



HAL
open science

Mesure de la force de traînée sur un agrégat

Frédéric Gruy, Gerd Hilpmann, Jean-Pierre Poyet, Frank Babick

► **To cite this version:**

Frédéric Gruy, Gerd Hilpmann, Jean-Pierre Poyet, Frank Babick. Mesure de la force de traînée sur un agrégat. XII ° Congrès de la Société Française de Génie des Procédés Pour relever les défis industriels du XXI^e siècle A la croisée des Sciences et des Cultures, Oct 2009, Marseille, France. 6p. hal-00425630

HAL Id: hal-00425630

<https://hal.science/hal-00425630>

Submitted on 22 Oct 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mesure de la force de traînée sur un agrégat

FRÉDÉRIC GRUY^{(1)(*)}, GERD HILPMANN⁽²⁾, JEAN-PIERRE POYET ⁽¹⁾, FRANK BABICK⁽²⁾

⁽¹⁾ *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, Centre SPIN – Département GENERIC-LPMG -UMR CNRS 5148, 158 Cours Fauriel - 42023 Saint-Étienne Cedex 2, France*

⁽²⁾ *Technische Universität Dresden, MVT Münchner Platz, 3, 01187 D-Dresden*

^(*) gruy@emse.fr

Résumé :

L'objectif est de mesurer la force de traînée sur un agrégat constitué d'un certain nombre de particules primaires. La plupart des mesures ont été réalisées jusqu'ici par sédimentation. Cette procédure pose un problème quant à la maîtrise de l'orientation de l'objet par rapport à un référentiel fixe. Nous proposons un nouveau montage, un mode opératoire et une analyse critique de la mesure. Ceux-ci ont été validés lors de l'étude d'une sphère.

Descripteurs:

Traînée ; sphère ; agrégat ; mesure.

1. Introduction

La force de traînée sur une particule poreuse et un agrégat constitué de particules primaires identiques en particulier est une grandeur d'intérêt quand on s'intéresse à la trajectoire d'une particule dans un fluide. Elle intervient aussi indirectement lors de la collision entre deux particules conduisant à un agrégat.

Nous nous intéressons à la force de traînée sur les agrégats quand l'écoulement relatif est de type stokien. En effet, les particules interagissant dans un phénomène d'agrégation sont sub-microniques ou microniques ; le nombre de Reynolds faisant intervenir la vitesse relative entre la particule et le fluide est alors beaucoup plus petit que 1.

L'évaluation de la force de traînée dans le cas des agrégats a déjà fait l'objet d'un certain nombre de travaux, la plupart théoriques (Vanni, 2000). Nous ferons un rappel succinct de quelques travaux réalisés dans notre laboratoire.

Une première étude reposant sur la sédimentation a été réalisée (Gruy, 2004). Pour respecter les nombres de Reynolds, nous avons construit des agrégats de particules primaires millimétriques (et donc faciles à construire) à morphologie contrôlée et avons étudié leur sédimentation dans le glycérol (liquide newtonien dont la viscosité dynamique est mille fois celle de l'eau). La vitesse de sédimentation de 40 agrégats contenant moins de 100 particules primaires et de morphologies variées (de l'agrégat linéaire à l'agrégat compact, i.e. de l'agrégat à enveloppe cylindrique à l'agrégat à enveloppe sphérique) a ainsi été mesurée. Cette mesure facile présente, néanmoins, un inconvénient : l'orientation de l'agrégat lors de la sédimentation n'est pas contrôlée ; on observe parfois, en effet, une rotation de l'objet pendant sa descente, laquelle a une influence sur la valeur mesurée du temps de sédimentation, surtout pour des agrégats à symétrie non sphérique.

Il a ainsi été décidé de changer la méthode de mesure. Un nouveau montage a été réalisé, lequel devrait permettre la mesure de la traînée pour une orientation donnée de l'agrégat. Ce dispositif doit obligatoirement permettre la mesure dans un liquide, car il est prévu, entre autres, de quantifier l'effet de la mouillabilité sur la force de traînée.

2. Montage expérimental et mode opératoire

2.1. Description du montage

Le montage (Fig.1) est constitué de différents éléments :

- ❖ une cuve cylindrique (à section carrée ou circulaire) contenant le liquide, muni, à sa base, d'un robinet de vidange, d'une entrée en bas et d'une sortie (deux tiers de hauteur)
- ❖ une pompe pour la circulation du liquide
- ❖ une microbalance, pour la mesure de la traînée
- ❖ un fil très fin liant l'agrégat à la microbalance

La microbalance MB 60 (Setaram) est équipée d'un système de compensation magnétique qui permet de maintenir horizontal le fléau de la balance et donc l'objet suspendu, quelle que soit la sollicitation appliquée à celui-ci.

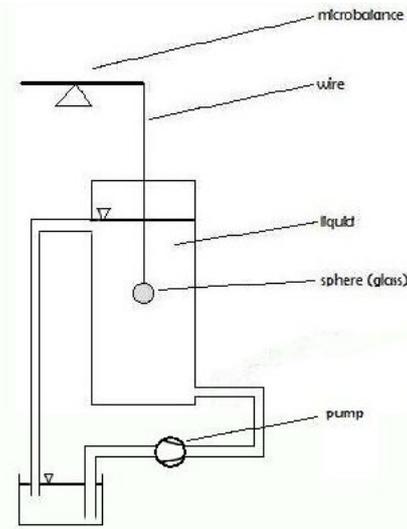


Figure 1 : Montage expérimental

2.2. Mode opératoire

Le liquide est soit du glycérol pur, soit une solution aqueuse de glycérol. La température de travail est notée à 0,1°C près. La viscosité du glycérol ou de la solution est mesurée avant chaque expérience au moyen d'un rhéomètre DV-III (Brookfield). Cette dernière mesure est importante car la viscosité du glycérol pur varie beaucoup entre 18°C et 25°C.

Deux modes opératoires ont été utilisés :

- ❖ vidange de la cuve sans circulation du glycérol : le robinet est ouvert ; la force et le niveau de glycérol sont mesurés en fonction du temps. La vitesse de baisse de niveau est comprise entre 0,01 cm/s et 0,2 cm/s.
- ❖ circulation à l'aide de la pompe : le glycérol circule du bas vers le haut ; le niveau de glycérol est constant. La force et la vitesse de circulation sont enregistrées en fonction du temps.

Dans les deux cas, la distance entre le niveau initial de glycérol et l'objet est un paramètre important.

3. Analyse critique de l'expérience

3.1 Introduction

Le dispositif expérimental a été testé en mesurant la force de traînée sur une sphère. L'objet choisi est une bille en verre de 1cm de diamètre. La Figure 2 représente l'enregistrement de la force perçue par la microbalance lors de la vidange (mode opératoire n°1) en fonction du temps. Lors de cette expérience, la vanne de vidange est ouverte à t=155s. La surface du liquide rencontre la sphère à t=425s.

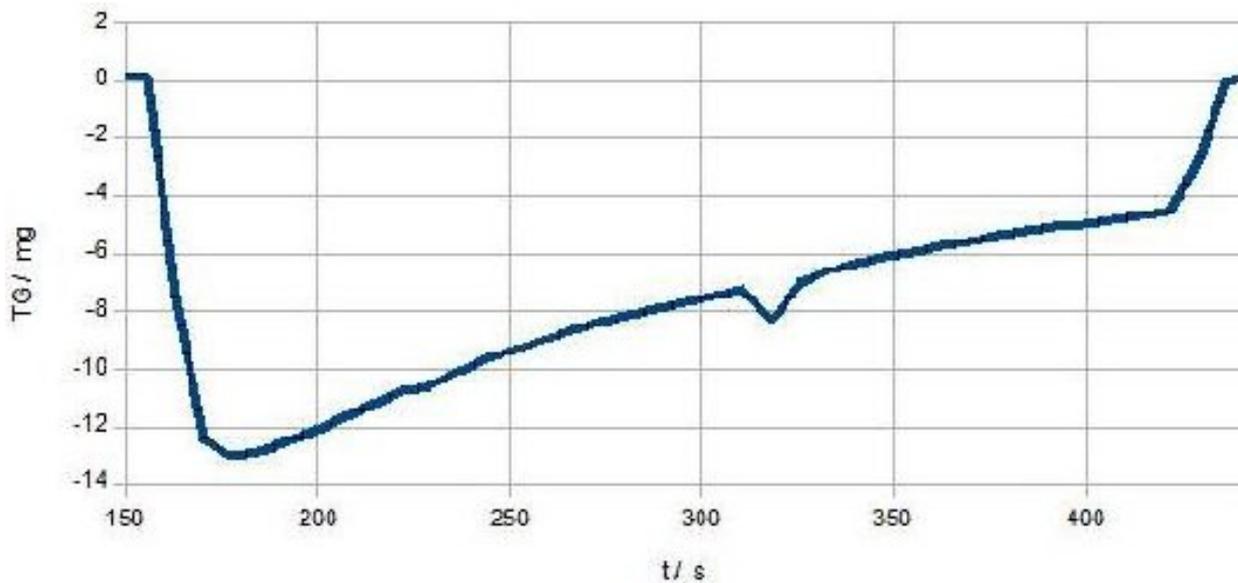


Figure 2 : Force mesurée par la microbalance lors de la vidange (vitesse de baisse du niveau : $U_L = 5,8110^{-4} m/s$) du contenant. La force est exprimée en masse. La viscosité du liquide est égale à $\mu = 0,335 Pa.s$

On pourrait s'attendre, lors de l'ouverture de la vanne de vidange, à une variation brutale du signal (force ou masse équivalente) suivie d'une période où le signal est constant, jusqu'au moment où la surface du liquide rencontre la sphère. On constate en fait qu'après la variation initiale du signal, celui-ci diminue lentement avec le niveau de liquide. La force de traînée calculée en appliquant la loi de Stokes avec les données correspondant à la figure 2 est égale à $1,83 \cdot 10^{-5} N$ (soit 1,87mg). Il apparaît ainsi que la valeur mesurée n'obéit pas à la loi de Stokes. Cette constatation est vraie pour toutes les mesures. La valeur mesurée est plusieurs fois plus grande que la valeur théorique. Une analyse fine des mesures s'avère donc nécessaire, car de nombreux phénomènes, hormis la traînée sur l'objet, doivent être pris en compte :

- ❖ Vitesse de vidange non constante
- ❖ Forces liées à l'accélération du fluide
- ❖ Effet de paroi sur la traînée
- ❖ Force de démouillage sur le fil
- ❖ Film résiduel ou gouttes de liquide sur le fil
- ❖ Frottement du liquide sur le fil
- ❖ Poussée d'Archimède du fil
- ❖ Accrochage de bulle pendant la vidange

Nous examinerons les plus pertinents avant de présenter les mesures.

3.2 Mouvement du fluide

La vidange du fluide ne se fait pas à vitesse U_L constante :

$$U_L \approx ah \tag{1}$$

avec $0,25 < h < 0,4m$

h est la distance entre la surface du fluide et l'orifice (vanne) de vidange. a est une constante pour une expérience donnée ; elle dépend de la viscosité du liquide et des caractéristiques de la vanne.

3.3 Bilan des forces sur l'objet (sphère)

Le bilan des forces appliquées à la sphère conduit à (Kim et Lawrence, 1988) :

$$\vec{T}_0 - \vec{T} = \vec{F}_D + \frac{3}{2} \rho_L V_p \frac{d\vec{U}_L}{dt} + \vec{F}_B \quad (2)$$

Où \vec{F}_D , \vec{T}_0 , \vec{T} , \vec{F}_B , ρ_L et V_p sont la force de traînée, la tension du fil avant vidange, la tension du fil pendant la vidange, la force de Basset, la masse volumique du liquide et le volume de l'objet. La grandeur mesurée est la variation de tension $\vec{T}_0 - \vec{T}$. L'écart prévisible entre grandeur mesurée et force de traînée provient des forces de masse ajoutée et de Basset. Ces deux forces sont liées à l'accélération du fluide.

Considérons une sphère de diamètre $d=1\text{cm}$ dans du glycérol pur de viscosité dynamique $\mu=1\text{ Pa.s}$ s'écoulant à 10^{-3}m/s . Les hauteurs initiale et finale de liquide sont respectivement $0,4\text{m}$ et $0,25\text{m}$. Dans ces conditions, les forces de traînée, de masse ajoutée et de Basset sont respectivement égales à 10^{-4}N , $3 \cdot 10^{-9}\text{N}$ et $5 \cdot 10^{-7}\text{N}$. Les forces de masse ajoutée et de Basset sont donc négligeables devant la force de traînée.

Il est bien connu que les parois du récipient ont une influence sur la valeur de la traînée. Celle-ci est fonction du rapport entre le diamètre d de la sphère et le diamètre D du récipient. Ainsi, des simulations réalisées à l'aide du logiciel Comsol montrent que la traînée est multipliée par 1,074 et 1,876 quand le rapport des diamètres du récipient et de la sphère est égal à 10 et 3 respectivement. Ce rapport dimensionnel étant égal à 6 dans le montage, l'écart observé ne peut donc pas être expliqué uniquement, loin s'en faut, par un effet de paroi.

3.4 Bilan des forces sur l'ensemble fil+objet

Le fil, même tendu, exerce une influence sur la mesure.

Au cours de la vidange, la contribution du fil à la poussée d'Archimède évolue suivant :

$$F_{G,\text{fil}} = \pi d_{\text{fil}}^2 \Delta h / 4g (\rho_L - \rho_{\text{air}}) \quad (3)$$

g est l'accélération de la pesanteur.

Si le diamètre d_{fil} du fil est de $100\mu\text{m}$, la variation totale de poussée d'Archimède sera égale à 10^{-5}N . Cette valeur a été confirmée en remplaçant le glycérol par l'eau (les forces liées à la viscosité étant alors négligeables, l'effet de la poussée d'Archimède est bien observé).

Le retrait du liquide le long du fil est la cause d'une force de démouillage (Karakashev, 2005), dont le point d'action est la jonction entre le fil et l'interface liquide-air. Son expression est :

$$F_{\text{démouillage}} = \frac{3\pi d_{\text{fil}} \mu K U_L}{\theta_{\text{ext}}} \quad (4)$$

K est une constante comprise entre 11 et 15. L'angle (dynamique) θ_{ext} de démouillage est une fonction de la vitesse de retrait. Si la valeur de ce dernier est $0,5\text{ rad}$, la force de démouillage est égale à 10^{-5}N .

Le liquide exerce une force de frottement (traînée) sur le fil lui-même. Il suffit de rappeler qu'un fil de diamètre $100\mu\text{m}$ et de longueur $0,1\text{m}$ a une surface qui est 10% celle d'une sphère de diamètre 1cm . Assimilant l'écoulement le long du fil à celui entre deux cylindres (fil et récipient), la force de frottement obéit à l'équation (Bird *et al*, 1960) :

$$F_{D,\text{fil}} = 8\pi\mu L U_L G(d_{\text{fil}} / D) \quad (5a)$$

Avec

$$G(x) = \frac{x^2 + (1-x^2)/(2\ln x)}{1+x^2 + (1-x^2)/(\ln x)} \quad (5b)$$

Où L est la longueur du fil. Si L est égale à 0,1m, la force de frottement sur le fil est égale à $2,35 \cdot 10^{-4} \text{N}$.

Il apparaît clairement que plus le fil est fin, plus faibles seront les forces exercées par le liquide. Cependant, si la variation de poussée d'Archimède et la force de démouillage peuvent devenir négligeables devant la force de traînée, cela n'est pas le cas du frottement du liquide sur le fil.

3.5 Interprétation de l'expérience

La variation initiale du signal est liée à la force exercée par le liquide en écoulement sur le système associant le fil et l'objet. Forces de traînée sur le fil et l'objet sont prépondérantes. La traînée sur le fil est du même ordre de grandeur que celle (compte tenu de l'effet de la paroi) sur l'objet. Au cours de la vidange, la longueur de fil immergée et, dans une moindre mesure, la vitesse du liquide diminuent ayant pour conséquence la diminution des forces de traînée sur le fil et l'objet. La force totale mesurée est proche de la traînée sur l'objet quand la surface du liquide est proche de la sphère. Cependant, l'écoulement devient, dans cette dernière situation, complexe ; la force de traînée sur l'objet a alors une valeur bien différente de celle donnée par la loi de Stokes. Il est donc plus judicieux d'analyser les premiers instants de la vidange. La variation initiale du signal dure quelques dizaines de secondes, dont une partie est due au temps de réponse de l'appareil et l'autre partie aux conséquences de l'établissement d'un régime quasi-stationnaire d'écoulement ($t < \rho_L D^2 / \mu$). Le maximum de la force mesurée (en valeur absolue) correspond au début du régime quasi-stationnaire. Nous nous sommes concentrés sur la valeur maximale de la force, sachant qu'elle contient les contributions de la traînée de l'objet étudié et du fil.

4. Quelques résultats

La force mesurée est la somme des forces de traînée sur le fil et l'objet et, dans une moindre mesure, de la force de démouillage. Ces trois forces sont proportionnelles à μU_L . Le coefficient de proportionnalité dépend essentiellement de la géométrie du système.

Un premier résultat (non présenté dans ce texte) est la comparaison de la force mesurée pour deux objets différents : une sphère en verre ($d=1\text{cm}$) et un cylindre en acier ($0,65\text{mm} \times 4\text{cm}$). Celle-ci est une fonction linéaire de μU_L pour les deux objets. La valeur de la force mesurée pour le cylindre est 1,83 plus petite que celle pour la sphère. Ceci montre que la force mesurée dépend de l'objet.

La Figure 3 représente la force mesurée F_m en fonction de la force théorique F_{th} donnée par la loi de Stokes $F_{th} = 3\pi d \mu U_L$.

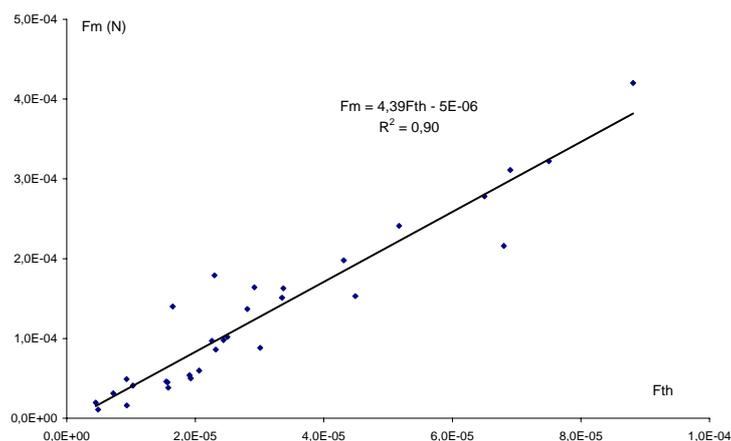


Figure 3 : Force de traînée mesurée en fonction de la force de Stokes (valeurs en N)

Il faut d'abord constater que la dispersion des données est importante, malgré le soin apporté aux expériences (par exemple, vérification de l'absence de bulles dans le liquide). L'obtention

d'une relation $F_m = k\mu U_L$ pour un objet nécessite donc un grand nombre de mesures ($N > 50$).

La force mesurée est 4,39 fois plus importante que la force théorique. En utilisant l'expression 5a (en prenant pour L la longueur de la partie du fil immergé quand la force est maximale ; la longueur initiale est 15cm), la force de traînée sur le fil est 3,0 fois celle obtenue pour la sphère à partir de la loi de Stokes. On en déduit que la force sur la sphère est 1,39 fois celle de Stokes. L'écart correspond à l'effet de paroi pour $D/d=6$.

Des essais ont été réalisés en diminuant le diamètre du fil ($d=10$ et $25\mu\text{m}$) sans amélioration quant à la qualité des mesures.

Le mode opératoire, qui met en oeuvre une circulation du liquide à l'aide d'une pompe, maintient constant le niveau du liquide. La longueur de fil immergé et la vitesse du liquide sont constantes, mais les lignes de courant dans le contenant ont une structure complexe rendant l'analyse difficile.

5. Conclusions

La mesure de la force exercée sur un objet fixe par un écoulement liquide a été réalisée de façon à maîtriser l'orientation de l'objet par rapport à l'écoulement. L'interprétation de la mesure s'est avérée plus compliquée que prévue. Un mode opératoire a été proposé et une analyse des résultats a montré que le fil suspendant l'objet contribuait de façon non négligeable à la force mesurée, par frottement visqueux et résistance au démouillage. L'obtention d'une valeur (à 1% près) de la force de traînée exige la mesure de celle-ci pour de nombreuses valeurs du paramètre μU_L .

Références

- Bird R.B., W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, 1960, Transport Phenomena, Wiley International Edition
- Gruy F. and P. Cugnet , 2004, Journal of Colloid and Interface Science, 272, 465
- Karakashev S.I, C.M. Phan, A.V. Nguyen, 2005, Journal of Colloid and Interface Science, 291, 489
- Kim S., C.J. Lawrence, 1988, Chemical Engineering Science, 43, 991
- Vanni M., 2000, Chemical Engineering Science, 55, 685

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (programme CIREM) pour le financement partiel de cette étude.