

Source: <https://www.spirit-science.fr>

## Les processus mécaniques

# MODULE 6:

2025

# Module 6.1

## 6.1 Le transport de solides

### 6.1.1 Eléments de théorie

# Module 6.1.1: Masse volumique du bulk

La masse volumique d'un «bulk» est:

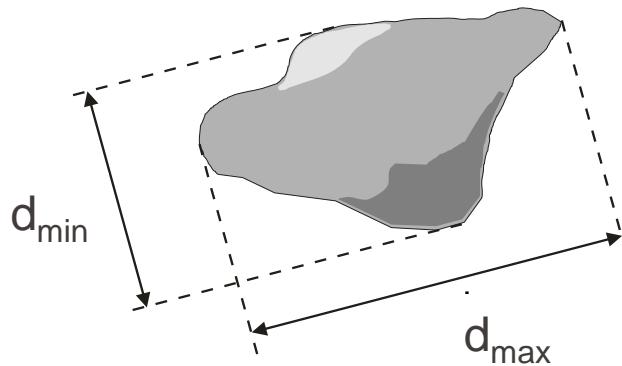
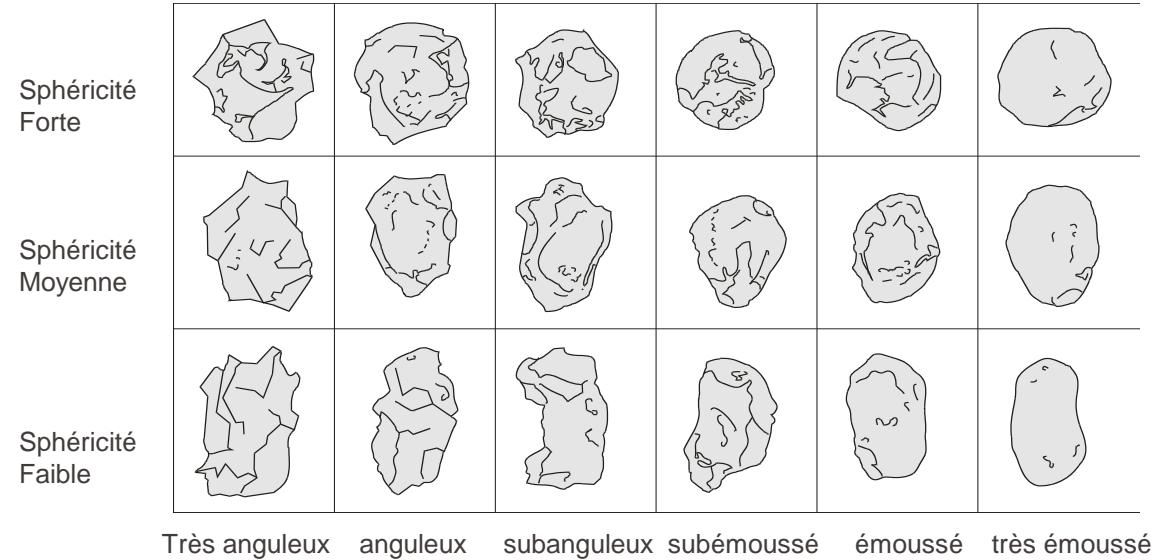
$$\rho_b = \frac{m_s + m_f}{V_s + V_f} = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon) + \rho_f$$

Si le fluide est de l'air, alors  $\rho_f$  devient négligeable et:

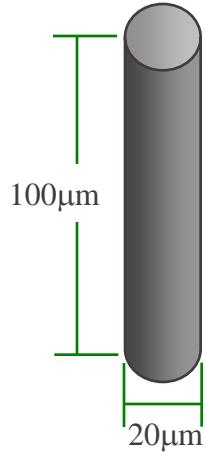
$$\rho_b = \rho_s (1 - \varepsilon)$$

$\rho_f$ , masse volumique fluide,  $\text{kg m}^{-3}$   
 $\rho_s$ , masse volumique solide,  $\text{kg m}^{-3}$   
 $\varepsilon$ , porosité, -

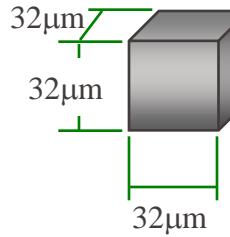
# Module 6.1.1: La forme des particules (1)



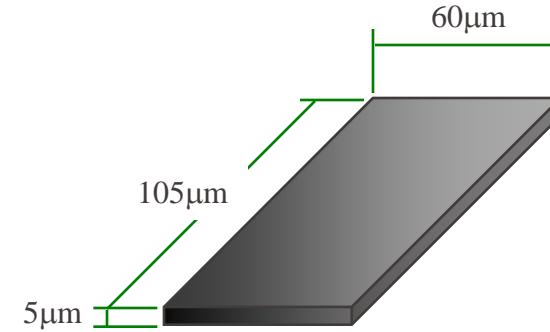
# Module 6.1.1: La forme des particules (2)



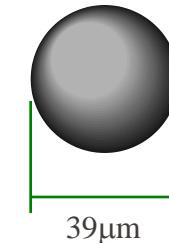
$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$



$$V = a^3$$



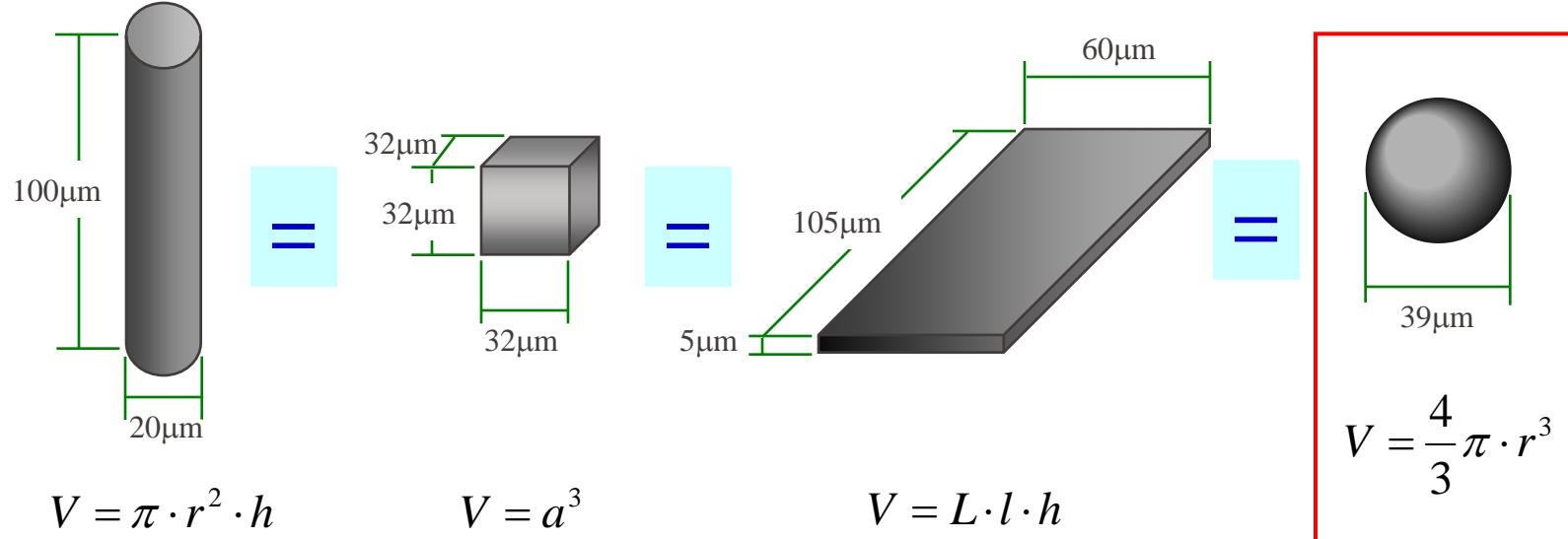
$$V = L \cdot l \cdot h$$



$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$$

Quelle est la plus grosse particule ???

# Module 6.1.1: La forme des particules (3)



On définit une sphère équivalente  
(diamètre équivalent → une seule et unique dimension)

# Module 6.1.1: La taille des particules (1)

Les particules solides n'étant pas toutes sphériques on les approxime par :

- Le diamètre volumique:  $d_v$ =diamètre équivalent à une sphère ayant un **volume** identique

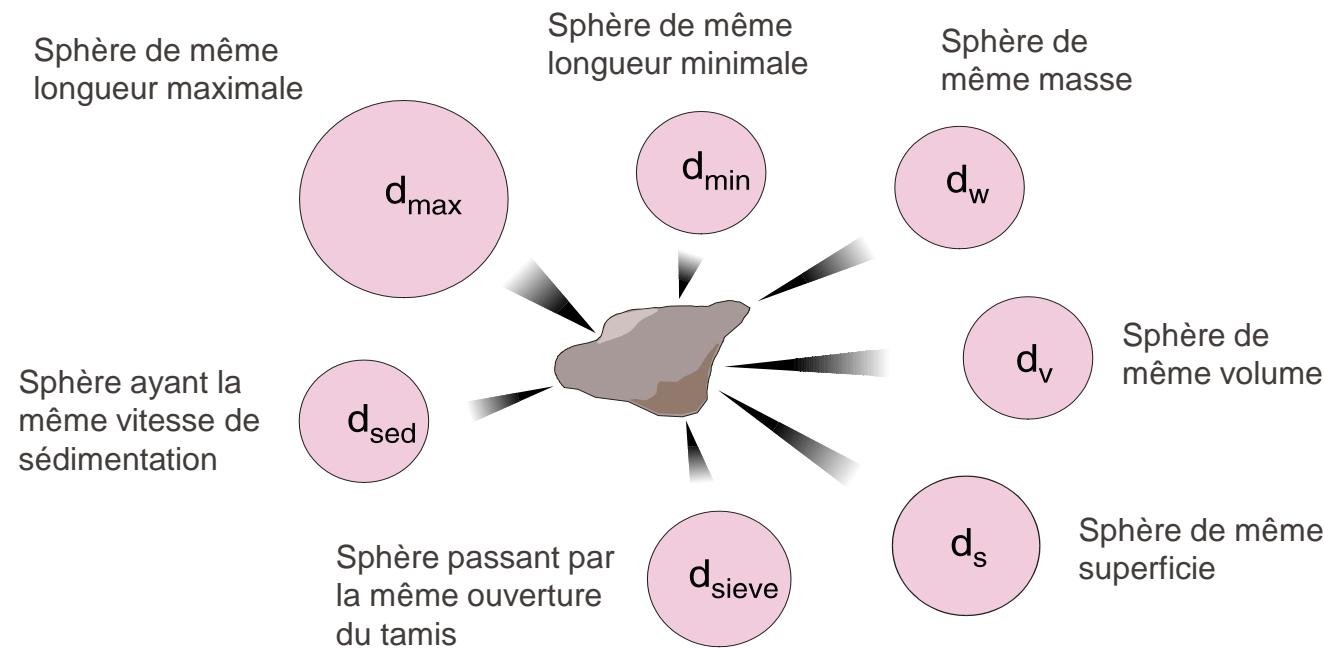
$$d_v = \left( \frac{6 \cdot V_p}{\pi} \right)^{1/3} = 1.241 \cdot V_p^{1/3}$$

- Le diamètre surfacique:  $d_s$ =diamètre équivalent à une sphère ayant une **surface** identique

$$d_s = \left( \frac{A_{sp}}{\pi} \right)^{1/2} = 0.564 \cdot A_{sp}^{1/2}$$

# Module 6.1.1: La taille des particules (2)

par diverses techniques: le tamisage, la sédimentation, la microscopie électronique, la granulométrie laser, ...



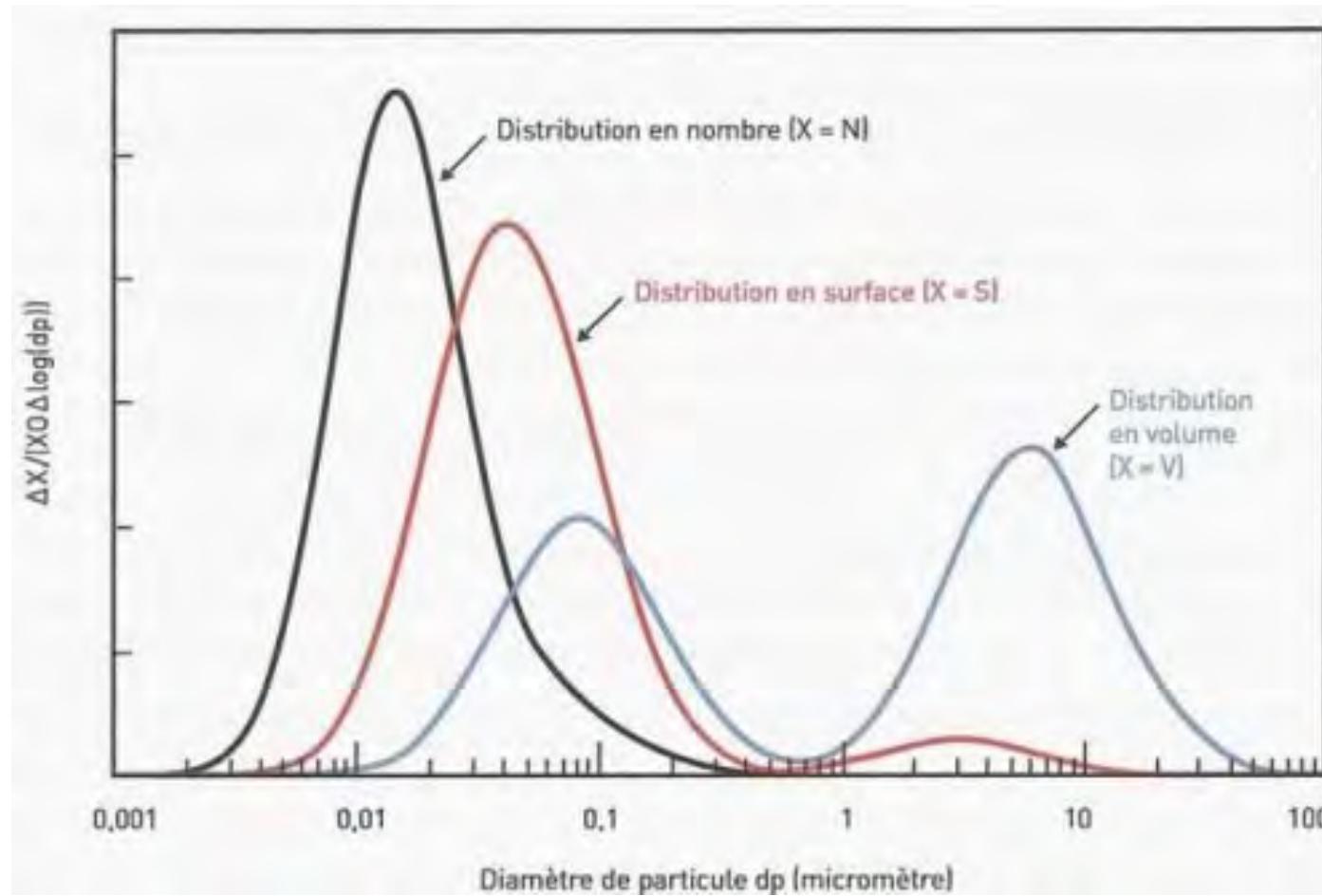
Aucune technique n'est fausse ou meilleure, chacune mesure une propriété différente  
→ Attention à ne comparer que les résultats issus d'une même technique

# Module 6.1.1: La taille des particules (3)

Nom	Propriétés équivalentes de la sphère	Expression
$d_v$	Diamètre en volume	Volume
$d_s$	Diamètre en surface	Surface
$d_{av}$	Diamètre en surface spécifique	Surface/volume
$d_d$	Diamètre de poussée	Résistance au déplacement dans le même fluide, à même vitesse (régime de Stokes)
$d_f$	Diamètre de chute	Vitesse de chute libre dans le même liquide et pour un grain de même masse volumique
$d_{sk}$	Diamètre de Stokes	Vitesse de chute libre suivant la loi de Stokes (à l'équilibre et sous l'effet de la gravité)
$d_A$	Diamètre de mailles	Passage au travers de la même ouverture carrée
Nom	Propriétés équivalentes du cercle	Expression
$d_a$	Diamètre de surface projetée	Surface projetée, particule stable
$d_p$	Diamètre de surface projetée	Surface projetée, particule en position aléatoire
$d_c$	Diamètre en périmètre	Périmètre extérieur

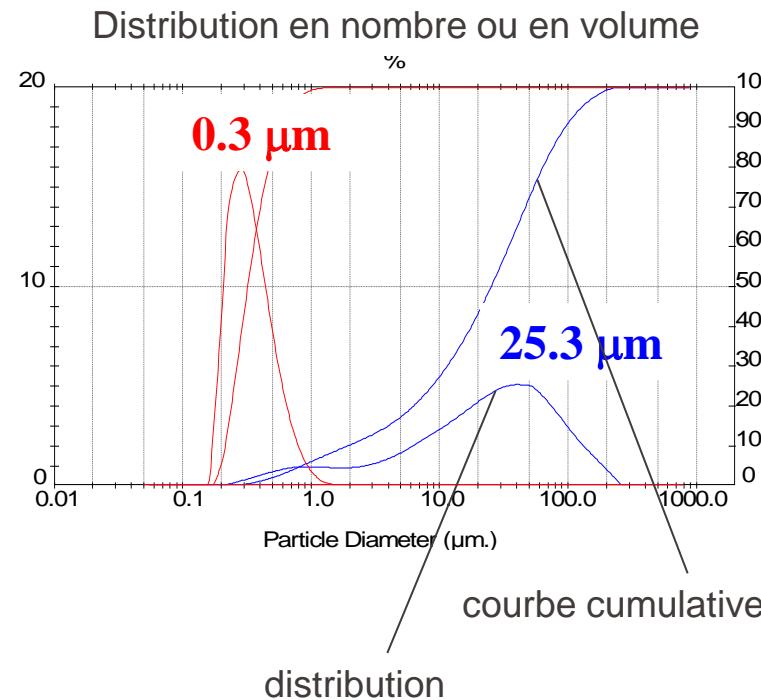
# Module 6.1.1: La taille des particules (4)

Les particules ne sont généralement pas mono-disperses !



# Module 6.1.1: La taille des particules (5)

On définit un diamètre caractéristique  $dX$  (d<sub>50</sub> ou d<sub>97</sub>) tel que la proportion X du nombre ou du volume des particules est plus petite que la valeur de  $dX$ .



Diamètre	Nombre de particules	% en Nombre	Volume d'une particule	% en Volume
2	2'000	50.9%	4	0.06%
4	1'000	25.5%	33	0.3%
8	500	12.7%	268	1.0%
16	250	6.4%	2'144	4.1%
32	125	3.2%	17'159	16.5%
64	50	1.3%	137'276	52.7%
128	3	0.08%	1'098'214	25.3%

1'000 particules de  
1  $\mu\text{m}$



1 particule de  
10  $\mu\text{m}$

# Module 6.1.1: La taille des particules (6)

Les particules sont classifiées dans les catégories suivantes:

Catégorie descriptive	Dimension	Exemple
Solide brut	5 - 100 mm	Charbon, agrégats
Granules	0.3 - 5 mm	Sucre grain, riz
Poudre grossière	100 - 300 µm	Sel de table
Poudre fine	10 - 100 µm	Sucre glace
Poudre superfine	1 - 10 µm	Poudre de riz (visage)
Poudre ultrafine	< 1 µm	Pigments (peinture)
Poudre nano	< 100 nm	Nano ...

# Module 6.1.1: Lois de distribution granulaire

Un matériau morcelé est généralement un ensemble de grains de différentes dimensions. Il est donc important de pouvoir caractériser la distribution granulaire de ces grains avant et après fragmentation:

Gaudin propose la relation:

$$Y = \left( \frac{x}{D} \right)^m$$

$D$  : dimension du plus gros grain (100 % de passant au tamis d'ouverture de maille  $D$ )

$Y$  : taux massique cumulé du passant au tamis d'ouverture de maille  $x$   
(voir 6.3.1 pour la définition des mailles)

$m$  : constante.

Rosin et Rammler :

$$r = 100 \exp(-bx^n)$$

$r$  : pourcentage massique cumulé du refus au tamis d'ouverture de maille  $x$

$b$  : constante de finesse

$n$  : constante de dispersion de la granulométrie.

Bennett la modifie comme:

$$r = 100 \exp\left(\frac{x}{x'}\right)^n$$

$x'$  : constante dimensionnelle.

Kolmogoroff donne, pour une fragmentation homogène, une relation de la répartition de type logarithmique-normale

$$Y = \theta \ln\left(\frac{x}{d}\right)^p$$

$Y$  : taux massique cumulé du passant au tamis d'ouverture de maille  $x$   
 $d$  et  $p$  : constantes

$\theta$  : fonction d'erreur de la loi de distribution normale ou distribution de Gauss.

# Module 6.1.1: Sphéricité des particules

La sphéricité des particules est donnée par le rapport des deux surfaces:

$$\phi_s = \frac{\text{surface d'une sphère}}{\text{surface d'une particule}} \text{ ayant le même volume}$$

$$\phi_s = \frac{\pi d_v^2}{A_{sp}} = \left( \frac{d_v}{d_s} \right)^2$$

$$\phi_s = 4.838 \frac{V_p^{2/3}}{A_{sp}}$$

# Module 6.1.1: Dureté des particules

La dureté des particules est donnée par l'échelle de Mohs:

Dureté	Minéral	Composition chimique	Structure cristalline	Résultat des tests	Références
1	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	monoclinique	friable sous l'ongle	
2	Gypse	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	monoclinique	rayable avec l'ongle	Ongle 2.2
3	Calcite	$CaCO_3$		rayable avec une pièce en cuivre	Cuivre 3
4	Fluorine	$CaF_2$	cubique	rayable (facilement) avec un couteau	
5	Apatite	$Ca_5(PO_4)_3(OH^-, Cl^-, F^-)$	hexagonale	rayable au couteau	Acier, verre 5.5
6	Orthose	$KAISi_3O_8$	monoclinique	rayable à la lime, par le sable	Acier trempé 6.4
7	Quartz	$SiO_2$	trigonal	raye le verre	Céramique 7
8	Topaze	$Al_2SiO_4(OH^-, F^-)_2$	orthorhombique	rayable par le carbure de tungstène	
9	Corindon	$Al_2O_3$	rhomboédrique	rayable au carbure de silicium	Chrome 9
10	Diamant	C	cubique	rayable avec un autre diamant	

# Module 6.1.1: Force de cohésion

La cohésion des particules :

Définitions selon DIN



➤ particules primaires



➤ agrégats (forte cohésion)



➤ agglomérats (faible cohésion)

$$\text{forces de cohésion} \sim \frac{1}{r^2}$$

Diamètre:

10 mm  
1 mm  
0.1 mm

Force de Van der Waals:

1  
100  
10'000

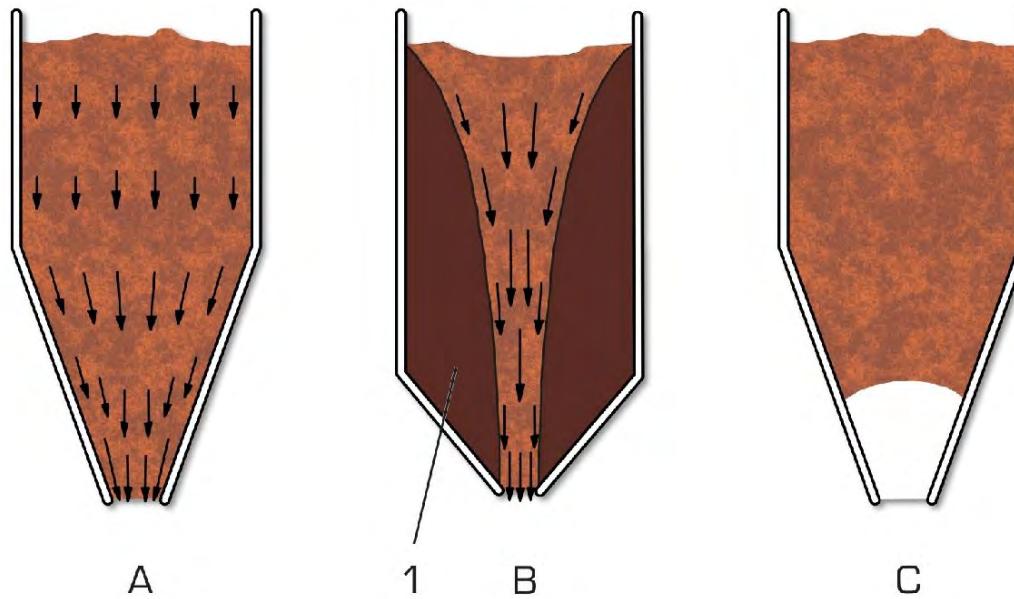
# Module 6.1.1: Fluides Newtoniens

La viscosité du fluide			
↓	Diminue	Augmente	Ne change pas
en fonction de l'intensité de l'action (contrainte mécanique):		<b>Non-Newtonien</b>	
	rhéofluidifiant ou pseudo-plastiques (ex : sang, ketchup, peintures)	rhéoépaisissant ou dillatant (ex : sable mouillé, farine de maïs)	<b>Newtonien</b> (ex: Eau)
indépendamment de l'action (mais dépendant de la durée de l'action) :		<b>Non-Newtonien</b>	
	thixotrope (ex : yaourt)	antithixotrope (ex : crème liquide)	

- Certains fluides non-newtoniens sont si efficaces qu'ils permettent de marcher dessus.
- Le sable mouillé ou une préparation de farine de maïs coulent comme un liquide quand ils sont au repos, mais ils deviennent au contraire très durs quand on les remue ou qu'on appuie dessus.
- Ketchup : plus on appuie, plus ce qui en sort est fluide et paradoxalement, plus il est facile d'augmenter la pression.
- Certains autres fluides évoluent, mais il faut les remuer durant un certain temps : ainsi, au fur et à mesure que l'on remue un yaourt il devient de plus en plus liquide.

# Module 6.1.1: Ecoulement des particules (1)

Les solides divisés ne se comportent pas comme des liquides **newtoniens**, ni pendant l'écoulement, ni pendant le stockage au repos. Contrairement à ceux-ci, les solides divisés peuvent transmettre des contraintes tangentielles de glissement même au repos et ainsi former des surfaces inclinées stables.



- A. Ecoulement en masse: l'intégralité du solide divisé est en mouvement
- B. Ecoulement en noyau: le solide divisé est en mouvement au niveau du noyau, et au repos dans les zones mortes (1)
- C. Formation de voûtes (ponts ou arches): l'écoulement du solide divisé s'immobilise

Les principaux phénomènes observés lorsqu'un solide divisé s'écoule d'un entonnoir ou d'un silo sont les suivants:

- **Ecoulement en masse**

L'ensemble du contenu du récipient bouge pendant l'écoulement du solide divisé. Si la partie située au-dessus de l'entonnoir est suffisamment haute, le produit s'abaisse régulièrement sur toute la section transversale (écoulement de type piston).

- **Ecoulement en noyau**

Seule une zone limitée située au-dessus de l'ouverture est en mouvement pendant l'écoulement du solide divisé. Cette zone peut s'élargir en forme d'entonnoir vers le haut. Des zones mortes, dans lesquelles le solide divisé est au repos, se forment en périphérie du noyau d'écoulement. Dans ces zones, le solide divisé reste longtemps et n'est évacué que vers la fin de la vidange.

- **Formation de voûtes**

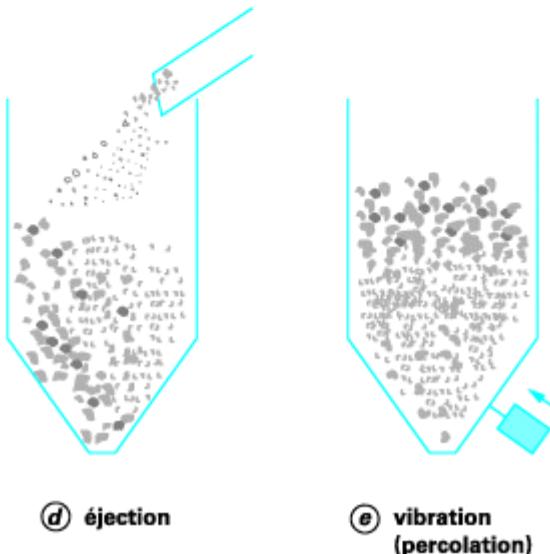
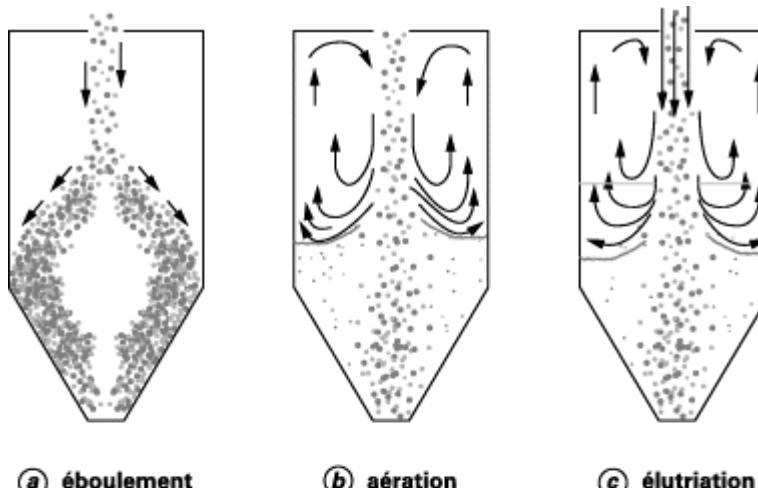
Dans le cas de solides divisés à faible coulabilité, de poudres cohésives, une voûte de solide peut se former dans l'entonnoir d'écoulement. Le solide divisé se trouve alors immobilisé au-dessus de la voûte.

- **Ségrégation**

Une ségrégation peut se produire lors du remplissage de récipients si les particules diffèrent quant à leur taille, leur forme ou leur densité. La ségrégation réduit logiquement la qualité du produit.

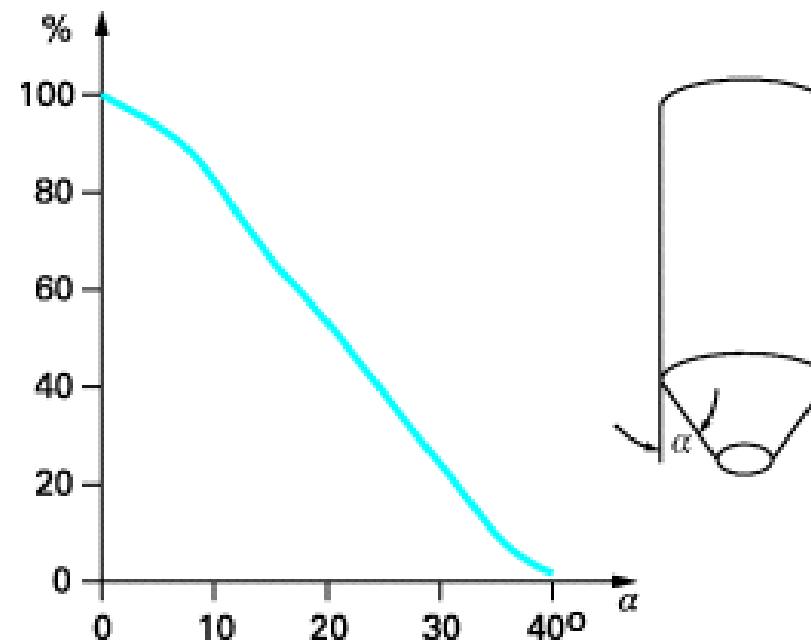
# Module 6.1.1: Ecoulement des particules (3)

La ségrégation:



# Module 6.1.1: Ecoulement des particules (4)

Probabilité d'occurrence d'écoulement en masse en fonction de l'angle du silo



Source: Technique de l'ingénieur: Mise en œuvre des poudres, 2022

Il est défini par deux grandeurs:

- 1) La vitesse d'écoulement  $v_{LDV}$  qui est suffisante pour empêcher le dépôt de solides sur le fond du tuyau

$$v_{LDV} = \sqrt{K_1 \cdot g \cdot d_{p85} \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right)^{0.8} \left( \frac{d_{p85}}{d_{tube}} \right)^{K_2}}$$

$d_{p85}$ , diamètre particules représentant 85% de la masse totale, m  
 $K_1 = 650$  si les forces visqueuses prédominent et = 0.19 en régime turbulent.  
 $K_2 = 0$  si les forces visqueuses prédominent et = -2 en régime turbulent.

- 2) La perte de charge, ou du gradient de pression, lors du flux hétérogène.

$$\Delta P = \Delta P_w \left[ 1 + 85C \left( \frac{g \cdot d_{tube} (\rho_s - \rho_f)}{v^2 \rho_f \sqrt{C_d}} \right)^{3/2} \right]$$

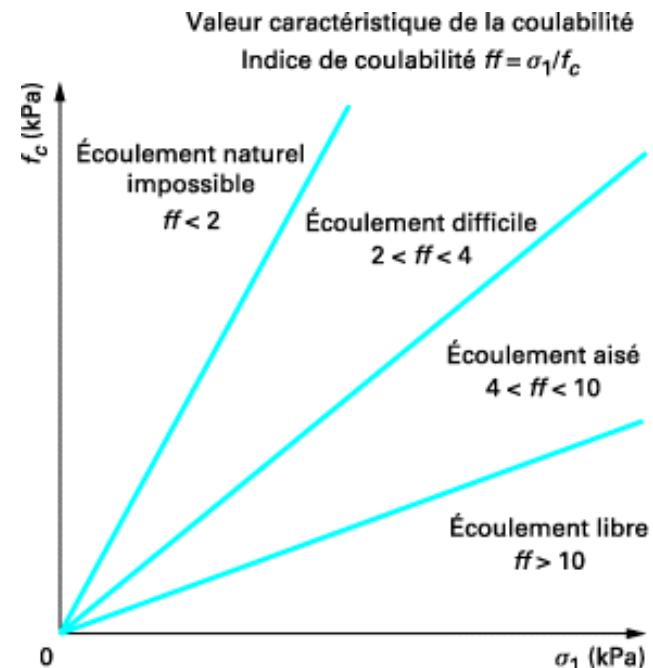
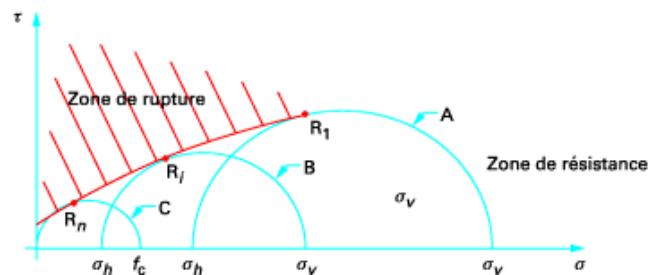
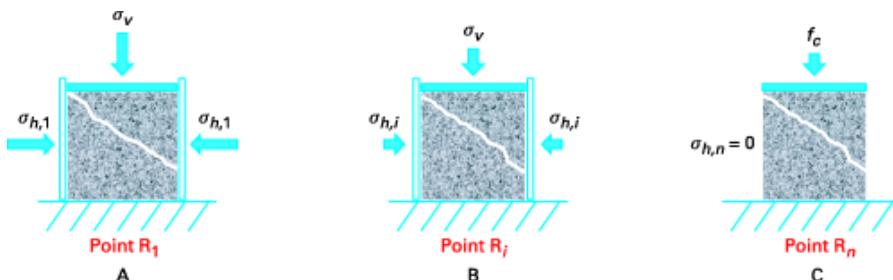
$C_d$ , coefficient de trainée de la particule, -  
 $C$  = fraction massique en particule, %.  
 $v$  = vitesse d'écoulement,  $m s^{-1}$   
 $\Delta P$ , perte de charge totale, Pa  
 $\Delta P_w$ , perte de charge du fluide pur, Pa

# Module 6.1.1: Ecoulement d'un solide divisé dans un fluide (2)

## Fonction d'écoulement:

La contrainte de cohésion,  $f_c$ , est la résistance en compression simple d'un matériau granulaire consolidé sous la contrainte de consolidation  $\sigma_1$ .

Elle traduit l'aptitude d'un matériau à former une voûte stable et s'obtient par le tracé d'un cercle de Mohr passant par l'origine et tangent au LCR, Lieu Cinématique de Rupture (zone de rupture).



L'indice de coulabilité est défini par :

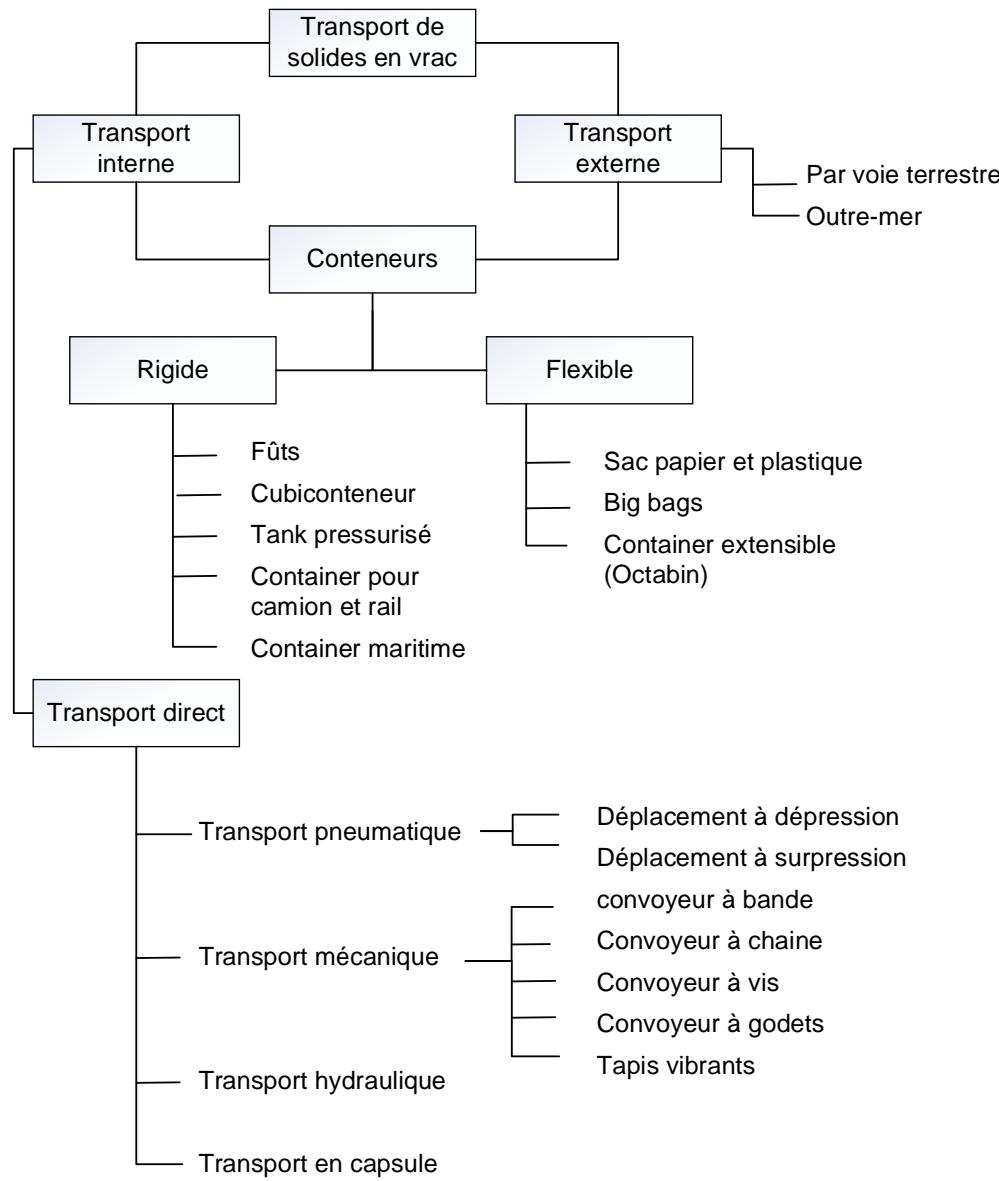
- $ff > 10$  : écoulement libre (*free flowing*), les voûtes ne peuvent pas se former
- $4 < ff < 10$  : écoulement aisément ; attention aux sorties étroites pour les trémies
- $2 < ff < 4$  : écoulement difficile ; poudres cohésives. Prévoir des dispositifs mécaniques
- $ff < 2$  : écoulement naturel impossible. Poudres très cohésives. Extraction mécanique obligatoire

## Module 6.1.2

### 6.1 Le transport de solides

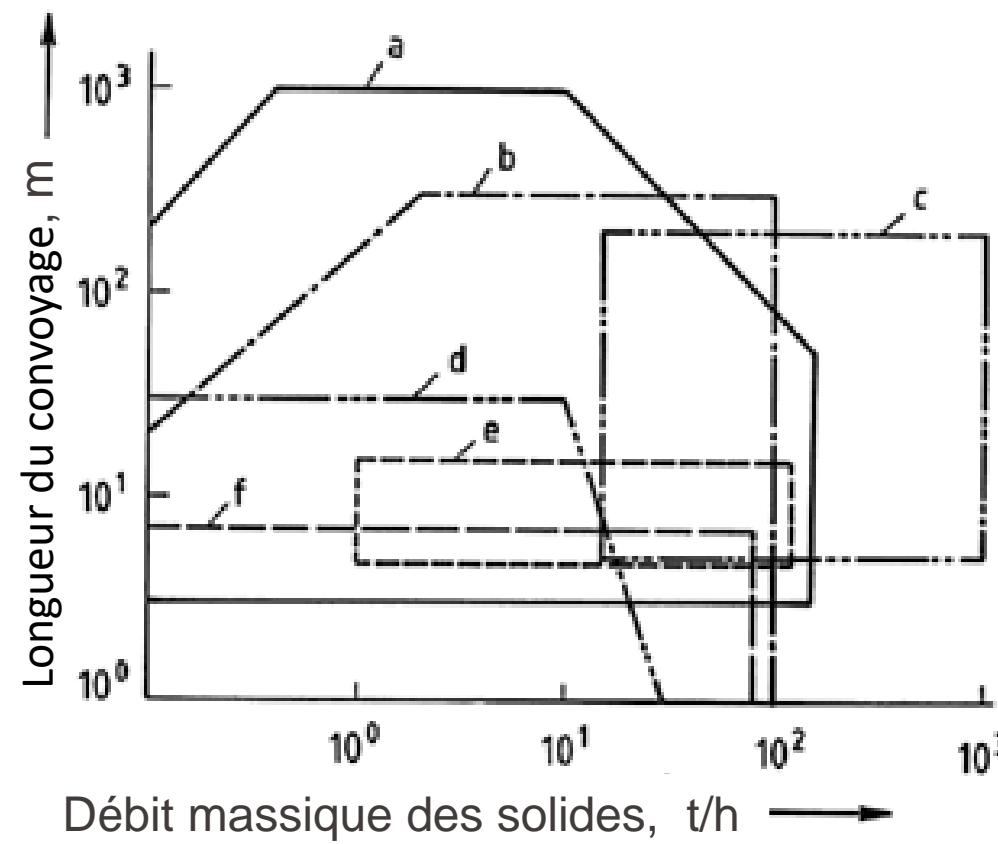
#### 6.1.2 Types de transports

# Module 6.1.2: Classification

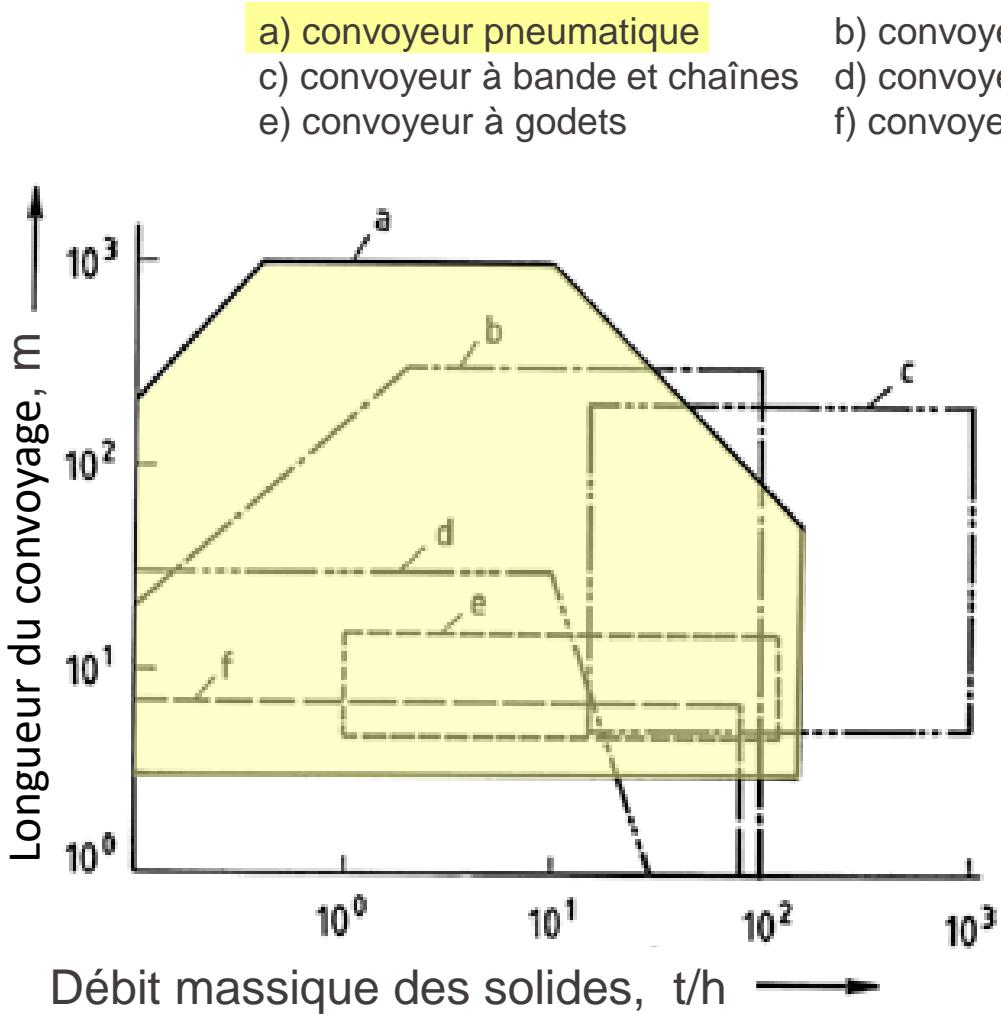


# Module 6.1.2: Types de transports (1)

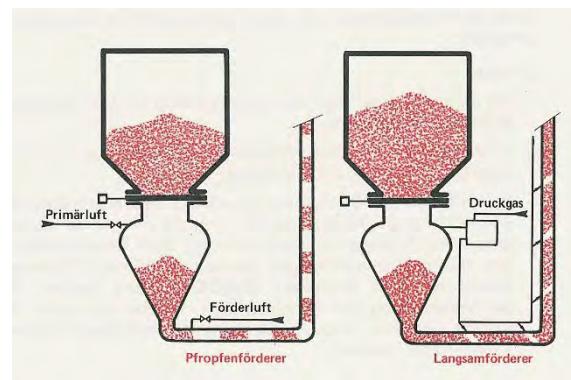
- a) convoyeur pneumatique
- b) convoyeur à air
- c) convoyeur à bande et chaînes
- d) convoyeur à panneau vibrant
- e) convoyeur à godets
- f) convoyeur à vis et conduites vibrantes



# Module 6.1.2: Types de transports (2)



- b) convoyeur à air
- c) convoyeur à bande et chaînes
- d) convoyeur à panneau vibrant
- e) convoyeur à godets
- f) convoyeur à vis et conduites vibrantes

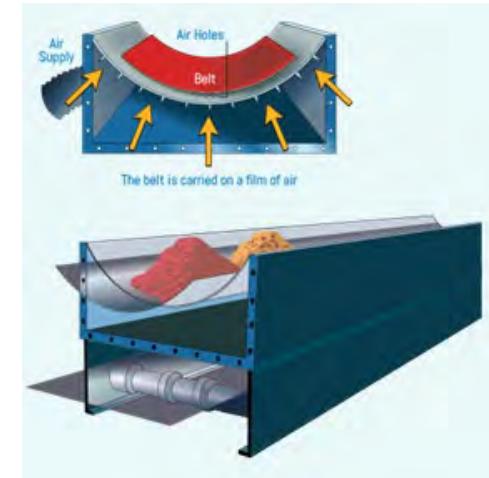
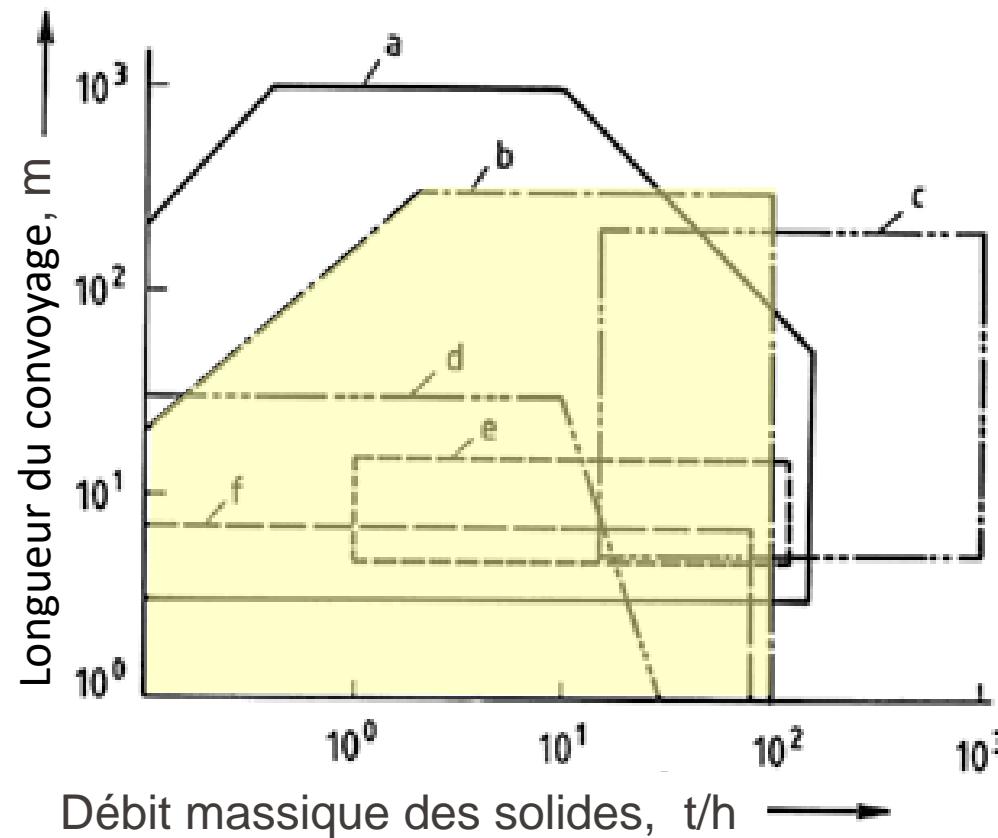


Transporteur pneumatique

# Module 6.1.2: Types de transports (3)

- a) convoyeur pneumatique
- c) convoyeur à bande et chaînes
- e) convoyeur à godets

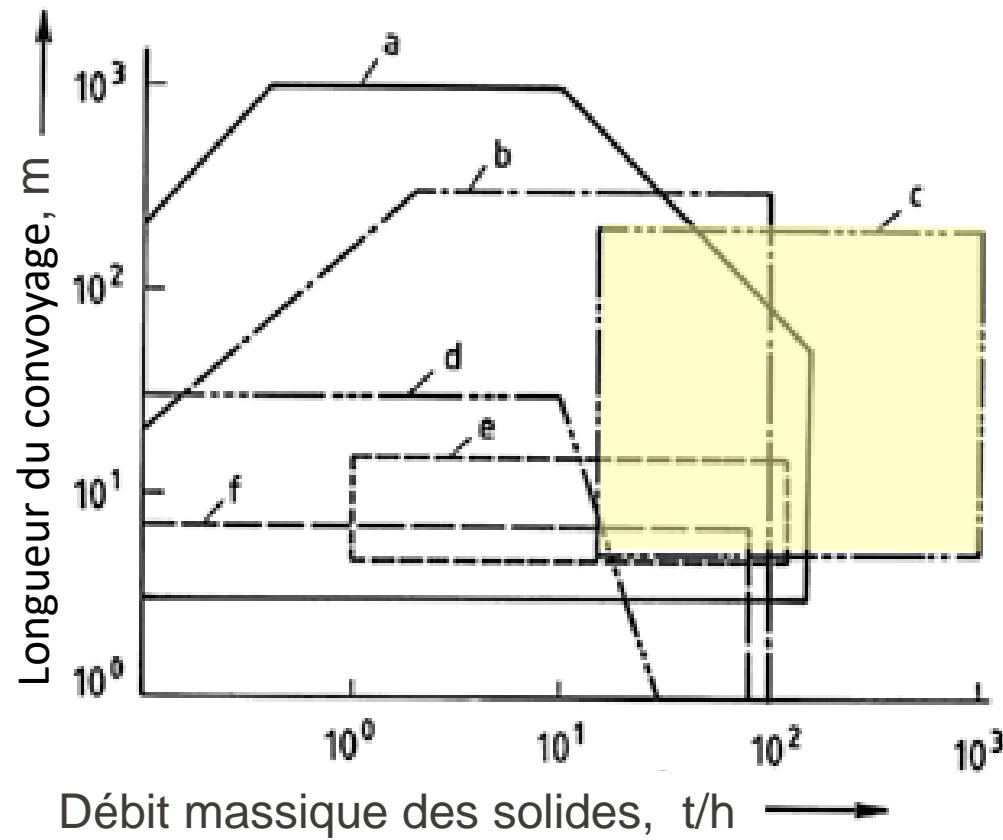
- b) convoyeur à air
- d) convoyeur à panneau vibrant
- f) convoyeur à vis et conduites vibrantes



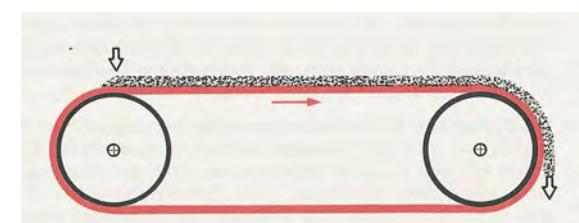
# Module 6.1.2: Types de transports (4)

- a) convoyeur pneumatique
- c) convoyeur à bande et chaînes
- e) convoyeur à godets

- b) convoyeur à air
- d) convoyeur à panneau vibrant
- f) convoyeur à vis et conduites vibrantes



Convoyeur à chaîne

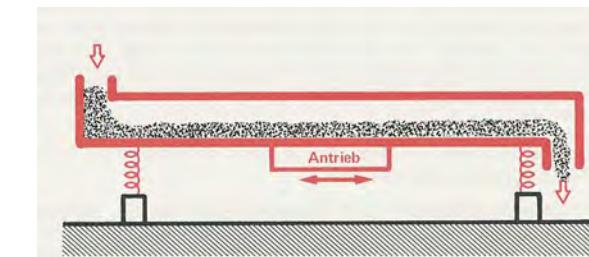
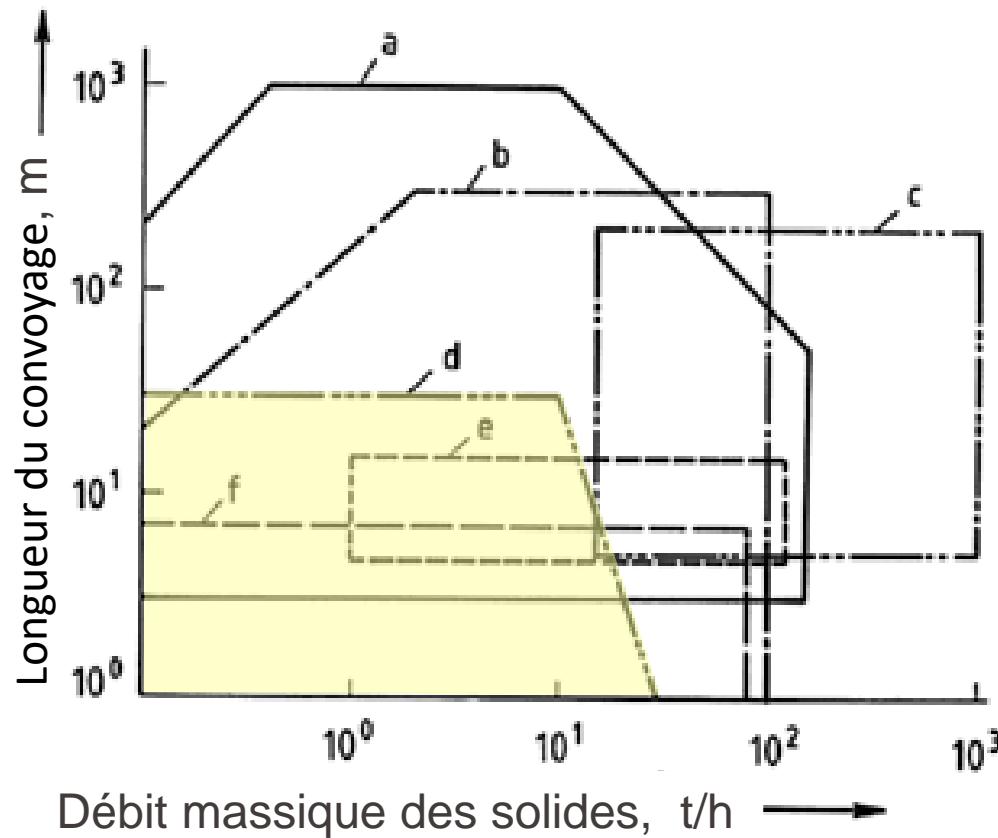


Bande transporteuse

# Module 6.1.2: Types de transports (5)

- a) convoyeur pneumatique
- c) convoyeur à bande et chaînes
- e) convoyeur à godets

- b) convoyeur à air
- d) convoyeur à panneau vibrant
- f) convoyeur à vis et conduites vibrantes

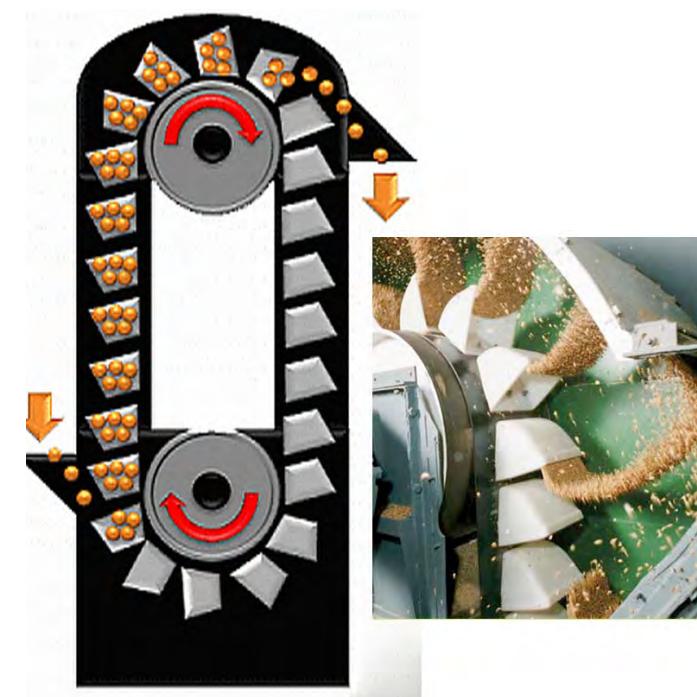
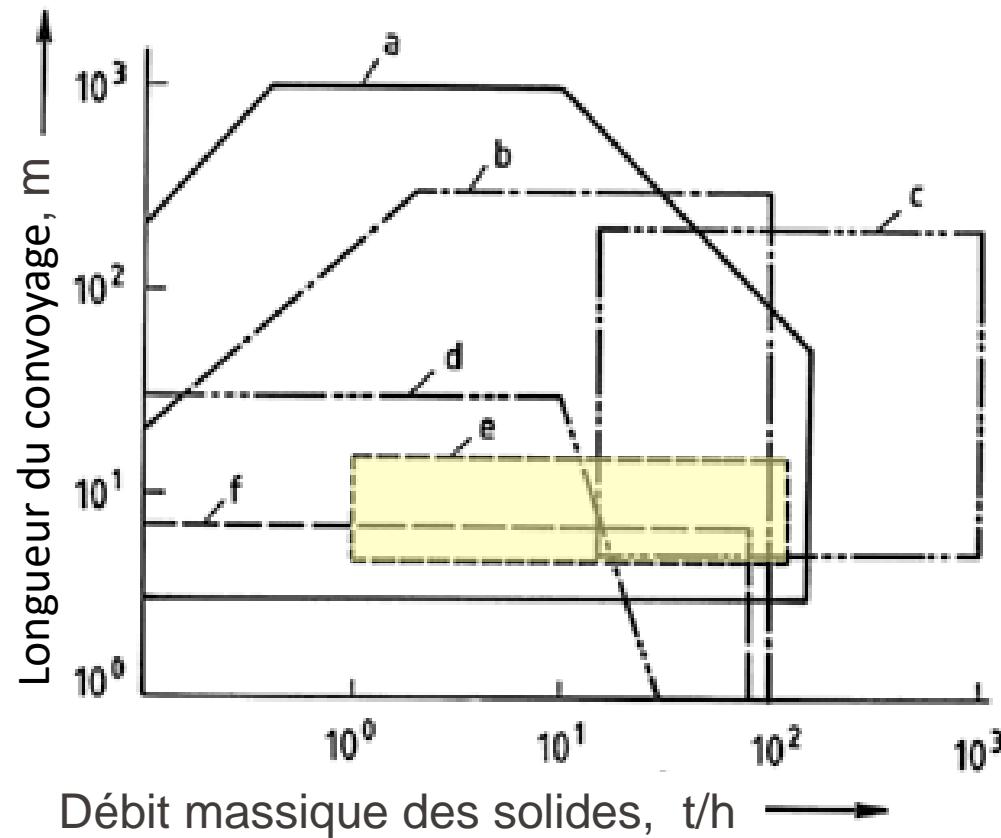


Transporteur à mouvements oscillatoires

# Module 6.1.2: Types de transports (6)

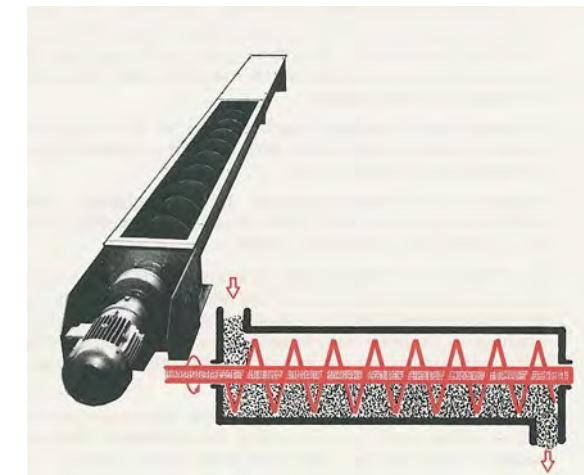
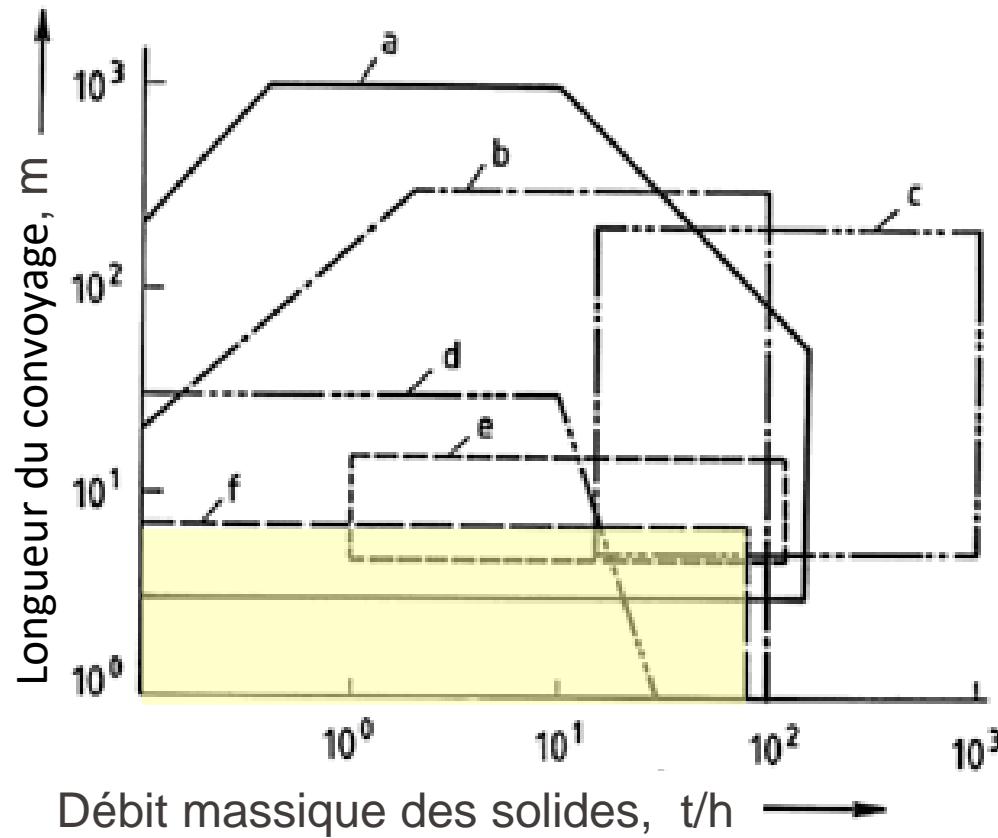
- a) convoyeur pneumatique
- c) convoyeur à bande et chaînes
- e) convoyeur à godets

- b) convoyeur à air
- d) convoyeur à panneau vibrant
- f) convoyeur à vis et conduites vibrantes



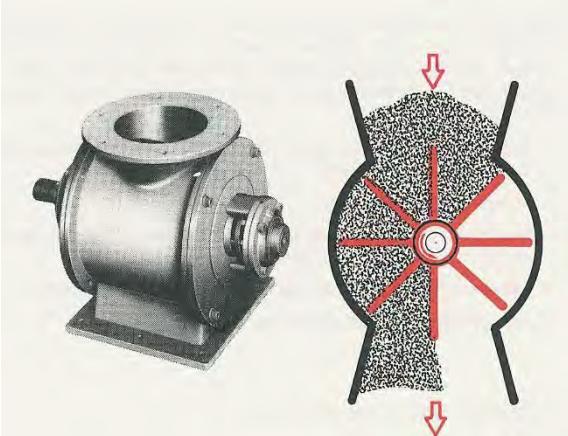
# Module 6.1.2: Types de transports (7)

- a) convoyeur pneumatique
- b) convoyeur à air
- c) convoyeur à bande et chaînes
- d) convoyeur a panneau vibrant
- e) convoyeur à godets
- f) convoyeur à vis et conduites vibrantes

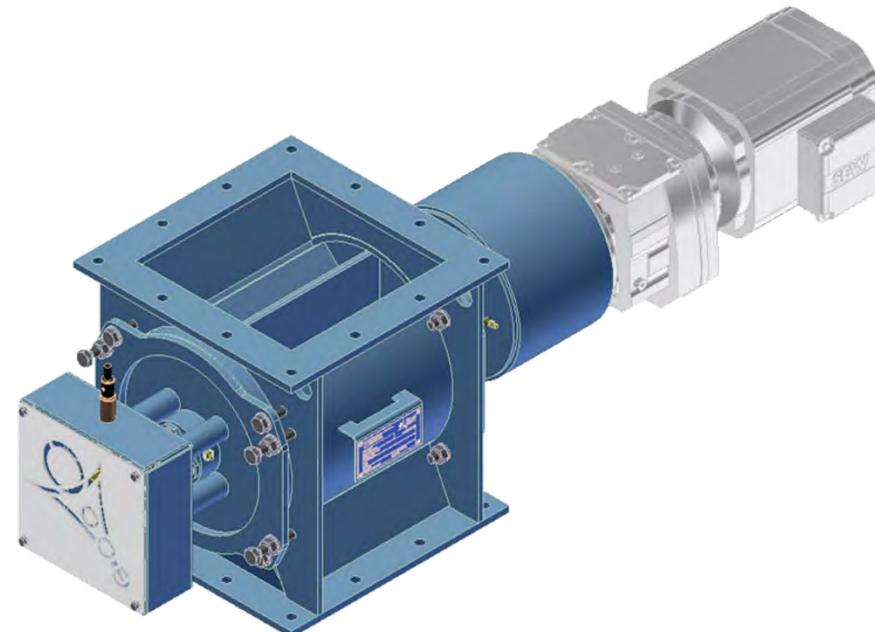


Transporteur à vis

# Module 6.1.2: Types de transports (8)

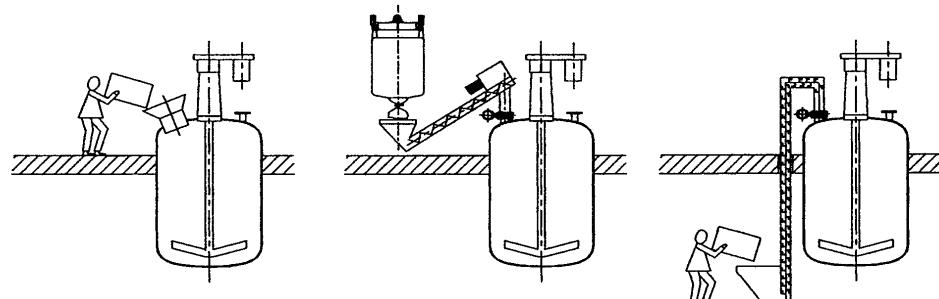


Ecluse à roue cellulaire  
(par gravité)

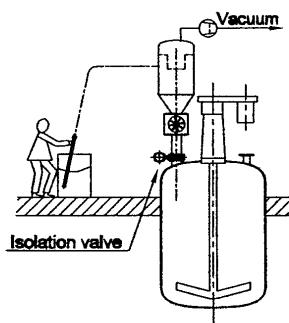


# Module 6.1.2: Transporteurs et charge de réacteur

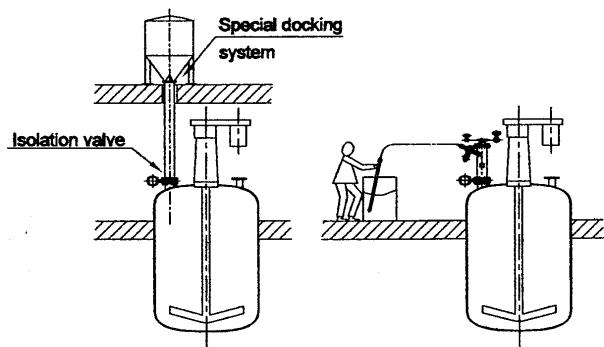
1. Charge manuelle    2. Transporteur à vis    3. Elévateur



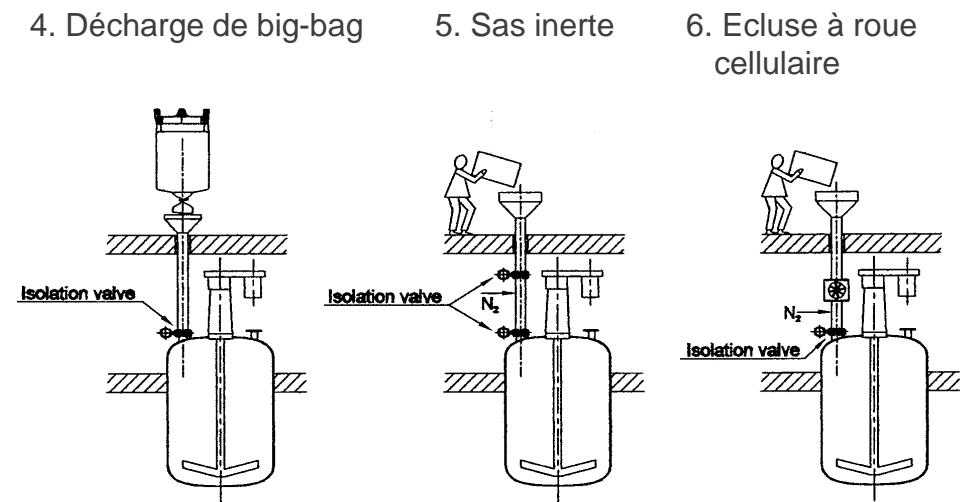
7. Système de succion avec écluse



8. Décharge de conteneur



9. Système PTS



# Module 6.2

La mouture (ou broyage) consiste à fragmenter des solides, à réduire la taille et/ou à augmenter la surface spécifique de particules solides.

Ce phénomène résulte de l'action d'un champ de contraintes engendré par des forces de contact (compression, cisaillement, torsion, flexion, attrition, plus rarement traction).

## 6.2 Le broyage/mouture

### 6.2.1 Théorie du broyage

# Module 6.2.1: Définition (1)

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

- **Débitage**: > 100 mm
- **Concassage**: 25 - 100 mm
- **Granulation**: 6.3 - 25 mm
- **Broyage**: 0.4 - 6.3 mm
- **Pulvérisation**: < 0.4 mm
- **Micronisation**:  $\approx \mu\text{m}$
- **Défibrage**: fragmentation des matières fibreuses (bois, végétaux, ...)
- **Déchiquetage**: réduction par hachage des matières flexibles
- **Découpage**: sciage ou cisaillement pour obtenir des fragments réguliers.

# Module 6.2.1: Définition (2)

On classe en général les appareils de fragmentation en fonction des dimensions des solides qu'ils traitent:

- Concasseurs pour l'obtention de gros fragments.
- Broyeurs pour la production de poudre.
- Pulvérisateurs, microniseurs ou super-broyeurs pour la préparation de poudres très fines.
- Désintégrateurs pour fragmenter les matières fibreuses.

# Module 6.2.1: Définition (3)

- **Taux de réduction** : c'est le rapport des dimensions moyennes avant et après fragmentation. Le taux de réduction varie de 5 à 100 environ.  
 $n=D/d$  avec D=dimension initiale caractéristique, et d=dimension finale caractéristique.
- **Dureté** : elle est définie par rapport à un autre matériaux. Un solide est plus dur qu'un autre si il le raye et n'est pas rayé par lui. L'échelle de dureté couramment utilisé est l'échelle de MOHS. Cette dureté est moins importante pour la broyabilité que pour l'usure.
- **Friabilité** : sans rapport avec la dureté, c'est la facilité avec laquelle une substance est brisée par percussion. Le charbon et le diamant sont, des substances friables, les matières plastiques ne sont pas friables.
- **Taux d'humidité** : un taux d'humidité généralement admis est de 1 à 4%. Au delà, il y a un risque de formation de pâte avec blocage du broyeur
- **Energie de broyage:**  $E = k ( 1/d - 1/D )$   
k dépend du produit et du broyeur. L'énergie de broyage est proportionnelle à la somme des nouvelles surfaces créées au cours de l'opération. Mais son calcul reste aléatoire. Il faut noter que l'énergie de broyage est faible (~3%) devant l'énergie nécessaire à l'ensemble de l'installation de broyage, notamment en raison des frottements et de l'énergie nécessaire au transport des solides.

# Module 6.2.1: Mouture, mécanisme (1)

L'opération de mouture dépend des propriétés de la matière à fragmenter.

Pour les matières dures, la contrainte est appliquée soit:

entre 2 surfaces: **compression**  
soit sur une seule: **percussion**

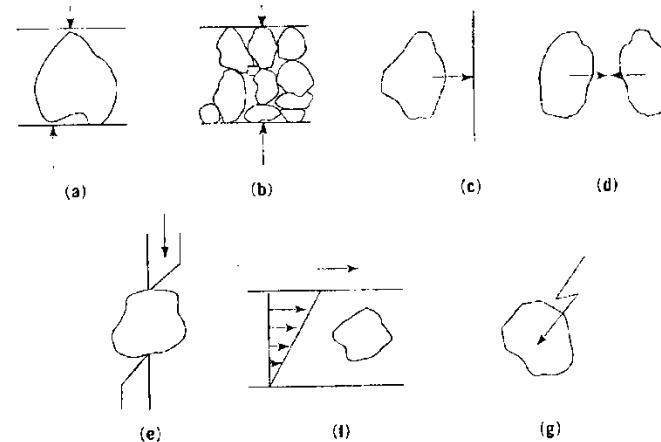
**Attrition ou abrasion** : broyage des matières tendres

**Cisaillement** : notamment pour les matières friables

**Arrachement** : notamment pour les matières molles

**Découpe** : qui donne des particules bien définies

*généralement la contrainte est appliquée par plusieurs de ces moyens combinés*



a. particule isolée; b. lit de particules comprimé entre 2 surfaces;  
impact d'une particule contre c une surface d. une particule plus  
molle e. cisaillement f. abrasion g. réaction dans un plasma

# Module 6.2.1: Mouture, mécanisme (2)

Un matériau est dit fragile quand il se rompt avant de dépasser sa limite élastique. On appelle communément fragilité le comportement mécanique d'un solide qui se rompt sans déformation préalable importante.

Dans la pratique, il existe divers modes de fragilisation, le plus souvent fondés sur un accroissement de la fissuration préexistante de solides ou d'agrégats minéraux.

- La fragilisation **mécanique** est en général implicite et résulte de la fissuration induite par les opérations d'abattage, de débitage ou de concassage.
- La fragilisation **thermique** peut se faire :
  - par choc(s) thermique(s) en exploitant la dilatation différentielle des composants, suivie parfois d'une trempe rapide, éventuellement dans un réactif chimique (exfoliation de la muscovite) ;
  - par destruction thermique, au moins partielle, d'un composant (libération des phosphates indurés par déstabilisation de la gangue carbonatée) ;
  - par traitement à très basse température (broyage dit cryogénique jusqu'à 77 K) de matières, comme les métaux ductiles ou les polymères organiques, dont le comportement à l'ambiante est plastique.
- La fragilisation **électrique** repose sur la formation de plasmas induite dans les matériaux humides par des impulsions à haute tension, jusqu'à 200 kV. Un procédé fondé sur ce principe a été utilisé comme préalable à la délamination des kaolinites.
- La fragilisation par **champ électromagnétique** fait appel à l'élévation locale de la température , due aux micro-ondes ou à des hautes fréquences, qui engendre une vaporisation ou crée des microplasmas. Elle concerne les matériaux hétérogènes où les constantes diélectriques sont fortement contrastées.
- La fragilisation **chimique** consiste à faire réagir partiellement le matériau avec un fluide pour améliorer sa broyabilité ; certains copeaux métalliques sont, par exemple, traités à chaud sous atmosphère d'azote, de sorte que la formation d'oxynitrides limite leur flexibilité.

# Module 6.2.1: Mouture, mécanisme (3)

La fragmentation d'une particule peut être décrite selon une séquence en 4 étapes successives:

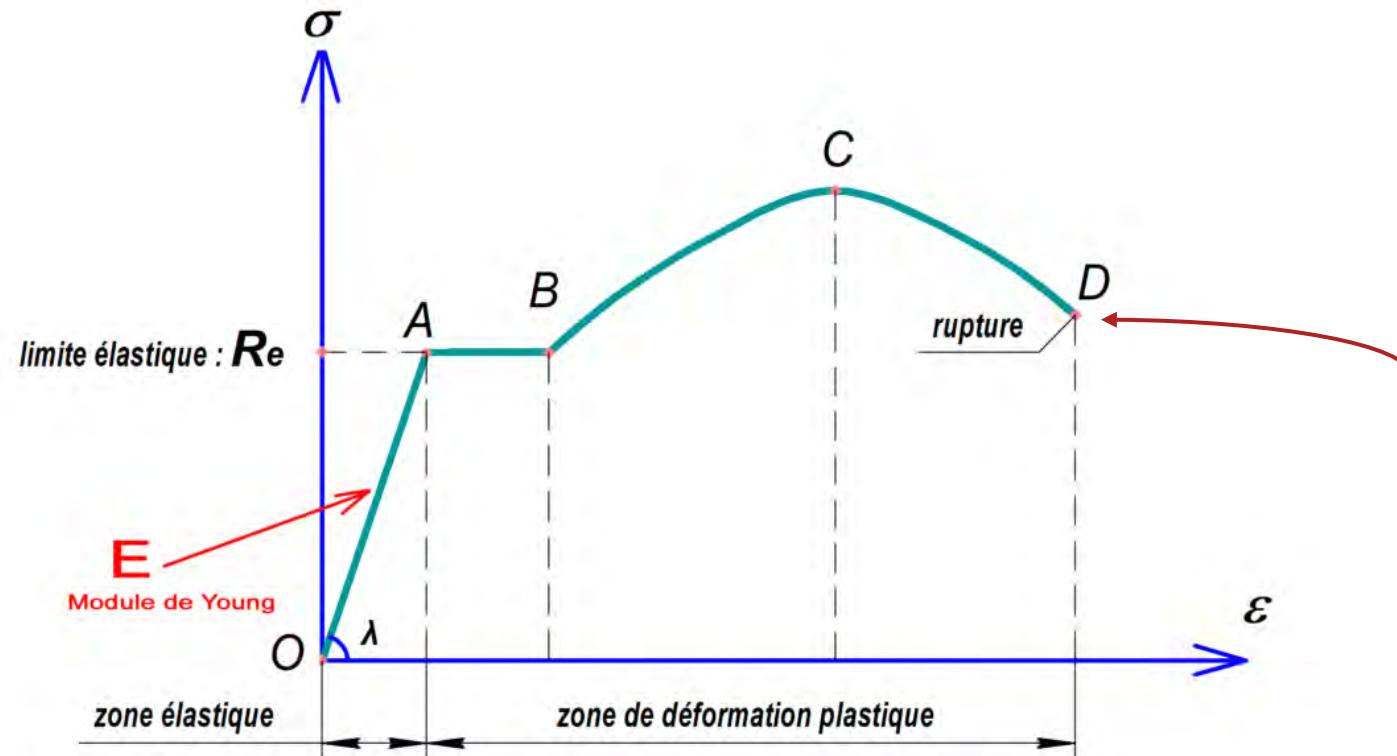
1. «charge» ou «stress» (**transmission** de l'énergie) de la particule
2. **déformation** de la particule
3. formation d'un champ de forces **non uniforme**
4. **fragmentation** ou non de la particule

On distingue 3 différents comportements limites de déformation de particule :

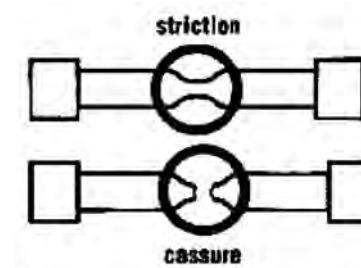
- a. **élastique**: caractérisé par sa réversibilité et son indépendance par rapport au temps
- b. **plastique**: irréversibilité complète des déformations
- c. **visqueux**: se différencie par sa forte dépendance à la vitesse de déformation

# Module 6.2.1: Mouture, mécanisme (4)

Allongement d'une éprouvette sollicitée en traction



- O-A : zone de déformation élastique (réversible) ;
- A-B: zone parfaitement plastique, une partie de la déformation sera permanente et irréversible
- B-D: zone d'écrouissage, étirement sans diminution de la section
- C: Point d'allongement maximal ou de résistance ultime
- C-D: zone de striction ou étranglement, la section ↓ alors que la contrainte ↑
- D: Point de rupture du matériau



Exemples:  $\sigma_r$ =Contrainte à la rupture

- Béton: 2-5 MPa
- Verre: 7 MPa
- Plomb: 13-22 MPa
- PET: 20-40 MPa
- Cuivre: 200-400 MPa
- Bois: 500 MPa (coupe: 8 MPa)
- Porcelaine: 450-600 MPa
- Acier: 800-1'500 MPa
- Diamant: 4'000-11'000 MPa

# Module 6.2.1: Mouture, mécanisme (5)

Pour un matériau élastique : (plastiques mous, papier, caoutchouc, ...)

- Les déformations sont réversibles et proportionnelles aux tensions
- Moulins coupants

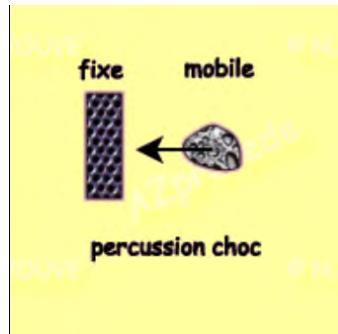
Pour un matériau plastique :(verre, métaux, pierre, ...)

- Les déformations produisent des tensions internes
- On doit stresser de manières répétitive ces matières pour arriver à la rupture
- Concasseur à mâchoires

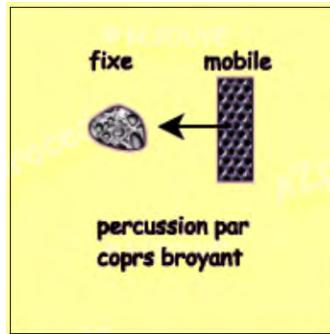
Pour un comportement visqueux: (polyéthylène, polystyrène, ...)

- Fortement dépendant de la déformation et de la température
- Force appliquée pour la rupture doit être rapide avant la déformation du corps
- On doit souvent refroidir l'appareillage
- Moulins à couteaux

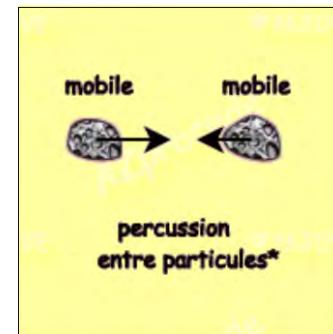
# Module 6.2.1: Modes de fragmentation



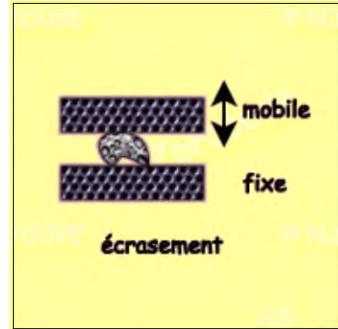
percussion par projection  
des particules (>100m/s)  
sur une surface fixe



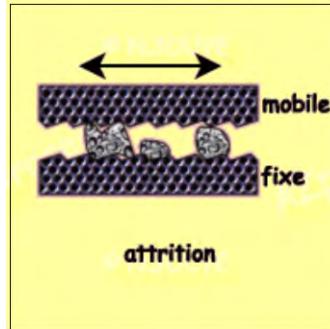
percussion entre  
particules fixes et corps  
broyant mobile (>100m/s)



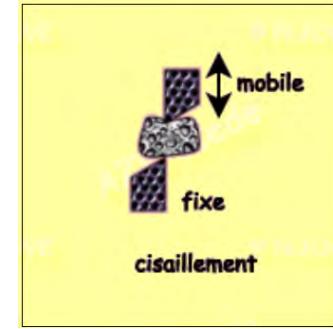
percussion entre  
particules



écrasement entre une  
plaqué fixe et une plaque  
mobile (~1m/s)



attrition, abrasion, usure  
par frottement obtenue  
par glissement relatif de  
deux corps broyants entre  
lesquels sont placées les  
particules à broyer



cisaillement entre deux  
corps coupants entre  
lesquels sont placées  
les particules à broyer

# Module 6.2.1: Théorie de la fragmentation (1)

La théorie de la fragmentation repose sur la relation liant l'énergie consommée (travail de broyage) et la taille des particules du produit obtenu ( $d_{p,ap}$ ) à partir d'une taille donnée de l'alimentation ( $d_{p,av}$ ).

## A. Loi de Von Rittinger (1867):

l'énergie consommée **W** est directement proportionnelle à la quantité de surface nouvellement créée (*point faible: ne tient pas compte de la déformation du matériau avant fragmentation*)

$$W = C_R \cdot \left( \frac{1}{d_{p,ap}} - \frac{1}{d_{p,av}} \right) = C_R \cdot (A_{s,ap} - A_{s,av}) , \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$$

*Cette loi s'applique uniquement à la fragmentation des particules fines à ultrafine (<100µm)*

## B. Loi de Kick (1885):

l'énergie nécessaire pour fragmenter un matériau homogène est proportionnelle à la variation du volume

$$W = C_K \cdot \ln\left(\frac{d_{p,av}}{d_{p,ap}}\right) = C_K \cdot \ln\left(\frac{A_{s,ap}}{A_{s,av}}\right) , \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$$

*Cette loi ne s'applique que pour le concassage, c'est à dire pour une fragmentation grossière (> 10 cm)*

## C. Loi de Bond (1952):

l'énergie spécifique requise est inversement proportionnelle à la racine carrée de la nouvelle surface produite

$$W = W_i \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{d_{p,ap}}} - \frac{10}{\sqrt{d_{p,av}}} \right) , \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$$

*Cette loi s'applique pour les fragmentations de grossier à fin (entre Kick et Rittinger), souvent utilisée pour le dimensionnement des broyeurs*

*En pratique, ce sont les quartiles 80 (aussi appelés  $d_{80}$ ) qui sont utilisés pour décrire les états granulométriques  $d_{p,ap}$  et  $d_{p,av}$ . Cette valeur peut être définie comme la dimension de la maille du tamis qui autorise 80 % de passant.*

$C_R, C_K, W_i$ : cstes de Rittinger, Kick, Bond spécifiques aux matériaux

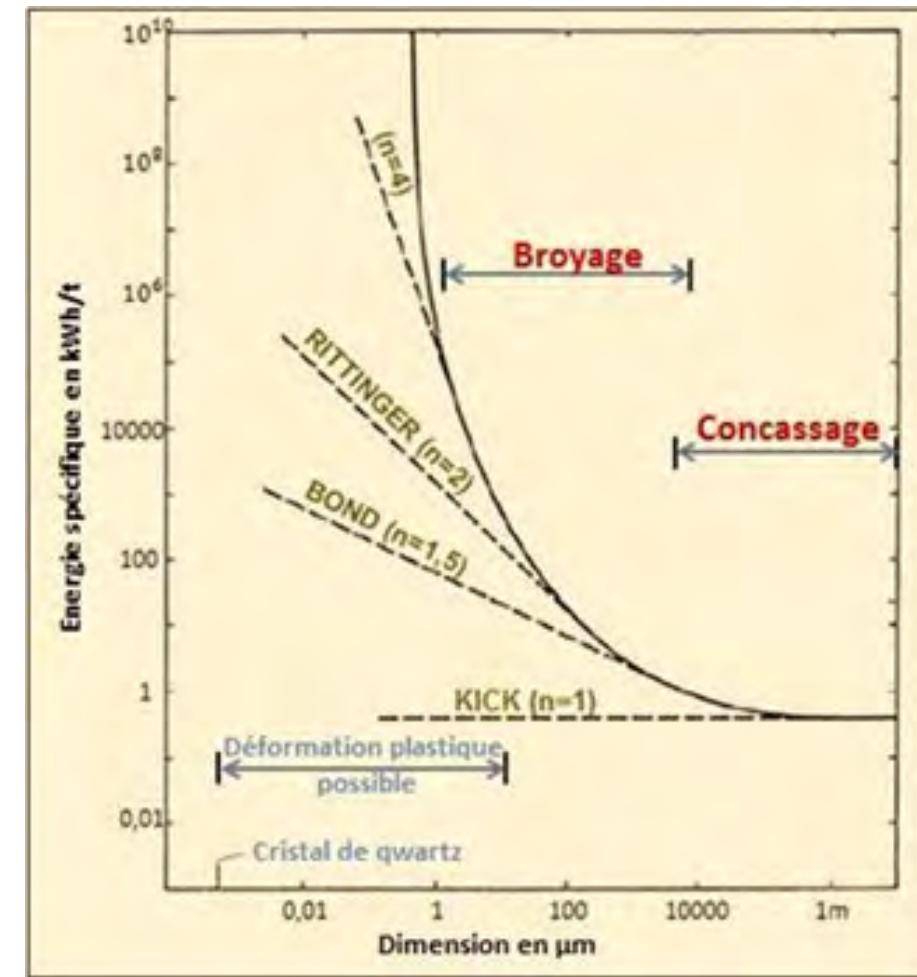
$A_s$ : surfaces spécifiques

# Module 6.2.1: Théorie de la fragmentation (2)

La théorie de la fragmentation sous la forme générale devient, Holmes (1957):

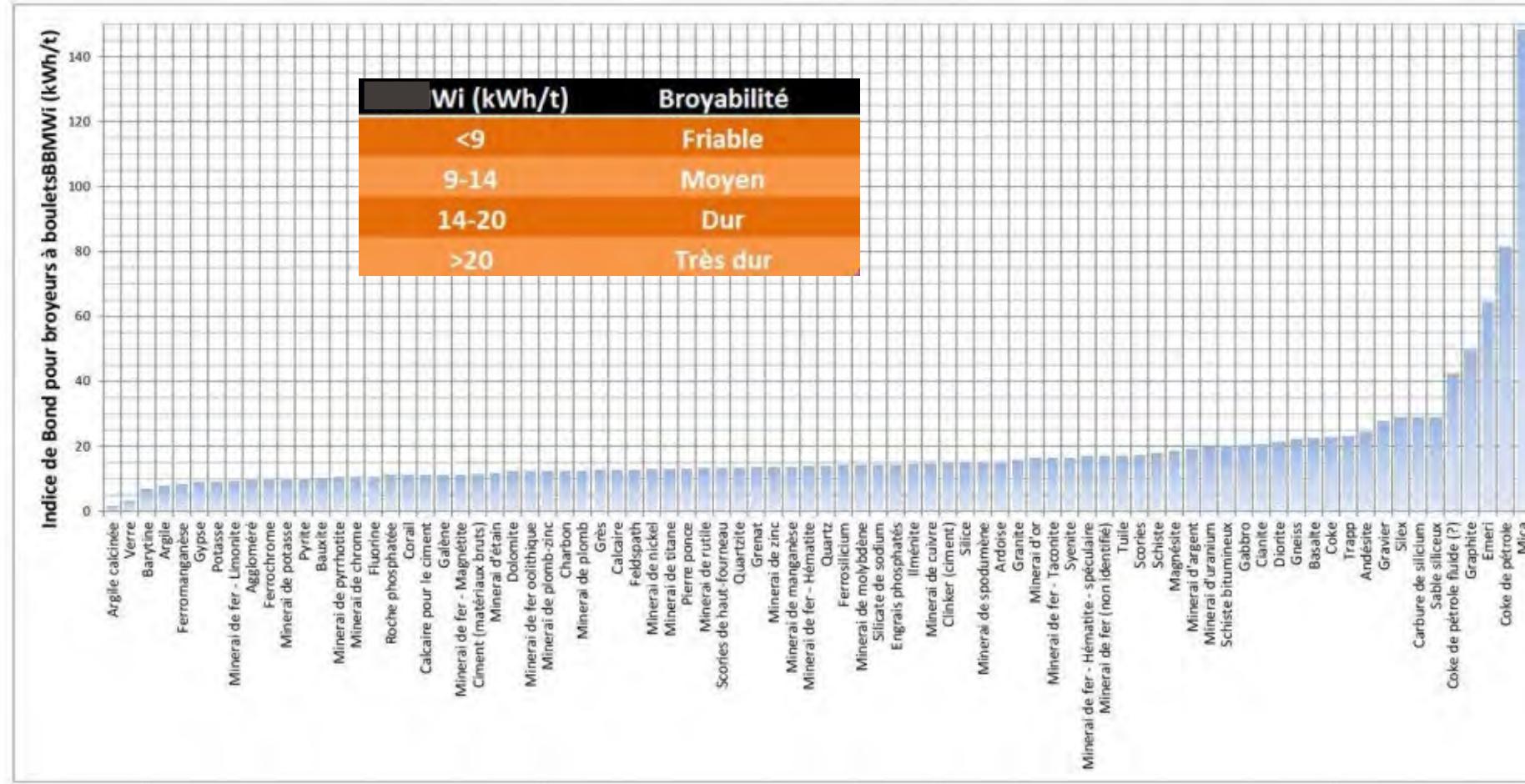
$$\frac{dW}{dx} = -C \frac{1}{x^n}$$

- $dW$  est la variation de l'énergie consommée par le broyage
- $C$  est une constante liée au matériau
- $dx$  est la variation en dimension qui nécessite un travail  $dW$  par unité de volume
- $x$  est la dimension caractéristique du produit
- $n$  est l'exposant (en fonction de la forme de broyage, des tests sur échantillons) = 1: Kick, 1.5: Bond, 2: Von Rittinger.



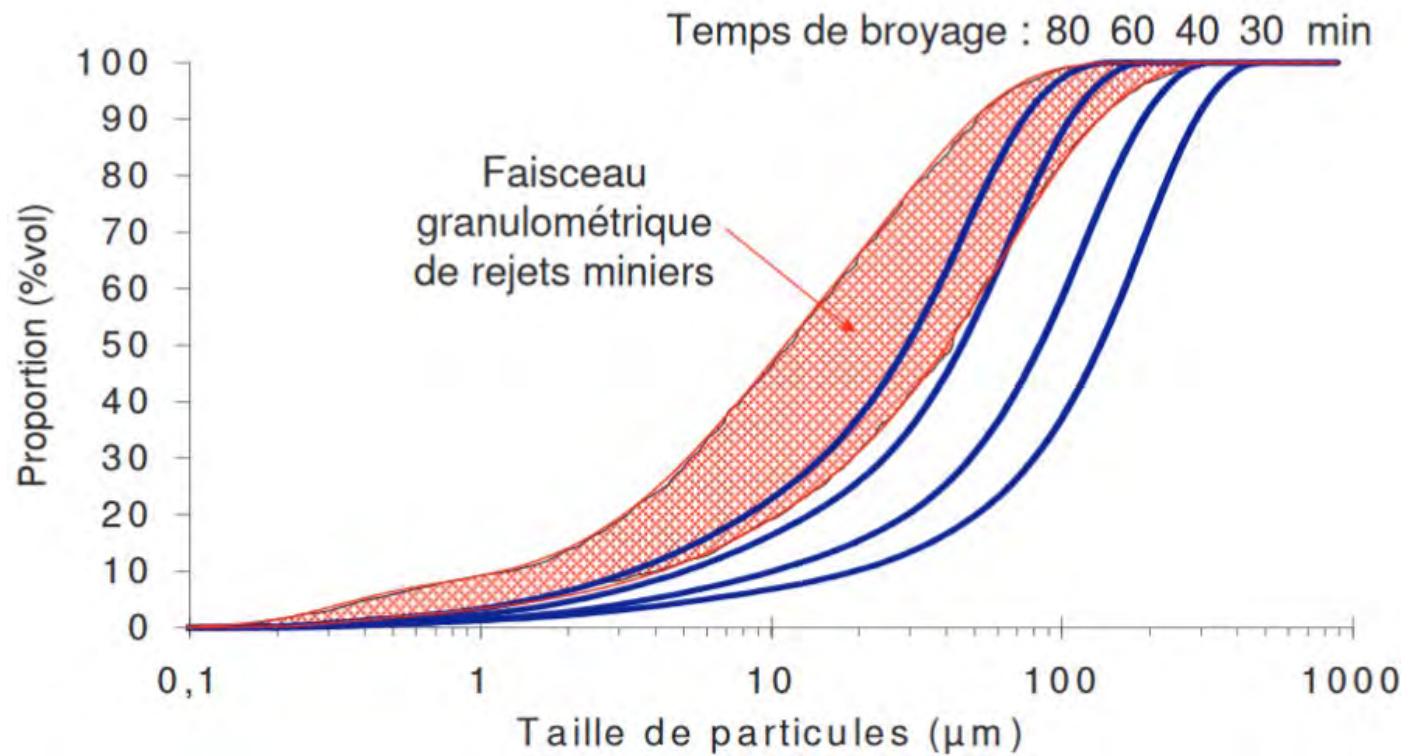
# Module 6.2.1: Théorie de la fragmentation (3)

L'indice de Bond ou indice énergétique (" Bond work index") lié à la nature du matériau ( $\text{kWh t}^{-1}$ )



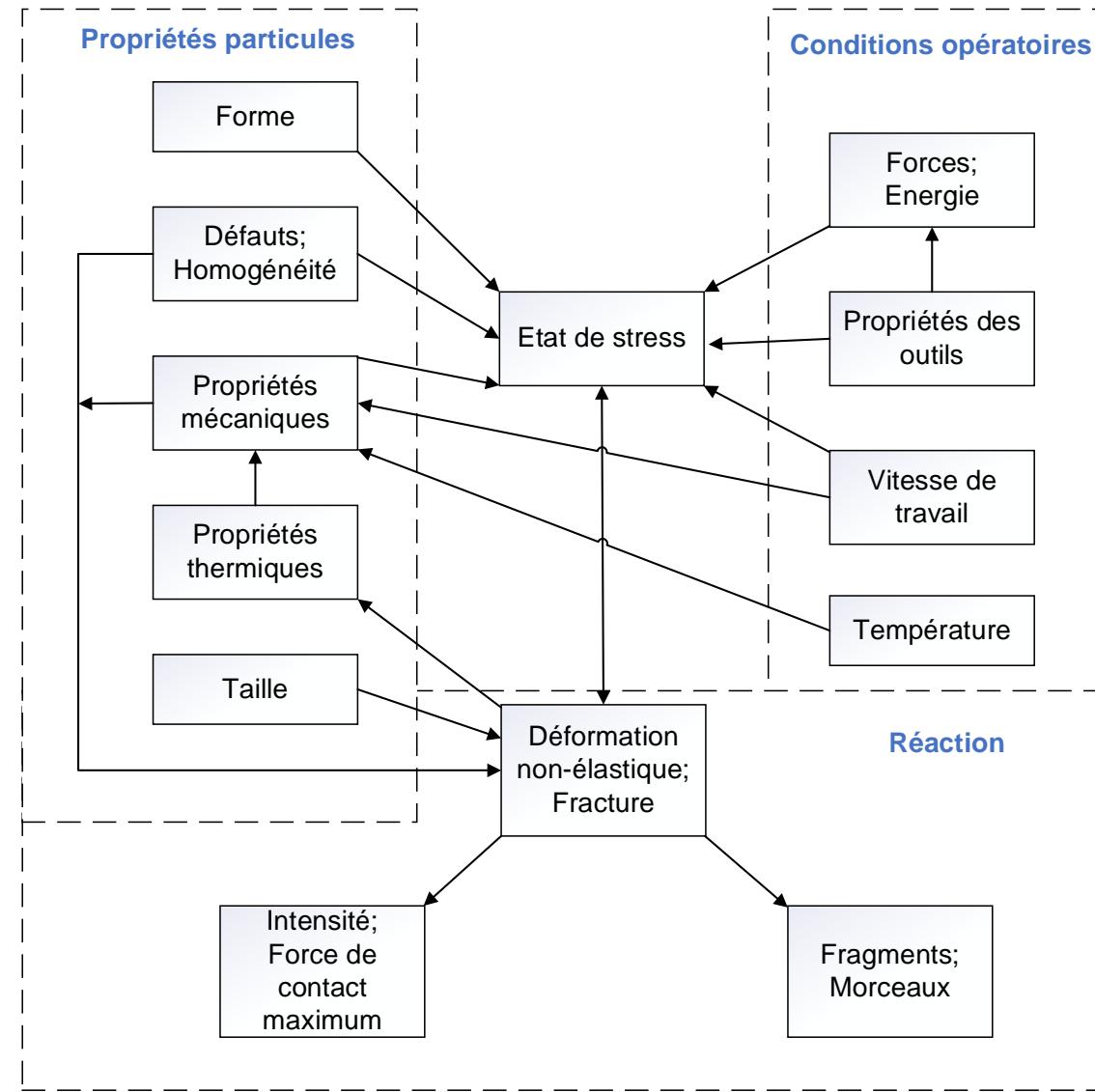
Source: <http://mineralurgie.unblog.fr/>

Broyage de minerais avec des billes en quartz de  $d_p = 35 \text{ mm}$  (dispersion diamètres 1-3)



# Module 6.2.1: Fragmentation des particules

Les effets des paramètres peuvent se résumer comme:



## Module 6.2.2

### FRAGMENTATION GROSSIÈRE

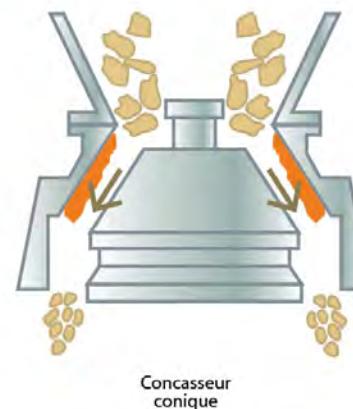
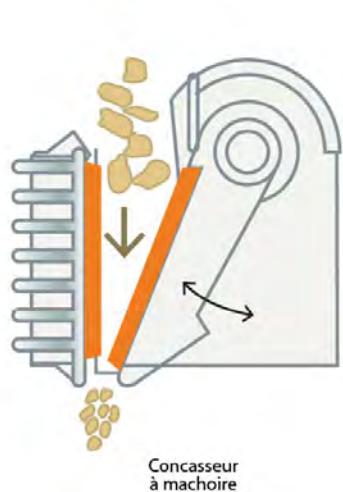
## 6.2 Le broyage/mouture

### 6.2.2 Types de broyeurs

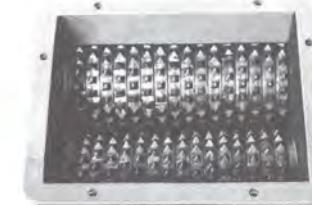
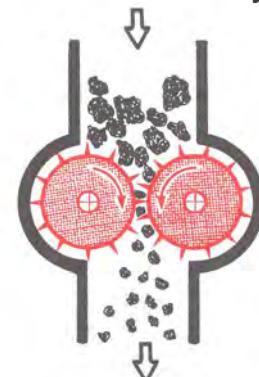
# Module 6.2.2: Les concasseurs (1)

Les concasseurs sont utilisés pour obtenir des particules assez grossières. Ils précèdent souvent les opérations de mouture. Opèrent à faible vitesse, alimentation pas trop élevée, des poussières peuvent sortir de l'alimentation.

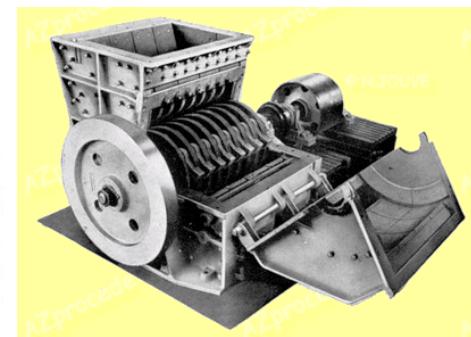
à mâchoires



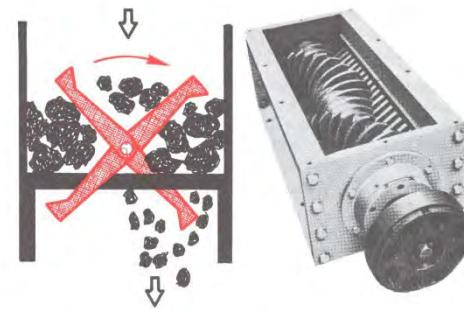
à cylindres



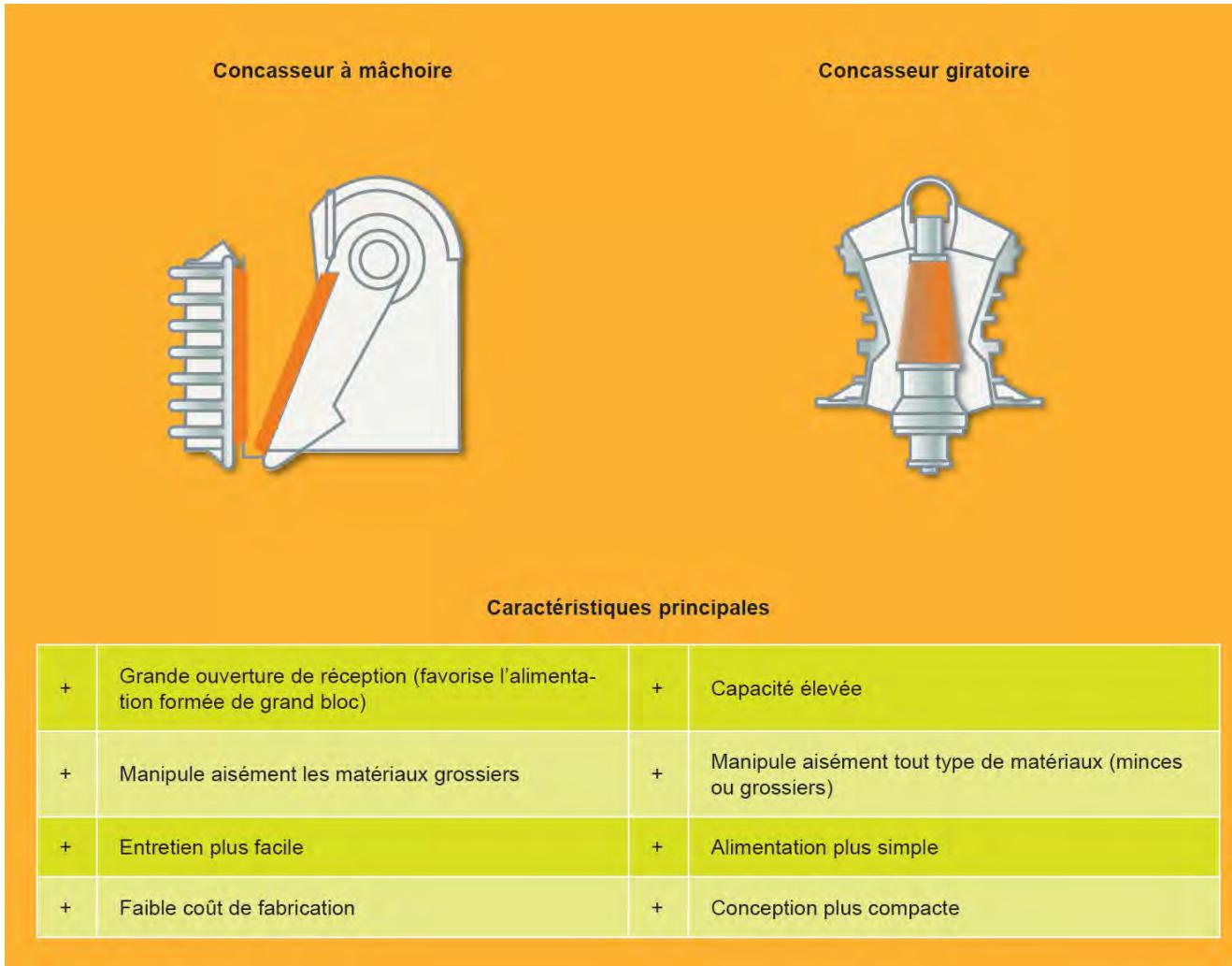
à marteaux



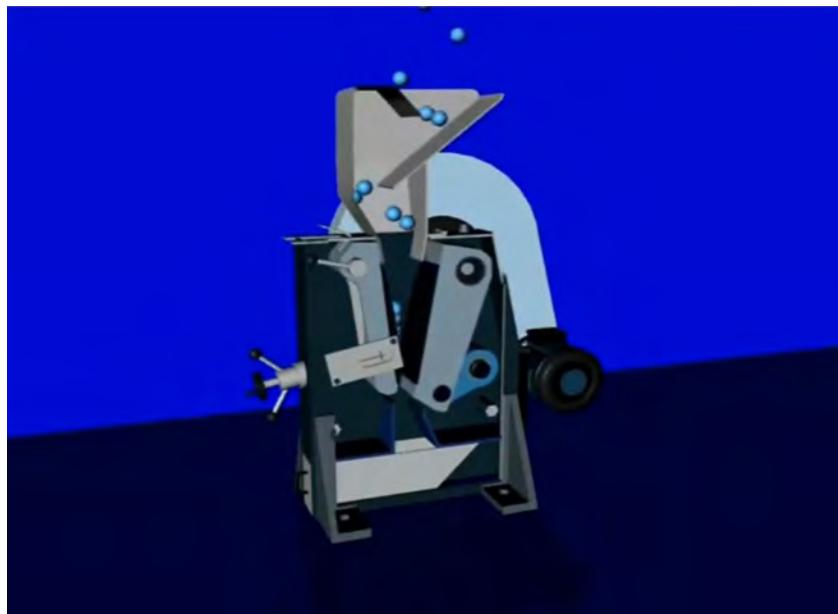
à doigts ou lamelles



# Module 6.2.2: Les concasseurs (2)



Source: <https://energie.wallonie.be>



Durée: 32''

Source: <https://www.retsch.fr/fr/produits/broyer>

*Débit: 100-4'000 t/h  
Vitesses rotation: 60-250 t/min  
Transport par gravité*

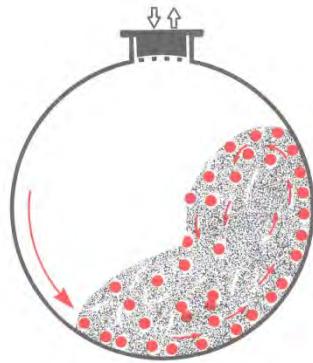
Module 6.2.2  
FRAGMENTATION FINE

## 6.2 Le broyage/mouture

### 6.2.2 Types de broyeurs

# Module 6.2.2: Les broyeurs (1)

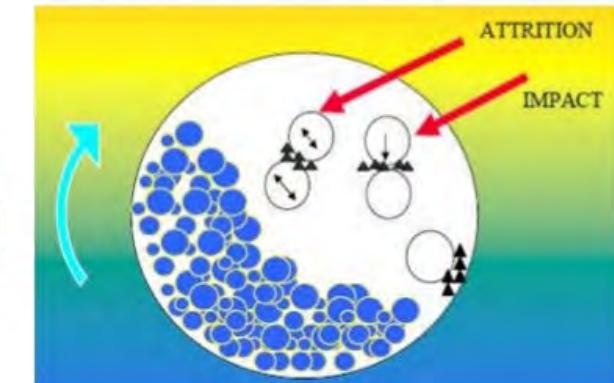
Les broyeurs ont en commun que la réduction de taille de particule se fait à l'aide de corps pleins, libres de toute attache, mélangés à la matière à broyer. Opérant à faible vitesse.



broyeur tubulaire ou à tambour  
(à boulets)

tubulaire

Ⓐ



vibrant

Ⓑ

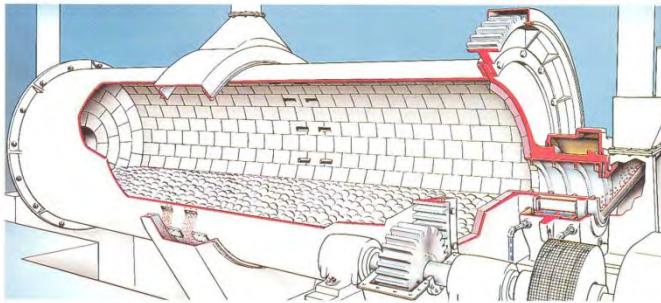
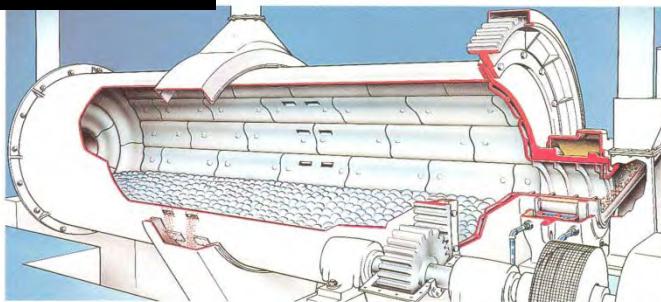
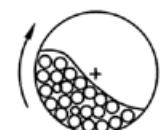
planétaire

Ⓒ

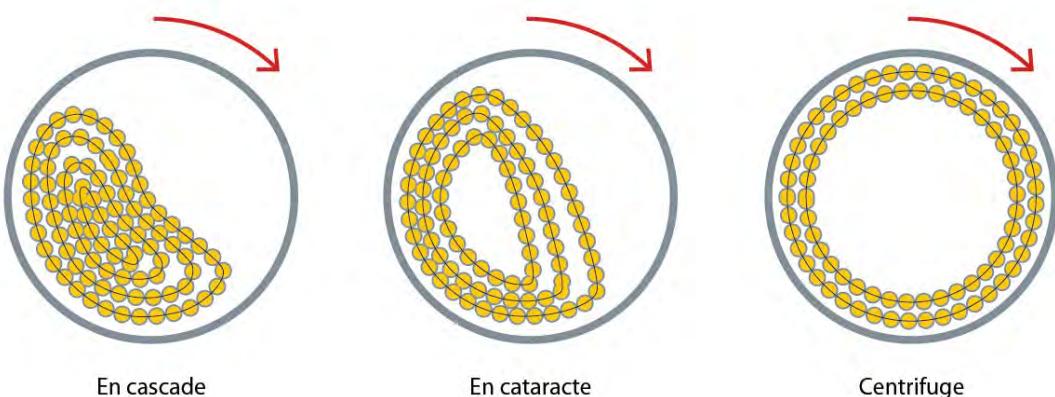


agité

Ⓓ



# Module 6.2.2: Les broyeurs (2)



$$\omega_{crit} = \frac{42.3}{\sqrt{d_{cylindre}}}$$

- A vitesse réduite, le régime est dit « **en cascade** ». Dans ce cas, la charge broyante a tendance à rouler jusqu'au point bas du cylindre. Il y a un phénomène d'abrasion des granulats à cause de cette charge broyante qui « roule » tout simplement sur eux. Ce régime induit la production de particules fines. Afin d'éviter l'usure du broyeur à cause de cette même abrasion, il faut augmenter l'épaisseur du blindage, ce qui peut s'avérer coûteux. Ce régime n'est dès lors pas choisi préférentiellement.
- A plus haute vitesse, le régime est dit « **en cataracte** ». La charge broyante est dans ce cas projetée sur les granulats à broyer en une série de paraboles et s'écrase sur ces derniers. La fragmentation produit dès lors de plus gros grains. Cette méthode permet de réduire l'épaisseur du blindage. Ce régime est choisi préférentiellement.
- Lorsque la vitesse augmente encore, la charge broyante ainsi que les granulats sont plaqués contre les parois et il n'y a plus aucune réduction de taille. Ce point correspond à la **vitesse critique**,  $\omega_{crit}$ , du système. En pratique, on choisit une vitesse entre 50 et 90 % de la vitesse critique. Ce choix est influencé par des considérations économiques.

# Module 6.2.2: Les broyeurs (3)

## Le choix des billes:

- L'efficacité du broyage est optimale lorsqu'on utilise un mélange de billes de trois diamètres différents. Le rapport des diamètres des billes est généralement de 1:2:4.
- Le volume total de billes, vide y compris, représentera environ 50-60% du volume intérieur de la jarre.
- Les billes de tailles différentes sont réparties selon les proportions suivantes, exprimée en pourcentage massique :25% de petites, 50% de moyennes et 25% de grosses.

## Volume de matière à broyer:

- Afin de limiter l'usure des billes, la charge à broyer doit recouvrir totalement la charge de billes. En général, elle représentera un volume correspondant à environ 15-25% du volume de la jarre.

## Vitesses utilisées en pratique:

- Pré-mouture:  $\approx 0.7 - 0.9 \omega_{\text{crit}}$
- Mouture fine:  $\approx 0.5 - 0.7 \omega_{\text{crit}}$

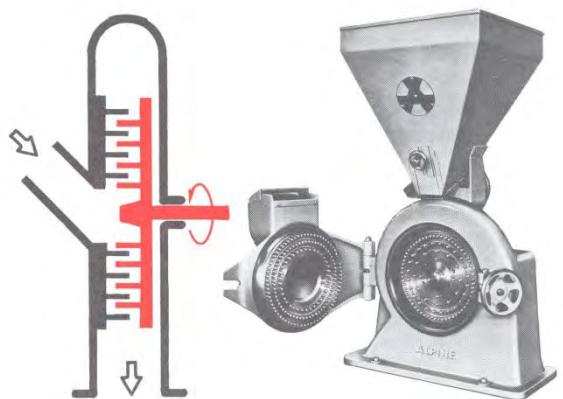
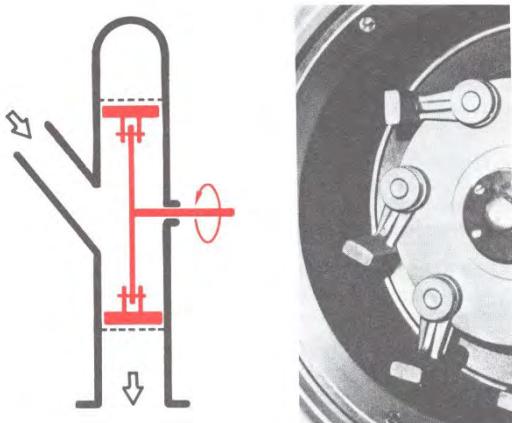
Débit: 100-600 t/h

Vitesses rotation: dépend du diamètre

# Module 6.2.2: Les moulins à percussion (1)

A. Impact par entraînement mécanique : Opérant à vitesse moyenne - élevée.

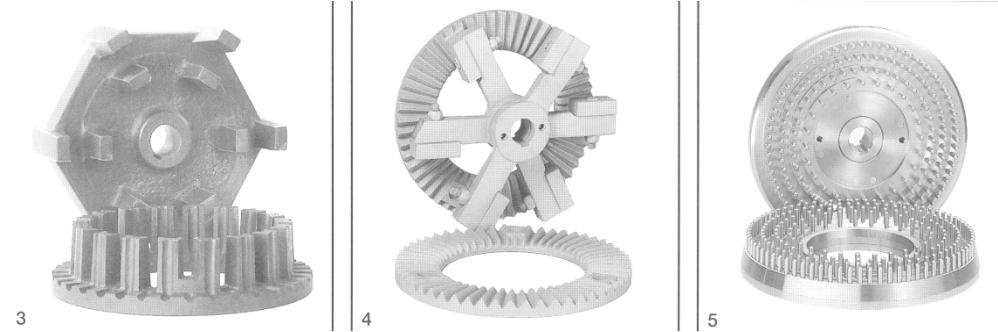
1. moulin à marteaux



2. moulin à aiguilles



Durée: 19"



Débit: 100-1100 t/h

Vitesses tip: 50-60 m/s

Diamètre → 3m

Source: Ciba-Geigy Inc.

## Module 6.2.2

FRAGMENTATION ULTRAFINE  
sèche

### 6.2 Le broyage/mouture

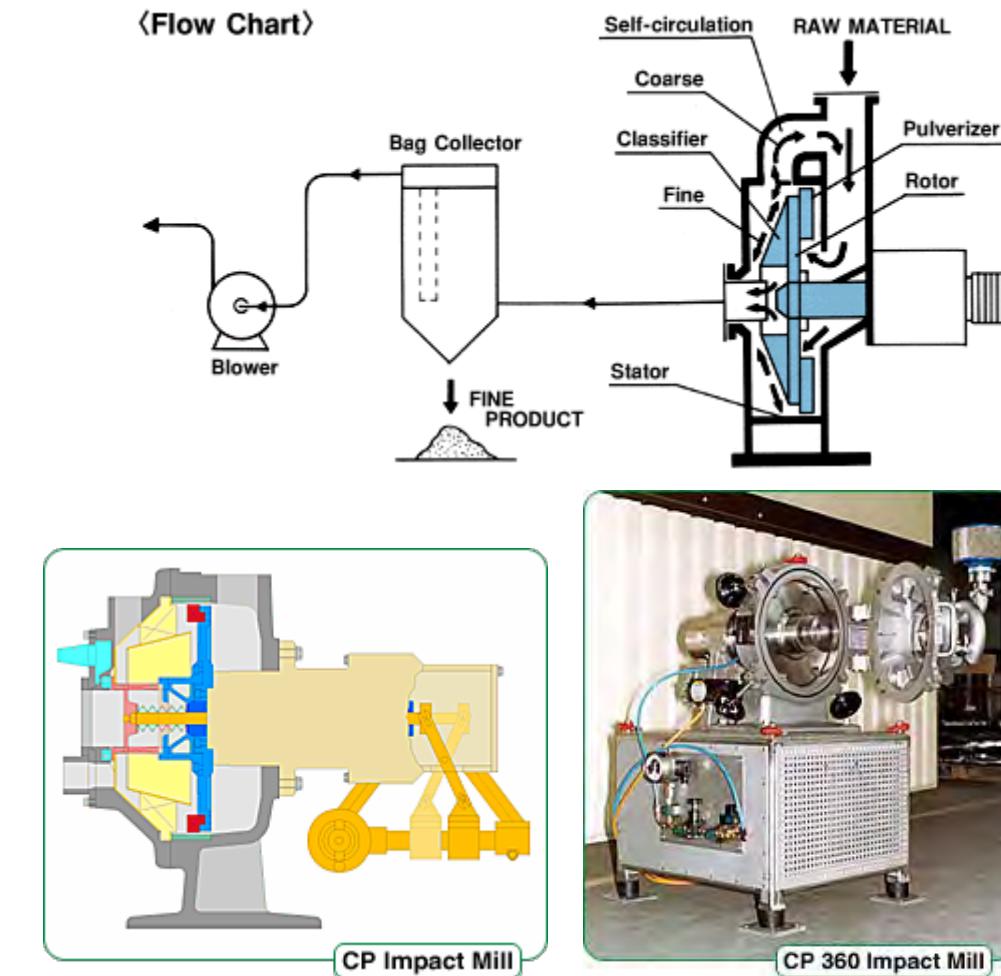
#### 6.2.2 Types de broyeurs

# Module 6.2.2: Les moulins à percussion (2)

B. Impact par entraînement mécanique : Opérant à vitesse élevée.



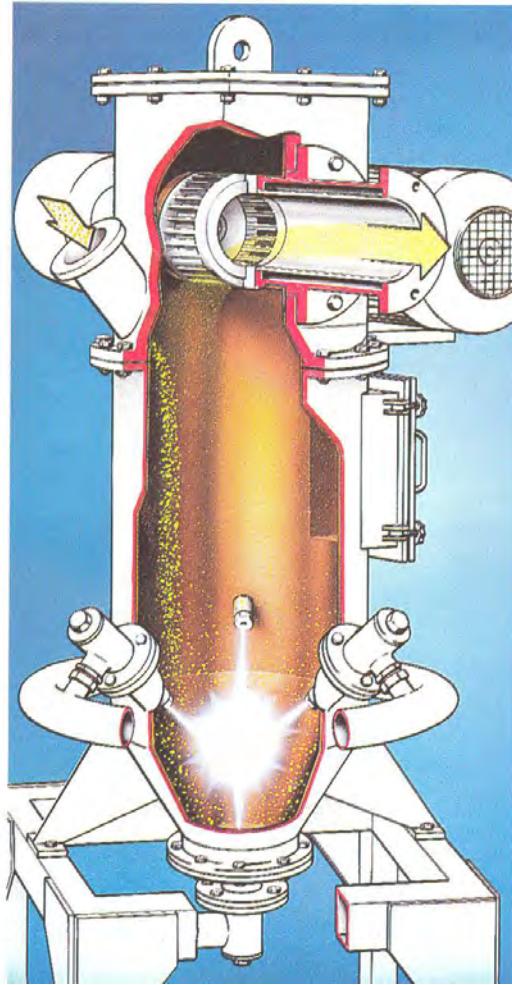
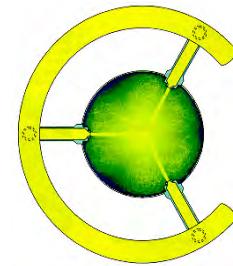
3. Moulin à impact à haute vitesse



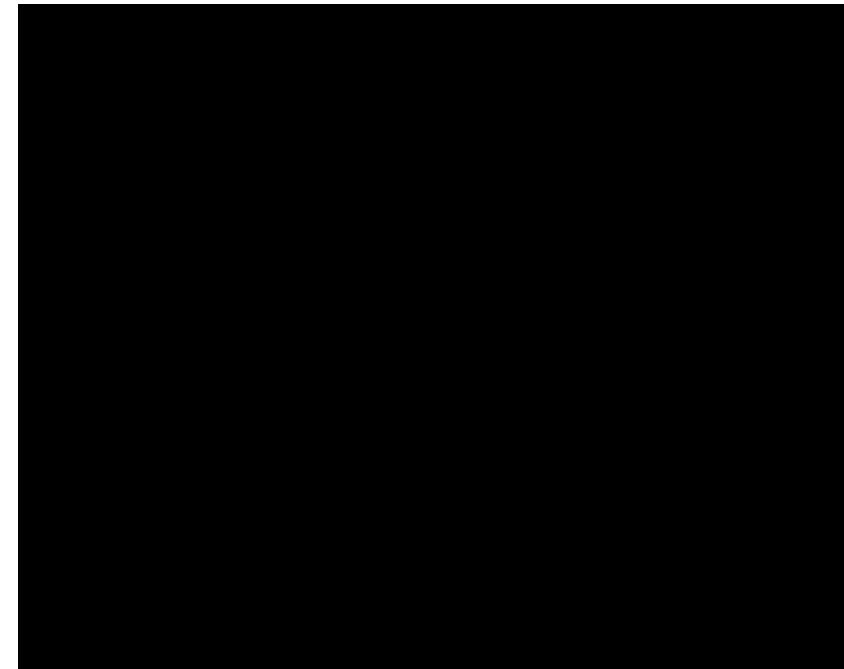
# Module 6.2.2: Les moulins à percussion (3)

C. Impact par entraînement pneumatique : Opérant à vitesse très élevée.

4. Jet-mill à lit fluidisé  
(jets de fluide)



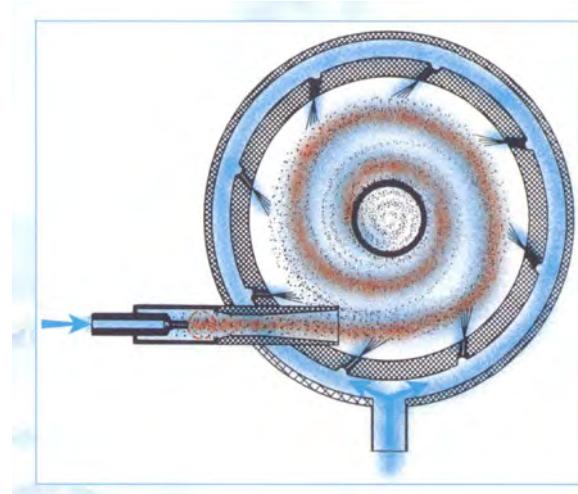
Vitesse du jet → 1200 m/s  
Débit: 1-2'800 kg/h



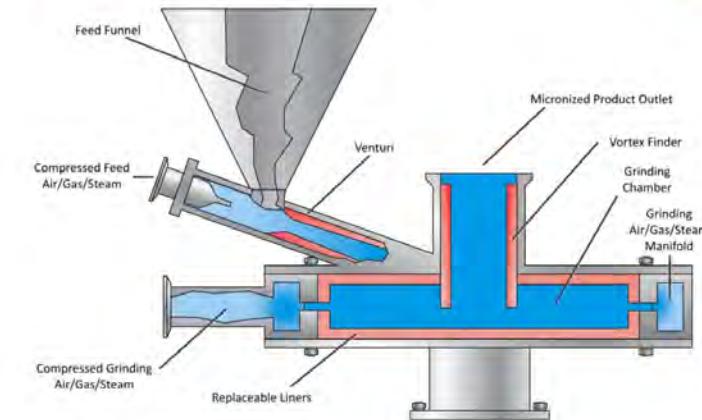
# Module 6.2.2: Les moulins à percussion (4)

C. Impact par entraînement pneumatique : Opérant à vitesse très élevée.

5. Jet-mill à spirale (pulvérisateur)



Micronizer® Jet Mill - How It Works



STURTEVANT

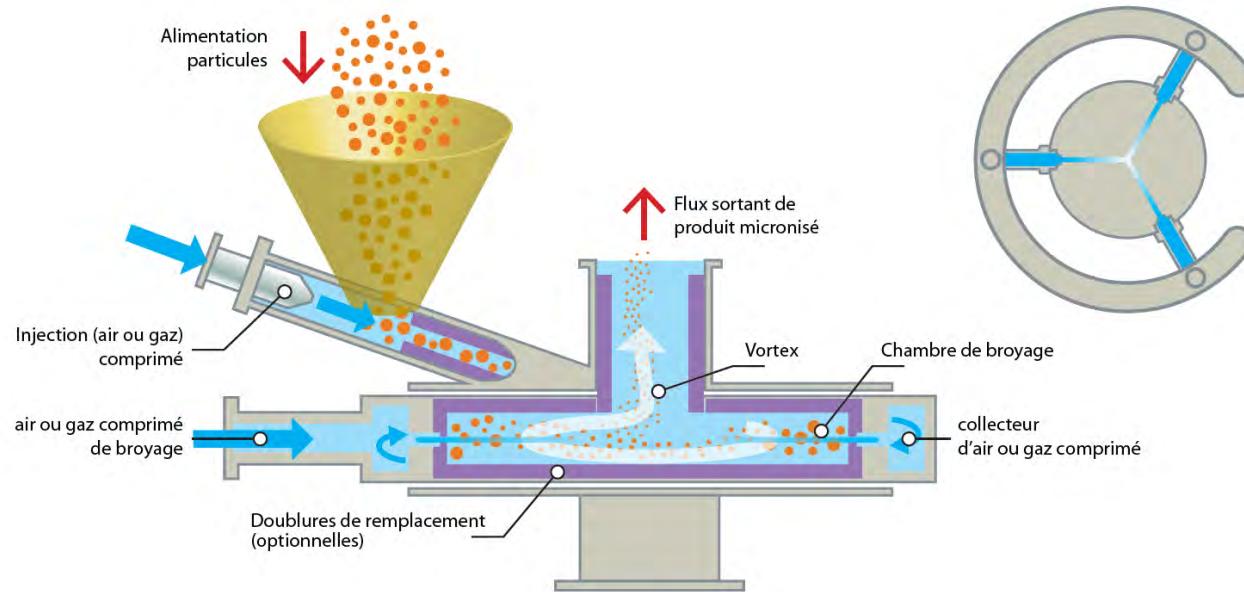
Durée: 1'20"

Source: <https://sturtevantinc.com/jet-mills-2/>

# Module 6.2.2: Les moulins à percussion (4bis)

C. Impact par entraînement pneumatique : Opérant à vitesse très élevée.

## 5. Jet-mill à jet d'air



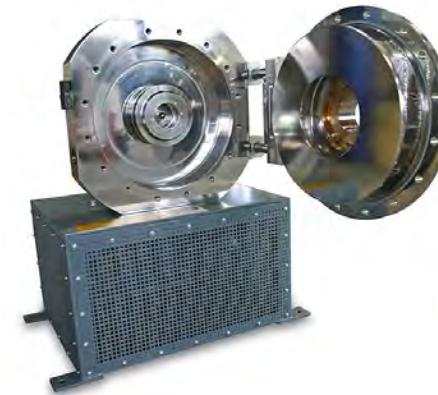
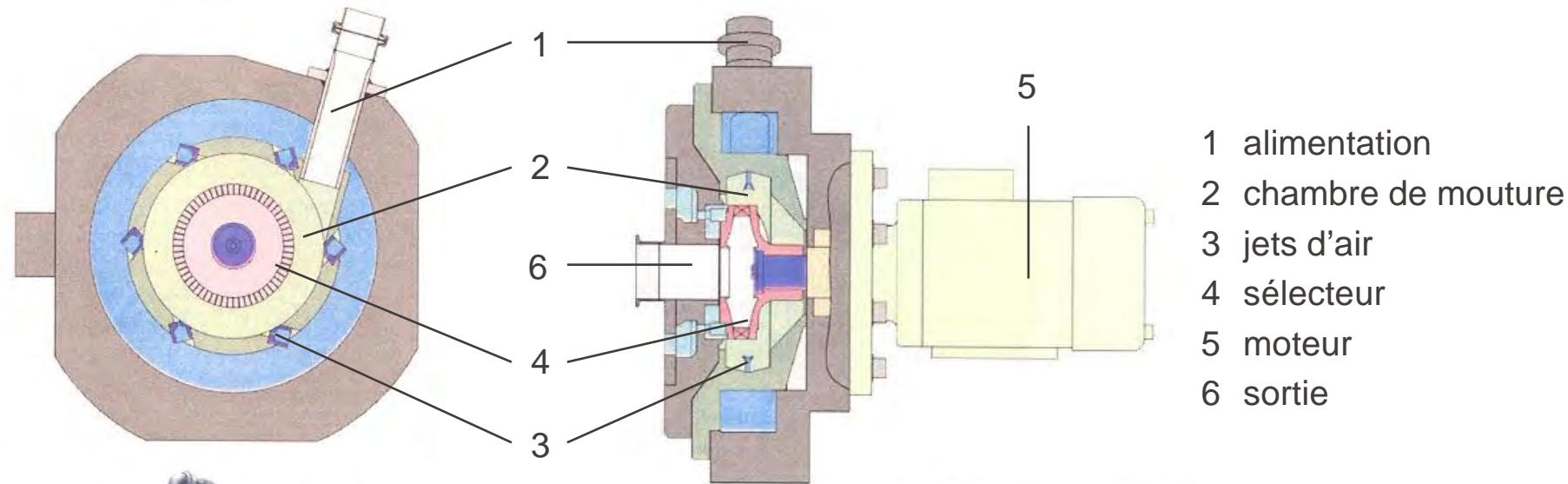
Les principaux avantages des broyeurs à jet sont les suivants :

- Production de particules ayant une taille et une apparence uniformes.
- Pas de problème d'usure.
- Pas de contaminations

# Module 6.2.2: Les moulins à percussion (5)

C. Impact par entraînement pneumatique : Opérant à vitesse très élevée.

6. Jet-mill à lit dense



## Module 6.2.2

### FRAGMENTATION ULTRAFINE humide

## 6.2 Le broyage/mouture

### 6.2.2 Types de broyeurs

# Module 6.2.2: Les moulins humides (1)

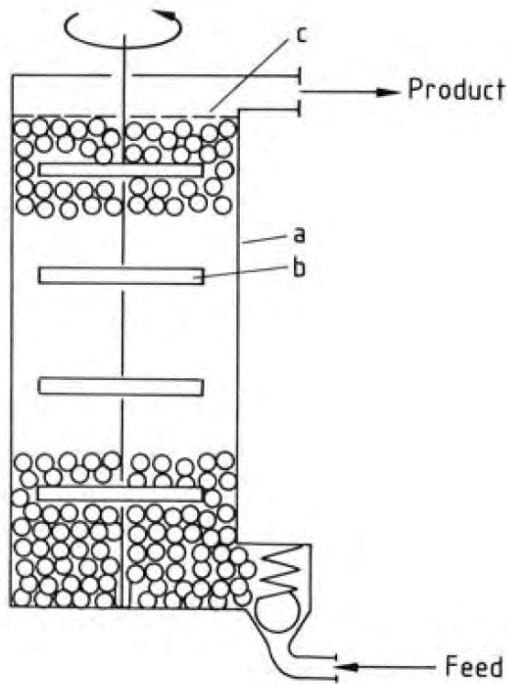
Le broyage humide est défini comme la fragmentation des solides en suspension dans un fluide. Les principales raisons d'utiliser cette technique sont:

1. L'alimentation est déjà sous la forme d'une suspension.
2. Le produit est souhaité en suspension.
3. La matière d'alimentation doit être finement broyée et a tendance à s'agglomérer.
4. Le matériel est explosif ou toxique.

# Module 6.2.2: Les moulins humides (2)

## D. Moulins à billes agitées

### 7. Moulin vertical



**Figure 59.** Schematic of an agitated ball mill  
a) Cylindrical mill housing; b) Agitator; c) Screen

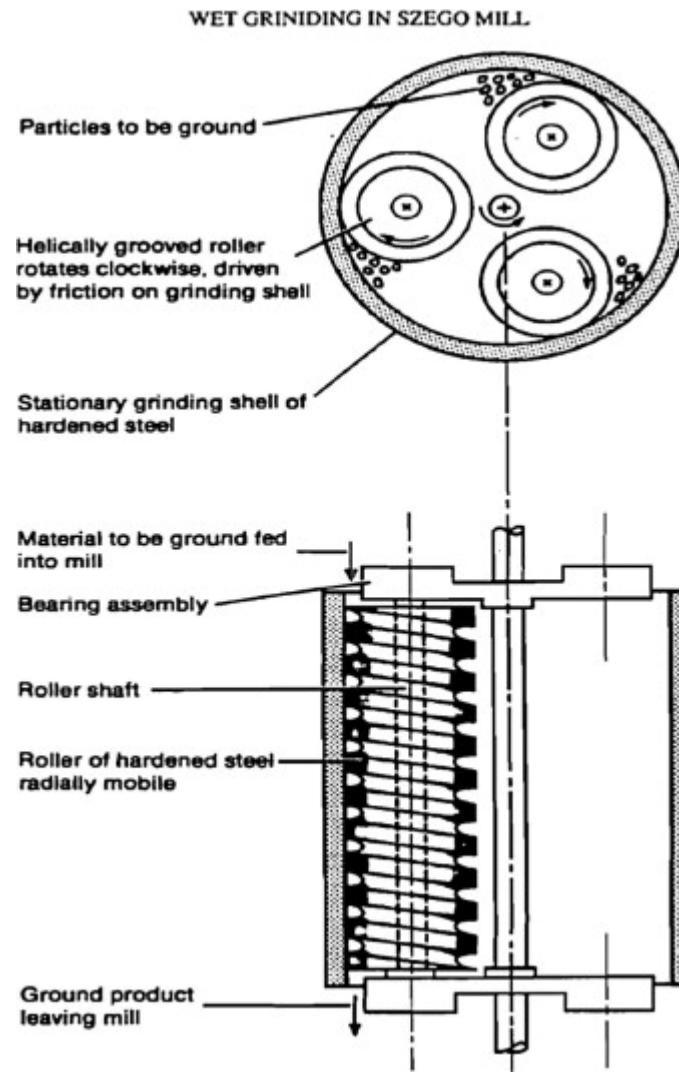


Source: <https://www.directindustry.com/prod/metso-corporation>

# Module 6.2.2: Les moulins humides (3)

## E. Moulins centrifuges

### 8. Moulin Szego (moulin à cylindres centrifuges)

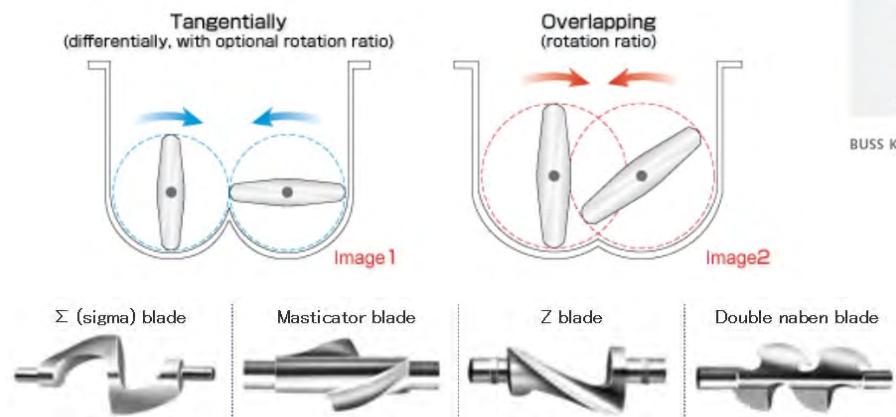


Source: Powder Technology, Volume 245, September 2013, Pages 189-198

# Module 6.2.2: Les moulins humides (4)

## F. Moulins rotatifs

### 9. Extrudeuses malaxeuses à simple ou double vis



## Module 6.2.2

Nouvelles technologies

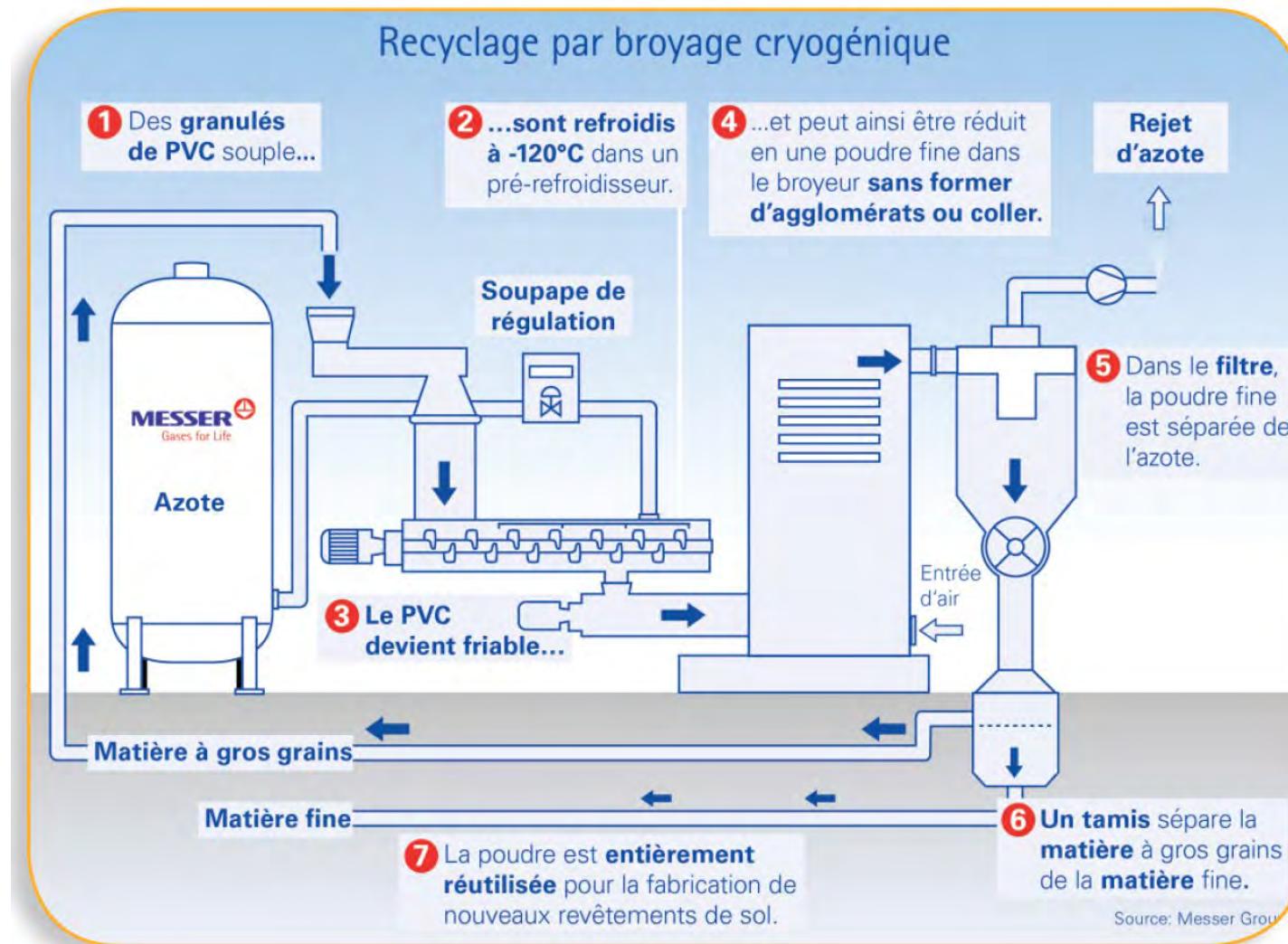
### **6.2 Le broyage/mouture**

#### **6.2.2 Types de broyeurs**

# Module 6.2.2: Broyage cryogénique (1)

- Par les techniques de broyages conventionnelles, il n'est pas toujours évident de fragmenter les déchets solides. En effet, certains matériaux, comme les thermoplastiques, les caoutchoucs, les cires, et quelques métaux ont tendance à s'agglomérer sous l'effet de la chaleur ; chaleur émanant du fonctionnement du broyeur en lui-même.
- Les procédés cryogéniques permettent dès lors de contourner cette difficulté en refroidissant ces matériaux avec de l'azote ou du dioxyde de carbone liquide. De là, les matériaux sont fragilisés et l'opération de broyage se verra nettement améliorée. En pratique, il est à noter un gain au niveau de la productivité ainsi qu'une économie en énergie.

# Module 6.2.2: Broyage cryogénique (2)



Principe du recyclage par broyage cryogénique dans le cas du PVC

## Module 6.2.3

### **6.2 Le broyage/mouture**

#### **6.2.3 Choix des broyeurs**

# Module 6.2.3: Production de chaleur

Les opérations de broyage consomment beaucoup d'énergie et une grande partie sera dégradée en chaleur qu'il faudra souvent évacuer:

- 1) Par des échangeurs de chaleur (internes, externes)
- 2) Par une alimentation refroidie
- 3) Par de la mouture humide
- 4) Par refroidissement avec un liquide cryogénique à l'intérieur du broyeur

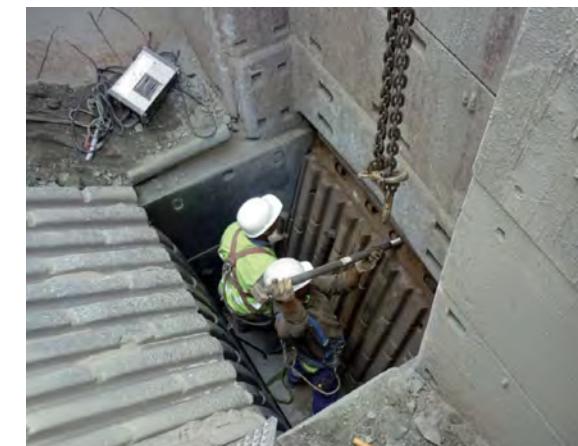
# Module 6.2.3 : Considérations de sécurité

Les opérations de broyage mettent en œuvre des installations avec de large pièces en mouvement et parfois de gros blocs en mouvement, il convient dès lors de :

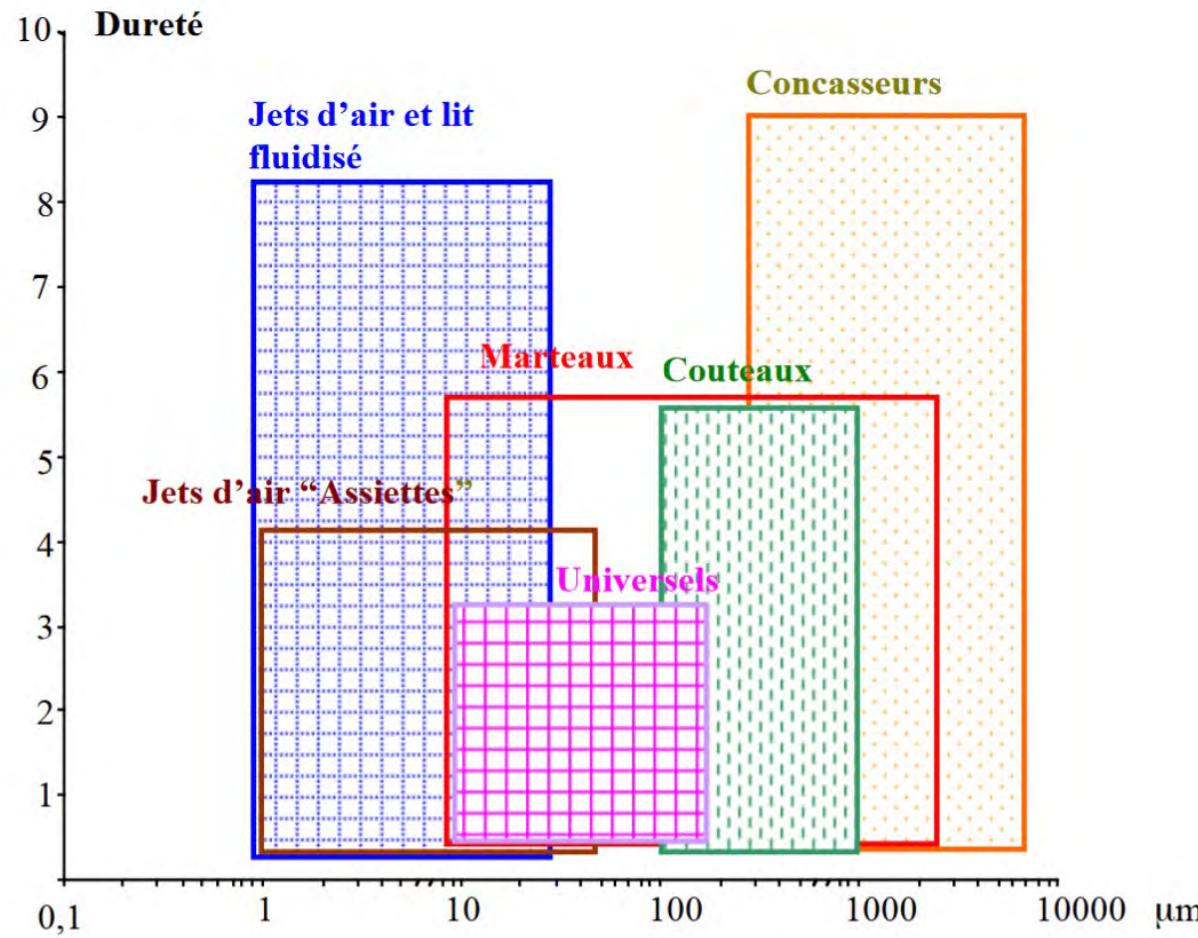
- Ventiler les équipements
- Eviter toute chute à l'intérieur ou la mise en contact d'un partie d'un corps avec un équipement (partie écrasée, coupé ou happée)
- Former les personnes aux équipements
- Maintenance préventive
- Contrôle du niveau de bruit
- Inspection des installations et de leur connections
- Nettoyer régulièrement

Les opérations de broyage produisent souvent des poussières fines → danger d'explosion de poussières:

- ATEX
- Ventilation
- Mise à terre
- Entretien, maintenance (éléments en mouvement)
- ! solvants



# Module 6.2.3: Choix de la technologie (1)



Les différents types de broyeur en fonction de la dureté du matériau et de la taille du produit à obtenir

# Module 6.2.3: Choix de la technologie (2)

Taille ( $\mu\text{m}$ )	à couteaux	Concasseurs	à aiguille	à marteaux	mécanique	à cylindres	Jets fluidisés	à corps broyants	à voie humide
> 5'000									
5'000 – 1'000									
1'000 - 500									
500 – 150									
150 – 50									
50 – 10									
10 - 1									
< 1									

Les différents types de broyeur en fonction de la taille du produit à obtenir

# Module 6.2.3: Aspect énergétique (1)

Caractéristiques des appareils de fragmentation grossière Les valeurs indiquées sont des ordres de grandeur destinés à cerner les possibilités d'emploi des appareils.  $d_c$  diamètre (en mm) du (ou des) cylindre(s) ;  $d_r$  diamètre (en mm) des rotors

Appareils	Dimension maximale admise (mm)	Rapports de réduction normaux	Capacité maximale (t/h)	Énergie consommée par tonne traitée (kWh)
Concasseurs à mâchoires	2 500	4/1 à 6/1	4 000	0,4 à 2
Concasseurs giratoires primaires	1 600	4/1 à 5/1	7 000	0,25 à 0,75
Concasseurs giratoires secondaires	750	5/1 à 8/1	3 000	0,5 à 1
Concasseurs à cône tête standard	450	5/1 à 8/1	3 000	0,75 à 1,5
Concasseurs à cône tête courte	175	4/1 à 7/1	1 500	1,5 à 2
Concasseurs à cylindres cannelés	0,05 à 0,6 $\varnothing_c$	3/1 à 4/1	2 000	0,3 à 0,75
Concasseurs à percussion (percuteurs rigides)	2 000	8/1 à 15/1	1 200	0,2 à 0,6
Concasseurs à marteaux articulés	0,1 à 0,8 $\varnothing_r$	10/1 à 30/1	1 200	0,2 à 0,6
Émotteurs à fléaux et à chaînes	250	10/1 à 15/1	50	0,3 à 0,8
Trommels concasseurs	0,1 à 0,5 $\varnothing_c$	25	400	0,1 à 0,3
Coupeuses et trancheuses	300	10/1 à 15/1	60	0,5 à 20
Déchiqueteuses	1 200	2/1 à 10/1	200	0,1 à 50

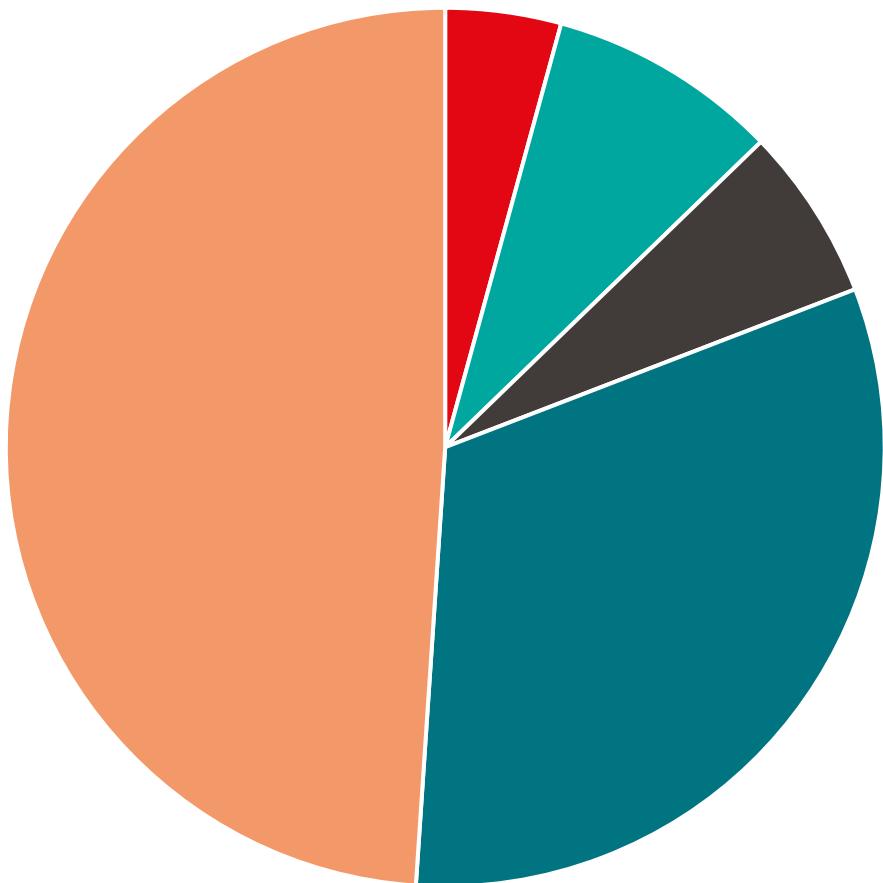
# Module 6.2.3: Aspect énergétique (2)

## Caractéristiques des appareils de broyage fin et ultrafin

Appareils	Granularité , les valeurs indiquées sont des ordres de grandeur. Elles varient largement en fonction des dimensions d'admission, de la nature des produits, du temps de séjour dans l'appareil, etc. (µm)		Capacité maximale (t/h)	Puissance installée (kW)
	Entrée	Sortie		
Broyeurs à barres	40 000	300	300	5 à 1 500
Broyeurs à boulets	25 000	100	600	5 à 5 000
Tubes broyeurs	25 000	40	400	5 à 8 200
Broyeurs à galets	10 000	100	350	5 à 1 800
Broyeurs semi-autogènes	150 000	100	350	15 à 6 000
Broyeurs autogènes	300 000	200	350	15 à 9 600
Tubes vibrants	5 000	74	4	3,5 à 70
Broyeurs à cylindres	5 000	500	250	2 à 300
Presses à rouleaux	5 000	40	700	220 à 1 800
Broyeurs à percussion	20 000	200	1100	6 à 900
Broyeurs verticaux à meules ou à billes	25 000	100	60	90 à 900
Broyeurs pendulaires	20 000	60	120	7,5 à 700
Broyeurs à meule de corindon	500	20	0,45	0,75 à 75
Broyeurs à billes à agitateur	100	1	2	2,5 à 200
Broyeur à impact (ou à broches)	100	20	2	5,5 à 315
Broyeurs vibrants	250	3	2 000 L discontinu	0,2 à 35
Broyeurs à billes, à circulation forcée	100	5	4	1 à 700
Broyeurs à billes à rotor conique	100	10	2	2,2 à 225
Broyeur à jets d'air	1 000	10	3	1 à 500

# Module 6.2.3: Aspect énergétique (3)

Ex: Moulin à boulet, l'opération de broyage a un très faible rendement énergétique  $\approx 5\text{-}10\%$



- Perte par frottement, 4 %
- Perte dans les engrenages, 8%
- Perte par transformation en chaleur due à l'échauffement du tambour, 6 %
- Perte par transformation en chaleur due à l'échauffement des fluides, 30 %
- Perte par transformation en chaleur due à l'échauffement du produit, 46 %

Source: données, techniques de l'ingénieur 2024

# Module 6.2.3: Aspect énergétique (4)

La mouture est caractérisée par une dépense d'énergie énorme pour un rendement très faible. Cette énergie est transformée en chaleur, d'où la nécessité de l'évacuer par ventilation ou refroidissement.

L'ordre de grandeur des rendements énergétiques est le suivant :

- concasseur à mâchoires : **70 à 90 %**
- concasseur à percussion : **30 à 40 %**
- broyeur à cylindres : **1 à 15 %**
- broyeur à boulets : **5 à 10 %**
- pulvérisateur à percussion : **1 à 10 %**

L'ordre de grandeur de consommation d'énergie est le suivant :

- concassage : **3 à 4 kWh/t**
- broyage : **20 à 30 kWh/t**
- pulvérisation : **100 à 1000 kWh/t**

# Module 6.3

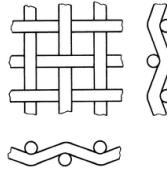
Le criblage et le tamisage sont des opérations unitaires qui ont pour but de séparer une population de fragments de matière suivant leur dimension.

Théoriquement, le terme tamisage est réservé à des séparations fines au-dessous du millimètre et le terme criblage à des séparations grossières, mais usuellement, le terme criblage recouvre les deux types de séparation.

## 6.3 Le criblage, tamisage

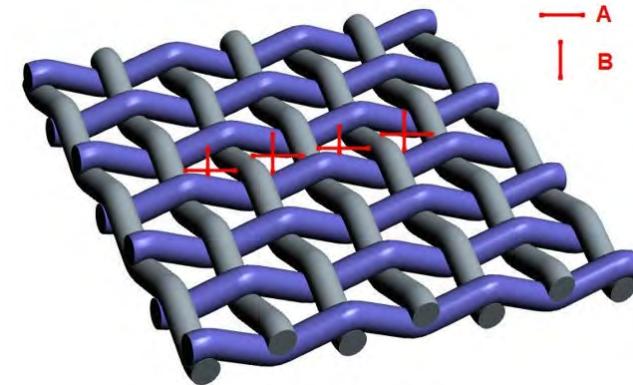
### 6.3.1 Théorie du tamisage

# Module 6.3.1: Le maillage



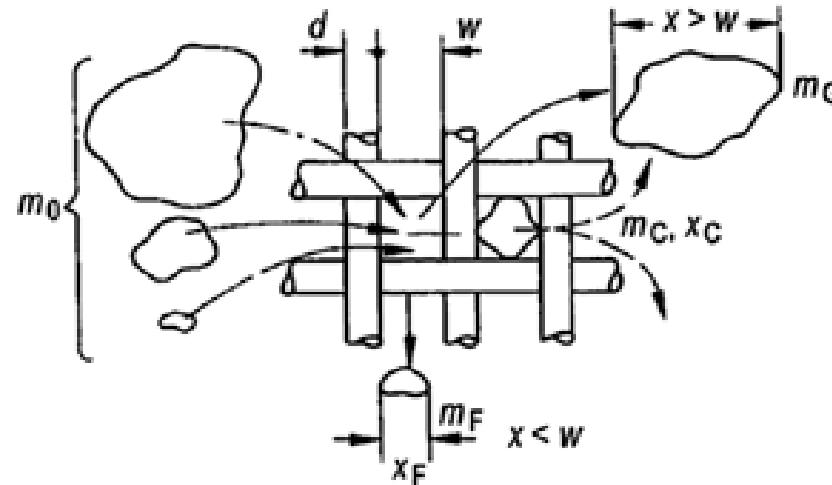
L'écartement des mailles d'un tamis (exprimé souvent en mesh) est généralement compris entre quelques centimètres et quelques micromètres.

La mesure en mesh est une mesure inverse de la taille d'une maille : la valeur en mesh diminue quand la taille de la maille augmente.



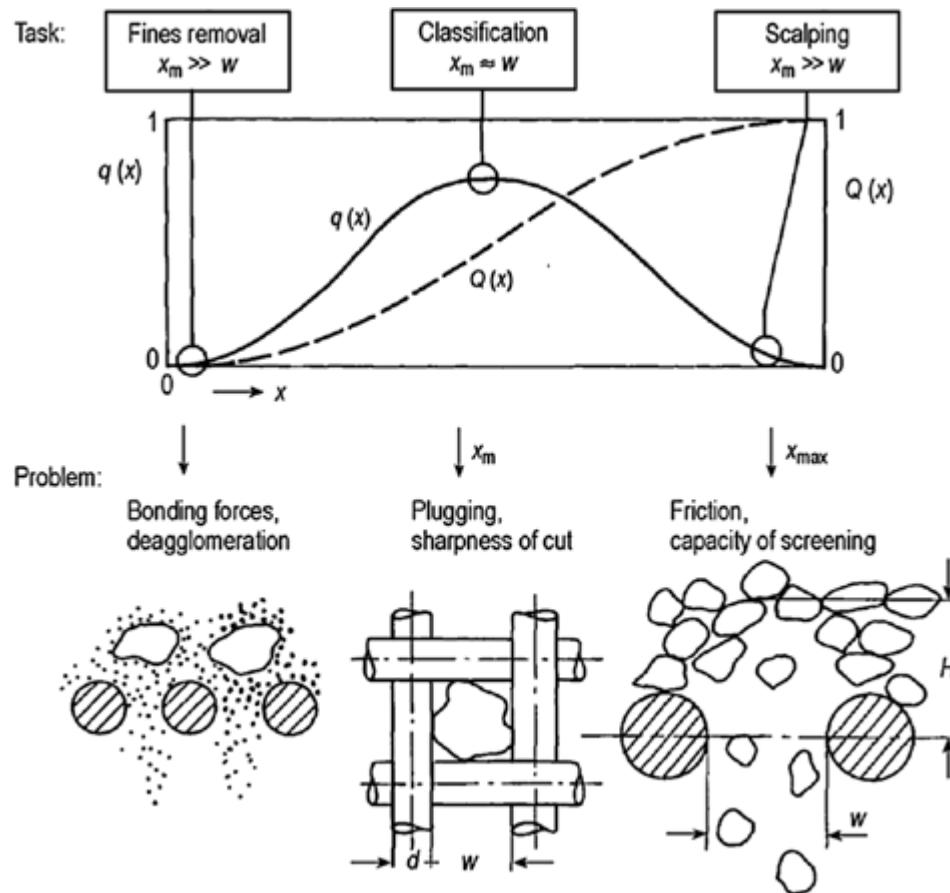
Taille du tamis ( $\mu\text{m}$ )	4750	3350	2360	1000	500	250	149	125	74	37
Taille de mesh	4	6	8	18	35	60	100	120	200	400

# Module 6.3.1: Théorie du tamisage (1)



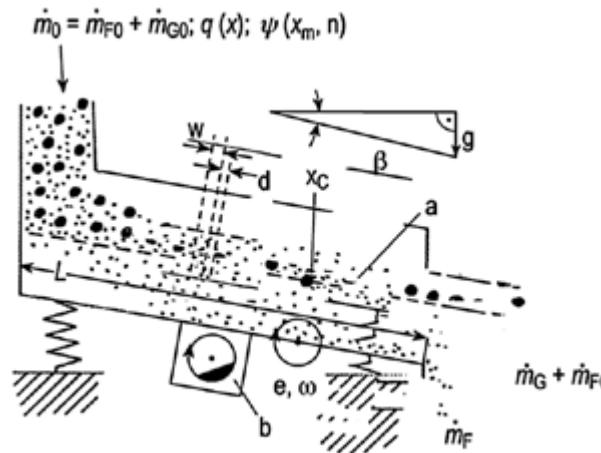
- Le criblage comme comparaison entre les particules de taille  $x$  (avec une distribution de taille  $q(x)$ ) dans la matière d'alimentation  $m_0$  et la maille avec une ouverture  $w$ .
- La séparation se fait en particules grossières ou ne passant pas ( $m_G$ ) et fines ou passantes ( $m_F$ );
- Les particules ayant une taille proche de celle de la maille ( $m_C$ ) avec  $x \approx w$  provoquent un blocage de la maille.

# Module 6.3.1: Théorie du tamisage (2)



- L'élimination ou le dépoussiérage est l'élimination d'une petite quantité de poussière qui s'accroche aux particules,  $x_m \gg w$ . Le problème ici est de désagglomérer et de surmonter les forces adhésives.
- La classification est la séparation du matériau en fractions fines et grossières. Le problème ici est d'obtenir une forte netteté de coupe et d'éviter l'aveuglement de la maille par des particules bloquées. Cette dernière se produit parce que de nombreuses particules sont proches de la taille de maille, appelée matériau à mailles proches  $x \approx w$ .
- Le scalping ou l'élimination des déchets est le processus dans lequel des quantités relativement faibles de matières étrangères, de grumeaux et d'impuretés grossières sont retirées du produit.

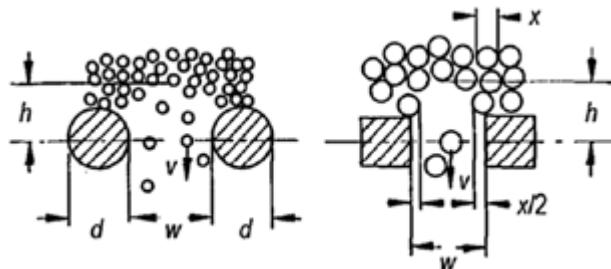
Efficacité  $\eta$  du tamisage, pour une concentration  $c_{F0}$  de particules fines dans l'alimentation,  $c_{FG}$  dans le « **rétentat ou refus** », et  $c_{FF}$  dans le « **perméat ou passant** », est donnée par:



$$\eta = \left[ \frac{(C_{F0} - C_{FG})(C_{FF} - C_{F0})}{C_{F0}(1 - C_{F0})(C_{FF} - C_{FG})} \right]$$

# Module 6.3.1: Théorie du tamisage (4)

## Débit de passage



La capacité est limitée par la vitesse d'écoulement = la vitesse de chute

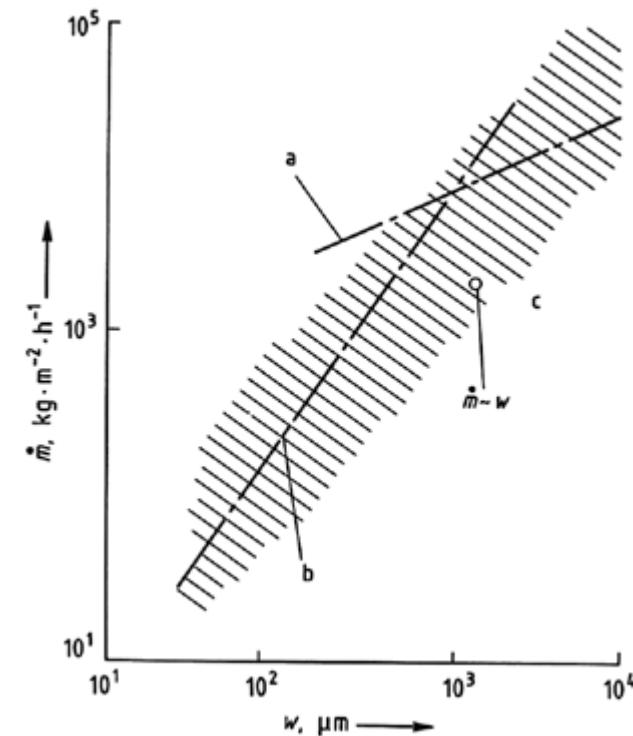
$$v = \sqrt{2gh} \sim \sqrt{gw}$$

Le débit massique devient:

$$\dot{m}_w \sim \rho w^2 v = Cste \cdot \rho \sqrt{g} w^i$$

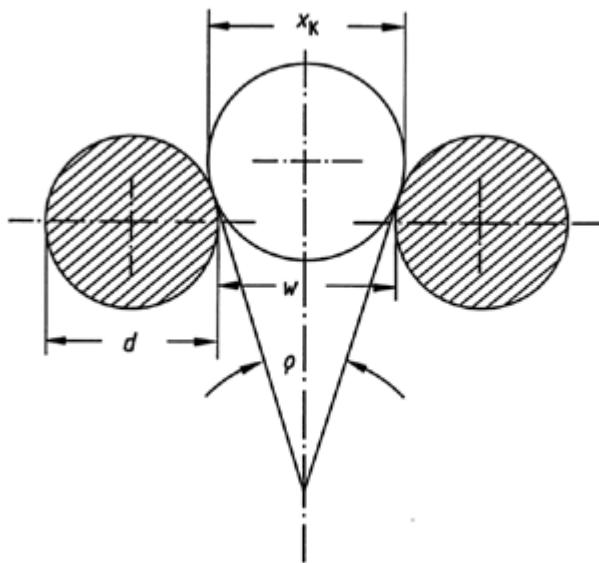
Relation entre la capacité de tamisage  $\dot{m}_w$  and la taille de la maille  $w$  (*définition de i*)

- a) Matériau grossier  $\dot{m}_w \sim w^{5/2}$
- b) Produit fin avec force de liaison interparticulaire,  $\dot{m}_w \sim w^{3/2}$
- c) Relation empirique pour particules intermédiaires,  $\dot{m}_w \sim w$



## Interaction particule - maille

Le diamètre des particules  $x_K$  pour le blocage (formation de bouchon) est fonction de la géométrie du maillage  $w$ ,  $d$  et de l'angle de friction  $\varphi$



$$x_K = \left[ \frac{(d + w)}{\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \right] - d$$

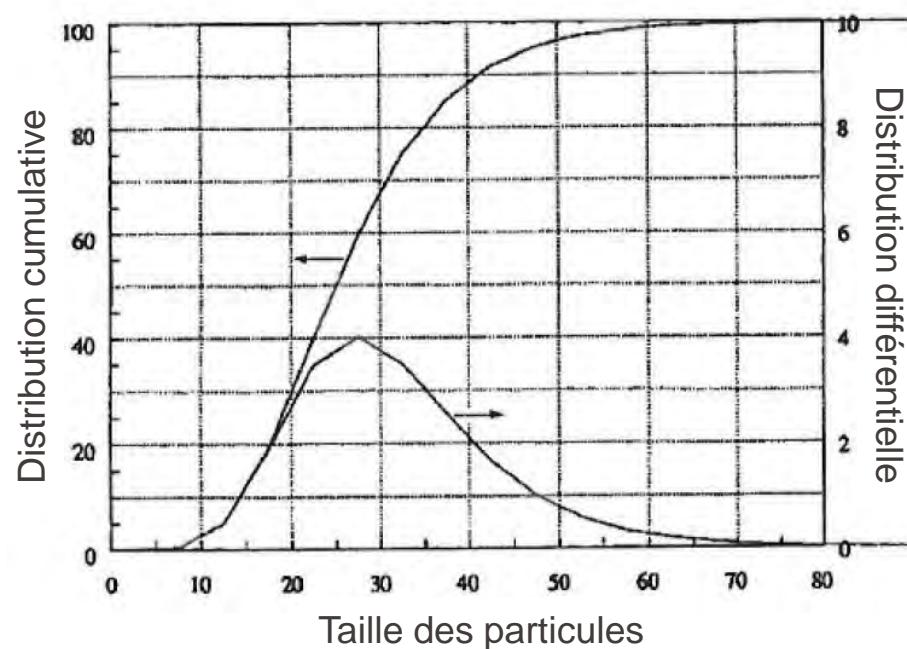
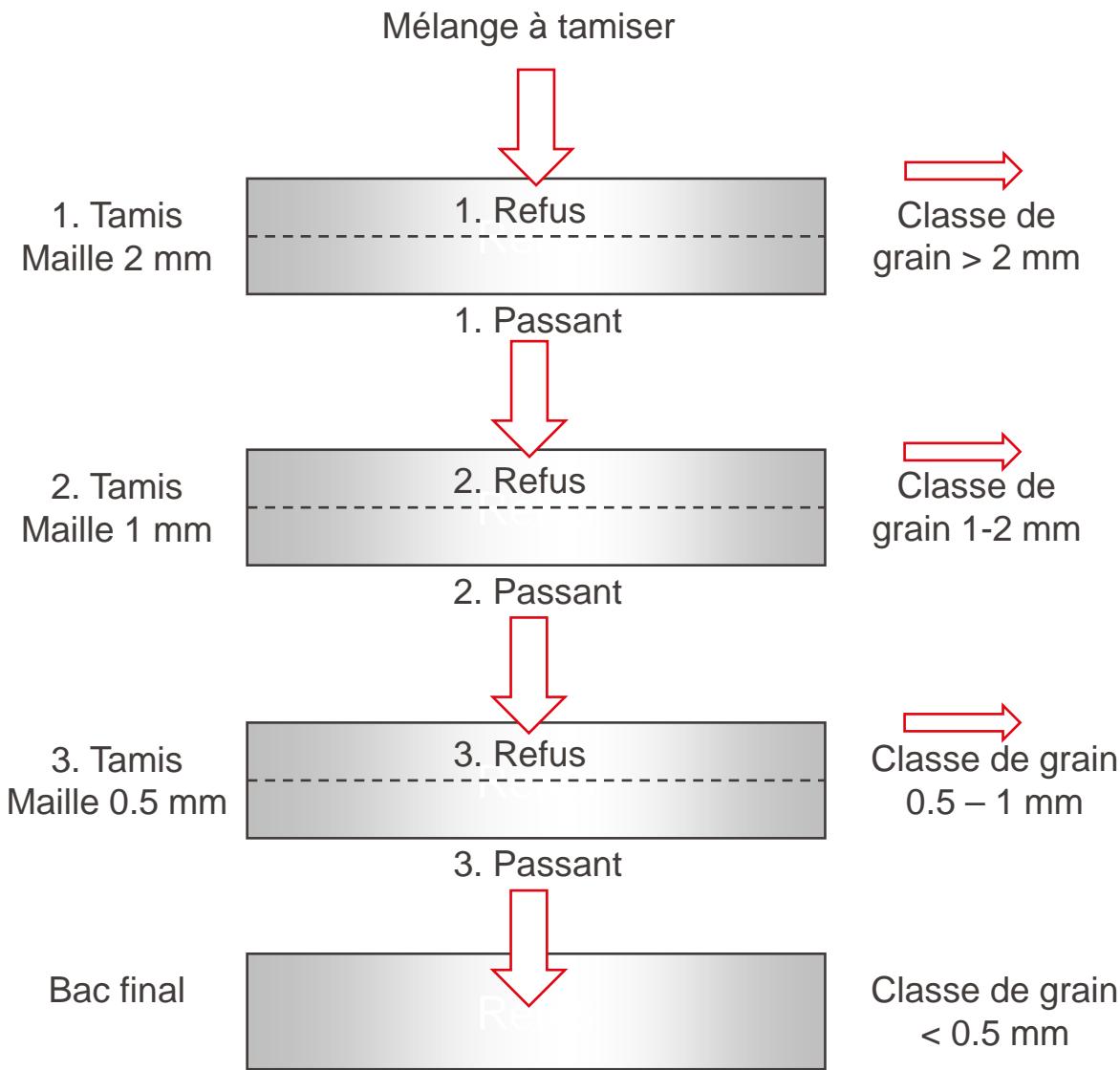
## Sélectivité

La sélectivité de la taille,  $S_c$  (fonction du diamètre  $d_p$ ), est définie comme le rapport de la quantité de particules de taille  $d_p$  qui arrivent dans le courant des particules de grosse taille et de la quantité de particules de taille  $d_p$  dans le courant à l'entrée.

$$S_c(d_p) = \frac{\dot{m}_c \cdot w_c^d(d_p)}{\dot{m}_c \cdot w_c^d(d_p) + \dot{m}_f \cdot w_f^d(d_p)}$$

- $\dot{m}_c$  : débit massique de la fraction des grosses particules
- $\dot{m}_f$  : débit massique des particules fines
- $w_c^d(d_p)$  : fraction massique des particules du courant des grosses particules de taille inférieure à  $d_p$
- $w_f^d(d_p)$  : fraction massique des particules du courant des petites particules de taille supérieure à  $d_p$

# Module 6.3.1: Tamisage en série et distribution

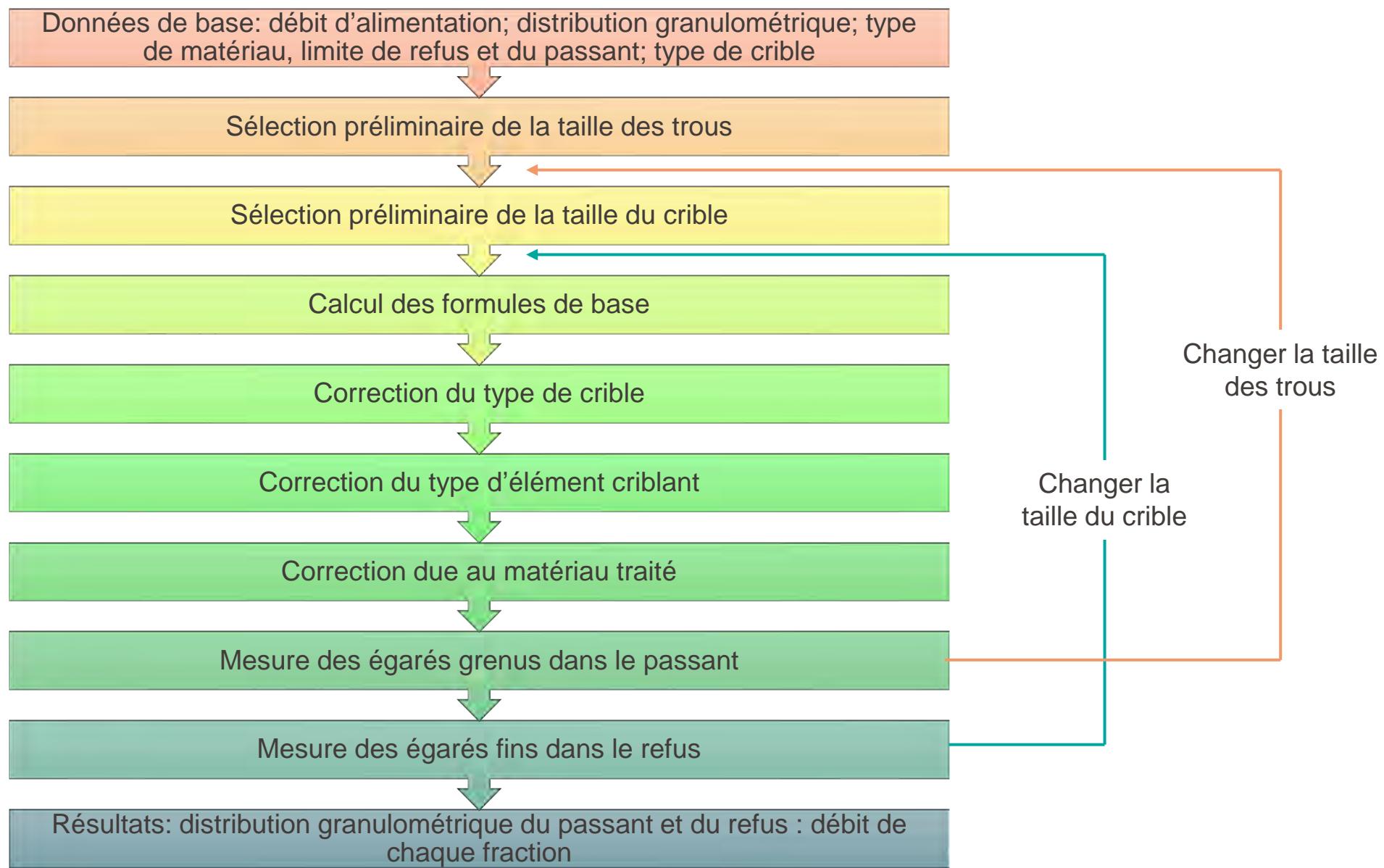


## Module 6.3.2

### 6.3 Le criblage, tamisage

#### 6.3.2 Types de cibles

# Module 6.3.2: Critères de choix d'un crible (1)



# Module 6.3.2: Critères de choix d'un crible (2)

## Guide du choix de la surface criblante en fonction de l'application

Application	Type de surface						
	Toile métallique avec fils tissés en acier trempé	Grille métallique harpe	Tôle perforée	Grille en acier inoxydable	Grille en polyuréthane	Grille en caoutchouc	Grille anticolmatante
Scalpage à sec	Moyen (1)	Non recommandé	Bon	Non recommandé	Non recommandé	Excellent	Non recommandé
Criblage primaire Pulpe alluviale	Moyen	Non recommandé	Bon	Non recommandé	Bon	Bon	Non recommandé
Criblage secondaire Voie sèche	Moyen à bon	Satisfaisant (2)	Bon	Non recommandé	Non recommandé	Excellent	Bon
Criblage secondaire Voie humide	Moyen à bon	Satisfaisant (2)	Moyen à bon	Moyen	Excellent	Bon	Bon à excellent
Criblage tertiaire Voie sèche	Bon (coupe précise)	Excellent (2)	Moyen à bon	Moyen	Moyen	Bon	Bon
Criblage tertiaire Voie humide	Bon (taux de vide élevé)	Satisfaisant (2)	Moyen	Moyen	Excellent	Moyen	Bon
Égouttage	Moyen	Satisfaisant (2)	Moyen	Bon	Excellent	Non recommandé	Moyen

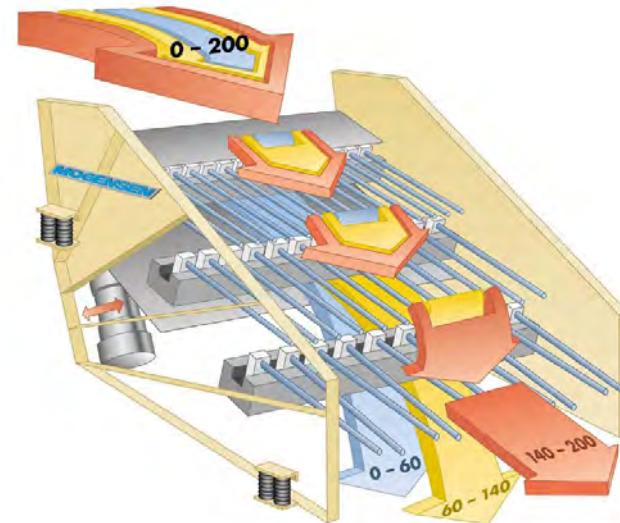
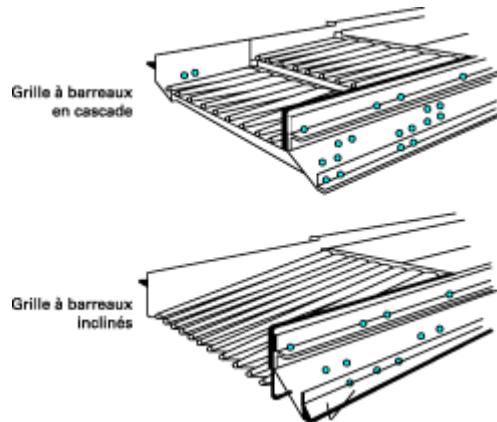
(1) Acier à haute teneur en carbone.  
(2) Fils en acier trempé pour des débits importants.

## Principaux types d'appareil

- A. Grilles et cribles statiques
- B. Trommels, cribles rotatifs et blutoirs
- C. Cribles vibrants
- D. Cribles circulaires (ou gyrocribles)
- E. Cribles divers

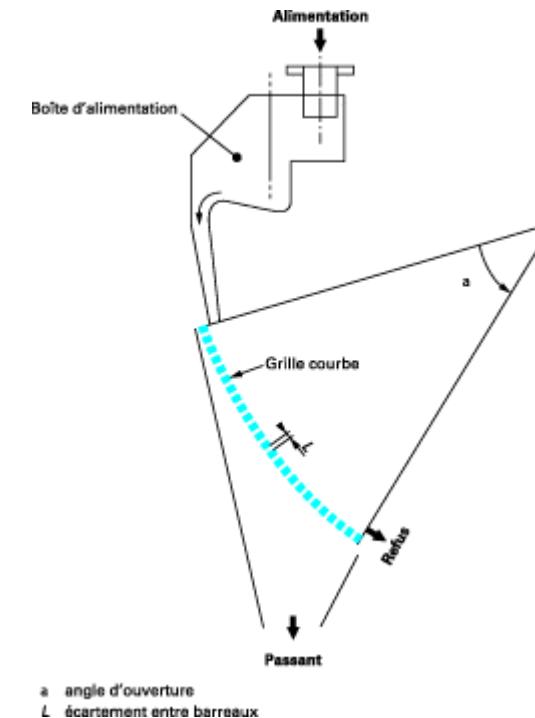
# Module 6.3.2: A. Grilles et cribles statiques

Grilles planes inclinées



Scalpeurs à barreaux divergents (Barsizer)

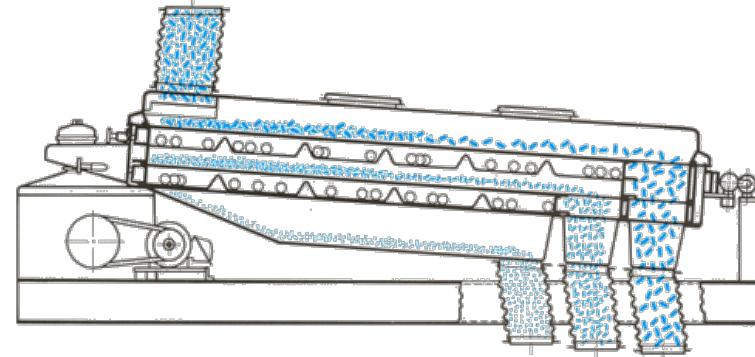
Grilles courbes



# Module 6.3.2: B. Trommels, cribles rotatifs et blutoirs



Trommel



Crible rotatif



Blutoir

# Module 6.3.2: C. Cribles vibrants

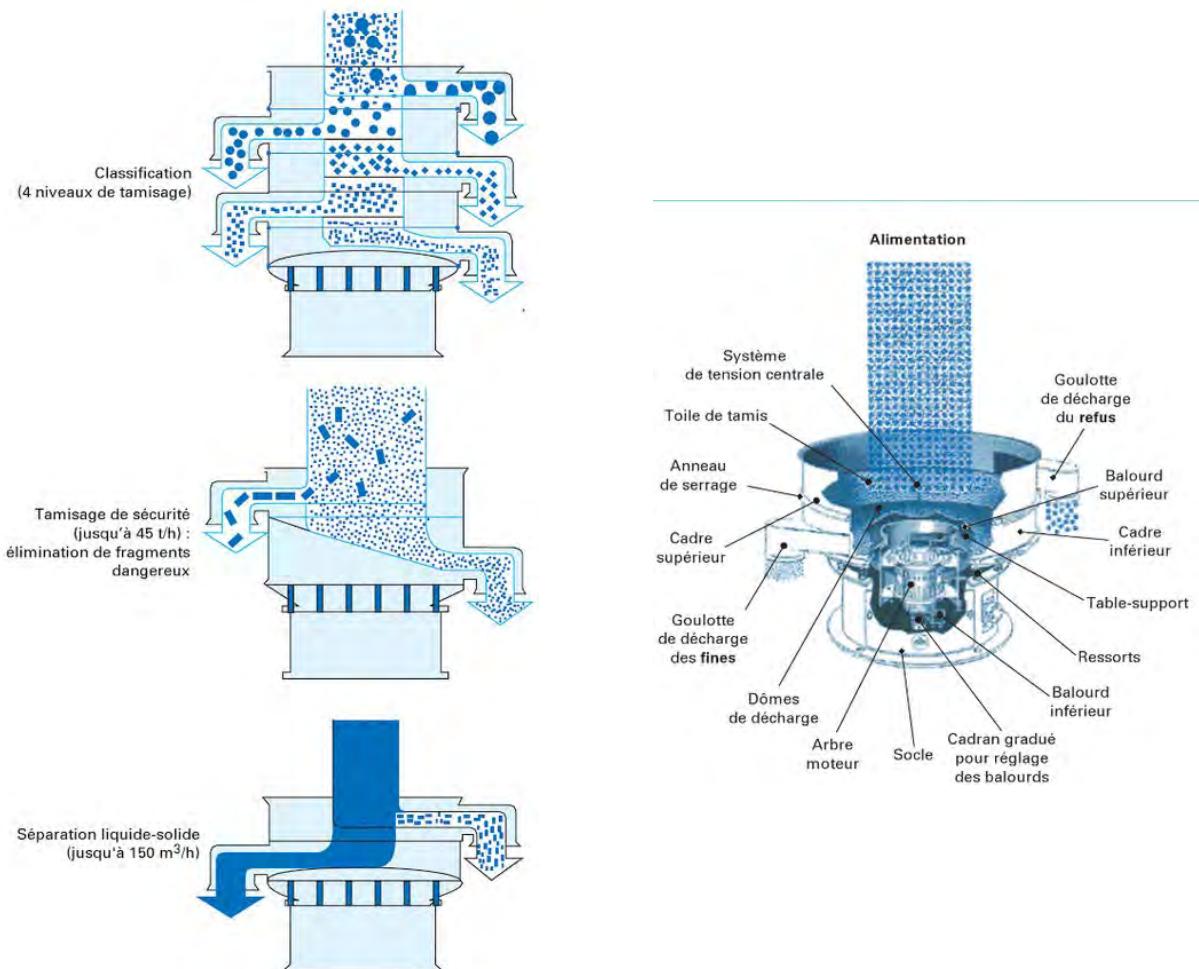


Source: <https://www.mogroup.com/>

# Module 6.3.2: D. Cribles circulaires (ou gyrocribles) (1)



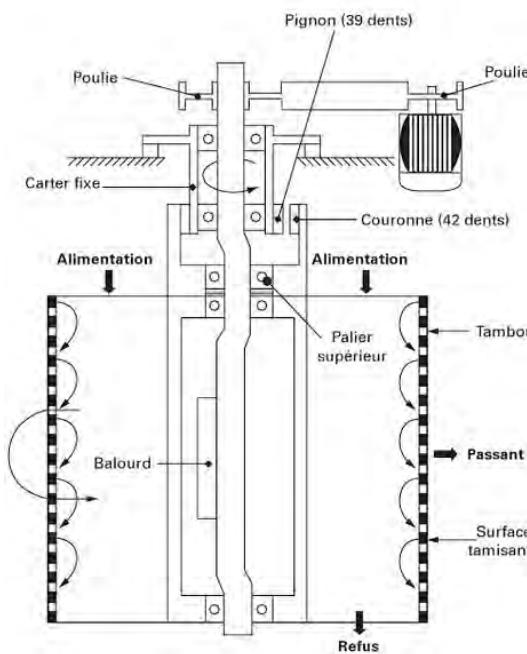
Durée: 50"



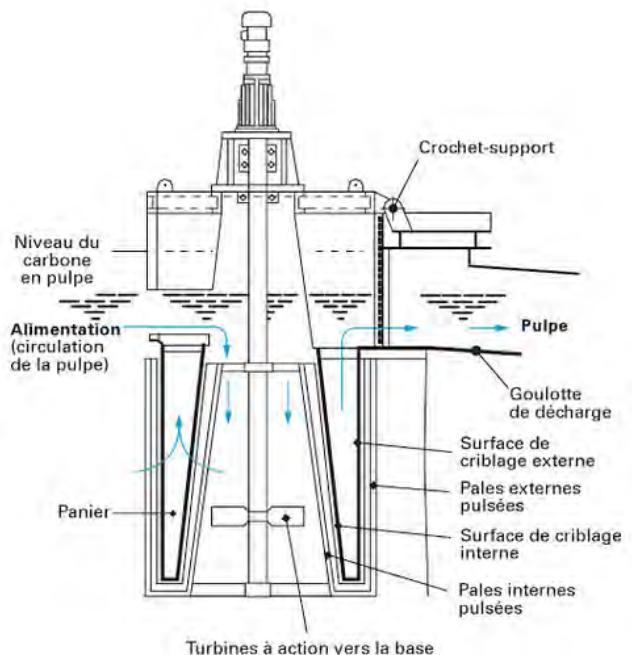
Tamiseur Sweco (tamis circulaire vibrant)

Source: <http://sweco.fr>

# Module 6.3.2: D. Cribles circulaires (ou gyrocribles) (2)



Crible V Symons (Doc. Bergeaud-Nordberg)



Crible NKM : Nuclear Knowledge Management Group.

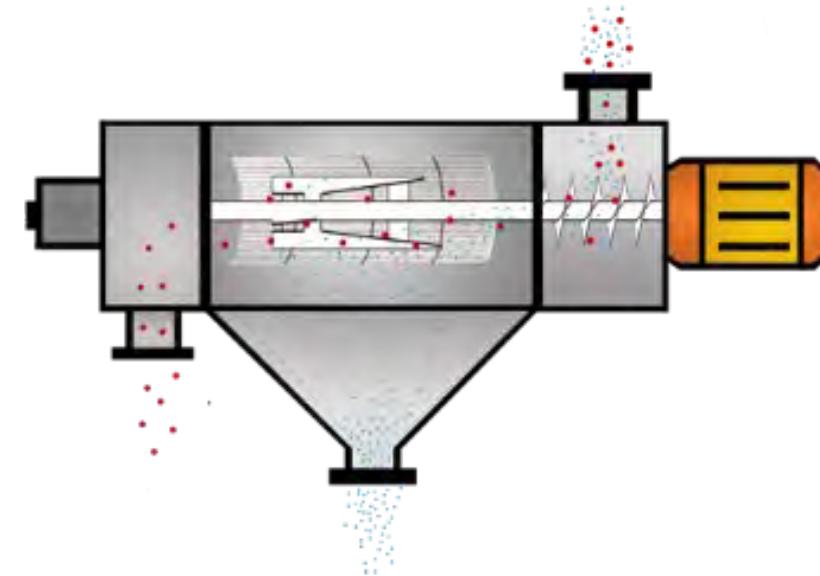
Crible centrifuge

Source: <https://crushers.co.uk/>

# Module 6.3.2: D. Cribles circulaires (ou gyrocribles) (3)



Tamiseur centrifuge Palomatic RS 4000

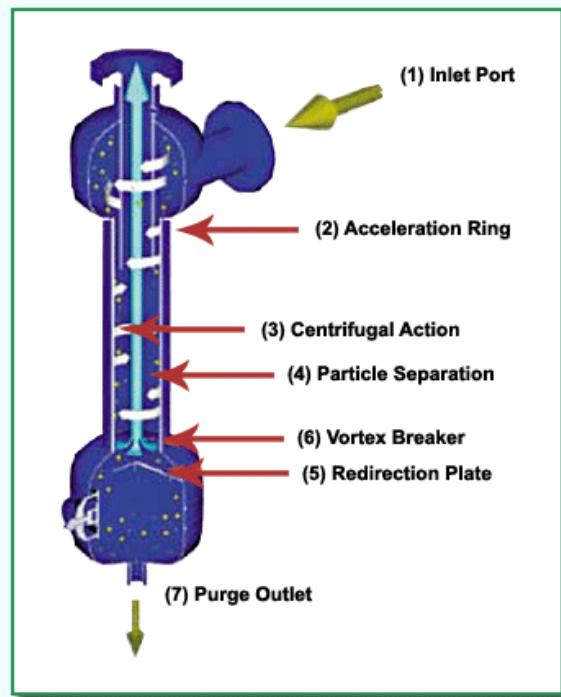


Crible centrifuge -2-

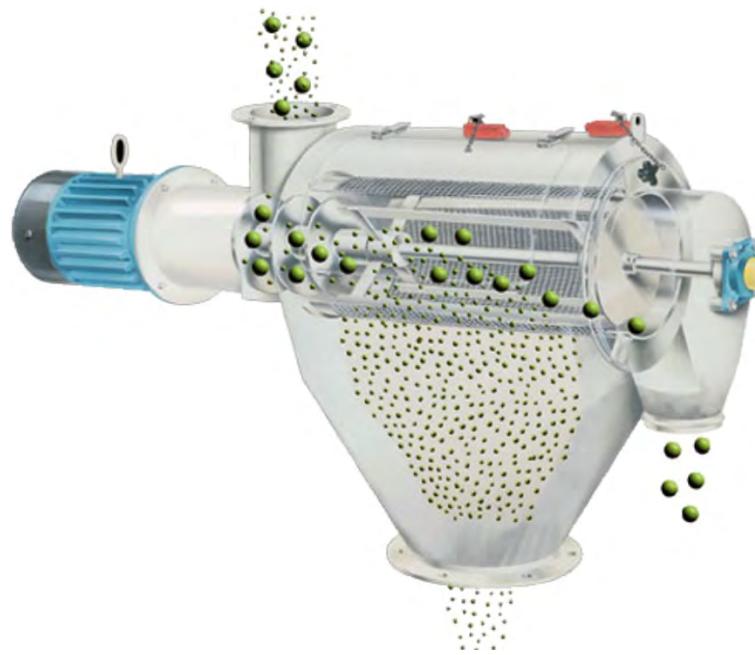
Source: <https://www.palomaticprocess.fr/machines-industrielles/>

# Module 6.3.2: E. Cribles divers (1)

L'exciteur ou le vibrateur sont mécaniques, ou le plus souvent électromagnétiques.



PEP ICS2 centrifuge



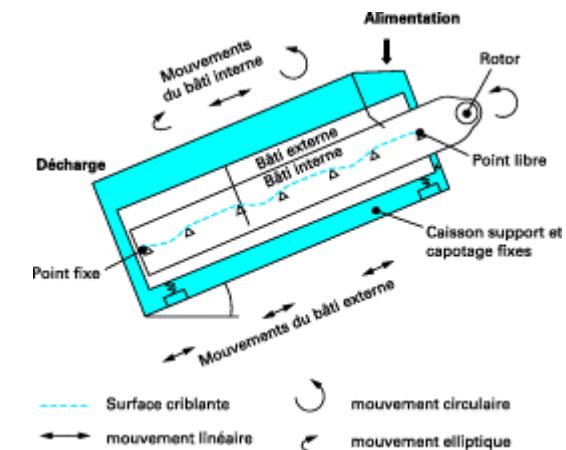
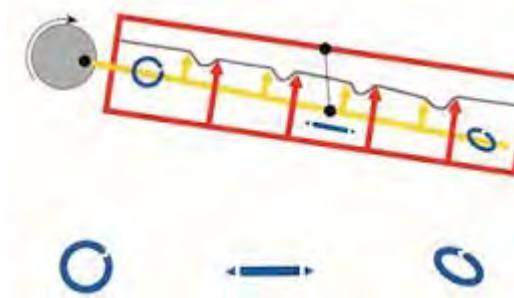
Kason CENTRI-SIFTERTM

Crible à haute fréquence > 3'000 vibrations / min

# Module 6.3.2: E. Cribles divers (2)



Crible à effet trampoline



Crible à mouvement ondulatoire

# Module 6.3.2 : Considérations de sécurité

Les opérations de tamisage mettent en œuvre des installations avec de large pièces en mouvement et parfois de gros blocs en mouvement, il convient dès lors de :

- Ventiler les équipements
- Eviter toute chute à l'intérieur ou la mise en contact d'une partie d'un corps avec un équipement (partie écrasée, coupé ou happée)
- Former les personnes aux équipements
- Maintenance préventive
- Contrôle du niveau de bruit
- Inspection des installations et de leur connections
- Nettoyer régulièrement

Les opérations de broyage produisent souvent des poussières fines → danger d'explosion de poussières:

- ATEX
- Ventilation
- Mise à terre