



EFFETS VISCOÉLASTIQUES DANS LES MESURES DES PRESSIONS STATIQUES ET D'ARRÊT

Communication présentée au
Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France
le 20 mars 1970

PAR D. FRUMAN *, G. LOISEAU **
ET P. SULMONT ***

1. — Introduction

On s'accorde pour appeler diluées les solutions de macromolécules pour lesquelles les distances entre molécules dissoutes, et supposées distribuées d'une manière homogène au sein du fluide, sont de l'ordre de grandeur des dimensions moyennes de celles-ci, définies par leur rayon de giration, R_G . Suivant leurs caractéristiques chimiques et mécaniques les propriétés des fluides obtenus à partir de solvants newtoniens sont très différents de celles du solvant. Ces comportements « anormaux » se traduisent différemment suivant qu'il s'agisse de l'écoulement turbulent ou laminaire des solutions.

Dans le premier cas la résistance de frottement turbulente se trouve fortement diminuée (effet Toms) aussi bien dans les écoulements internes [1, 2, 3, 4], qu'externes [4, 5, 6]. Dans les premiers on atteint des réductions de l'ordre de 75 % du coefficient de frottement turbulent newtonien du solvant, et ceci pour des concentrations de dix parts par million en poids d'un polymère très efficace en solution aqueuse [4]. La résistance d'une plaque plane sans incidence se déplaçant dans la même solution se voit réduite de 60 % [4, 5]. Ces deux valeurs montrent l'intérêt pratique indéniable de ces fluides. Un certain nombre de travaux ont été consacrés à des explications plausibles de cet effet [7, 8, 9, 10], presque toutes s'accordant sur l'influence des caractéristiques viscoélastiques de ces solutions.

Dans certains écoulements laminaires on met en évidence l'existence de différences de contraintes normales non nulles ce qui traduit aussi un comportement viscoélastique. La mise en évidence de ces phénomènes, connus sous le

nom d'*effet Weissemberg*, ainsi que l'interprétation qui permet l'obtention des paramètres élastiques de ces fluides a été à l'origine d'un grand nombre de travaux [11, 12, 13, 14, 15]. Les méthodes décrites sont néanmoins d'une utilisation pratique assez délicate dans le cas des solutions diluées.

Les propriétés élastiques de ces solutions se traduisent dans certains types d'écoulements par des phénomènes inattendus et souvent gênants, surtout quand il s'agit d'influences qui faussent les instruments de mesure. Au cours d'essais dans des conduites il a été constaté par différents auteurs [16, 17, 18], des écarts entre les débits obtenus par intégration des vitesses mesurées au moyen de tubes de Pitot, et ceux mesurés par pesée ou par volumétrie. Il s'agit là, en fait, de la mise en évidence globale d'un phénomène qui prend naissance au point d'arrêt des sondes, et sur lequel peu d'études systématiques ont été effectuées jusqu'à présent. Des phénomènes similaires à celui remarqué dans le cas des prises de pression totale ont été mis en évidence récemment [19] pour les prises de pression statiques dans des conditions particulières de fonctionnement.

Ce mémoire présente quelques résultats expérimentaux concernant les effets viscoélastiques qui apparaissent dans ces deux types de prises de pression. L'influence de la géométrie des sondes à pression d'arrêt et de leurs dimensions, de la concentration des solutions, et de la vitesse de l'écoulement est analysée, tout en tâchant de définir les paramètres adimensionnels les plus caractéristiques. En ce qui concerne les pressions statiques les résultats dont on dispose sont encore trop fractionnaires pour pouvoir en tirer des conclusions générales.

* Chargé de Recherches, C.N.R.S., Laboratoire d'Aérodynamique, Orsay.

** Chercheur, Laboratoire d'Aérodynamique, Orsay.

*** Maître de Conférences, E.N.S.M., Nantes.

2. — Comportement des prises de pression totale

Le fonctionnement et la réponse des prises de pression totale en fluide newtonien incompressible peuvent être considérés comme connus. Des travaux importants ont été consacrés à ce sujet [20].

Quand les dimensions des sondes, caractérisées par leur diamètre R , deviennent trop faibles, de sorte que le nombre de Reynolds, Re , défini par la vitesse de l'écoulement à mesurer, V_0 , est inférieur à 200, on constate que la pression d'arrêt mesurée est supérieure à la pression dynamique réelle $\rho V_0^2/2$. Les effets visqueux conduisent donc à surestimer la valeur de la vitesse.

Dans le cas des fluides viscoélastiques l'effet est contraire. La pression d'arrêt mesurée est inférieure à la pression dynamique, la vitesse étant supposée connue. Comme il a été indiqué, les premières constatations expérimentales de ces effets ont eu lieu au cours des mesures des profils des vitesses dans les conduites. Des écarts importants, de l'ordre de 10 à 15 %, entre les débits calculés par intégration des vitesses et ceux mesurés indépendamment sont apparus [17, 18].

Néanmoins, ces études ne permettaient pas d'établir d'une manière claire les causes réelles de ce comportement. En effet, outre le fait que la vitesse locale réelle de l'écoulement n'était pas connue et que les comparaisons étaient seulement faites entre les vitesses déduites des mesures de pression dynamique dans les solutions et le solvant, l'influence réciproque des dimensions et de la forme géométrique des sondes et des gradients de vitesse de l'écoulement empêchait toute interprétation de ces résultats.

Tulin [21], Metzner et Astarita [16] ont donné une analyse qualitative du phénomène. D'une façon générale il est montré que si le rapport entre le temps caractéristique du fluide et le temps propre de l'écoulement, inverse du gradient des vitesses au point d'arrêt, est supérieur à l'unité, les molécules se trouvent fortement élonguées dans la direction des gradients positifs [21]. Cette élongation entraînerait l'apparition de contraintes normales qui modifient la mesure de la pression d'arrêt.

Il pourrait être intéressant d'utiliser la réponse du tube de Pitot pour estimer les temps de relaxation ou les différences des contraintes normales. Cette optique a été suggérée la première fois par J.G. Savins [22], mais le raisonnement alors employé semble injustifié, étant donné que l'on négligeait l'influence de la forme géométrique des sondes, et que l'on déduisait les contraintes normales en ne considérant que les gradients de vitesse de l'écoulement laminaire à l'intérieur d'une conduite.

3. — Paramètres caractéristiques

L'écart de pression, Δp , différence entre la pression d'arrêt et la pression dynamique réelle, est fonction de la vitesse de l'écoulement, V_0 , de la dimension de la sonde $D_e =$ diamètre extérieur, de la viscosité, μ , de la masse spécifique, ρ , et d'un paramètre caractéristique du comportement élastique, G , module d'élasticité du cisaillement. On aura donc :

$$\Delta p = f(V_0, D_e, \mu, \rho, G)$$

en arrangeant ces paramètres convenablement on obtient :

$$\Delta p = f\left(\rho V_0^2, \mu \frac{V_0}{D_e}, G\right)$$

ou encore :

$$\frac{\Delta p}{\rho V_0^2} = f_1\left(Re^{-1}, \frac{GD_e}{\mu V_0} \times Re^{-1}\right) \quad (1)$$

On retrouve bien le résultat connu pour un fluide newtonien, c'est-à-dire une variation de l'écart de pression adimensionnel proportionnelle à l'inverse du nombre de Reynolds. Le rapport μ/G est équivalent à un temps et caractérise le fluide considéré. Multiplié par l'inverse du temps caractéristique de l'écoulement il définit un nombre adimensionnel : le *nombre de Deborah*, D .

Dans l'analyse simplifiée qui vient d'être faite il n'a pas été tenu compte des caractéristiques dynamiques propres à chaque écoulement. Il est en effet évident que la forme géométrique des sondes modifie le gradient des vitesses de l'écoulement potentiel au voisinage du nez de celles-ci.

4. — Installation expérimentale

L'installation expérimentale est constituée par un bassin circulaire de 125 cm de rayon moyen et d'une largeur de 50 cm. La hauteur du fluide dans le canal peut dépasser 50 cm. Un bras tournant, mû par un moteur électrique à tension de stator variable, permet l'entraînement d'une sonde dans le canal. Les vitesses atteintes sont comprises entre 1 et 12 m/s, mais elles ne sont stables qu'à partir de 3 m/s. La mesure de pressions est faite au moyen d'un capteur à membrane, à jauges de contraintes ou potentiométrique, placé à l'extérieur des éléments tournants. Dans ces cas, pour un fluide newtonien, la pression d'arrêt, égale à la pression dynamique, sera équilibrée exactement par les forces d'inertie du fluide contenu dans l'ensemble des conduites menant de la sonde au joint tournant placé sur l'axe de rotation du bras; et ceci à condition que la vitesse d'entraînement produite par les parties immergées soit nulle. Pour les solutions testées la pression mesurée correspond donc à la différence Δp .

Dans les premières expériences effectuées avec de l'eau on avait constaté des vitesses d'entraînement de l'ordre de 1,5 % de la vitesse réelle dans la gamme la plus élevée de celles-ci. De manière à réduire cet écart deux plaques diamétralement opposées et percées de façon à permettre le passage de la sonde et de son support furent disposées dans le canal. On obtenait grâce à ce dispositif une nette amélioration puisque la vitesse d'entraînement reste toujours inférieure à 0,5 %.

5. — Produits utilisés

Le produit utilisé dans la préparation des solutions était du polyoxyéthylène, connu sous le nom commercial de Polyox, qualité WSR 301 (*). Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un polymère de l'oxyde d'éthylène à chaîne linéaire. Le nombre de molécules du monomère pouvant être liées ensemble peut atteindre 500 000. Le produit obtenu est cristallin, soluble dans l'eau, et possède d'importantes propriétés épaississantes quand il est dissout. Ainsi le WSR (Water Soluble Resin) 301 donne une viscosité de l'ordre de 3 000 cps en solution aqueuse de 1 % [23]. Pour ces valeurs

(*) Fabriqué par Union Carbide Co.

très élevées de la viscosité le fluide présente des caractéristiques pseudo-plastiques très prononcées.

Le poids moléculaire de ce polymère, estimé par le fabricant, est de l'ordre de 4×10^6 . Des mesures par diffusion de la lumière effectuées au Centre de recherches sur les macromolécules (Strasbourg) donnent, en utilisant comme solvant le méthanol, un poids moléculaire de $1,8 \times 10^6$ et un rayon de giration de 1 200 Å.

Pour la préparation des solutions il est nécessaire de prendre beaucoup de précautions si l'on veut éviter la dégradation des molécules. En effet, soumises à des taux de cisaillement élevés, par une agitation trop forte par exemple, il se produit une chute de la viscosité, dans les solutions très concentrées, ou une diminution des propriétés réductrices du frottement pour les solutions très diluées [4, 24].

Le processus de mélange employé consistait à disperser d'abord le poids de polymère dans de l'alcool pur, ensuite cette dispersion était versée, soit directement dans le canal, soit dans un réservoir permettant d'obtenir une solution très concentrée. Au cours de cette opération l'eau était brassée, au moyen d'un agitateur portatif, de manière à provoquer un mélange le plus homogène possible. Pour diminuer les effets de la dégradation « biologique » on ajoutait à la solution une certaine quantité de formaldéhyde (de l'ordre de $100 \text{ cm}^3/\text{m}^3$). La stabilité des solutions peut aussi être affectée par le pH du solvant. Aucune précaution particulière n'a été néanmoins prise pour contrôler son influence. La viscosité des solutions était mesurée soit avec un viscosimètre à tube capillaire, soit avec un viscosimètre à cylindres. On a tenu compte de ces valeurs dans l'analyse des résultats.

6. — Analyse des résultats expérimentaux

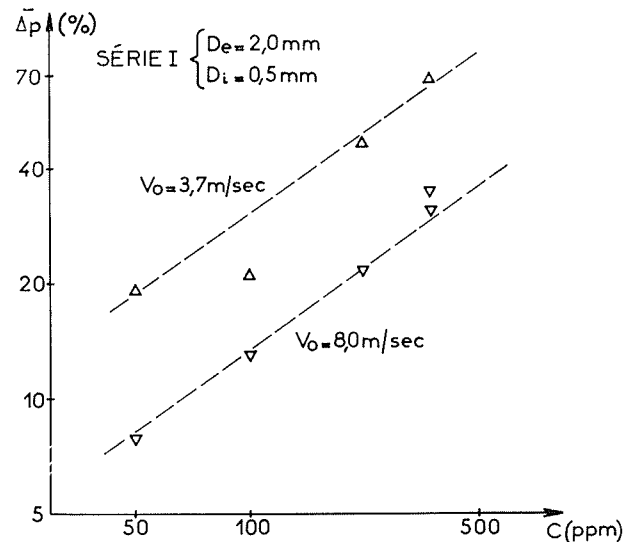
On ne donnera ici que quelques-uns des résultats obtenus, en les présentant de façon à mettre en évidence l'influence des différents paramètres caractéristiques du phénomène. Pour une revue complète de ces résultats on se rapportera à [25]. Quatre types de sondes, ayant des caractéristiques géométriques différentes furent testées : les deux premières séries de tubes de Pitot, de différents diamètres extérieurs, sont à bout hémisphérique; pour la série I le diamètre de la prise de pression est constant, pour la série II le rapport des deux diamètres est conservé. La série III est constituée de tubes à bord vif définis par le seul diamètre extérieur. Enfin un seul test a été fait avec une sonde à aspiration [20].

6.1 Influence de la concentration.

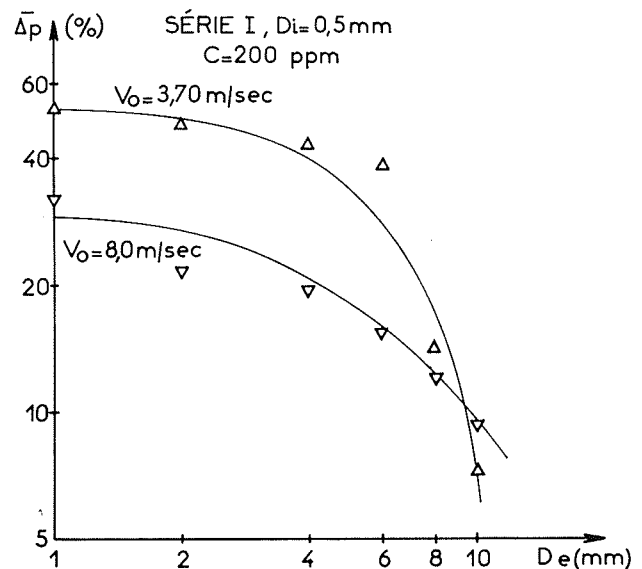
Si l'on garde constante la forme géométrique de la sonde, ses dimensions et la vitesse d'avancement, l'augmentation de la concentration se traduit par une augmentation du déficit de pression adimensionnelle. La figure 1 montre la variation de $\bar{\Delta p}$ en fonction de la concentration pour une sonde hémisphérique de diamètre extérieur, D_e , égal à 2 mm et intérieur, D_i , de 0,5 mm, pour deux vitesses d'avancement : 3,70 et 8,00 m/s.

6.2 Influence des dimensions des sondes.

On peut comparer d'abord l'influence du diamètre extérieur, quand celui de la prise de pression reste inchangé, cas de la série I, pour les mêmes vitesses que dans le paragraphe 6.1 et une concentration de 200 ppm (fig. 2).



1/ Variation du $\bar{\Delta p}$ avec la concentration à vitesse constante. Variation of $\bar{\Delta p}$ with concentration at constant velocity.



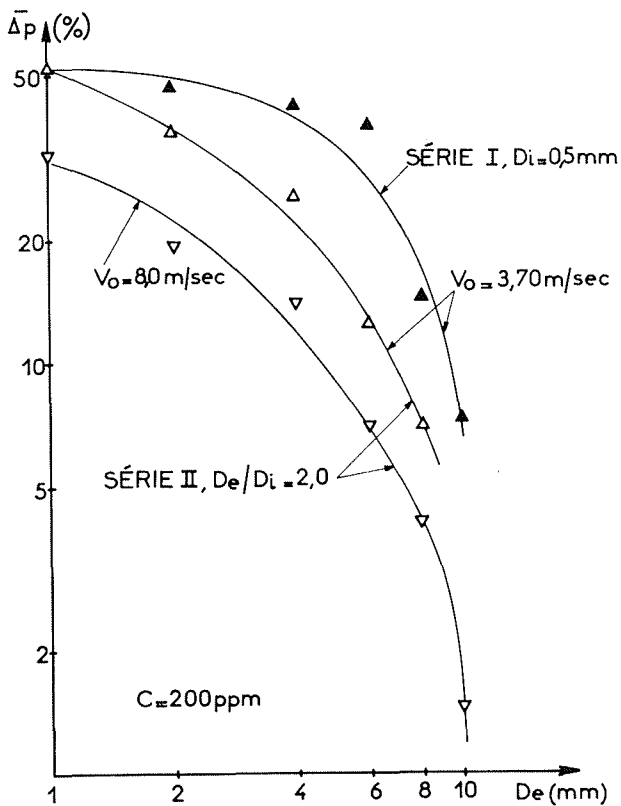
2/ Variation du $\bar{\Delta p}$ avec le diamètre extérieur à vitesse et diamètre intérieur constants. Variation of $\bar{\Delta p}$ with outside diameter, for constant velocity and inside diameter.

On remarque que la valeur de $\bar{\Delta p}$ décroît rapidement quand le diamètre extérieur croît. Une constatation similaire se dégage des résultats obtenus avec les sondes de la série II (fig. 3). On voit que le $\bar{\Delta p}$ diminue beaucoup plus rapidement dans la série II que dans la I. L'influence du diamètre de la prise de pression est donc similaire à celle du diamètre extérieur des sondes.

6.3 Influence de la géométrie des sondes.

La géométrie des sondes semble avoir une grande influence sur la mesure du déficit de pression. Les raisons en ont été signalées dans le chapitre III. La figure 4 montre les résultats obtenus avec trois sondes d'égal diamètre extérieur, mais ayant des formes d'étrave complètement différentes, en fonction de la vitesse d'avancement.

Les essais ont été effectués dans la même solution, chaque



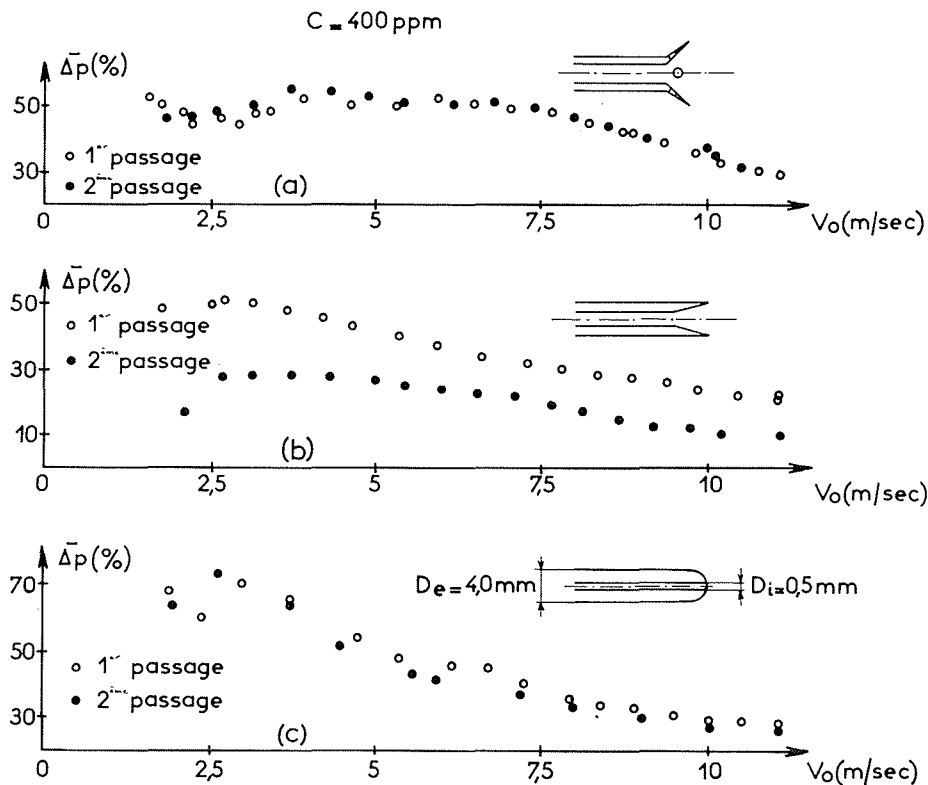
3/ Variation of $\overline{\Delta p}$ with the outside diameter at constant velocity and constant diameter ratio.
 Variation of $\overline{\Delta p}$ with outside diameter, for constant velocity and diameter ratio.

sonde a été testée deux fois dans l'ordre suivant : (a), (b), (c). Si on compare les résultats obtenus au cours du premier passage, on constate un comportement nettement différent des trois sondes. Pour la sonde à bout hémisphérique (c) la valeur du $\overline{\Delta p}$ maximale est de l'ordre de 70 %, valeur très supérieure au maximum atteint par les deux autres sondes. Dans les cas (c) et (b) ces valeurs sont assez nettement caractérisées puisque les courbes décroissent régulièrement quand la vitesse augmente. Par contre pour (a) la valeur maximale ne varie pratiquement pas sur une gamme assez large de la vitesse, le $\overline{\Delta p}$ décroît ensuite assez rapidement, aux grandes vitesses, vers une valeur sensiblement égale à celle de (c) et supérieure à celle de (b).

Sur les résultats obtenus au deuxième passage on remarque que pour (a) et (c) les différences entre les deux essais sont très faibles ; par contre pour la sonde à bord vif elles sont notables. Il semble difficile de pouvoir expliquer ce phénomène étant donné le peu de renseignements dont on dispose. Néanmoins, il semblerait possible qu'un processus de dégradation locale se produise au nez de cette sonde entraînant l'effet constaté. Cette hypothèse nécessite cependant une confirmation expérimentale plus complète.

6.4 Influence de la vitesse.

De tous les paramètres à considérer, la vitesse de l'écoulement, et tout particulièrement le gradient de celle-ci à l'approche de la sonde, est de loin le plus important. L'interprétation de son influence s'avère cependant très délicate. Si l'on considère le paramètre défini par le rapport V_o/D_e (fig. 5 et 6) en prenant la vitesse constante et en faisant varier les diamètres extérieurs pour une série de sondes donnée on observe un comportement qui est attendu, puisqu'il est similaire à celui constaté dans les figures 2 et 3.



4/ Variation of $\overline{\Delta p}$ with velocity for various probe tip shapes.
 Variation of $\overline{\Delta p}$ with velocity, for various probe tip shapes.

C'est-à-dire quand V_o/D_e diminue, augmentation du D_e , le $\overline{\Delta p}$ diminue aussi. Les valeurs de $\overline{\Delta p}$ obtenues diffèrent néanmoins suivant la vitesse prise en considération ; quand celle-ci augmente, à l'intérieur de la gamme étudiée (3 à 10 m/s), les $\overline{\Delta p}$ diminuent. Si l'on définit par contre V_o/D_e en conservant D_e constante et en faisant varier la vitesse l'on constate un résultat bien différent (fig. 4(c)) ; le $\overline{\Delta p}$ diminue quand V_o/D_e augmente.

Il est difficile d'établir dans ces conditions une corrélation quelconque en fonction de V_o/D_e , en effet, pour une même valeur de ce paramètre, c'est-à-dire égal à gradient des vitesses, deux pitots de diamètre différent mais d'égale géométrie donnent des $\overline{\Delta p}$ très largement différents.

7. — Mesures de pressions statiques

Des expériences ont été conduites en vue de déterminer quelle était l'étendue réelle de la portion de contour des corps bidimensionnels sur laquelle le déficit de pression pouvait se faire sentir. Par commodité on a utilisé des cylindres circulaires qui étaient plongés verticalement dans l'eau ou la solution contenue dans le bassin (cf. chapitre 4). Ces essais ont porté sur des corps ayant 4, 8 ou 16 mm de diamètre. Un orifice circulaire de prise de pression de 0,5 mm de diamètre était placé à mi-hauteur. Les deux premiers cylindres avaient 80 mm de longueur et le dernier 100 mm. Celui-ci était limité par deux flasques horizontaux pour atténuer les effets de bout. Un support profilé permettait d'entraîner les cylindres à une profondeur d'immersion de l'ordre de 20 cm. On mesurait les pressions autour des corps en plaçant la prise de pression dans différentes positions angulaires par simple rotation du cylindre.

On a utilisé une solution de concentration unique 100 ppm de Polyox WSR 301 préparée dans les mêmes conditions que pour les expériences relatées plus haut. Les cylindres de 4 et 8 mm ont été testés à deux vitesses différentes, 3,80 et 7,60 m/s, celui de plus grand diamètre n'a pu être essayé qu'à la vitesse la plus basse étant donnée la puissance disponible au moteur d'entraînement.

7.1 Analyse des premiers résultats.

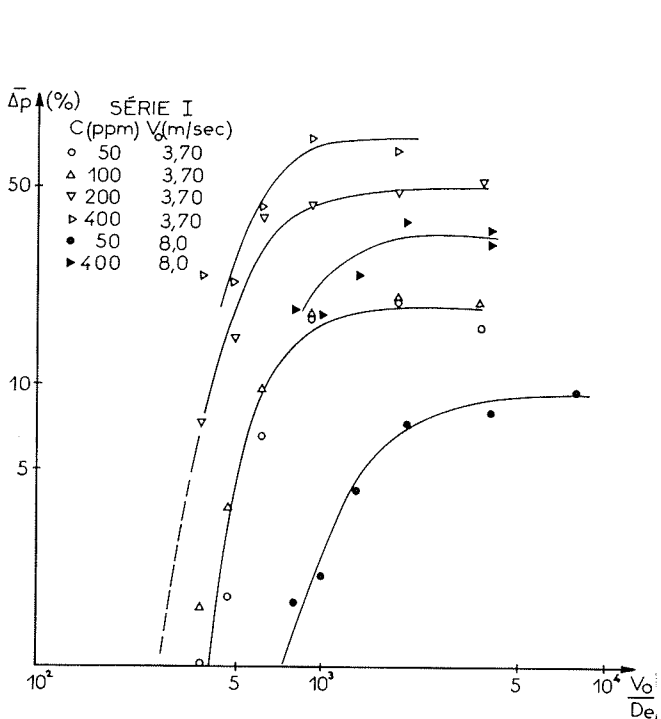
Les figures 7, 8 et 9 montrent des variations notables entre les coefficients de pression :

$$C_p = \frac{p - p_0}{\rho V_o^2 / 2}$$

mesurés dans la solution de polymère et ceux mesurés dans le solvant. Dans ce dernier on constate pour les trois cylindres essayés une bonne reproductibilité des mesures. Des légers écarts sont constatés au point d'arrêt, ceux-ci sont dus à un entraînement de l'eau dans le bassin. La répartition de pression relevée est alors typiquement laminaire avec un point de décollement situé approximativement à 80° sauf pour le cylindre de plus petit diamètre où il se situerait aux environs de 90°.

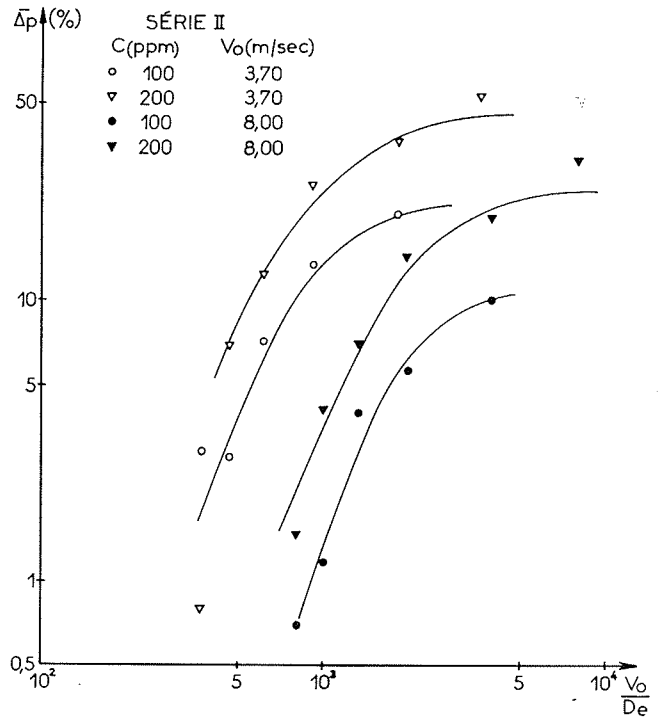
Comme pour les tubes de Pitot, dans la solution de polymère, le C_p au point d'arrêt est inférieur à l'unité. Il reste pratiquement partout inférieur à celui du solvant sauf dans une faible zone située en arrière du cylindre. Cette zone peu étendue pour le cylindre de 4 mm, augmente avec le diamètre à vitesse constante.

L'allure générale des courbes de répartitions de C_p obtenue font penser que la diminution de C_p ne peut pas être entièrement imputée à des effets élastiques mais à une modification profonde de l'écoulement.



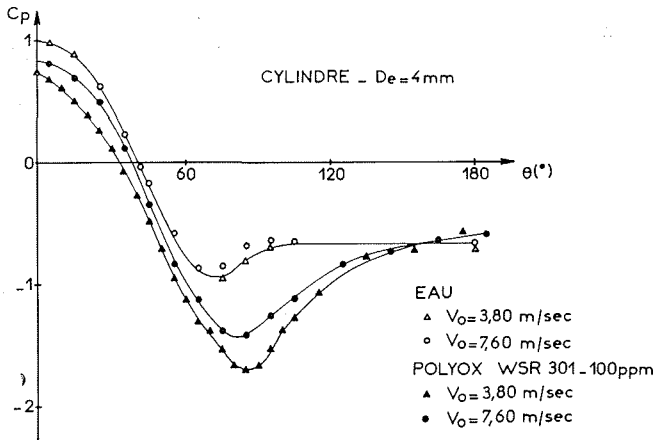
5/ Variation du $\overline{\Delta p}$ avec le rapport entre la vitesse et le diamètre extérieur, à diamètre intérieur constant.

Variation of $\overline{\Delta p}$ with velocity/outside diameter ratio, for constant inside diameter.



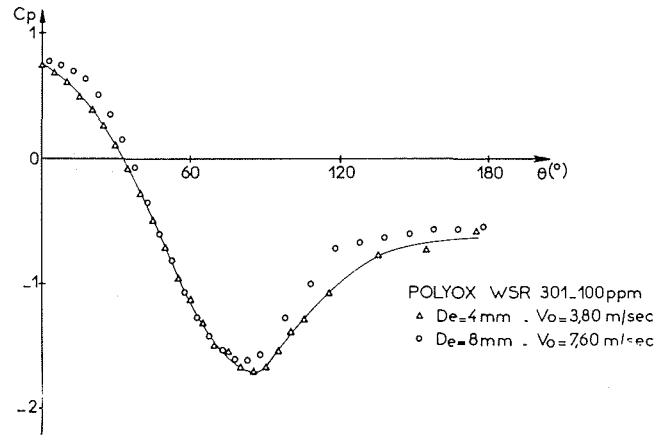
6/ Variation du $\overline{\Delta p}$ avec le rapport entre la vitesse et le diamètre extérieur, à rapport des diamètres constant.

Variation of $\overline{\Delta p}$ with velocity/outside diameter ratio, for constant diameter ratio.



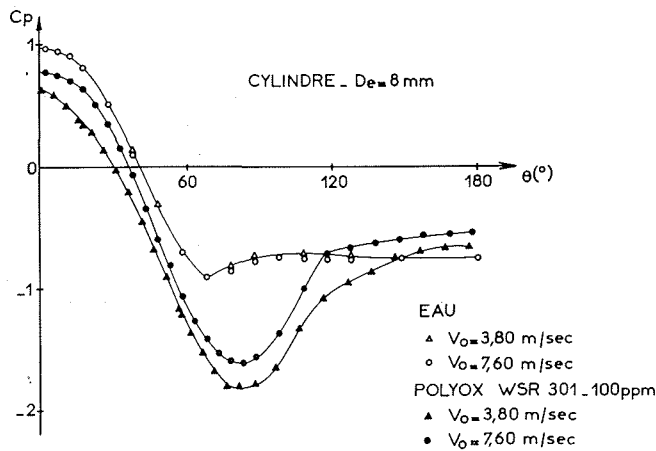
7/ Distribution du C_p sur le contour d'un cylindre circulaire de 4 mm de diamètre.

Distribution of C_p on the periphery of a 4 mm dia./circular cylinder.



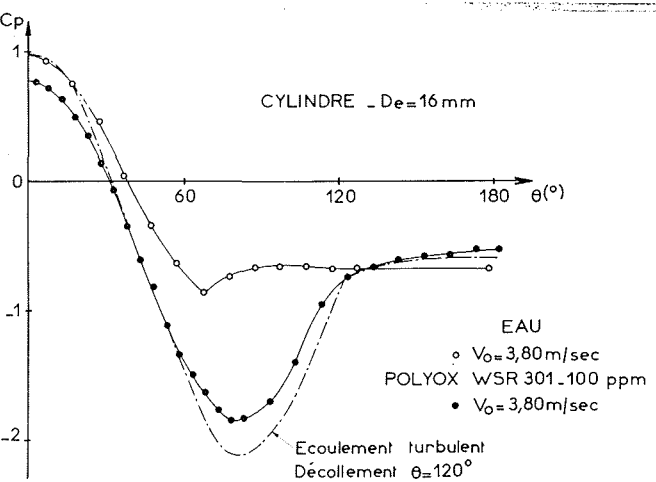
10/ Comparaison de la distribution du C_p pour deux cylindres circulaires ayant le même rapport V_0/D_e .

Comparison between C_p distributions for two circular cylinders with the same V_0/D_e ratio.



8/ Distribution du C_p sur le contour d'un cylindre circulaire de 8 mm de diamètre.

Distribution of C_p on the periphery of an 8 mm dia./circular cylinder.



9/ Distribution du C_p sur le contour d'un cylindre circulaire de 16 mm de diamètre.

Distribution of C_p on the periphery of a 16 mm dia./circular cylinder.

En effet, on peut comparer la distribution de C_p correspondant à la figure 9 à celle obtenue pour un écoulement turbulent [26] avec décollement à 120° — la similitude des courbes est assez remarquable, ce qui tendrait à prouver que bien que le régime de l'écoulement dans la solution soit encore laminaire, la structure serait suffisamment modifiée pour que le décollement n'apparaisse qu'à 120° . Si l'on admet cette hypothèse les effets élastiques ne se feraient sentir que dans la région voisine du point d'arrêt et, avec un effet inverse, dans la région située à 90° de la direction de l'écoulement.

Sur la figure 10 on a porté les résultats pour deux essais ayant le même rapport D_e/V_0 , on remarque que c'est au voisinage du point d'arrêt et de 90° qu'apparaissent les écarts les plus importants.

8. — Conclusion

On pense avoir montré l'importance des effets secondaires produits par les solutions diluées de macromolécules sur des instruments de mesure, tubes de Pitot, prises de pression statique.

Les tentatives en vue d'obtenir, à partir des pressions d'arrêt, des corrélations qui auraient permis de déterminer des paramètres caractéristiques des différentes solutions n'ont pas données les résultats escomptés. De nouvelles recherches s'avèrent nécessaires en particulier dans la zone des basses vitesses qui n'a pas pu être explorée dans ce travail. On peut s'attendre que pour celles-ci il apparaisse une branche descendante des courbes représentatives des Δp en fonction des gradients. S'il en était ainsi les raisons pour lesquelles, après avoir atteint les valeurs maximales, le Δp diminue doivent pouvoir être élucidées.

Les quelques résultats présentés ont le mérite de permettre un choix nouveau des valeurs intéressantes des paramètres.

En ce qui concerne les prises de pression statiques on devrait pouvoir déterminer quelle est la part prise effectivement par les phénomènes élastiques et celle qui est due à des modifications des conditions de décollement dans la zone en recompression.

9. — Remerciements

La direction des Recherches et moyens d'essais finança partiellement ces travaux (Convention n° 67.34.434.00. 480.75.00). Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude à M. le Professeur Malavard, directeur du Laboratoire d'Aérodynamique, de l'intérêt constant qu'il a porté à ces recherches.

10. — Références

- [1] SAVINS (J.G.). — Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow. *Society of Petroleum Engineers Journal*, n° de septembre 1964, pp. 203-214.
- [2] METZNER (A.B.) et PARK (M.G.). — Turbulent flow characteristics of viscoelastic fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 20, n° 2, pp. 291-303 (1964).
- [3] VIRK (P.A.), MERRILL (E.W.), MICKLEY (H.S.), SMITH (K.A.) and MOLLO-CHRISTENSEN (E.L.). — The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 30, n° 2, pp. 305-328 (1967).
- [4] FRUMAN (D.H.) et SULMONT (P.). — Recherches sur la réduction de la résistance de frottement en hydrodynamique. A.T.M.A., mai 1970.
- [5] FRUMAN (D.H.) et SULMONT (P.). — Réduction de la résistance de frottement d'une plaque plane dans les solutions de polymères. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 268, pp. 1493-1496.
- [6] LEVY (J.) et DAVIS (S.). — Drag measurements on a thin plate in dilute polymer solutions. *International Shipbuilding Progress*, vol. 14, n° 152 (1967).
- [7] ASTARITA (G.). — Possible interpretation of the mechanism of drag reduction in viscoelastic liquids. *I. and E.C. Fundamentals*, vol. 4, n° 3, pp. 354-356 (août 1965).
- [8] LUMLEY (J.L.). — The reduction of skin friction drag. Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, Ship Motion, Drag Reduction, Bergen, Norvège, 1964.
- [9] LUMLEY (J.L.). — The Toms Phenomenon: anomalous effects in turbulent flow of dilute solutions of high molecular weight linear polymers. *Applied Mechanics Review*, vol. 20, n° 12, pp. 1139-1149 (décembre 1967).
- [10] PATTERSON (G.K.) et ZAKIN (J.L.). — Prediction of drag reduction with a viscoelastic model. *A.I.Ch.E. Journal*, vol. 14, n° 3, pp. 434-439 (mai 1968).
- [11] WEISSENBERG (K.). — A Continuum theory of rheological phenomena. *Nature*, vol. 159, pp. 310-311 (mars 1947).
- [12] LODGE (A.S.). — Elastic liquids. *Academic Press* (1964).
- [13] WHITE (J.L.) et METZNER (A.B.). — Measurement of normal stresses. *Transactions of the Society of Rheology*, VII, pp. 295-301 (1963).
- [14] COLEMAN (B.D.) et MARKOVITZ (H.). — Normal stress effects in second order fluids. *Journal of Applied Physics*, vol. 35, n° 1, pp. 1-9 (janvier 1964).
- [15] FERRY (J.D.). — Viscoelastic properties of Polymers. *John Wiley and Sons*, p. 82 (1961).
- [16] METZNER (A.B.) et ASTARITA (G.). — External flows of viscoelastic materials: fluid property restrictions on the use of velocity-sensitive probes. *A.I.Ch.E. Journal*, vol. 13, n° 3, pp. 550-555 (mai 1967).
- [17] SMITH (K.A.), MERRILL (E.W.), MICKLEY (H.S.) et VIRK (P.S.). — Anomalous Pitot tube and hot film measurements in dilute polymer solutions. *Chemical Engineering Science*, vol. 22, pp. 619-626 (1967).
- [18] ASTARITA (G.) et NICODEMO (L.). — Velocity distributions and normal stresses in viscoelastic turbulent pipe flow. *A.I.Ch.E. Journal*, vol. 12, n° 3, pp. 478-484.
- [19] FRUMAN (D.H.) et SULMONT (P.). — Distribution de la pression à la surface d'obstacles de forme géométrique simple en mouvement uniforme dans des solutions diluées de polymères. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 270, pp. 69-72 (1970).
- [20] BARAT (M.). — Contribution à la mesure des pressions dans les écoulements turbulents. Thèse, *Faculté des Sciences de Paris* (1965).
- [21] TULIN (M.P.). — Hydrodynamic aspects of macromolecular solutions. Sixth Symposium Naval Hydrodynamics, *ACR-136*, Washington, D.C.
- [22] SAVINS (J.G.). — A Pitot tube method for measuring the first normal stress difference and its influence on laminar velocity profile determinations. *A.I.Ch.E. Journal*, vol. 11, n° 4, pp. 673-677 (juillet 1965).
- [23] *The Oil and Gas Journal*, p. 68 (novembre 1957).
- [24] FRUMAN (D.H.), SULMONT (P.) et LOISEAU (G.). — Mesure de vitesses dans les fluides viscoélastiques au moyen de tubes de Pitot. *Journal de Mécanique*, vol. 8, n° 4, pp. 463-475 (1969).
- [25] LOISEAU (G.). — Comportement des tubes de Pitot dans les fluides viscoélastiques. Thèse, *Faculté des Sciences de Paris* (février 1970).
- [26] THWAITES (B.). — Incompressible aerodynamics. *Clarendon Press*, p. 168 (1960).

Discussion

Président : M. A. MAYER

Sur l'invitation de M. le Président, M. FRUMAN présente cette communication en ces termes :

« Depuis quelques années, notre laboratoire s'intéresse au problème de la réduction de la résistance de frottement turbulent en hydrodynamique. Les solutions aqueuses faiblement concentrées de certains polymères donnent des résultats très intéressants et prometteurs. L'analyse des causes probables de ce phénomène de réduction de la contrainte de cisaillement nécessite néanmoins la connaissance des caractéristiques rhéologiques de ces solutions.

Malgré son caractère plus abstrait, l'étude que nous présentons aujourd'hui est étroitement liée à cette direction de recherche.

Notre mémoire donne les résultats d'un travail préparatoire sur l'important problème de la mesure des pressions d'arrêt dans les écoulements de solutions de macromolécules; une telle mesure devrait rendre possible la détermination des paramètres élastiques caractéristiques des solutions testées. »

Après avoir remercié le conférencier, M. le Président ouvre la discussion.

Vivement intéressé par l'exposé de M. LOISEAU, M. SACKMANN

(Laboratoire de mécanique des fluides, Strasbourg) observe qu'il serait intéressant :

- 1° « De connaître le résultat des essais concernant des tubes de Pitot dans le cas où le fluide serait une solution de gomme de Guar (pseudo-plastique).
- 2° De choisir comme profil du tube de Pitot, celui dit de Prandtl (qui est d'ailleurs normalisé) et qui est caractérisé au sommet par un élargissement du canal intérieur.
- 3° De pouvoir étudier l'évolution de la pression, dans le fluide, sur l'axe du Pitot, les valeurs extrêmes étant :
— la pression statique à l'infini amont,
— la pression totale sur le nez du Pitot. »

M. FRUMAN a bien voulu nous faire parvenir le résumé ci-après de la réponse qu'il a faite en séance aux questions ci-dessus, et de l'échange de vue qui en est résulté :

« M. le Professeur SACKMANN nous a fait l'honneur d'intervenir dans la discussion de notre note et nous l'en remercions vivement. En ce qui concerne l'influence de la turbulence, due au passage de

la sonde sur son propre sillage, nous sommes d'accord avec lui pour penser qu'elle doit être négligeable. Néanmoins, il nous semble qu'une vérification expérimentale s'impose.

Nous avons pensé dans notre première analyse des résultats des mesures de pression statique sur le cylindre que les effets élastiques se faisaient sentir sur une portion importante du contour, angle au centre d'approximativement 140°. En effet, quand on compare les points obtenus dans la solution de POLYOX et ceux mesurés dans le solvant on s'aperçoit que l'écart de pression entre eux reste pratiquement constant dans cette zone. On peut alors supposer, comme le signale M. SACKMANN, que tout se passe comme si une membrane élastique entourait l'avant du cylindre. Cependant, l'analyse peut être faite d'une façon différente. Du fait qu'à l'arrière du cylindre se produit un phénomène, dont la nature nous est encore inconnue, qui tend à recoller l'écoulement faisant passer d'un angle de 80° pour le solvant à un angle de 120° pour la solution, on est en droit de comparer les pressions mesurées avec celles calculées théoriquement pour un écoulement potentiel autour d'un cylindre circulaire avec décollement à 120°. Les effets élastiques semblent alors limités au nez du corps d'une part et à l'arrière, à proximité du point de décollement, de l'autre. L'hypothèse de la membrane est alors difficilement justifiable.

Nous n'avons pas fait d'essais systématiques avec des produits autres que le POLYOX WSR 301. Il semble néanmoins que dans le cas des gommés de guar les effets élastiques ne soient pas aussi marqués.

Nous sommes d'accord qu'il serait intéressant de connaître la variation de la pression le long de la ligne de courant aboutissant

à l'orifice de prise de pression. Malheureusement cette mesure est très délicate étant donné que l'on serait amené à l'utilisation d'instrument de mesure dont on ne connaît pas exactement la réponse. »

M. THIRRIOT revient sur l'analogie présentée par les auteurs entre l'écoulement non newtonien et l'écoulement turbulent. On a montré que, dans une certaine gamme, le profil des vitesses dans le premier de ces écoulements était plus aplati que le profil parabolique de l'écoulement laminaire et ressemblait à celui d'un écoulement turbulent. En se fondant sur cette pseudo-similarité, le Laboratoire de mécanique des fluides de Toulouse tente d'étudier certains phénomènes d'intumescences en écoulement turbulent dans des modèles spéciaux de canaux transitant un fluide non newtonien. On espère ainsi séparer l'effet de la viscosité de Newton de celui de la viscosité turbulente.

D'autre part, M. BELLET a fait quelques expériences en vue de déterminer le nombre de Reynolds critique d'un écoulement non newtonien.

Enfin, le même laboratoire a tenté d'utiliser les diaphragmes, les tyères et la mesure (au moyen de strainages) des pressions sur un obstacle pour déterminer globalement le débit d'un écoulement non newtonien. Les résultats paraissent suffisamment précis pour le praticien; ainsi l'écart entre l'étalonnage de certains de ces dispositifs dans l'eau d'une part et dans une solution de CMC d'autre part ne diffère que de quelques pour cent.

M. le Président clôt la discussion en remerciant les conférenciers et les personnes qui l'ont animée.

Abstract

Visco-elastic effects in static and dynamic pressure measurement

Total and static pressure measurements in visco-elastic fluids are subject to considerable interference. Measured dynamic pressures differ by up to 70 per cent from similar data for Newtonian fluids, due to such factors as flow velocity V_0 , outside probe diameter D_e , viscosity μ , specific gravity ρ and shear modulus of elasticity for the fluid G .

It is found that there are two characteristic non-dimensional factors for the problem, one being the Reynolds number referred to D_e and the other the Deborah number relating characteristic flow to flow time.

Tests have been carried out to establish the effect of the characteristic parameters, using a probe mounted on a rotating arm and moving at an exactly known rate in a circular tank and transmitting the pressure data to an external receiver. The tests were carried out in a solution of polyethylene and water over a range of concentrations. The pressure difference Δp was found to vary as

the reciprocal of D_e and it was seen that, depending on probe tip geometry, it either passed through a maximum or reached a step as V_0 increased.

The static pressure measurements were carried out in with the same equipment and the same fluids. Circular cylinders of varying outside diameter and with varying pressure tapping orifice angular position θ on a generatrix were tested at Reynolds numbers ranging from 1.52×10^4 to 6.0×10^4 . The results differed from Newtonian fluid data, for which mainly D_e , V_0 and θ are significant.

From the analysis of the results it was suspected that the difference might be due to the elastic fluid properties. The main differences were lower measured pressures in the neighbourhood of the stagnation point and a downstream shift of the separation point. The measured pressures in the intermediate zone and in the wake of the measured pressures were very close to those associated with the flow of a Newtonian fluid around a similar cylinder with delayed separation.