

# ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'ADDITION DES POLYMÈRES SUR LA RÉDUCTION DE LA RÉSISTANCE AU FROTTEMENT DANS UN ÉCOULEMENT TURBULENT

## 1 INTRODUCTION

Le problème de frottement en écoulement turbulent des conduites lisses et rugueuses a suscité de nombreux travaux depuis le début du siècle. Une caractéristique parmi tant d'autres, utilisée dans les calculs hydrauliques, est le coefficient de frottement « $\lambda$ ». Ainsi de nombreux modèles ont été suggérés permettant le calcul de ce coefficient en fonction du régime de l'écoulement, état de surface etc. [1, 2, 3, 4]. Le but de ce travail n'est pas l'étude du frottement turbulent dans un écoulement mais la réduction de ce dernier [5].

## 2 ÉTUDE DES PERTES DE CHARGE DANS LES ÉCOULEMENTS VISQUEUX

En premier lieu nous nous proposons d'étudier les travaux de Poiseuille, Blasius, Prandtl etc. [1, 2, 4] concernant la détermination du coefficient de frottement. Plusieurs corrélations ont été suggérées dans ce domaine.

### • Régime laminaire

$$\lambda = \frac{64}{Re} \text{ Poiseuille}$$

### • Régime turbulent

$$\text{Turbulent lisse : } \lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \text{ Blasius}$$

$$\text{Turbulent rugueux : } \lambda = 0,11 \left( \frac{ke}{D} \right)^{0,25} \text{ Shiffriinson}$$

$$\lambda = \frac{0,25}{\log \left( \frac{3,7D}{2ke} \right)} \text{ Prandtl et Nikuradse}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left( \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2,51} \right) \text{ Prandtl et Von Karman}$$

### • Régime transitoire

$$0,25 < \frac{ke}{\delta} < 6 \quad \delta : \text{épaisseur de la couche limite}$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{ke}{D} \right)^{0,25} \text{ Altchule}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left( \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2,51} + \frac{3,7D}{ke} \right) \text{ Collebrooke}$$

Les études sur les calculs du coefficient de frottement ont pris un aspect fondamental lorsque Prandtl et Von Karman ont rattaché le problème aux théories de la couche limite et de la turbulence. Ainsi Nikuradse, disciple de l'école de Prandtl, a vérifié en grande partie leurs théories par ses nombreuses expérimentations. Nikuradse a fait les deux études de base du frottement turbulent [4]:

- Mesure du coefficient des pertes de charge conduisant aux lois logarithmiques.

- Détermination du profil des vitesses.

### • Frottement laminaire

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy}$$

$$\frac{U}{U_{max}} = 1 - \left( \frac{R}{R_0} \right)^2$$

### • Frottement turbulent

La contrainte de Reynolds due aux fluctuations des vitesses est  $\tau = r U' V'$

où :  $U'$ ,  $V'$  sont les vitesses de déformation

$$U = V' = \frac{dU}{dy} y$$

La longueur du mélange est :

$$l = \chi y$$

où  $\chi$  est le coefficient de mélange

$$\tau = \rho l^2 \frac{dU}{dy} \frac{dU}{dy} = \zeta y$$

ce qui donne l'équation bien connue :

$$U^+ = 5,75 \log y^+ + 5,50 \text{ Profil universel des vitesses à l'intérieur d'un tube}$$

$U^+ = y^+$  au voisinage de la paroi

$$U = \frac{U^+}{v}$$

$$y^+ = \frac{U^+ \delta}{v}$$

$$y^+ = \frac{\sqrt{\lambda}}{1} \text{ vitesse de frottement}$$

$y^+ > 20$  zone turbulente

$8 < y^+ < 30$  zone de transition

$$U^+ = 3,05 + 11,5 \log y^+$$

$$\delta = \frac{11,6D}{Re} \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \text{ épaisseur de la couche limite}$$

$8 < y^+ < 7$  zone très proche de la paroi

$y^+ > 20$  zone turbulente

$8 < y^+ < 30$  zone de transition avec  $U^+ = -3,05 + 11,5 \log y^+$

D'autres travaux concernent au contraire l'étude de la réduction de ce dernier par les différentes méthodes.

## 3 RÉDUCTION DE FROTTEMENT PAR VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES FLUIDES

Nous nous limitons à la réduction de frottement par variation des caractéristiques mécaniques des fluides en introduisant les polymères hydrosolubles ou solubles dans d'autres solvants [5]. L'intérêt de cette méthode de la réduction au frottement tient principalement aux faibles quantités de polymères recuises pour obtenir des effets considérables.

### 3.1 Propriétés des solutions des polymères

Les molécules des polymères s'allongent sous l'effet

M. BOUMAZA · M. KHE-ROUF

Centre Universitaire de Guelma, Institut de Génie Civil GUELMA

## RÉSUMÉ

Dans cet article, nous étudions la possibilité de réduction de la résistance hydraulique due au frottement par addition des polymères dans des conduites en (P.C.V.) qui reste une des préoccupations essentielles des hydrauliciens. Cependant la réduction des frottements se fait généralement par variation des caractéristiques mécaniques des fluides. On a essayé par ce travail d'approcher ce phénomène dans les conditions locales de notre pays. A cet effet, on a utilisé un polymère carboxyl méthyle cellulose (C.M.C.). Notre étude expérimentale consiste d'une part à effectuer plusieurs essais avec l'eau naturelle et d'autre part l'addition des polymères pour différents diamètres. On a constaté que la réduction du coefficient de perte de charge est sentie pour les quatre diamètres choisis à partir d'un ajout de polymère (C.M.C.) à une concentration faible de 2,5 ppm. Aussi la réduction des pertes de charge est très importante pour des faibles valeurs du nombre de Reynolds, mais au fur et à mesure que le nombre de Reynolds augmente, l'efficacité diminue légèrement et devient constante et ceci pour la même conduite. Pour conclure nous pourrions utiliser ces polymères afin d'augmenter la portée des lances à incendies, le transport d'hydrocarbure en oléoduc.

## MOTS-CLÉS

Polymères, coefficient de perte de charge, Nombre de Reynolds.

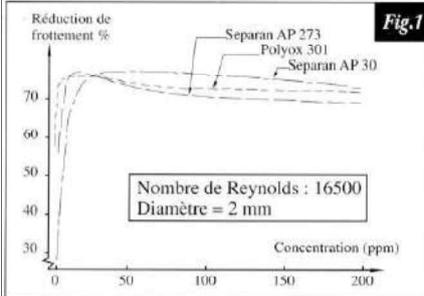


Fig.1

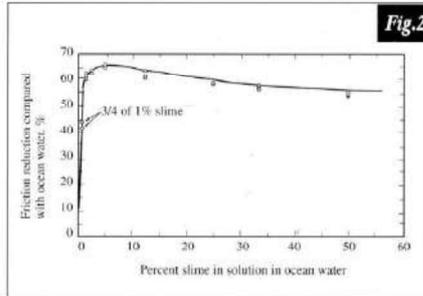


Fig.2

figure 2. Réduction de frottement obtenue avec le mucus du Sphyrane argentina

figure 1. Réduction de frottement dans une conduite circulaire de 2mm de diamètre en fonction de la concentration de polymère pour un nombre de Reynolds constant.

des actions hydrodynamiques exercées sur elles par le fluide en mouvement. Cette modification de leurs configurations semble être la propriété primordiale requise pour qu'elles donnent lieu à une réduction substantielle du frottement en écoulement turbulent. Les effets épaississants de ces polymères n'apparaissent que pour des concentrations beaucoup plus élevées. A titre d'exemple, la Fig. (1) montre les résultats par de Lagarde dans une conduite tubulaire de 2 mm de diamètre [5].

On observe que pour des concentrations croissantes la résistance de frottement augmente très rapidement jusqu'à atteindre au maximum de 75% pour des concentrations de

5 à 10 ppm suivant le polymère utilisé et diminue légèrement ensuite. Signalons aussi le rôle joué par le mucus des poissons peut être interprété comme celui d'une couche concentrée qui se dissout d'une manière contrôlée dans le fluide.

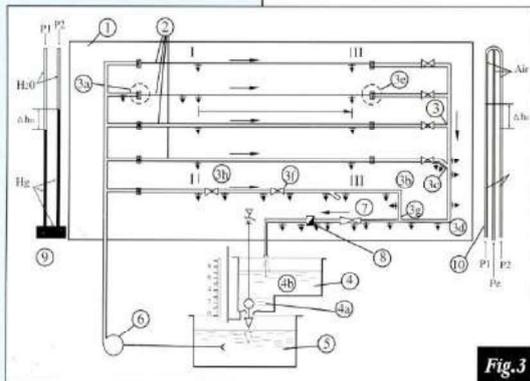


Fig.3

Fig 3. Schéma de l'installation pour l'étude de la réduction du frottement

- 1- panneau général;
- 2 conduite d'essai; 3a- rétrécissement brusque; 3b- élargissement brusque; 3c- coude à 45° -3d- coude à 90; 3e- coude standard; 3f -3g, 3h- robinets, 4- réservoir pour mesurer les débits; 5- réservoir de stockage; 6- pompe centrifuge; 7- débitmètre; 8- diaphragme; 9- piézomètre à mercure; 10- piézomètre à eau.

Le travail le plus complet est celui de Rozens et Cornfors puisqu'ils étudient le mucus de vingt poissons différents d'eau douce et de mer. A titre d'exemple la Fig (2) montre les résultats obtenus avec le mucus de Sphyranea Argentina. Neuf de ces poissons donnent à des concentrations comprises entre 5 et 50% des réductions de frottement supérieur à 60% dans un écoulement turbulent en conduite circulaire à nombre de Reynolds égale à 8000. Maintenant on peut se poser la question quelles sont les modifications des profils des vitesses moyennes de la couche limite qui justifieraient un tel phénomène.

Les mesures ont montré que dans la sous-couche visqueuse la formule:  $U^+=Y^+$  reste applicable, tandis que dans la zone extérieure l'abscisse à l'origine de la formule est modifiée:  $U^+=5,75 \log Y^++\Delta B$

$\Delta H$ = déplacement dû à la présence du polymère

$\Delta B = f(De)$   
 $De$ : nombre de Deborah  $\frac{\theta}{t_c}$

$\theta$ : temps de relaxation de la solution  $10^{-4} \text{ à } 10^{-3} \text{ s}$

$T$ : temps caractéristique de l'écoulement  $\frac{V}{U^*} \times 2$

Pour qu'une réduction se produise, il faut que  $De > 1$

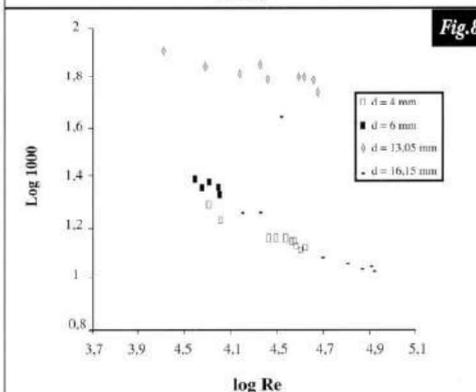
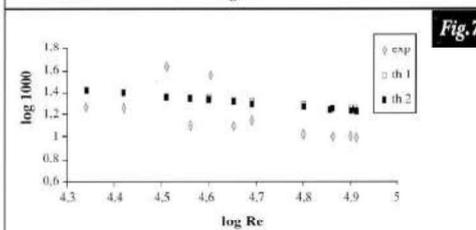
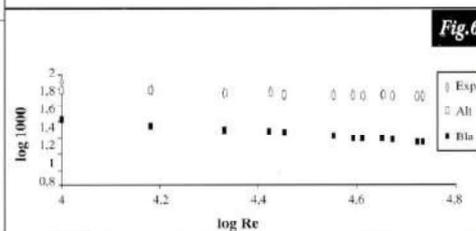
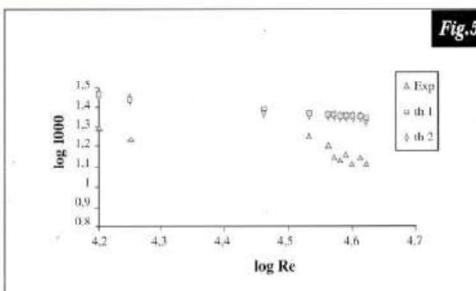
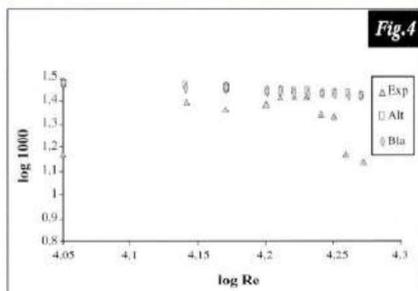
Nous allons nous limiter à considérer l'utilisation du phénomène de réduction de frottement par addition des polymères en hydrodynamique interne (conduites). L'intérêt de cette étude tient principalement aux faibles quantités de polymères. Cependant, pour vérifier l'efficacité de cette méthode, il faut tenir compte de plusieurs paramètres qui influent sur le frottement, qui sont notamment nombre de Reynolds, viscosité, aspérités de la paroi, diamètre des conduites etc.

Par ailleurs, pour déterminer les concentrations optimales du polymère pour les différentes conduites, la méthode expérimentale s'impose.

#### 4 DESCRIPTION DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE UTILISEE

Cette méthode est basée sur des mesures effectuées au laboratoire afin de réduire le coefficient de frottement. L'installation (Fig 3) présente un système où circule l'eau, elle se compose du réservoir principal (5), d'une pompe (6), différentes conduites d'essais en plastique (2), un ensemble d'appareils de contrôle et de mesure: robinets(3f)(3h), prises de pression (3a)-(3b), piézomètres (9)-(10). Les conduites d'essai sont de diamètre 4mm, 6mm, 16,15mm et 13,05mm avec la rugosité artificielle  $ke=1,59\text{mm}$ . Elles sont horizontales munies de prises de pression en deux points de chaque conduite. Les longueurs des quatre conduites sont égales à 1 m. On a pu tenir compte aussi d'une zone de stabilisation du régime d'écoulement de 30 cm. Son mode de fonctionnement est comme suit: Après avoir rempli le réservoir de stockage d'eau, la pompe de refoulement aspire l'eau du réservoir pour alimenter les conduites d'essais, ensuite les conduites sont purgées des bulles d'air à l'aide des robinets pour ne pas perturber les mesures de pression. Le fonctionnement de l'installation s'effectue dans les conditions normales (température ambiante).

La plus importante particularité de la méthode utilisée dans notre travail réside dans la comparaison d'une part, des résultats obtenus avec l'analyse théorique sans addition de la solution de polymère et d'autre part le même schéma d'expériences avec l'eau modifiée. Afin d'étudier l'influence des polymères sur la réduction de la résistance au frottement, on calcule l'efficacité du polymère qui est donnée par:



$$E = \frac{\lambda_i - \lambda_f}{\lambda_i} \cdot 100\%$$

où :  $\lambda_f$  : le coefficient de frottement final  
 $\lambda_i$  : le coefficient de frottement initial

### 5 ESSAIS ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX SANS ADDITION DES POLYMÈRES

Calcul du débit

$$Q = W/t \quad (l/s)$$

W: volume qui s'est écoulé dans le récipient gradué  
 t: unité de temps lu à partir d'un chronomètre

Calcul des pertes de charge: (manomètre différentiel à mercure)

$$H_p = \Delta h \left( \frac{t_{Hg} - t}{t} \right)$$

$\Delta h$ : différence de niveau mercure

$\tau_{Hg}$  : poids spécifique du mercure=13600 kg/m<sup>3</sup>

Vitesse de l'écoulement:

$$U = Q/A$$

A: section de la conduite

Viscosité cinématique:

$$\nu = 0,0178 / (1 + 0,0337t + 0,00022t^2) \text{ stockes}$$

T: température en °C

Coefficient de frottement expérimental

$$\lambda = \frac{2hDg}{lU^2} \quad (\text{Darcy Weisback})$$

h: perte de charge

D: diamètre de la conduite

g: intensité de la pesanteur

l: longueur de la conduite

U: vitesse de l'écoulement

Rugosité équivalente des conduites: (régime quadratique)

$$k_e = \left( \frac{\lambda_m}{0,11} \right)^4 D \text{ Chiffirinson}$$

• Diamètre 4,00 mm;  $k_e = 0,001$  mm

• Diamètre 6,00 mm;  $k_e = 0,002$  mm

• Diamètre 16,15 mm;  $\gamma = 0,001$  mm

Calcul du coefficient de frottement théorique:

$$\lambda_{th1} = 0,11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{k_e}{D} \right)^{0,25} \text{ Alchule}$$

$$\lambda_{th2} = \left( \frac{0,3164}{Re} \right)^{0,25} \text{ Blasius}$$

Les résultats des expériences sont représentés sur un diagramme logarithmique  $\log(1000\lambda)$  en fonction de  $\log(Re)$  pour la série de diamètres étudiés. Ces résultats sont illustrés sur les Fig. (4 à 7). De ce graphique, on peut tirer les conclusions principales:

• Pour les diamètres 4 et 6mm les résultats obtenus d'après les modèles théoriques d'Alchule et Blasius sont presque identiques. Ces résultats diffèrent peu des courbes expérimentales, ceci est dû au fait que la rugosité est faible.

• Pour ce qui est du diamètre 13,05 mm, le modèle d'Alchule décrit de façon satisfaisante les résultats expérimentaux du fait que la rugosité est artificielle. Par contre le modèle de Blasius a donné des résultats moins inférieurs dus au régime de la conduite où le coefficient est indépendant de Re.

À titre comparatif les courbes expérimentales pour les quatre diamètres sont représentées sur un même graphe Fig. (8) pour voir l'influence du diamètre sur le coefficient de frottement expérimental. On remarque que ces courbes expérimentales présentent une allure similaire. Elles semblent présenter une allure décroissante, ainsi le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. D'autre part on remarque que pour les diamètres 4mm, 6mm et 16,15mm le coefficient de frottement diminue au fur à mesure que le diamètre augmente, hormis le diamètre 13,05mm.

figure 4 Courbe  $\lambda=f(Re)$  pour  $D=4mm$ ,  $Ke=0,001mm$

figure 5 Courbe  $\lambda=f(Re)$  pour  $D=6mm$ ,  $Ke=0,002mm$

figure 6 Courbe  $\lambda=f(Re)$  pour  $D=13,05mm$ ,  $Ke=1,59mm$

figure 7 Courbe  $\lambda=f(Re)$  pour  $D=16,15mm$ ,  $Ke=0,002mm$

figure 8 Courbe  $\lambda=f(Re)$  pour  $D=4,6, 13,05$  et  $16,15mm$

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] N. CARLIER, Hydraulique générale et appliquée, Eyrolles, Paris 1972
- [2] B. NEKRASSOV, Cours d'hydraulique, Mir, 1978
- [3] C. COMOLET, Mécanique expérimentale des fluides, Masson, Paris, 1979
- [4] D PAUL HELTER, L. SAKCKMAN, Contribution à l'étude du frottement turbulent des fluides en conduites lisses, Série de documentation scientifique et technique de l'armement N° 414 1965
- [5] H. FRUMAN, B. DELAGARDE, Réduction de frottement en écoulement turbulent par injection des macromolécules, Revue Houille Blanche N° 66 1984.

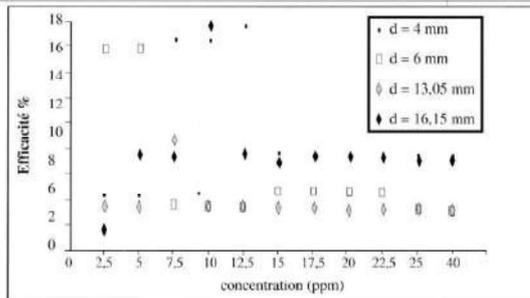


figure 9 Efficacité de C.M.C. pour les quatre diamètres

**5. EXPÉRIENCES AVEC ADDITION DU POLYMÈRE**

- *Polymère utilisé:* carboxyl méthyle cellulose (C.M.C.) c'est un polymère naturel.
- *Choix de la concentration:* La concentration de base requise pour la réduction de frottement dans l'installation de Matlabo est de 5g de solution de (CMC) dans un litre d'eau.
- *Dissolution du (CMC):* 2 à 3 jours pour que la solution soit complètement dissoute (température ambiante 24 à 25°C).

Les expériences ont été élaborées avec des débits maximum pour chaque diamètre par augmentation successive des concentrations à partir de zéro jusqu'à 40 ppm par pas de 2,5 ppm.

En analysant les résultats expérimentaux par addition des polymères  $\lambda = f(C)$ , un calcul de l'efficacité est nécessaire :

$$E = \frac{\lambda_0 - \lambda_c}{\lambda_0} 100\%$$

La Fig. (9) illustre l'ensemble des résultats.

Toutes les courbes ont une allure similaire. Elles passent par un même pic et puis ça diminue et devient stationnaire, ceci est obtenu pour des concentrations différentes, hormis le diamètre 16,15 mm.

- Diamètre 4,00 mm C = 7,5 à 10 ppm
- Diamètre 6,00 mm C = 2,5 à 5 ppm
- Diamètre 13,05 mm C = 5 à 7,5 ppm
- Diamètre 16,15 mm C = 7,5 ppm

L'efficacité maximale est presque la même pour les diamètres 4,6 et 13,05mm, mais à des concentrations différentes, par contre pour le diamètre 16,15 mm l'efficacité maximale est moins importante. La réduction de frottement est environ de 17% pour des concentrations variant de (7,5 à 12,5 ppm). On peut tirer les résultats principaux de notre travail:

1. La présence du polymère (C.M.C.) a permis d'améliorer les pertes de charge dans les conduites en plastique (P.V.C.)
  2. La réduction de frottement dépend de deux paramètres: Concentration et rugosité
  3. Influence de Re et de la viscosité.
- En ce qui concerne la viscosité, après des mesures on a pu constater que la viscosité des solutions des polymères est pratiquement constante aux concentrations recuises du fait que les solutions des polymères présentent des caractéristiques viscoélastiques. Quant à l'influence de Re, on a pu conclure:
- l'efficacité augmente quand Re diminue
  - l'efficacité dépend du diamètre.

**6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

- Un effet de diminution de la résistance au frottement par addition du polymère C.M.C.
  - Efficacité maximale est de 20% pour une concentration inférieure à 12,5 ppm
  - La réduction de frottement n'est que de 8,62% pour le diamètre 16,15 mm
  - Valeur inférieure aux diamètres plus petits
  - La présence du polymère permet d'allonger la zone viscoélastique.
- Les recommandations suivantes peuvent être suggérées:
- Industrie
  - Agriculture
  - Hydraulique urbaine
  - Portée de lance à incendie
  - Transport d'hydrocarbure en oléoduc
  - Firmes étrangères (Waterman) ■