

Transport de matériaux solides en conduites

H. Reitzer O. Scrivener

Institut de mécanique des fluides, URA CNRS, F-67083 Strasbourg

Introduction

Alors qu'un écoulement de fluide monophasique dans une conduite est facile à décrire lorsque l'on connaît la géométrie du tube, la vitesse et le comportement rhéologique du fluide, il n'en est plus de même pour un fluide hétérogène où s'ajoutent les paramètres liés aux particules : taille, forme, masse volumique, concentration volumique en solide, comportement rhéologique et interaction turbulence-particules.

Les études théoriques, peu nombreuses, ne concernent que des cas spécifiques simples. Les études expérimentales, par contre, sont nombreuses et ont conduit à une vingtaine de modèles de perte de charge [1] élaborés à partir des résultats obtenus dans des installations semi-industrielles avec des matériaux naturels. Cet éventail de modèles hétérogènes le plus souvent applicables dans des conditions bien délimitées, est la conséquence d'abord du nombre important de paramètres mis en jeu, ensuite des difficultés matérielles à contrôler ces paramètres. On est donc encore loin d'un modèle universel comme en fluide monophasique, et même le dernier modèle développé par LAZARUS [2] qui regroupe, à 9 % près, un grand nombre de résultats publiés ne s'applique pas à toutes les configurations d'écoulement.

Les résultats présentés ici montrent l'influence de certains paramètres facilement accessibles sur la perte de charge en conduites horizontales et verticales en corrélation avec les modèles les plus connus.

Dispositif expérimental

L'installation comprend une boucle formée d'éléments de tube de verre de 20,4 mm de diamètre. Elle comporte trois sections de mesure : une horizontale et deux verticales (ascendante et descendante). Le mélange liquide solide est mis en mouvement par une pompe centrifuge et un bac de mélange permet de réguler et varier la concentration du matériau solide dans l'écoulement. Le matériau solide utilisé est composé de billes de verre de masse volumique $2\,640\text{ kg/m}^3$ et de courbe granulométrique assez étroite ($\pm 14\%$ du diamètre d_{50}).

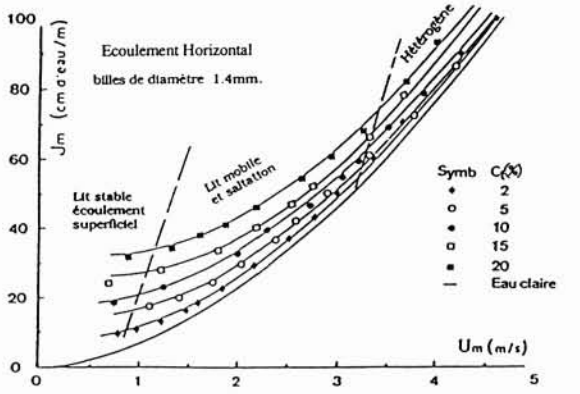
Evolution des pertes de charge

Dans une conduite horizontale, les pertes de charge suivent un schéma bien connu avec un minimum aux faibles vitesses et se rapprochent de la courbe de l'eau aux grandes vitesses. La *figure 1* montre un exemple. Les limites des régimes d'écoulement ont été déterminées visuellement et par vidéo.

Sur cette courbe apparaît l'influence de la concentration de transport, paramètre facilement accessible par la mesure du débit solide + liquide. La concentration spatiale qui est le paramètre le plus représentatif est supérieure à la concentration de transport du fait de la

Transportation of solid materials in pipes

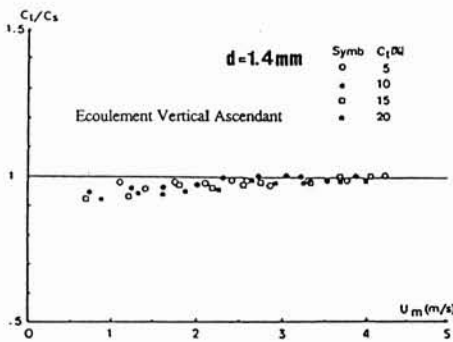
This paper presents an experimental research about flows of water-glass beads mixtures in horizontal and vertical pipes. The influence of particles physical parameters (size, granulometry, shape) on pressure losses, velocity profiles, spacial distribution of the solids and flow regime appearance is studied. We developed non intrusive measuring techniques, like ultrasonic and laser velocimetry, light absorption to get to certain parameters (spacial concentration distribution, particle and fluid local velocities). The results are analysed with the idea of a modelisation of solid-liquid mixture flows.



vitesse de glissement. Nous avons pu déterminer le rapport entre ces deux concentrations grâce à la mesure simultanée des pertes de charge dans les trois parties de l'installation : horizontale, verticale ascendante et verticale descendante, et en supposant que la concentration spatiale est identique dans les trois tronçons de mesure (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de dépôt dans une partie quelconque de la boucle). Dans ces conditions :

$$C_s = \frac{J_{asc} - J_{desc}}{2(\rho_m - \rho_w)}$$

La figure 2 montre C_i/C_s en fonction de la vitesse pour les particules de 1,4 mm.



Profil des vitesses des particules solides

Des mesures plus précises de la vitesse des particules solides ont été faites à l'aide d'une méthode de vélocimétrie ultrasonore pulsée que nous avons développée. L'utilisation d'un tel appareil, initialement à usage médical, auquel nous avons adjoint un système d'acquisition et de traitement du signal Doppler par analyse de Fourier a permis la mesure de la vitesse de particules de taille pouvant atteindre l'ordre du millimètre [3].

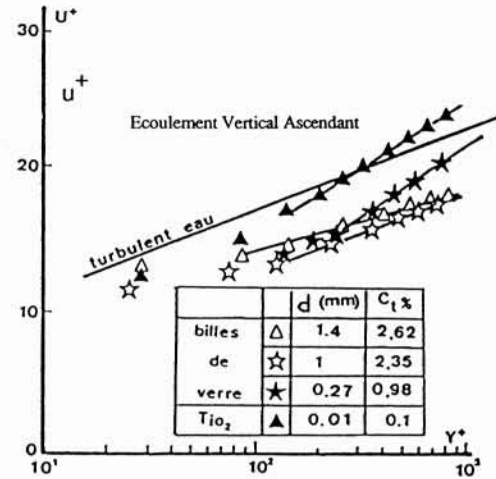
Les résultats obtenus dans un écoulement vertical montrent que la vitesse des particules est inférieure à

celle du fluide et en outre, la vitesse de glissement est supérieure à la vitesse de sédimentation. L'analyse des résultats a permis de calculer la vitesse de frottement u^* et de tracer l'évolution des vitesses réduites :

$$u^+ = u/u^* = f(y^+ = \rho_m u^* y/\mu_w)$$

La figure 3 montre que ces vitesses réduites obéissent à une relation logarithmique semblable à celle de l'eau :

$$u^+ = A \log y^+ + B$$



Nous avons montré que les coefficients A et B évoluent linéairement avec le carré de la concentration. Le diamètre de la particule intervient fortement dans cette évolution et une analyse plus poussée montre que la vitesse de frottement réduite peut être modélisée par une relation logarithmique :

$$u^+ = f(d/D, C_i^2, y^+)$$

qui s'écrit explicitement dans le domaine d'évolution des paramètres sous la forme :

$$u^+ = [(a_1 d/D + b_1) C_i^2 + (a_2 d/D + b_2)] \log y^+ + [(a_3 d/D + b_3) C_i^2 + (a_4 d/D + b_4)]$$

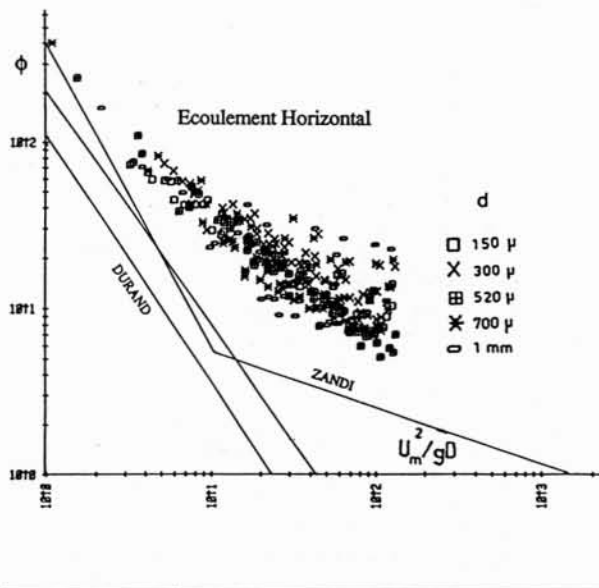
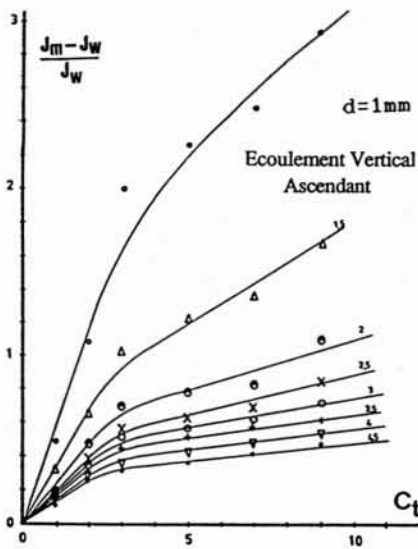
Ce résultat est comparable à celui de BOUVARD-PETKOVIC [4] qui ont obtenu un profil des vitesses réduites parallèle à celui de l'eau pour des grandes particules dans un écoulement en canal ouvert.

Pertes de charge en fonction de la concentration

Les pertes de charge augmentent avec la concentration. Une représentation du gradient hydraulique relatif $(J_m - J_w)/J_w$ montre une évolution linéaire de celui-ci avec la concentration, avec une rupture de pente pour

une concentration voisine de 3 %. La figure 4 montre le cas de l'écoulement vertical. On peut noter qu'une étude théorique, signalée dans [5], a montré que l'évolution de la pente de la courbe de la distance entre particules, de forme géométrique simple et dans un arrangement cubique, en fonction de la concentration augmente fortement pour des concentrations inférieures à 3 %. L'intensité hydrodynamique et les chocs entre particules solides est inversement proportionnelle à la distance relative entre les particules. Il en résulte une augmentation plus rapide de la perte de charge aux concentrations < 3 %.

Notons également que les pentes des droites représentées sur cette figure diminuent avec l'augmentation de la vitesse, ce qui va dans le sens de la diminution de l'influence de la concentration sur la perte de charge aux vitesses élevées.



Modèle de pertes de charge

La représentation des résultats selon des modèles classiques tels ceux de DURAND, ZANDI et NEWITT [6, 7] qui s'expriment tous sous la forme de :

$$\frac{J_m - J_w}{C_t J_w} = K(U^2/gD)$$

montre des divergences notables entre les valeurs mesurées et ces modèles établis avec des matériaux industriels tels que le sable et des diamètres de conduite plus grands. La représentation, avec ce type de modèle, des résultats obtenus pour un ensemble de diamètres de particules se traduit par une dispersion considérable (fig. 5).

Une autre approche est l'étude du coefficient de frottement selon le schéma classique des fluides monophasiques :

$$\lambda = 2 gDJ_m/U_m^2 .$$

Pour les petites particules ($d = 100 \mu\text{m}$), les courbes $\lambda = f(\text{Re})$ sont des droites pratiquement parallèles à celle de BLASIUS et l'introduction de la viscosité de mélange de MOONEY qui tient compte de la concentration :

$$\text{Ln} \left(\frac{\mu_m}{\mu_w} \right) = \frac{2,5 C_s}{1 - 1,4 C_s}$$

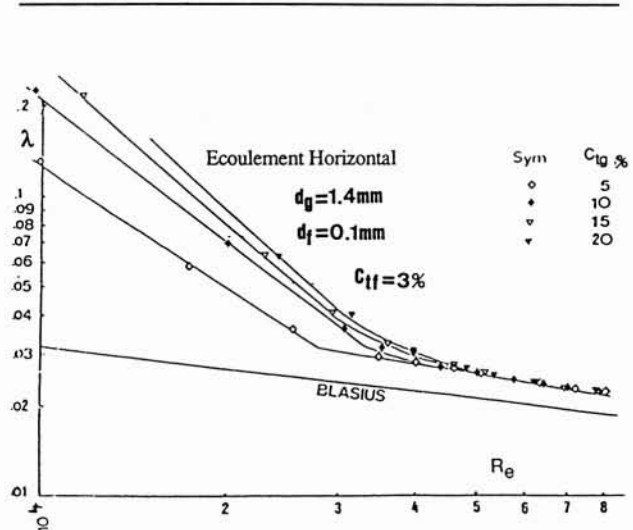
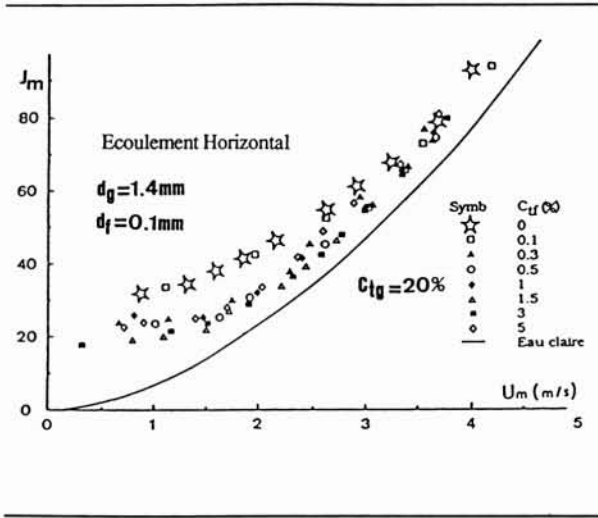
montre une évolution comparable à celle du fluide monophasique. Le modèle de BLASIUS [5] $\lambda = A(\text{Re})^B$, valable pour des fluides homogènes avec des particules microniques, est donc encore bien vérifiée pour des billes de diamètre 0,1 mm.

Avec les grandes particules, l'écoulement est presque toujours hétérogène et l'application du modèle, relativement complexe, de LAZARUS [2] (qui donne des résultats intéressants avec un bon nombre de données expérimentales fournies par la littérature, obtenus avec des fluides le plus souvent différents de l'eau et des diamètres de conduite de 50 mm) conduit dans notre cas à des écarts relativement importants.

Réduction de perte de charge

Les résultats précédents ont été obtenus avec des particules dont la courbe granulométrique est très étroite. Dans le cas contraire, le phénomène est plus complexe et dans certaines conditions granulométriques, on observe une réduction de perte de charge. La figure 6 montre les résultats obtenus lorsque une petite proportion de particules fines (0,1 mm) est ajoutée à des particules de plus grande taille (1,4 mm). On peut voir que ces petites particules réduisent considérablement la perte de charge comparée à celle des grandes particules seules.

Le tracé de λ en fonction de Re (fig. 7) montre une rapide décroissance de λ vers une droite parallèle à celle de BLASIUS. Ceci montre que les particules fines avancent le point de passage de l'écoulement de saltation à l'écoulement hétérogène en modifiant la structure de



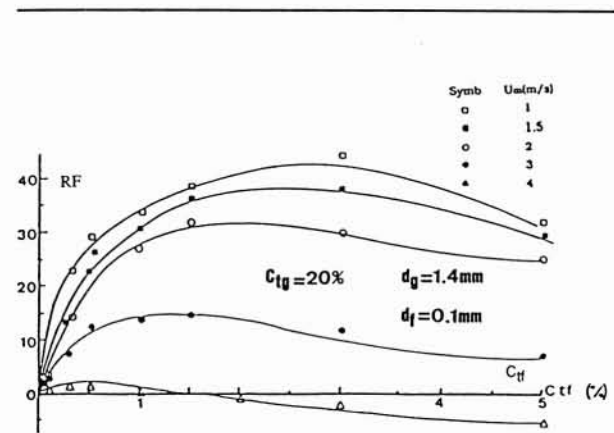
l'écoulement, soit au niveau de la turbulence, soit au niveau des propriétés rhéologiques de la suspension.

Si l'on définit une réduction de frottement par :

$$RF = \frac{J_m - J_{mp}}{J_m}$$

on obtient les résultats présentés sur la figure 8. Notons que la réduction n'est importante qu'aux faibles vitesses, donc surtout dans le régime de saltation. En outre, il apparaît l'existence de conditions optimales de réduction de perte de charge en fonction de la concentration en particules fines.

De plus, cette réduction de perte de charge est différente de celle décrite par BRUHL et KAZANSKI (cités dans [8]) pour un écoulement hétéro-homogène où les particules très fines forment un fluide transporteur de masse volumique supérieure à celle de l'eau. Un examen visuel de l'écoulement montre en effet que le mécanisme du phénomène est à rechercher dans la modification de la structure turbulente de l'écoulement.



Conclusions et perspectives

Ces résultats bien que souvent classiques dans leur ensemble ont montré quelques particularités intéressantes dont les plus significatives sont d'une part l'existence d'une concentration volumique en solide de 3 % où apparaît un changement de comportement du mélange et d'autre part la réduction de la perte de charge par la présence d'une faible quantité de fines particules dans le transport des grandes particules.

Ils ont également montré que les équations numéri-

ques, basées sur les corrélations entre les données présentent de sérieuses divergences parce que ne prenant en compte qu'une partie du phénomène et souffrent de l'absence de bases théoriques.

Le mécanisme physique impliqué dans l'écoulement solide-liquide est donc bien loin d'être simple et des recherches fondamentales sont encore nécessaires, en particulier sur la configuration du champ cinématique des particules et du fluide.

Liste des symboles

C_t	concentration de transport	Re	nombre de Reynolds = $U_m D \rho_w / \mu_m$
C_s	concentration spatiale	Re_m	nombre de Reynolds du mélange = $U_m D \rho_m / \mu_m$
C_{tg}	concentration en particules de grand diamètre	U	vitesse locale
C_{tf}	concentration en particules de petit diamètre	U_m	vitesse de débit du mélange
d	diamètre des particules	u^+	vitesse réduite = u/u^*
d_g	diamètre des grandes particules	u^*	vitesse de frottement = (τ/ρ_m)
d_f	diamètre des petites particules	y^+	coordonnée réduite = $yu^* \rho_m / \mu_m$
D	diamètre de la conduite	λ	coefficient de perte de charge = $2gDJ_m/U_m^2$
J_m	gradient hydraulique du mélange en hauteur d'eau/m	μ	viscosité dynamique du fluide
J_{mp}	gradient hydraulique avec particules fines	μ_m	viscosité dynamique du mélange
J_w	gradient hydraulique du fluide	ρ_w	masse volumique du fluide
		ρ_m	masse volumique du mélange
		Φ	$(J_m - J_w)/C_t J_w$
		τ	contrainte à la paroi

Références

- [1] KESKA J. K. : Förderung von inhomogenen Zwei-Phasen-Gemischen durch Rohrleitungen. Sonderdruck aus Heft 53 (1981) der *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen* der Universität Hanover.
- [2] LAZARUS J. H., NELSON I. D. : A generalised correlation for friction head losses of settling mixtures in horizontal smooth pipelines. *Hydrotransport 5*, 1978.
- [3] BELIBEL C. : *Écoulement en conduite de mélange solide-liquide. Champ des vitesses en écoulement vertical*. Thèse Université de Strasbourg. 1985.
- [4] BOUVARD M., PETKOVIC S. : Vertical dispersion of spherical, heavy particles in turbulent open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 23, 1985, n° 1.
- [5] GOVIER G. W., AZIZ K. : *The complex mixtures in pipes*. Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- [6] DURAND R. : Basic relationships of the transportation of solids in pipes. Experimental research. *Proc. Min. Int. Hyd. Conv.* 1953.
- [7] ZANDI I. : *Advances in solid-liquid flow in pipes and its applications*. Pergamon Press, 1971.
- [8] PARZONKA W., SCRIVENER O. : Modèles rhéologiques appliqués au transport de solides en conduites. *Congrès de rhéologie*, Strasbourg, 1986.