

# Mise en œuvre des Matériaux-I - **Les Céramiques** -

## Transformation des poudres

*Partie 1: Opérations de fragmentation et  
de classification des particules*

M. Stuer & P. Bowen

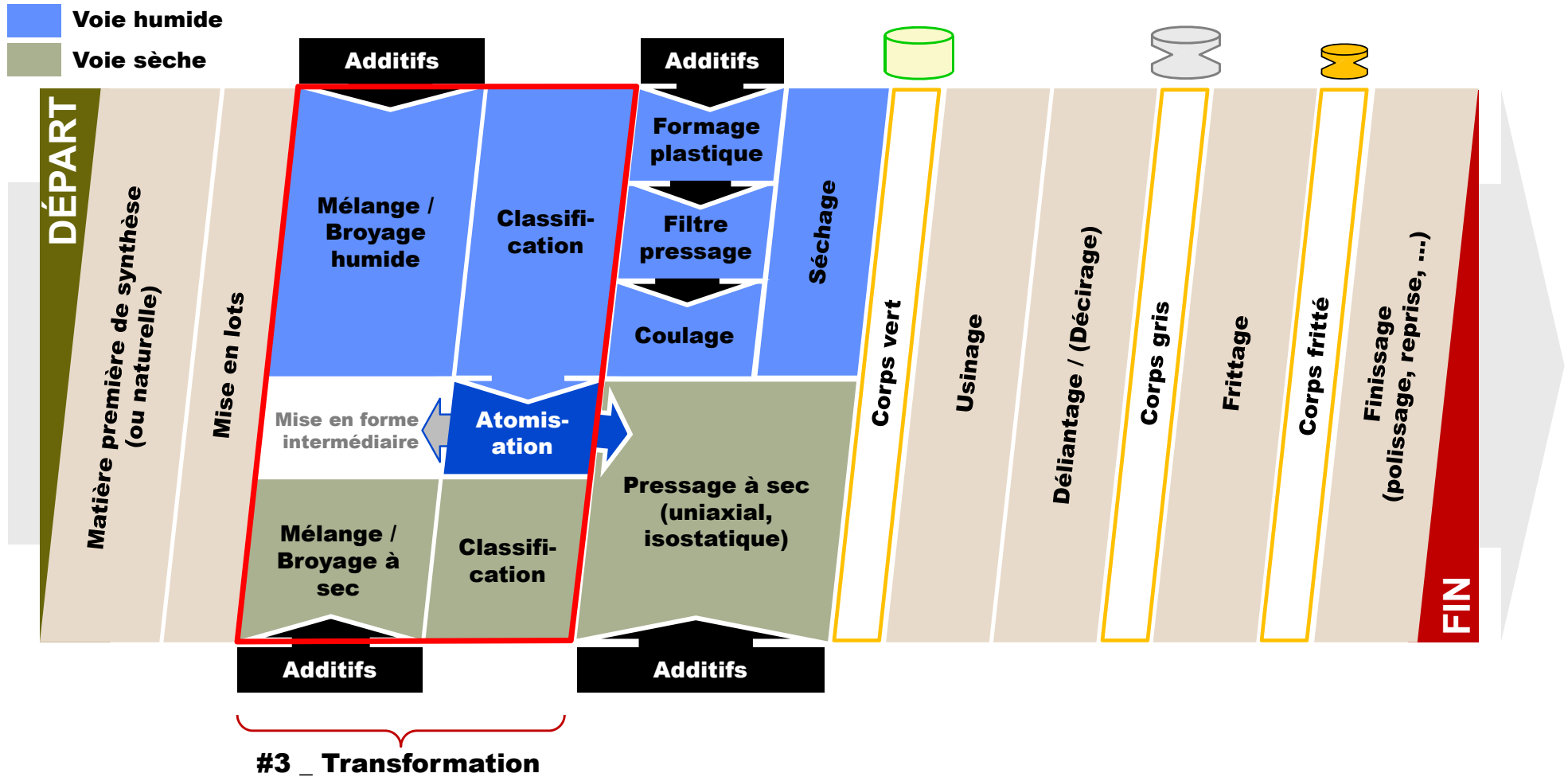


# diapos effectives: **10**  
(sans pages de gardes, questionnaires, ...)

## Les cinq grands thèmes du cours



# Flux de mise-en-œuvre des céramiques et chapitres du cours



## Sommaire

*What's on the  
- MENU -  
today ?*



- ◆ Pourquoi broyer
- ◆ Opérations et types de fragmentation
- ◆ Mécanismes de rupture des particules
- ◆ Broyage rotatif à billes et aspects pratiques liés
- ◆ Méthodes courantes de broyage fin

### Objectifs d'apprentissage:

- ◆ Avoir les bons réflexes lors du choix de la méthode de fragmentation
- ◆ Aperçu des méthodes et du processus de fragmentation
- ◆ Connaître les mécanismes de rupture et le principe de la taille limite



# Pourquoi transformer les poudres? (rappel !)

## #1\_ Poudre

impacte

## #2\_ Microstructure

Im-

pacte

#3\_

Propriétés

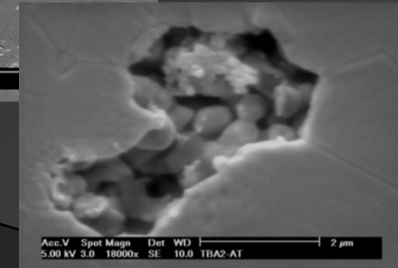
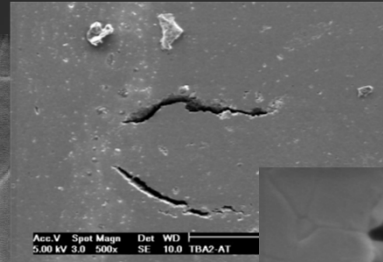


**Transformation:**  
**Suppression d'agglomérats**  
(broyage et/ou classification)

94 %

Acc.V Spot Magn Det WD 2 µm  
5.00 kV 3.0 9000x SE 10.0 TBA2-AT

Hétérogène  
Densité faible avec défauts



Densité 99 %

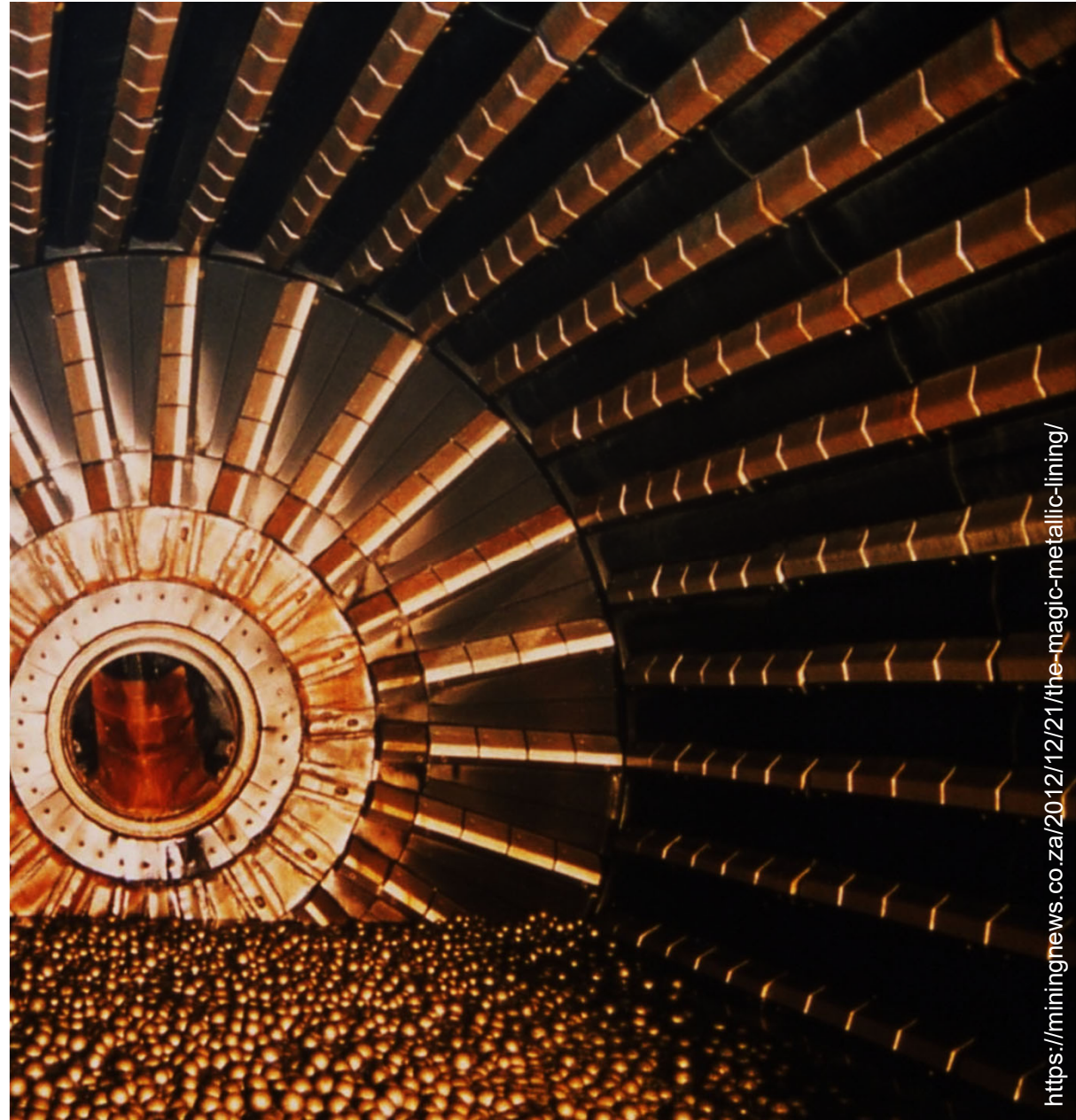
Acc.V Spot Magn Det WD 2 µm  
5.00 kV 3.0 9000x SE 10.1 L6-10-AT

Homogène  
Densité élevée et grains fins

**Si la poudre n'est pas bonne, alors  
il faut la changer ou transformer !**

# Généralités sur les opérations de fragmentation

*M. Stuer & P. Bowen*



<https://miningnews.co.za/2012/12/21/the-magic-metallic-lining/>

## Opérations de fragmentation selon tailles des particules

♦ **Selon la taille** des matériaux entrants et sortants **on distingue entre:**

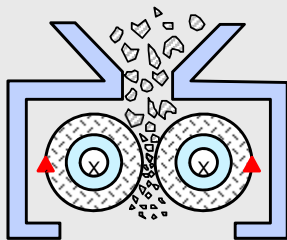
### #1\_concassage

#### Entrée:

Particules grandes de quelques **dizaines de cm**

#### Sortie:

Particules **entre mm et centaines de  $\mu\text{m}$**



Concasseur à rouleaux

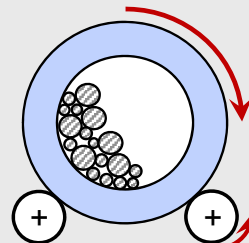
### #2\_broyage

#### Entrée:

Particules **entre mm et centaines de  $\mu\text{m}$**

#### Sortie:

Particules de **quelques dizaines de  $\mu\text{m}$**



Broyeur rotatif à billes

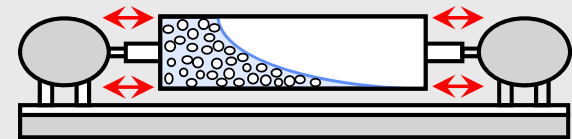
### #3\_broyage fin

#### Entrée:

Particules de **quelques dizaines de  $\mu\text{m}$**

#### Sortie:

Particules **entre 1 et 0.1  $\mu\text{m}$**



Broyeur vibrationnel

## Conditions de fragmentation

♦ La **fragmentation** peut se faire **à sec ou humide** (=poudre dans liquide)

### Fragmentation à sec

#### Avantages:

- **Pas de séchage** après la fragmentation si la poudre est travaillée à sec par la suite
- **Usure** des outils **et** donc **contamination** de produit **moindre** (p.ex. pots et billes)
- Compatibilité avec les poudres sensibles à l'eau (p.ex. ciments)

#### Limitations:

- **Manipulation des poudres** (surtout fines) plus difficile
- Risque de formation d'**aérosols** nocifs
- **Rendement énergétique\***

### Fragmentation humide

#### Avantages:

- **Manipulation** poudres fines plus aisée
- **Transport** des suspensions facile par pompage
- **30% moins énergétique** que la fragmentation à sec\*
- Idéale, si suivi par conditionnement ou mise en forme humide (p.ex. atomisation ou coulage en barbotine)

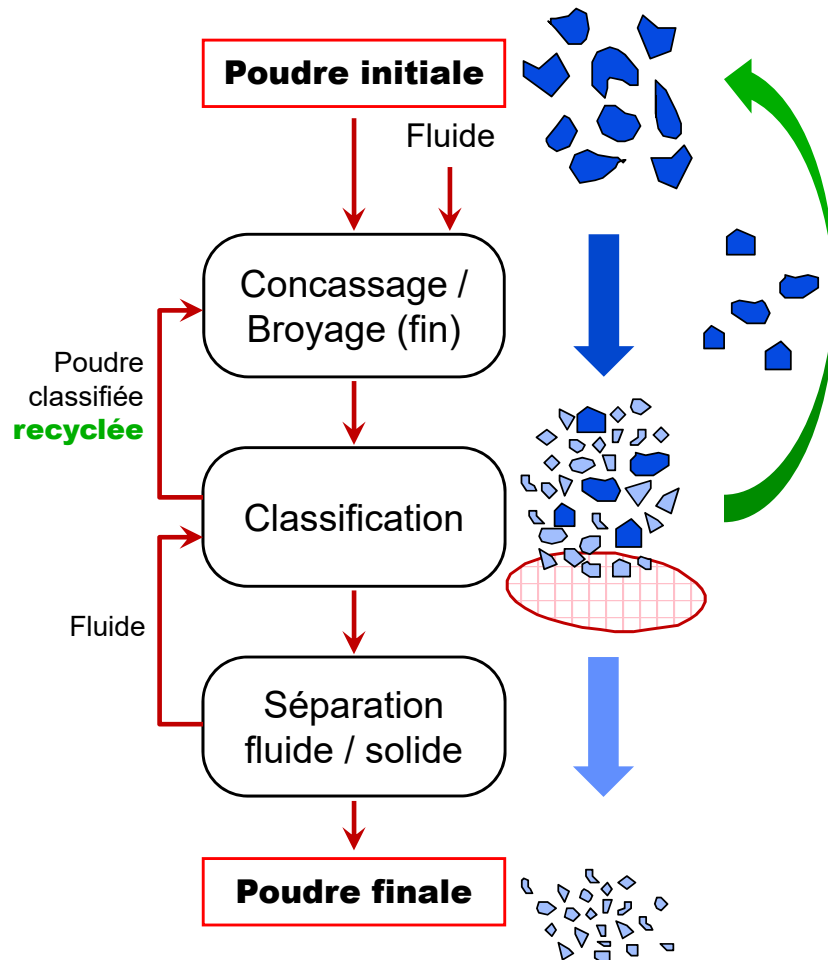
#### Limitations:

- **Usure des outils** jusqu'à 5x supérieure par rapport à la fragmentation à sec\*
- Besoin de **stabiliser les suspensions** contre la réagglomération
- Nécessite une opération de **séchage**

\*(à réduction de taille équivalente)



## Vue globale du processus de fragmentation



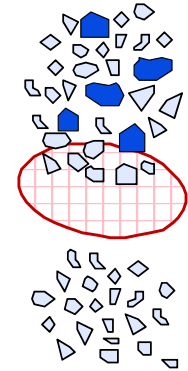
- ♦ **Deux modes** de fragmentation:
  - **Lot:** Souvent utilisée à l'échelle laboratoire
  - **Continu:** Souvent utilisée à l'échelle industrielle
- ♦ La fragmentation est souvent **combinée avec la classification** pour augmenter l'efficacité:
  - **Retire** la fraction du produit qui a déjà atteint la taille requise
  - **Recycle** la fraction qui est trop grossière
- ♦ Malgré l'importance industrielle (représente 6% de la consommation électrique mondiale), le **rendement** de fragmentation reste à date **faible**:
  - ➔ seul **1-7% de l'énergie utilisée** pour la fragmentation



## Critères de classification et types de classificateurs

- ♦ La classification se fait **normalement par taille**, mais d'autres critères existent tels que:

- forme
- densité
- propriétés magnétiques
- propriétés électriques



- ♦ **Types** de classificateurs **par taille** courants:

### #1\_tamis

#### Tailles particules:

entre 20 cm et 30  $\mu\text{m}$  environ

### #2\_classificateurs à air

#### Tailles particules:

entre 1000 et 0.1  $\mu\text{m}$  environ

(aussi appelés turboclassificateurs)

### #3\_centrifugation

#### Tailles particules:

entre centaines de  $\mu\text{m}$  et quelques nm environ

### Noter:

Au lieu des opérations de fragmentation, la **classification seule** peut aussi être utilisée pour **modifier la distribution de taille** d'une poudre (p. ex. enlèvement des agglomérats)

Choix multiple

1. ...augmentent le bilan énergétique de la mise en œuvre
2. ...peuvent contaminer la poudre
3. ...ont un rendement énergétique élevé
4. ...impactent la qualité du produit final

# Rupture des particules

*M. Stuer & P. Bowen*





# Forces et mécanismes de rupture

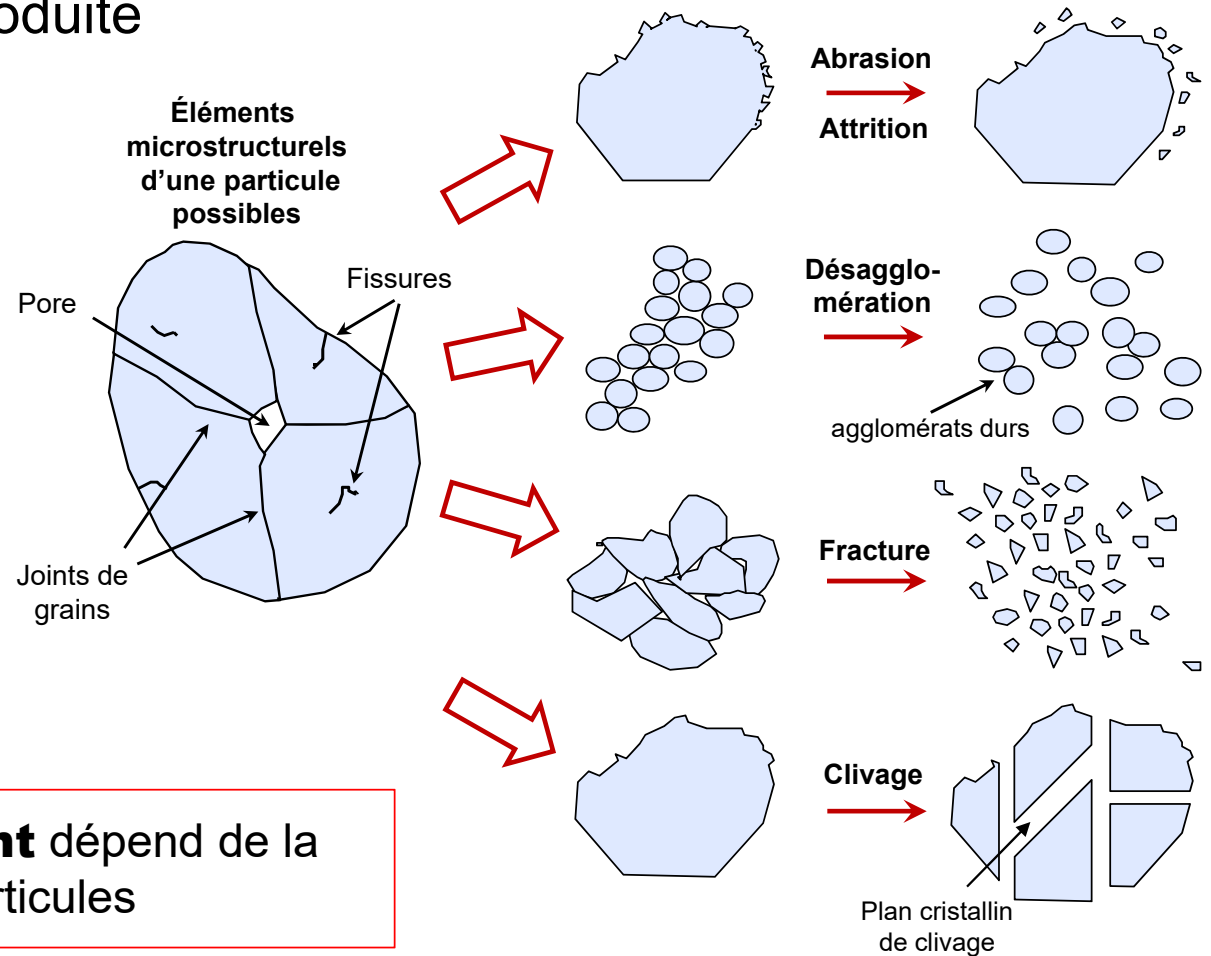
♦ Rupture des particules est produite par les **forces** de:

- **compression**
- **cisaillement**
- **friction**

♦ Les **mécanismes de rupture** possibles sont:

- **attrition**
- **désagglomération**
- **fracture**
- **clivage**

**Mécanisme** de rupture **dominant** dépend de la **microstructure** des particules



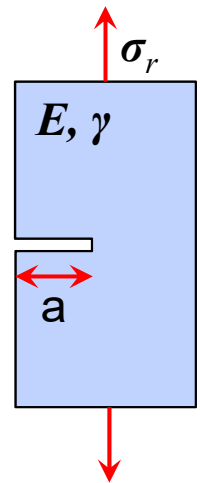
Rupture

## Contraintes de rupture et taille limite

- ♦ La **contrainte** à la rupture d'une particule **tend à accroître** lorsque:
  - la **taille décroît** → Taille et probabilité de défaut diminuent aussi
  - on approche une particule **monocristalline dense** → Probabilité de défaut diminue
- ♦ En effet, selon la loi de Griffith la contrainte de rupture  $\sigma_r$  et la taille de défaut  $a$  sont liés:

$$\sigma_r \sqrt{a} \approx \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi}} = C \Rightarrow \sigma_r \propto \frac{C}{\sqrt{a}} \quad \boxed{a \downarrow \rightarrow \sigma_r \uparrow}$$

$E$ : module de Young [GPa]  
 $\gamma$ : énergie de surface  
[mJ/m<sup>2</sup>] = [mN/m]

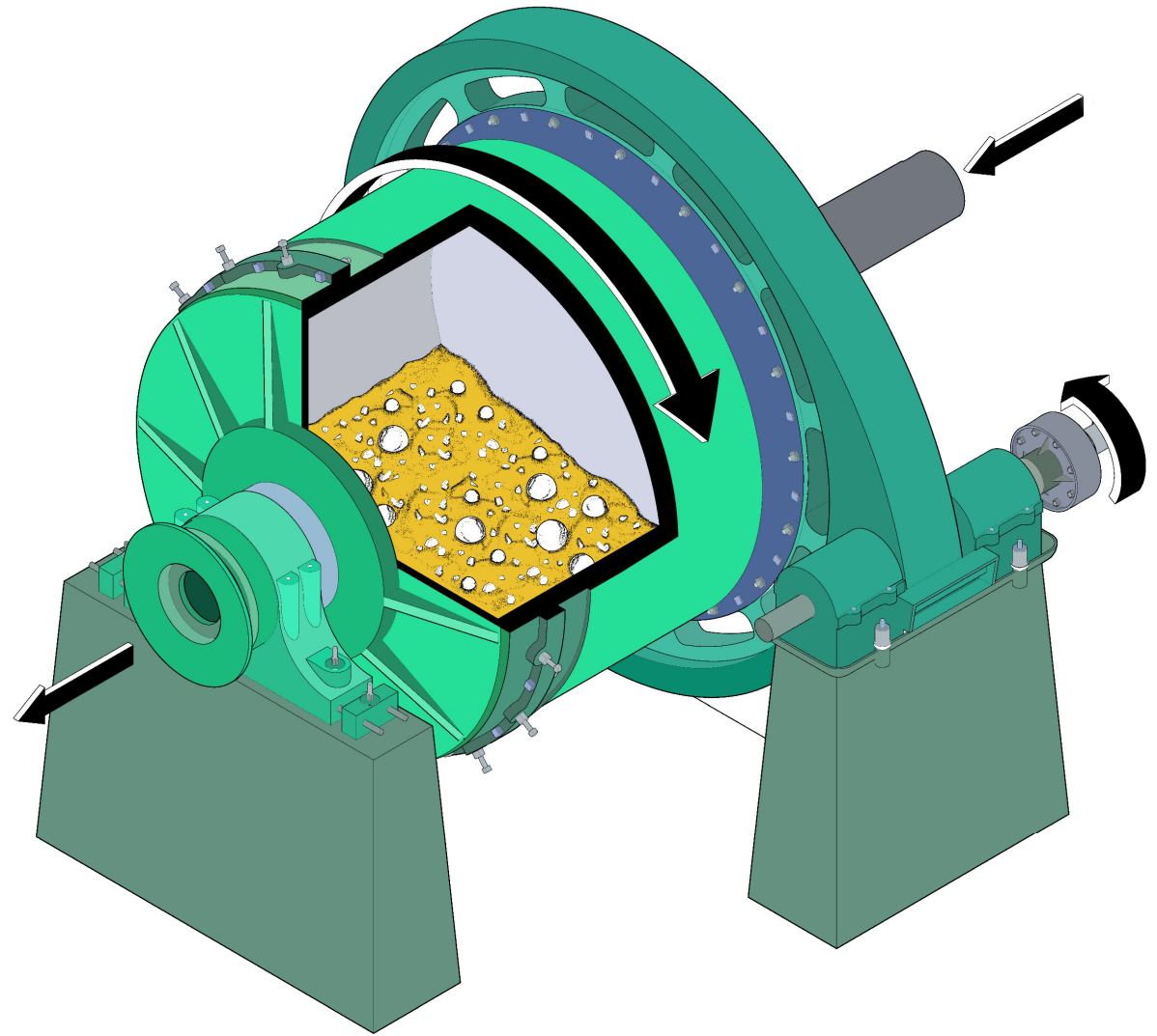


### Conséquences:

- ♦ Il y a une **taille limite** pour un monocristal parfait, en-dessous de laquelle la **particule va se déformer au lieu de se rompre**.
- ♦ **En dessous de cette taille limite**, l'attrition (contraintes de friction) devient un mécanisme important pour permettre une réduction de taille supplémentaire! → Mécanisme dominant lors du **broyage fin** !

# **Broyage: Exemple du broyeur rotatif à billes**

**Informations pratiques**



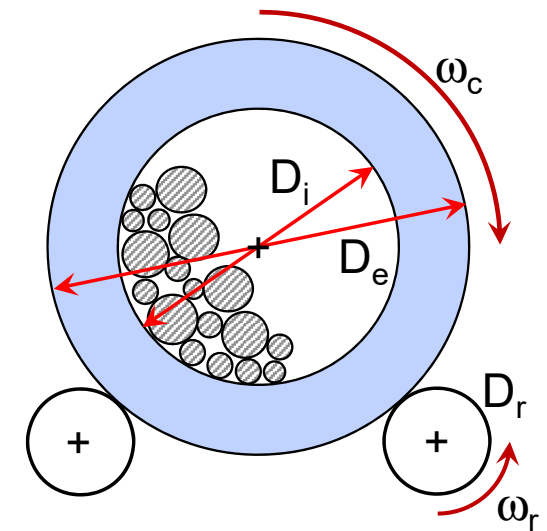
## Vitesse de rotation maximale (suivi en TP)

- ♦ La **vitesse de rotation maximale**,  $\omega_c$  [rpm], à laquelle toutes les billes sont maintenues contre la paroi par forces centrifuge est donnée par:

$$\omega_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_i}}$$

- ♦ Quant les diamètres interne  $D_i$  et externe  $D_e$  de la jarre sont connus, cette vitesse **peut être exprimée fonction de la vitesse de rotation des rouleaux**  $\omega_r$  [rpm]

$$\omega_r = \frac{42.3 D_e}{D_r \sqrt{D_i}} \xrightarrow{D_i \approx D_e} \omega_r = \frac{42.3 \sqrt{D_e}}{D_r}$$



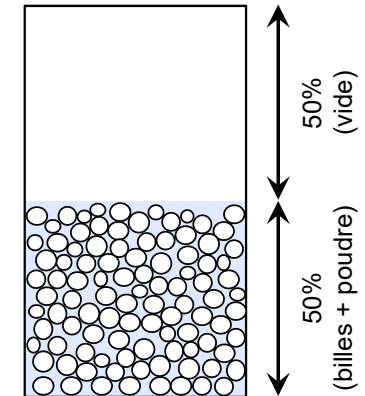
Une vitesse de **60 à 80% de la vitesse maximale** est utilisée pour le broyage rotatif pour maximiser son rendement



## Aspects pratiques (suivi en TP)

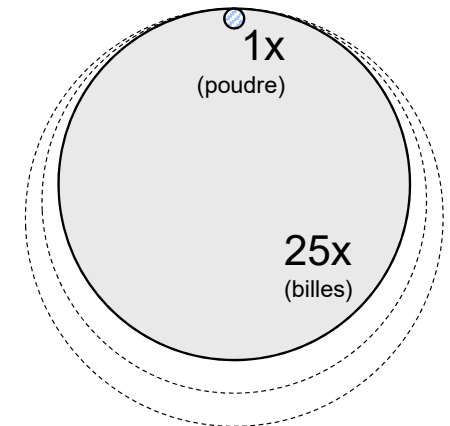
### ♦ Volumes:

- La jarre est généralement remplie à **~50%vol.** avec les **billes** de broyage (vides compris)
- La volume de **poudre/suspension** à broyer ajoutée est juste suffisante pour remplir les interstices et venir couvrir la surface des billes  
→ **~25% de volume** de la jarre

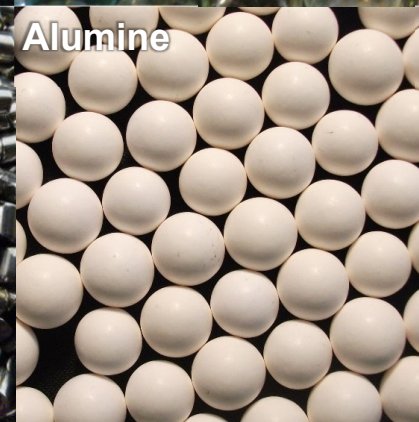
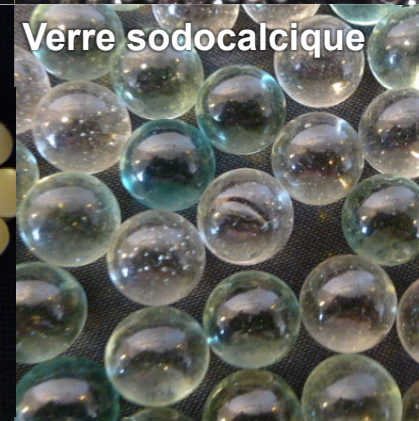


### ♦ Tailles:

- Les **billes** (plus fines) doivent être approximativement **25 fois plus grandes que la poudre** à broyer pour que le broyage soit efficace
- Un **mélange de tailles** peut être utilisé pour
  - augmenter le nombre de collisions,
  - produire d'importantes forces à l'impact (voir TP)



# **Broyage fin: Généralités et types de broyeurs fins courants**

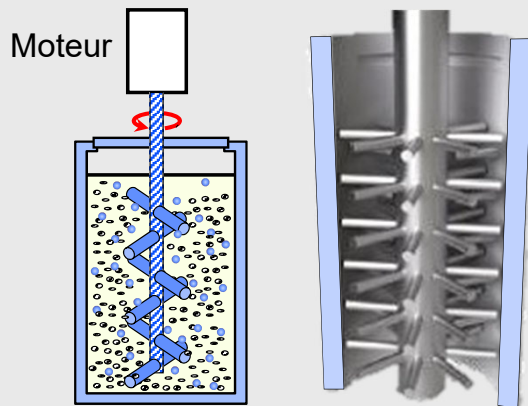


## Broyage fin: Généralités

- ♦ L'apport énergétique est **plus élevé** par rapport au broyage favorisant l'attrition

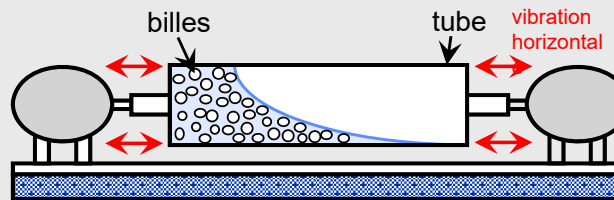
### #1\_billes agitées

Haute **turbulence** des corps broyants provoque **fortes contraintes** en compression et en cisaillement.



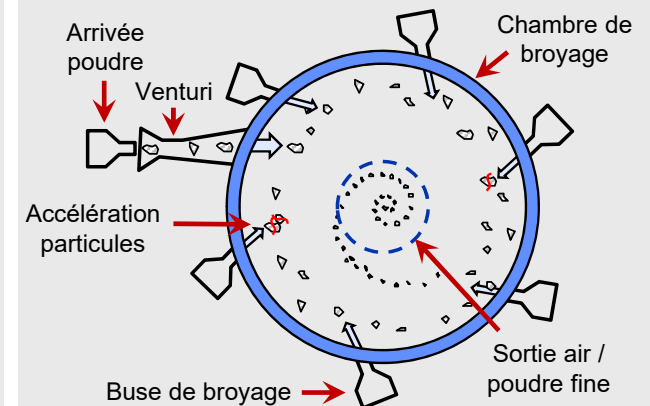
### #2\_vibrationnel

Chocs produits par **vibration horizontale** avec corps broyants sphériques ou cylindriques (donne plus de surface de contact).



### #3\_à tuyère / jet

**Particules s'entrechoquent** entre elles dans un gaz porteur. La contamination de la poudre est ainsi minimisée.





## Acquis de formation et questions

What was on the  
- MENU -  
today ?



### ◆ Acquis

- Domaines d'utilisation du concassage, broyage et broyage fin
- Principes de fragmentation à sec et humide
- Processus de broyage et classificateurs
- Mécanismes de rupture
- Broyage rotatif à billes
- Broyage fin

### ◆ Questions

- Quel type de broyeur/concasseur utiliseriez vous pour réduire en taille les poudres: (a) jusqu'au mm, (b) alumine < 100  $\mu\text{m}$ , (c) alumine < 1  $\mu\text{m}$
- Quelles sont les différences entre un broyage humide et un broyage à sec?
- Pourriez-vous décrire un circuit de broyage et pourquoi le circuit est utile?
- Quelles sont les méthodes principales de classification d'une poudre?
- Quelle est la vitesse de rotation maximale pour un broyeur rotatif à billes?