsi les opérations unitaires mécaniques concernent presque tous les appareillages du génie des procédés : réacteurs, séparateurs, appareils pour la mise en forme de produits et appareils de liaison.

Tableau 1 : Les trois types d'Opérations Unitaires Mécaniques. 📖 d'après MIDOUX

	type d'opérations	dénomination	exemple
modification de taille	RÉDUCTION		
	liquides	dispersion	séchage
	matériaux durs	broyage	traitement de minerais ; préparation en vue du retraitement du combustible nucléaire
	matériaux consistants	découpage	traitement de fibres végétales
modification de taille	AUGMENTATION		
	solides	mise en granulés	engrais
		coagulation	lait
		agglomération	produits pharmaceutiques
		extrusion	plastiques
séparations	liquide / liquide	séparation gravitaire	séparation des solutions aqueuses de produits organiques
	liquide / solide	décantation ;	} traitement des eaux usées
		centrifugation ;	
		filtration ;	
	flottation ;	traitement des minerais	
	pressage	traitement de pulpes végétales	
solide / solide	classification	triage de grains en fonction de la taille, la densité, la forme, ...	

mélange	phases solubles	agitation	dilution de solutions concentrée ; réactions chimiques homogènes
	phases insolubles	mélange	extraction liquide-liquide
		homogénéisation	émulsification
		mise en suspension	crystallisation ; réaction avec catalyseur hétérogène
	systèmes consistants	pétrissage	préparation de polymères, pâtes

Nombre de ces opérations unitaires mécaniques mettent en jeu des pulvérulents. Leur traitement industriel concerne quelques dizaines de milliards de tonnes par an, ce qui représente environ **60% de la production industrielle**. Les domaines concernés sont -entre autres- la chimie, la pharmacie, la cosmétique, l'agroalimentaire, le nucléaire, l'industrie des polymères, la métallurgie, sans oublier les catalyseurs et les garnissages utilisés dans de nombreux procédés. La science liée à la technologie du traitement industriel des poudres s'est surtout développée depuis un siècle environ, par conséquent la théorie de ces opérations unitaires est beaucoup moins avancée que celle liée à la distillation par exemple.

L'objectif des industriels est de préparer économiquement des produits ayant certaines **propriétés d'usage** : aspect extérieur, propriétés gustatives, texture, aptitude à l'écoulement, vitesse de dissolution, capacité à flotter, résistance à l'abrasion, ... Même si ces propriétés d'usage n'apparaissent souvent qu'en fin de fabrication, elles sont le résultat de toutes les opérations qui ont précédé, d'où la difficulté d'obtenir ces propriétés. De plus en plus on cherche désormais à partir de la propriété d'usage recherchée et -par ingénierie inverse- définir le procédé qui permettra de l'obtenir, c'est le **génie des produits**.

Ces deux sciences (technologie des poudres et génie des produits) n'en sont encore qu'à leurs débuts...

### ☞ plan du cours

Ce cours est consacré aux opérations purement mécaniques effectuées sur des solides pulvérulents seuls, en l'absence de fluide (mis à part l'air ambiant, ou éventuellement une atmosphère contrôlée inerte).

Le premier chapitre sera consacré à la caractérisation des solides pulvérulents.

Le deuxième chapitre abordera les opérations de fragmentation et d'agglomération.

Le troisième chapitre s'intéressera à la classification et au mélange des poudres.

Le quatrième chapitre fera le point sur le transport et le stockage.

# Chapitre 1 : caractérisation des solides pulvérulents

L'état d'un fluide (liquide ou gaz), c'est-à-dire l'ensemble de ses propriétés (masse volumique, viscosité, capacité calorifique, conductivité thermique, ...), est parfaitement défini dès lors que l'on a précisé sa composition chimique, la température et la pression. Dans le cas d'un solide pulvérulent, ces propriétés dépendent également dans une large mesure de la forme, de la taille des grains, et de leur état de surface. L'objet de ce chapitre est de préciser comment l'on peut caractériser une particule solide tout d'abord, et une population de particules ensuite.

## 1.1. CARACTÉRISATION D'UNE PARTICULE UNIQUE

Même si dans les procédés industriels, on n'a jamais affaire à une seule particule, il est nécessaire de s'intéresser à la caractérisation d'une particule unique avant de pouvoir aborder le cas d'une population de particules. Une particule solide est caractérisée, en plus de sa composition, par sa taille, sa forme, sa résistance mécanique, sa surface spécifique et sa porosité.

### 1.1.1. taille

Pour simplifier grandement les études ultérieures de procédés, il est judicieux de caractériser la taille d'une particule par une seule dimension. Dans le cas d'une sphère, cette dimension est tout simplement le diamètre de la sphère. Dans le cas d'une particule de forme quelconque, on choisit souvent d'exprimer sa dimension comme étant le diamètre de la sphère équivalente. Plusieurs références peuvent être choisies, selon l'application considérée :

- ✓ diamètre de la sphère de même volume

$$d_V = \left( \frac{6 \cdot V_p}{\pi} \right)^{1/3}$$

- ✓ diamètre de la sphère de même surface

$$d_A = \left( \frac{A_p}{\pi} \right)^{1/2}$$

- ✓ diamètre de la sphère de même surface par unité de volume

$$d_p = \frac{6}{a_p}, \text{ avec } a_p = \frac{A_p}{V_p}$$

- ✓ diamètre de la sphère de même surface projetée dans la direction de l'écoulement

$$d_C = \sqrt{\frac{4 \cdot \Omega_C}{\pi}}$$

Plus les valeurs de ces diamètres sont proches, plus la particule est similaire à une sphère, et plus les corrélations de la littérature (généralement établies pour des particules sphériques) sont utilisables.

☞ La difficulté est souvent de mesurer  $A_p$  et  $V_p$ .

## 1.1.2. forme

On voit que la forme de la particule est intimement liée à sa dimension.

### 1.1.2.1. facteur de forme

Pour caractériser la forme des particules, on peut calculer son facteur de forme (ou facteur de sphéricité), qui est un nombre adimensionnel :

$$\checkmark \psi_V = \frac{\text{surface de la sphère de même volume que la particule}}{\text{surface de la particule}} = \left( \frac{d_V}{d_A} \right)^2$$

$$\checkmark \psi_A = \frac{\text{volume de la sphère de même surface que la particule}}{\text{volume de la particule}} = \left( \frac{d_A}{d_V} \right)^3$$

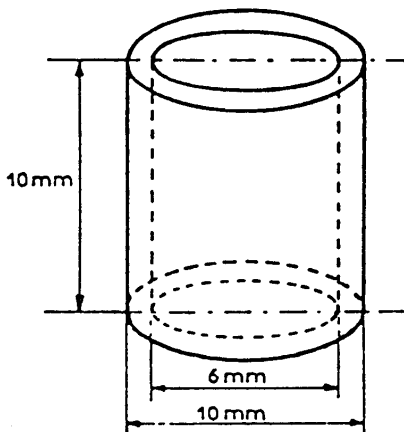
$$\checkmark \psi_p = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{surface de la sphère de même surface par unité de volume que la particule}}{\text{surface de la particule}} \\ \frac{\text{volume de la sphère de même surface par unité de volume que la particule}}{\text{volume de la particule}} \end{array} \right\} = \left( \frac{d_p}{d_A} \right)^2 = \left( \frac{d_p}{d_V} \right)^3$$

$$\checkmark \psi_C = \frac{\text{volume de la sphère de même surface projetée que la particule}}{\text{volume de la particule}} = \left( \frac{d_C}{d_V} \right)^3$$



#### exercice 1-1 : taille et forme d'un anneau de Raschig

↳ Calculer les diamètres équivalents de l'anneau de Raschig ci-dessous, et les facteurs de forme correspondants.



### 1.1.2.2. indices d'allongement et d'aplatissement

On peut également caractériser la forme d'une particule à l'aide des indices d'allongement et d'aplatissement :

$$\checkmark \text{indice d'allongement} = \frac{\text{largeur}}{\text{longueur}}$$

$$\checkmark \text{indice d'aplatissement} = \frac{\text{épaisseur}}{\text{largeur}}$$

↑ allongement

plaquettes

sphères  
cubes

filaments

→ aplatissement

☞ Lorsque les dimensions (réelles) d'une particule sont du même ordre de grandeur dans les trois directions de l'espace, on parle de **particule isométrique** (sphère, cube, par exemple). Les particules dont l'une des dimensions est nettement plus faible que les deux autres, sont qualifiées de **plaquettes** ; celles dont deux des dimensions sont nettement plus faibles que la troisième, sont appelées **filaments** ou **aiguilles**.

### 1.1.3. résistance mécanique

La résistance mécanique d'une particule correspond à plusieurs propriétés :

- ✓ dureté : on la quantifie soit par des essais de rayure par différents matériaux (dureté de Mohs), soit à partir de l'empreinte laissée par une pointe de diamant (dureté de Knoop) ;
- ✓ abrasivité : elle correspond à la rugosité (dimension ET forme) de la surface des particules. Il n'existe pas de test normalisé pour quantifier l'abrasivité, bien que cette notion soit importante. On peut imaginer de mesurer l'usure d'un morceau de bois agité dans la poudre dont on veut estimer l'abrasivité ;
- ✓ rigidité : c'est la résistance à la traction, la flexion, voire l'écrasement. Elle est mesurée à l'aide du module d'élasticité du matériau (module d'Young) ;
- ✓ ténacité : c'est la résistance à la cassure. Elle est quantifiée en mesurant l'énergie nécessaire pour provoquer une déformation permanente ;
- ✓ friabilité : c'est la résistance à l'attrition, c'est-à-dire **la perte de petits fragments sous l'effet des chocs**.

☞ Dans le cas des agglomérats, cette caractérisation est particulièrement importante puisque leur résistance mécanique est souvent moindre que celle des particules "mono-grain".

### 1.1.4. porosité et surface spécifique

Bien que ces aspects soient très importants pour caractériser une particule, des mesures ne peuvent être effectuées que sur des populations de particules, ces notions seront donc abordées dans la partie suivante.

## 1.2. CARACTÉRISATION D'UNE POPULATION DE PARTICULES

Dans un procédé, c'est bien sûr sur une population de particules et non une particule seule, que l'on est amené à travailler.

### 1.2.1. granulométrie

La granulométrie consiste à caractériser la taille d'une population de particules, n'ayant pas forcément toutes la même dimension.

#### 1.2.1.1. méthodes de mesure

Ces méthodes doivent permettre de compter le nombre de particules de telle ou telle taille dans un échantillon représentatif. (Le Tableau 3 page 7 présente un récapitulatif des différentes méthodes. ☞ *Il est à compléter.*)

### 1.2.1.1.1. mesure au microscope

Cette mesure convient aux particules de taille inférieure à 100 µm et supérieure à 1 µm pour les mesures avec un microscope classique, 1 nm pour les mesures avec un microscope électronique à balayage (MEB).

On peut réaliser un comptage manuel, à l'aide d'un comparateur tel que celui représenté sur la Figure 2. Ce comptage manuel est bien sûr très fastidieux, toutefois, il existe actuellement des logiciels de traitement et d'analyse d'image qui permettent d'effectuer des mesures automatiques.

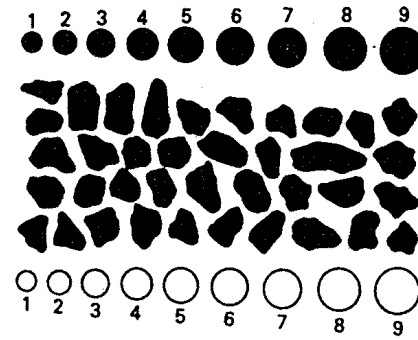


Figure 2 : Comparateur pour le décompte manuel de particules au microscope. COULSON & RICHARDSON

### 1.2.1.1.2. tamisage

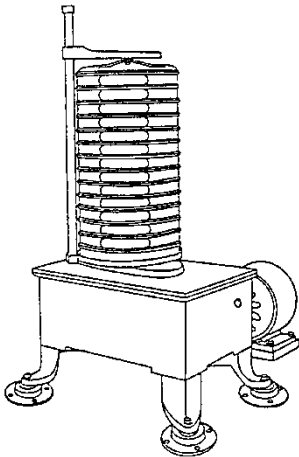


Figure 3 : Tamis vibrant. PERRY

Pour mesurer la distribution granulométrique de particules de taille supérieure à 50 µm, on peut utiliser une série de tamis de mailles carrées, disposés sur un support vibrant, comme le montre la Figure 3. On récupère les particules les plus grosses dans le tamis du haut et les plus petites dans celui du bas (on appelle parfois ce tamis le *talon*). On pèse le lot de particules recueillies dans chaque tamis et on leur attribue une taille moyenne correspondant à la moyenne arithmétique des dimensions des mailles des deux tamis définissant ce lot (c'est-à-dire le tamis dans lequel on a récupéré le lot et celui juste au-dessus).

L'ouverture des mailles des tamis est normalisée, comme indiqué dans le Tableau 2. Ainsi le rapport entre les ouvertures de deux tamis successifs est constant, appelé *raison*. Dans le cas de la série AFNOR, la raison vaut  $r = (\sqrt[10]{10})^m$ , avec  $m = 1$  ou 2 ou 3.

Tableau 2 : Standardisation des tamis. DARRIGO

AFNOR NF X. 11.501			NORME ALLEMANDE D.I.N. 1171			NORME BRITANNIQUE BS 410.1931			NORME INTER- I.S.A. 24			NORME AMÉRICAIN A.S.T.M.E. 11			TYLER		
n°	ouverture		n°	ouverture		n°	ouverture		n°	ouverture		n°	ouverture		n°	ouverture	
	pouces	mm		pouces	mm		pouces	mm		pouces	mm		pouces	mm		pouces	mm
17	0,0019	0,04	0,060	0,0024	0,060	300	0,0021	0,053	200	0,0025	0,063	325	0,0017	0,044	400	0,0015	0,038
18	19	5	0,075	30	75	240	26	66	150	33	84	270	21	53	325	17	43
19	24	63	0,090	35	90	200	30	76	120	42	0,107	230	24	62	270	21	53
20	31	80	0,100	40	0,100	170	35	89	100	50	127	200	29	74	230	24	61
21	39	0,100	120	47	120	150	41	0,104	90	55	139	170	34	88	200	29	74
22	49	125	150	59	150	120	49	124	80	62	157	140	41	0,105	170	35	88
23	63	160	200	79	200	100	60	162	70	71	180	120	49	125	150	41	0,104
24	78	200	250	98	250	85	70	178	60	83	211	100	59	149	115	49	124
25	98	250	300	0,0118	300	72	83	211	50	0,0100	254	80	70	177	100	58	147
26	0,0124	315	400	157	400	60	99	261	40	125	317	70	83	210	80	69	173
27	157	400	430	169	430	52	0,0116	295	30	166	421	60	98	250	65	82	208
28	196	500	500	196	500	44	139	353	20	250	635	50	0,0117	293	60	97	248
29	248	630	600	236	600	36	166	422	16	312	792	45	138	350	48	0,0116	295
30	315	800	750	295	750	30	197	500	12	416	1,056	40	165	420	42	138	351
31	393	1,000	1,000	393	1,000	25	236	299	10	500	1,270	35	197	500	35	164	417
32	492	1,250	1,200	473	1,200	22	275	699	8	620	1,574	30	232	590	32	195	495
33	630	1,600	1,500	590	1,500	18	336	853	5	0,1000	2,540	25	280	710	28	232	589
34	787	2,000	2,000	787	2,000	16	396	1,003				20	331	840	24	276	701
35	984	2,500	2,500	984	2,500	14	474	1,204				18	394	1,000	20	328	833
36	0,1240	3,150	3,000	0,118	3	12	553	1,405				14	555	1,410	16	390	991
37	1570	4	4	157	4	10	660	1,676				12	661	1,680	14	460	1,168
38	1970	5	5	197	5	8	810	2,057				10	787	2,000	12	550	1,397
			6	236	6	7	949	2,411				8	937	2,380	10	650	1,651
						6	0,1107	2,812				7	0,1110	2,830	9	780	1,981
						5	1320	3,353				6	1320	3,360	8	930	2,362
												5	1570	4,000	7	0,1100	2,794
												4	1870	4,760	6	1310	3,327
															5	1560	3,962
															4	1850	4,699
															3½	2210	5,613
															3	2630	6,680
															2½	3120	7,925



Certaines particules, de forme allongée notamment, peuvent ou non passer dans le tamis inférieur selon leur orientation, ce qui introduit une incertitude sur les mesures. D'autre part, dans le cas de matériaux particulièrement fragiles, le tamisage sur banc vibrant peut conduire à la fragmentation des particules, et donc fausser les mesures. Malgré tout, cette méthode est **très répandue** pour la mesure de distributions granulométriques, de par sa **simplicité** et sa **fiabilité**.

1.2.1.1.3. compteur Coulter

Une suspension de particules (de taille comprise entre 1 et 100 µm) dans un **électrolyte** circule dans un tube et passe devant un orifice (souvent de taille réglable), de chaque côté duquel sont placées deux électrodes (Figure 4). Un courant constant alimente ces électrodes. Lorsqu'une particule passe devant l'orifice, elle déplace son volume d'électrolyte et la résistance du circuit électrique varie. Il suffit de mesurer cette variation de résistance pour accéder au diamètre de la sphère de même volume que la particule.

Pour que cette méthode donne de bons résultats, il faut que les particules soient isolantes, que le diamètre de la particule n'excède pas 40% de celui de l'orifice, et surtout il faut une **suspension diluée** (pour éviter d'avoir plusieurs particules devant l'orifice en même temps, qui seraient interprétées comme une seule "grosse" particule). L'autre inconvénient est que l'on détecte aussi les éventuelles bulles d'air.

☞ Pour effectuer des mesures **en ligne** : on fera la mesure directement si la poudre existe sous forme de suspension diluée dans un électrolyte, sinon on fera une dérivation de la production, on préparera la suspension diluée dans un électrolyte, et selon les cas, on réinjectera la poudre dans le procédé.

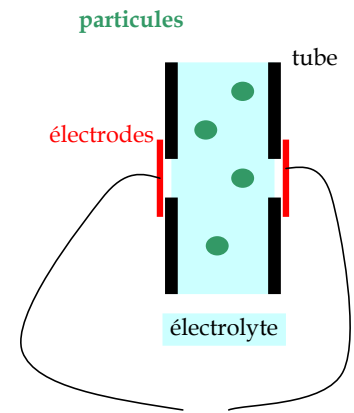


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un compteur Coulter.

1.2.1.1.4. granulomètre laser

Cette méthode concerne des particules de taille comprise entre 0,5 et 50 µm. Le dispositif est similaire au précédent, mais cette fois on ne place pas deux électrodes de part et d'autre de l'orifice, mais une source lumineuse et un photodétecteur. On mesure ainsi le diamètre de la sphère de même surface projetée dans la direction du faisceau lumineux. Comme précédemment, la suspension doit être diluée, mais le liquide peut ne pas être conducteur ; on peut même effectuer des mesures en phase gazeuse.

La Figure 5 et la Figure 6 montrent des appareils commerciaux.



Figure 5 : Granulomètre de laboratoire. 📖 MALVERN



Figure 6 : Granulomètres industriels.

Tableau 3 : Récapitulatif des méthodes de mesure de distributions granulométriques.

	taille des particules mesurables	diamètre mesuré	remarques
microscope			
tamis			
compteur Coulter			
granulomètre laser			

### 1.2.1.2. distribution granulométrique

Il s'agit de représenter les résultats des mesures.

#### 1.2.1.2.1. représentation graphique

On peut représenter les fractions  $f$  (relatives) en nombre ou en masse de particules ayant une taille donnée. La somme des fractions de toutes les tailles possibles est alors égale à UN.

On peut aussi représenter la distribution granulométrique en fraction cumulée  $F$ . La fraction cumulée de particules de plus grande taille vaut donc UN.

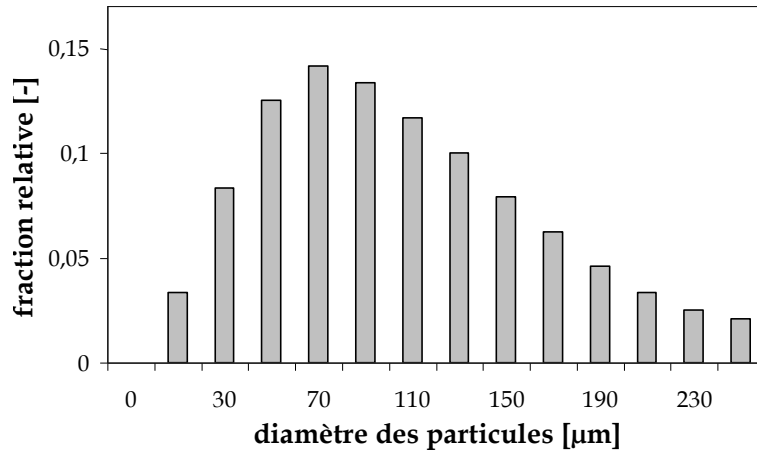


Figure 7 : Distribution granulométrique sous forme d'histogramme.

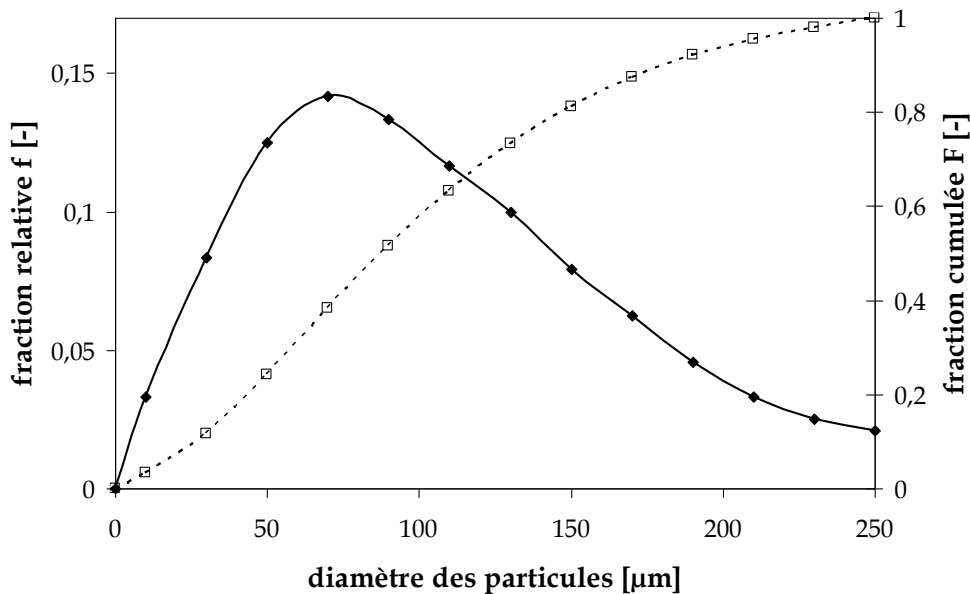


Figure 8 : Fractions relative et cumulée d'une distribution granulométrique.

#### 1.2.1.2.2. diamètre moyen

Selon que  $f$  (ou  $F$ ) est donnée en masse ou en nombre, le diamètre moyen d'une distribution est qualifié de diamètre moyen en masse ou en nombre. Il peut être défini comme :

- ✓ le diamètre le plus fréquent (*très utilisé*)

$d_f$  (correspondant à  $f$  maximum)

- ✓ le diamètre moyen arithmétique (également appelé diamètre moyen pondéré)

$$d_a = \sum_i f_i \cdot d_i$$

- ✓ le diamètre moyen géométrique

$$d_g = \prod_i (d_i)^{f_i} = \exp \left( \sum_i f_i \cdot \ln(d_i) \right)$$

- ✓ le diamètre moyen harmonique (*rarement utilisé*)

$$d_h = \left( \sum_i \frac{f_i}{d_i} \right)^{-1}$$

✓ le diamètre médian (*très utilisé*)

$d_{50}$  (correspondant à  $F = 50\%$ )



Les distributions granulométriques et les diamètres moyens en masse sont de loin les plus utilisés.



*exercice 1-2 : distribution granulométrique et diamètres moyens d'une poudre*

Une poudre a été analysée par tamisage avec les résultats ci-dessous.

<b>ouverture du tamis [mm]</b>	4	3,15	2,5	2	1,6	1,25	1	0,8	0,63	0,5	0,4	0,315	0,25	0,2	0,16	0,125	0,1	0,08
<b>masse recueillie [g]</b>	0	98	106	143	158	187	267	330	286	220	154	88	66	53	44	31	22	10

↪ Tracer la distribution granulométrique correspondante en fraction relative  $f$  et en fraction cumulée  $F$ .

↪ Calculer les différents diamètres moyens.

## 1.2.2. masse volumique

On définit la **masse volumique apparente** d'un lot de particules selon :

$$\rho_{app} = \frac{\text{masse totale}}{\text{volume total}}$$

La **porosité** de ce lot (c'est la fraction de "trous") est notée  $\varepsilon$ . Elle est telle que :

$$\rho_{app} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{théo}$$

Pour mesurer la masse volumique apparente d'une poudre, on pèse un échantillon de cette poudre, que l'on place dans une éprouvette graduée, comme illustré sur la Figure 9.

☞ Il existe aussi une masse volumique dite "**tassée**", dont la mesure est normalisée.

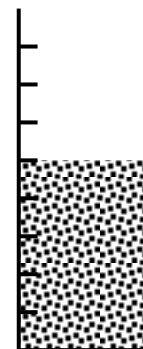


Figure 9 : Mesure de masse volumique apparente d'une poudre.

### 1.2.3. surface spécifique

C'est la surface totale des particules d'un échantillon (y compris la surface à l'intérieur des pores) rapportée au volume de l'échantillon occupé par du solide. On la note généralement  $a_s$ , son unité est le plus souvent exprimée en  $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$  ou en  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ .

Elle est reliée à  $a_p$  par la relation :  $a_s = (1 - \varepsilon) \cdot a_p$

On peut la mesurer par la méthode B.E.T. (Brunauer-Emmet-Teller), qui consiste à mesurer la quantité de gaz (généralement de l'azote) nécessaire pour tapisser la surface d'un échantillon d'une monocouche de molécules de gaz adsorbées.

### 1.2.4. distribution de taille de pores

La distribution de taille de pores peut être mesurée par porosimétrie au mercure pour des pores de 15  $\mu\text{m}$  à 4 nm, et par porosimétrie à l'azote pour des pores de 50 à 2 nm.

### 1.2.5. propriétés liées à l'écoulement

L'indice mesurant l'aptitude d'une poudre à s'écouler est appelé **coulabilité**. Il en existe de nombreuses définitions, mais on procède surtout par comparaison par rapport à des matériaux tests, ou bien pour vérifier la régularité d'une production.

La **compressibilité** d'une poudre peut être caractérisée en comparant  $\rho_{app}$  et  $\rho_{tassée}$ . La **cohésion** caractérise les frottements entre particules, c'est-à-dire la tendance au mottage. L'**adhésion** caractérise les frottements entre les particules et une paroi, c'est-à-dire la tendance à encroûter ces parois. Ces propriétés sont liées aux forces d'interaction superficielle (électrostatique par exemple), à l'effet de l'humidité et éventuellement aux fluctuations de température qui peuvent modifier la structure du matériau.

#### 1.2.5.1. angles caractéristiques

Pour quantifier ces propriétés, on utilise des angles caractéristiques. Les plus courants sont les suivants :

- ✓ angle de talus (Figure 10) ;
- ✓ angle de glissement (Figure 11) ;
- ✓ angle de frottement interne (Figure 12).

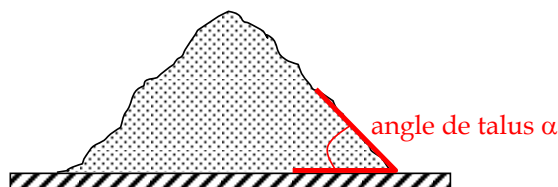


Figure 10 : Principe de mesure de l'angle de talus.

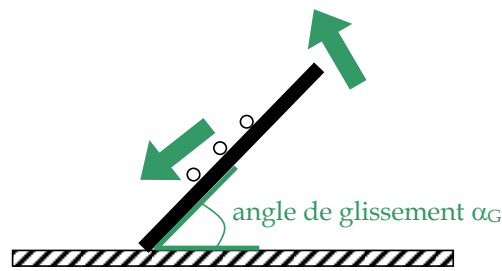


Figure 11 : Principe de mesure de l'angle de glissement.

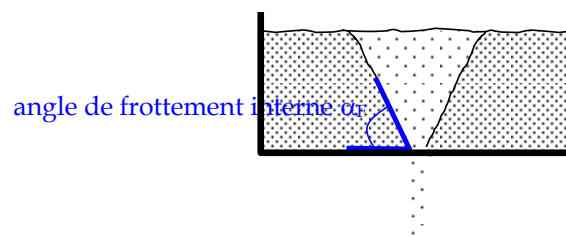


Figure 12 : Principe de mesure de l'angle de frottement interne.

### 1.2.5.2. évaluation de la coulabilité

☞ *rapport d'HAUSSNER et indice de CARR*

À partir des mesures de masse volumique apparente et de masse volumique "tassée", on définit :

✓ le rapport d'HAUSSNER :

$$HR = \frac{\rho_{tassée}}{\rho_{apparente}}$$

✓ indice de CARR :

$$IC = \frac{\rho_{tassée} - \rho_{apparente}}{\rho_{tassée}}$$

On donne alors les diagnostics résumés dans le Tableau 4 et le Tableau 5.

Tableau 4 : Diagnostic de coulabilité avec le rapport d'HAUSSNER. 📖 d'après TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

rapport d'HAUSSNER	diagnostic pour la poudre
$HR \leq 1,25$	sableuse, granuleuse
$1,25 < HR < 1,4$	fusante
$HR \geq 1,4$	cohésive

Tableau 5 : Interprétation de l'indice de CARR.  d'après TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

indice de CARR	coulabilité	diagnostic pour la poudre
0,05 à 0,15	excellente	sableuse, granuleuse, sans fines ni fibres
0,15 à 0,18	bonne	
0,18 à 0,22	médiocre	avec peu de fines
0,22 à 0,35	mauvaise	avec fines, fusante
0,35 à 0,40	très mauvaise	cohésive
$IC > 0,40$	exécrable	très cohésive

*☞ évaluation de la coulabilité à partir de l'angle de talus*

On donne les diagnostics résumés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Diagnostic pour la poudre à l'aide de l'angle de talus.  d'après TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

angle de talus	coulabilité
$< 30^\circ$	excellente
30 à $50^\circ$	passable
$> 50^\circ$	exécrable

*☞ quantification de l'aptitude à l'écoulement à l'aide de l'appareil de HALL*

La méthode (norme NF A 95-113) consiste à mesurer le temps nécessaire à l'écoulement de 50,0 g de poudre à travers un entonnoir d'angle  $60^\circ$  et présentant un orifice de 2,50 mm. Le résultat est exprimé comme un débit d'écoulement, en faisant le rapport entre la masse d'échantillon (en grammes) et la moyenne sur trois essais des temps mesurés (en secondes).

Dans la pratique, cette dimension d'orifice est souvent insuffisante pour les poudres peu coulantes, et on effectue des tests avec des orifices plus grands, en prenant soin de préciser sa dimension pour accompagner tout résultat fourni.

### 1.3. ÉCHANTILLONNAGE

Pour toutes ces mesures, l'échantillonnage est un problème épineux. Il faut en effet que l'échantillon prélevé soit représentatif du produit. Il faut par conséquent que le système de prélèvement ne prélève pas préférentiellement certaines particules et que l'échantillon soit suffisamment "grand" pour que les hétérogénéités du produit soient représentées. Il est également nécessaire que la méthode de mesure soit aussi fiable pour tous les types de particules (les grosses comme les fines, par exemple pour une mesure de distribution granulométrique). Enfin si le produit est très hétérogène, il pourra être utile de tester plusieurs échantillons.

☞ Pour aller plus loin sur la question de l'échantillonnage, on pourra lire avec profit la partie qui y est consacrée dans le module en ligne « Sciences et Technologies des Poudres » par Cendrine GATUMEL et al. : <http://nte.mines-albi.fr/STP/co/C5.html>

On citera ici la conclusion :

**Comment faire un échantillonnage correct ?**

Un échantillonnage doit être effectué dans un écoulement. Il est impossible d'échantillonner correctement une grande quantité de solides statiques.

Il faut utiliser un échantillonneur correct qui réalise une prise d'un échantillon représentatif.

- Prélèvement de la totalité du courant pendant une fraction de temps
- Vérifier que l'échantillonneur prélève chaque filet de solides pendant le même temps de manière à ne pas introduire une erreur de délimitation.

- S'assurer que les conditions de prise sont correctes. Faire en sorte que les morceaux dont le centre de gravité se trouve à l'intérieur de l'échantillonneur tombe dedans.

Éviter toute contamination de l'échantillon une fois prélevé.

Plus le milieu sera hétérogène plus il faudra redoubler d'attention lors de la prise d'échantillon.



## Chapitre 2 : fragmentation & agglomération

On souhaite généralement fabriquer un produit avec une taille moyenne, et éventuellement une distribution de tailles ou une surface spécifique, données. Ceci soit pour préparer un produit avant un traitement (augmenter la réactivité d'un solide consommable, faciliter le transport d'une poudre, par exemple) ou pour finaliser un produit avant sa vente (obtenir l'intensité voulue pour la couleur de pigments, un goût particulier du chocolat ou du thé, une bonne résistance d'un ciment, par exemple).

### 2.1. RÉDUCTION DE TAILLE : FRAGMENTATION

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.

#### 2.1.1. mécanismes de 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  $\mu\text{m}$ ) ;
- ✓ coupure - cisaillement ;
- ✓ attrition - frottement.

Le principe de ces différents mécanismes est illustré sur la Figure 13.

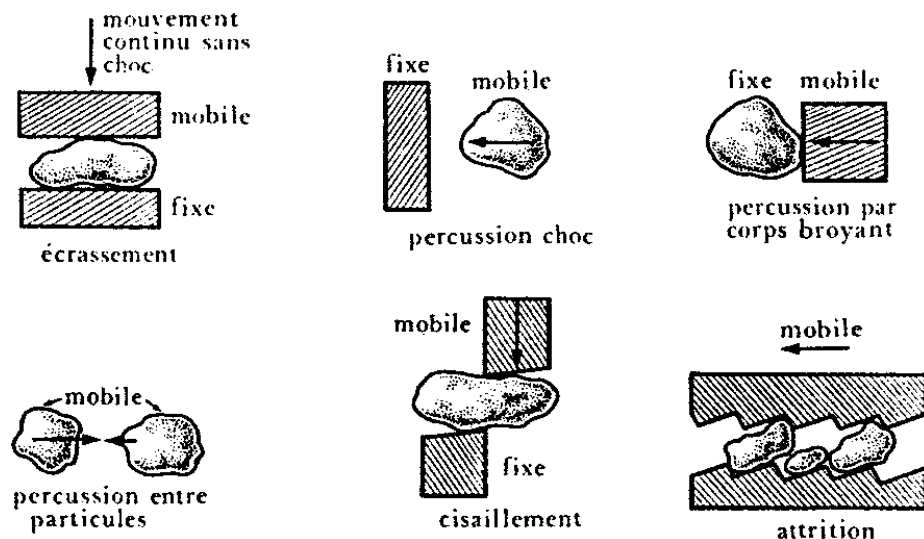


Figure 13 : Mécanismes de fragmentation.  DARRIGO

#### 2.1.2. grandeurs caractéristiques

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

### 2.1.2.1. taux de réduction

On définit le taux (ou rapport ou degré) de réduction :  $r = \frac{D}{d}$ . 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.

### 2.1.2.2. énergie 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 créées :

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

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

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

- ✓ la **loi de Bond**, est réputée plus précise que les deux précédentes :

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

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.



#### exercice 2-1 : puissance de broyage

Lors du broyage d'un solide, le produit d'alimentation est tel que 80% du produit a une taille inférieure à 5 cm et le matériau broyé est tel que 80% a une taille inférieure à 0,63 cm. La puissance de broyage nécessaire pour réaliser cette opération est de 89,5 kW.

☞ Quelle sera la puissance nécessaire pour que, partant du même produit initial, 80% du matériau broyé ait une taille inférieure à 0,315 cm (avec le même débit) ?

### 2.1.3. appareillages

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 pulvérisateurs (< 1 mm).

#### 2.1.3.1.1. appareils de fragmentation 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 14).

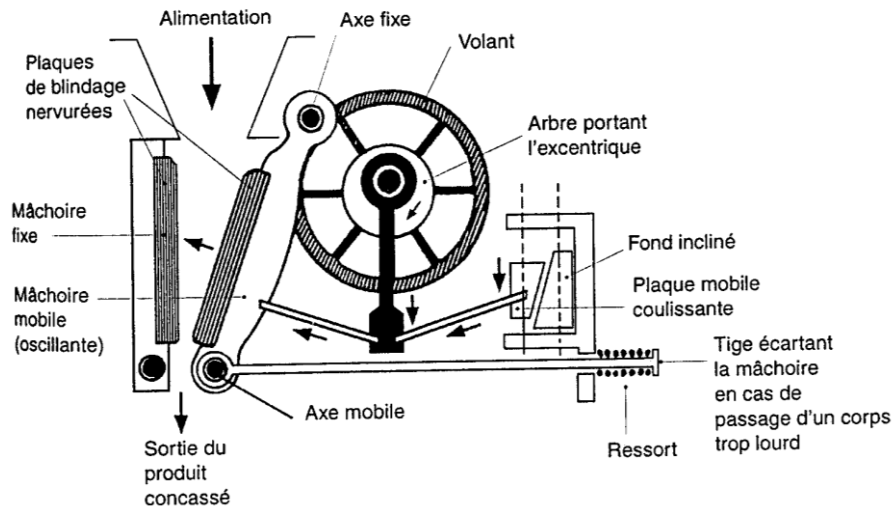


Figure 14 : Concasseur à mâchoires. ANGLARET

Le **concasseur giratoire** (Figure 15) 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.

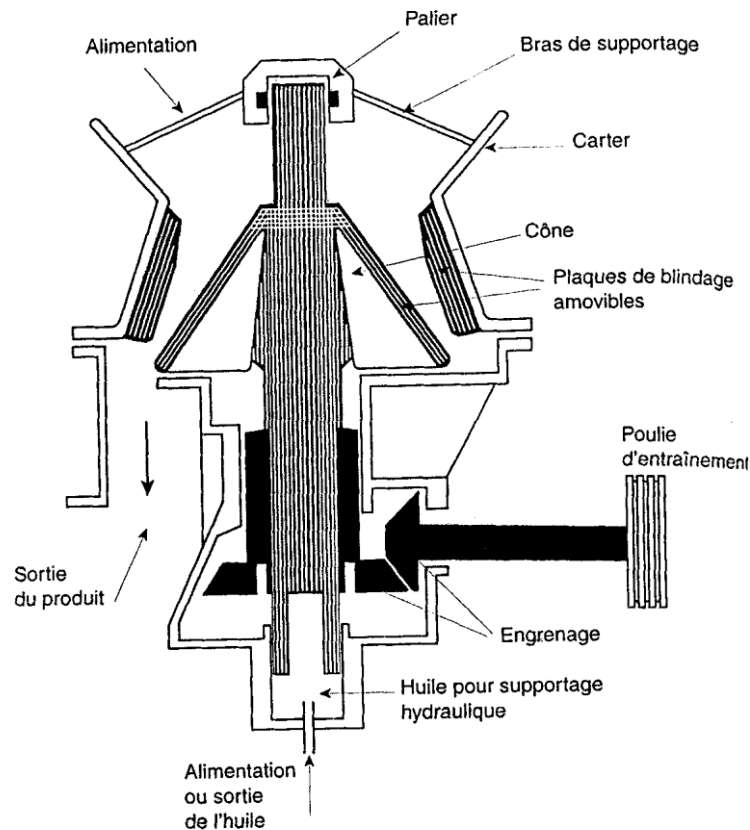
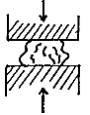


Figure 15 : Concasseur giratoire. ANGLARET



Enfin le **broyeur à cylindres** 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.

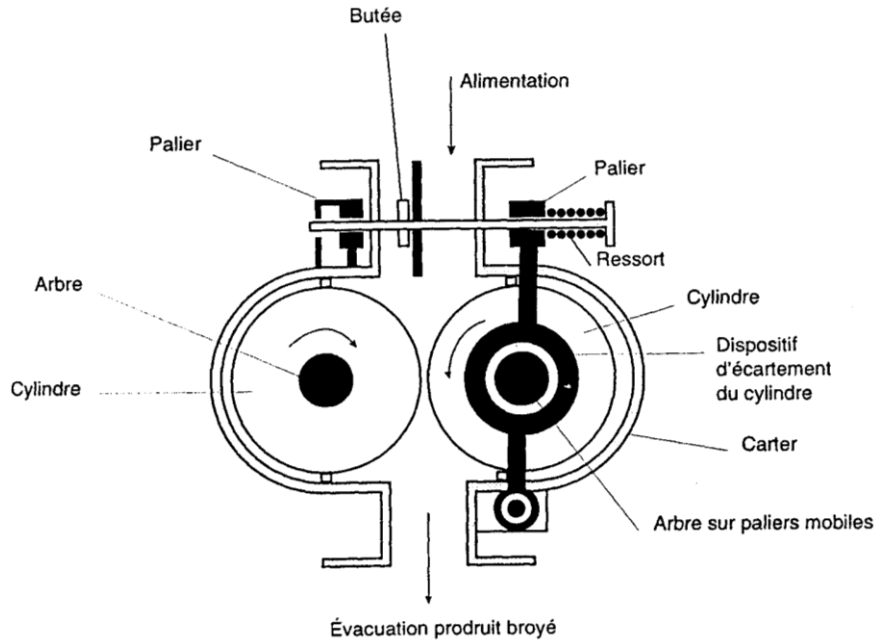


Figure 16 : Broyeur à cylindres. ANGLARET

### 2.1.3.1.2. appareils de fragmentation par impact - percussion

La fragmentation dans le **broyeur à marteaux** (Figure 17) 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 18) est similaire, toutefois les broches sont fixes. Ce broyeur convient pour des matières fibreuses.

Le **broyeur à barres** est représenté sur la Figure 19.

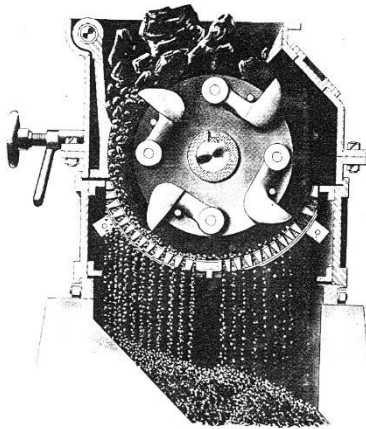
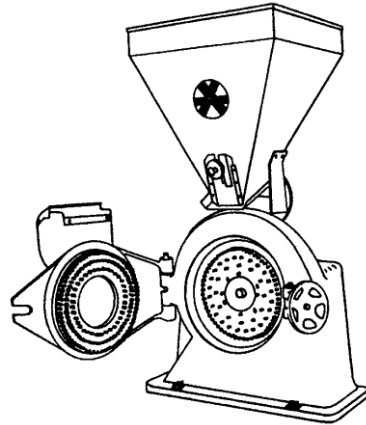


Figure 17 : Broyeur à marteaux. COULSON & RICHARDSON



PERRY

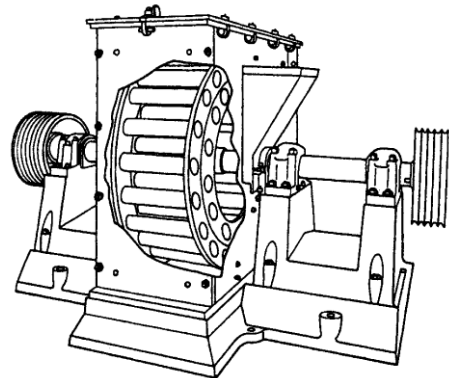


Figure 19 : Broyeur à barres. PERRY

Le **broyeur à boulets** est très utilisé pour obtenir des produits fins. Son principe est représenté sur la Figure 21. Pour un bon fonctionnement, le taux de remplissage ne doit pas excéder 30 %. Comme illustré sur la Figure 20, 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.

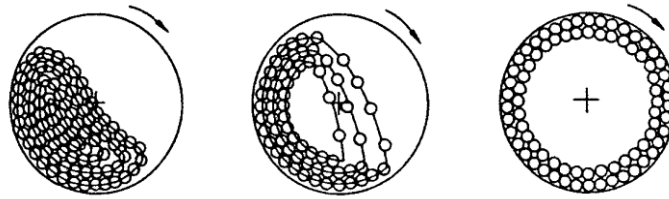


Figure 20 : Mouvement des boulets dans un cylindre tournant.

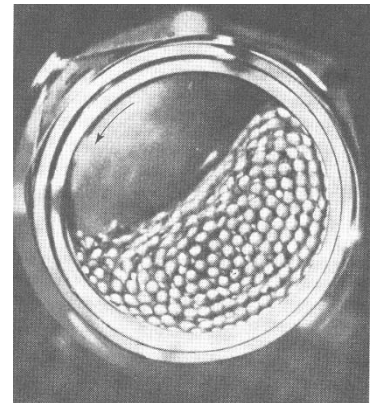
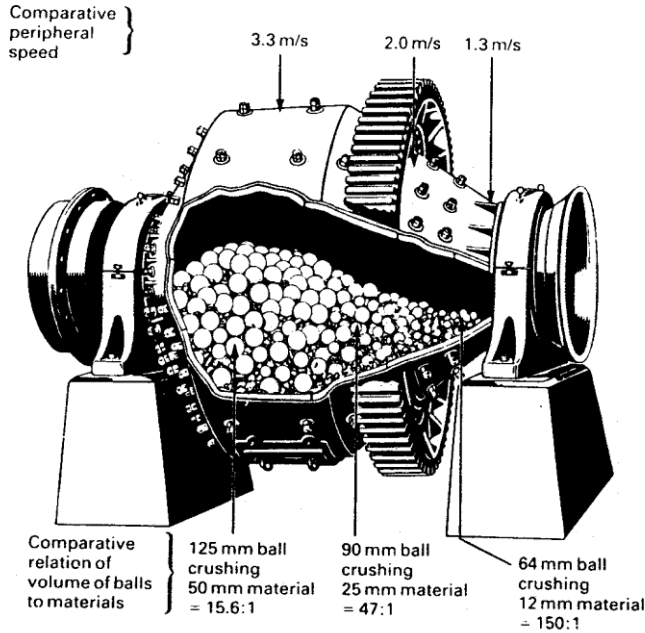


Figure 21 : Broyeur à boulets. COULSON & RICHARDSON



exercice 2-2 : broyeur à boulets

d'après Henri FAUDET

Un broyeur à boulets cylindrique, de 3,5 m de diamètre intérieur et de 4,5 m de longueur, est utilisé pour broyer un minerai de chalcopirite (minerai de sulfures de cuivre et de fer). La mesure de la distance entre le niveau de la charge (minerai + boulets) et le niveau supérieur du broyeur est de 1,9 m.

Les masses volumiques des boulets et du minerai sont respectivement de 6250 kg m<sup>-3</sup> et 1600 kg m<sup>-3</sup>. La charge contient 34% de minerai.

Les boulets font 5 cm de diamètre.

↳ Calculer le degré de remplissage du broyeur (c'est-à-dire le rapport entre le volume occupé par la charge et le volume total du broyeur).

↳ Calculer la masse de boulets et la masse de minerai.

La vitesse de rotation efficace du broyeur est telle que  $\omega_{efficace} = \frac{23}{\sqrt{R-r}} = \frac{32}{\sqrt{D-d}}$ , où  $R$  et  $D$  sont le rayon et le diamètre du broyeur et  $r$  et  $d$  le rayon et le diamètre des boulets.

La vitesse critique est telle que  $\omega_{critique} = \frac{29,91}{\sqrt{R-r}}$ .

↳ Calculer la vitesse de rotation efficace et la vitesse critique.

### 2.1.3.1.3. appareils de fragmentation par attrition - frottement



Le **broyeur à meule** (Figure 22) fonctionne en discontinu, par frottement et compression. Il permet d'atteindre des taux de réduction élevés.

Le **broyeur à jet** d'air (Figure 23) permet d'obtenir des poudres très fines (microniques).

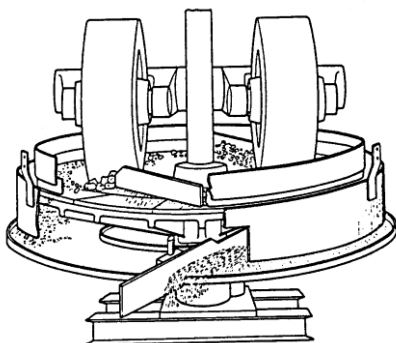


Figure 22 : Broyeur à meule.

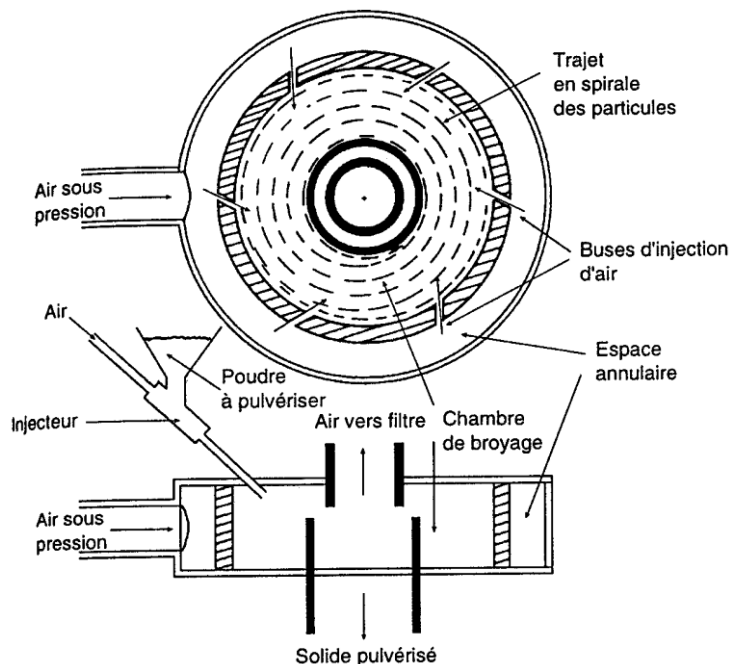


Figure 23 : Broyeur à jet d'air. ANGLARET

### 2.1.3.1.4. appareils de fragmentation par coupe - cisaillement

Le **broyeur à couteaux** (Figure 24 & Figure 25) est constitué de lames montées sur un rotor (ou un stator).

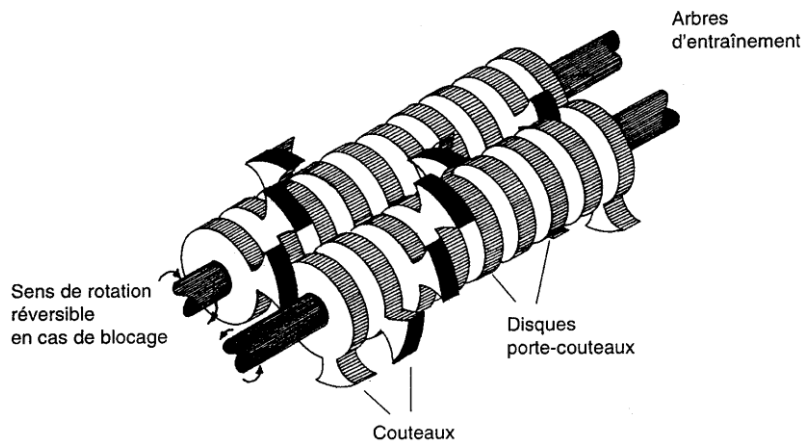


Figure 24 : Broyeur à couteaux. ANGLARET

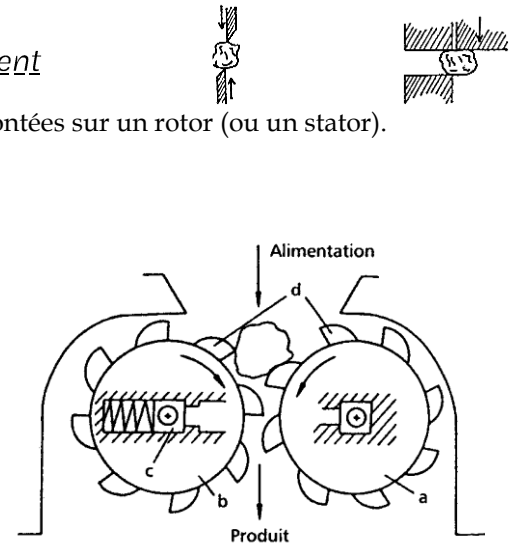


Figure 25 : Broyeur à couteaux. KOLLER

## 2.1.4. conclusion

On obtient toujours une distribution granulométrique, et non une population de taille unique.

Le broyage trouve des applications notamment dans l'agroalimentaire, la pharmacie, la cosmétique et l'environnement (compostage).

## 2.2. AUGMENTATION DE TAILLE

De nombreuses industries font appel à des procédés d'augmentation de taille de particules : pour éviter les poussières (risque d'inhalation ou d'explosion), pour uniformiser la taille de populations de particules, pour faciliter la manipulation de poudre, ...

Le mécanisme de l'agglomération met en jeu des forces électrostatiques, des forces de Van der Waals, des forces capillaires (en présence de liants), des ponts solides (obtenus par compression ou frittage).

### 2.2.1. granulation

La granulation est une agglomération sans compression, en présence de liants. Elle peut être réalisée dans des granulateurs à plateau (Figure 26) ou à tambour (Figure 27). Il s'ensuit généralement un traitement thermique ou un séchage. Les granulés ainsi obtenus sont de forme plus ou moins quelconque.

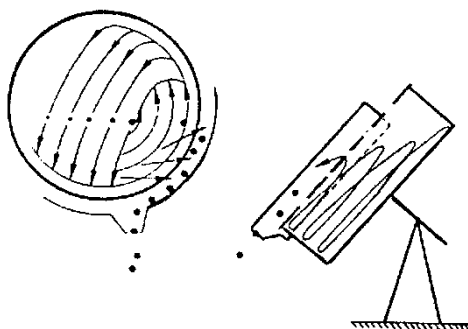


Figure 26 : Granulateur à plateau. KOLLER

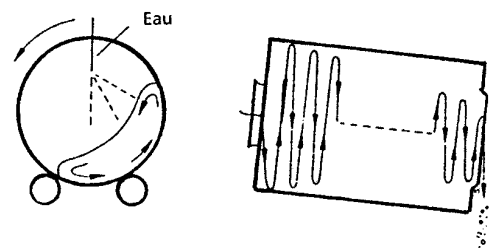


Figure 27 : Granulateur à tambour. KOLLER

## 2.2.2. agglomération par compression

Ce type d'agglomération permet d'obtenir des particules de forme et de taille définies. L'agglomération peut se faire par extrusion (Figure 29), pastillage (Figure 30) ou compression en voie humide (Figure 28).

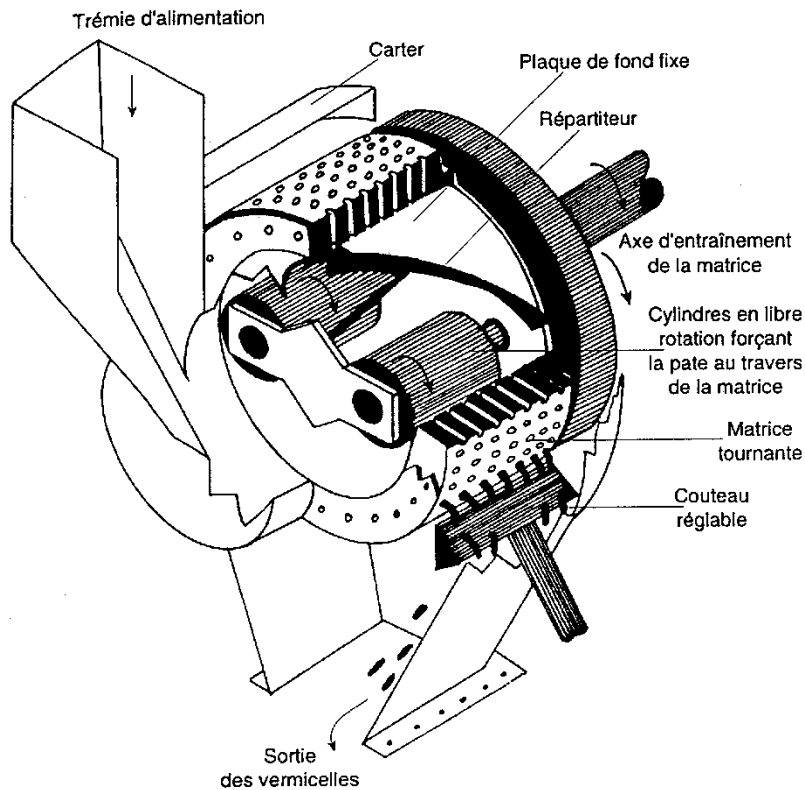


Figure 28 : Granulater à compression en voie humide. ANGLARET

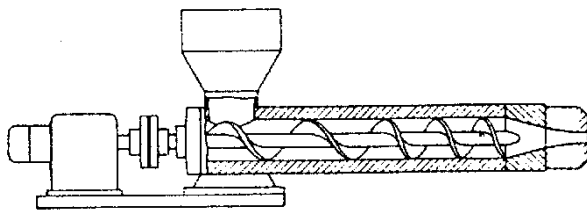


Figure 29 : Extrudeuse. KOLLER

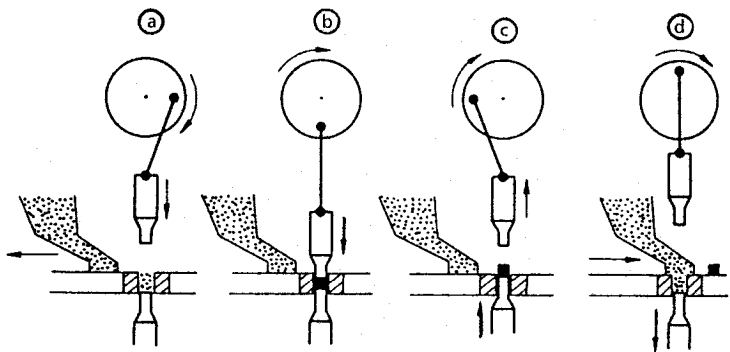


Figure 30 : Fabrication de comprimés. KOLLER

Ces différentes technologies sont étudiées en détails dans les enseignements de génie des procédés pharmaceutiques (unités d'enseignement PHA).



## Chapitre 3 : classification & mélange

Si l'on considère une population de particules de propriétés différentes, on peut chercher à les séparer (traitement du minerai par exemple) ou à les mélanger (formulation de cosmétiques, médicaments ou détergents par exemple).

### 3.1. CLASSIFICATION

La propriété qui diffère d'une particule à l'autre peut être la taille, la masse volumique, voire les deux, ou encore une propriété magnétique ou électrostatique.

#### 3.1.1. classification par taille et/ou par masse volumique

Le procédé le plus simple de classification par taille à l'échelle industrielle est le **tamissage**. D'autres techniques permettent de classer des particules par taille et/ou par masse volumique :

- ✓ la **table oscillante** (Figure 31) :

La différence de vitesse entre les allers et retours de la table a pour effet de faire avancer les particules dans les rainures dans le sens où la vitesse est la plus faible (du fait de l'inertie des particules). De plus, les particules avancent d'autant plus vite dans les rainures qu'elles sont plus lourdes (soit plus grosses, soit plus denses). Enfin pendant la phase où la table se déplace à grande vitesse, les particules ont tendance à chuter le long de sa pente ;

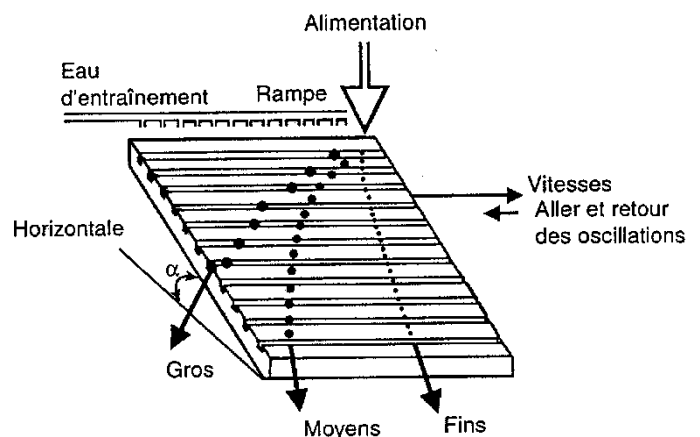


Figure 31 : Table oscillante. 📖 ANGLARET

- ✓ la **fluidisation** (elle sera abordée dans le cours d'hydrodynamique) ;
- ✓ le **classeur à cône**, basé sur le principe de la centrifugation (qui sera étudiée dans le cours sur les opérations mécaniques fluide/solide) ;
- ✓ le **classeur à air**, basé sur le principe de la décantation (qui sera étudiée dans le cours sur les opérations mécaniques fluide/solide) ;
- ✓ le **tamissage**, qui est détaillé au paragraphe suivant.

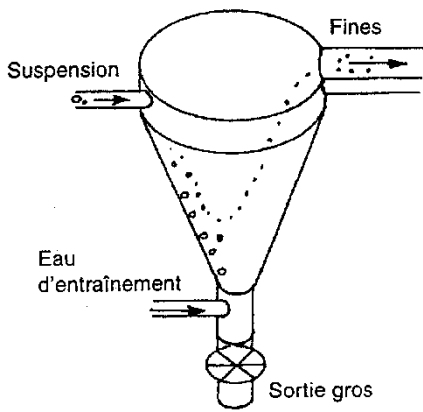


Figure 32 : Classeur à cône. ANGLARET

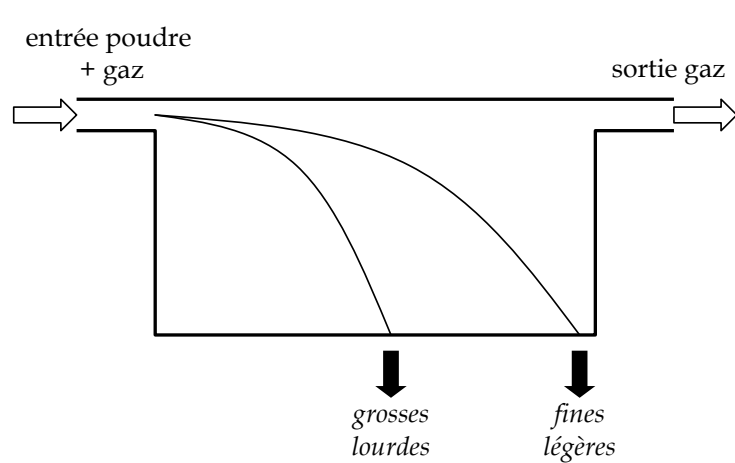


Figure 33 : Classeur à air.

### tamisage

La Figure 34 illustre le principe du tamisage. La surface tamisante peut être une série de barreaux (pour le tri des grosses particules), une "passoire" (surface perforée) ou un tamis (grille ou toile).

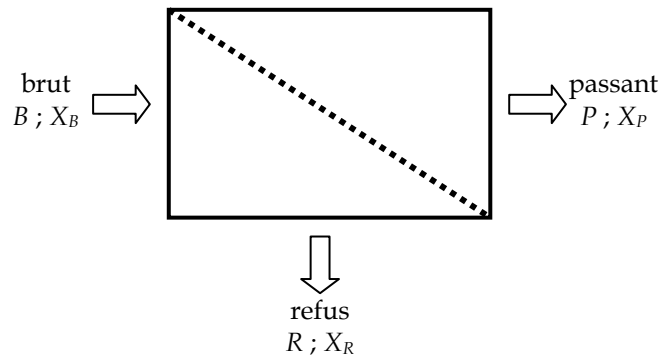


Figure 34 : Principe du tamisage.

L'opération de tamisage peut-être effectuée pour différents buts :

- ✓ séparer les plus gros fragments (refus) contenus dans un mélange, soit en vue de les éliminer, soit en vue de leur faire subir une réduction de taille ;
- ✓ séparer les plus petits fragments, soit pour les agglomérer, soit pour les éliminer comme déchets ;
- ✓ classer les produits fragmentés en dimensions commerciales (matériaux de voirie, abrasifs, ...) ;
- ✓ classer les produits en vue d'opérations de traitement mécanique ou physico-chimique devant porter sur des dimensions homogènes (concentrations de minerais, lavage des charbons, ...).

On caractérise une opération de tamisage à l'aide de son **efficacité** :

Si la séparation est parfaite, les plus petites particules du refus sont légèrement plus grosses que les plus grosses du passant. Mais en réalité, certaines particules, du fait de leur forme allongée par exemple, parviennent à passer alors qu'elles ne devraient pas ; au contraire, si l'accès à la surface tamisante est difficile (du fait de l'épaisseur trop importante de produit brut sur la toile par exemple, ou bien si l'agitation de ce brut est insuffisante), certaines particules qui auraient dû passer n'ont pas pu. Il est par conséquent nécessaire de définir une efficacité du tamisage.

- ✓ Si l'objectif du tamisage est de fournir le maximum de fines (c'est-à-dire  $X_P$  maximum ET  $X_R$  minimum), on définit :

$$E_1 = \frac{\text{quantité de produit intéressant récupéré}}{\text{quantité de produit intéressant dans le brut}} =$$

$$E_2 = \frac{\text{quantité de produit non intéressant dans les déchets}}{\text{quantité de produit non intéressant dans le brut}} =$$

Les bilans matière sur l'installation fournissent :

$$\text{On en déduit alors l'efficacité } E = E_1 \cdot E_2 = \frac{X_P}{X_B} \cdot \frac{X_B - X_R}{X_P - X_R} \cdot \frac{1 - X_R}{1 - X_B} \cdot \frac{X_B - X_P}{X_R - X_P}$$

✓ Si l'objectif du tamisage est au contraire de récupérer le maximum de grosses particules, on aura :

$$E = \frac{X_R}{X_B} \cdot \frac{X_B - X_P}{X_R - X_P} \cdot \frac{1 - X_P}{1 - X_B} \cdot \frac{X_R - X_B}{X_R - X_P}$$



### exercice 3-1 : efficacité d'un tamis

On traite un produit brut avec un tamis industriel d'ouverture 0,63 mm. Le résultat de l'analyse granulométrique (sur tamis de laboratoire normalisé) des trois flux (brut, produit, rejet) est donné ci-dessous en fractions massiques. Le "produit d'intérêt" doit avoir un diamètre supérieur à 0,63 mm.

ouverture du tamis [mm]	brut	rejet	passant
< 0,250	0,067	0,000	0,212
0,250	0,058	0,000	0,222
0,400	0,125	0,028	0,366
0,630	0,247	0,249	0,200
1,000	0,298	0,434	0,000
1,600	0,167	0,241	0,000
2,500	0,038	0,048	0,000

↳ Quel est le pourcentage de particules de diamètre inférieur à 0,63 mm contenues dans le brut, le rejet et le produit ? En déduire  $X_B$ ,  $X_R$  et  $X_P$ . Quelle quantité de "produit d'intérêt" obtient-on à partir d'une tonne de brut ? Calculer l'efficacité du tamis.

Les appareillages pour le tamisage doivent présenter une surface tamisante importante, assurer le déplacement du brut (inclinaison), favoriser l'accès des particules à la surface tamisante (rotation ou vibrations) et assurer le décolmatage (brosses ou injection d'air comprimé à contre-courant). Il existe par conséquent diverses technologies de tamis industriels :

- ✓ dans certains appareils rudimentaires (**cribles**) on jette simplement le brut (particules assez grosses) sur une surface inclinée immobile ;
- ✓ les **tamis vibrants** (Figure 35) permettent de traiter des particules de 0,3 à 120 mm, avec des débits pouvant atteindre plusieurs centaines de tonnes par heure. Le déplacement du brut est obtenu grâce à l'inclinaison du tamis. Pour obtenir parallèlement plusieurs classes de particules, on les superpose, comme illustré sur la Figure 36 ;
- ✓ les **tamis rotatifs**, également appelés tambours ou trommels (Figure 37) ont généralement une plus faible capacité et une plus faible efficacité que les tamis vibrants, mais ils permettent d'obtenir plusieurs classes avec un encombrement réduit. Le déplacement est obtenu soit par l'inclinaison du tambour, soit par sa forme conique. Pour obtenir plusieurs classes de particules, on augmente la taille des orifices de l'entrée vers la sortie (Figure 38), ou bien on superpose des tambours concentriques.

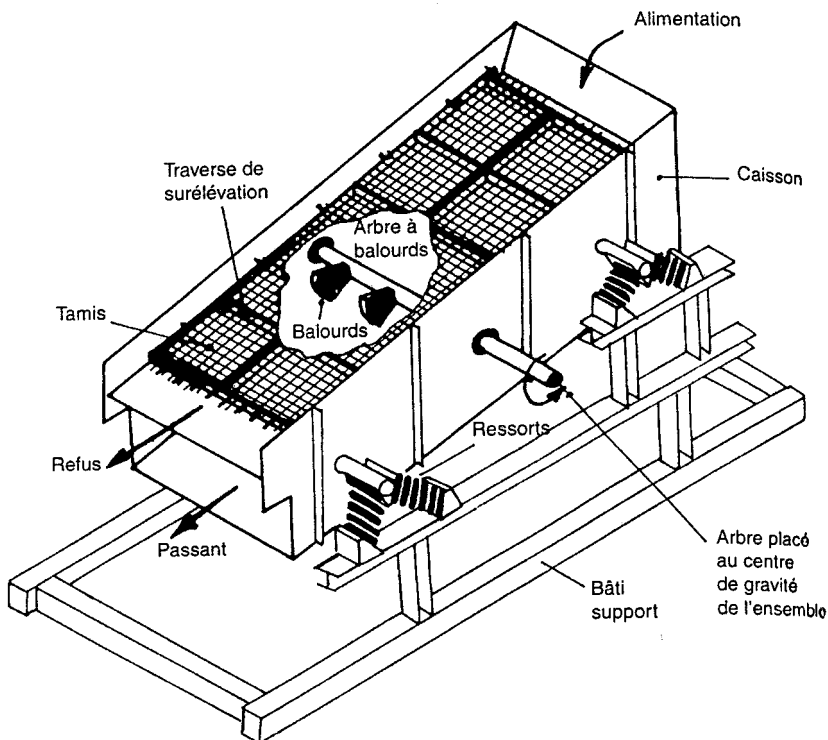


Figure 35 : Principe du tamis vibrant. ANGLARET

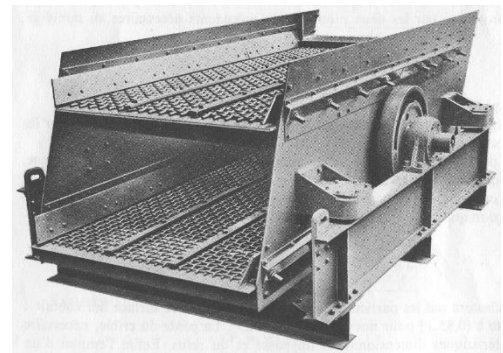


Figure 36 : Tamis vibrant. DARRIGO

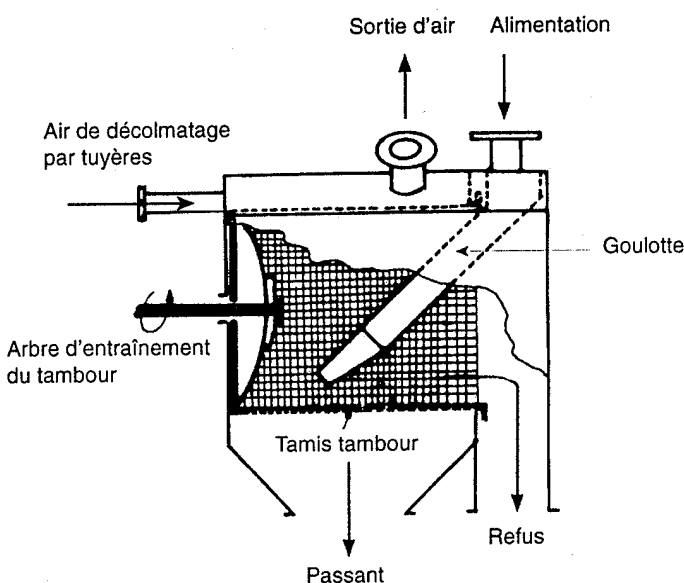


Figure 37 : Principe du tamis rotatif. ANGLARET

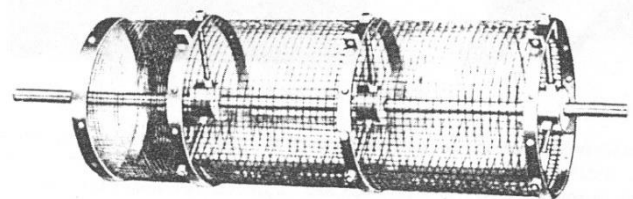


Figure 38 : Trommel. COULSON & RICHARDSON

### 3.1.2. classification par une propriété magnétique ou électrostatique

Le **tri magnétique** (Figure 39) est notamment exploité pour les ordures. Il faut une source de champ magnétique, une zone où ces forces agissent, un dispositif de circulation et des pots de récupération.

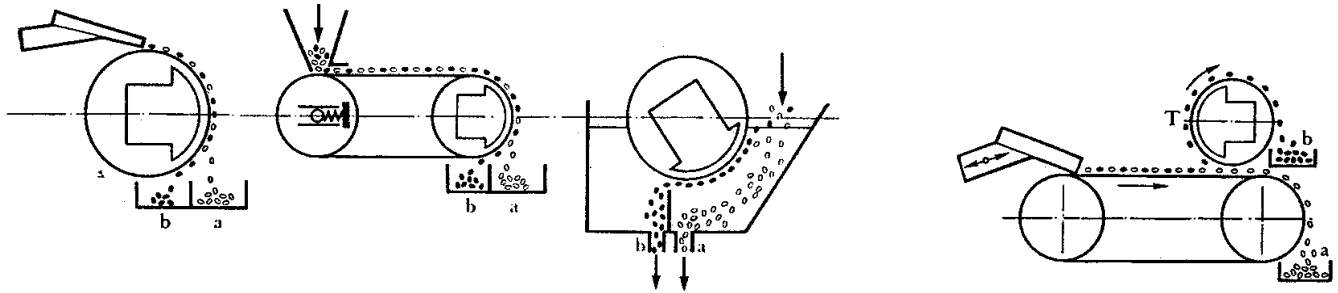


Figure 39 : Principe des appareils de tri magnétique. DARRIGO

Pour effectuer un **tri électrique**, soit on exploite l'éventuelle différence de conductivité des différents types de particules (Figure 40-a), soit on communique une charge électrique aux particules non conductrices, le plus souvent par frottement (Figure 40-b), ou encore par ionisation.

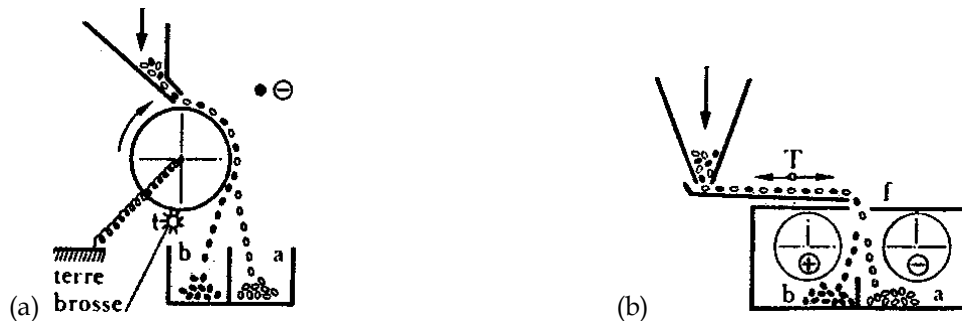


Figure 40 : Tri par différence de conductivité (a) et tri de particules non-conductrices (b). DARRIGO

## 3.2. MÉLANGE

Les particules dont la taille est supérieure à  $10 \mu\text{m}$  ne sont pratiquement plus animées de mouvement brownien, et n'ont par conséquent pas tendance à se mélanger. Il faut donc mettre en œuvre des appareillages pour favoriser ce mélange.

Sous l'effet de vibrations, les populations de particules ont au contraire tendance à subir une **ségrégation** :

- ✓ ségrégation par vibration : les plus grosses particules ont tendance à remonter en surface du lit de particules ;
- ✓ ségrégation par percolation : les plus fines particules traversent l'empilement de grosses comme dans un tamis et s'accablent au fond du réservoir ;
- ✓ ségrégation lors du déplacement : différentes particules, soumises à une même impulsion initiale, ont des trajectoires différentes.

La puissance requise pour mélanger des poudres est généralement beaucoup plus importante que celle qui est nécessaire pour mélanger des liquides (*l'étude de l'agitation des liquides sera faite lors du cours sur l'hydrodynamique*).

Lors d'une opération discontinue, le degré de mélange décroît généralement de façon exponentielle en fonction du temps.

### appareillages

On distingue trois grands types de mélangeurs de poudres :

- ✓ les **mélangeurs mobiles** mettent en rotation une cuve de forme variable (Figure 41 ; double-cône sur la Figure 43 ; mélangeur en V sur la Figure 42). Ils ne sont adaptés qu'aux poudres s'écoulant bien. Leur volume n'excède pas  $2 \text{ m}^3$  et la puissance dépensée est de l'ordre de  $1 \text{ kW m}^{-3}$ . Ils ont l'avantage de pouvoir travailler facilement sous atmosphère contrôlée (stérile par exemple) ;

- ✓ les **mélangeurs fixes** avec organe interne mobile sont de deux types :
  - **mélangeur à vis** : verticale pour les granulés (Figure 45) ou inclinée et animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe de la cuve pour les poudres (Figure 46),
  - **mélangeur à ruban** : si le passage d'un arbre ne pose pas de problème. Le mélange est assez lent, le volume ne peut pas excéder  $8 \text{ m}^3$  et la puissance dépensée est de l'ordre de  $4 \text{ kW m}^{-3}$  ;
- ✓ les **mélangeurs utilisant un fluide** fonctionnent :
  - **pneumatiquement** (Figure 47) sous l'effet d'un courant d'air violent (30-40 bar). Ces mélangeurs sont adaptés pour les très fines particules (poudres et farines). Leur volume est inférieur à  $200 \text{ m}^3$ ,
  - en **lit fluidisé** (qui sera étudié dans le cours sur l'hydrodynamique). Les particules doivent être ultra fines (taille inférieure à  $500 \mu\text{m}$ ), mais le volume peut atteindre  $10^4 \text{ m}^3$ . Le mélange est très rapide.

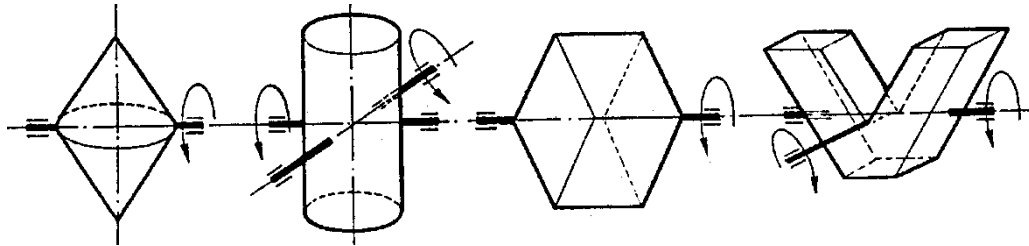


Figure 41 : Différentes formes de mélangeurs mobiles. 📖 DARRIGO

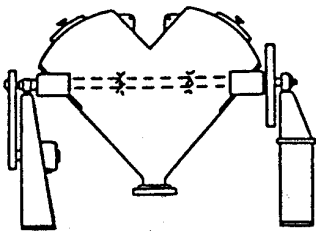


Figure 42 : Mélangeur en V. 📖 PERRY

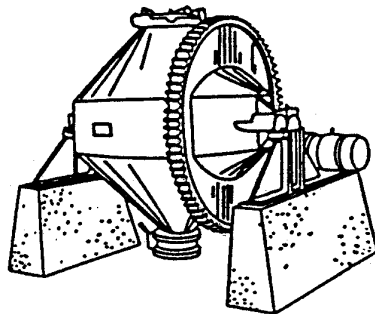


Figure 43 : Mélangeur double-cône. 📖 MCCABE & SMITH

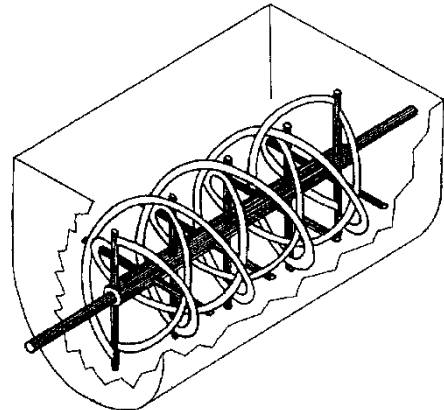


Figure 44 : Mélangeur à ruban. 📖 ANGLARET

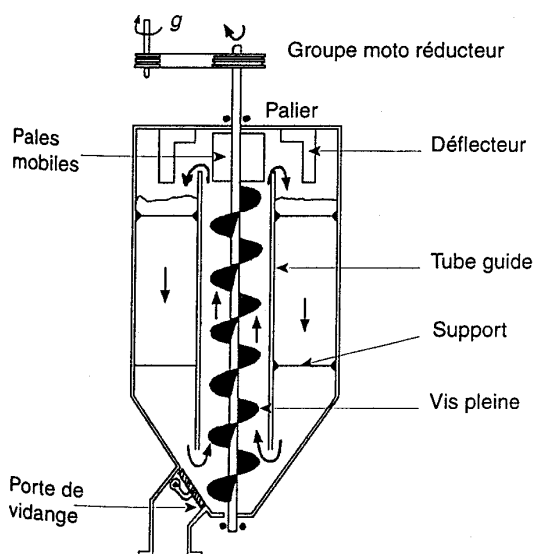


Figure 45 : Mélangeur à vis verticale. 📖 ANGLARET

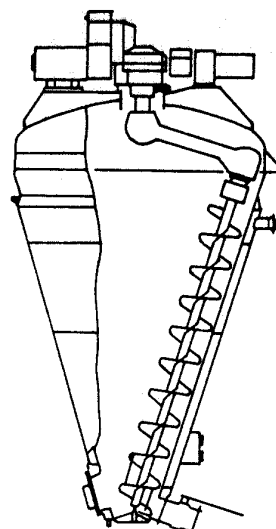


Figure 46 : Mélangeur à vis inclinée. 📖 ULLMANN

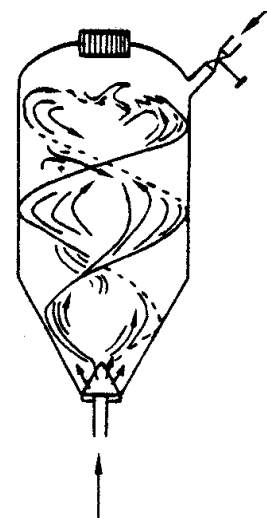


Figure 47 : Mélangeur pneumatique. 📖 ULLMANN

## Chapitre 4 : transport & stockage

La facilité de transport et de stockage d'un matériau pulvérulent dépend de ses propriétés d'écoulement : coulabilité et cohésion/adhésion.

### 4.1. TRANSPORT

Le choix d'un appareil est conditionné par le débit de la charge à transporter, la longueur du déplacement, la trajectoire (verticale, horizontale, inclinée) et la nature du matériau (granulométrie, dureté, abrasivité, ...). On distingue trois grandes catégories d'appareils, selon que le transport est discontinu, continu ou pneumatique.

#### 4.1.1. transport discontinu

Pour le transport, on pourra utiliser des chariots motorisés (transpalette, Figure 49). Pour le levage, on utilise des poulies, des ponts roulants (Figure 48), des grues.

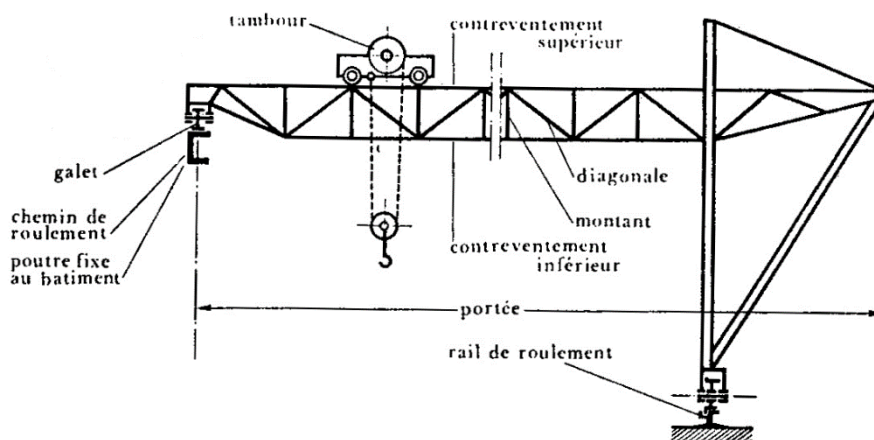


Figure 48 : Pont roulant. DARRIGO

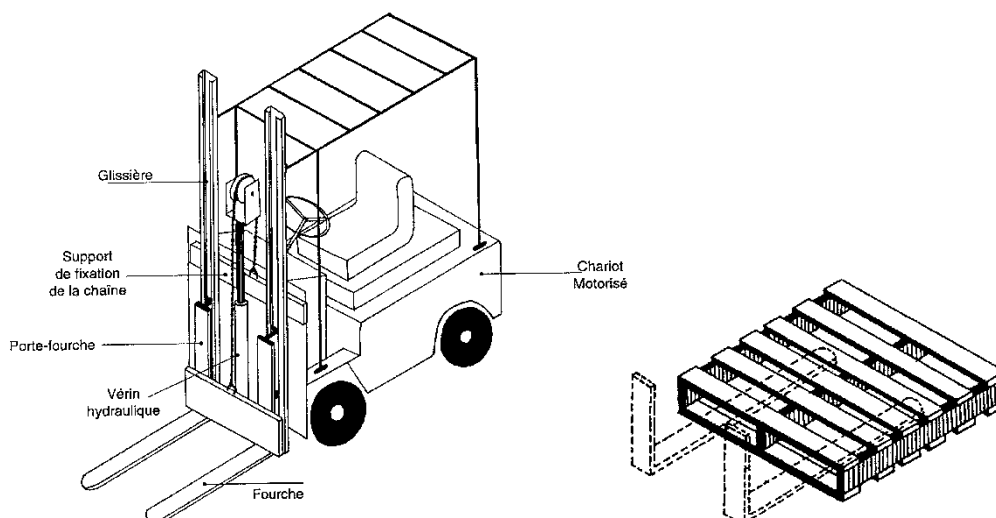


Figure 49 : Transpalette. ANGLARET

## 4.1.2. transport continu

Dans certains cas il est préférable d'effectuer un transport en continu.

### 4.1.2.1. bande transporteuse

Les bandes transporteuses (Figure 50) permettent le transport horizontal (ou éventuellement faiblement pentu : 20° maximum) sur quelques centaines de mètres, pour un débit maximum d'environ 1000 tonnes par heure (pour une vitesse de 1 à 2 m s<sup>-1</sup>).

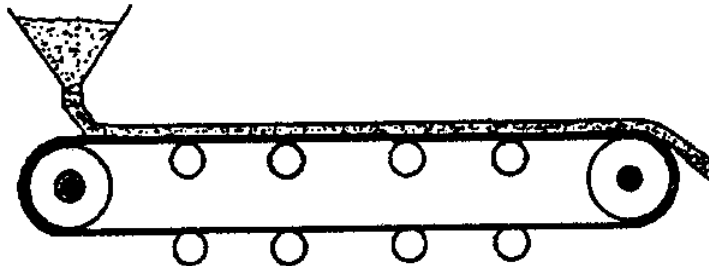


Figure 50 : Bande transporteuse. ANGLARET

Selon le type de solide pulvérulent transporté, la bande peut avoir diverses configurations (Figure 51). Le plus souvent, le solide repose sur une toile (éventuellement munie d'armatures). Dans le cas de matériaux très abrasifs, on pourra utiliser des tôles métalliques. La bande souple forme souvent une cuvette (plus ou moins creuse selon l'angle de talus du solide). Le solide est transporté le plus souvent à l'air libre, à la température maximale de 70°C.



Figure 51 : Les différentes configurations de bande transporteuse. PERRY

### 4.1.2.2. vis de transfert

Les vis de transfert permettent le transport horizontal (ou légèrement incliné) de poudres sur quelques mètres. Elles permettent le transport à l'abri de l'air, mais consomment une puissance motrice importante. La vitesse de rotation de la vis peut aller de quelques tours par minute jusqu'à environ 100 tr/min. Le taux de remplissage ne doit pas excéder 45 % (pour éviter le "bourrage"), 30 % pour les poudres fines, 15 % pour les produits abrasifs.

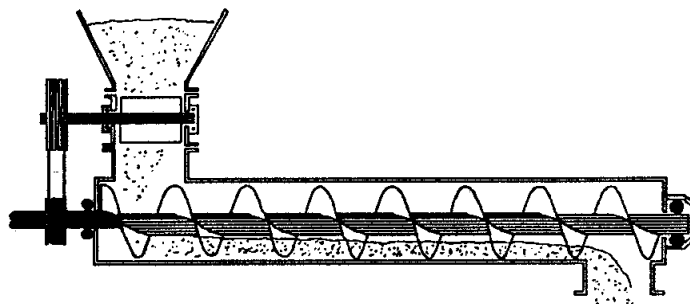


Figure 52 : Vis de transfert. ANGLARET

### 4.1.2.3. transporteur à chaînes

Les transporteurs à chaînes permettent de nombreuses configurations : horizontal, vertical (Figure 54) ou avec coudes (Figure 53). La vitesse de transport est de l'ordre de 0,5 m s<sup>-1</sup> et l'énergie motrice nécessaire est assez grande. Ce type de transporteur ne convient pas aux produits abrasifs ou collants.



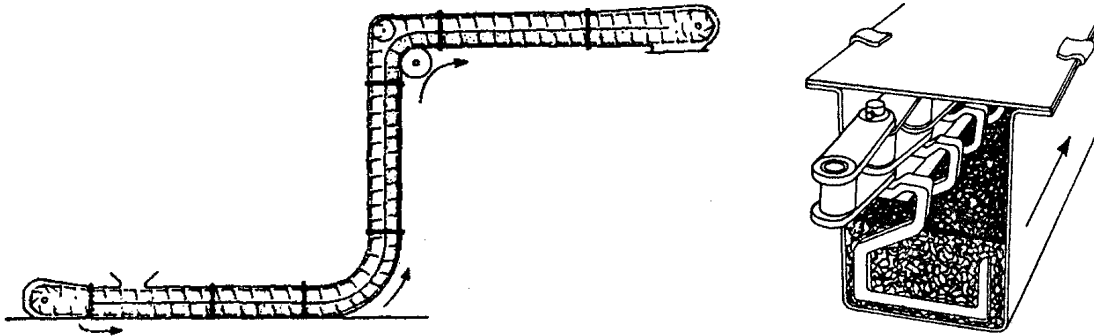


Figure 53 : Transporteurs à chaînes. PERRY

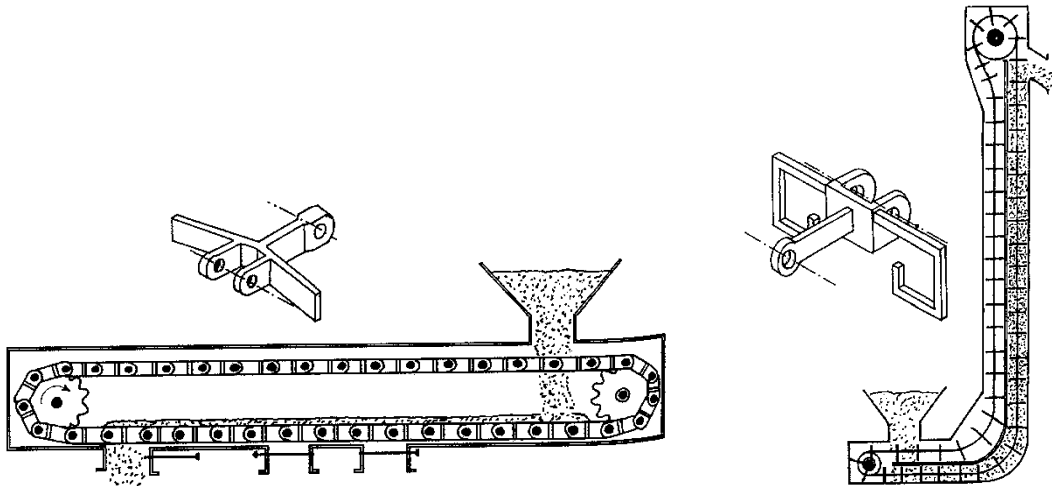


Figure 54 : Transporteurs à chaînes horizontal & vertical. ANGLARET

#### 4.1.2.4. élévateur à godets

Comme son nom l'indique l'élévateur à godets (Figure 55) permet le transport vertical, jusqu'à 50 m d'élévation et 250 tonnes par heure. Ce type de transporteur convient à une large gamme de produits : s'ils coulent bien, on pourra utiliser des godets profonds, si au contraire ils coulent mal, on choisira des godets évasés (Figure 57). À l'entrée, la matière est prélevée par dragage dans un tas, ou tout simplement par chute directe dans les godets ; à la sortie, elle est éjectée sous l'effet de la pesanteur et de la force centrifuge.

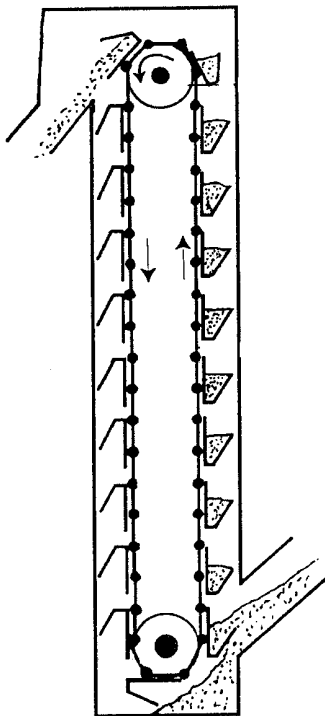


Figure 55 : Élévateur à godets. ANGLARET

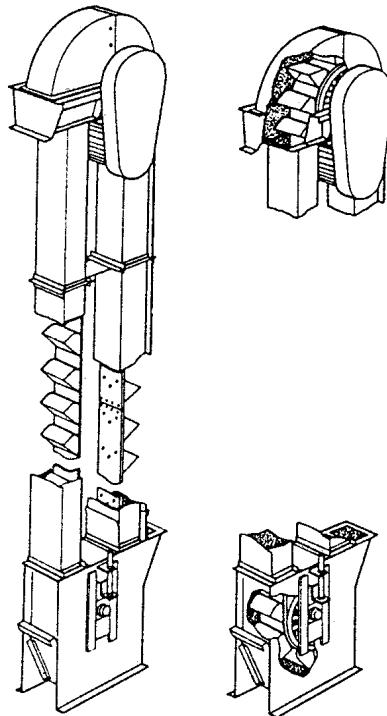


Figure 56 : Élévateur à godets. COULSON & RICHARDSON

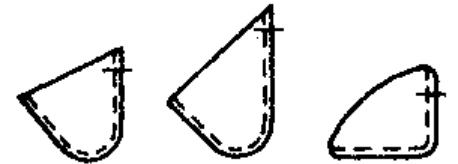


Figure 57 : Divers types de godets. PERRY

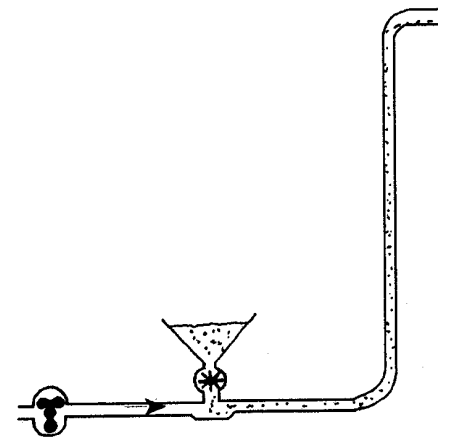


Figure 58 : Transport pneumatique. ANGLARET

### 4.1.3. transport pneumatique

Pour les matériaux granulaires finement divisés, ne collant pas, et de distribution granulométrique homogène, on peut utiliser le transport pneumatique (à l'air, ou avec un autre gaz), ou encore le transport hydraulique (à l'eau le plus souvent). Les particules sont mises en suspension dans le fluide et transportées en même temps que lui (Figure 58). Ce système est simple à mettre en place, d'un encombrement réduit, il évite le dégagement de poussières, mais la force motrice nécessaire est plus importante qu'avec les dispositifs mécaniques vus précédemment.

## 4.2. STOCKAGE

Le stockage de poudres en tas (en vrac) est très courant pour les matériaux grossiers, bruts, en très grande quantité et insensibles aux intempéries. C'est un type de stockage extrêmement simple, toutefois il peut poser des problèmes de poussières, d'odeurs, de ruissellement. Il est soumis à réglementation.

Le stockage en silo est utilisé pour les produits plus coûteux. Les silos peuvent être en béton ou métalliques, circulaires ou rectangulaires. Ils doivent être conçus de manière à faciliter l'écoulement de la poudre qu'ils contiennent.

### 4.2.1. distinction et analogies des poudres avec les fluides

Comme les fluides, les solides pulvérulents "s'écoulent" à travers les orifices, exercent une pression sur les parois du récipient dans lequel ils sont stockés, mais les poudres peuvent "se bloquer" lors de leur écoulement. En outre, la masse volumique d'une poudre n'est pas une grandeur définie (elle dépend du tassement).

La "pression" dans un milieu pulvérulent n'est pas isotrope. Ainsi toute pression verticale  $P_V$  appliquée à un empilement de grains engendre une pression latérale  $P_L$  telle que  $P_L = k \cdot P_V$ , avec  $k$  compris entre 0,35 et 0,6 ( $k = 0$  pour un solide rigide et  $k = 1$  pour un liquide). Le coefficient  $k$  est appelé mobilité, il caractérise les frottements internes (liés à la cohésion).

$$k = \frac{1 - \sin \alpha_F}{1 + \sin \alpha_F}$$

Même au repos, il existe des contraintes tangentielles non nulles dans une poudre (liées à l'adhésion). Par exemple, pour une pression  $P_L$  appliquée sur une paroi verticale, il existe une contrainte  $\tau$  telle que  $\tau = \mu \cdot P_L$ , où  $\mu$  est appelé coefficient de frottement externe.

$$\mu = \tan \alpha_G$$

Certains solides présentent une contrainte critique  $\tau_c$ , en dessous de laquelle la cohésion interne s'oppose à l'écoulement.

### 4.2.2. répartition des pressions dans un silo

On étudie le cas d'un silo circulaire de diamètre  $D$ .



$$\begin{cases} P_V = \frac{\rho_{app} \cdot g \cdot D}{4 \cdot \mu \cdot k} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot \mu \cdot k}{D} \cdot z\right) \right] \\ P_L = k \cdot P_V \end{cases}$$

équation de JANSSEN



### 4.2.3. vidange d'un silo

Il existe donc des frottements entre les grains et la paroi d'un silo. L'effet de ces frottements est transmis à travers la masse de particules, ce qui tend à compenser le poids de solide et donc à réduire la pression exercée par la masse sur le fond du silo. Dans les cas extrêmes, cette force conduit à la formation d'une voûte, au point que le matériau granulaire ne s'écoule plus (Figure 59-a-c).

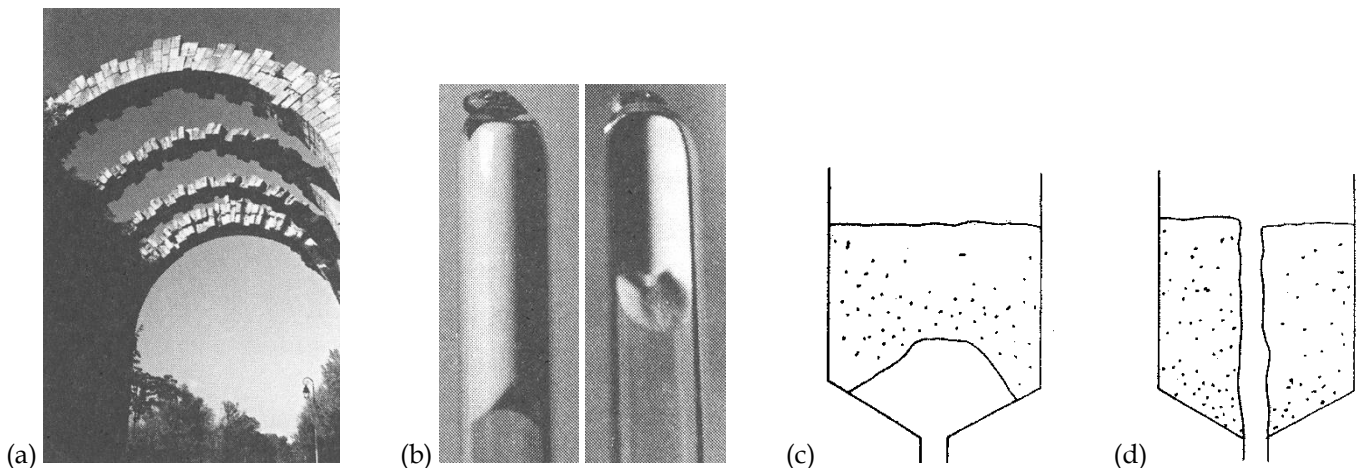


Figure 59 : Phénomènes de blocage d'écoulement. DURAN ; ULLMANN

Lorsque le matériau parvient à s'écouler, cet écoulement peut être régulier comme pour un liquide (Figure 60-a), ou bien conduire à la formation de zones mortes (Figure 60-b), c'est le **renardage**. Dans les cas extrêmes, la poudre ne s'écoule qu'au-dessus de l'orifice (Figure 59-d), c'est le "rat-holding".

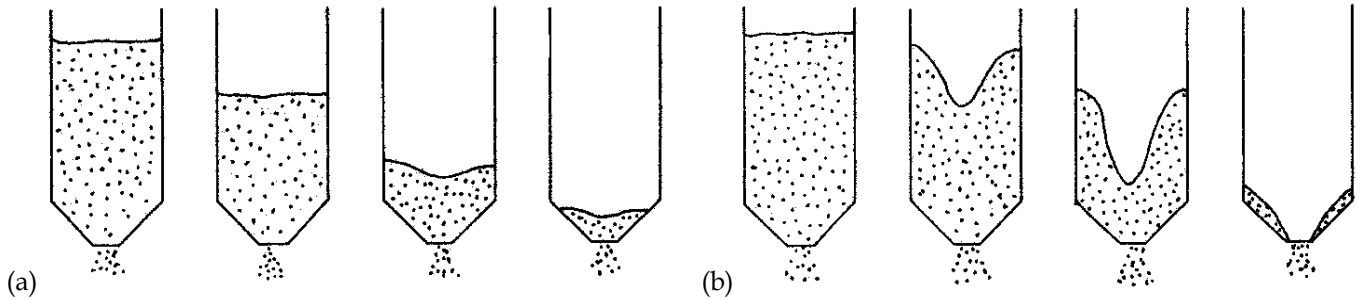


Figure 60 : Vidange d'un silo. ULLMANN

#### 4.2.3.1. vidange naturelle des silos

Pour faciliter la vidange des silos et limiter la formation de zones mortes, les silos sont généralement coniques à leur base. L'angle du cône doit être choisi en fonction de l'angle de glissement du matériau, comme illustré sur la Figure 61.

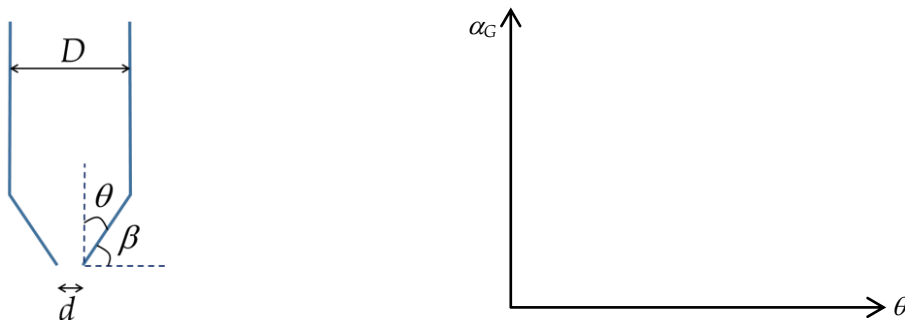


Figure 61 : Choix de l'angle du silo.

Le diamètre de l'orifice de vidange doit être suffisamment grand. On préconise généralement :

$$d \geq \frac{4 \cdot \tau_c \cdot (1 + \sin \alpha_F)}{\rho_{app} \cdot g}$$

Le débit de vidange d'un silo rempli sur une hauteur au moins égale à 4 fois son diamètre, peut être calculé à partir de la relation de Brown, valable pour des particules d'assez grande taille, et s'écoulant librement ( $\tau_c = 0$ ) :

$$Q_m = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_{app} \cdot (d - d_p)^{2,5} \cdot g^{0,5} \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2 \cdot \sin^3 \beta} \right)^{0,5}$$

On donne une autre relation en unités anglo-saxonnes (pour des particules millimétriques) :

$$Q_m = \frac{\rho_{app} \cdot d^n}{(6,226 \cdot \tan \alpha_F + 23,16) \cdot (d_p + 1,889) - 44,90}$$

$n$  est un exposant adimensionnel compris entre 2,8 (particules anguleuses) et 3,1 (sphères).

$Q_m$  est en lbm/min,  $\rho_{app}$  en lbm/ft<sup>3</sup>,  $d$  &  $d_p$  en inch. On rappelle les facteurs de conversion :

$$1 \text{ lbm} = 453,59 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$1 \text{ ft} = 304,80 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \text{ inch} = 25,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \text{ lbm ft}^{-3} = 16,0185 \text{ kg m}^{-3}$$

#### exercice 4-1 : calcul d'un silo

Un silo circulaire de 3 m de diamètre contient de l'orge ( $\alpha_F = 25^\circ$ ;  $\alpha_G = 45^\circ$ ;  $n = 2,93$ ;  $d_p = 1 \text{ mm}$ ;  $\rho_{app} = 1041 \text{ kg m}^{-3}$ ).

Que valent les pressions verticales et latérales à la base du silo s'il est rempli sur 12 m ? Et sur 24 m ? Quelle pression verticale exercerait un liquide de même masse volumique ? Calculer le débit d'orge (en kg s<sup>-1</sup>) à travers une ouverture circulaire de 300 mm dans le fond du silo (fond conique :  $\beta = 60^\circ$ ).

#### 4.2.3.2. vidange mécanique des silos

Pour assurer un débit donné, ou simplement pour parvenir à vidanger un silo, on utilise des dispositifs variés (Figure 62 & Figure 63).

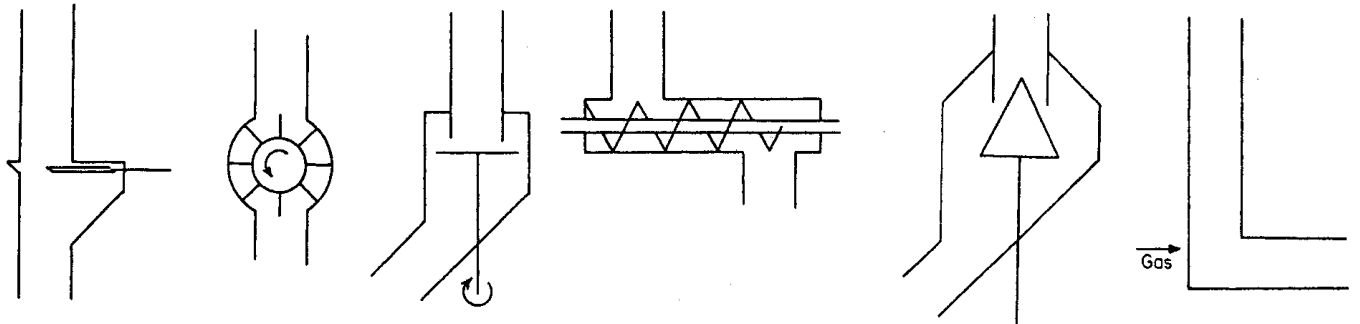


Figure 62 : Vannes de fond de silos.

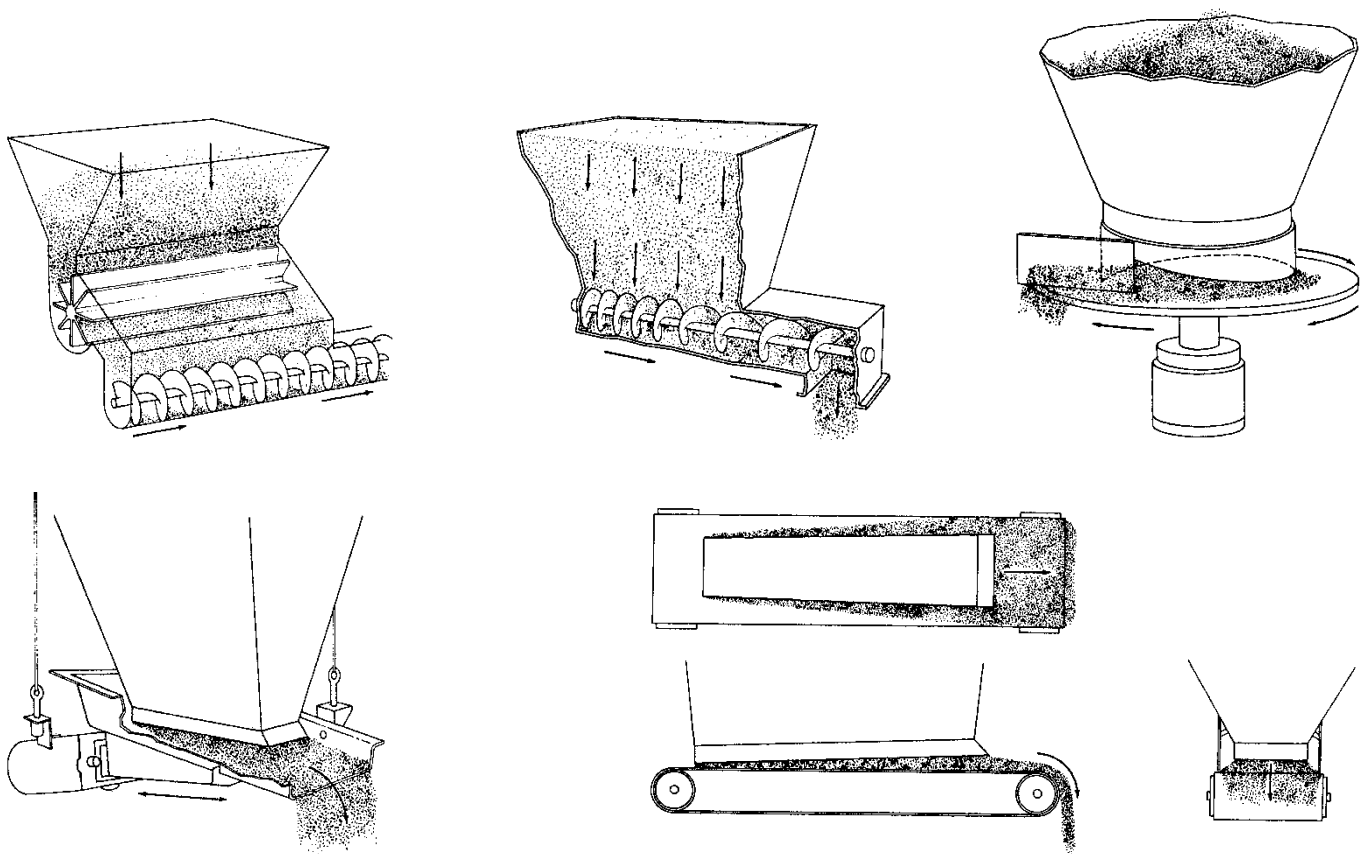



Figure 63 : Vidange mécanique des silos.  PERRY

# conclusion

L'étude des poudres et des procédés qui les mettent en œuvre est aujourd'hui encore un domaine de la science et de la technologie en plein développement. On commence à savoir faire des choses sophistiquées, mais cela implique immédiatement des modèles et calculs numériques rapidement complexes, c'est pourquoi ces sujets font encore l'objet de recherches dans de nombreux laboratoires publics et privés. L'objectif de ce cours se limitait donc à une première présentation, d'une part de la problématique de la caractérisation des solides pulvérulents, et d'autre part des appareillages les mettant en œuvre seuls.

## références bibliographiques

- Paul ANGLARET, "Technologie Génie Chimique", tome 1, Centre Régional de Documentation Pédagogique de l'Académie d'Amiens, 1998
- COULSON & RICHARDSON's "Chemical Engineering", volume 1, 6<sup>th</sup> edition, Ed. Butterworth Heinemann, Oxford, 2000
- R. DARRIGO, "Notions de génie chimique - 1. traitement des solides", Ed. Armand Colin, Paris, 1970
- Jacques DURAN, "Sables, poudres et grains - Introduction à la physique des milieux granulaires", Ed. Eyrolles, Paris, 1999
- Henri FAUDUET, "Mécanique des fluides & des solides appliquée à la chimie", Ed. Tec&Doc - Lavoisier, Paris, 2011.
- KIRK-OTHMER, "Encyclopedia of Chemical Technology", Ed. John Wiley & Sons, 1980
- Emilian KOLLER, "Aide-mémoire Génie chimique", Ed. Dunod - L'usine nouvelle, Paris, 2001
- Jean-Pierre MELCION et Jean-Luc ILARI, "Technologie des pulvérulents dans les IAA", Ed. Tec&Doc - Lavoisier, Paris, 2003.
- Noël MIDOUX, polycopiés de cours d'Opérations Unitaires Mécanique, École Nationale Supérieure des Industries Chimiques (ENSIC), Nancy, 1996
- PERRY's "Chemical Engineers' Handbook", 7<sup>th</sup> edition, Ed. McGraw-Hill, New-York, 1998
- TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR : volume J "Génie des procédés", partie "Opérations unitaires", fascicules "Tri et mise en forme des solides" & "Séparation physique de phases"
- ULLMANN's "Encyclopedia of Industrial Chemistry", Ed. Wiley-VCH, 1999

### savoirs

- ↳ savoir qu'il existe différentes façons de définir la taille et la forme d'une particule, sur quel principe on les définit et pourquoi ;
- ↳ connaître les principes de mesure d'une distribution granulométrique, connaître les différentes représentations graphiques et savoir qu'il existe différentes façons de définir la taille moyenne (connaître au moins la définition du diamètre le plus fréquent, du diamètre médian et du diamètre moyen arithmétique) ;
- ↳ connaître les autres propriétés des poudres (masses volumiques, surface spécifique et grandeurs caractéristiques de l'écoulement notamment) ;
- ↳ connaître le principe de fonctionnement, les caractéristiques et quelques critères de choix des différents appareils pour :
  - la fragmentation des solides,
  - l'augmentation de taille des particules,
  - la classification des particules,
  - le mélange des poudres,
  - le transport des pulvérulents ;
- ↳ connaître le phénomène de vidange des silos et les moyens de le contrôler.

### savoir-faire

- ↳ savoir représenter et exploiter des mesures de distribution granulométrique (à l'aide d'un logiciel de type tableur) ;
- ↳ savoir utiliser (mais ne pas les retenir) les lois sur l'énergie de fragmentation ;
- ↳ savoir faire les bilans matière sur un tamis industriel et calculer son efficacité ;
- ↳ savoir déterminer la pression à laquelle est soumise un silo, le débit qu'il fournit.