Traînée sur des obstacles cylindriques immergés dans l'écoulement d'une suspension concentrée de particules solides en eau

Drag over cylindrical obstacles immersed in the flow of a concentrated suspension of solid particles in water

C. Pfeiff

E. Hopfinger

Institut de mécanique
BP n° 68, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex

Aux débouchures des grands fleuves à taux de charriage élevé de sédiments, on trouve souvent des couches de sédiments sous-consolidés. Leur mise en mouvement par des causes diverses (houle, séismes) représente un risque pour les fondations des plates-formes offshore situées dans ces zones.

Les résultats présentés sur la traînée d'un cylindre immergé dans des suspensions de particules solides dans de l'eau, de concentration volumique $\leq 65\%$, permettent d'évaluer les efforts sur les fondations. Une étude expérimentale des propriétés rhéologiques des suspensions utilisées met en évidence l'influence des divers paramètres (taux de déformation, concentration volumique, nature de la suspension) sur la traînée.

At the outlets of great rivers having a high percentage of bed loads, underconsolidated sediments are often found. Their motion engendered through various causes (swell, seisms) is a risk for foundations of off-shore platforms which are situated in these zones.

The results presented concern the drag of a cylinder immersed in the suspension of solid particles in water, volume concentration $\leq 65\%$, enable the stresses on the foundations to be evaluated. An experimental study on the rheological properties of suspensions used shows the effect of various parameters (deformation ratio, volume concentration nature of suspension) as regards the drag.

Introduction

L'étude de l'écoulement de suspensions concentrées autour d'obstacles cylindriques est un sujet de recherche intéressant aussi bien du point de vue pratique et fondamental. Une application immédiate concernant ce sujet se trouve dans la prédiction des forces de traînes qui peuvent s'exercer sur les fondations des plateformes « off-shore » lorsqu'elles se situent dans des coulées denses de sédiments. Ces masses de sédiments peuvent être mises en mouvement par diverses causes (houle, séismes ou micro-séismes, par exemple) même sur des pentes très faibles.

Les forces exercées sur les fondations des plateformes et sur d'autres ouvrages tels que pipelines ou, notamment, câbles téléphoniques sous-marins peuvent être considérables [Sterling, 1973 ; BEA, 1980]. On trouve souvent des couches de sédiments sous-consolidés aux embouchures de grands fleuves à taux de charriage élevé; tel est le cas, entre autres, du Mississippi au Golfe du Mexique et de l'Orénoque sur l'Océan Atlantique.

L'étude des propriétés rhéologiques des masses denses de sédiments en mouvement devient un élément essentiel

pour l'interprétation des efforts de traînée. Il existe une assez vaste littérature concernant la rhéologie des suspensions concentrées et homogènes de particules solides de géométrie régulière, dont les principaux résultats ont été résumés par Jeffreys et Acrivos (1976). Les recherches expérimentales dans le domaine des écoulements granulaires — à partir notamment des travaux de Bagnold (1954) — ont plutôt été orientées vers les écoulements à fort gradient de vitesse (v.g. Savage, 1983). Par contre, les publications concernant les propriétés rhéologiques des écoulements lents de suspensions concentrées et des boues denses d'origine fluviale ou marine ne sont pas nombreuses (v.g. Engelund et Wan, 1984; Wan, 1985).

Les expériences réalisées dans le laboratoire de l'IMG ont été conçues dans le but de déterminer l'influence de la concentration solide sur la force de traînée exercée sur un obstacle cylindrique qui se déplace dans la suspension. Les résultats présentés ici correspondent à des expériences réalisées avec des suspensions aqueuses de particules sphériques de polystyrène, ce qui peut être considéré comme une idéalisation de la coulée de sédiments sous-consolidés.

Une étude expérimentale des propriétés rhéologiques des suspensions utilisées, réalisée en parallèle, a permis d'estimer leur viscosité et donc le nombre de Reynolds de l'écoulement autour de l'obstacle, en fonction de la vitesse, du diamètre du cylindre, de la concentration et taux de déformation de la suspension. La dépendance de la viscosité du taux de déformation est due au comportement sensiblement non newtonien des suspensions très concentrées.

Un diagramme reliant le coefficient de traînée au nombre de Reynolds ainsi défini a pu être établi et les résultats obtenus ont été comparés avec la corrélation classique fournie par l'hydrodynamique des fluides newtoniens.

Etude expérimentale

Les expériences ont été réalisées avec des particules sphériques de polystyrène, de distribution granulométrique pratiquement uniforme (diamètre moyen de 0.3 mm). L'utilisation de ce type de particules a l'avantage — dû à sa densité voisine à celle de l'eau — de permettre l'obtention d'une concentration homogène au sein de la suspension si on utilise de l'eau légèrement salée.

La plupart des essais rhéologiques ont été réalisés avec un rhéomètre à contrainte contrôlée, avec une géométrie de cylindres coaxiaux (rapport des rayons 0.89). L'espace annulaire (2.25 mm) a été nettement plus grand que le diamètre des particules solides. Des expériences complémentaires ont été effectuées avec un autre rhéomètre à vitesse angulaire contrôlée, utilisant des cylindres coaxiaux dont le rapport des rayons était de 0.95 avec un espace annulaire de 1.30 mm.

Pour les expériences de mesure de la traînée, on a eu recours à un canal de 2 m de longueur, 0.30 m de largeur et 0.50 m de hauteur. Le canal, aux parois vitrées, est parcouru par un chariot qui s'appuie sur des barres posées longitudinalement. Le chariot, dont la vitesse constante est choisie par l'opérateur, transporte le cylindre et le capteur de force (voir fig. 1).

Figure 1. — Schéma de l'installation expérimentale utilisée pour les expériences de mesure de la traînée.

La profondeur de la suspension dans le canal a été variée de façon à étudier sur la traînée du rapport d'élanement h/d (h profondeur du fluide, d diamètre du cylindre). Dans l'ensemble des essais présentés ici, ce rapport est toujours supérieur à 20, ce qui s'approche de la condition dite du « cylindre infini ». La distance entre l'extrémité du cylindre et le fond du canal a été fixée à 5 mm. Cette distance résulte d'un compromis entre la nécessité de minimiser les effets de bord et de préserver les caractéristiques bidimensionnelles de l'écoulement autour du cylindre.

La concentration volumique a été calculée de la façon suivante :

$$C_v = P_s / (\gamma_s V_t)$$

où P_s est le poids sec des particules dans le canal, γ_s leur poids spécifique et V_t le volume total de la suspension.

La sédimentation des particules se produit assez lentement à cause de la faible différence de densité entre les composantes de la suspension, ce qui permet de soutenir l'hypothèse de l'homogénéité de celle-ci pendant les essais, ayant effectué préalablement l'agitation du mélange au moyen de la rotation d'une pale rectangulaire tout au long du canal.

Le système de mesure de la traînée a été étalonné par des expériences réalisées en utilisant comme fluide de l'eau et une huile très visqueuse.

Les propriétés rhéologiques

Les essais rhéologiques ont été effectués avec les rhéomètres indiqués ci-dessus, sur des suspensions à concentration volumique C_v entre 36 % et 62 %. La température a été maintenue constante à 20 °C.

L'utilisation d'un rhéomètre à contrainte contrôlée permet de rechercher l'existence d'un seuil. La procédure d'essai consiste à imposer une valeur T du couple et à mesurer la vitesse angulaire ω résultante du cylindre mobile. Cette procédure est répétée pour des valeurs croissantes de T jusqu'à ce que la valeur de ω à l'équilibre soit de l'ordre de 30 rad/s. Ensuite le couple est mis à zéro et un second cycle est effectué sans remanier la suspension dans l'appareil.

Pour l'ensemble des essais réalisés avec des concentrations élevées, on a pu déterminer l'existence d'une certaine valeur critique T_c du couple, au-dessous de

Figure 2. — Viscosité relative apparente en fonction du taux de déformation, d'après les mesures rhéologiques sur des suspensions aqueuses de particules de polystyrène, de concentration volumique 55, 60 et 62 %. Les lignes pleines représentent les estimations obtenues en utilisant les relations [1] et [2].

Figure 3. — Coefficient de traînée normalisé en fonction de la concentration volumique (suspensions de particules de polystyrène en eau). Re_0 : nombre de Reynolds calculé pour le fluide sans particules.

♦ : $Re_0 < 1000$; □ : $1000 < Re_0 < 2000$; ◇ : $Re_0 > 2000$.

laquelle la vitesse angulaire se maintient à zéro. On a constaté cependant des déplacements angulaires finis du cylindre mobile. Ces déplacements n'étant pas totalement réversibles. Par ailleurs, lorsque $T = T_c$, la vitesse de rotation oscille sans parvenir à l'équilibre; c'est le comportement dit « stick-slip » mentionné déjà par Cheng (1978) et Hanes (1985).

La valeur de T_c déterminée lors du deuxième cycle a été généralement inférieure. Ce comportement peut s'expliquer si on tient compte que, dans le cas des suspensions très denses, la concentration n'est pas uniformément distribuée dans l'espace annulaire et T_c est alors affecté par l'influence des agglomérations localisées de particules; le mouvement des parois provoque, après un certain temps, une redistribution au sein de la suspension et une diminution de la valeur critique T_c . Malgré une certaine dispersion des résultats pour des valeurs proches de T_c , les essais rhéométriques effectués sur plusieurs échantillons ayant la même concentration s'avéraient assez reproductibles.

La figure 2 représente les résultats de la viscosité apparente obtenus pour des concentrations volumiques de 55, 60 et 62 %. Cette figure montre le comportement non-newtonien de toutes ces suspensions, en particulier pour les faibles vitesses de déformation.

Parmi les diverses expressions proposées dans la littérature pour l'estimation de la viscosité relative des suspensions concentrées, nous avons utilisé celle due à Vocollo (1973) :

$$\mu_r/\mu_0 = \exp [(2,5 + n/0,74) C_v] / (1 + C_v/0,74)^n \quad (1)$$

où n est un facteur d'ajustement aux résultats des essais rhéologiques. En prenant en compte l'influence du taux de déformation D sur la viscosité, nous avons déduit une relation empirique entre n et D d'après les résultats expérimentaux :

$$n = 7,385 D^{-0,1} \quad 1 < D < 200 \quad (2)$$

où D est une mesure du taux de déformation. Dans nos essais,

$$D = (R^2 + r^2) \omega / (R^2 - r^2)$$

(R et r étant les rayons des cylindres).

La force de traînée

On s'attend à ce que la force de traînée augmente avec la vitesse et la concentration, et son augmentation est particulièrement rapide quand $C_v > 50$ %. Ce phénomène est montré sur la figure 3, où on a représenté le coefficient de traînée normalisé C_d/C_{d0} en fonction de la concentration volumique.

La valeur de C_d est calculée de la façon suivante :

$$C_d = 2 F / (\rho d u^2)$$

où F est la force de traînée mesurée (correction faite de l'influence des parois du canal), ρ la densité de la suspension et u la vitesse du cylindre. Le coefficient de référence C_{d0} est la valeur qui correspond à un cylindre infini dans le fluide sans particules solides (dans notre cas, de l'eau);

Figure 4. — Visualisation de l'écoulement autour d'un cylindre ($d = 18 \text{ mm}$) en mouvement dans une suspension de particules de polystyrène en eau, à concentration volumique de 55 %.

Figure 5. — Coefficient de traînée C_d en fonction du nombre de Reynolds Re_s . La ligne pleine représente la corrélation classique. Les résultats expérimentaux ont été obtenus avec des suspensions de particules de polystyrène en eau. Re_s a été calculé avec la viscosité apparente des suspensions d'après l'étude rhéologique. $\diamond$: $C_v < 50 \%$; $\blacklozenge$: $C_v > 50 \%$.

Figure 6. — Coefficient de traînée C_d en fonction du nombre de Reynolds Re_s . Les concentrations volumiques sont indiquées pour chaque point.

cette valeur est donnée par la corrélation classique entre C_d et le nombre de Reynolds, Re étant calculé avec la vitesse et le diamètre du cylindre et la viscosité du fluide de base. Le coefficient de traînée normalisé C_d / C_{d0} est alors une indication de l'augmentation de la résistance due aux particules solides en suspension.

Les points expérimentaux montrent une nette augmentation de la traînée quand la concentration devient plus grande que 35 %. Si les points sont classés d'après Re_d (calculé avec la viscosité du fluide sans particules), il est clair que l'accroissement de la traînée est plus important si le nombre de Reynolds est petit.

Les résultats représentés dans la *figure 5* indiquent que pour des concentrations élevées, une petite variation de C_v peut affecter l'estimation de la traînée par un ordre de grandeur. Il s'agit d'une observation importante en vue des applications pratiques, dû aux difficultés existantes pour déterminer avec précision la concentration solide des coulées de boue.

Corrélation entre C_d et le nombre de Reynolds

Les résultats des essais rhéologiques ont permis d'estimer la viscosité des suspensions denses en fonction de la concentration solide et du taux de déformation. On peut alors calculer le nombre de Reynolds de l'écoulement de la suspension autour de l'obstacle de la façon suivante :

$$Re_s = \rho u d / \mu_s$$

où ρ est la densité de la suspension, d le diamètre du cylindre et μ_s la viscosité de la suspension ($\mu_s = f(C_v, D)$).

Ce calcul nécessite une estimation préalable du taux de déformation près du cylindre. Cette information a été obtenue à partir des expériences qui consistaient à déterminer la déformation d'une ligne de colorant introduit à la surface libre (*fig. 4*). Ces expériences ont montré que dans une suspension dense ($C_v = 55\%$) l'écoulement autour de l'obstacle qui se déplace à une vitesse modérée ($u = 5$ cm/s) est laminaire. Dans ce cas, le taux de déformation proche au cylindre, déterminé à partir de la déformation de la ligne de colorant, est en première approximation donné par $D = u/r$ (u et r étant la vitesse et le rayon du cylindre).

Le coefficient de traînée C_d est représenté dans la *figure 5* en fonction du nombre de Reynolds Re_s . Le trait plein représente la relation classique valable pour un cylindre infini qui se déplace dans un fluide newtonien. Il résulte de cette figure que lorsque $C_v < 50\%$ les points expérimentaux coïncident avec l'estimation classique, la dispersion étant attribuée à l'influence de la relation d'élancement et à des incertitudes expérimentales. Cependant, pour des concentrations plus élevées (*fig. 6*) le comportement des points expérimentaux suggère que les valeurs de C_d sont systématiquement plus grandes que celles qui correspondent à des fluides newtoniens. Cette déviation pourrait être attribuée à l'influence du frottement solide et la possible anisotropisation de l'ensemble de particules due au passage du cylindre.

L'imprécision dans l'estimation du taux de déformation près du cylindre n'a pas une grande influence dans la relation $C_d = f(Re_s)$: par exemple, une diminution de

20 % dans la valeur estimée de D provoque un léger déplacement des points dans le diagramme, les approchant de la ligne pleine. Or, dans les calculs, on a utilisé une estimation du taux de déformation qui est en fait une borne supérieure de sa variation près de l'obstacle. Par contre, la position des points est fortement dépendante de la valeur de la concentration de la suspension. Cette valeur globale est connue avec une précision suffisante dans les expériences, et il ne semble pas que la viscosité ait été systématiquement sous-évaluée par l'étude rhéologique malgré les approximations introduites par les relations [1] et [2].

Conclusions

En utilisant une suspension aqueuse de particules de polystyrène, nous avons montré que la traînée exercée par des suspensions denses sur des obstacles cylindriques est fortement dépendante des propriétés rhéologiques de la suspension. Lorsque la concentration solide est élevée (par exemple $C_v > 50\%$), le comportement non-newtonien de la suspension devient important et la viscosité apparente dépend en même temps de la concentration et du taux de déformation, particulièrement quand celui-ci est petit. Dans le cas des suspensions denses, un changement relativement petit de la concentration peut affecter la force de résistance par un ordre de grandeur.

Si le nombre de Reynolds de l'écoulement près de l'obstacle est calculé avec la viscosité apparente de la suspension, les résultats expérimentaux suggèrent que la corrélation classique entre C_d et Re reste en première approximation valable. Les valeurs de C_d observées dans la zone des petits Re sont cependant par un facteur de 1.5 à 2 plus grandes que celles prévues pour un fluide newtonien. Cette augmentation est en partie due à l'influence du rapport d'élancement et à une probable surestimation du taux de déformation près de l'obstacle. La déviation par rapport à la relation classique peut être aussi attribuée à l'effet non-newtonien induit par le frottement solide et par l'anisotropisation de la configuration de l'ensemble de particules due au cisaillement imposé à la proximité de l'obstacle.

Références

- BAGNOLD R.A. (1954). — Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, *Proc. Royal Soc. A*, 225, 49-63.
- BEA R. (1980). — Offshore Platforms and Pipelines in Mississippi River Delta, *J. Geotech. Eng., ASCE*, 106, 853-869.
- CHENG C., RICHMOND R. (1978). — Some observations on the rheological behaviour of dense suspension, *Rheol. Acta*, 17, 447-453.
- ENGELUND D., WAN Z. (1984). — Instability of Hyperconcentrated Flow, *J. Hydr. Div., ASCE*, 110, 219-233.
- HANES D., INMAN D. (1985). — Observations on rapidly flowing granular-fluid materials, *J. Fluid Mech.*, 150, 357-380.
- JEFFREY D., ACRIVOS A. (1976). — The rheological properties of suspensions of rigid particles, *J. AIChE*, 22, 417-432.
- SAVAGE S., MCKEOWN S. (1983). — Shear stresses developed during rapid shear of concentrated suspensions of large spherical particles between concentric cylinders, *J. Fluid Mech.*, 127.
- STERLING G., STROHBECK E. (1973). — The failure of the South Pass 70B Platform in hurricane Camille, *Proc. 5th Offshore Tech. Conf., Houston*.
- VOCADLO J., SAGOO M. (1973). — Slurry Flow in pipes and pumps, *J. of Eng. for Industry*, Feb.
- WAN Z. (1985). — Bed Material Movement in Hyperconcentrated Flow, *J. Hydr. Div., ASCE*, 111, 987-1003.

Discussion

Président : M. M. BANAL

M. le Président BANAL : Y a-t-il deux ou trois questions à M. Pfeiff sur ce sujet ?

M. MOGUILNY : Pourriez-vous préciser quelle définition vous avez adoptée pour le coefficient de viscosité dynamique ?

M. PFEIFF : Il s'agit de la viscosité dynamique apparente.

M. MOGUILNY : Elle ne serait donc pas liée à la pente du rhéogramme.

M. PFEIFF : Non, pas directement. C'est le rapport point par point entre la contrainte de cisaillement et le taux de déformation.