

# Cours de mise en forme des sols et matériaux granulaires

---

Jean-Marie Fleureau

[jean-marie.fleureau@ecp.fr](mailto:jean-marie.fleureau@ecp.fr)

<http://www.mssmat.ecp.fr>

(→ enseignement/élèves-ingénieurs)

# Que cherche-t-on lorsqu'on met en forme un matériau granulaire ?

- Augmenter les caractéristiques en **petites et moyennes déformations** :

*Limite d'élasticité (réversibilité du comportement)*

*Module d'élasticité, isotropie*

*Résistance (de pic)*

*Caractéristiques d'usage : portance, résistance...*

- mais, en même temps :

*Augmentation de la fragilité, des risques de fissuration*

*Augmentation du gonflement lors de la saturation*

*Pas de changement des caractéristiques en grandes déformations (résistance ultime)*

## Organisation du cours

Date	Contenu	Date	Contenu
Ve 5/2	Cours 1 jmf	Ve 19/3	TP A TP B Préparation du projet
Ve 12/2	Cours 2 jmf	Ma 23/3	
Ve 19/2	Cours 3 jmf	Ve 26/3	
Ve 26/2	Préparation projet	Lu 29/3	X. Guillot - Nouveaux bétons
Ve 5/3	?? - Matériaux pharmaceutiques	Ve 2/4	?? - Bétons bitumineux
Lu 15/3	J.B. Guillot - Matériaux pour la sidérurgie	Ma 7/4	Contrôle oral

# Mise en forme des matériaux granulaires (J.M. Fleureau)

## 1. Caractérisation des matériaux granulaires

Caractérisation des grains solides

Caractérisation de l'assemblage des grains

Paramètres de caractérisation empiriques

## 2. Spécificité du comportement des matériaux granulaires sans « colle »

Influence du chemin de contrainte (quasi-statique, cyclique, par vibrations, dynamique, avec ou sans rotation du tenseur des contraintes principales)

Rôle de la granulométrie; du comportement des grains (grains fragiles, ductiles..)

### 3. Matériaux avec « colle »

Colle d'origine **capillaire** : rôle de la teneur en liant, teneur optimale, relation avec la pression négative

Colle **bitumineuse** : rôle de la viscosité du liant et de la température

Colle d'origine **chimique** : produits d'injection ou colle naturelle

### 4. Différentes approches de la modélisation du comportement

Modélisation élastique non linéaire,

Modélisation élasto-plastique...

Approches micro-macro

### 5. Applications

...

# Introduction

## Qu'est-ce qu'un matériau granulaire ? Exemples, applications

- Grains solides assemblés, l'ensemble peut se comporter comme un solide, ou comme un fluide

Ex: Sols granulaires (sables),

- Matériaux du génie civil (granulats, poudres),
- Industrie agro-alimentaire (céréales, engrais...)

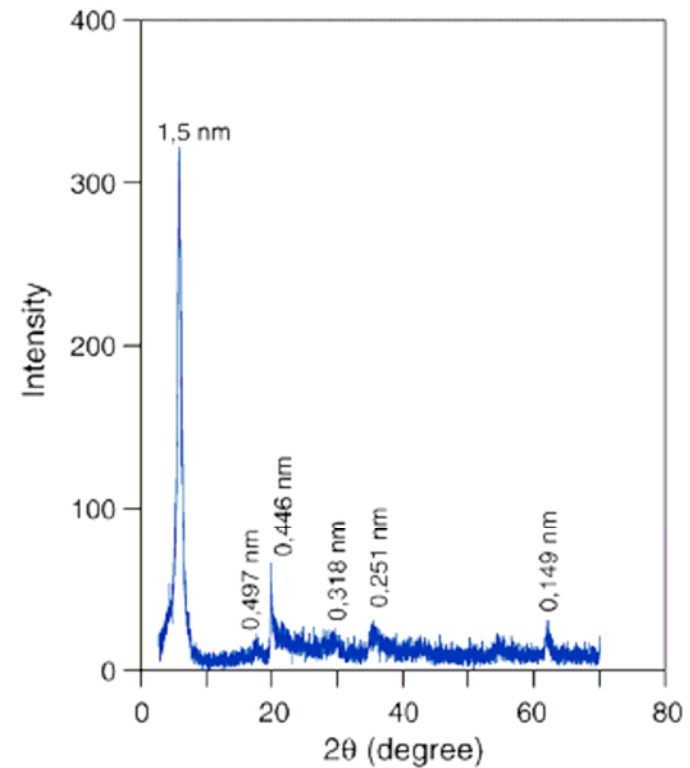
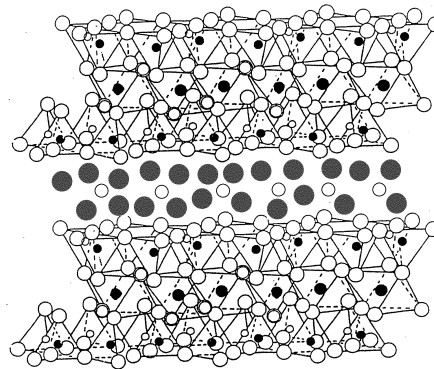


- Différentes situations et problèmes :  
manutention, stockage, mélange, construction...
- Les grains peuvent être inclus dans une matrice,  
liés, cimentés...
- Distinguer les assemblages avec et sans cohésion

# 1ère partie : Caractérisation des grains solides

# Particules monocristallines

- Cohésion de l'édifice : liaison ionique , liaison métallique, liaison covalente, liaison moléculaire..
- Réseaux et systèmes cristallins
- Caractérisation par diffraction de rayons X



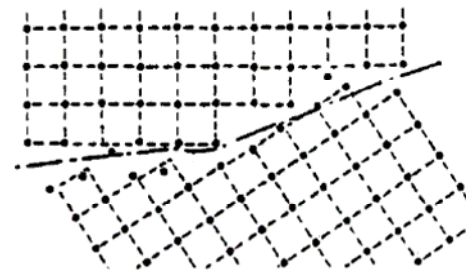
# Particules polycristallines

Association de petits monocristaux (cristallites) totalement ou partiellement attachés les uns aux autres par des joints rigides.

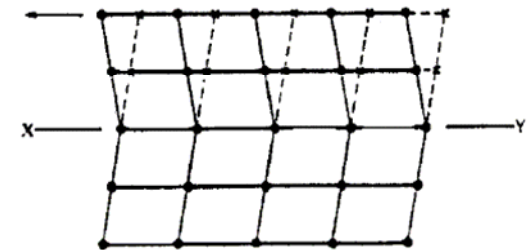
- Cohésion des contacts inter-cristallites : contacts plutôt face-face
- Chaque domaine soudé au voisin fortement, de différentes façons

Défauts surfaciques (2D) :

- résistance mécanique  $\searrow$
- Joint de grain : volume libre important
- Cohésion  $\searrow$  (fragilité)
  - Corrosion préférentielle aux joints de grains



Joints de grains



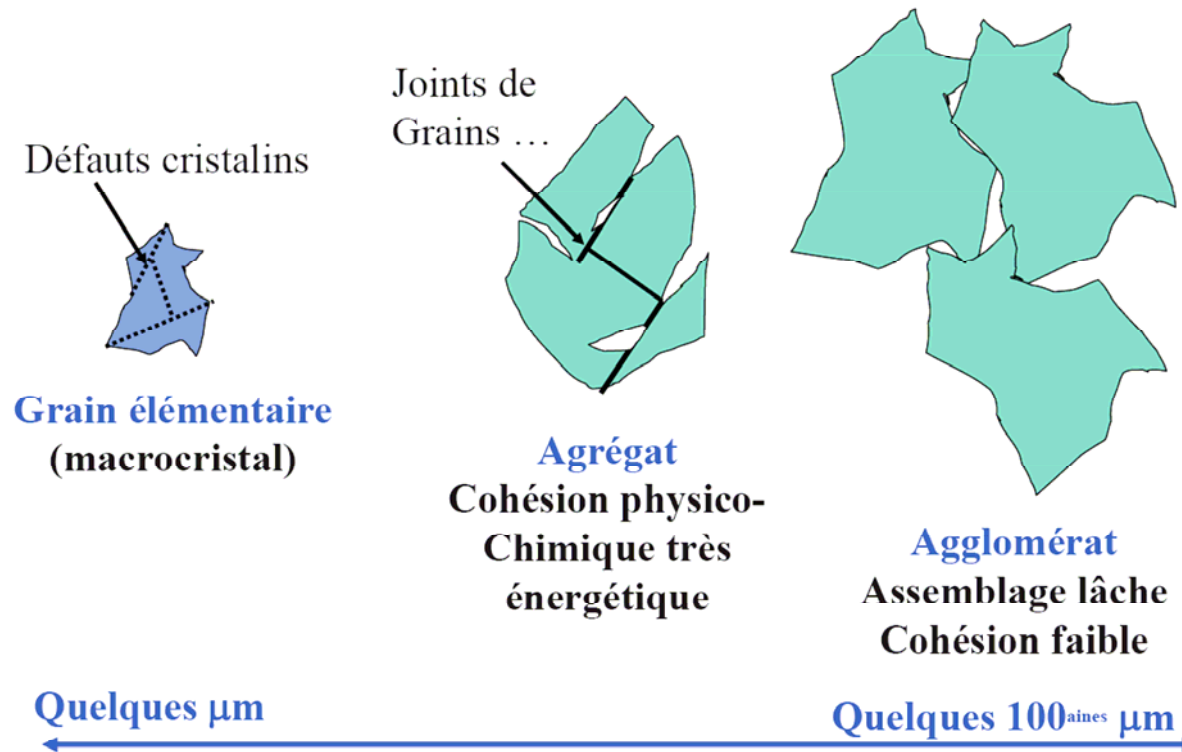
Mâcles

# Agrégats

Assemblée de grains : agrégats, puis agglomérats

⇒ Poudre

- Cohésion entre grains : forces de VDW, électriques, capillaires...



# Caractérisation des grains solides

## Caractéristiques élémentaires

- Granulométrie
- Densité vraie
- Facteur de forme
- Surface spécifique
- Porosité intraparticulaire
- Energie cohésive

## Caractéristiques des ensembles particulaires

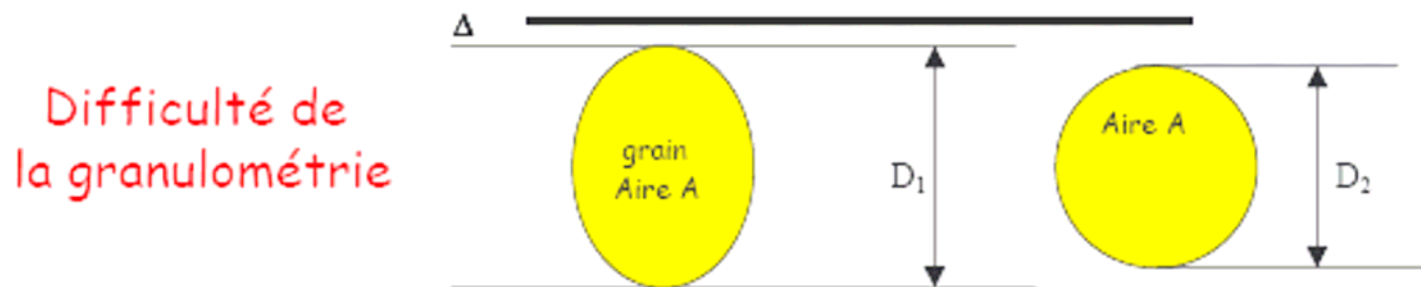
- Compacité
- Porosité interparticulaire
- Densité apparente
- Coulabilité
- Adsorption
- Cohésion volumique et de surface

# Caractérisation géométrique

## Granulométrie - Granularité

**Granulométrie:** mesure de la dimension des grains d'un matériau granulaire

**Granularité:** exploitation des résultats de la granulométrie (distribution des dimensions des grains)



$D_1$  est la distance entre les deux tangentes extrêmes au contour de la projection menées parallèlement à une direction  $\Delta$ .

Par définition, c'est le **diamètre de Féret**. Il dépend de la direction  $\Delta$  choisie.

$D_2$  est le diamètre du cercle ayant la même aire que la projection du grain.

C'est le **diamètre projeté**.

# Méthodes de caractérisation géométrique

Granulométrie → Par tamisage (principe)

- Consiste à réaliser une **coupure granulométrique** à une dimension  $d$ , par conséquent les particules sont séparées en deux lots :



- Les ouvertures des mailles sont de forme carrée
- La maille des ouvertures est normalisée et varie selon une progression géométrique

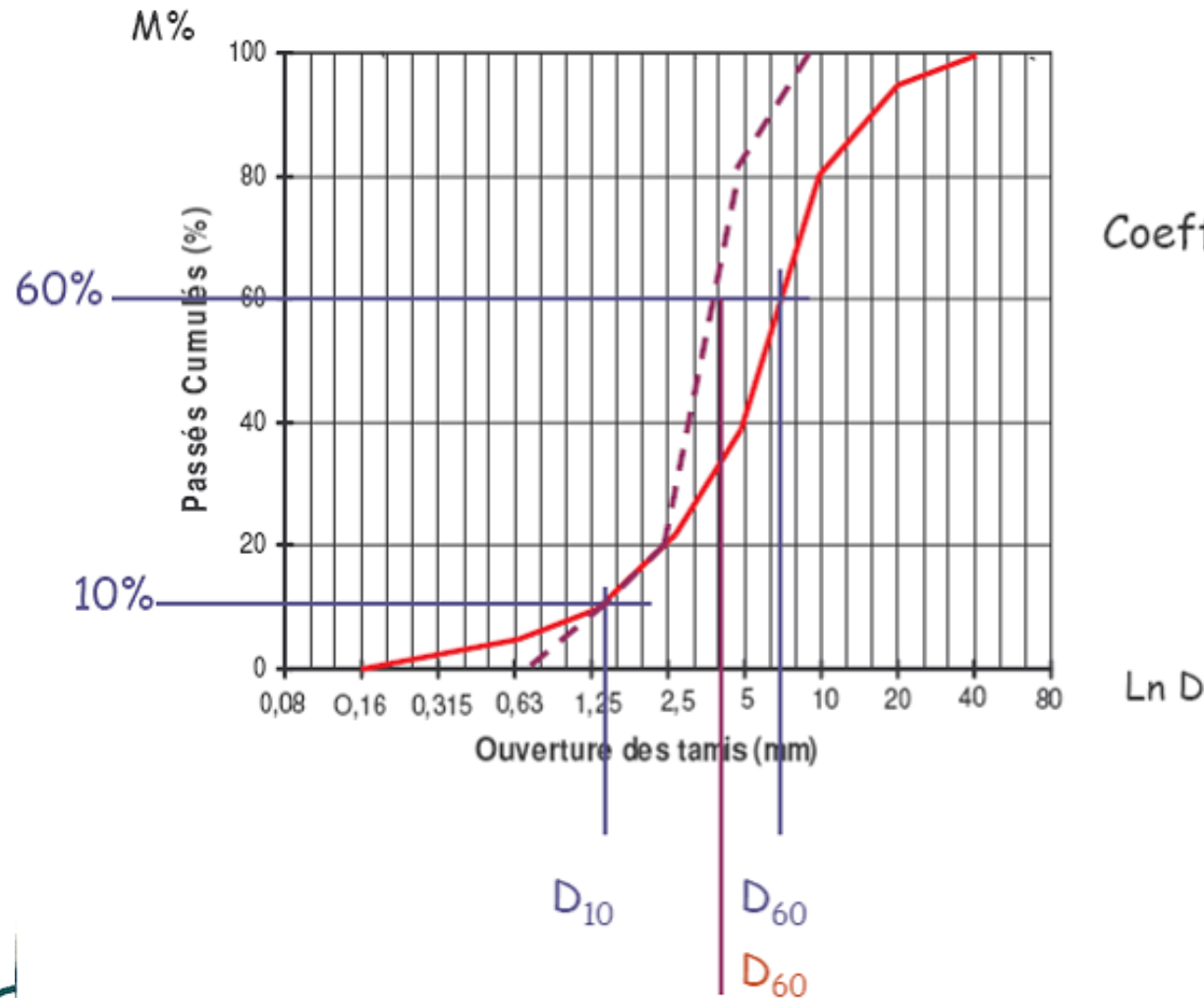
Tamis AFNOR = Tamis Européen EN

$$d_{\min} = 40\mu\text{m}$$

$$d_{\max} = 80\text{ mm}$$

# Méthodes de caractérisation géométrique

Granulométrie → Par tamisage (exemples de résultat)



Coefficient d'uniformité

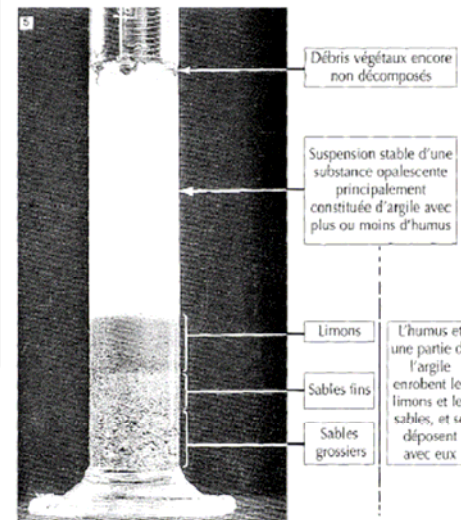
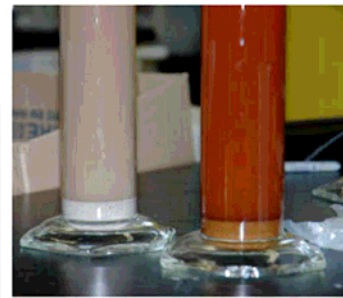
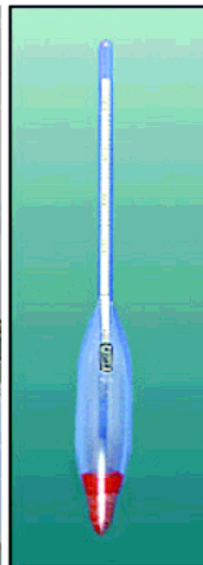
$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

# Méthodes de caractérisation géométrique

## Granulométrie par sédimentométrie (principe)

- Relation entre la taille et la vitesse de sédimentation

Densimétrie

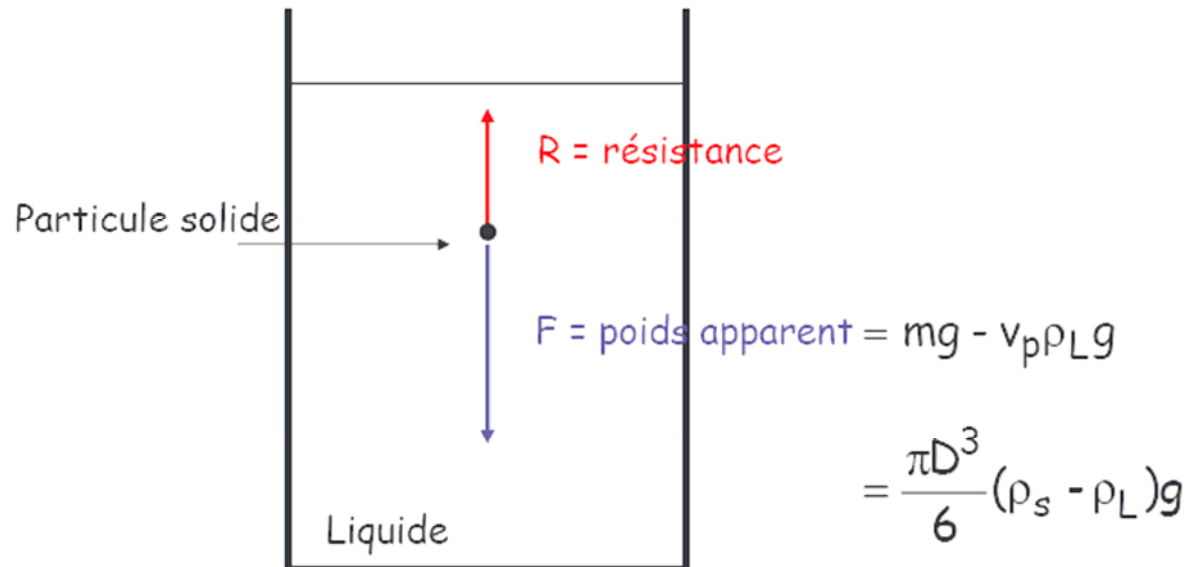


Source : Soltner, 205, p 16

# Méthodes de caractérisation géométrique

## Granulométrie par sédimentométrie (principe)

### Etude de la chute de particules sphériques ( $D=2r$ )



- $\rho_s$  masse volumique du solide
- $\rho_L$  masse volumique du liquide
- $V_p$  volume de la particule
- $m$  masse de la particule
- $R$  résistance (en général inconnue)

$$H = \frac{D^2}{18\mu} (\rho_s - \rho_L) g t$$

$H$  est la distance  
parcourue pendant  $t$