

**Titre:** Etude sur la transition d'un fluide légèrement viscoélastique.  
**Title:** Première partie, Ecoulement sur un disque en rotation

**Auteurs:** Patrick Vasseur, Ertugrul Bilgen, & P. T. Trinh  
**Authors:**

**Date:** 1975

**Type:** Rapport / Report

**Référence:** Vasseur, P., Bilgen, E., & Trinh, P. T. (1975). Etude sur la transition d'un fluide légèrement viscoélastique. Première partie, Ecoulement sur un disque en rotation. (Rapport technique n° EP-R-75-58). <https://publications.polymtl.ca/6163/>  
**Citation:**

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/6163/>  
**PolyPublie URL:**

**Version:** Version officielle de l'éditeur / Published version

**Conditions d'utilisation:** Tous droits réservés / All rights reserved  
**Terms of Use:**

## Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

**Institution:** École Polytechnique de Montréal

**Numéro de rapport:** EP-R-75-58  
**Report number:**

**URL officiel:**  
**Official URL:**

**Mention légale:**  
**Legal notice:**



DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
SECTION AÉROTHERMIQUE

ETUDE SUR LA TRANSITION D'UN FLUIDE  
LEGEREMENT VISCOELASTIQUE

1<sup>ERE</sup> PARTIE: ECOULEMENT SUR UN DISQUE EN ROTATION

FAR

P. VASSEUR

E. BILGEN

P.T. TRINH

NOVEMBRE 1975

NO. EP 75-R-58

Ecole Polytechnique de Montréal

CA2PQ  
UP4  
75R58  
FRE

Campus de l'Université  
de Montréal  
Case postale 6079  
Succursale 'A'  
Montréal, Québec  
H3C 3A7



**Bibliothèque  
École  
Polytechnique  
MONTREAL**

CLASSIFICATION

CA2PQ

No D'ENTRÉE

UP4

78280

75 R 58 FRE



17 DEC. 1975

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

SECTION AEROTHERMIQUE

ETUDE SUR LA TRANSITION D'UN FLUIDE

LEGEREMENT VISCOELASTIQUE

1<sup>ère</sup> partie: écoulement sur un disque en rotation

PAR

P. VASSEUR

E. BILGEN

P.T. TRINH

78280

**A CONSULTER  
SUR PLACE**

NOVEMBRE 1975

No. EP 75-R-58



## RÉSUMÉ

Les caractéristiques de l'écoulement et de la transition sur la surface d'un disque en rotation dans un fluide légèrement viscoélastique ont été étudiées expérimentalement. Les liquides utilisés pour effectuer ces expériences étaient de l'eau et des solutions aqueuses diluées de polyoxyéthylènes, de polyacrylamides et de gommes de Guar. Les concentrations des solutions variaient entre 0 et 10 parties en poids par million. Les nombres de Reynolds de l'écoulement, basés sur le rayon du disque, étaient compris entre  $2.0 \times 10^5$  et  $2.5 \times 10^6$ .

La vitesse de l'écoulement, près de la paroi du disque, a été mesurée avec un anémomètre à rayon laser. Des réductions de vitesse importantes ont été observées quand le poids moléculaire du polymère utilisé et le nombre de Reynolds étaient suffisamment élevés. Les nombres de Reynolds marquant la transition ont été estimés à l'aide de graphiques montrant la relation entre la friction exercée sur le disque et sa vitesse de rotation. Ces résultats ont ensuite été complétés avec ceux obtenus en photographiant l'écoulement sur la surface du disque grâce à une méthode de visualisation. Il a été trouvé que les polymères avaient pour effet de retarder le point de transition et ce retardement dépendait dans une large mesure des poids moléculaires des polymères utilisés et de leurs concentrations.

ABSTRACT

The flow and transition characteristics of extremely dilute polymer solutions have been experimentally studied by using a rotating free disk. The test liquids were water and dilute aqueous solutions of polyethylene oxide, polyacrylamide and Guar gum. The concentration range of polymers was between 0 and 10 parts per million by weight. The Reynolds number, based on the disk's radius, varied from about  $2.0 \times 10^5$  to about  $2.5 \times 10^6$ . The velocity near the disk surface was measured by using a laser doppler velocimeter. An important reduction of the velocity was found when the molecular weight of the polymer and the Reynolds number of the flow were high enough. Occurrence of transition was estimated by means of Moment-Reynolds number graphs. The results thus obtained were then completed with those obtained by the streak lines on the disk produced by using a visualization method. It has been found that transition was delayed and the point of transition was influenced by the molecular weight of the polymers used and their concentrations.



## INTRODUCTION

Certains polymères, en solution dans l'eau, ont la propriété de réduire considérablement la friction turbulente (1, 2) et ce phénomène a été utilisé dans le passé dans l'industrie (3, 4, 5) ainsi que dans l'étude de la structure de la turbulence et, en particulier, la stabilité (6, 7, 8) et la transition (9, 10, 11).

La plupart des études faites avec des solutions diluées de polymères se sont portées sur des écoulements dans des tuyaux et il semble que, dans ce cas, on peut observer deux régimes différents (2). Avec des tuyaux ayant un diamètre relativement grand, on a observé (12) une transition similaire à celle d'un fluide newtonien. Dans ce cas, on obtenait une réduction de friction qui, lorsqu'on dépassait un nombre de Reynolds critique, semblait ne pas dépendre de la concentration de la solution utilisée. D'un autre côté avec des tuyaux ayant un diamètre relativement petit, on a remarqué (6, 9, 13) que la transition était retardée et que la réduction de friction saturée était indépendante du diamètre du tuyau et du polymère utilisé. Cependant, à des nombres de Reynolds suffisamment élevés, on pouvait observer une transition de l'écoulement saturé à l'écoulement turbulent qui dépendait alors fortement du type du polymère utilisé et de sa concentration.

Dans le cas d'un écoulement sur la surface d'un disque en rotation, on a observé (8) que la transition d'un fluide viscoélastique du régime laminaire au régime turbulent était, en général, à peu près semblable à la transition d'un fluide newtonien. Cependant, au fur et à mesure que l'on augmentait le nombre de Reynolds, on constatait que l'on



obtenait une réduction de friction qui était une fonction du polymère employé et de sa concentration. De plus, il existait, tel que déjà observé dans le passé (14, 15), une concentration optimum pour laquelle on obtenait une réduction de friction saturée.

Comme on le voit, alors qu'il existe de nombreuses études sur l'écoulement et la transition de solutions viscoélastiques dans des tuyaux, il semble que peu d'études similaires aient été effectuées dans le cas d'un écoulement sur la surface d'un disque en rotation. Cependant, à cause des possibilités immédiates d'utiliser les polymères pour réduire la friction dans des turbomachines, il est souhaitable de mieux connaître les caractéristiques d'un écoulement viscoélastique induit par un simple disque et ceci a fait l'objet de la présente investigation. Les mesures faites au cours de cette étude ont surtout été effectuées à des nombres de Reynolds tels que l'on pouvait observer la transition entre le régime saturé et le régime turbulent. Le nombre de Reynolds marquant ce point de transition a été estimé expérimentalement et on a déterminé l'effet des poids moléculaires des polymères et de leurs concentrations sur ce point de transition. Les solutions de polymères utilisés étaient très diluées et de grands soins ont été pris afin d'éviter le plus possible les effets de la dégradation.

#### ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Appareillage et Techniques: L'installation expérimentale était constituée par un disque en acier inoxydable poli de 20.3 cm de diamètre tournant dans un bassin, de 44 cm de diamètre par 40 cm de hauteur,

contenant les solutions de polymères à étudier (voir fig. 1 a). Le disque était monté sur un arbre vertical entraîné, grâce à une poulie, par un moteur électrique de 2 HP à vitesse variable. On pouvait ainsi obtenir des vitesses de rotation de l'ordre de 100 à 2000 tours par minute et ces vitesses étaient mesurées par un compte-tours magnétique ayant une précision de  $\pm 0.1\%$ . Les nombres de Reynolds, basés sur le rayon du disque, obtenus au cours des expériences variaient entre  $2.0 \times 10^5$  et  $2.5 \times 10^6$ .

Les moments qu'il fallait exercer sur le disque pour le faire tourner à des vitesses spécifiques étaient mesurés grâce à des jauges de contrainte placées directement sur l'arbre du disque (voir fig. 1 b) et reliées à des instruments de mesure appropriés. Les quatre jauges étaient installées de façon à compenser pour les effets thermiques et à mesurer seulement les déformations dues à la torsion.

Les traces faites par l'écoulement sur la surface du disque ont été obtenues en employant une méthode de visualisation qui avait déjà été utilisée dans le passé par l'un des auteurs (7, 8) lors d'études sur la stabilité des écoulements viscoélastiques. Cette méthode consiste essentiellement à peindre la surface du disque avec une fine couche d'une solution préparée en mélangeant de l'huile et du noir de carbone. En faisant tourner le disque peint avec un tel mélange dans la solution de polymères à étudier, on obtient alors sur sa surface les traces de l'écoulement et celles-ci peuvent être enregistrées grâce à des photographies.



La vitesse de l'écoulement près de la paroi du disque a été mesurée en utilisant un anémomètre à rayon laser (Thermo-Systems Inc., modèle 900). Contrairement aux anémomètres plus conventionnels, tels que le fil chaud ou le tube de pitot par exemple, on n'a pas besoin avec le laser, qui est essentiellement un instrument optique, d'introduire une sonde dans l'écoulement pour en mesurer sa vitesse. Ceci est un avantage sérieux spécialement lorsque l'on veut faire des mesures dans des fluides viscoélastiques car, dans ce cas, l'introduction d'une sonde dans l'écoulement peut causer certaines difficultés dans les mesures (16).

La vitesse de l'écoulement près de la paroi du disque a été mesurée à un rayon spécifique de ce dernier. Ce rayon était situé à une distance telle que l'on pouvait négliger la composante axiale de l'écoulement tout en étant assez loin du bord du disque pour en négliger les effets de bout. La figure 2 montre la technique utilisée pour mesurer la vitesse de l'écoulement avec l'anémomètre à rayon laser. Comme nous le voyons, cette vitesse a été déterminée en mesurant séparément la vitesse tangentielle et la vitesse radiale. Ceci est dû au fait qu'avec le laser nous pouvons seulement mesurer la composante de la vitesse de l'écoulement située dans un plan formé par les deux rayons du laser et dans une direction perpendiculaire à la bissectrice de ces deux rayons. Pour mesurer les vitesses radiales et les vitesses tangentielles à un rayon spécifique  $r$  du disque, il fallait donc placer successivement le laser dans les positions (1) et (2) telles que montrées dans la figure 2.



Polymères Utilisés: Les polymères utilisés dans la préparation des solutions étaient des gommes de Guar (Jaguar A-20-D), des polyacrylamides (Separan AP-30, Separan AP-273 et Polyhall M-295) et des polyoxyéthylènes (Polyox Coagulant, Polyox WSR-301, WSR-1105, WSR-205, WSRN-80 et WSRN-3000). Les propriétés physiques des solutions de polymères ont été déterminées en utilisant les techniques usuelles. Les viscosités ont été mesurées à l'aide d'un viscosimètre Brookfield. Les poids moléculaires des polymères employés ainsi que leurs viscosités intrinsèques (i.e. la capacité d'un polymère donné à accroître la viscosité d'un solvant) sont donnés dans la table 1.

Pour la préparation des solutions, il était nécessaire de prendre beaucoup de précautions si l'on voulait éviter la dégradation des molécules. En effet, soumises à des taux de cisaillement élevés, par une agitation trop forte par exemple, les solutions très diluées montrent une diminution des propriétés réductrices du frottement (16). Ainsi, on a pu observer, dans le cas d'écoulement dans des tuyaux, des écarts importants dans les résultats obtenus par divers investigateurs et ces écarts sont dus, en majeure partie, à la façon dont les solutions avaient été préparées et aux effets résultant de la dégradation des polymères (10). Dans cette étude, la procédure utilisée pour obtenir les solutions était de préparer tout d'abord une solution maîtresse concentrée de polymères. Cette solution maîtresse était obtenue en plaçant 2 litres d'eau du robinet dans un récipient placé sur un vibreur électrique de faible intensité. Une petite quantité de poudre de polymère était alors répandue sur la surface de l'eau. Une fois que cette quantité initiale de poudre était complètement dissoute par l'action du vibreur,

une seconde quantité de poudre était répandue et ce processus était continué jusqu'à la dissolution complète du poids de polymère nécessaire pour obtenir une solution de 1000 p.p.m. Les solutions requises pour les tests (entre 0 et 10 p.p.m.) étaient finalement obtenues en ajoutant à la solution maîtresse la quantité d'eau nécessaire et en agitant à la main, avec précaution, pour obtenir un bon mélange.

Les polymères peuvent être également dégradés par l'attaque des bactéries (dégradation biologique), par oxydation et par l'effet des rayons ultraviolets (dégradation chimique) et aussi, de façon à éviter ces effets, on a réduit à trois jours la période de temps maximum pour le stockage des solutions maîtresses. Quant au laps de temps écoulé entre la préparation des solutions diluées et leur utilisation dans l'appareillage, il était réduit à seulement quelques heures. Finalement, nous avons vérifié expérimentalement la période de temps maximum durant laquelle on pouvait faire tourner le disque, dans les solutions testées, sans provoquer une dégradation mécanique des polymères causée par les forces de cisaillement induites par l'écoulement. Les résultats ont indiqué que cette période de temps dépendait énormément du polymère utilisé, de sa



concentration ainsi que de la vitesse de rotation du disque. Pour les solutions utilisées et la gamme de nombres de Reynolds étudiée, il a été trouvé que le temps critique, après lequel on observait la dégradation, était compris entre 10 secondes et 1 heure. On s'est donc efforcé, au cours de cette étude, de toujours faire les mesures avec des solutions fraîches et de vérifier après chaque expérience s'il y avait dégradation ou non du polymère. Cette vérification se faisait de la manière suivante:

- à la fin d'une expérience avec une solution polymérique donnée, nous comparions le coefficient de moment obtenu avec une solution fraîche avec le coefficient obtenu avec la solution utilisée pour l'expérience. Si les deux coefficients de moment étaient identiques, on pouvait alors conclure que la solution n'avait subi aucune dégradation.



## ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Mesure du Moment: De façon à déterminer le nombre de Reynolds critique marquant la transition entre le régime saturé et le régime turbulent, on a mesuré, dans le voisinage de cette région de transition, le moment exercé sur le disque en fonction de sa vitesse de rotation.

Il est commode à ce stage d'introduire le coefficient de moment  $C_M$  qui est défini comme:

$$C_M = \frac{2M}{\frac{1}{2} \rho \omega^2 a^5} \quad (1)$$

Dans le cas d'un écoulement laminaire, la valeur de  $C_M$  est donnée par l'expression suivante (17):

$$C_M = 3.87 \text{ Re}^{-0.5} \quad (2)$$

dans lequel  $\text{Re} = \omega a^2 / \nu$ . D'un autre côté, pour un écoulement turbulent, nous avons (18):

$$C_M^{-0.5} = 1.97 \log (\text{Re } C_M^{0.5}) + 0.03 \quad (3)$$

alors que dans le cas d'une solution de polymères, le coefficient de moment, correspondant à la courbe de réduction de friction saturée, est donné (8) par:

$$C_M = 0.72 \text{ Re}^{-0.36} \quad (4)$$

Les résultats obtenus en mesurant le coefficient de moment exercé sur le disque en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement sont montrés dans les figures 3 et 4. Nous voyons tout d'abord, dans le cas de l'eau pure, que la transition du régime laminaire au régime turbulent commence à  $Re = 2.2 \times 10^5$  et se termine à un nombre de Reynolds  $Re = 4.5 \times 10^5$ . Pour des nombres de Reynolds supérieurs à cette dernière valeur, l'écoulement est en régime turbulent et les résultats obtenus montrent que le coefficient de moment mesuré dans cette investigation est alors légèrement supérieur à la valeur prédite par la théorie de Von Karman (basée sur un écoulement ayant une distribution de vitesse obéissant à la loi de la puissance  $1/7$ ), mais qu'il est légèrement inférieur à la valeur prédite par la théorie de Goldstein (18). Le fait que les valeurs obtenues expérimentalement se situaient entre ces deux théories indique que les effets de paroi et de bout étaient négligeables dans notre installation expérimentale. La figure 3 présente le résultat des expériences menées avec des solutions de polyoxyéthylène (Polyox WSR-301). On remarque qu'avec ce polymère, qui a un poids moléculaire très élevé, (voir table 1), nous pouvons obtenir un écoulement en régime saturé (régime d'écoulement avec une réduction de frottement maximale) avec des solutions ayant des concentrations aussi faibles que 3 p.p.m. On constate de plus que, pour toutes les concentrations utilisées, il y a d'abord une transition normale suivant la transition de l'eau et ensuite, passé un certain nombre de Reynolds, les résultats tombent alors graduellement, soit sur un régime d'écoulement avec une réduction de frottement (cas



des solutions plus concentrées). De plus, on voit que la transition du régime saturé au régime turbulent a lieu à des nombres de Reynolds critiques qui augmentent au fur et à mesure que l'on utilise des solutions de plus en plus concentrées. Il est à noter que lorsque la concentration des solutions était trop élevée, le nombre de Reynolds critique marquant la transition était alors retardé à des valeurs situées en dehors de la gamme de nombres de Reynolds étudiée dans cette investigation. Des tests similaires ont été conduits avec des solutions de gomme de Guar (Jaguar A-20-D) et les résultats sont présentés dans la figure 4. Comme on peut l'observer, avec ce polymère, qui a un poids moléculaire très faible, on ne peut pas atteindre le régime saturé même avec des concentrations aussi élevées que 30 p.p.m. On note de plus que la courbe obtenue avec une solution de 30 p.p.m. de Jaguar A-20-D est similaire à la courbe obtenue avec une solution de 1 p.p.m. de Polyox WSR-301. Des résultats identiques ont été observés pour des écoulements dans les tuyaux et il semble que, dans ce cas, il fallait utiliser des solutions de gomme de Guar ayant des concentrations d'au moins 2,400 p.p.m. avant de pouvoir obtenir un écoulement en régime saturé (14).

La transition du régime saturé au régime turbulent de solutions diluées de polyoxyéthylènes et de polyacrylamides en écoulement sur la surface d'un disque en rotation a été étudiée dans le passé par Bilgen (21) et les résultats obtenus par cette investigation sont présentés dans les figures 5 et 6 pour fins de comparaison avec la présente étude.



La figure 5 montre les résultats obtenus en utilisant des solutions de Polyox Coagulant et de Polyox WSR-301. On remarque que la transition du régime saturé au régime turbulent a lieu à des nombres de Reynolds critiques qui augmentent au fur et à mesure que l'on utilise des solutions de plus en plus concentrées. D'un autre côté, on peut observer, en comparant les résultats obtenus avec le Polyox Coagulant et le Polyox WSR-301, que plus le polymère a un poids moléculaire élevé, plus sa transition du régime saturé au régime turbulent est retardée.

Dans le cas des solutions de polyacrylamides (PA), les poids moléculaires des polymères utilisés étaient moins élevés que dans le cas des solutions de PEO et on constate, en examinant la figure 6, que si l'on voulait obtenir un écoulement en régime saturé, il fallait utiliser des concentrations d'au moins 5 p.p.m. On voit de plus qu'avec ces polymères, le nombre de Reynolds marquant la transition pouvait être observé pour chacune des concentrations utilisées dans ces expériences. On remarque, cependant, qu'avec les solutions de PA, il était beaucoup plus difficile d'estimer le point exact où les résultats expérimentaux quittaient la ligne de friction saturée qu'avec les solutions de PEO.

En comparant les résultats obtenus par Bilgen (21) avec ceux de la présente investigation, on note qu'il existe des différences mineures entre ces deux études. Tout d'abord, dans le cas de l'eau pure, le coefficient de moment mesuré par Bilgen est légèrement inférieur au coefficient obtenu dans cette étude. De plus, on observe

qu'avec les solutions de polymères, les valeurs obtenues par Bilgen pour la ligne de friction saturée sont légèrement supérieures aux valeurs prédites par la référence (7). Cette différence, déjà observée dans le passé par Giles (14), est attribuée à l'effet de diamètre de dimension finie du disque. On note finalement, en comparant les résultats obtenus dans ces deux investigations avec des solutions de Polyox WSR-301, que l'on obtient des nombres de Reynolds critiques qui diffèrent légèrement d'une étude à l'autre. Ces différences sont possiblement dues aux caractéristiques particulières des deux bancs d'essais utilisés, à la manière dont les solutions de polymères étaient préparées ainsi qu'au fait que les caractéristiques d'un polymère peuvent varier sensiblement d'un échantillon à l'autre. Cependant, mis à part ces différences négligeables, les deux investigations montrent clairement que le nombre de Reynolds critique est étroitement relié au type de polymère utilisé ainsi qu'à sa concentration.

Comme on en a discuté antérieurement, le nombre de Reynolds critique marquant la transition entre le régime saturé et le régime turbulent peut être estimé en déterminant le point où les résultats expérimentaux quittent la ligne marquant le régime d'écoulement saturé. En examinant les figures 3 à 6, on remarque qu'avec les solutions de polymères ayant un poids moléculaire élevé, la transition



du régime saturé au régime turbulent dépend fortement du poids moléculaire du polymère et de sa concentration. Si on utilise un polymère ayant un poids moléculaire plus grand ou une solution ayant une concentration plus élevée, on voit que le point de transition sera alors retardé à un nombre de Reynolds plus élevé. Ceci est une indication qu'un écoulement en régime saturé est plus stable lorsque le poids moléculaire du polymère utilisé et sa concentration sont plus élevés et que la transition, pour un polymère et une concentration donnés, a lieu seulement lorsque l'écoulement stabilisé ne peut être maintenu à cause d'un niveau de turbulence trop élevé. D'un autre côté, on voit que la transition peut ne pas être retardée, excepté peut-être dans le cas où les solutions auraient des concentrations beaucoup plus élevées.

Des résultats similaires, c'est-à-dire l'observation d'un délai du point de transition et une augmentation de la région de transition sur une plage du nombre de Reynolds plus grande que dans le cas d'un fluide newtonien, ont été observés par Castro et Squire (9) et White et McEligot (10) lors de leurs études sur la transition de solutions diluées de polymères dans des tuyaux. Cependant, avec les écoulements dans les tuyaux, tel que déjà mentionné, il est à remarquer que non

seulement la transition est influencée par le poids moléculaire et la concentration des polymères utilisés, mais elle dépend également, et ceci dans une large mesure, du diamètre du tuyau.

Traces de l'Écoulement: Dans la section précédente, on a déterminé le nombre de Reynolds critique pour la transition en observant le point où il y avait une "cassure" dans un graphique coefficient de moment - nombre de Reynolds. Il est également possible d'observer visuellement la région de transition en photographiant les traces de l'écoulement produites sur la surface du disque grâce à une méthode de visualisation. Ces traces sont essentiellement les lignes de courant si on imagine que le disque est immobile et que c'est le fluide qui est en rotation. Elles ont été obtenues pour des solutions de Polyox WSR-301 ayant des concentrations variant entre 0 et 10 p.p.m. La vitesse de rotation du disque était maintenue constante à 1000 t.p.m. L'angle de l'écoulement près de la surface du disque, c'est-à-dire l'angle  $\theta$  fait entre les spirales équiangles et la direction circonférentielle, a été mesuré directement sur les photographies pour chacune des concentrations utilisées.

Dans le cas de l'eau pure, les caractéristiques des traces faites par l'écoulement sur la surface d'un disque ont déjà été discutées par Gregory, Stuart et Walher (19) et par Bilgen (7). Sur les photographies publiées par ces auteurs, on pouvait clairement observer trois régions différentes. Une région sombre au centre du disque marquait le régime laminaire alors que la couronne de spirales équiangles, adjacente à la région du régime laminaire, indiquait la zone de transition. Enfin, une région plus sombre, située sur le bord du disque, marquait le régime



turbulent. Les mesures effectuées directement sur ces photos montraient que le nombre de Reynolds critique pour la transition était d'environ  $3.1 \times 10^5$  alors que l'angle de l'écoulement dans la région turbulente était de  $\theta = 17$  degrés. Il est à noter que, pour un écoulement laminaire, la valeur théorique de cet angle est de  $\theta = 39.6$  degrés (17).

Les résultats obtenus en photographiant les traces de l'écoulement pour des solutions de Polyox WSR-301 ayant des concentrations de 0 p.p.m. et 10 p.p.m. sont montrés respectivement dans les figures 7 et 8. Comme nous pouvons le constater, l'effet des polymères est, tel que déjà démontré par Bilgen (8), de changer les relations angulaires des traces de l'écoulement. En fait, des mesures effectuées directement sur les photographies indiquent qu'avec des solutions ayant des concentrations de 1, 5 et 10 p.p.m. l'angle d'écoulement  $\theta$  était respectivement de 20, 32 et 32.5 degrés. On voit donc qu'en augmentant la concentration de la solution, on modifiait la structure de l'écoulement de telle manière que l'angle d'écoulement  $\theta$  à la surface du disque se rapprochait de plus en plus de la valeur théorique  $\theta = 39.6$  degrés pour un écoulement laminaire. L'accroissement de la concentration des solutions semble donc avoir pour effet de laminariser l'écoulement turbulent dans la couche limite. En plus de changer les relations angulaires des traces de l'écoulement, nous voyons, d'après les figures 7 et 8, que les polymères ont pour effet de diminuer le nombre des traces sur la surface du disque et d'augmenter leurs espacements. Ces modifications, qui sont essentiellement en accord avec les résultats obtenus dans la référence (7), indiquent un profond changement dans les caractéristiques cellulaires

de l'écoulement. Tel que suggéré par Hoyt (2), ce dernier effet pourrait être une clé à une compréhension éventuelle du mécanisme de la réduction de friction causée par les polymères.

Les nombres de Reynolds critiques indiquant le début de la transition ont été estimés, pour des solutions de Polyox WSR-301, à partir de mesures faites directement sur les photographies. Il était difficile de déterminer avec exactitude le nombre de Reynolds marquant la transition, cependant, on pouvait estimer que pour des concentrations de 1, 3 et 5 p.p.m., ces valeurs étaient approximativement de  $0.8 \times 10^6$ ,  $2.0 \times 10^6$  et  $3.0 \times 10^6$  respectivement. Comme nous pouvons le constater en consultant les figs 3 à 6, ces résultats sont à peu près en accord avec ceux obtenus à partir des courbes donnant le coefficient de moment en fonction du nombre de Reynolds. Cette concordance indique en fait que la transition est un phénomène qui a son origine près de la paroi en contact avec l'écoulement.

#### MESURE DES VITESSES

De façon à déterminer quels étaient les effets des polymères sur la vitesse de l'écoulement près de la surface du disque, on a mesuré cette dernière avec un anémomètre à rayon laser et les résultats obtenus sont montrés dans les figures 9 et 10. Ces mesures ont été effectuées avec des solutions ayant une concentration de 10 p.p.m. Les polymères utilisés étaient de la famille des Polyox (Polyox WSR-301, WSR-1105, WSR-205, WSRN-3000 et WSRN-80) et avaient des poids moléculaires compris entre  $0.2 \times 10^6$  et  $4.6 \times 10^6$ . Toutes les mesures ont été faites à une position  $r = 77.0$  mm et  $z = 0.30$  mm. Cependant,



il est à remarquer que le rayon émis par le laser avait un diamètre de l'ordre de 0.30 mm et, conséquemment, il s'en suit que les résultats ont été obtenus pour une zone de mesure comprise entre  $z = 0.15$  mm et  $z = 0.45$  mm plutôt que pour un point précis.

Dans la figure 9, nous avons le pourcentage de la réduction de la composante tangentielle de la vitesse, telle que comparée avec celle obtenue dans le cas de l'eau pure, en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement pour les divers polymères mentionnés ci-haut. Dans le cas de la composante radiale de la vitesse, les résultats obtenus sont montrés dans la figure 10. Comme on peut le voir en examinant ces deux figures, les polymères n'ont aucun effet sur l'écoulement tant que celui-ci est en régime laminaire. Cependant, dès que l'on est dans le voisinage de la zone de transition, on remarque que les polymères causent une réduction dans la vitesse de l'écoulement et cette réduction devient de plus en plus importante au fur et à mesure que l'on augmente le nombre de Reynolds de l'écoulement. En outre, on voit que le poids moléculaire du polymère utilisé joue également un rôle important sur le pourcentage de réduction de vitesse de l'écoulement. Ainsi, dans le cas du Polyox WSRN-80, le polymère ayant le poids moléculaire le plus faible, nous voyons que la solution se comporte comme un fluide newtonien et on obtient alors aucune réduction de vitesse. Par contre, avec le Polyox Coagulant, le polymère dont le poids moléculaire est le plus élevé, on obtient le pourcentage de réduction de vitesse maximum. Avec les autres polymères utilisés, les résultats obtenus se situent, en général, entre ces deux extrêmes. Il est intéressant de constater que dans le cas des polymères WSR-205 et WSRN-3000, on obtient, dans la limite de nos expériences, une rédu-

tion dans la composante tangentielle de la vitesse alors que l'on note aucun effet sur la composante radiale. Il n'a malheureusement pas été possible, avec la présente installation, d'obtenir des mesures à des nombres de Reynolds plus élevés, car il y avait alors une formation de bulles d'air dans le bassin qui dérangeait les mesures faites avec l'anémomètre à rayon laser.

### CONCLUSIONS

Dans cette étude, il a été trouvé expérimentalement que le nombre de Reynolds critique marquant la transition entre le régime saturé et le régime turbulent, d'un écoulement produit par un disque en rotation dans une solution très diluée de polymère, dépendait considérablement du type du polymère utilisé, de son poids moléculaire et de sa concentration. Ainsi plus le polymère était efficace, c'est-à-dire plus son poids moléculaire et sa concentration étaient élevés, plus la transition était retardée à un nombre de Reynolds plus grand. Les résultats obtenus en mesurant la vitesse de l'écoulement près de la paroi du disque indiquent que les polymères ont pour effet de réduire considérablement la vitesse de cet écoulement. Cette réduction de vitesse, qui n'était pas observée lorsque l'écoulement était laminaire, augmentait avec le nombre de Reynolds de l'écoulement et l'efficacité des polymères utilisés. Finalement, il a été constaté, et ceci en accord avec les résultats obtenus dans les investigations précédentes, qu'en général les polymères avaient pour effet de laminariser l'écoulement turbulent et de modifier considérablement ses caractéristiques cellulaires.



## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil National de Recherches du Canada et le Conseil de Recherches pour la Défense pour leurs appuis financiers. Les polymères utilisés au cours de ces expériences ont été gracieusement fournis par les compagnies Union Carbide et Stein Hall.

## NOTATION

- a : rayon du disque
- c : concentration de la solution
- $C_M$  : coefficient de moment ( $2M / \frac{1}{2} \rho \omega^2 a^5$ )
- m : poids moléculaire du polymère
- M : moment exercé sur un côté du disque
- Re : nombre de Reynolds ( $\omega r^2 / \nu$ )
- $Re_{cr}$  : nombre de Reynolds critique marquant le début de la transition
- r : position radiale sur le disque
- $V_e$  : vitesse avec de l'eau pure
- $V_{sn}$  : vitesse avec une solution de polymère
- z : distance perpendiculaire à la surface du disque

## Lettres grecques

- $[\eta]$  : viscosité intrinsèque
- $\theta$  : angle de l'écoulement
- $\nu$  : viscosité cinématique
- $\rho$  : densité
- $\omega$  : vitesse angulaire du disque

# RÉFÉRENCES

- 1.- Lumley, J.L., "Drag Reducing by Additives", Annual Review of Fluid Mechanics, ed. Sears W.R., Vol. 1, p. 367, 1969.
- 2.- Hoyt, J.W., "The Effect of Additives on Fluid Friction", J. Basic Eng., Trans. ASME, Vol. 94, No. 2, Ser. D, p. 258, 1972.
- 3.- Anon., "Slippery Water Cuts Friction Loss", Fire Eng., p. 48, 1969.
- 4.- Wells, C.S. and Spangler, J.C., "Injection of a Drag Reducing Fluid into Turbulent Pipe Flow of a Newtonian Fluid", Phys. of Fluids, Vol. 10, p. 1890, 1967.
- 5.- Anon., "Friction Reducing Agent Improves Water Flow", Chem. Eng., p. 36, 1966.
- 6.- Giles, W.B. and Pettit, W.T., "Stability of Dilute Viscoelastic Flow", Nature, Vol. 216, p. 470, 1967.
- 7.- Bilgen, E., "Stability of Three-Dimensional Boundary Layer of Dilute Polymer Solutions", J. Basic Eng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 93, No. 2, p. 85, 1971.
- 8.- Bilgen, E., "On the Stability of Viscoelastic Flow due to a Rotating Disk", Chem. Eng. Progr., Vol. 67, No. 111, p. 74, 1971.
- 9.- Castro, W. and Squire W., "The Effect of Polymer Additives on Transition in Pipe Flow", Appl. Sci. Res., Vol. 18, p. 81, 1967.
- 10.- White, W.D. and McEligot, D.M., "Transition of Polymers in a Dilute Aqueous Solution", J. Basic Eng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 92, No. 3, p. 411, 1970.
- 11.- Hasegawa, T. and Tomita, Y., "A Study on Anomalous Turbulent Flows of Non-Newtonian Fluids", Bul. of JSME, Vol. 17, No. 103, p. 73, 1974.
- 12.- Goren, Y. and Norbury, J.F., "Turbulent Flow of Dilute Aqueous Polymer Solutions", J. Basic Eng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 89, No. 4, p. 814, 1967.
- 13.- Ripkin, J.F. and Pilch, M., "Non-Newtonian Pipe Friction Studies with Various Dilute Polymer Solutions", J. Basic Eng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 89, No. 4, p. 814, 1964.
- 14.- Giles, W.B., "Similarity Laws of Friction-Reduced Flows", J. Hydronautics, Vol. 2, No. 1, p. 34, 1968.
- 15.- Hoyt, J.W. and Fabula, A.G., "The Effect of Additives on Fluid Friction", NAVWEPS Rept 8636, ASTIA AD 612 056, Naval Ordnance Test Station, China Lake, Calif., 1964.



- 16.- Fruman, D.H., Sulmont, P. & Loiseau, G., "Mesure de Vitesses dans les Fluides Viscoélastiques au Moyen de Tubes de Pitot", Journ. de Mécanique, Vol. 8, No. 4, p. 463, 1969.
- 17.- Schlichting, H., Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New-York, 1967.
- 18.- Goldstein, S., "On the Resistance to the Rotation of a Disk Immersed in a Fluid", Proc. Cambridge Phil. Soc., 31, part 2, p. 232, 1935.
- 19.- Gregory, N., Stuart, J.T. & Walker, W.S., "On the Stability of Three-Dimensional Boundary Layers with Application to the Flow due to a Rotating Disk", Phil. Trans. of Roy. Soc. of London, No. A 248, p. 155, 1955.
- 20.- Shin, H., "Reducing of Drag in Turbulence by Dilute Polymer Solutions", D. Sc. Thesis, Mass. Inst. Tech., 1965.
- 21.- Bilgen, E., (résultats non publiés).

TABLE 1

Polymère	$m \times 10^{-6}$	$[\eta]$
Polyox Coagulant <sup>*</sup>	6.8	22.1
Polyox WSR-301 <sup>*</sup>	4.6	16.2
Polyox WSR-1105 <sup>*</sup>	0.9	4.5
Polyox WSR-205 <sup>*</sup>	0.6	3.3
Polyox WSRN-3000 <sup>*</sup>	0.4	2.4
Polyox WSRN-80 <sup>*</sup>	0.2	1.4
Separan AP-273 <sup>+</sup>	$\sim 3.0$	230.
Separan AP-30 <sup>+</sup>	$\sim 2.0-3.0$	90.
Polyhall M-295 <sup>+</sup>	$\sim 2.0$	50.
Jaguar A-20-D <sup>+</sup>	$\sim 0.2$	4.0

\* Poids moléculaire calculé à partir de la relation de Shin (20)

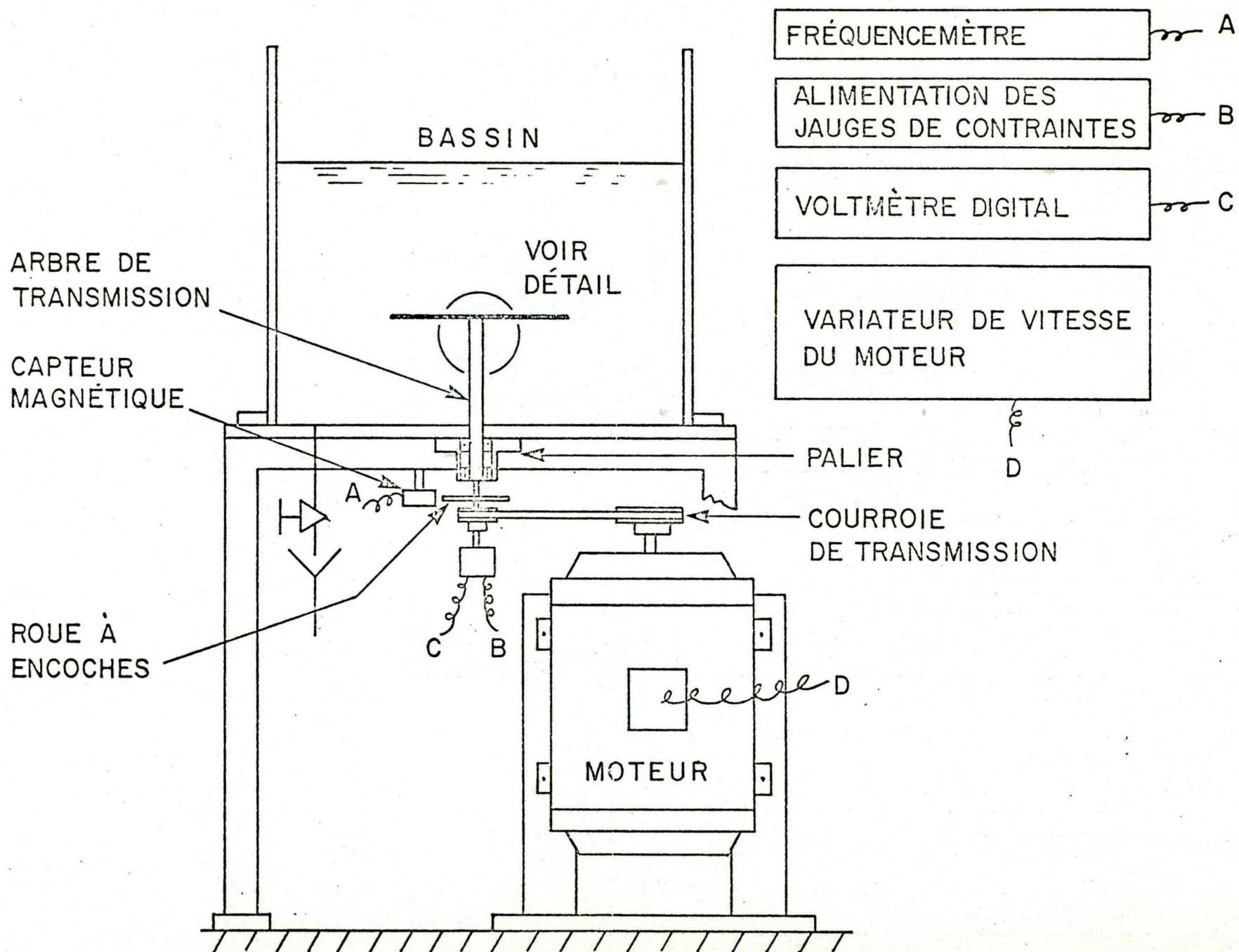
+ Poids moléculaire spécifié par le manufacturier



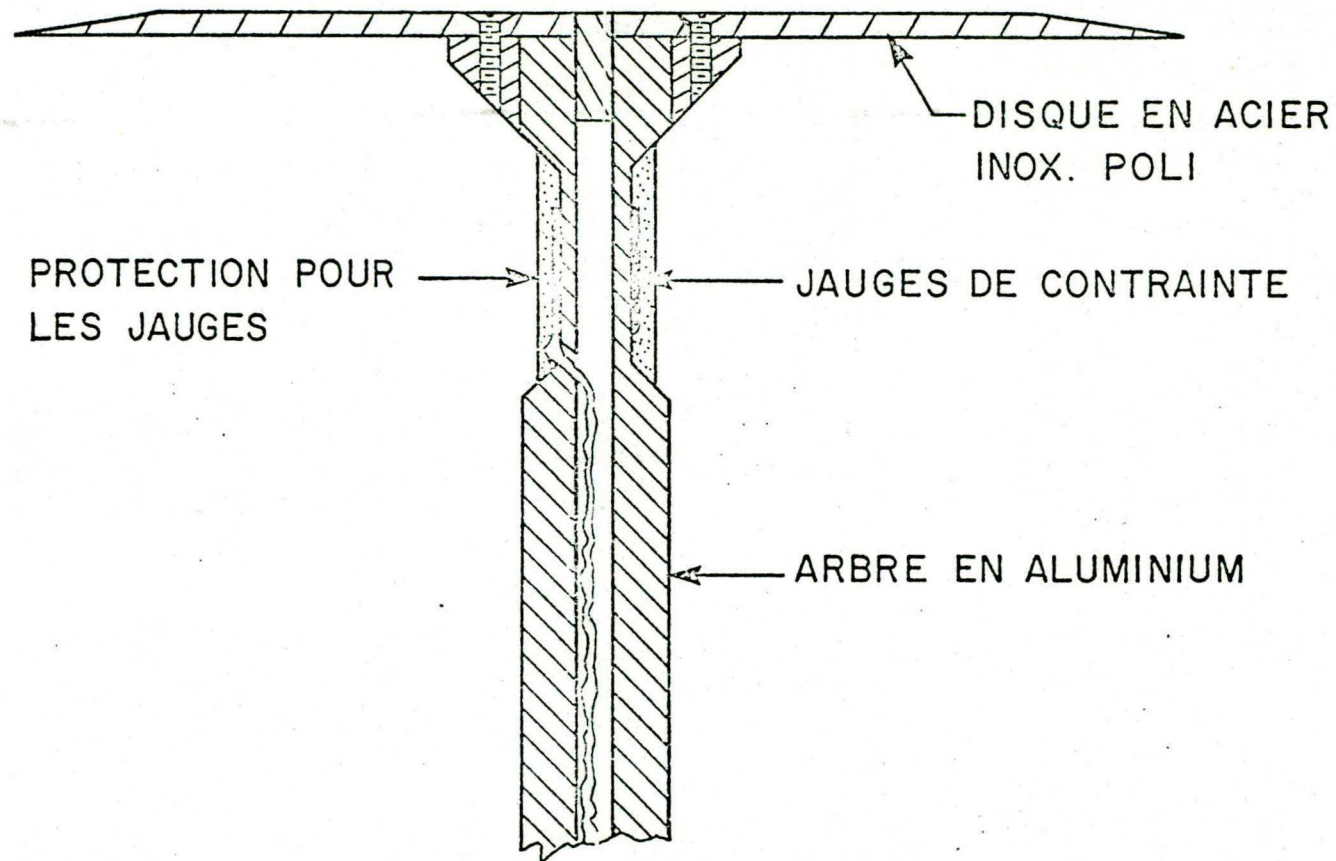
LEGENDE DES FIGURES

- Figure 1    a) Schéma de l'installation expérimentale  
              b) Détail de l'arbre  
              c) Vue de l'installation
- Figure 2    Schéma du système optique
- Figure 3    Transition pour des solutions diluées de Polyox WSR-301
- Figure 4    Caractéristique de frottement du Jaguar A-20-D
- Figure 5    Transition pour des solutions diluées de polyoxyéthylènes
- Figure 6    Transition pour des solutions diluées de polyacrylamides
- Figure 7    Traces de l'écoulement pour de l'eau
- Figure 8    Traces de l'écoulement pour une solution de Polyox WSR-301  
              de 10 p.p.m.
- Figure 9    Mesure des réductions de vitesses tangentielles avec des  
              solutions de polyoxyéthylènes
- Figure 10   Mesure des réductions de vitesses radiales avec des solutions  
              de polyoxyéthylènes

FIG. 1 a)







DÉTAIL

FIG. 1 b)

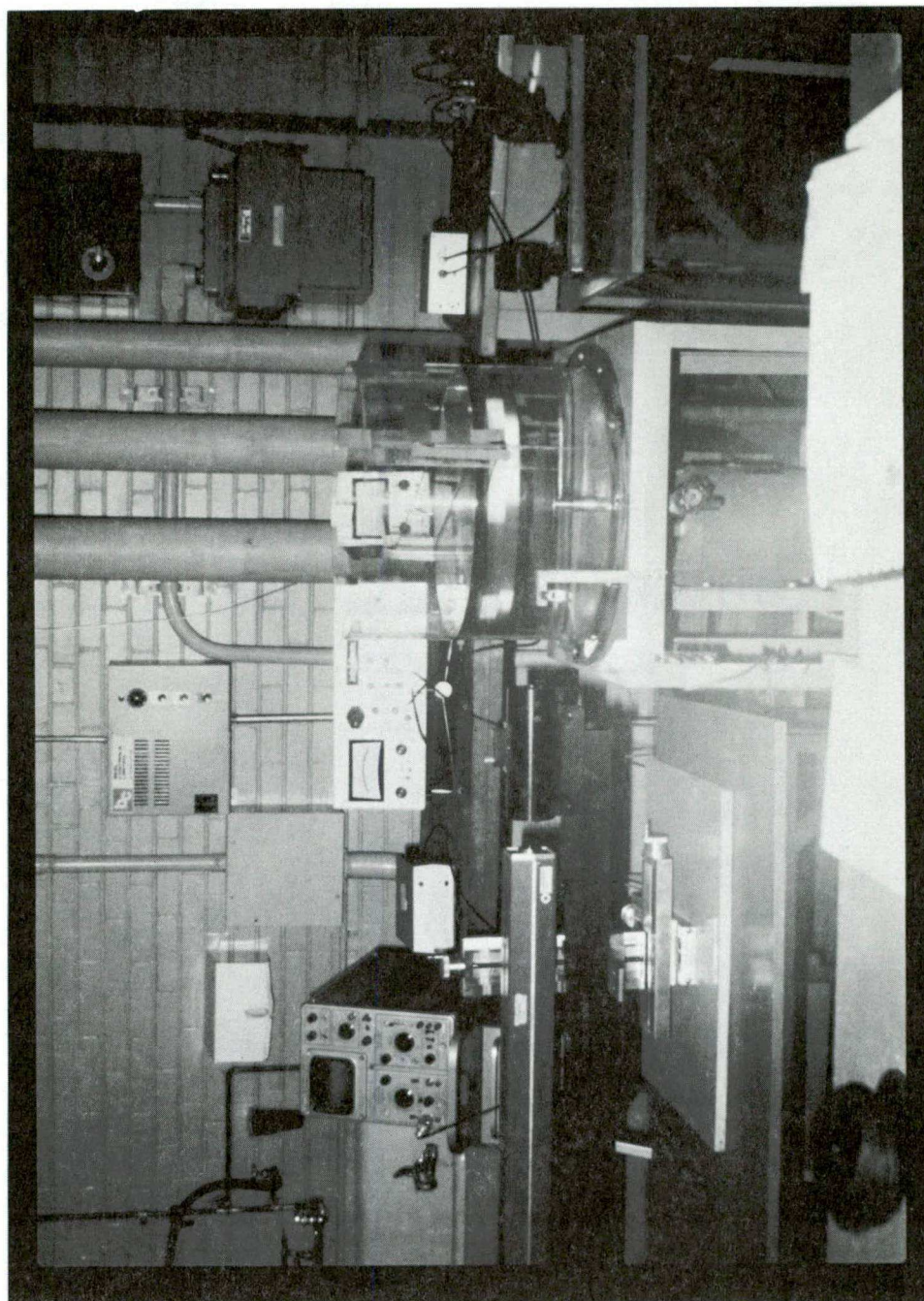


Fig. 1 c)



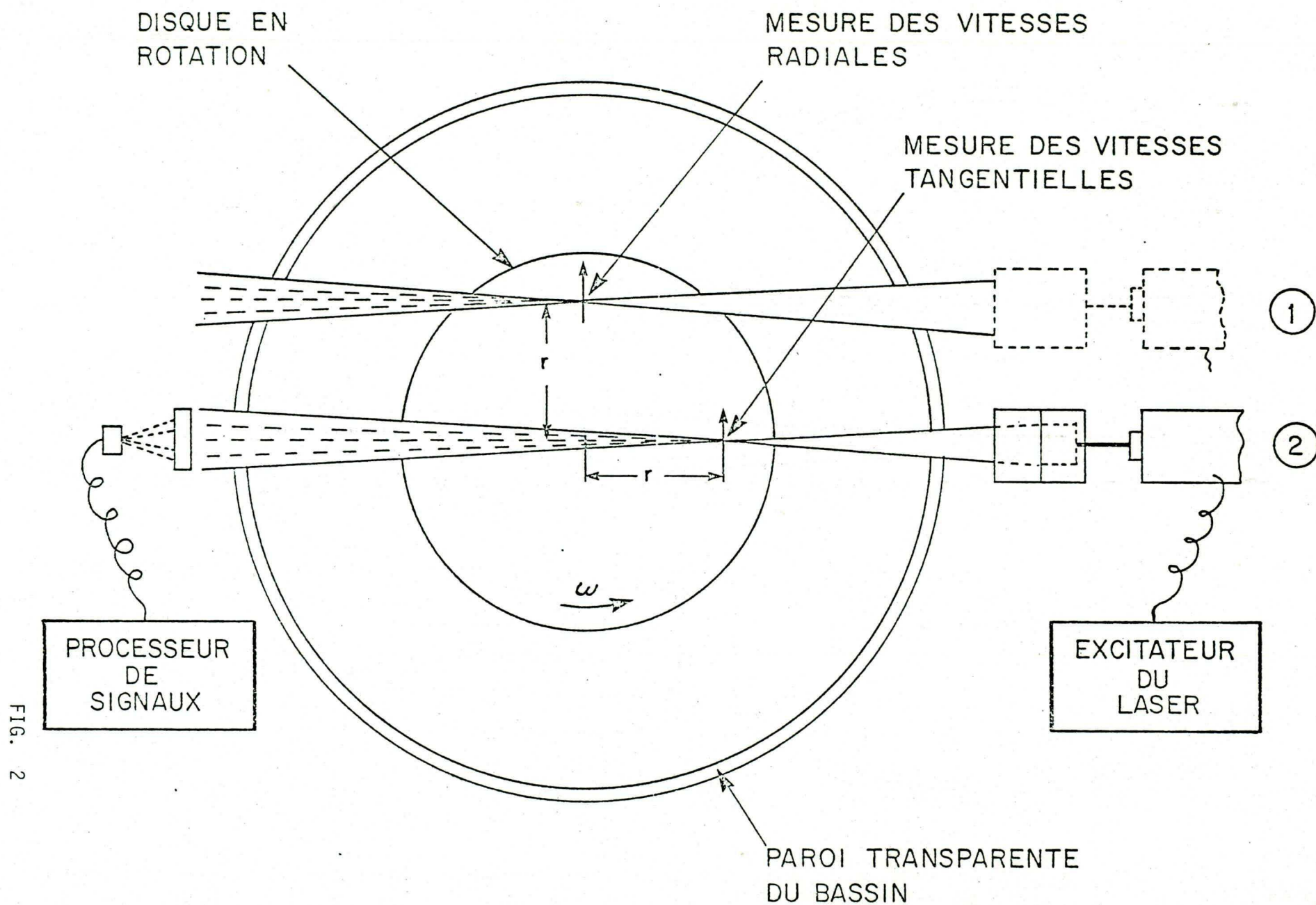


FIG. 2

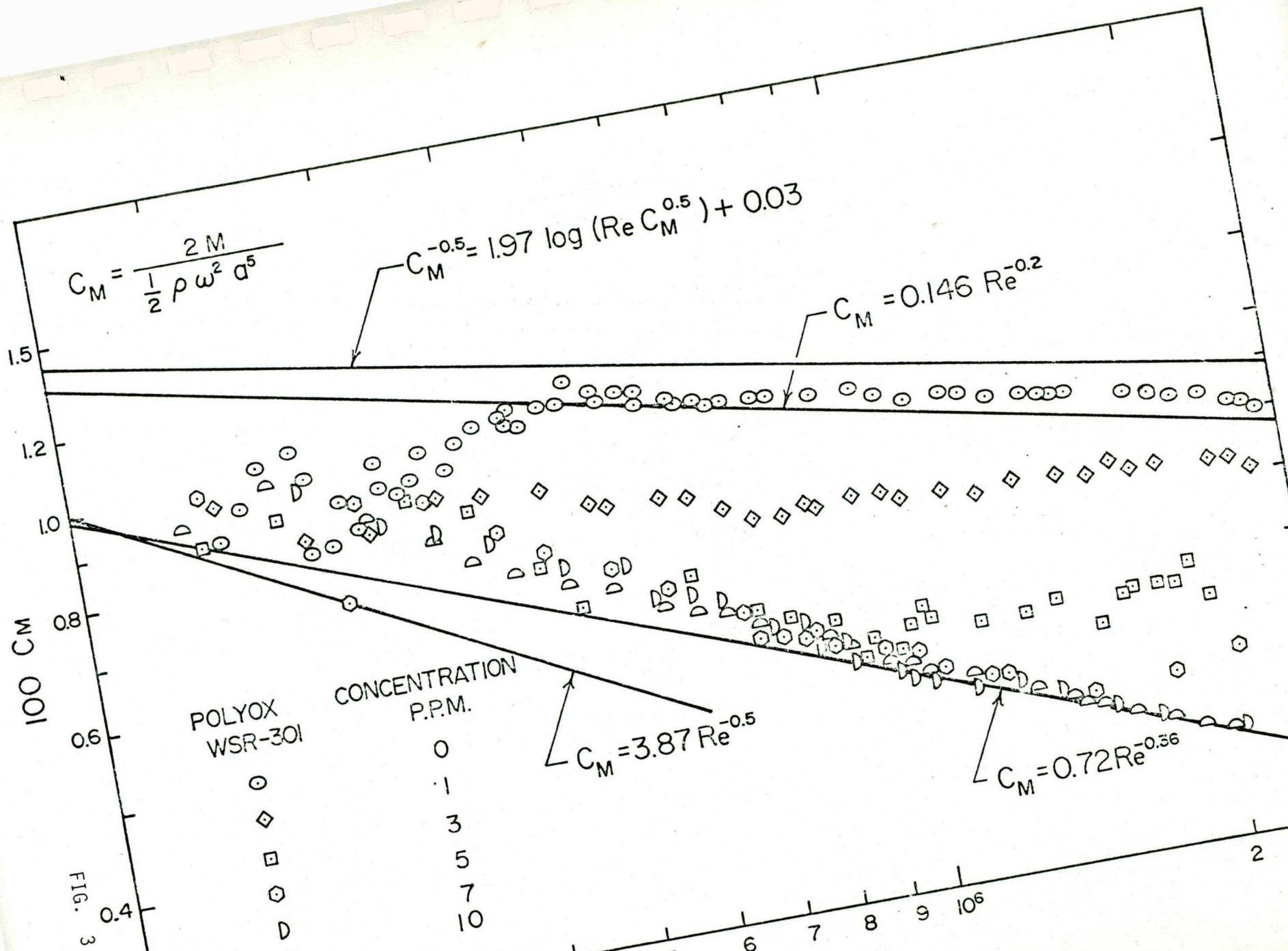


FIG. 3



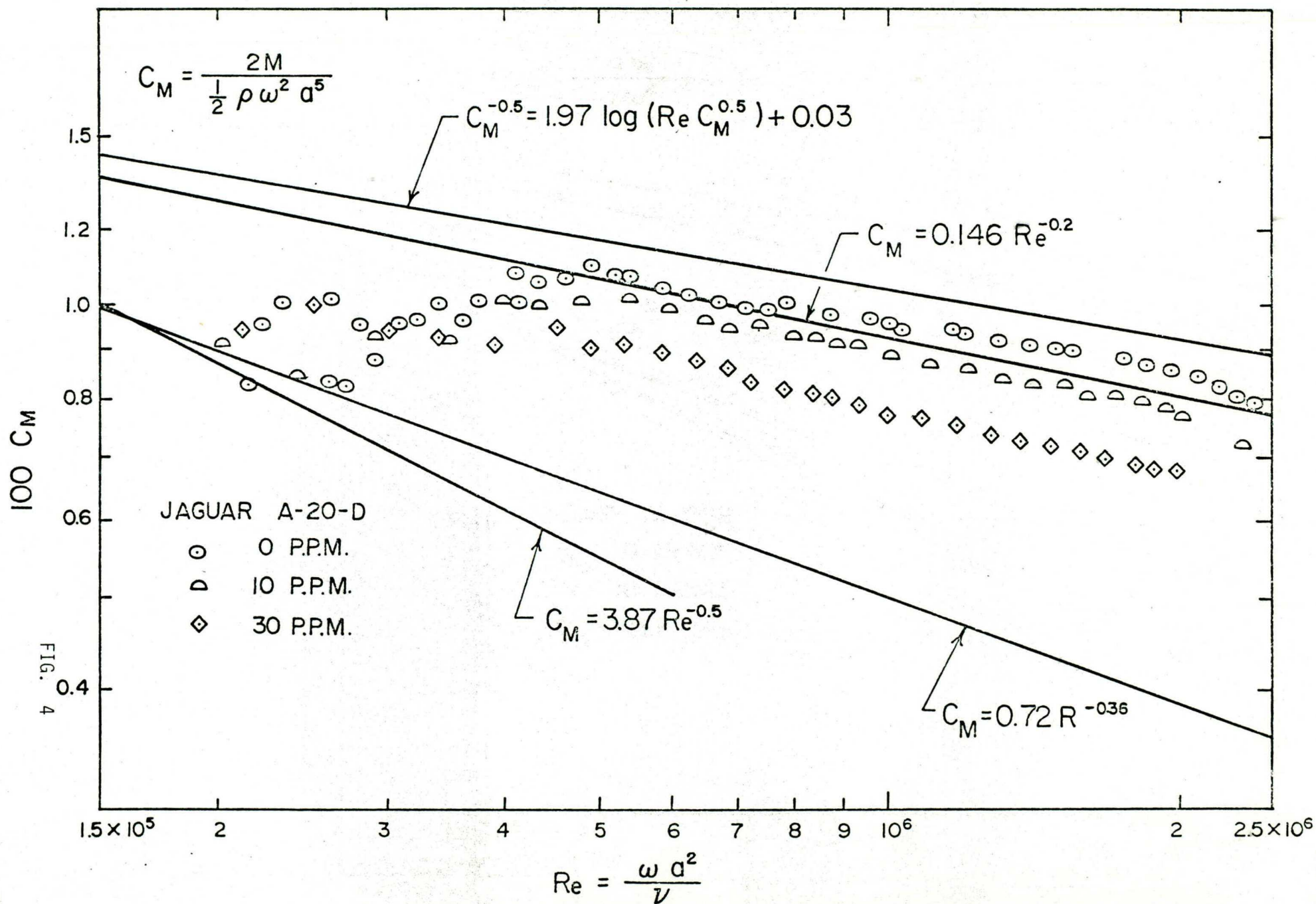
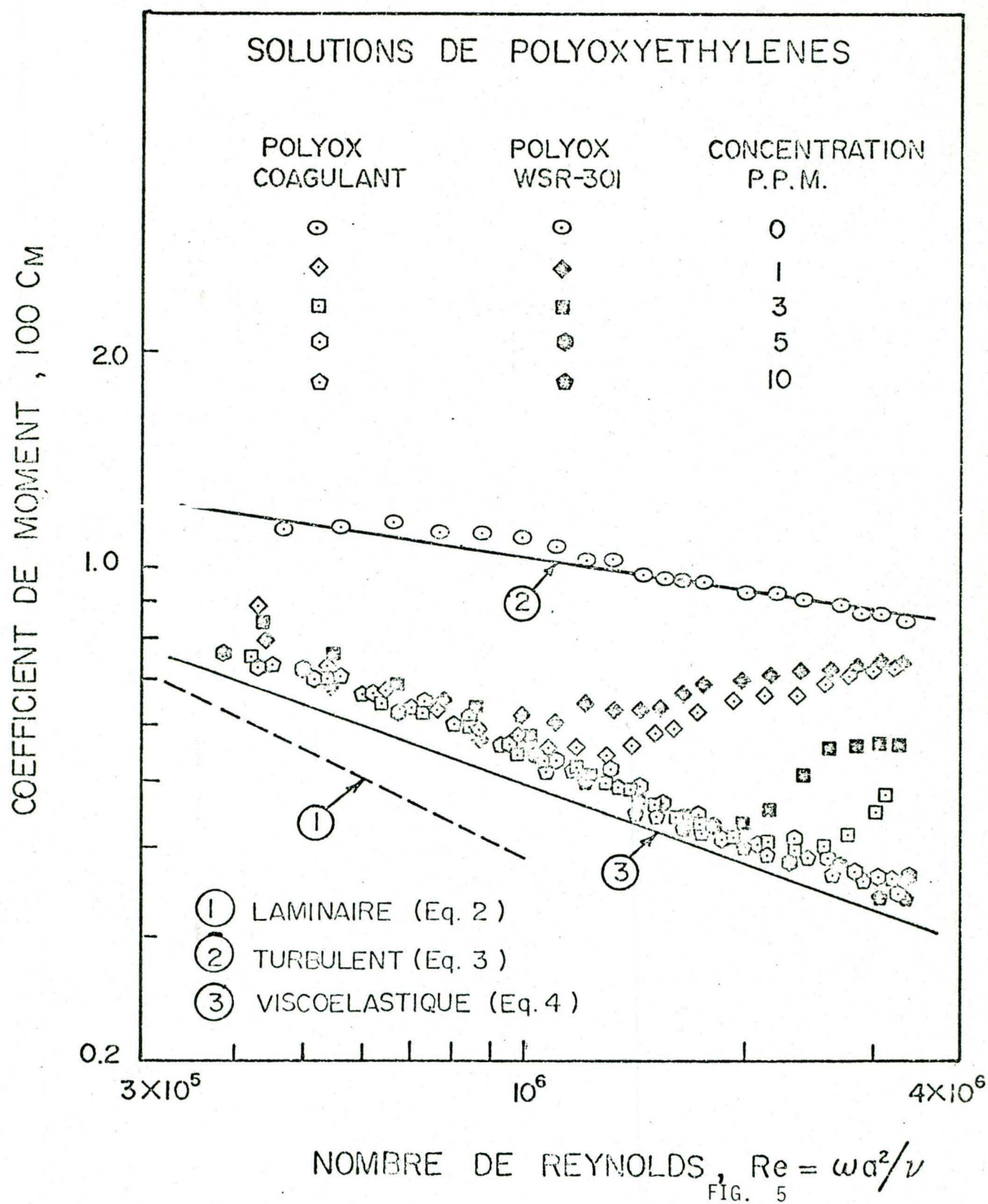


FIG. 4





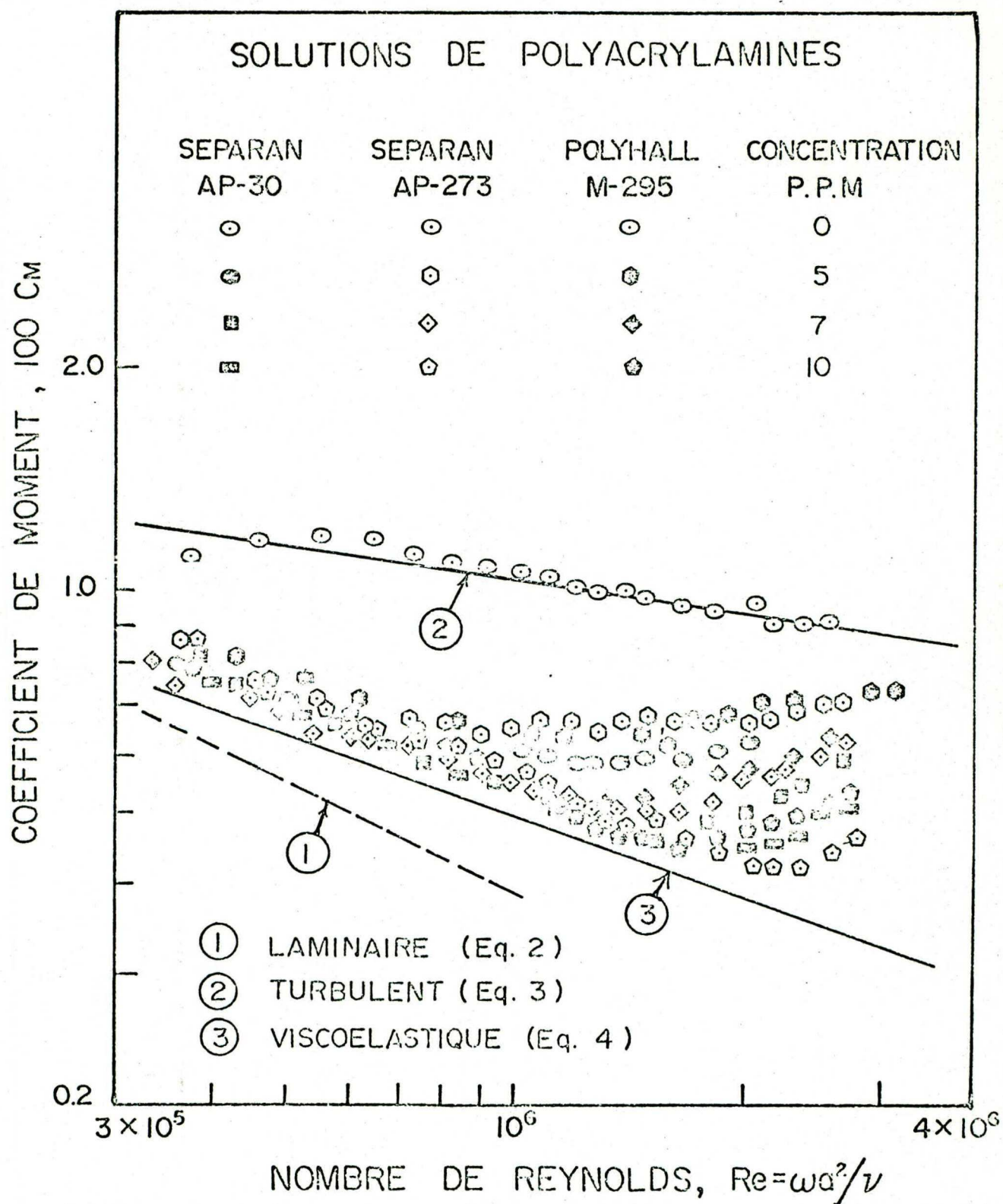


FIG. 6

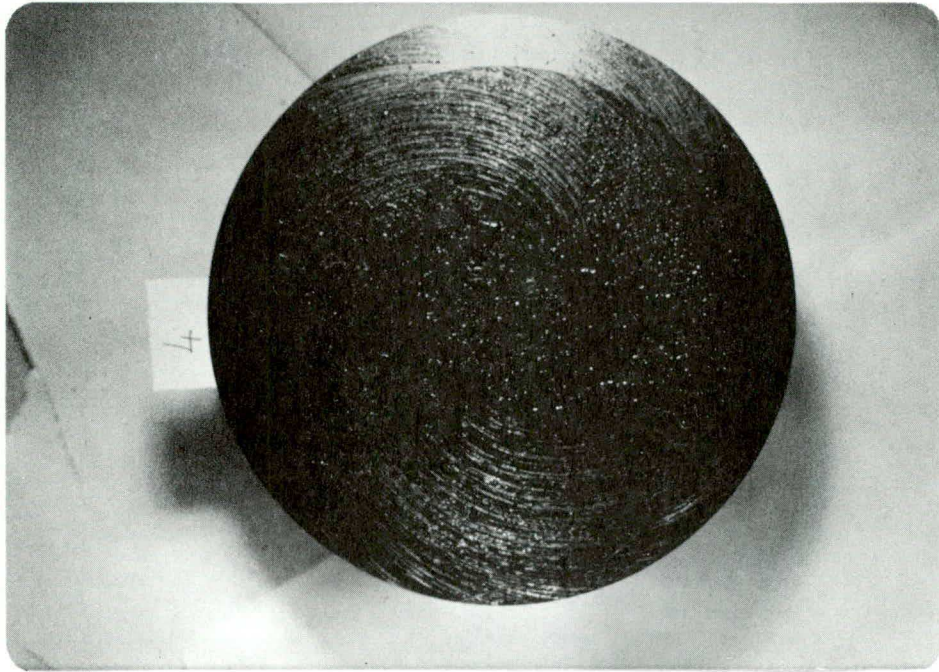


Fig. 7

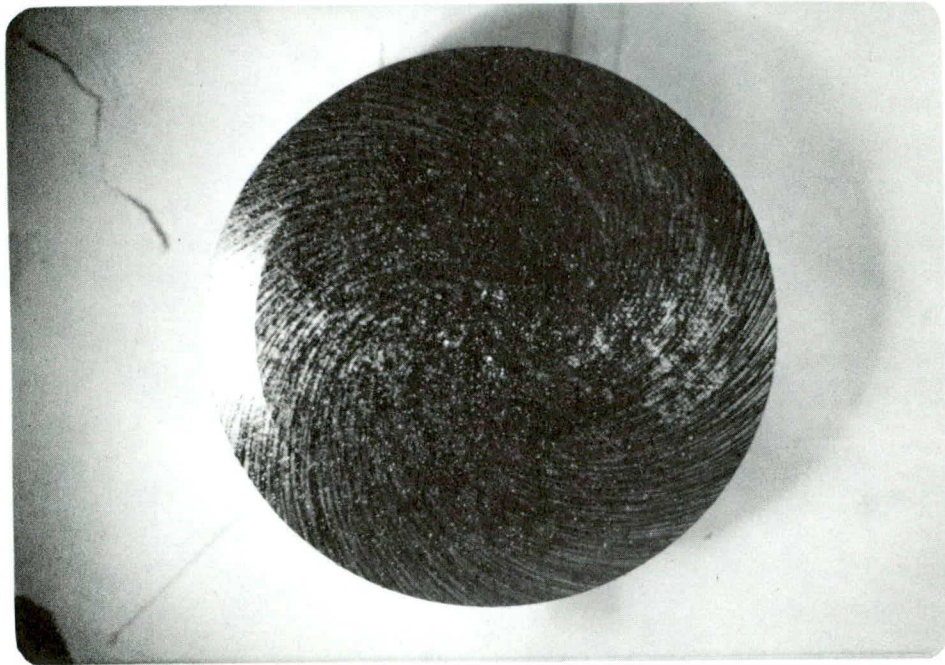


Fig. 8



# SOLUTIONS DE POLYOXYETHYLENES

VITESSE TANGENTIELLE

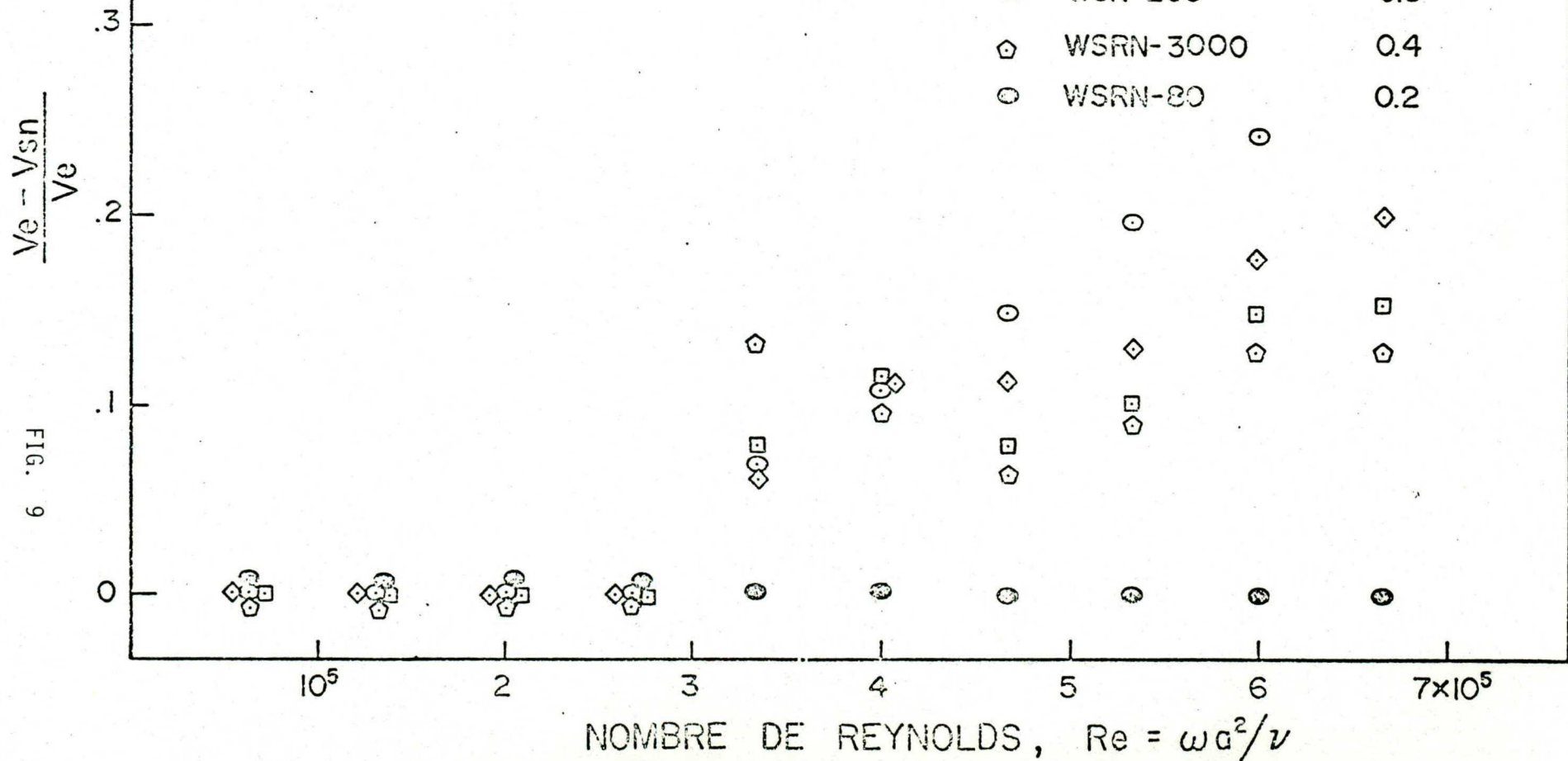
$r = 77.0 \text{ mm}$

$z = 0.3 \text{ mm}$

POLYMERE

POIDS  
MOLECULAIRE  $\times 10^6$

○	WSR-301	4.6
◇	WSR-1105	0.9
□	WSR-205	0.6
◇	WSRN-3000	0.4
○	WSRN-80	0.2



# SOLUTIONS DE POLYOXYETHYLENES

VITESSE RADIALE

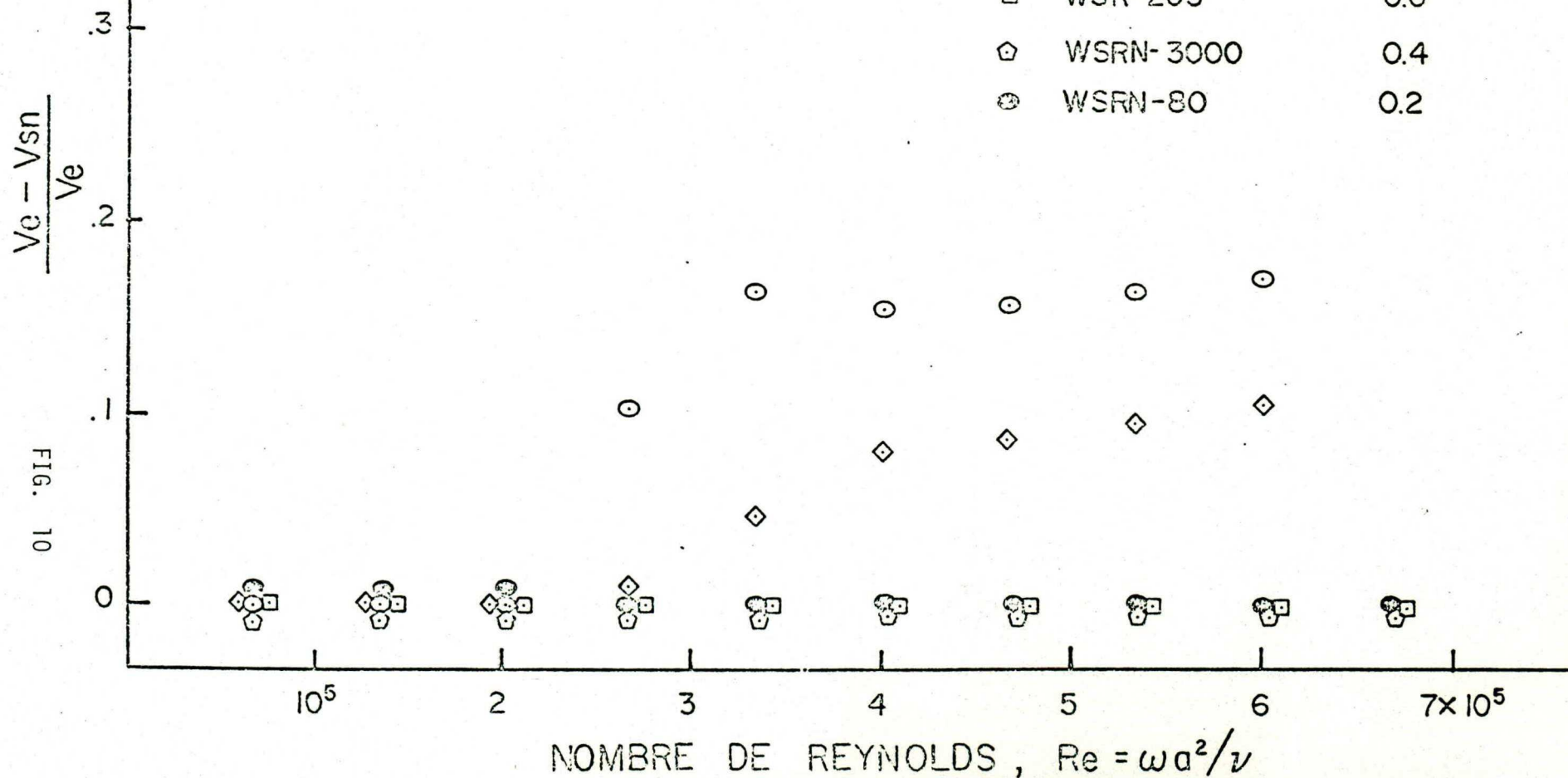
$r = 77.0 \text{ mm}$

$z = 0.3 \text{ mm}$

POLYMERE

POIDS  
MOLECULAIRE  $\times 10^6$

○	WSR-301	4.6
◇	WSR-1105	0.9
□	WSR-205	0.6
◇	WSRN-3000	0.4
⊙	WSRN-80	0.2





ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00288772 5