

# Lit fluidisé et sédimentation

*Quelles sont les questions scientifiques ou techniques?*

Écoulement au travers d'un milieu granulaire non-cohésif: régime de Darcy, lit fluidisé.  
Sédimentation d'une suspension de particules.

*Par quelles expériences y répondre?*

Expérience modèle dans un tube cylindrique avec un lit de billes de verre.

*Quelles techniques expérimentales?*

Mesure de pression et de débit.

Acquisition vidéo et analyse d'image.

*Quels sont les résultats?*

À vous de les montrer à travers des graphes clairs.

*Comment les interpréter?*

Ingrédients physiques, lois d'échelle, ajustement de courbes expérimentales: à vous de jouer!

Dans certains procédés industriels, les réactions catalytiques par exemple, on utilise des lits fluidisés pour assurer un bon échange de masse ou de chaleur entre une phase fluide en écoulement et une phase solide sous forme de petites particules. Le "lit" de particules solides est placé dans un courant ascendant de fluide. Les particules étant plus denses que le fluide, elles ont tendance à sédimenter au fond du réacteur et à former un empilement compact. La traînée exercée par le fluide qui s'écoule tend au contraire à soulever les particules. Lorsque la traînée est supérieure au poids apparent des particules, les particules sont soulevées du fond et le sédiment devient moins compact. Il y a fluidisation du lit de particules. Nous cherchons ici à déterminer quelle est la vitesse minimale de fluidisation et comment varie la compacité du lit en fonction de la vitesse du courant de liquide.

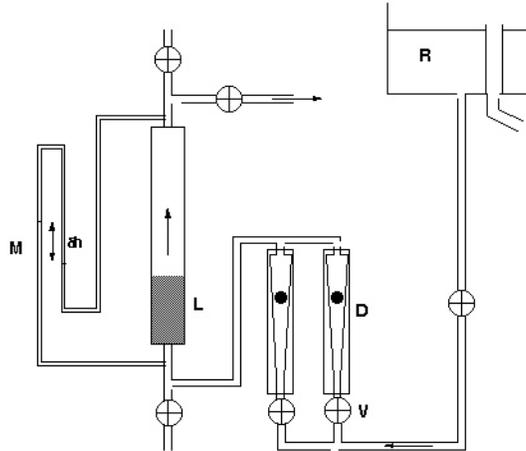


Figure 1: Chaudière à lit fluidisé (image Renewa®), mélange de sédiments dans le golfe du Mexique (source: Nasa).

## Description de l'expérience

Les particules sont des sphères de verre de  $350\mu\text{m}$  de diamètre dont la masse volumique est  $2500\text{kg}/\text{m}^3$ . Elles sont placées dans une colonne cylindrique de 20 mm de diamètre (il faut ajouter 14 mm à la valeur lue sur le réglet). La hauteur initiale du lit de particules est de 33 mm. On supposera que sa porosité initiale vaut 36% (estimation statistique pour un empilement aléatoire de sphères). L'écoulement d'eau est alimenté par un réservoir muni d'un déversoir afin de maintenir

une pression constante en amont. Le débit peut être réglé à l'aide des vannes pointeau placées à la base des deux débitmètres. Les deux débitmètres à billes sont à lecture directe et correspondent à deux gammes complémentaires. La différence de pression entre les deux extrémités de la colonne peut être mesurée à l'aide d'un manomètre différentiel contenant de l'eau et de l'air.



R : réservoir avec déversoir  
V : vanne de réglage du débit  
D : débitmètre à flotteur  
L : lit fluidisé  
M : manomètre différentiel

Figure 2: Schéma du lit fluidisé

## 1 Fluidisation

Mesurer la différence de pression  $\Delta p$  entre les deux extrémités de la colonne ainsi que la hauteur du lit de particules en fonction de la vitesse moyenne du liquide. Déterminer le seuil de fluidisation  $U_{mf}$ . Comment varie  $\Delta p$  lorsque le lit est fluidisé et lorsqu'il ne l'est pas ?

### 1.1 Lit sédimenté : loi de Darcy

Lorsque la vitesse du fluide est suffisamment faible (plus exactement si le nombre de Reynolds  $Re = Ud_p/\nu$ , est petit devant 1,  $d_p$  étant le diamètre des pores et  $\nu$  la viscosité cinématique du liquide), la vitesse moyenne de l'écoulement  $U$  (débit imposé sur la section de l'échantillon) dans un milieu poreux est donnée par la loi de Darcy :

$$U = -\frac{k}{\eta} \frac{\Delta p}{L}$$

où  $k$  est la perméabilité du milieu poreux,  $\eta$  la viscosité dynamique du fluide,  $L$  la longueur du milieu poreux et  $\Delta p$  la différence de pression. Le signe - dans la loi de Darcy traduit le fait que le fluide s'écoule de la zone de haute pression vers la zone de basse pression.

Déterminer la perméabilité  $k$  de l'empilement de billes lorsqu'il est encore compact. Si nous disposons d'échantillons correspondant à des diamètres de billes différents, comment devrait varier  $k$  avec  $d_p$ ? Commentaire sur le préfacteur? L'hypothèse sur le nombre de Reynolds est-elle valable?

## 1.2 Lit fluidisé

Considérons un lit fluidisé. La relation de conservation de l'impulsion nous permet de relier la chute de pression dans le lit fluidisé à la force exercée par le fluide sur les particules. On considère un volume de contrôle délimité par  $S_1$  et  $S_2$  (fig. 3). Si on néglige la friction sur les parois du tube, la différence de pression entre  $S_1$  et  $S_2$  compense exactement le poids du liquide et des particules. Comme on mesure l'écart  $\Delta P$  par rapport à la pression hydrostatique, cet écart vaut donc :

$$\Delta p = (\rho_p - \rho_f)g\varphi L,$$

où  $\rho_p$  et  $\rho_f$  sont les densités respectives des particules et du fluide,  $\varphi$  la fraction de volume occupée par les particules (le complémentaire de la porosité) et  $L$  sa hauteur. Par conservation de la matière, le produit  $\varphi L$  est constant et on s'attend donc à ce que  $\Delta P$  ne varie plus au delà du seuil de fluidisation.

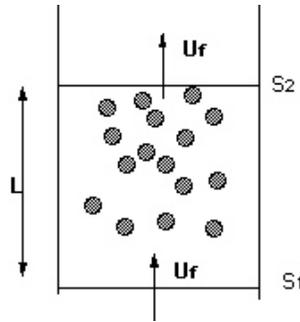


Figure 3: Volume de contrôle pour le calcul de la force exercée sur le lit de particules.

*La différence de pression est-elle effectivement constante au delà du seuil de fluidisation? À partir de la mesure de  $k$  et de  $\varphi_0$ , déterminer la vitesse minimale de fluidisation et la comparer à la valeur observée. À partir de la hauteur du lit, déterminer l'évolution de la fraction volumique  $\varphi$  occupée par les particules en fonction de la vitesse moyenne du liquide.*

La vitesse de chute  $U_0$  d'une particule isolée sédimentant dans un fluide visqueux est donnée par:

$$U_0 = \frac{2}{9}a^2 \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\eta},$$

où  $a$  est le rayon de la particule (sous la condition  $Re = \rho_f U_0 a / \eta \ll 1$ ).

*Quelle serait alors la vitesse minimale de fluidisation? Au delà de cette vitesse, la particule se stabiliserait-elle à une hauteur d'équilibre comme le fait le lit? (on pourra commenter la valeur du nombre de Reynolds). Expliquer qualitativement pourquoi le lit se stabilise effectivement à une hauteur d'équilibre.*

## 2 Sédimentation

### 2.1 Deux fronts

Lorsque que le lit fluidisé est bien stabilisé, fermer brusquement la vanne d'arrivée : le lit sédimente. On pourrait s'attendre à observer un unique front de sédimentation. En fait non: un front de compaction monte également progressivement.

Si  $\varphi$  est la fraction de volume dans la partie fluidisée du lit et  $\varphi_0$  celle dans la zone compacte, la conservation de la matière devrait nous imposer:

$$V_{compact} = \frac{\varphi}{\varphi_0 - \varphi} V_{sed},$$

$V_{compact}$  étant la vitesse de montée du front de compaction et  $V_{sed}$  la vitesse du front de sédimentation. Vérifier si c'est bon, car nous avons pu nous tromper!

*Filmer l'opération avec un camescope et mesurer les vitesses des fronts de sédimentation et de compaction grâce au logiciel ImageJ (outil Image/Stacks/Reslice pour réaliser un diagramme spatio-temporel). Quel est le lien entre ces deux vitesses? Reproduire l'expérience pour des hauteurs de front différentes (et donc valeurs de  $\varphi$  différentes). La relation entre  $V_{compact}$  et  $V_{sed}$  est-elle vérifiée?*

## 2.2 Comparaison fluidisation sédimentation

Les deux phénomènes ont la même origine physique: équilibre entre le poids des particules et la friction du fluide. Il est donc tentant de comparer nos deux expériences et de superposer les courbes  $\varphi$  fonction de la vitesse. La comparaison n'est cependant pas immédiate car la vitesse qui compte est la vitesse relative du fluide par rapport aux particules. Ce n'est cependant pas la vitesse que l'on mesure dans ni l'une ni l'autre de nos expériences:

- Pour la fluidisation, la vitesse relative du fluide par rapport aux particules est donnée par  $V_{rel} = U_f / (1 - \varphi)$ .
- Pour la sédimentation, il faut tenir compte du contre-courant. La vitesse relative est donnée par  $V_{rel} = V_{sed} / (1 - \varphi)$ .

Par coïncidence les vitesses mesurées peuvent donc être directement comparées. Vérifier également si c'est bon, car c'est facile de se tromper!

*Représenter les deux expériences sur un même graphe. Sont-elles effectivement équivalentes?*

Une relation semi-empirique, classique dans le domaine (loi de Richardson-Zaki), stipule que la vitesse de sédimentation est liée à la fraction de volume par une relation du type:

$$U_{sed} = U_0(1 - \varphi)^n,$$

la puissance  $n$  étant proche de 5 et dans la limite  $\varphi \ll \varphi_0$ . Les résultats obtenus sont-ils compatibles avec une telle loi?

## 2.3 Effet Boycott

Rien à voir avoir Charles Boycott, intendant d'un riche propriétaire terrien de l'Irlande de l'ouest durant le XIXe siècle qui traitait mal ses fermiers et subit un blocus de leur part (source wikipédia). Il s'agit ici d'Arthur Boycott qui a observé dans les années 1920 que les globules sanguins sédimentaient plus rapidement dans un tube incliné que dans un tube droit.

*Observer qualitativement cet effet avec les tubes libres. Comment peut-on expliquer qualitativement ce phénomène?*