



GBA

Quelques éléments de physique et de caractérisation des poudres

Thierry Ruiz



Enseignant/Chercheur – Université de Montpellier

✘ Faculté de Pharmacie

✘ U.M.R. QualiSud

Email. thierry.ruiz@umontpellier.fr



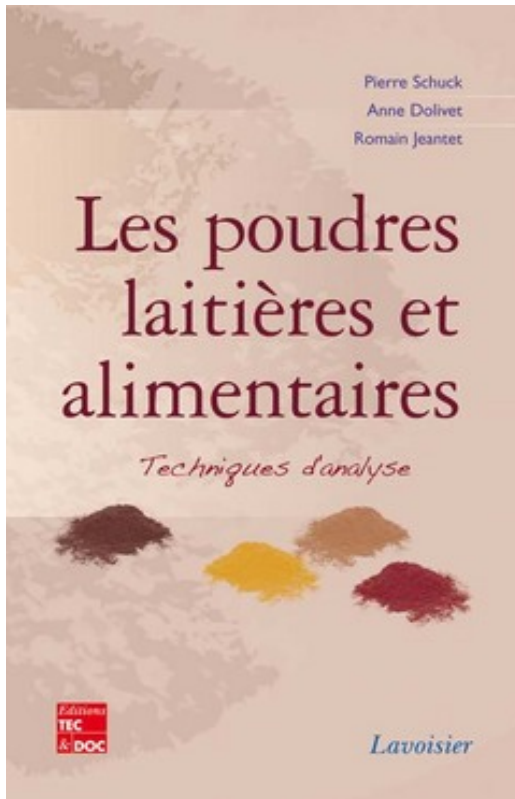
Quelques éléments de physique et de caractérisation des poudres

- 🕒 Définition et usages des poudres
- 🕒 Quelques éléments de caractérisation des poudres
- 🕒 Ecoulement, tassement et compression des poudres sèches

Poudres, grains et science des aliments



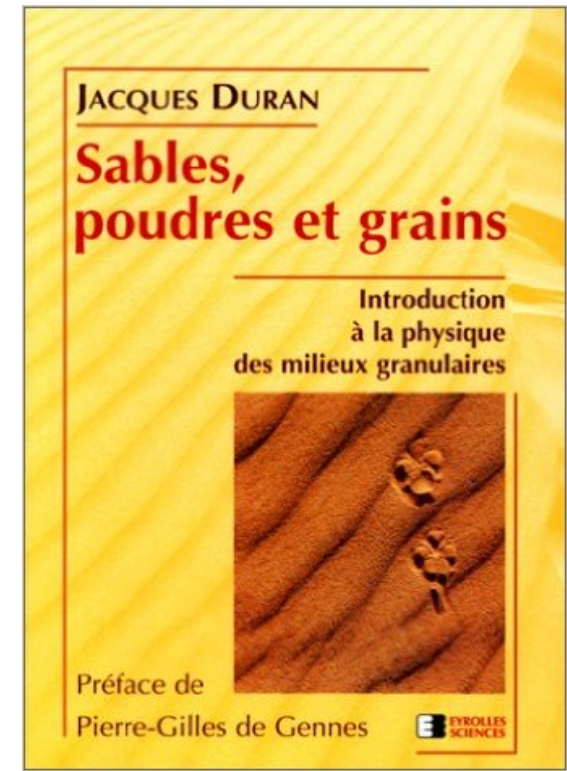
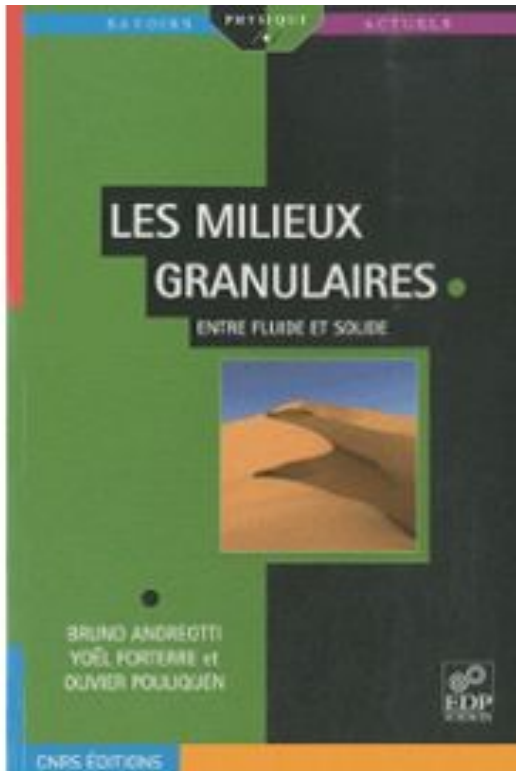
Eléments bibliographiques



Science culinaire
Matière, procédés,
dégustation

Belin:

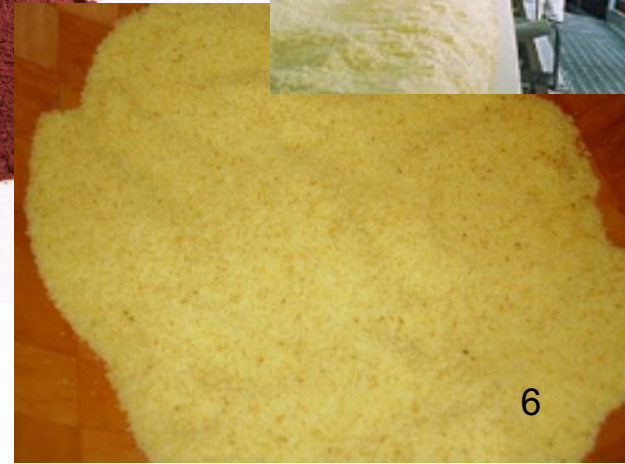
Eléments bibliographiques



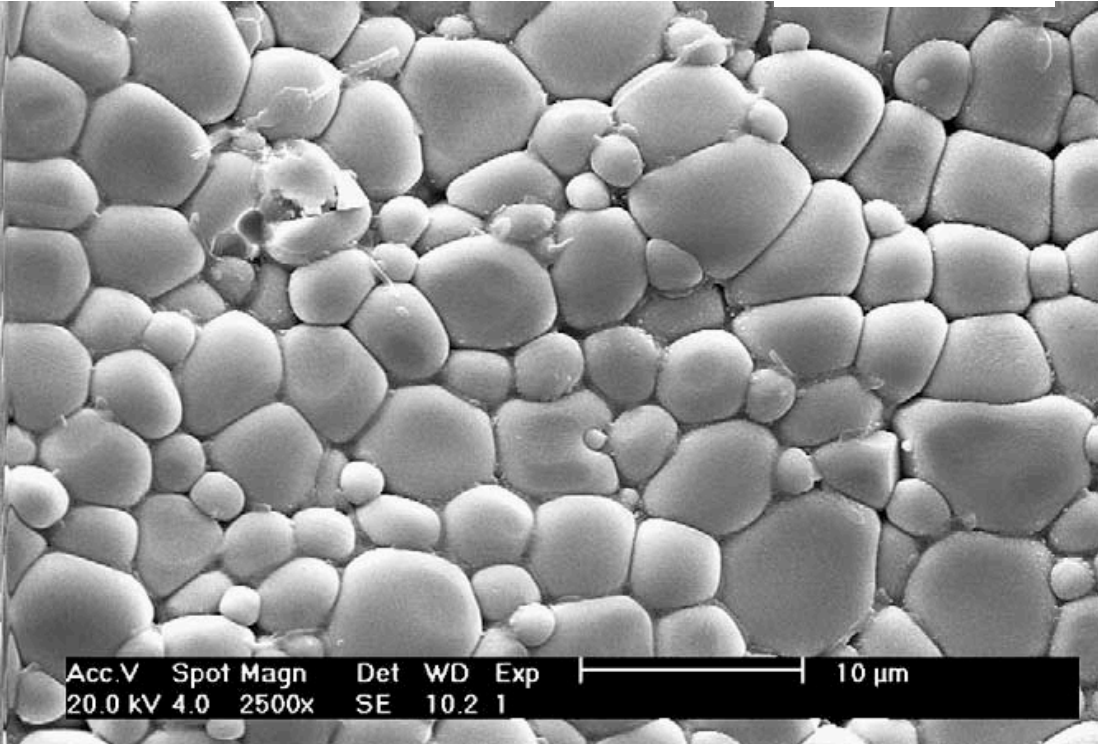
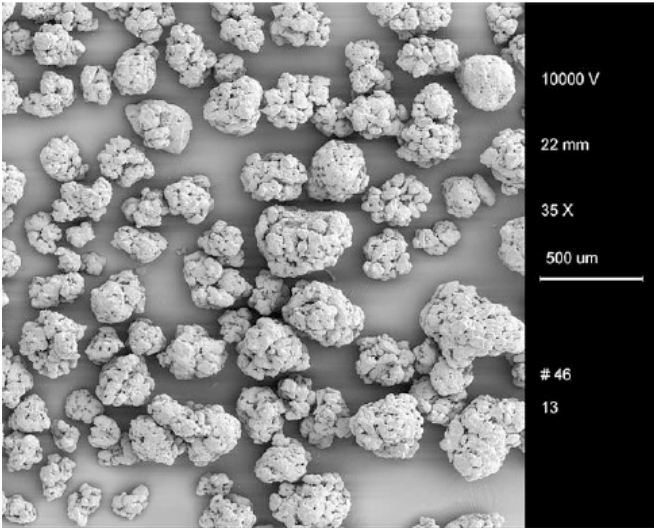
<http://www.techniques-ingenieur.fr/>

Poudres, grains et Science des Aliments

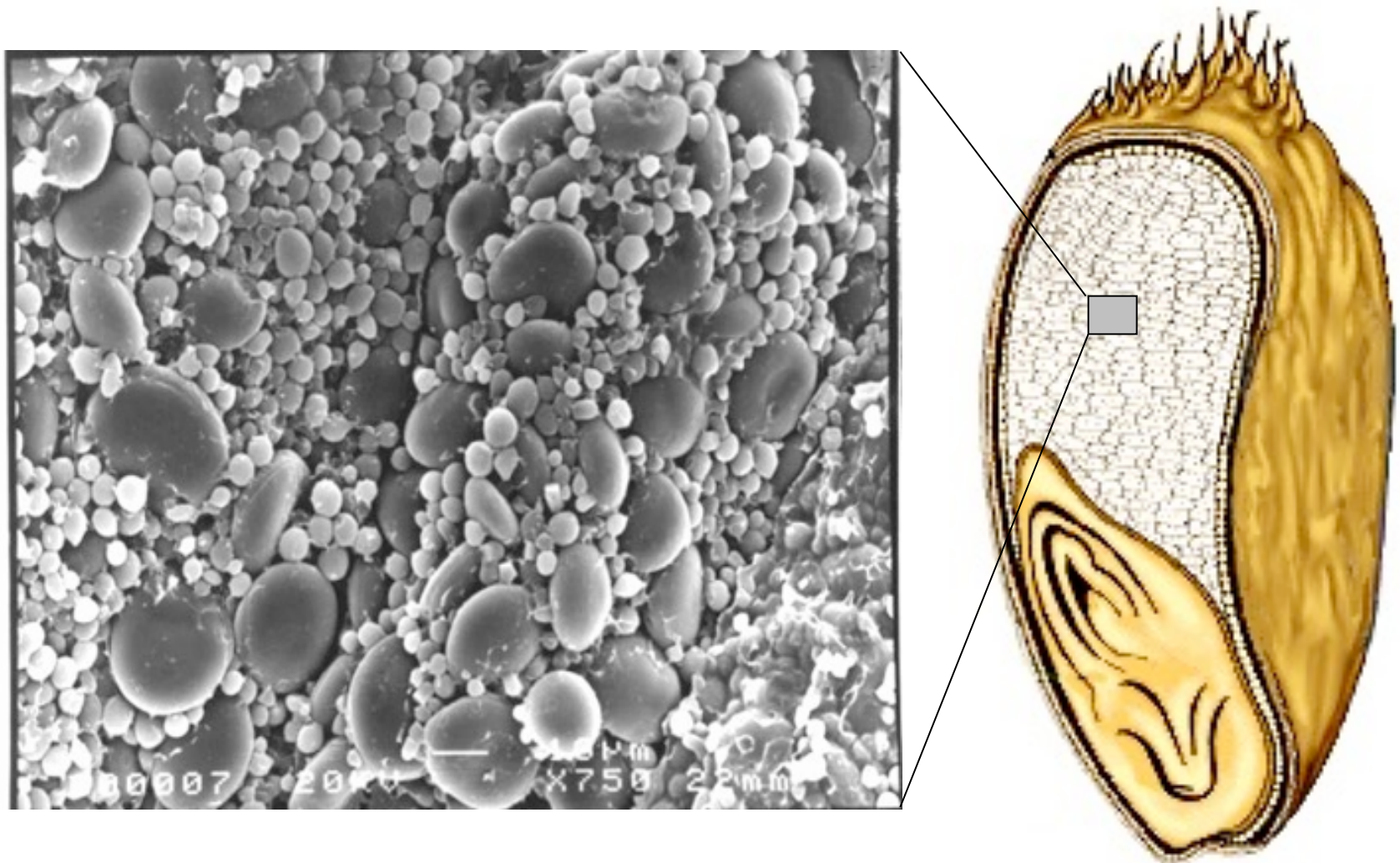
Une très grande variété de matière granulaire...



Poudres, grains et Science des Aliments



Poudres, grains et Science des Aliments



Exemple de structuration à différent niveau d'échelle (grain de blé)

Albumen amyacé : granules d'amidons enchevêtrés dans une matrice protéique₈
+ ou – poreuse

Poudres, grains et Science des Aliments

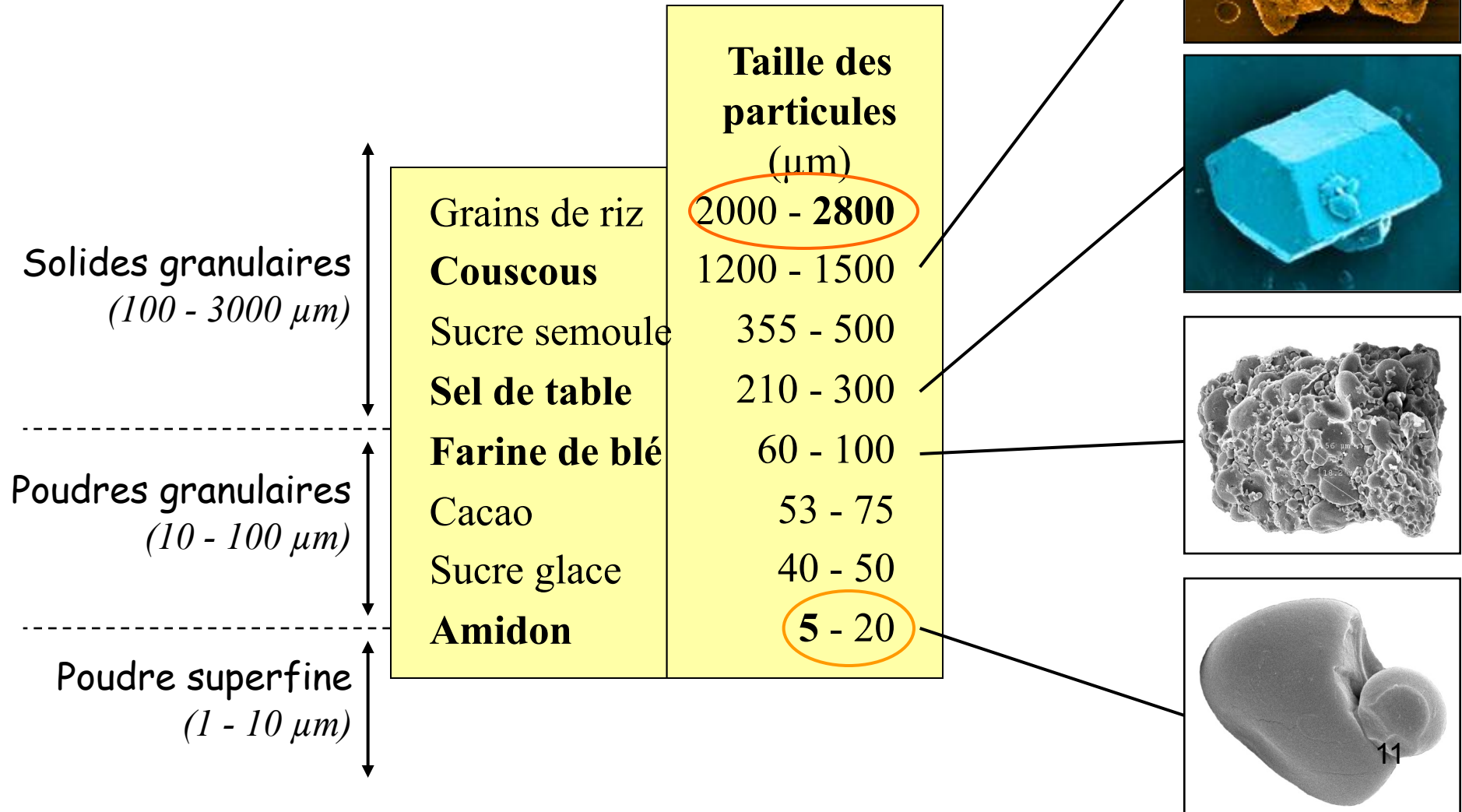
Un mot sur le secteur agroalimentaire

Secteur Agro-Alimentaire :

- importance stratégique incontournable**
- fer de lance de l'économie française**
- niveau d'exportation ~ premiers rangs mondial dans le domaine**

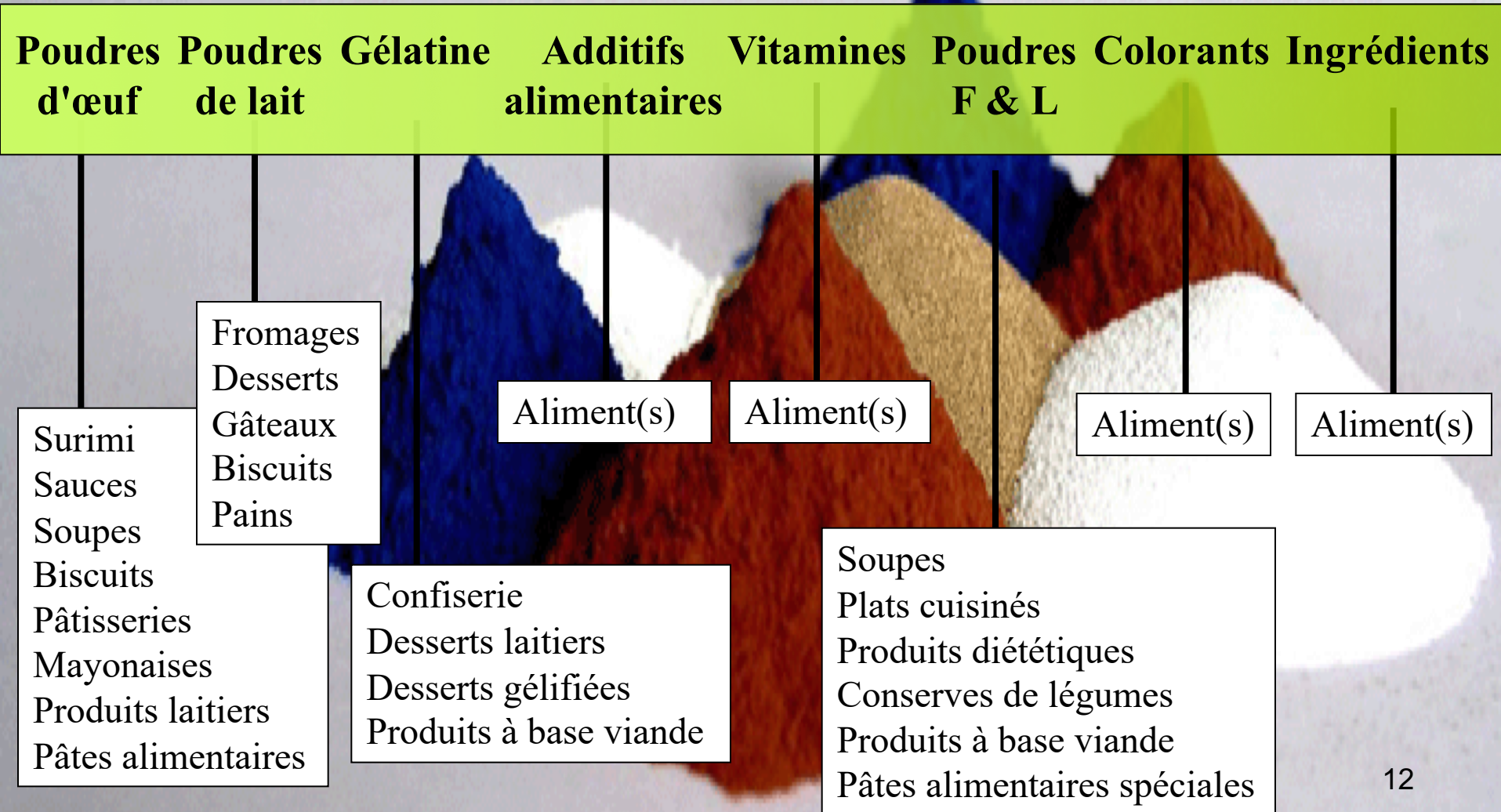
Poudres, grains et Science des Aliments

Caractéristiques "classiques" des poudres et grains alimentaires



Poudres, grains et Science des Aliments

Produit Alimentaire Intermédiaire



Poudres, grains et Science des Aliments

Quelques propriétés des poudres alimentaires

Bonnes propriétés d'usage

- o Facile à **conserver** = Faible a_w
- o Facile à **transporter** = Faible masse
- o Facile à **stocker** = Ambiance
- o Facile à **doser** = Simple pesée
- o Facile à **utiliser** = Hydratation & mélange

Ingrédients fonctionnels

- **Structuration** (épaississants, gélifiants...)
- Stabilisation **physico-chimique** (acidifiants, antioxygène...)
- Conservation **microbiologique** (antimicrobiens...)
- Qualités **organoleptiques** (colorants, arômes...)
- Composition **nutritionnelle** (vitamines, minéraux...)

Poudres, grains et Science des Aliments

Une journée avec les poudres alimentaires...



Ricoré
(en poudre)



Boisson chocolatée
(en poudre)



Sucre
(en poudre)



Café moulu, café soluble, dosettes (en poudre)



Lait
(en poudre)



Lait infantile
(en poudre)¹⁴

Poudres, grains et Science des Aliments

Une journée avec les poudres alimentaires...



Sel fin



Poivre moulu



Gros sel



Epices
(en poudre)



Plantes aromatiques
(en poudre)



Fonds de sauce
(en poudre)



Gélatine
(en poudre)



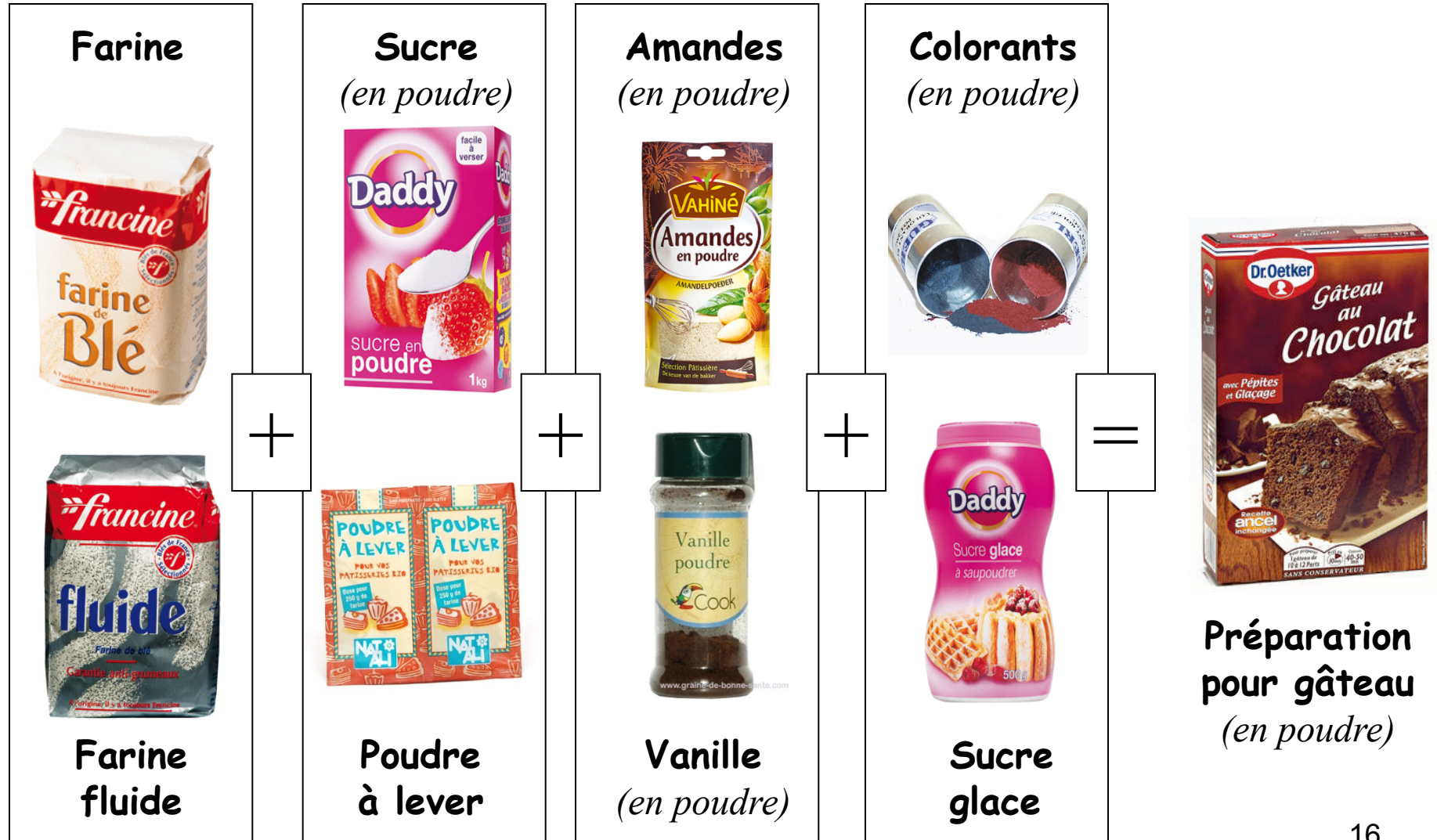
Tapioca



Chapelure
(en poudre)

Poudres, grains et Science des Aliments

Une journée avec les poudres alimentaires...



Poudres, grains et Science des Aliments

Une journée avec les poudres alimentaires...



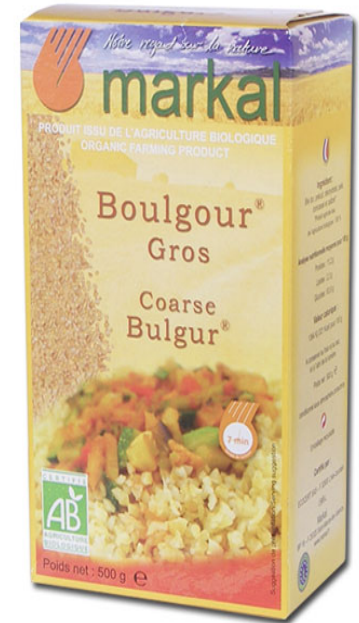
Soupe
(en poudre)



Couscous



Purée
(en flocons)



Boulgour

Définition et usages des poudres



Définition et usages des poudres

↪ Poudres \approx matière fine **pulvérulente** ou plus ou moins **cohésive** en grains

Plus précisément ...

Les **solides brisés** sont des matériaux granulaires dont la plupart des particules ont une taille supérieure à 3 mm. C'est le cas des éboulements rocheux ou des graviers qui servent à l'élaboration des bétons grossiers.

Les **solides granulaires** sont des matériaux composés de grains dont la taille se situe **entre 0,1 et 3 mm**.

Les **poudres** sont des matériaux granulaires dont **la taille est inférieure à 100 μ m**.

On distingue :

les poudres granulaires : 10 à 100 μ m,

les poudres superfines : 1 à 10 μ m,

les poudres ultrafines : 0.1 à 1 μ m.

Les **colloïdes** sont des agrégats solides dont la taille est comprise entre **10nm et 1 μ m**.

Définition et usages des poudres

↳ Poudres \approx matière fine pulvérulente en grains

Quelques exemples de poudres

Sel, poivre, épices moulues, sucre glace, pollens, sable fin, fars, médicaments à dissoudre, café, argiles, farines, explosifs, ...



agglomération, compactage, ...).

Définition et usages des poudres

Génération de poudres...

Les **particules natives** sont obtenues naturellement ou générées par des procédés tels que le **broyage**, le **concassage**, l'**abrasion**, la **nucléation par voie humide**, ...

Les technologies concernant la matière en grain dans l'industrie font aussi appel à d'autres opérations variées : l'**extraction**, le **forage**, le **criblage**, le **malaxage**, la **compression**, le **convoyage pneumatique**, l'**extrusion**, la **granulation**, le **frittage**...

Quelques données ...

Le traitement de la matière en grain concerne, chaque année à l'échelle mondiale, des quantités gigantesques de matériaux de l'ordre de la **dizaine de milliard de tonnes (mMT)**.

A eux seuls, les **charbons** \approx **3.5 mMT (énergie)**, les **ciments** et les **matériaux de construction ordinaire** \approx **1 mMT (bâtiment)**, les **sables et graviers** \approx **1 mMT (Génie Civil)**.

Définition et usages des poudres

Quelques données ...

Le traitement de la matière en grain mobilise près de 10% de la production énergétique planétaire.

Cette classe de matériaux occupe le deuxième rang, immédiatement après l'eau, dans l'échelle des priorités pour l'activité humaine.

Poudres et milieux granulaires : une thématique de recherche très moderne ...

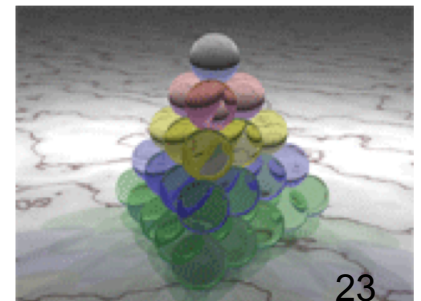
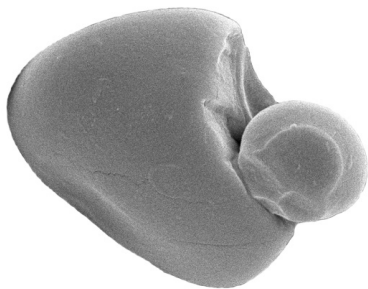
■ Ancienne problématique

Les domaines qui utilisent les poudres ont recours à des **procédés datant du 19ème siècle** : nombreux sont les problèmes résolus de manière très approximative...au niveau du transport (lits fluidisés, bandes roulantes...), de la mise en forme (malaxage, compression), du stockage (notamment en silos)...

Quelques problématiques actuelles ...

Bien qu'utilisées depuis de nombreuses années
par les industries alimentaires...

...les poudres alimentaires sont **longtemps restées à l'écart**
des centres d'intérêts des spécialistes des poudres.



Quelques problématiques actuelles ...

Dans les industries alimentaires...

- (-) **Faible valeur** économique des poudres alimentaires (*farine, sucre, sel, etc.*)
 - (-) **Pilotage** industriel régi par la **maîtrise des coûts**.
 - (-) **Peu de formation** des ingénieurs agroalimentaires aux Sciences des Poudres.
 - (-) **Peu d'investissements** (*institutionnel, industriel, équipementier, scientifique*).
 - (-) **Equipements** relativement **anciens**.
- > **Connaissances** scientifiques & technologiques encore **insuffisantes**
- > **Innovations** technologiques **rares**

Même si depuis 20 ans, les acteurs des filières agroalimentaires cherchent à mieux comprendre les performances des poudres alimentaires.

Quelques problématiques actuelles ...

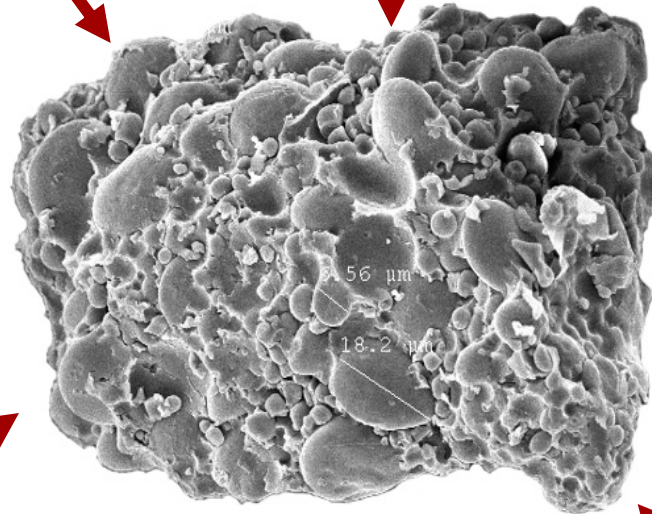
Nécessité d'une approche intégrative

Savoir-faire
historiques

Expertise des
professionnels

Sciences
Alimentaires

Génie des Procédés



Physique des Milieux
granulaires

Mécanique des Milieux
granulaires

Quelques problématiques actuelles ...



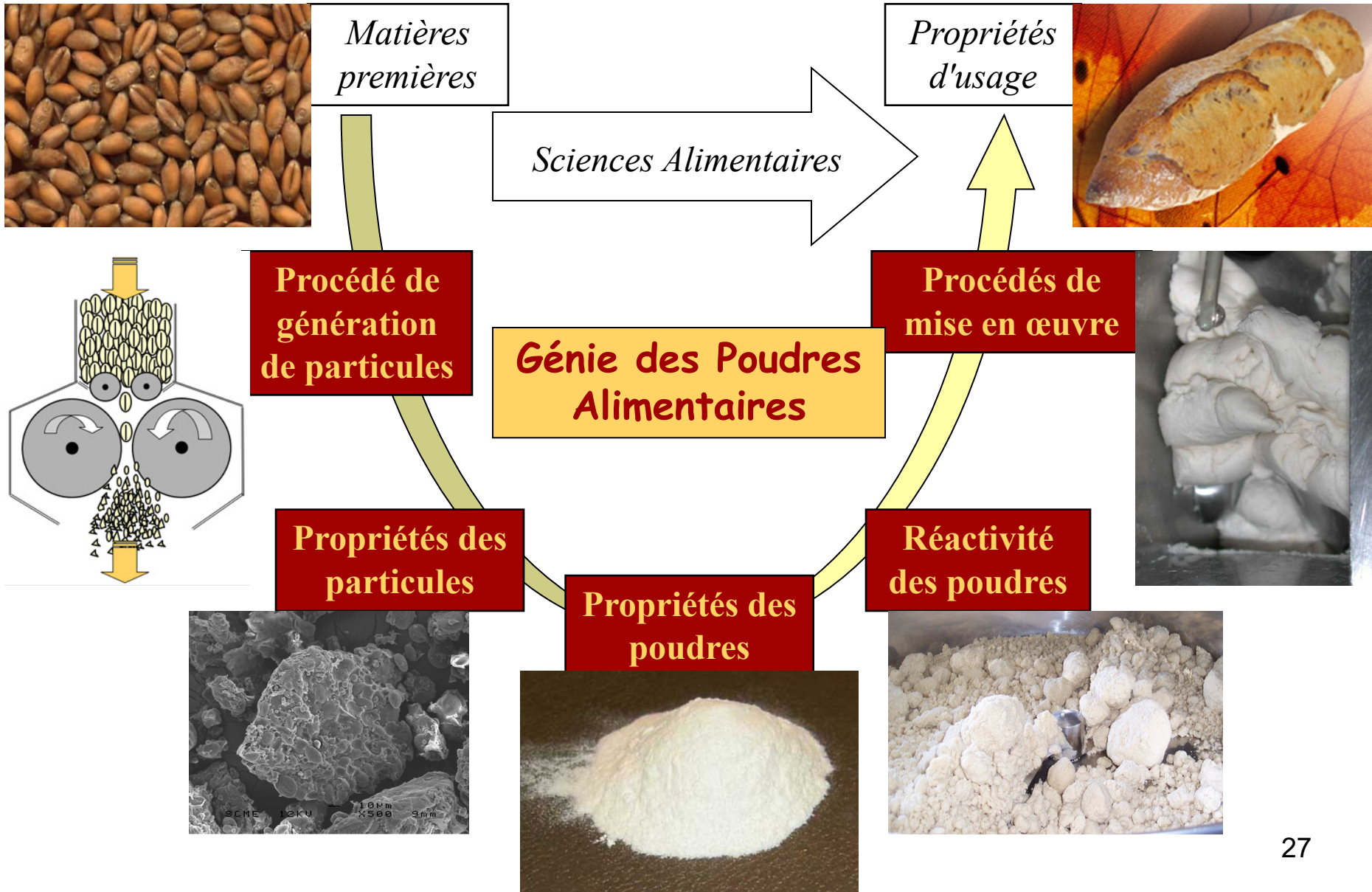
**Matières
premières**

Sciences Alimentaires

**Propriétés
d'usage**



Quelques problématiques actuelles ...



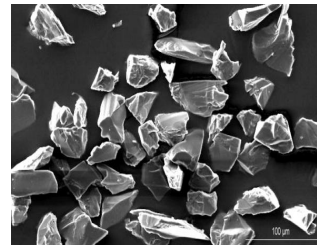
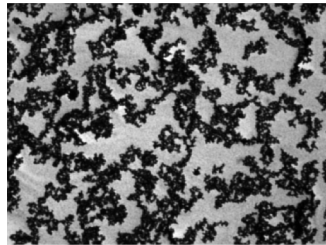
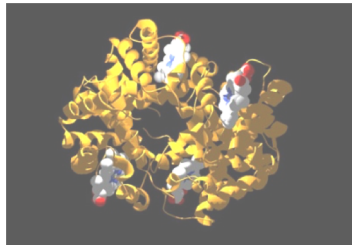
Quelques éléments de caractérisation des poudres



Quelques éléments de caractérisation des poudres

Matière « molle »

Milieux granulaires



Macromolécules

Colloïdes

Poudres

Solides divisés

10^{-9} m

10^{-6} m

10^{-3} m

10^0 m

longueur de Bjerrum

longueur de Debye

Particules « thermiques »

longueur **colloïdale**

$$L_{col.} = 2 \left(\frac{3k_B T}{4\pi\Delta\rho g} \right)^{\frac{1}{4}}$$

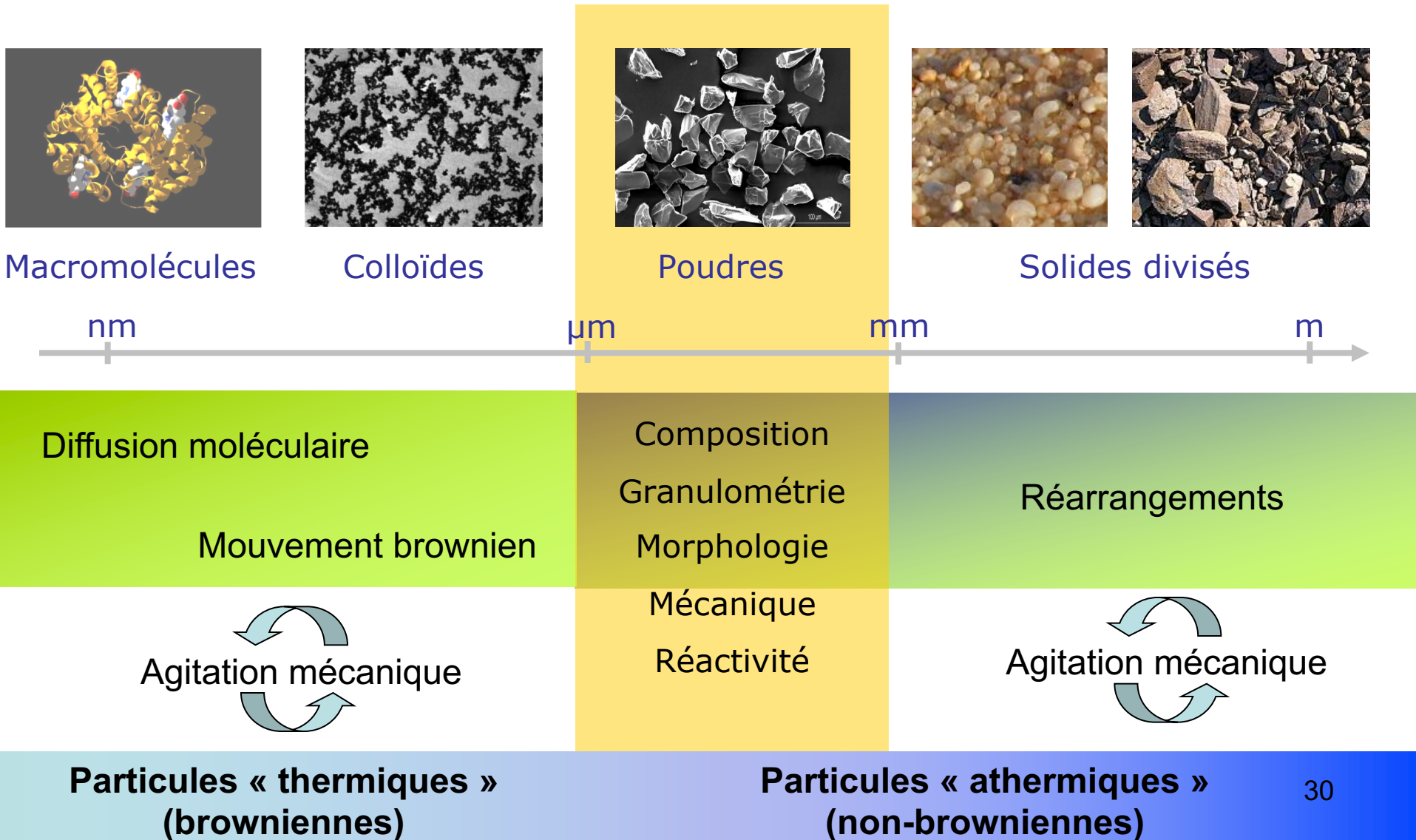
longueur capillaire

$$L_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$$

Particules « athermiques »

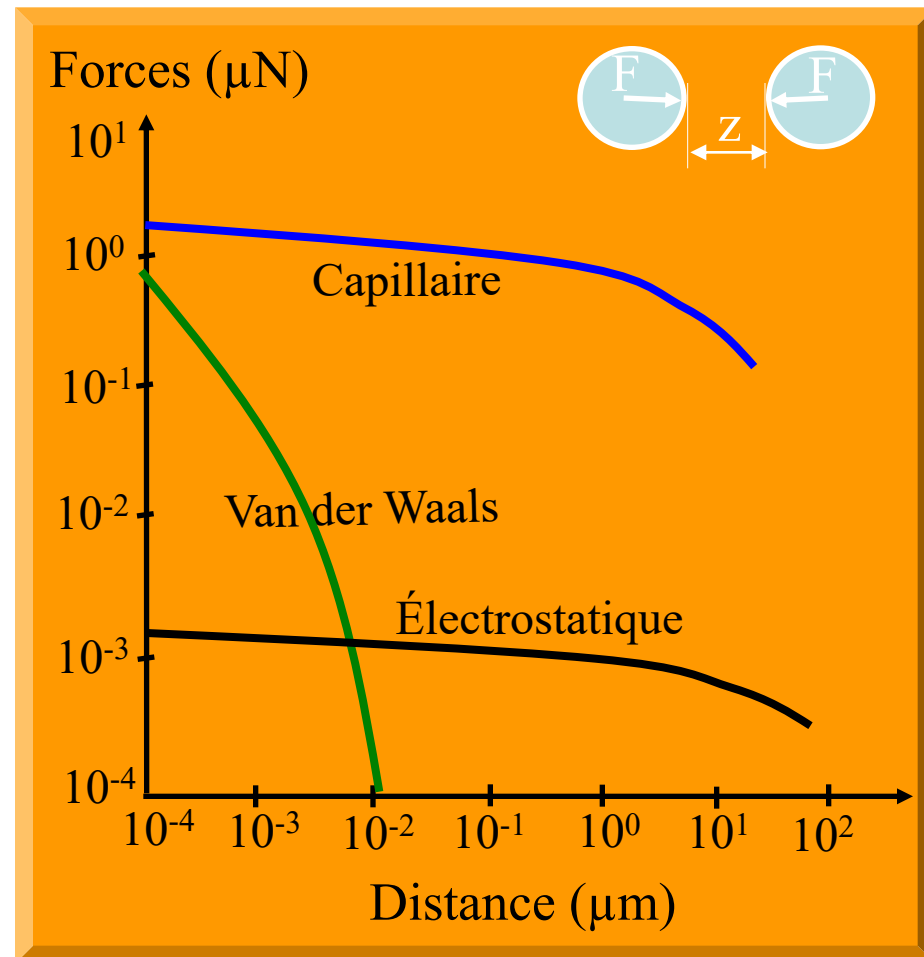
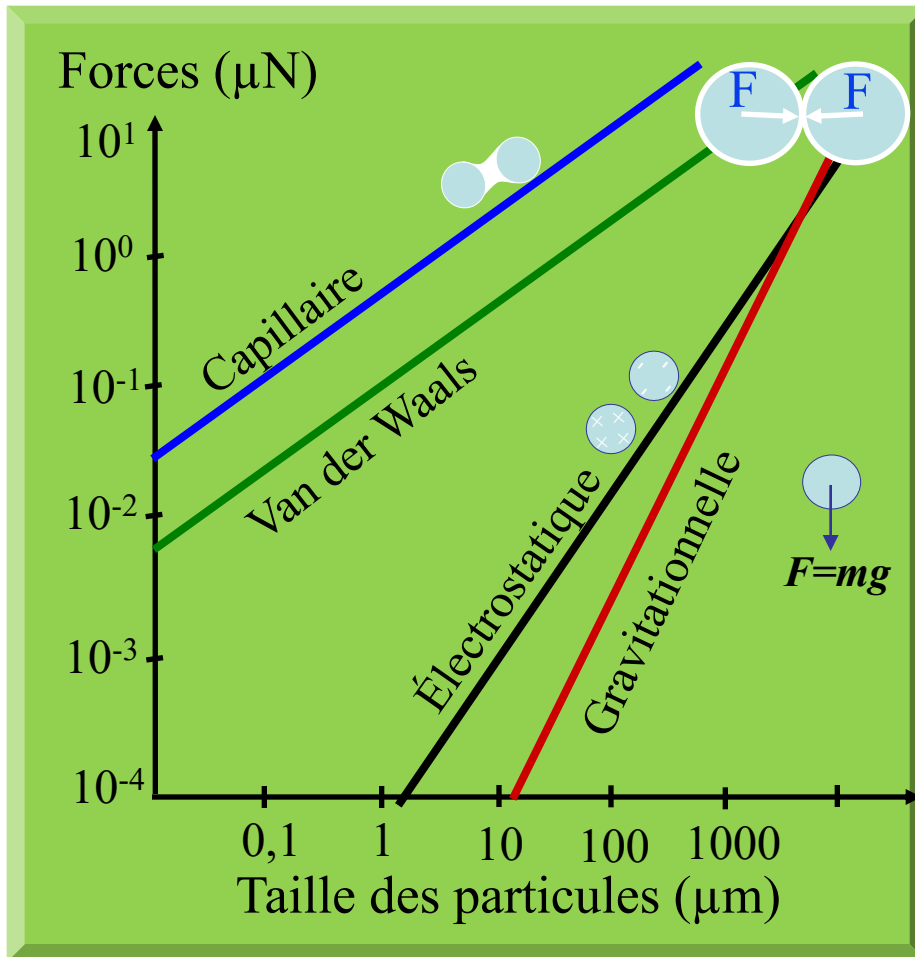
Quelques éléments de caractérisation des poudres

Quelle mobilité ?



Quelques éléments de caractérisation des poudres

Quelles interactions ?



« Diagrammes des forces interparticulaires »

Quelques éléments de caractérisation des poudres

Diagramme des forces interparticulaires

Longueur capillaire ($l_{\text{cap}} \approx 2 \text{ mm}$)

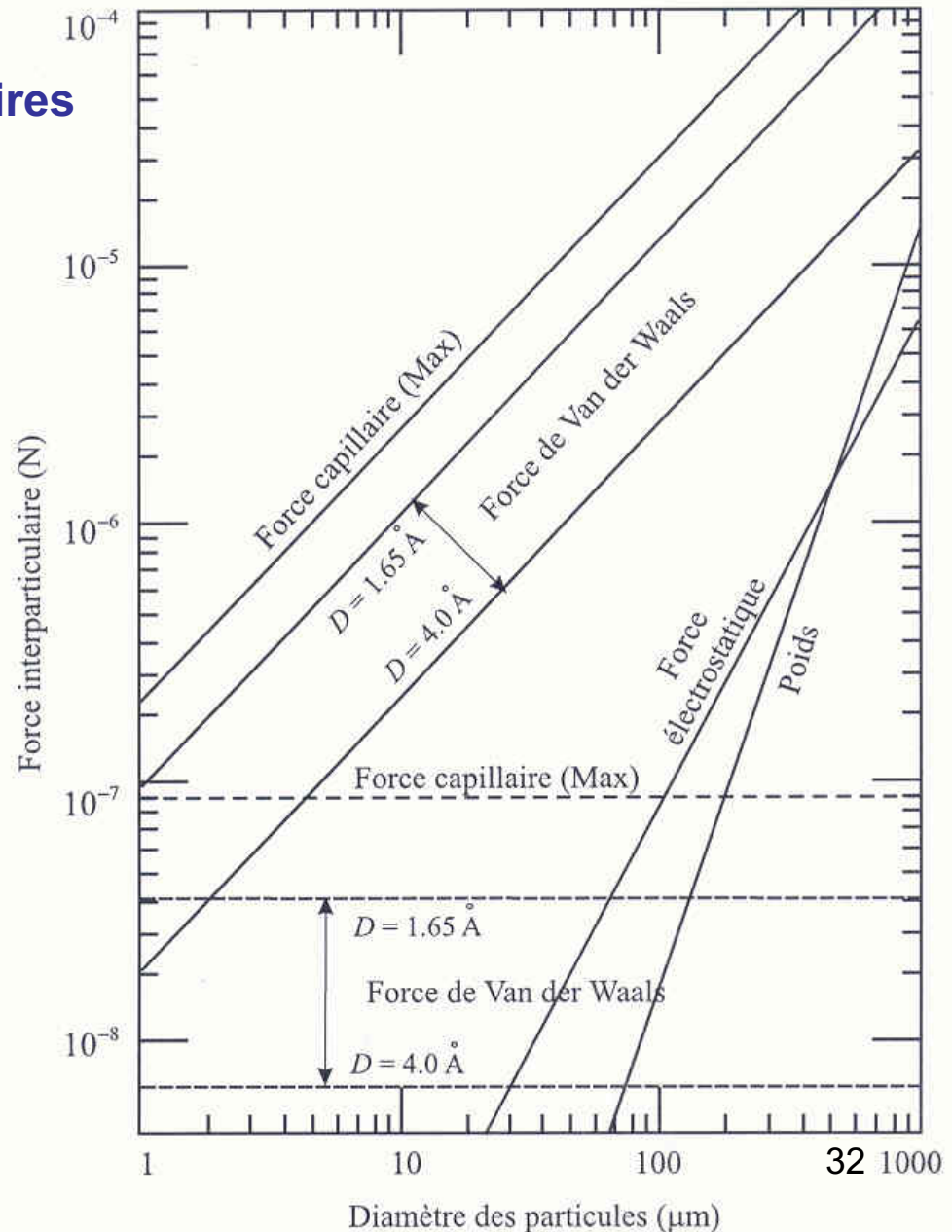
Forces de tension superficielle

Gravité

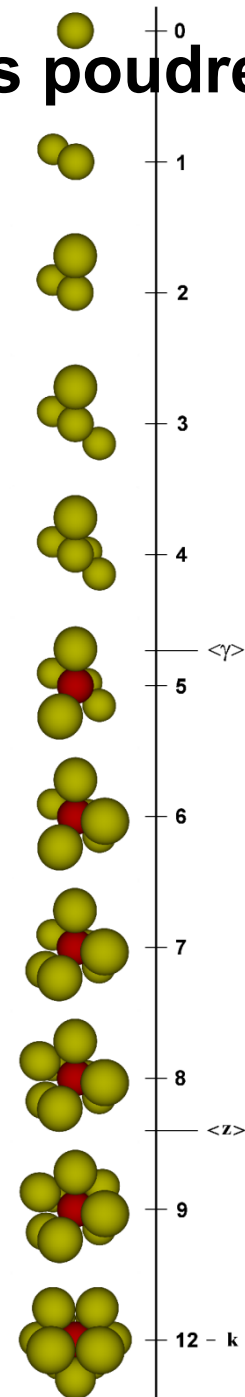
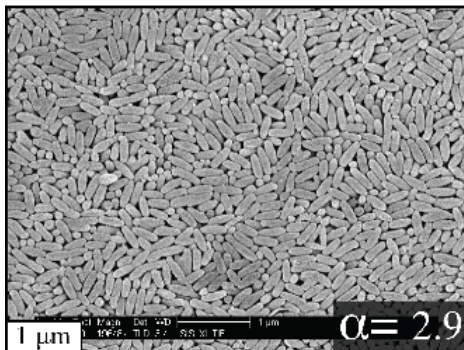
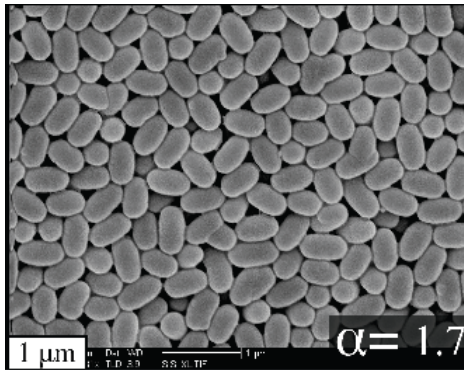
Longueur colloïdale ($l_{\text{col}} \approx 1 \text{ }\mu\text{m}$)

Forces de surface (Van der Waals)

Gravité



Quelques éléments de caractérisation des poudres

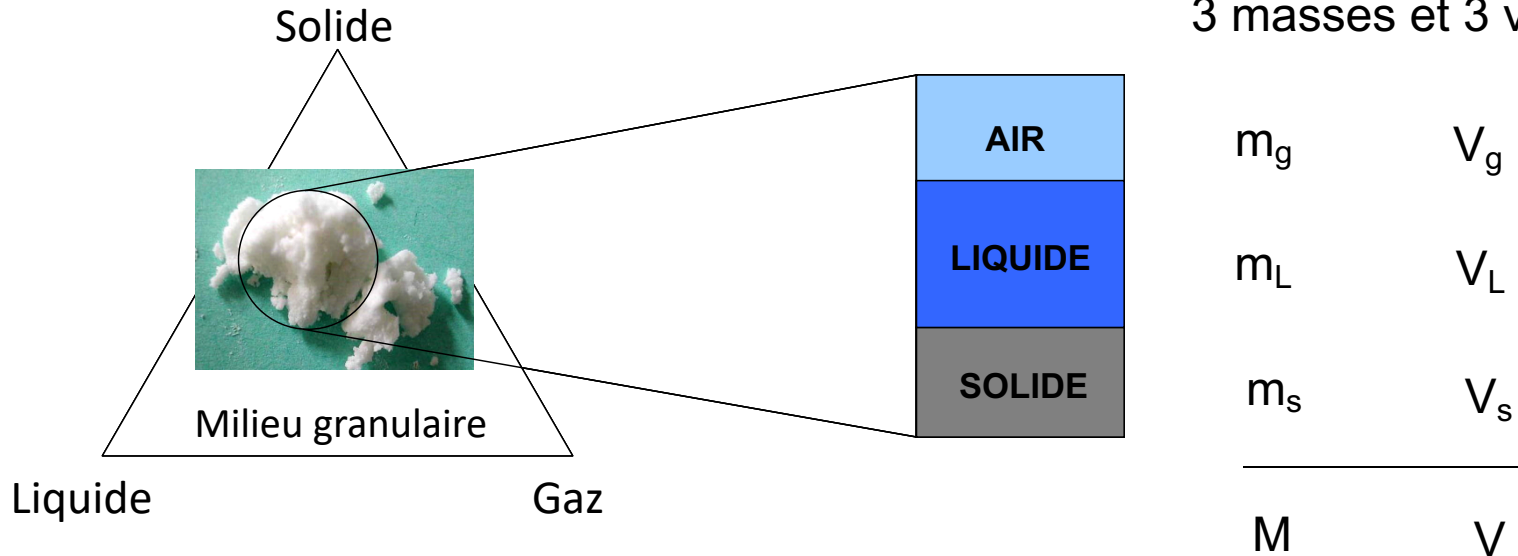


Importance du nombre de « points » de contact : **la coordinance**

Quelques éléments de caractérisation des poudres

Variables texturales de description des milieux granulaires

Décomposition du milieu selon ses phases constitutives → purement conceptuelle



3 masses et 3 volumes

Caractéristiques globales intrinsèques

➔ masses volumiques réelles de chacune des phases

phase solide

$$\rho_s^* = \frac{m_s}{V_s}$$

phase liquide

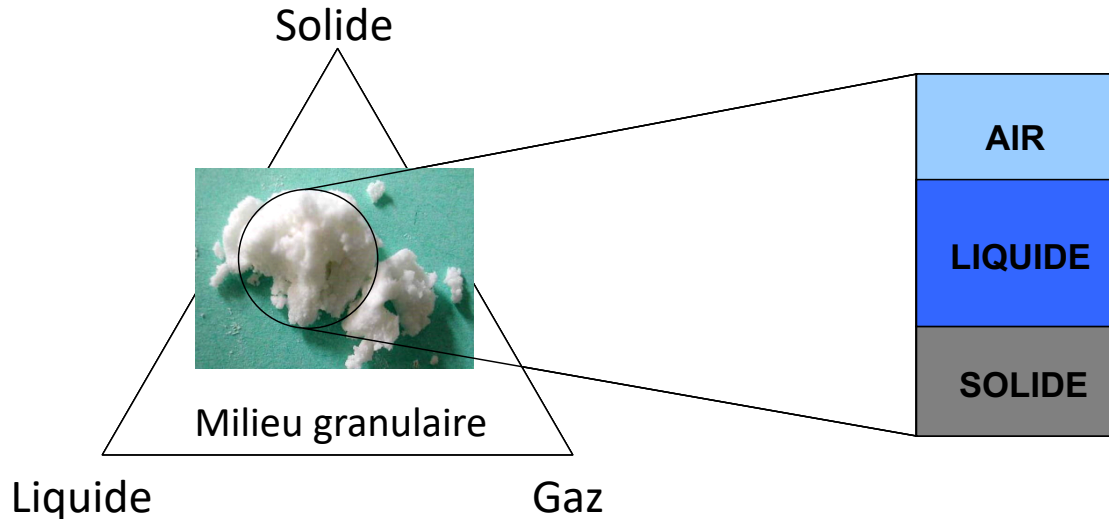
$$\rho_L^* = \frac{m_L}{V_L}$$

phase gazeuse

$$\rho_g^* = \frac{m_g}{V_g} \approx 0$$

Quelques éléments de caractérisation des poudres

Variables texturales de description des milieux granulaires



Fraction volumique solide ou **compacité** $\phi = \frac{V_s}{V}$ Porosité $\varepsilon = 1 - \phi = \frac{V - V_s}{V}$

Teneur en eau (base sèche) $w = \frac{m_L}{m_s}$ (base humide) $w = \frac{m_L}{M}$

Quelques éléments de caractérisation des poudres

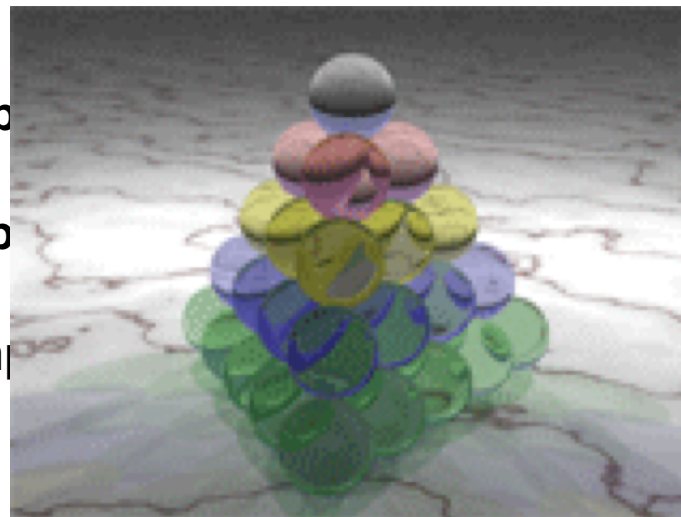
Une variable texturale clé : la compacité de l'empilement

Les caractéristiques des comportements dynamiques sec (coulabilité, ségrégation, cohésion, compressibilité, tassement, ...) et **humide** (malaxage, extrusion, granulation, agglomération, sphéronisation, ...) sont très fortement dépendant de la compacité.

✘ **Empilement maximal ϕ_{\max} (ex. compactage) et empilement minimal ϕ_c (ex. fluidisation)**

↪ **Il existe une gamme de compacité bien connue pour des particules sphériques monodisperses (milieux granulaires modèles) :**

- Random loose p
- Random close p
- Empilement comp



contacts entre grains

nt maximal

(conjecture de Kepler)

Quelques éléments de caractérisation des poudres

Une variable texturale clé : la compacité de l'empilement



100 mL + 100 mL =



150 mL ??

Quelques éléments de caractérisation des poudres

Un peu de physique préliminaire ...

Les poudres et milieux en grains, «résistent» encore à une description rhéologique unifiée par une équation constitutive simple, et sont le siège de phénomènes en contraste avec des fluides simples (Newtoniens) ou des solides classiques.

On dénombre trois phénomènes majeurs en milieux granulaires secs, liés à la **notion d'arrangements granulaires**

- ✘ La ségrégation

- ✘ L'effet de voûte

- ✘ La dilatance

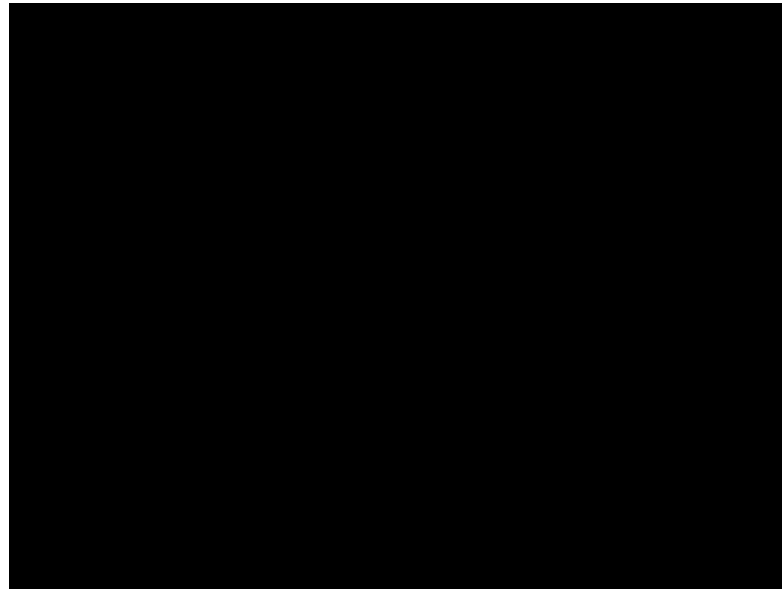
➔ L'implication de ces phénomènes complexes lors du transport de matière en grains est importante dans de nombreux processus industriels, où **une majeure partie de l'énergie est dépensée dans la friction générée lors des écoulements.**

Quelques éléments de caractérisation des poudres

La ségrégation

Expérience : lorsqu'on secoue un tas de grains de tailles différentes, on peut obtenir soit un mélange, soit une ségrégation (séparation des différentes tailles).

C'est Faraday qui a réalisé les premières expériences en faisant vibrer verticalement un tas de grains de tailles différentes mais de même densité. Il avait remarqué qu'au bout d'un moment, toutes les grosses billes se retrouvaient au- des petites.



La ségrégation spontanée sous l'effet d'écoulements ou de vibrations (effet des noix du Brésil) **n'est pas reliée à la densité.**

Quelques éléments de caractérisation des poudres

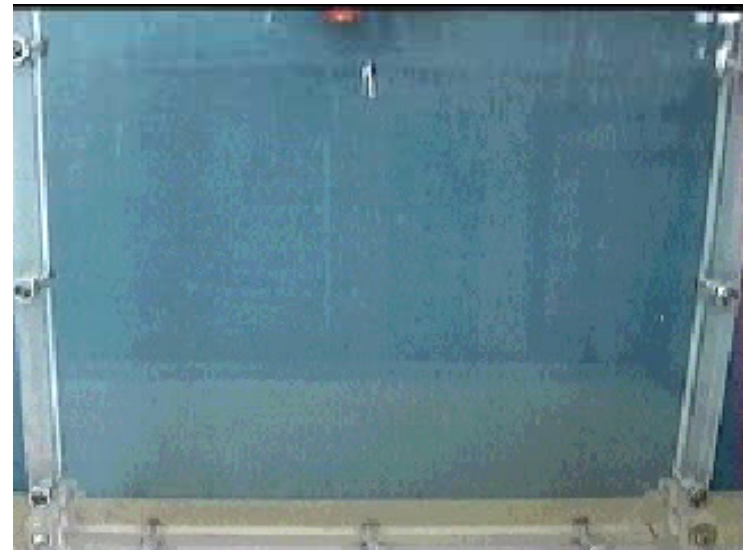
La ségrégation

Expérience : autres sollicitations appliquées à un milieu granulaire de granulométrie contrastée.

Ségrégation en rotation



Ségrégation en tas



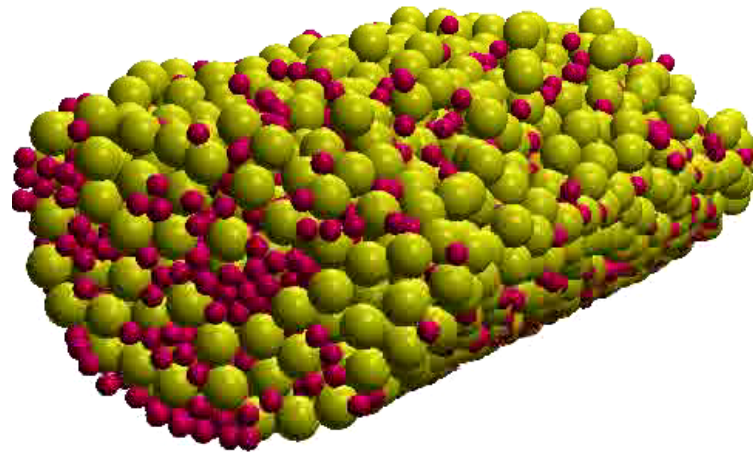
La ségrégation est liée au fort contraste granulométrique. Il est très difficile de mélanger des poudres de granulométrie différentes...

Quelques éléments de caractérisation des poudres

La ségrégation

Expérience : autres sollicitations appliquées à un milieu granulaire de granulométrie contrastée.

Ségrégation en rotation

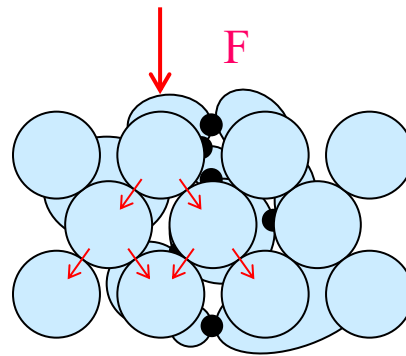


...il est très difficile de séparer des poudres de même granulométrie.

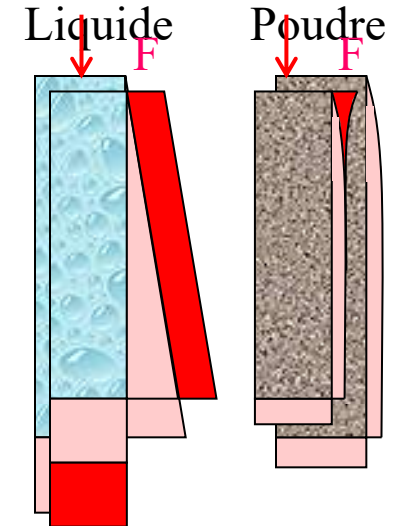
Quelques éléments de caractérisation des poudres

L'effet de voûte

Expérience : lorsqu'on applique une contrainte verticale sur un milieu granulaire, cette contrainte ne se transmet pas exclusivement suivant cette seule direction.



points de contact
des efforts



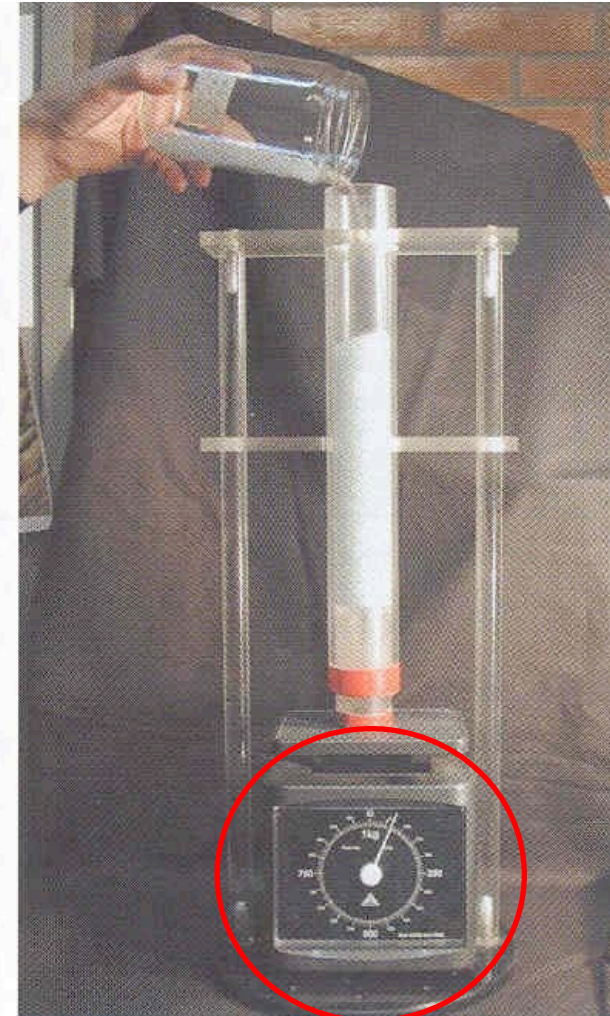
Expérience de Janssen (1895)

Transmission de efforts au point de contact :

⇒ dans une poudre la pression n'est pas hydrostatique

Quelques éléments de caractérisation des poudres

L'effet de voûte



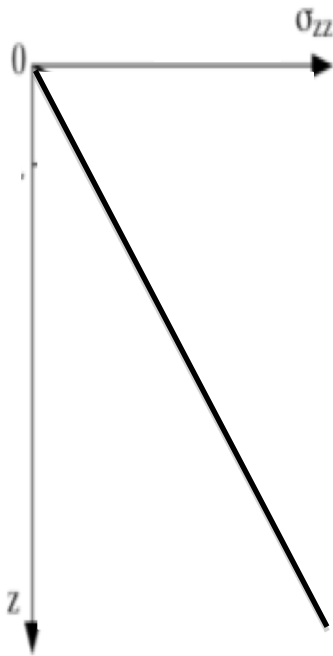
Expérience de Janssen (1895)

Quelques éléments de caractérisation des poudres

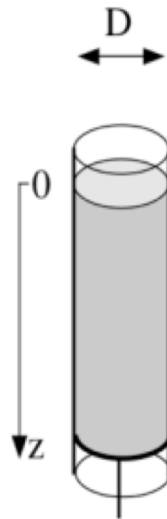
Cas des liquides :

Pression hydrostatique

$$\sigma_{zz} = \rho g z$$



Liquide

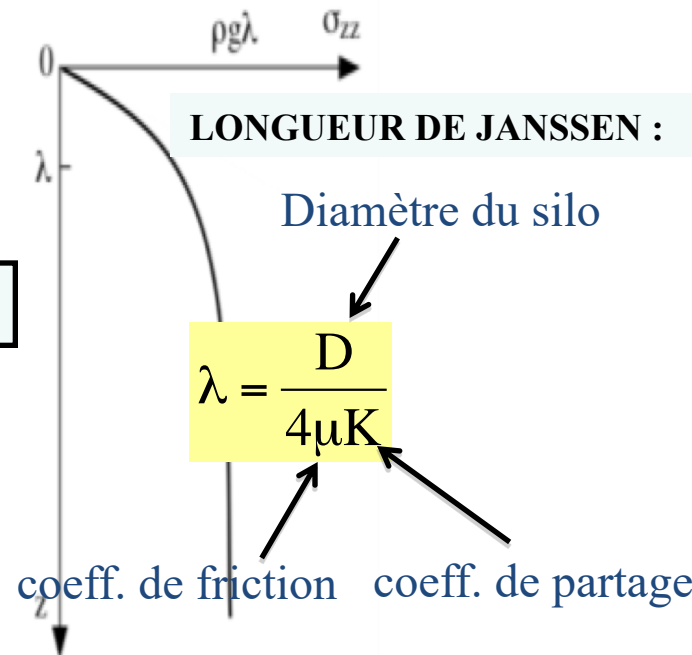


Profil de pression dans un silo rempli de d'eau

Cas des matériaux granulaires :

Loi de Janssen : Répartition des pressions verticales dans un silo rempli de matériau granulaire

$$\sigma_{zz} = \rho g \lambda \left(1 - e^{-\frac{z}{\lambda}}\right)$$



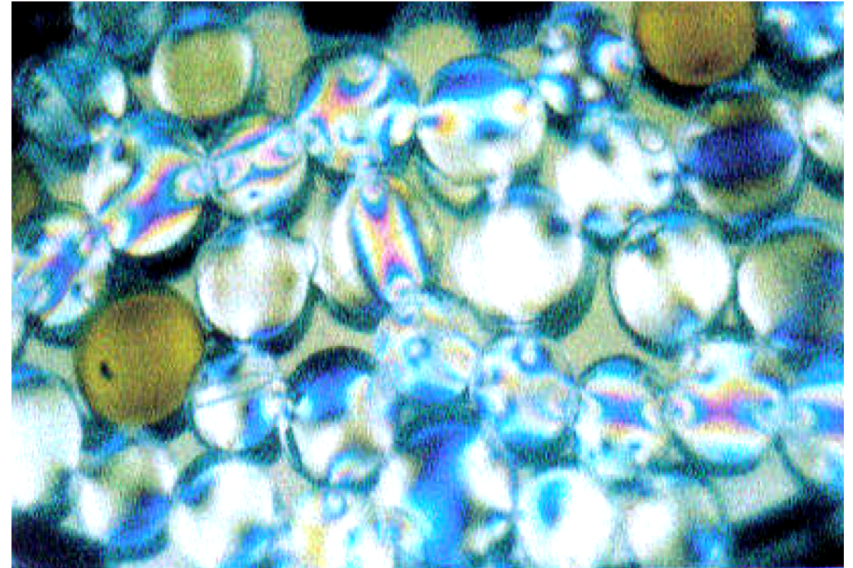
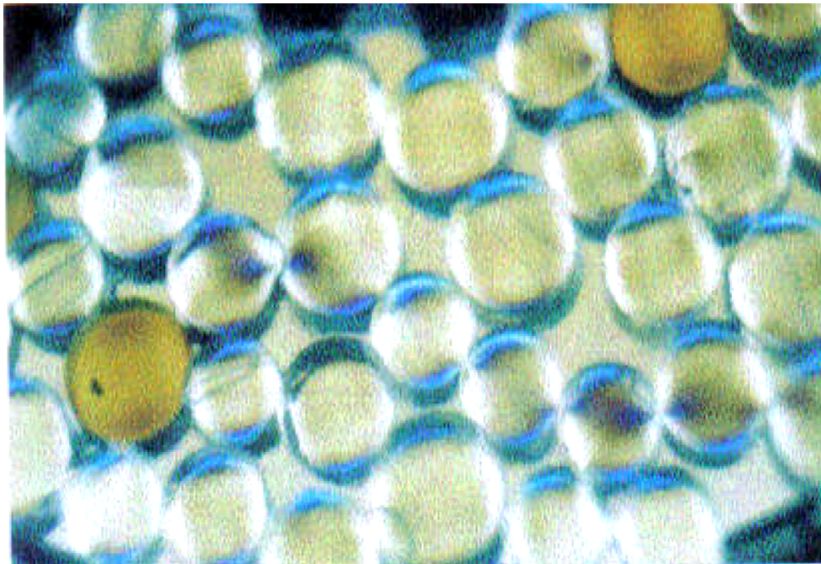
Poudre

Profil de pression dans un silo rempli de matériau granulaire (Loi de Janssen)

Quelques éléments de caractérisation des poudres

L'effet de voûte

Contraintes mécaniques transmises de manière anisotrope : illustration



Expérience de photoélasticimétrie sur un matériau granulaire illustrant la notion de chaîne de force dans un matériau granulaire.

A gauche : en l'absence de contraintes.

A droite : sous contraintes.

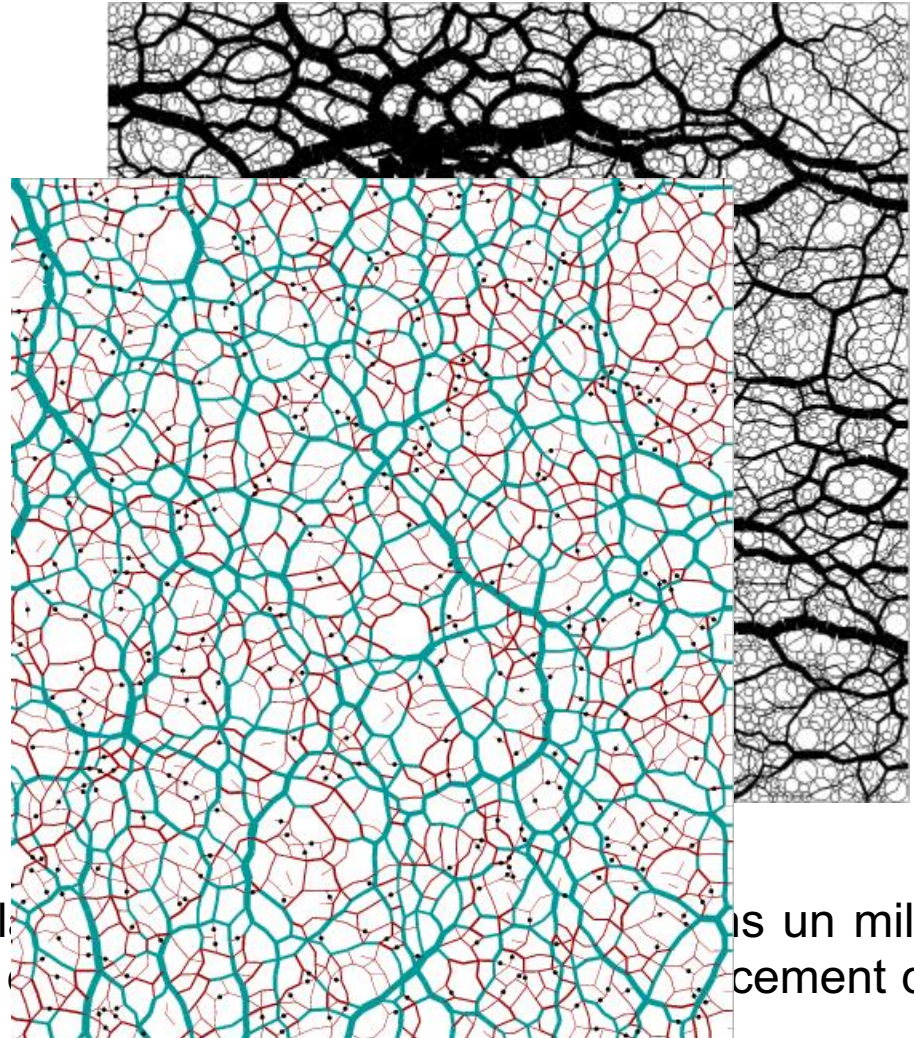
Quelques éléments de caractérisation des poudres

L'effet de voûte

Arches romanes



Lignes de force dans un réseau de contact



Effet Janssen : mise en évidence l'effet de voûte dans un milieu granulaire au repos (blocages)... et l'effet de voûte dans les clepsydres par des sabliers...

Quelques éléments de caractérisation des poudres

La dilatance

Expérience : lors d'une compression uniaxiale les milieux granulaires peuvent augmenter de volume !

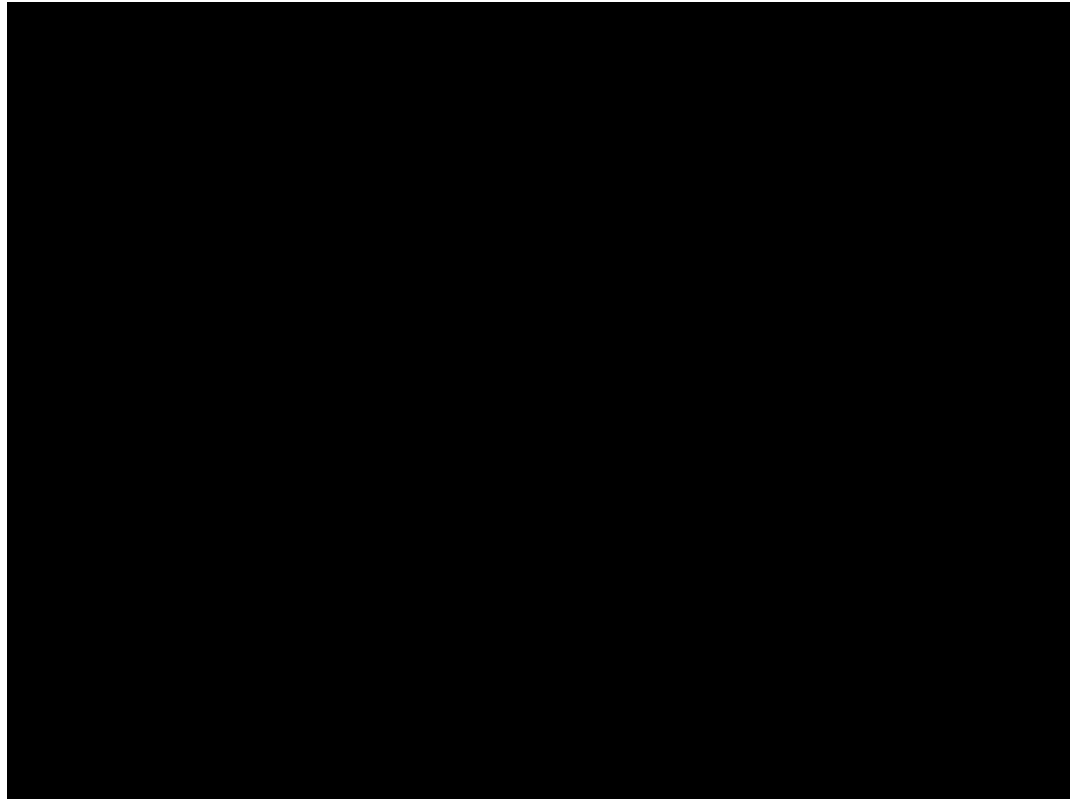


Vous avez dû remarquer en marchant l'été dernier sur du sable mouillé que vos traces de pas paraissent plus sèches que le sable mouillé autour tandis que si on marche sur une éponge mouillée, l'eau sort !

Quelques éléments de caractérisation des poudres

La dilatance

Expérience : lors d'une compression uniaxiale les milieux granulaires peuvent augmenter de volume !

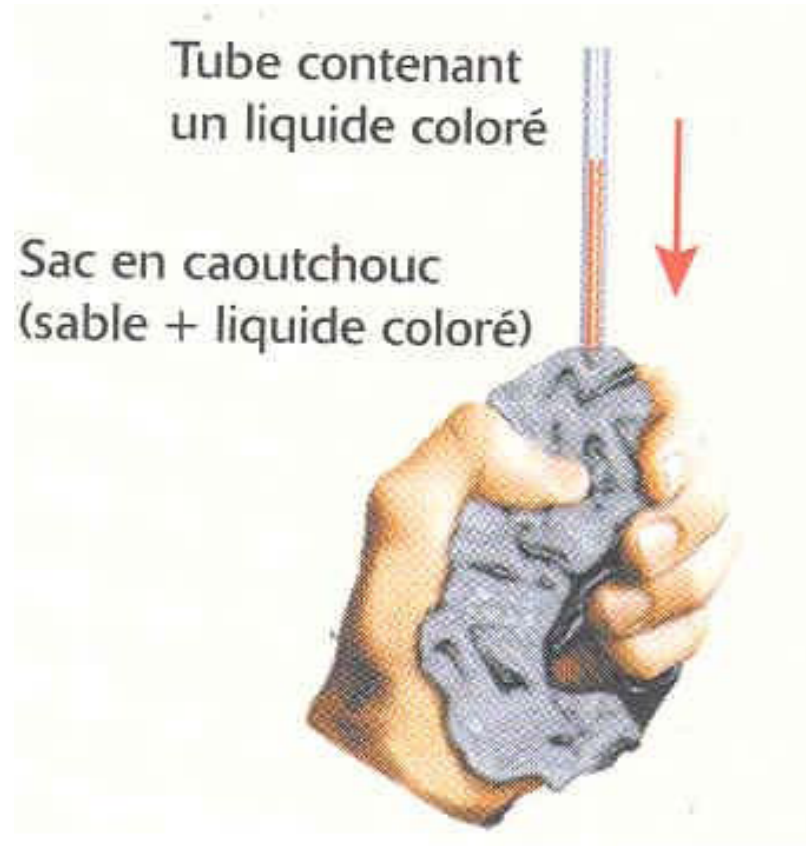


Vous avez dû remarquer en marchant l'été dernier sur du sable mouillé que vos traces de pas paraissent plus sèches que le sable mouillé autour tandis que si on marche sur une éponge mouillée, l'eau sort !

Quelques éléments de caractérisation des poudres

La dilatance

Expérience : lors d'une compression uniaxiale les milieux granulaires peuvent augmenter de volume !



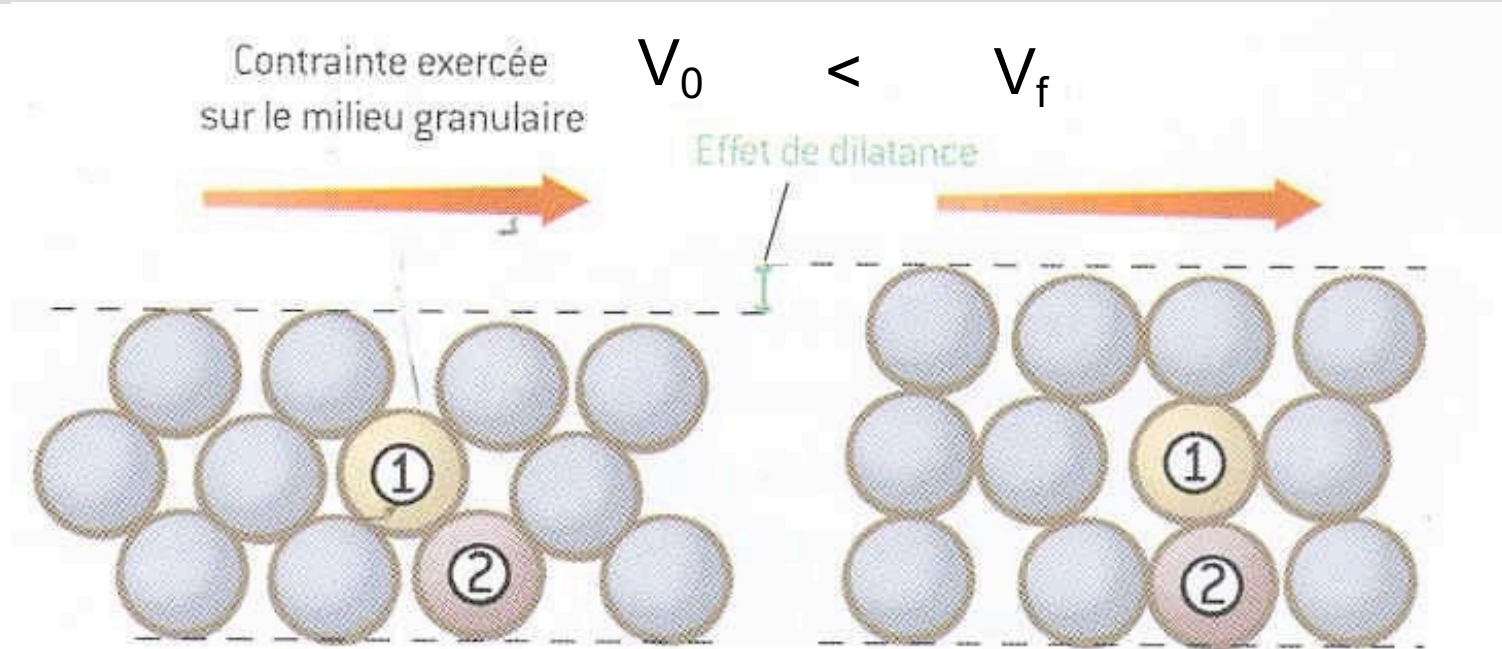
Expérience de Reynolds

Quelques éléments de caractérisation des poudres

La dilatance

C'est Reynolds, à l'origine de nombreuses études sur les fluides qui a constaté et expliqué ce phénomène très intrigant :

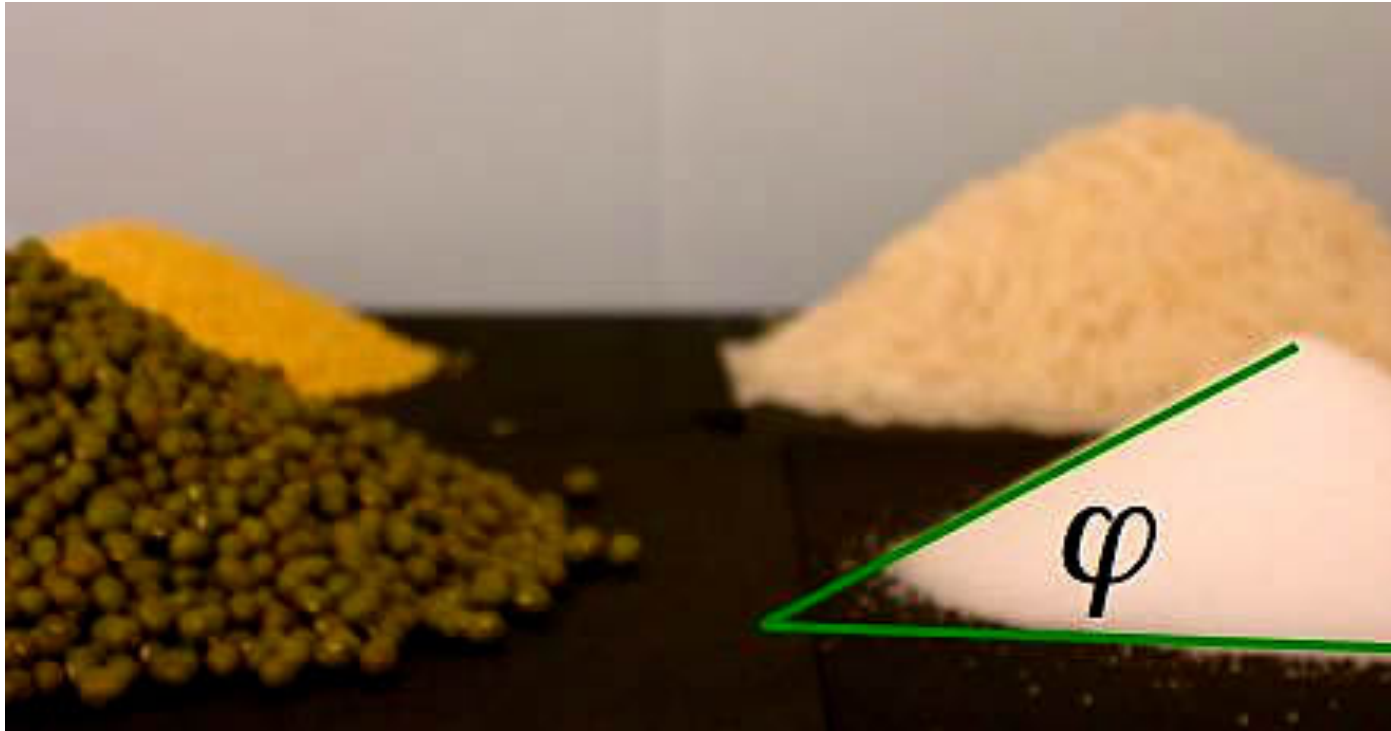
« Pour déformer un tas de grains, il faut le dilater pour que des vides se forment (et ce d'autant plus que le milieu est tassé au départ). »



Encore un exemple : prenez un paquet sous vide de cacahouètes ou de café et essayez de le plier ! Si vous l'ouvrez un peu par contre, l'intromission d'air entre les grains va permettre le mouvement des grains.

Quelques éléments de caractérisation des poudres

Une surface libre caractérisée par un angle



Angle de « talus » ou angle de repos

Quelques éléments de caractérisation des poudres

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement

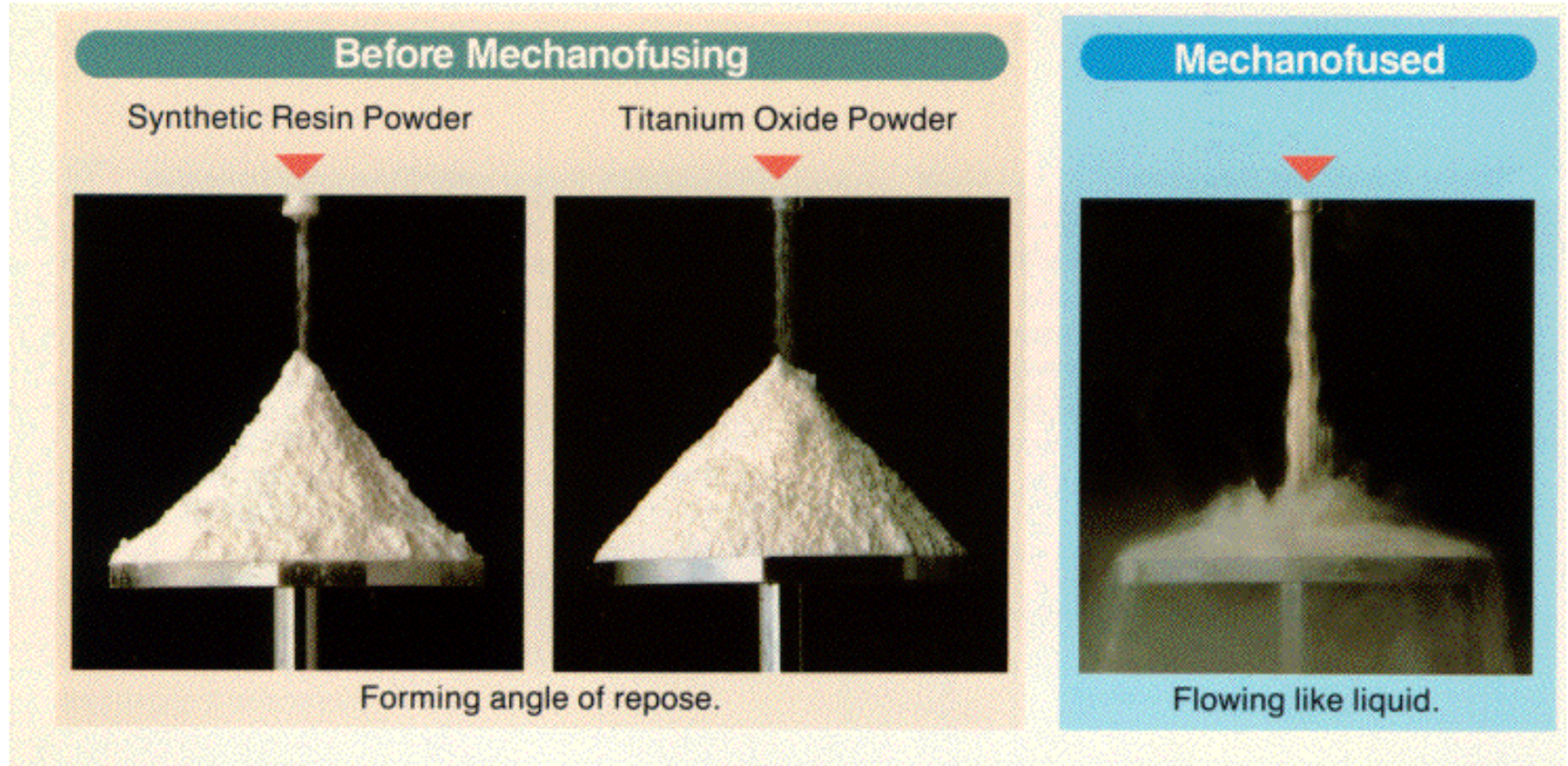


Illustration de la coulabilité

Ecoulement, tassement et compression des poudres sèches



Ecoulements, tassements, ...

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement

Le pro
déstock



rs du



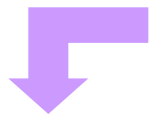
Pour u
de pro

up

➔ Notion de seuil d'écoulement (blocages)

Écoulements, tassements, ...

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement



Deux types majeurs d'écoulement :



■ L'écoulement en noyau :

c'est l'écoulement qui pose beaucoup de problème.

Seule la poudre située au centre du silo s'écoule. Il en résulte la formation d'arches cohésives et de zones mortes proches des parois.

Du fait de la présence des zones mortes, les temps de séjour des produits sont très variables.

■ L'écoulement en masse :

c'est l'écoulement généralement recherché où toute la poudre s'écoule uniformément (excepté dans la section convergente du silo où le flux est plus important au centre).

Écoulements, tassements, ...

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement



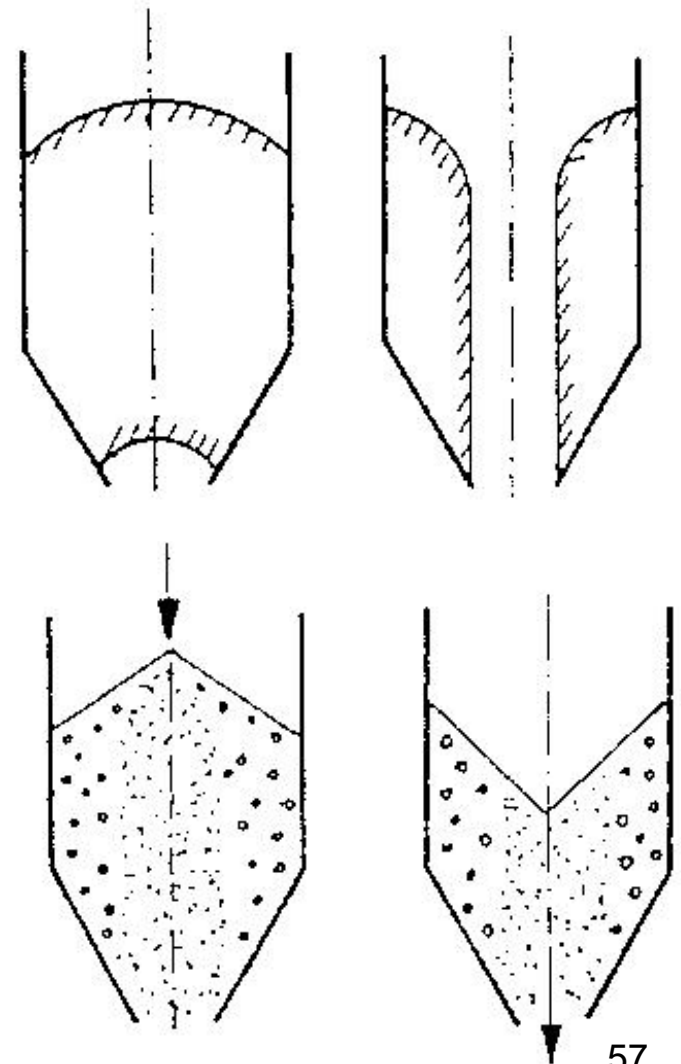
Transports des poudres

Écoulements, tassements, ...

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement

Problèmes d'écoulement dans un silo

- Formation de voûtes
- Formation de cheminées
- Écoulement irrégulier
- Submergence
- Ségrégation
- Temps de résidence



Ecoulements, tassements, ...

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement

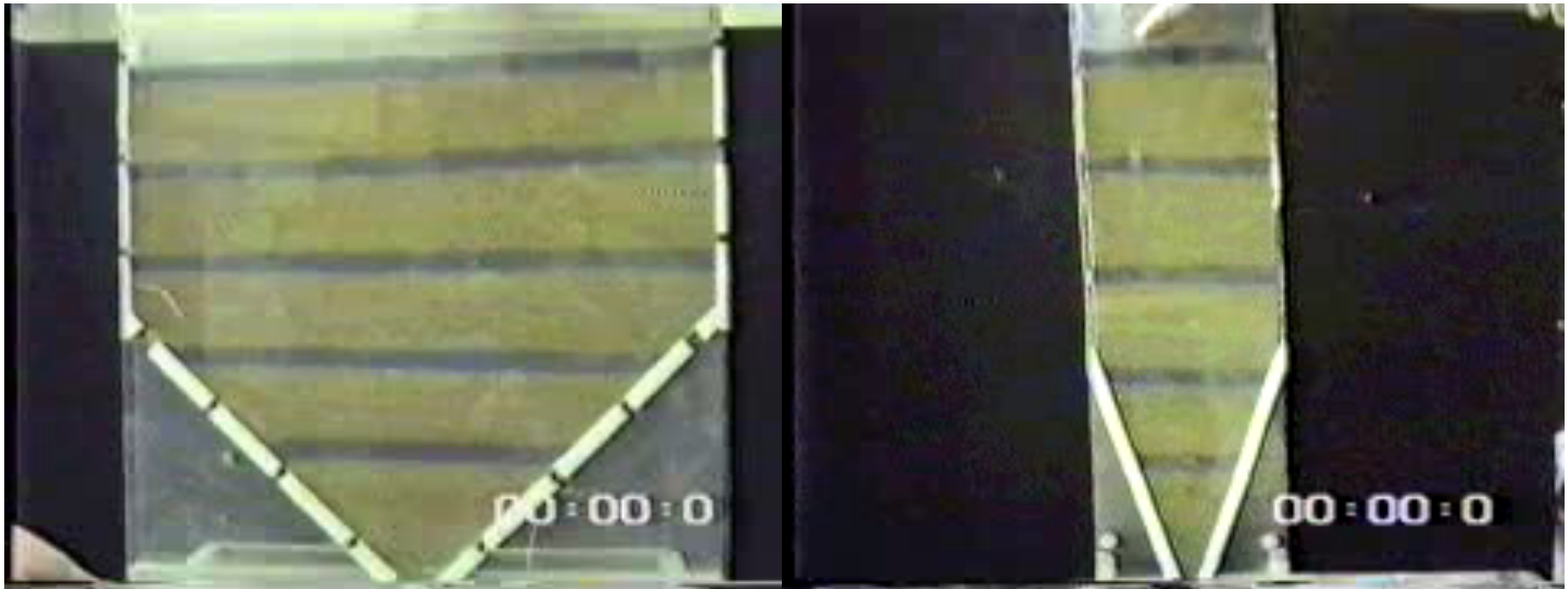


Deux types majeurs d'écoulement :



■ L'écoulement en noyau :

■ L'écoulement en masse :



Écoulements, tassements, ...

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement

Deux types majeurs d'écoulement :

■ L'écoulement en noyau :

■ L'écoulement en masse :

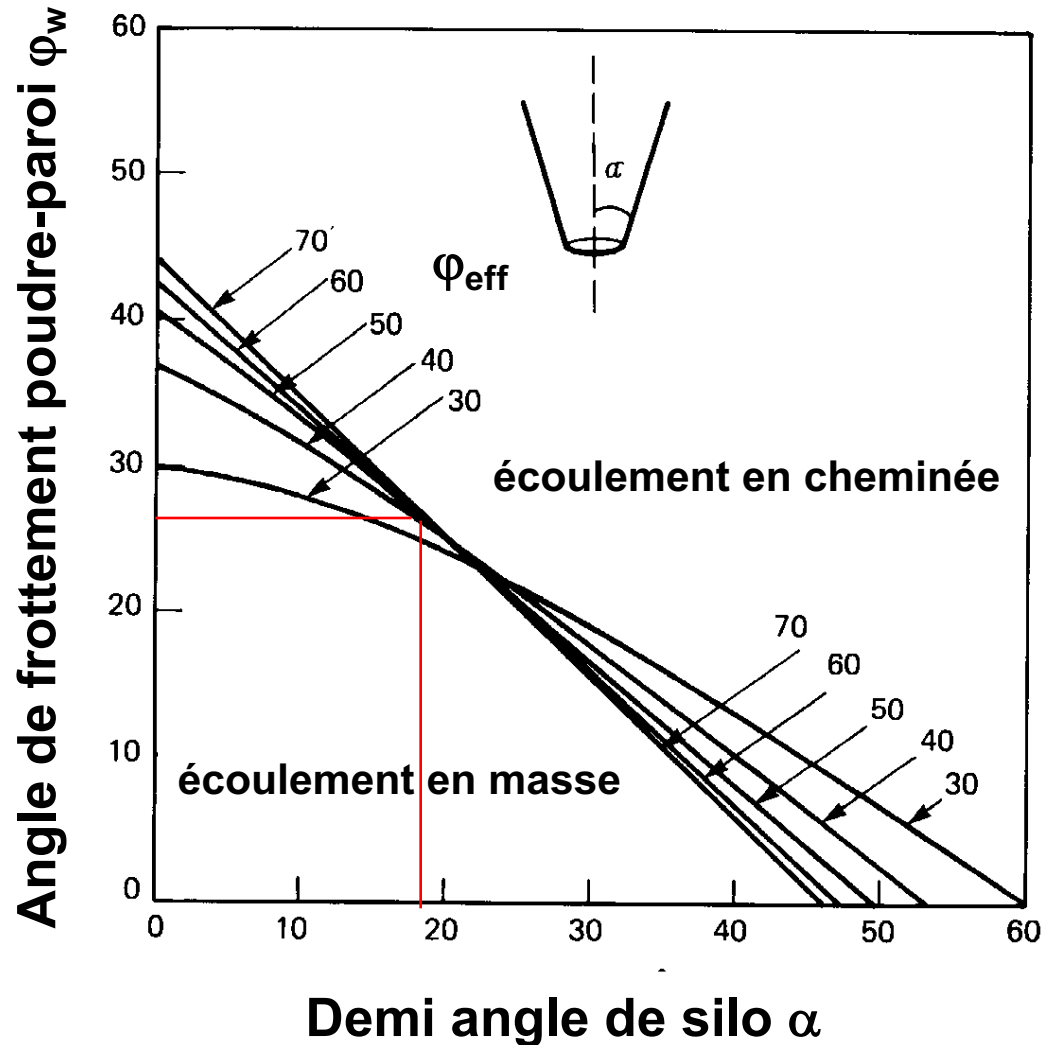


Écoulements, tassements, ...

Implication de ces phénomènes sur l'écoulement

La transition entre écoulement en masse et écoulement en cheminée dépend des la valeur de trois paramètres:

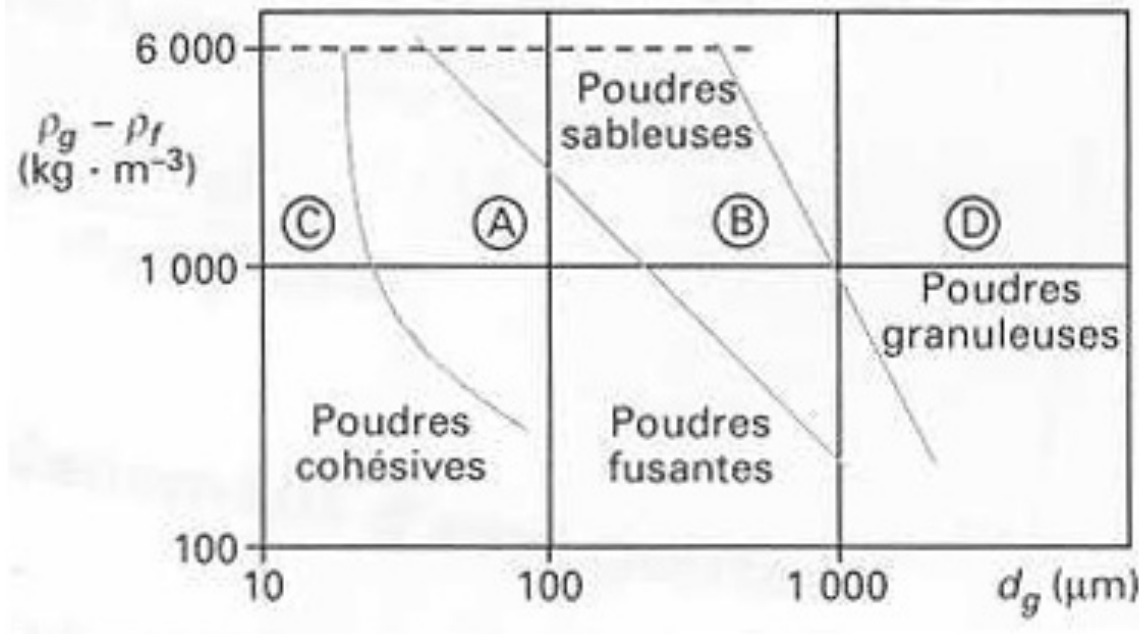
- le demi-angle du silo α ,
- l'angle de frottement poudre-paroi φ_w ,
- l'angle de frottement effectif φ_{eff} .



Transition entre écoulement en masse et écoulement en cheminée

Ecoulements, tassements, ...

Un des exemples de l'intérêt de la caractérisation physique des poudres



Le diagramme de Geldart

Poudre A. poudres fines (20 à 150 μm) et légères (moins de 1500 Kg/m^3) → fluidisation aisée

Poudre B. poudres de taille moyenne entre 80 et 800 μm et de masse volumique de 1500 à 4000 Kg/m^3 → fluidisation facile

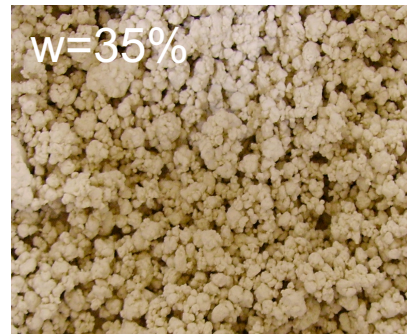
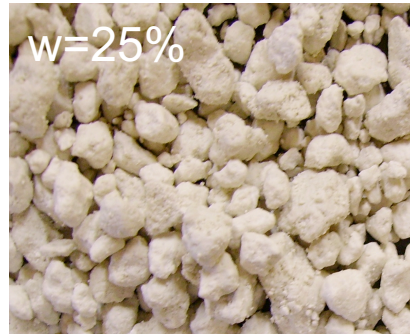
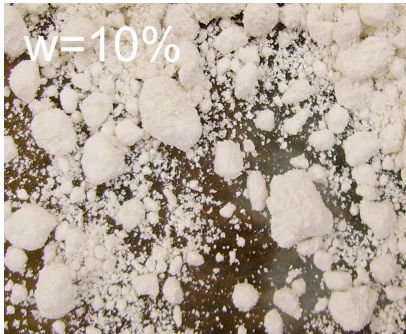
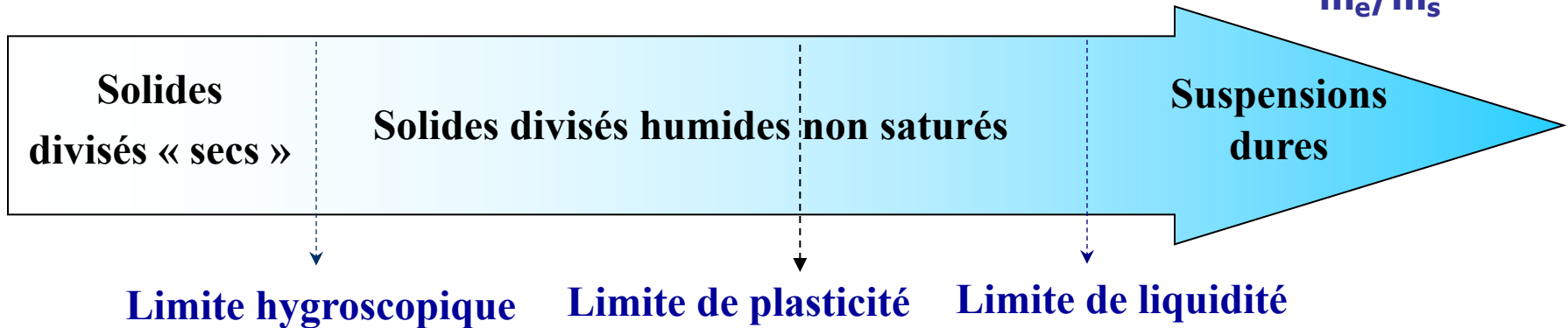
Poudre C. poudres très fines < 30 très cohésives → difficiles à fluidiser

Poudre D. grains et agglomérats, taille particulière importante et produit dense¹

Agglomération, structuration sous contraintes

Implication de ces phénomènes sur les mélanges

En fonction des proportions respectives des différentes phases : **teneur en liquide** $\xrightarrow{m_e/m_s}$



Première étape de la démarche : situer les transitions hydriques, propres au mélange poudre /liquide réalisé 62

Agglomération, structuration sous contraintes

Un exemple industriel de mise en œuvre : **le couscous**



Durum wheat grains



Semoule

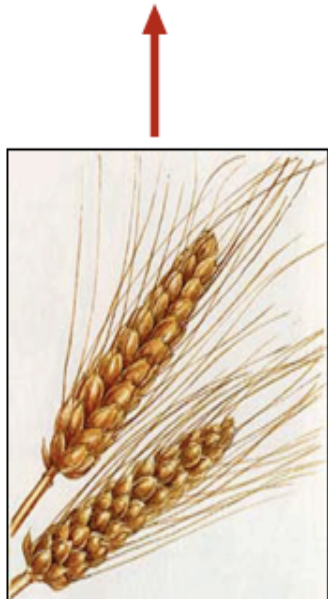
Copyright © 2004 Food & Agriculture



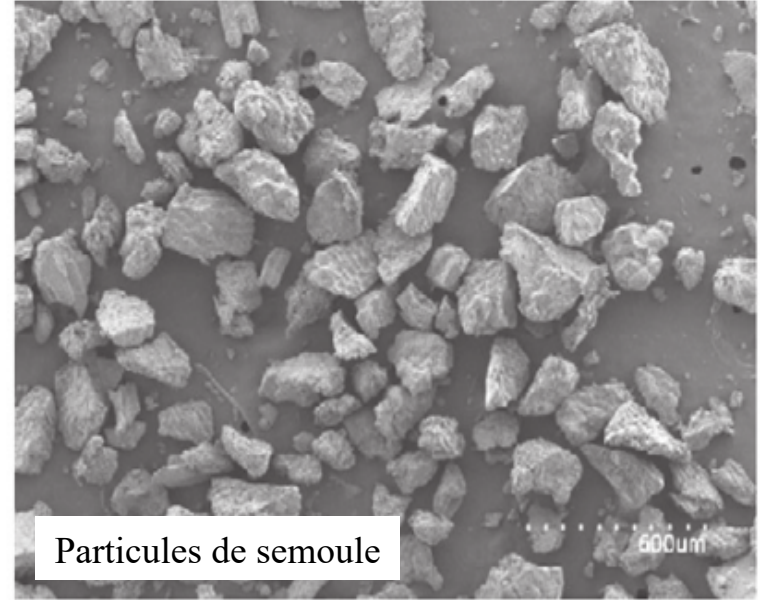
*Graine de
couscous*



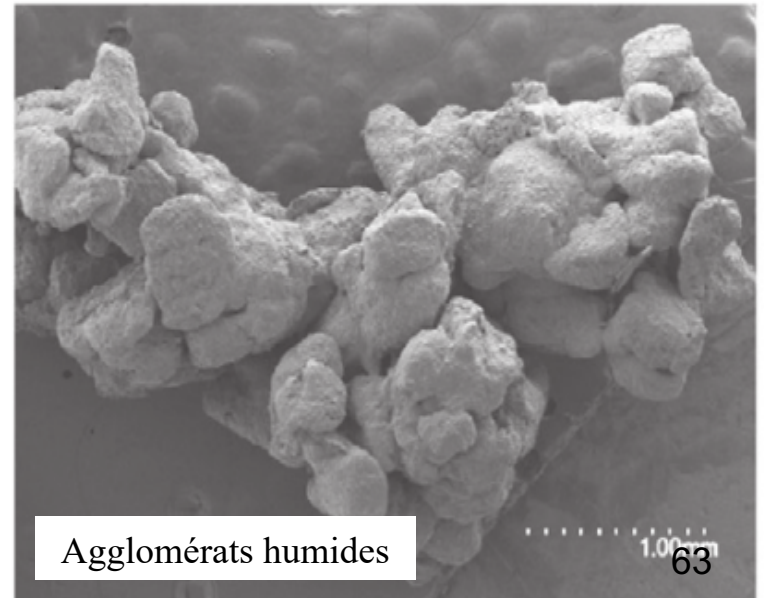
Couscous



Durum wheat



Particules de semoule



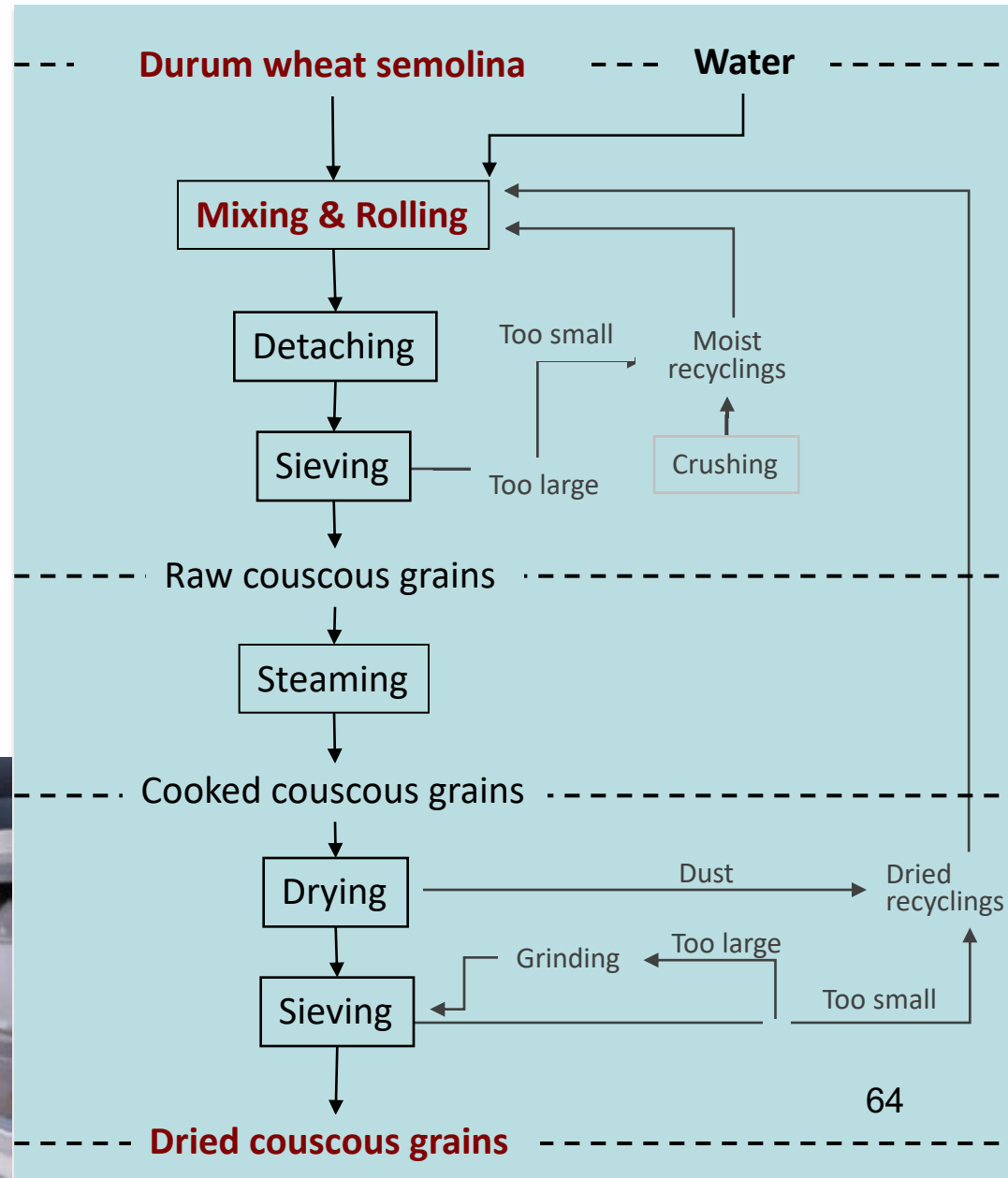
Agglomérats humides

Agglomération, structuration sous contraintes

Filière d'élaboration



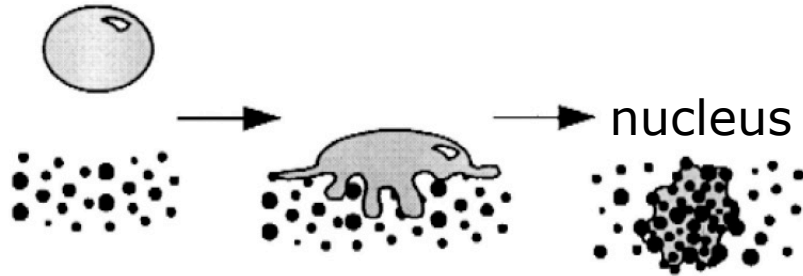
Traditional couscous manufacture



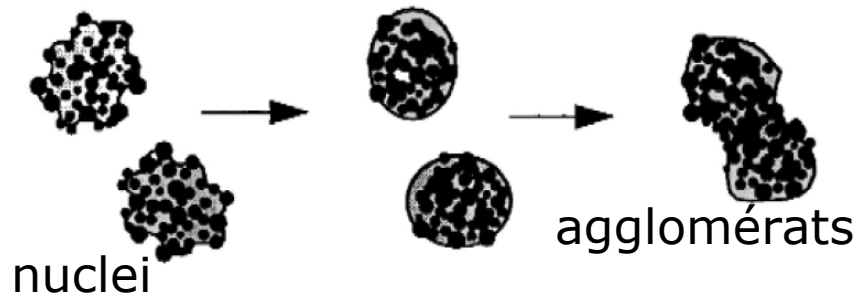
Agglomération, structuration sous contraintes

Processus d'agglomération

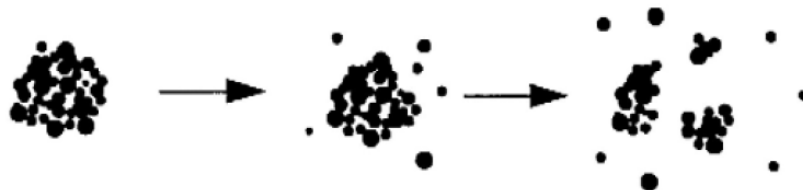
- Mouillage et nucléation



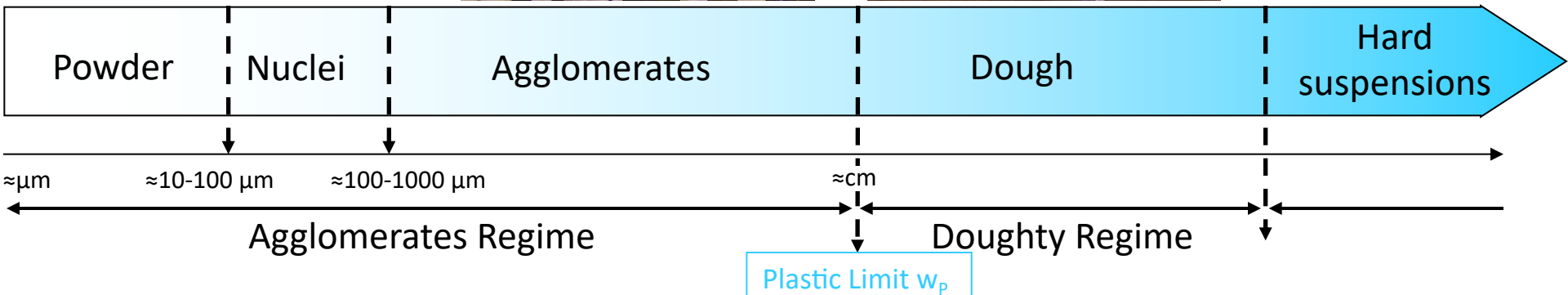
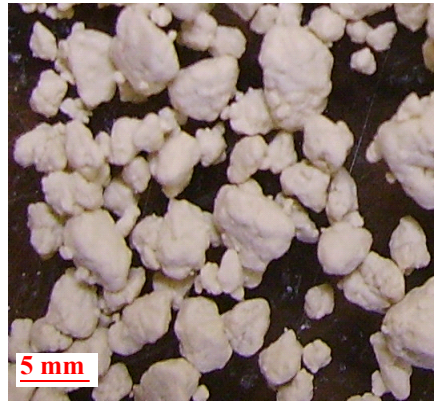
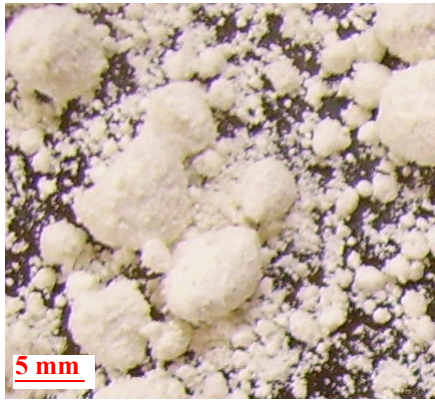
- Consolidation et croissance



- Rupture et usure



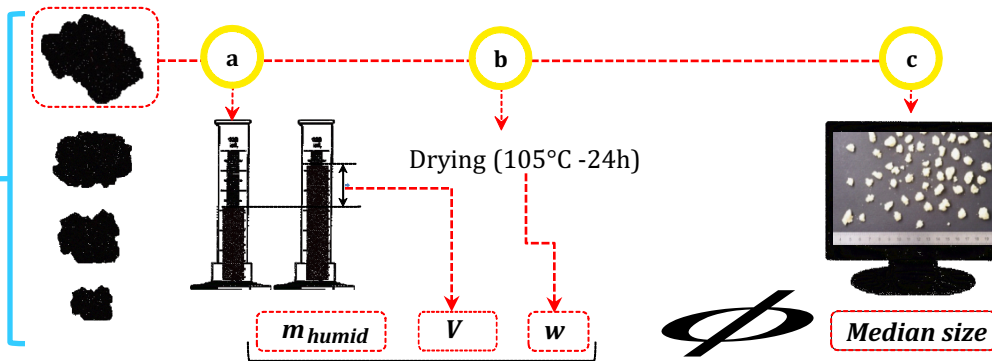
Agglomération, structuration sous contraintes



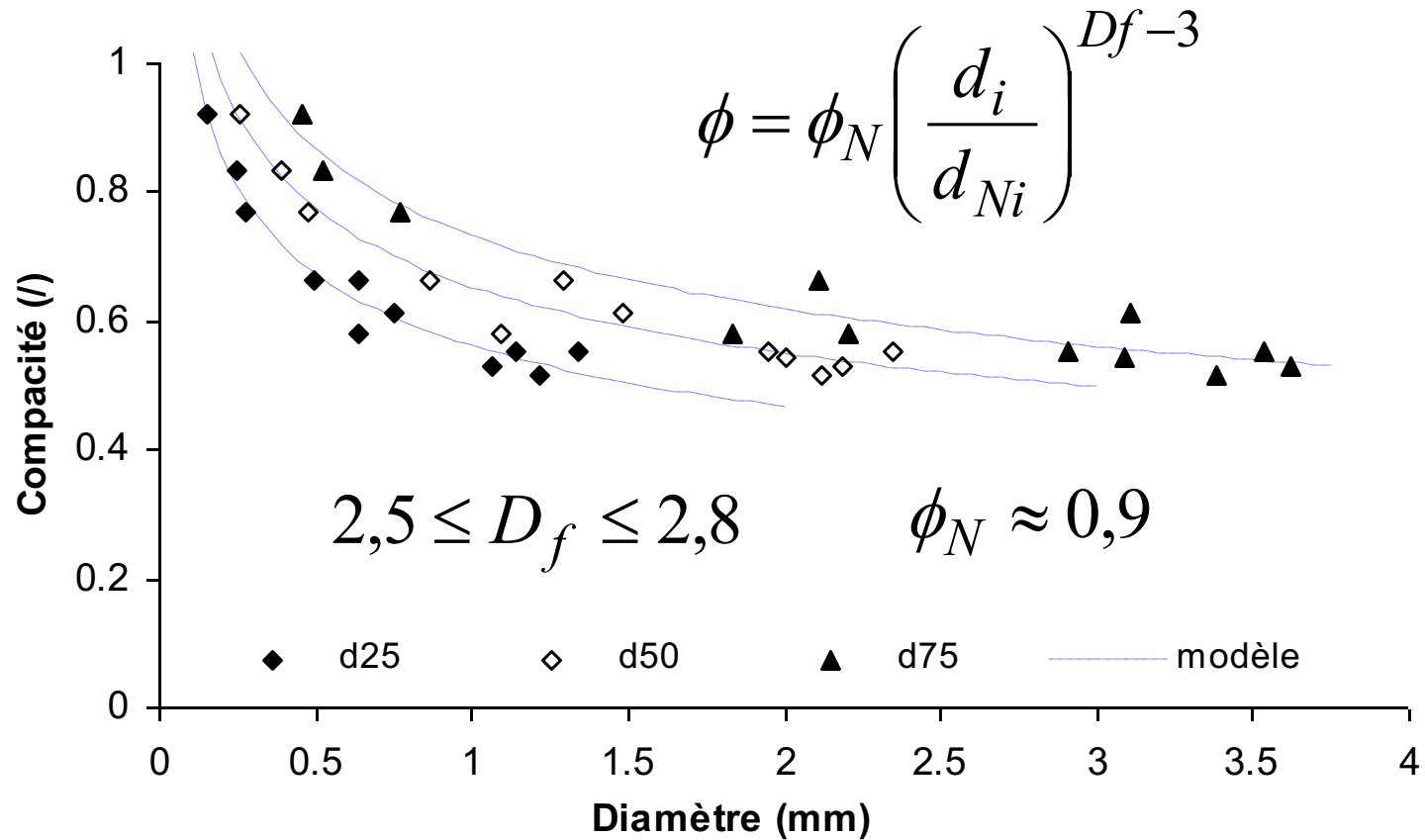
Mesure de la texture et des dimensions



KNEADING

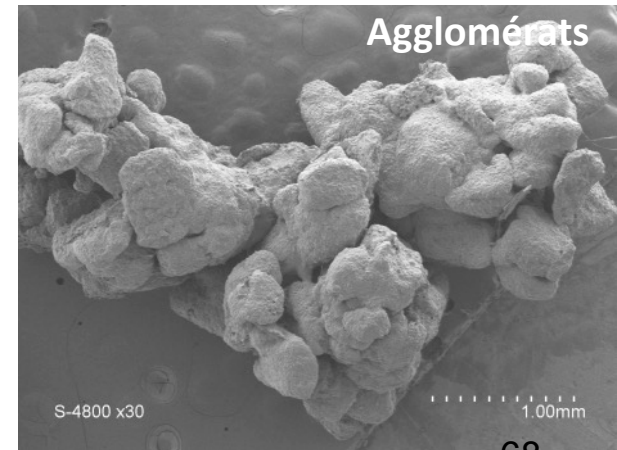
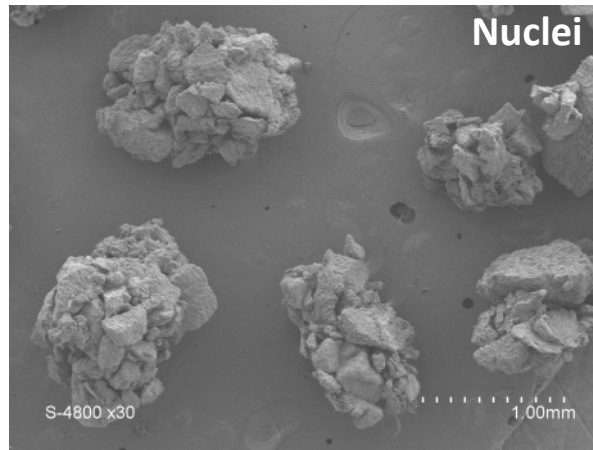
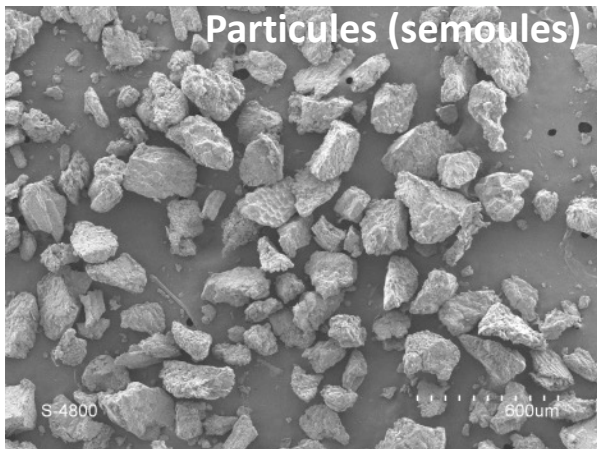
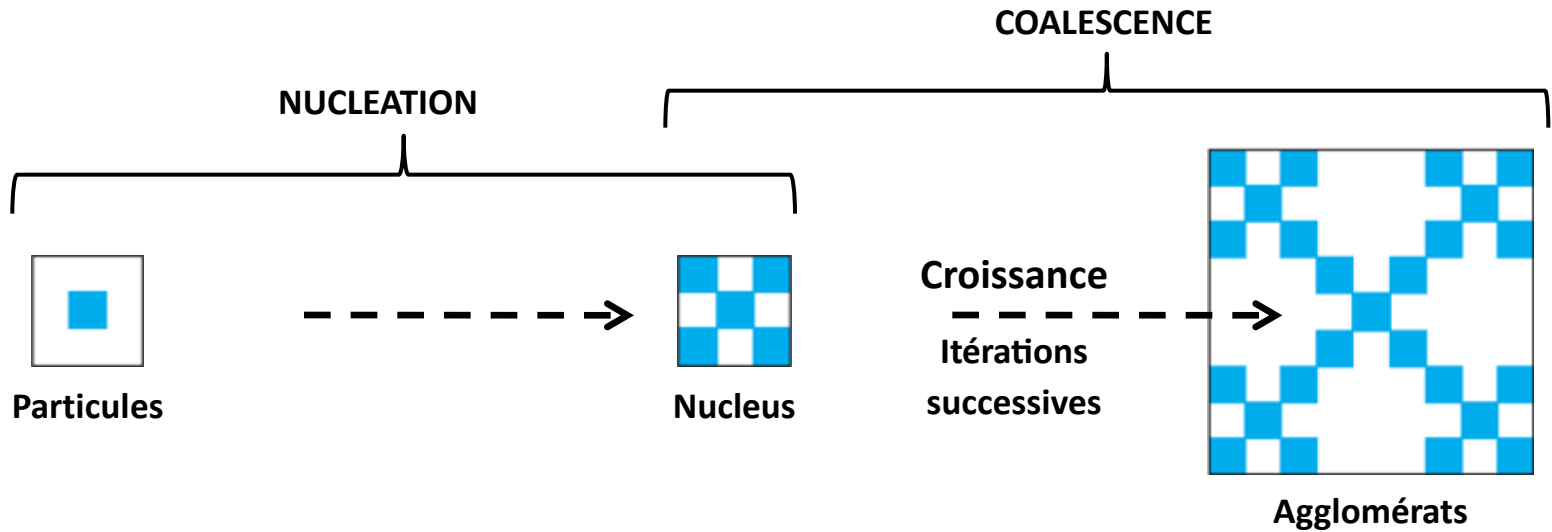


Agglomération, structuration sous contraintes



Agglomération, structuration sous contraintes

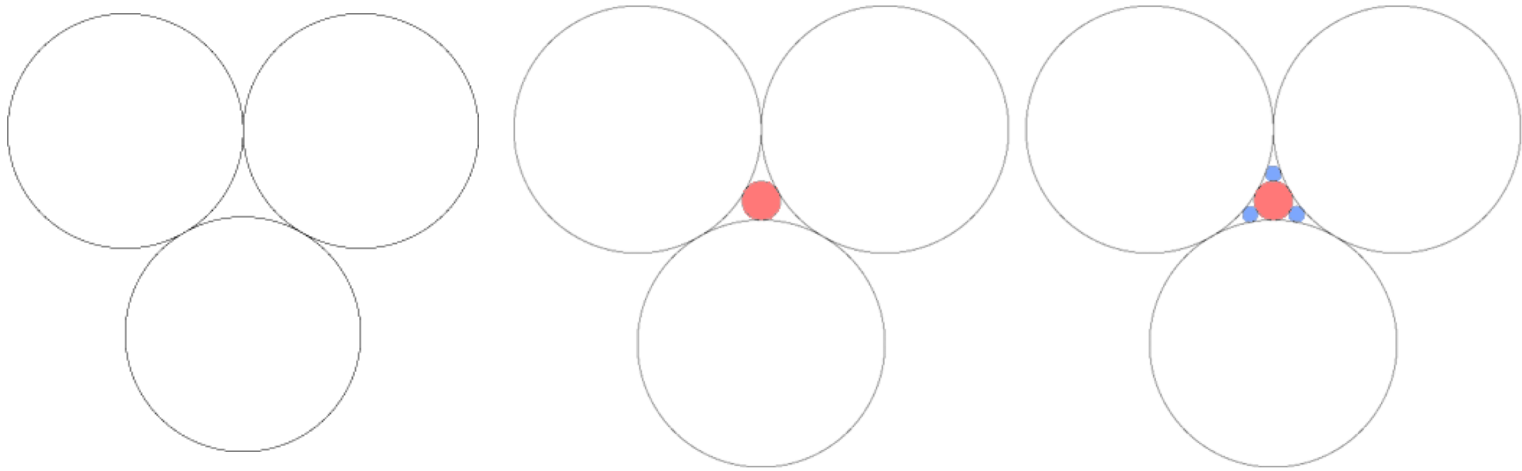
Modèle de croissance fractale



Agglomération de la semoule de blé dur

Agglomération, structuration sous contraintes

Un exemple remarquable : l'empilement apollonien ➔ structure fractale



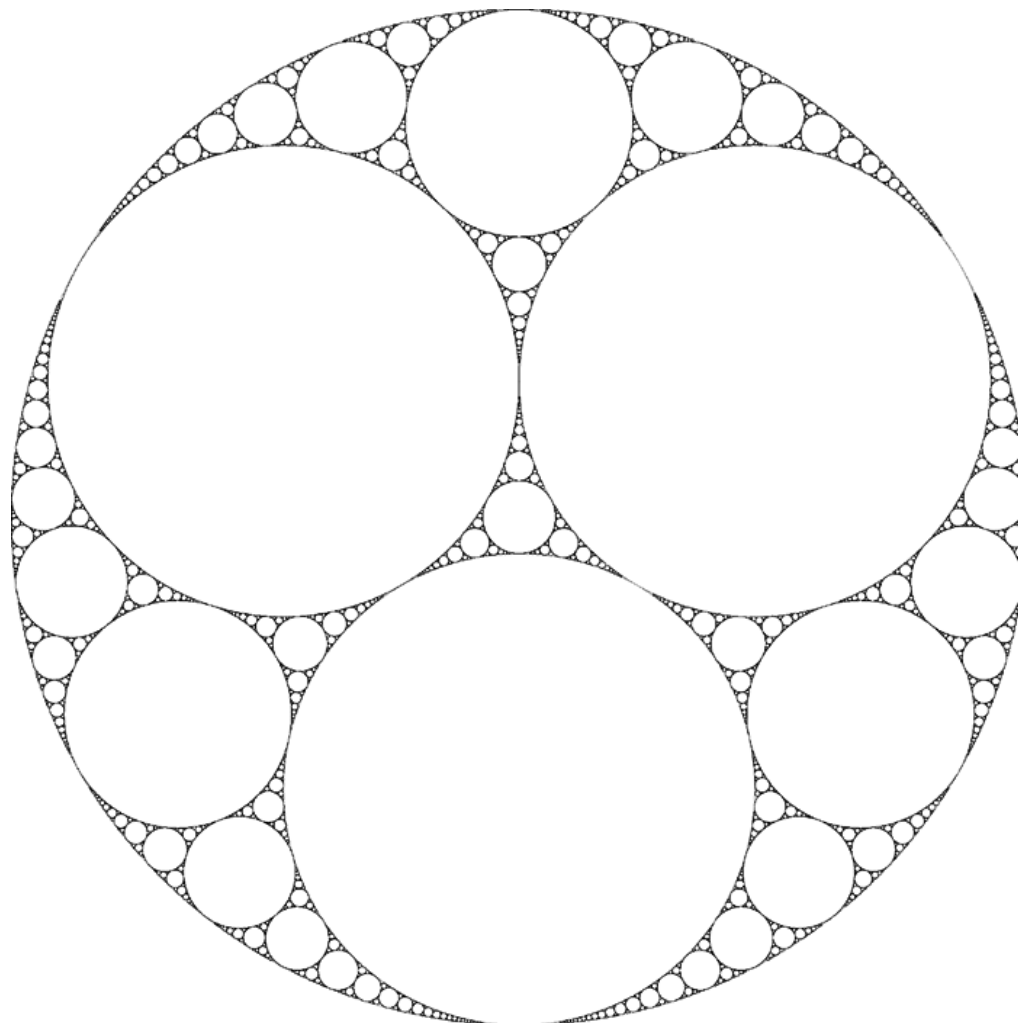
Triangle de Sierpinski



Flocon de Koch

Agglomération, structuration sous contraintes

Un exemple remarquable : l'empilement apollonien ➔ structure fractale

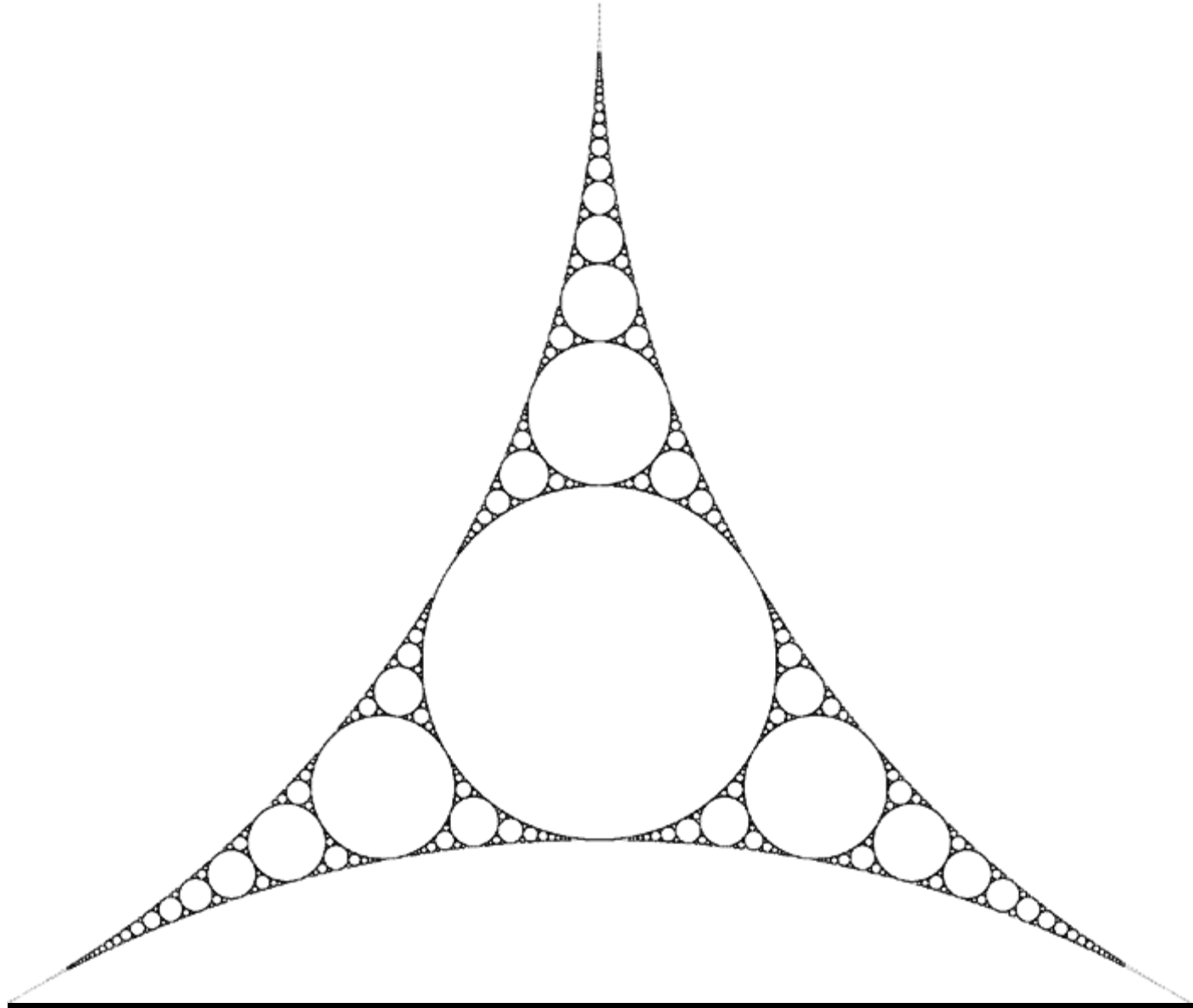


Exemple d'application : les bétons hautes performances

Agglomération, structuration sous contraintes

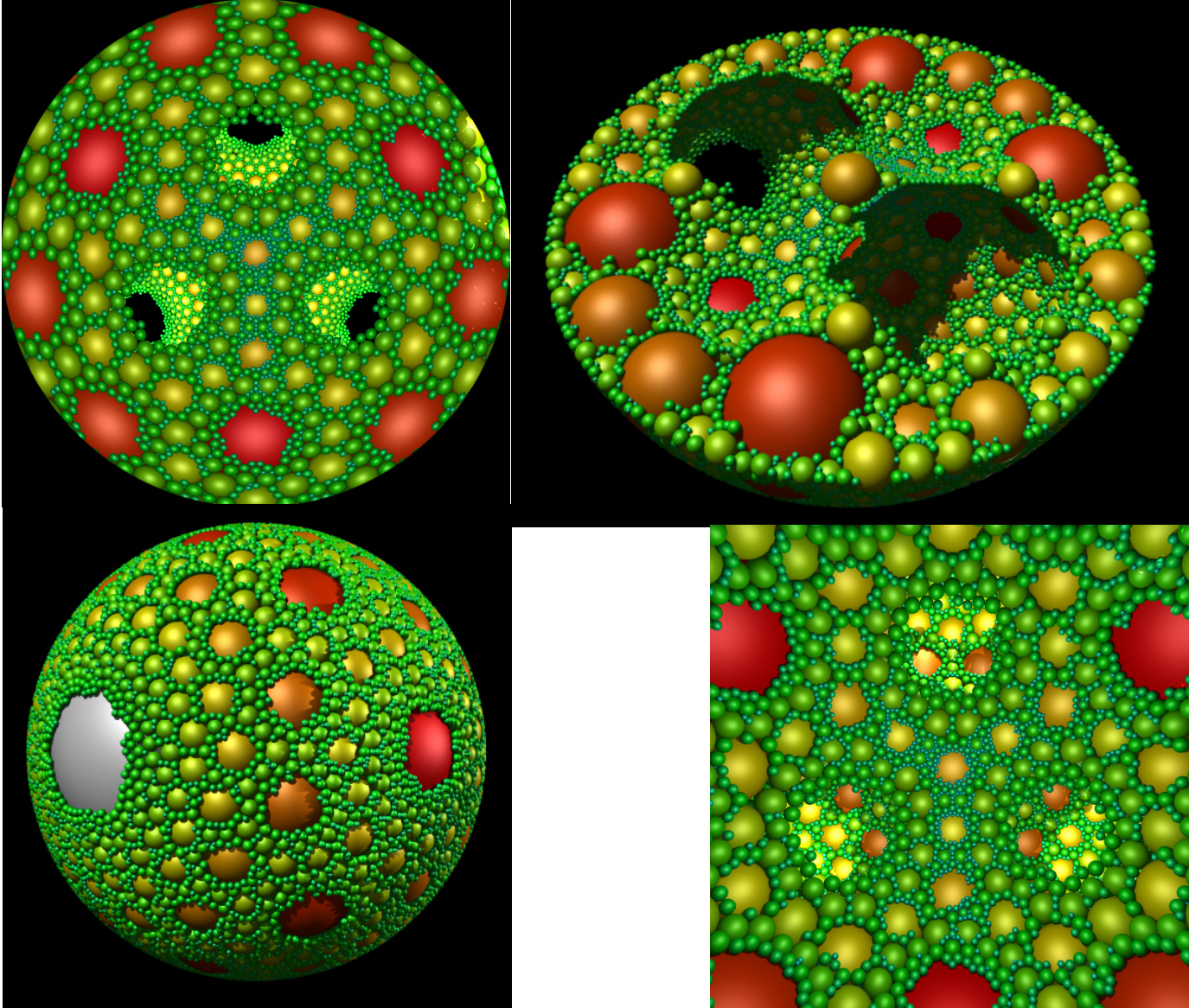
Un exemple remarquable : l'empilement apollonien ➔ structure fractale

Détails 2D



Agglomération, structuration sous contraintes

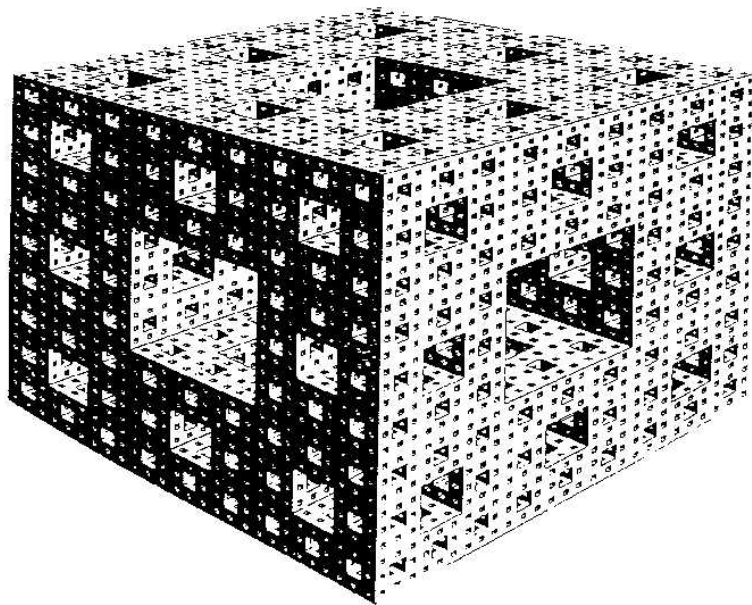
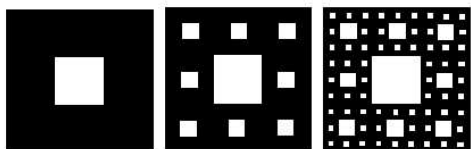
Un exemple remarquable : l'empilement apollonien \rightarrow structure fractale



Détails 3D

Agglomération, structuration sous contraintes

Implication de ces phénomènes sur l'élaboration



Eponge de Menger

- ✦ Elaboration de matrices granulaires à structure et texture contrôlées



Exemple de l'agglomération (Rondet, 2008)

Quelques éléments de physique et de caractérisation des poudres

Merci de
votre
attention

