

## Étude sur le bourrage



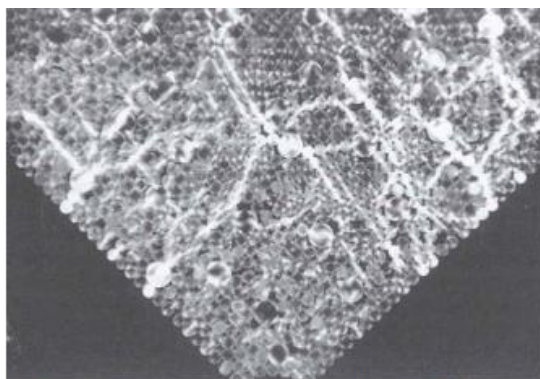
*Écoulement de grains dans un sablier*

### Exemple du sablier :

Le diamètre de l'orifice doit être grand devant la taille des grains afin d'empêcher les blocages, et petit devant la hauteur de sable dans le réservoir supérieur.

Dans un sablier, les grains présents dans l'orifice subissent seulement la pression des couches situées juste au-dessus d'eux. Le poids des grains plus éloignés est, de fait, redirigé vers les parois par des chaînes de forces entre grains : c'est un « effet de voûte ». Ainsi, c'est uniquement lorsque le réservoir est quasi vide que la pression sur les grains dans l'orifice diminue ce qui diminue le débit aussi.

Il est possible de visualiser la distribution instantanée des forces entre grains dans un sablier modèle grâce à une technique astucieuse, la photoélasticimétrie. C'est une technique optique utilisant les propriétés de la lumière polarisée et de la réfraction. Elle permet de visualiser les contraintes exercées au sein d'un milieu transparent.



*Visualisation par photoélasticimétrie d'un empilement de disques en plexiglas, s'écoulant dans une trémie simulant un sablier. Le dispositif est placé entre deux polariseurs croisés : les disques fortement contraints apparaissent clairs et forment des chaînes continues de forces qui vont jusqu'aux parois. Les cylindres non contraints apparaissent en foncé.*

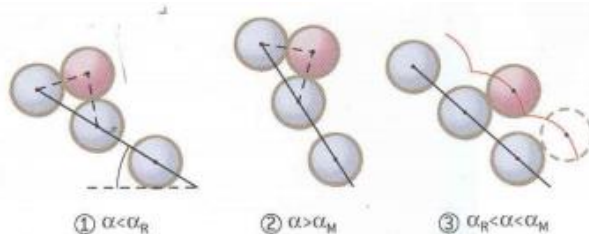
Le poids des grains situés assez loin de l'orifice est renvoyé en permanence vers les parois latérales par un réseau continu de lignes de forces. Ce réseau évolue en permanence lors de l'écoulement du sable, si bien que, dans certains cas, des voûtes stables se forment et provoquent un blocage complet. On observe facilement ce blocage en tentant de vider du riz par un entonnoir étroit.

### Le cas des silos :

Souvent étudié par les ingénieurs depuis les années 1890, le silo est présent à travers la France. Il est étudié pour optimiser sa capacité de stockage de différentes matières. La seconde raison pour laquelle les silos ont été prisés pour l'étude des milieux granulaires est que la manifestation des effets de voûte dans un silo est amplifiée par la présence des parois. L'expérience pour mettre en évidence ces effets de voûte est la suivante : on remplit un silo avec une masse  $M_{versée}$  de grains, c'est la masse versée. Le fond du silo est un piston indépendant des parois. Celui-ci permet de mesurer la masse  $M_{pesée}$  qui pèse sur le fond du silo. Si l'on effectuait ces mesures avec un fluide, on trouverait bien entendu que les deux masses sont les mêmes. Avec des grains, la masse  $M_{pesée}$  n'est qu'une fraction de la masse des grains contenus dans le silo, une masse apparente. Cela signifie que le poids des grains est en partie supporté, ou écranté, par les parois du silo.

Plus précisément, si l'on trace  $M_{pesée}$  en fonction de  $M_{versée}$ , on s'aperçoit que lorsque la hauteur des grains dans le silo devient comparable à quelques diamètres de celui-ci,  $M_{pesée}$  « sature » et devient indépendante de  $M_{versée}$ . Autrement dit, toute surcharge imposée à un silo, disons, trois ou quatre fois plus haut que large n'affectera pas le fond du silo mais sera au contraire supportée entièrement par les parois. Cet effet d'écrantage se comprend bien en termes de voûtes : les chemins de contrainte (ou, par extension, les voûtes) qui propagent le poids des grains ne sont pas verticaux mais sont au contraire déviés vers les parois du silo et, par friction, y transfèrent une partie du poids qu'ils charrient.

En tapant régulièrement sur le tube, les grains se réorganisent pour diminuer les espaces vides. On conçoit bien que cela sera facile au début. Par la suite, cela sera de plus en plus difficile car la quantité d'espaces vides diminue progressivement. On comprend ainsi que l'opération va prendre de plus en plus de temps, c'est-à-dire que la vitesse du tassement va diminuer au cours du processus.



*Modélisation des deux angles d'un talus de grains par le déplacement d'une bille (en rose) sur une surface rugueuse, constituée d'une rangée de cylindres (en gris) d'axe horizontal.*

Aux faibles inclinaisons de la rangée (cas 1), la bille est immobile et dans un état stable. Aux fortes inclinaisons, elle descend continûment le long de la chaîne sans qu'il soit nécessaire de la pousser (cas 2). Pour un angle d'inclinaison plus faible mais supérieur à l'angle de repos  $\alpha_R$  (cas 3), la bille continue sa course une fois lancée, à condition donc de lui avoir communiqué une énergie cinétique initiale.

Les milieux granulaires naturels sont des mélanges de grains de caractéristiques (taille, forme ou rugosité) différentes : en s'écoulant sur une pente, ces grains auront tendance à se séparer, même si le mélange est initialement homogène. C'est ainsi qu'on retrouve les plus gros cailloux au pied des tas de gravier ou des éboulis.

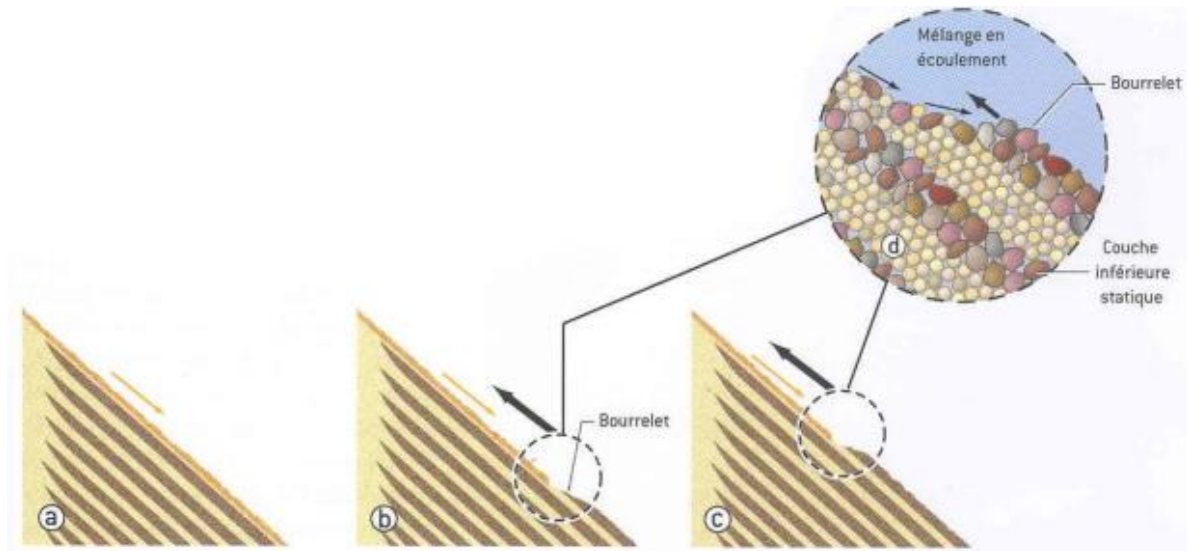
L'expérience de la figure suivante illustre de manière spectaculaire ce phénomène : elle consiste à verser entre deux plaques de verre, verticales et parallèles, un mélange initialement homogène de petites sphères (en blanc), et de plus gros grains anguleux (en rouge). Au début de l'opération, les petits grains s'amassent à la verticale de l'endroit où est versé le mélange, alors que les gros vont plus loin. On observe alors une ségrégation des grains. En continuant l'expérience, il apparaît spontanément une stratification : des couches alternativement blanches et rouges se forment par paires (la couche la plus basse contient les petites billes).



*Stratification spontanée d'un mélange de deux types de particules de taille et forme différentes entre deux plaques de verre verticales distantes de 10 mm. Le mélange est versé près du milieu de la cellule. Les particules blanches (60% du mélange) sont des sphères à peu près lisses, de 0,3 mm de diamètre ; les particules rouge (40%) sont des grains de sable anguleux de 0,8 mm environ.*

La stratification que l'on observe par la suite résulte de la différence entre les angles de talus des deux types de grains, qui résulte de leurs formes différentes. Cet angle est l'inclinaison maximum que peut présenter une couche de particules sans qu'une avalanche ne se déclenche (voir partie 4) ; il est plus faible pour les grains sphériques seuls ( $26^\circ$ ) que pour les grains à facettes seuls ( $35^\circ$ ). L'inclinaison des strates correspond à cette dernière valeur car la couche supérieure d'une paire est formée de gros grains. Décrivons un cycle de formation d'une telle paire. Initialement, le mélange des deux types de particules roule sur toute la longueur du talus (figure a) ; progressivement, il se forme une couche fine de petites particules, arrêtées sur la couche de gros grains de la paire précédente. Lorsque le mélange

atteint le bas du talus, il apparaît un bourrelet qui bloque l'écoulement (figure b) : les petites billes s'arrêtent les premières et les gros grains passent par-dessus (figure d). Cette séparation crée les deux couches : elles se développent quand on continue de verser le mélange, tandis que le bourrelet remonte vers le haut du talus (figure c) ; un nouveau cycle recommence ensuite.



La formation de cette structure en strates tient donc à un antagonisme entre les effets de taille et de forme : si le mouvement des petites billes est gêné par leur faible taille, il est en revanche facilité par leur forme ronde qui leur permet d'atteindre le bas de la pente. Avec une configuration inverse où les gros grains sont sphériques et les petits anguleux, les effets de forme et de taille se cumulent et les petits grains s'arrêtent rapidement près de la paroi de gauche. On a alors une simple ségrégation sans stratification.

De nos jours, on a toujours de gros soucis à réaliser des mélanges homogènes de particules. Par exemple, la fusée Ariane 5 est propulsée par diverses sortes de comburants et carburants très sophistiqués. Les propulseurs (ou boosters) utilisent des mélanges complexes de particules solides, dont la combustion produit la poussée nécessaire pour arracher l'engin à l'attraction terrestre. La suite du voyage de la fusée est assurée par la combustion des propergols dits solides (ce sont en fait des liquides très épais), une sorte de carburant qui lui-aussi contient des particules solides de tailles et de natures diverses.

Pour mélanger, les industriels ont tenté de copier un geste simple de la vie quotidienne : le mélange du sucre, avec une cuillère, dans un yaourt ! Pour cela, ils utilisent des vis d'Archimède.