

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

وزارة التعليم العالي
Ministere aux Universites

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Hydraulique

THESE DE MAGISTER

Présentée Par : SAFRI - Abdelhamid
en Juillet 1992

THEME :

Influence des Polymeres
sur la perte de charge
des Mixtures de vase

Président Dr. A. KETTAB Maître de conférence ENP

Rapporteur Dr. A. KHALDI Chargé de cours USTOran

Examineurs Dr. A. BILEK Chargé de cours ENP

Mr Y. MOULOUDI Chargé de cours ENP

Dr M. BERKANI Chargé de cours ENP

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et populaire



وزارة التعليم العالي

Ministere aux Universites

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Departement Hydraulique

THESE DE MAGISTER

Présentée Par : SAFRI - Abdelhamid

en Juillet 1992

THEME :

Influence des Polymeres
sur la perte de charge
des Mixtures de vase

Président Dr. A. KETTAB Maitre de conférence ENP

Rapporteur Dr. A. KHALDI Chargé de cours USTOran

Examineurs Dr. A. BILEK Chargé de cours ENP

Mr Y. MOULOUDI Chargé de cours ENP

Dr M. BERKANI Chargé de cours ENP

AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués à L'INSTITUT D'HYDRAULIQUE DE L'U.S.T.Oran dans le laboratoire de transport solide.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont rendu possible l'élaboration et la rédaction de ce mémoire.

Monsieur KHALDI Abdelkrim qui a accepté de m'encadrer a qui j'exprime ma gratitude pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté au cours de cette étude.

A Monsieur M.BERKANI, qui a bien voulu me faire bénéficier de ses conseils éclairés dans la mise en forme du présent mémoire

A tout les enseignants de cet Institut plus particulièrement SAAD-CHEMLOUL Nour-eddine, A.LADOUANI, Belhadri, N.BOUDJENANE qui était à la direction de cet institut, sans oublier A.DJEHICHE.

A tout les enseignants du C.U.Tiaret sans oublier S.CHAHBI, A.BELAHCENE, N.A/SADOK..... ..

Que tous ceux qui m'ont aidé et soutenu sans être nommés ou oubliés, veuillent bien trouver ici mes plus sincères remerciements.

Notations et symboles	7
I Introduction	10
II Etude bibliographique	10
II.1 Notions de pertes de charge	10
II.1.1 Définition	10
II.1.2 Formulations de la perte de charge	10
II.1.2.1 Formulation empirique	11
II.1.2.2 Formulation rationnelle	14
II.1.2.2.1 Experiences de Reynolds	14
II.1.2.2.2 Ecoulement laminaire	15
II.1.2.2.3 Passage du régime laminaire au régime turbulent	17
II.1.2.2.4 Ecoulement turbulent	17
II.1.2.2.5 Lois de frottement pour les conduites circulaires	25
II.2 Cas de la réduction de perte de charge	29
II.2.1 Historique	29
II.2.2 Mise en évidence	31
II.2.3 Dégradation et propriétés des solutions de polymères	32
II.2.4 La réduction de frottement	32
II.2.5 Début de la réduction de frottement	34
II.2.6 Influence des polymères sur la structure de la turbulence	35
II.2.7 Modèles proposés	36
II.2.8 Interprétations du mécanisme de réduction de frottement	38
II.3 Transport des particules solide dans des conduites	42
II.3.1 Définition et caractéristiques des mixtures de vase	42
II.3.2 Classifications et régimes d'écoulement	42
II.3.2.1 Classification des solides	42
II.3.2.1 Régimes d'écoulement	43
II.3.3 Perte de charge des mixtures	45

III Dispositif expérimental et méthodes de mesure utilisées	48
III.1 Dispositif expérimental	48
III.1.1 Paramètres d'écoulement	48
III.1.2 Paramètres rhéologiques	51
III.2 Méthodes de mesure	53
III.2.1 Préparation des mixtures et solutions étudiées	53
III.2.2 Mesure du débit	53
III.2.3 Mesure de la concentration en particules solides et en polymère	54
III.2.4 Mesure de la perte de charge	54
IV Résultats expérimentaux et interprétations	56
IV.1 Matériaux utilisés	56
IV.1.1 Vase	56
IV.1.2 Polymères utilisés	58
IV.2 Comportement rhéologique des différentes mixtures et solutions étudiées	60
IV.2.1 Généralités	60
IV.2.2 Solutions et mixtures étudiées	61
IV.2.2.1 Mixtures vase et vase-polymères	61
IV.2.2.2 Solutions diluées de polymères	63
IV.3 Influence des matériaux utilisés sur la perte de charge	64
IV.3.1 Influence de la concentration de la vase	64
IV.3.2 Influence des polymères	65
IV.3.2.1 Influence des polymères sur l'écoulement de l'eau claire	66
IV.3.2.2 Influence des polymères sur les mixtures de vase	66
IV.4 Influence des matériaux utilisés sur le coefficient de perte de charge unitaire λ	69
IV.5 Allures et valeurs du degré de réduction de la perte de charge	71
IV.6 Effet du diamètre de la conduite sur la perte de charge	72
V Conclusion	111
VI Bibliographie	113



ΔP_pPerte de pression pour une solution ou mixture polymérique

Q.....Débit volumique

r.....Distance à l'axe de la conduite

R.....Rayon de la conduite

Re.....Nombre de Reynolds

Rem.....Nombre de Reynolds pour les mélanges à comportement newtonien

Re_n^*Nombre de Reynolds généralisé pour un fluide d'Ostwald

Re_m^*Nombre de Reynolds généralisé pour un fluide de Bingham

S.....section du conduit = $\pi D^2/4$

T.....Temps d'écoulement

U_mVitesse de débit (moyenne)

u.....Vitesse instantanée

u_lVitesse locale instantanée : $u_1 = u$; $u_2 = v$; $u_3 = w$

\bar{u}Vitesse locale moyenne

U^*Vitesse de frottement

u^+Vitesse réduite = u/U^*

V.....Volume du fluide

V_mVolume du mélange

V_sVolume des particules solides

V_wVolume d'eau

W_lLimite de liquidité

W_pLimite de plasticité

y.....Distance à la paroi

y^+Distance réduite = $y U^* / \nu$

2) Caractères grecs

γVitesse de déformation

δ_{ij}Symbole de Kronecker (= 0 ou 1)

τContrainte de cisaillement

τ_0Seuil de cisaillement pour un fluide de Bingham

τ_wContrainte à la paroi

μViscosité dynamique

μ_tViscosité turbulente

μ_pViscosité plastique

νViscosité cinématique

λCoefficient de perte de charge unitaire = $4f$

λ_wCoefficient de perte de charge unitaire pour l'eau

λ_mCoefficient de perte de charge unitaire des mixtures

1) Caractères latins

- C.....Coefficient de Chezy
 Cc.....Coefficient de conformité
 Cu.....Coefficient d'uniformité
 Cv.....Concentration volumique de vase (en pourcent)
 Cp.....Concentration massique de polymère (partie par million par poids)
 Cv_{lim} et Cp_{lim} Concentrations de vase et de polymère limitant le domaine newtonnien et non-newtonien
 d.....Diamètre des particules solide
 D.....Diamètre de la conduite (D₁=36mm, D₂=53mm, D₃=84mm)
 E.....Paramètre d'Engler
 f.....Coefficient de frottement = $\lambda/4$
 g.....Accélération de la pesanteur
 ΔH.....Perte de charge en hauteur de fluide
 I_p.....Indice de plasticité
 J.....Pente hydraulique de l'eau
 J_m.....Pente hydraulique du mélange
 J_p.....Pente hydraulique de la solution diluée de polymère
 k.....Consistance du fluide dans la loi d'Ostwald
 k_v.....Consistance du fluide dans la loi de Vocadlo
 L.....Longueur total de la conduite
 L_i(i=1,2,3).Longueur totale des conduites relative aux conduites D₁, D₂ et D₃ (L₁=12.24 m L₂=18.52 m L₃=26.30 m)
 l_i(i=1,2,3) longueur des tronçons d'essais relative aux conduites D₁, D₂ et D₃ (l₁=3.727 mm, l₂=6.31 mm, l₃=8.00 mm)
 l.....Longueur de mélange
 l_m.....Parcours de mélange
 M_m.....Masse du mélange
 M_p.....Masse du polymère
 M_v.....Masse d'eau
 M_s.....Masse des particules solides
 n.....Indice du fluide dans la loi d'Ostwald
 p.....Pression en un point
 ΔP.....Perte de pression du solvant (l'eau)

λ_pCoefficient de perte de charge unitaire pour les solutions
de polymère

ρ_mMasse volumique du mélange

ρ_sMasse volumique des particules solide

ρ_vMasse volumique de l'eau

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE I

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La sédimentation accélérée des retenues pose un grave problème aussi bien pour les services de stockage que pour les services d'exploitation. Ce phénomène est devenu une préoccupation essentielle. Plusieurs procédés de luttés sont utilisés, il existe deux aspects remèdes, et dévasement. Le premier aspect consiste à empêcher l'arrivée des sédiments par les eaux de ruissellement au versant de la retenue. Il s'agit du traitement du bassin versant et du lit majeure du cours d'eau. Le second aspect utilise d'une part l'évacuation des sédiments par vidange de fond et d'autre part le dévasement mécanique.

Ce dernier procédé est le plus couramment utilisé, notamment lorsque les consignes d'exploitation interdisent toute perte d'eau. Son application à un type de barrage déterminé nécessite une connaissance suffisante des causes et du processus d'envasement notamment le tassement et la consolidation de la vase. Une telle connaissance pour le choix économique des moyens à mettre en oeuvres ne peut être obtenue qu'en réduisant l'énergie consommée lors du transport de la vase qui s'effectue généralement en écoulement turbulent dissipant une perte de charge importante. C'est dans ce contexte, de réduire cette perte de charge, que se situe notre étude, ceci en utilisant des polymères.

Le phénomène de réduction de frottement caractérisé par la modification des écoulements par addition de faibles quantités de macromolécules au solvant a été mis en évidence par les travaux expérimentaux de divers auteurs [15,16,17] et notamment en 1948 par ceux de TOMS [13]. Cette réduction de frottement se traduit par une diminution de la perte de charge (ou augmentation du débit) dans une conduite ou par la diminution de la résistance à l'avancement (ou augmentation de la vitesse) d'un obstacle. Les différents travaux expérimentaux sur la réduction de frottement par polymères ont montré, que celle-ci n'apparait que dans des écoulements turbulents, que la nature et la concentration en polymères sont des facteurs qui interviennent dans le taux de réduction de frottement. L'importance de ce phénomène est démontré à travers les possibilités d'application dans les différents

domaines industriels. En effet, les polymères en tant qu'additifs réducteurs de frottement ont été utilisés dès la deuxième guerre mondiale pour le transport de pétrole et ses dérivés. Depuis, de nombreuses recherches d'applications ont été entreprises et certaines réalisations ont vu le jour, parmi ces applications on peut citer :

- Transport de pétrole dans les oléoducs.
- Augmentation de la capacité de conduites.
- Augmentation des effets des jets dans la lutte contre les incendies.
- Hydrotransport.
- Turbomachines.

C'est au laboratoire de Transport Solide de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, que nous avons effectué l'étude présentée, dont le but est d'étudier l'effet des polymères sur le transport de la vase dans des conduites fermées. Les paramètres suivants ont été variés: la nature du polymère, la concentration du polymère et de la vase ainsi que le diamètre de la conduite.

Dans la première partie du chapitre II nous donnons un bref rappel sur la notion de la perte de charge et les différentes méthodes de sa formulation, ainsi que les notions fondamentales de la turbulence newtonienne permettant de souligner certains aspects particuliers du phénomène de perte de charge. Dans la deuxième partie, afin de définir le mécanisme de réduction de frottement, nous justifions notre essai de synthèse bibliographique en présentant les principaux résultats expérimentaux et théoriques établis par d'autres auteurs. Dans la deuxième partie nous présentons une revue bibliographique sur les différents travaux effectués sur la réduction de frottement et dans la troisième partie, nous présentons les principaux résultats obtenus dans le transport des mélanges solide-eau.

Dans le chapitre III, nous présentons l'installation expérimentale et les méthodes de mesures utilisées pour la détermination de la perte de charge, la concentration de polymères et de vase et le débit volumique ainsi que les erreurs que peuvent entraîner notre technique de mesure. D'autre part nous présentons les installations utilisées pour la détermination des paramètres

rhéologiques et la méthode de préparation de ces mixtures.

Le chapitre IV est consacré à la présentation des résultats expérimentaux. Un bref rappel des caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi que leurs comportements rhéologiques sont présentés dans une première partie. Dans la deuxième partie, nous avons étudié l'influence des paramètres cités plus haut sur la perte de charge, le coefficient de perte de charge unitaire et le degré de réduction. Dans une dernière partie de ce mémoire, nous commentons l'ensemble des résultats trouvés dans cette étude.

CHAPITRE 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE II

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

PREMIERE PARTIE

II.1 NOTION DE PERTE DE CHARGE DANS LES CONDUITES CIRCULAIRES

II.1.1 DEFINITION:

La notion de perte de charge est liée à l'effet de la viscosité et de la turbulence. Elle exprime l'énergie perdue par frottement visqueux et par frottement turbulent. En exprimant le bilan énergétique entre deux sections d'une conduite de caractéristiques uniques d'un écoulement permanent ou non permanent d'un liquide visqueux, la perte de charge totale est définie globalement comme étant la différence de charge entre ces deux sections.

II.1.2 FORMULATION DE LA PERTE DE CHARGE

En appliquant le théorème de Bernoulli entre deux sections droites d'une conduite, la perte de charge est $\Delta H = H_1 - H_2$ où H_1 et H_2 sont l'énergie mécanique moyenne de la particule respectivement dans la section 1 et la section 2 figure II-1.

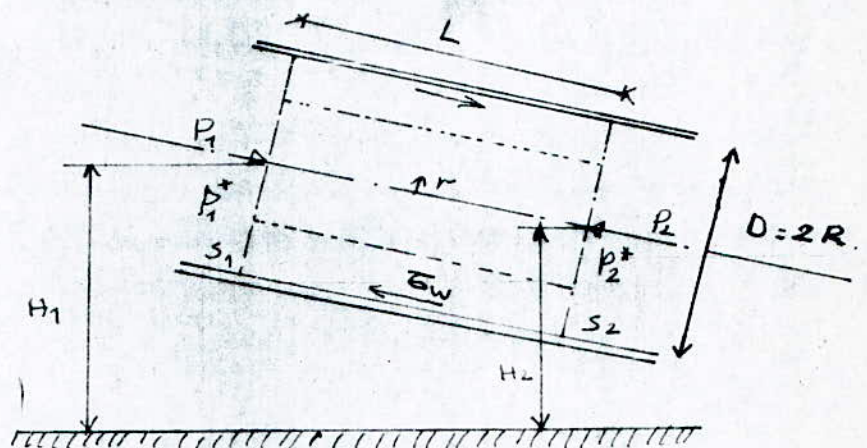
Tout le problème posé pour l'ingénieur ou le chercheur c'est de pouvoir exprimer cette perte de charge mathématiquement et de la quantifier. En ce qui concerne le premier point, sa formulation mathématique est difficile étant donné que les fluctuations des vitesses (énergie turbulente) étaient difficilement détectable. Par contre les secondes, en ignorant le phénomène de turbulence on a injecté dans l'expression de l'énergie mécanique des coefficients expérimentaux pour exprimer l'énergie perdue.

En d'autres termes, nous avons affaire à des formules rationnelles de pertes de charge faisant intervenir l'effet de la viscosité de turbulence et des formules empiriques qui ignorent ce phénomène.

II.1.2.1 FORMULATION EMPIRIQUE

Soit une conduite circulaire de caractéristiques uniques de charges moyennes H_1 et H_2 et de forces de frottements τ sur les parois. On applique le théorème de quantité de mouvement à la surface de référence constituée par les parois de la conduite et les sections S_1 et S_2 .

La variation de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces appliquées à la section de référence fermée, étant donné que l'écoulement est permanent en moyenne et que la vitesse ne varie pas d'une section à une autre (équation de continuité), la contribution de la quantité de mouvement est nulle, le fluide considéré est donc en équilibre sous l'action des forces de pressions $p^* = p + \rho g z$ et des forces de frottements τ voir figure (II-1) ci-dessous.



$$\int_{S_1} p_1 ds - \int_{S_2} p_2 ds + \int_S \rho g L \sin \alpha ds - \tau_v P \int_0^L dL = 0$$

ou:

$$\int_S (p_1 - p_2 + \rho g L \sin \alpha) ds - \tau_v P L = 0$$

Or la quantité $L \sin \alpha$ représente la différence des côtes $H_1 - H_2$, on a par suite :

$$\int_S ((p_1 + \rho g H_1) - p_2 + \rho g H_2) ds - \tau_v P L = 0$$

Soit :

$$\int_S (p_1^* - p_2^*) ds - \tau_v P L = 0$$

et :

$$(p_1^* - p_2^*) S - \tau_v P L = 0$$

Soit :

$$U = C \sqrt{R_h J} \quad (\text{II-1}) \quad \text{Formule de Chezy}$$

C : Est le coefficient de Chezy, qui n'est pas adimensionnel.

R_h : Est le rayon hydraulique

J : Est la pente hydraulique égale à $\Delta P / \rho g L$.

L : Longueur de la conduite

donc :

$$U_m = C \sqrt{D J / 4}$$

qu'on peut mettre sous la forme:

$$D J / 4 = b_1 U_m^2$$

avec $b_1 = 1/C^2$ dans la formule de Chezy.

On remarque, que nous avons fait implicitement l'hypothèse que τ_v (force de frottement / unité de surface) est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne d'écoulement $\tau_v = \rho U_m^2 / 2$, dans ce cas le coefficient de Chezy ne dépend que de la nature de la paroi.

La formulation empirique des pertes de charge est basée sur l'amélioration du coefficient b_1 de la formule des pertes de charge, parmi ces formules on peut citer celle de Darcy, de Flamant, de Maurice-Levy, de Mougny et de Manning-Strickeler.

a) FORMULE DE DARCY :

À la suite de nombreuses expériences effectuées sur des tuyaux de diamètres variant de 0.16 m à 0.50 m, Darcy estime que le coefficient b_1 devait tenir compte à la fois du diamètre de la conduite et de l'état de la rugosité de la paroi, il proposa pour b_1 la formule:

$$b_1 = \alpha + \beta / D \quad (\text{II-2})$$

et admet les valeurs $\alpha = 0.000507$ pour la Fonte en service

$$\beta = 0.00001294$$

Pour la fonte neuve, on prend la moitié de ces valeurs numériques.

b) FORMULE DE FLAMANT :

Flamant proposa pour b_1 l'expression suivante:

$$b_1 = a / \sqrt[4]{D U_m} \quad (II-3)$$

$a = 0.00074$ Tuyaux très lissés à l'intérieur
 $a = 0.00092$ Tuyaux en service

La formule de Flamant convient, en fait, pour les diamètres inférieurs à 50 mm. L'équation générale de la perte de charge proposée par Flamant pour les tuyaux en service est la suivante:

$$D J = 0.00092 \sqrt[4]{U_m^7 / D}$$

c) FORMULE DE MAURICE-LEVY :

Pour les conduites dont le diamètre est compris entre 0.08 m à 3 m Maurice et Levy proposent pour b_1 l'expression suivante:

$$b_1 = 1 / \left[\alpha' + \beta' \sqrt{D/2} \right] \quad (II-4)$$

$$U_m = 36.4 \left[DJ (1 + \sqrt{D/2}) / 2 \right]^{1/2} \quad \text{Fonte neuve}$$

$$U_m = 20.5 \left[DJ (1 + \sqrt{D/2}) \right]^{1/2} \quad \text{Fonte en service}$$

d) FORMULE DE MOUGNIE :

Mougnie fait intervenir un autre coefficient qui est K et propose la formule de la perte de charge :

$$J = K U_m^2 / D^{1.25} \quad (II-5)$$

Avec : $K = 1/500$ Fonte en service
 $K = 1/1000$ Fonte neuve

e) FORMULES DE MANNING-STRICKELER :

$$U_m = (1/n) (D/4)^{2/3} J^{1/2}$$

dans cette formule $b_1 = n^{2''} (D/4)^{1/2}$

(II-6)

Les coefficients K et n dépendent de la nature de la paroi.

En conclusion, la détermination des pertes de charge des conduites à caractéristiques uniques, pour un fluide par les formules empiriques type Chezy font intervenir un coefficient expérimental dépendant de la nature de la paroi (C, n, K,....etc) et non la nature du fluide et sont basées sur la proportionnalité de la contrainte de frottement au carré de la vitesse moyenne d'écoulement.

II.1.2.2 FORMULATION RATIONNELLE

La formulation des pertes de charge par des formules rationnelles fait intervenir, en plus des caractéristiques physiques de la conduite, les caractéristiques du fluide c'est à dire les régimes d'écoulements. Ces coefficients ne sont pas tous adimensionnels.

II.1.2.2.1 EXPERIENCE DE REYNOLDS :

L'expérience de Reynolds a pu mettre en évidence deux types d'écoulement. Un écoulement laminaire défini en tant qu'écoulement ordonné (filet colorant ne se mélange pas avec le liquide) dans lequel les particules du fluide glissent les unes par rapport aux autres et un régime turbulent, dans lequel les particules fluides seront animées de mouvements chaotiques désordonnés et aléatoires (mélange du colorant avec le liquide). L'écoulement turbulent peut être considéré comme un écoulement laminaire où se développeraient des instabilités.

La distinction de ces deux régimes est due à l'existence d'un nombre sans dimensions représentant le rapport entre les forces d'inerties qui sont proportionnelles à ρU_m^2 et les forces de viscosités qui sont proportionnelles à $\mu U_m/R$. Suivant que ce nombre est supérieur ou inférieur au critérium de Reynolds égale à 2400, on est dans l'un des deux régimes.

$$Re = U_m D / \nu$$

(II-7)

II.1.2.2.2 ECOULEMENT LAMINAIRE:

L'étude de l'écoulement laminaire peut se faire à l'aide des seuls éléments de la mécanique rationnelle, si l'on admet que les frottements à l'intérieur de la masse fluide obéissent à la loi de Newton.

On peut écrire que dans une conduite de diamètre D il y a équilibre des forces appliquées à un élément de fluide en régime permanent:

$$\Delta P (\pi D^2/4) = \pi D L \tau_v$$

- τ_v : contrainte de cisaillement à la paroi
 - ΔP : différence de charge en pression statique
 - L : longueur d'un élément
- d'où

$$\tau_v = D \Delta P / 4 L$$

Dans la section annulaire limitée par les cylindres de rayons r et r+dr s'écoule le débit figure (II-1):

$$dQ = 2\pi r u dr$$

le débit total est alors obtenu par intégration

$$Q = \int_0^Q dQ = \pi \int_0^R u 2r dr = \pi \int_0^{R^2} u d(r^2)$$

$$Q = \left[u r^2 \Big|_0^{R^2} - \int_0^{R^2} r^2 du \right]$$

Avec :

$$\left[u r^2 \Big|_0^{R^2} = 0 \quad \text{car } u = 0 \quad \text{si } r = R \right]$$

De même que l'on avait déterminé τ_v on détermine τ par la relation :

$$\tau = r \Delta P / 2L$$

d'où

$$\tau / \tau_v = r/R \quad \text{et } r^2 = (\tau / \tau_v)^2 \times R^2$$

il vient :

$$dr = \left[\frac{R}{\tau_v} \right] d\tau$$

d'où la relation du débit:

sachant que :

$$\frac{du}{dr} = - f(\tau) \quad (\text{II-8})$$

équation qui définit le comportement rhéologique du fluide.

$$Q = \left[\frac{R}{\tau_v} \right]^3 \int_0^{\tau_v} \tau^2 f(\tau) d\tau$$

ou

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{2U_m}{D} = \left[\frac{1}{\tau_v} \right]^3 \int_0^{\tau_v} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (\text{II-9})$$

Cette relation dite de Rabinowitsch-Mooney, n'est valable, que dans le cas d'un fluide rhéostable en écoulement laminaire et permanent.

Si on connaît la nature du fluide, c'est à dire l'expression formelle de la fonction $f(\tau)$, on obtient après intégration de l'équation (II-9) une relation entre le débit Q et le gradient de pression motrice $(D/4)(\Delta P/L) = \tau_v$. Le tableau ci-dessous donne cette relation pour le cas d'un fluide d'Ostwald De Waele et de Bingham.

Nature du fluide	Relation rhéologique	Expression de : $Q / \pi R^3$
OSTWALD DE WAELE	$\tau = K \gamma^n$	$\frac{n}{1+3n} \left[\frac{\tau_v}{K} \right]^{1/n}$
BINGHAM	$\tau < \tau_0 \quad \gamma = 0$ $\tau > \tau_0$	$\frac{\tau_v}{4\eta} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_v} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_v} \right)^4 \right]$

Possédant alors l'expression de $du/dr = - f(\tau)$, une simple intégration fournira le profil de vitesse.

CONCLUSIONS : Dans ce type d'écoulement le gradient de pression varie linéairement suivant l'axe de l'écoulement en fonction de la vitesse moyenne, dans le cas d'un fluide newtonien par exemple, la vitesse suivant la section perpendiculaire à l'écoulement varie de

façon parabolique, dont le maximum se trouve sur l'axe de l'écoulement égale au double de la vitesse moyenne d'écoulement. En d'autres termes, en régime laminaire les pertes de charge sont d'origine visqueuse.

II.1.2.2.3 PASSAGE DU REGIME LAMINAIRE AU REGIME TURBULENT:

Les expériences du type de celle de Reynolds permettent d'évaluer la valeur du nombre de Reynolds critique Re_c correspondant à la transition entre l'écoulement laminaire et l'apparition de la turbulence. Dans les conduites cylindriques, on admet généralement la valeur $Re_c = 2100$ qui est assez subjective. On a pu atteindre en effet des valeurs du nombre Re de l'ordre de $4 \cdot 10^4$ en restant en régime laminaire (avec des conduites très lisses et exemptes de vibrations). Dans les conditions usuelles, Re_c est rarement supérieur à 4000.

II.1.2.2.4 ECOULEMENT TURBULENT:

L'augmentation du débit d'un élément se traduit par l'apparition progressive d'instabilités au delà d'un régime donné. Des mouvements chaotiques, désordonnés et aléatoires se superposent à l'écoulement principal.

Ce changement d'état et de structure de l'écoulement apparaît au moment où les forces d'inertie sont nettement supérieures aux forces visqueuses. Dans un écoulement turbulent il y a augmentation de l'énergie interne sous forme d'énergie cinétique. La dissipation de cette énergie nécessite un apport constant d'énergie pour le maintien de la turbulence.

Aucune solution mathématique complète n'a pu être donnée à ce jour pour les écoulements turbulents bien que les équations de Navier-Stokes qui la gouvernent soient connues depuis longtemps. Les équations différentielles caractérisent un phénomène non linéaire et aléatoire n'ont été résolues que dans des cas particuliers.

a) EQUATIONS FONDAMENTALES DU MOUVEMENT:

Quelle que soit la nature du milieu en mouvement, l'équation de conservation de la quantité de mouvement est :

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = f_i + \sigma_{ij,j} \quad (\text{II-10})$$

avec le tenseur des contraintes : $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij}$

p : pression

τ_{ij} : tension des contraintes visqueuses

δ_{ij} : symbole de Kronecker (= 1 si $i=j$; 0 si $i \neq j$)

f_i : Résultante des forces extérieures

Si le fluide se comporte comme un fluide visqueux et Newtonien, alors sa loi de comportement est la loi classique de Newton:

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \lambda \varepsilon_{ii} \delta_{ij} + 2 \mu \varepsilon_{ij} \quad (\text{II-11})$$

avec

$$\varepsilon_{ii} = \text{div } u$$

λ et μ sont les coefficients de viscosité du fluide

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{tenseur des déformations}$$

Si le fluide considéré est non-Newtonien, la relation liant la contrainte de cisaillement et la déformation est une loi non linéaire dépendant par exemple du gradient de vitesse, du temps de relaxation. Par simplification on peut obtenir des modèles linéaires.

Dans le cas d'un écoulement isotherme et incompressible ($T^\circ = \text{cte}$, $\rho = \text{cte}$, $\mu = \text{cte}$) on est conduit à écrire les équations de Navier-Stokes (les forces extérieures sont supposées négligeables).

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta u_i \quad (\text{II-12})$$

ν : viscosité cinématique ($\nu = \mu/\rho$)

à laquelle, on adjoint l'équation de continuité :

$$\operatorname{div} u = 0 \quad (\text{II-13})$$

La non linéarité des équations de Navier-Stokes ont amené les chercheurs à chercher des solutions par un certain nombre d'approximations, qui sont vérifiées expérimentalement, mais toujours dans des cas particuliers. Ainsi pour résoudre les problèmes pratiques, on continue à se baser sur les équations statistiques dérivées des équations de Navier-Stokes, obtenues à partir de l'hypothèse de Reynolds : qui consiste à décomposer une vitesse instantanée en une vitesse moyenne \bar{u} et une fluctuation u'

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (\text{II-14})$$

avec, si l'écoulement est permanent :

$$\bar{u}_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt$$

$$\bar{u}'_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'_i dt = 0$$

Par ce procédé, en tenant compte des produits des moyennes, on aboutit aux équations de Reynolds :

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \Delta \bar{u}_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (\text{II-15})$$

avec $p = \bar{p} + p' \quad \bar{p}' = 0$

On note l'apparition de termes du second ordre $\overline{u'_i u'_j}$ issus de la non-linéarité de l'équation de Navier-Stokes. Ces termes complémentaires, causés par les fluctuations turbulentes, sont appelés tensions de Reynolds. Ces tensions de Reynolds représentent l'influence du mouvement turbulent sur l'équilibre dynamique du mouvement moyen.

b) L'EQUATION D'ENERGIE :

Partant des équations de Reynolds équation (II-15) pour un écoulement permanent d'un fluide incompressible, écoulement sans effet de la gravité on aboutit à :

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial (\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_i} \quad (\text{II-16})$$

En multipliant cette équation par $\bar{u}_i + u_i'$ et en calculant la moyenne temporelle il vient :

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{2} \bar{u}_j \frac{\partial \overline{u_i' u_i'}}{\partial x_j} &+ \frac{\rho}{2} \frac{\partial \overline{u_i'^2 u_j'}}{\partial x_j} + \rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{u_i' p}}{\partial x_i} + \\ &+ \frac{\mu}{2} \frac{\partial^2 \overline{u_i'^2}}{\partial x_j \partial x_j} - \mu \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{II-17})$$

terme I : Convection d'énergie cinétique des fluctuations de vitesse par les composantes de la vitesse moyenne.

terme II : Convection ou diffusion d'énergie cinétique des fluctuations de vitesse par les composantes des fluctuations de vitesse.

terme III : Production d'énergie cinétique par interaction des tensions de Reynolds et du gradient principal de vitesse. Production de la turbulence au détriment du mouvement moyen.

terme IV : Transport d'énergie cinétique turbulente par les fluctuations de pression. Passage de l'énergie d'une composante de fluctuation à l'autre.

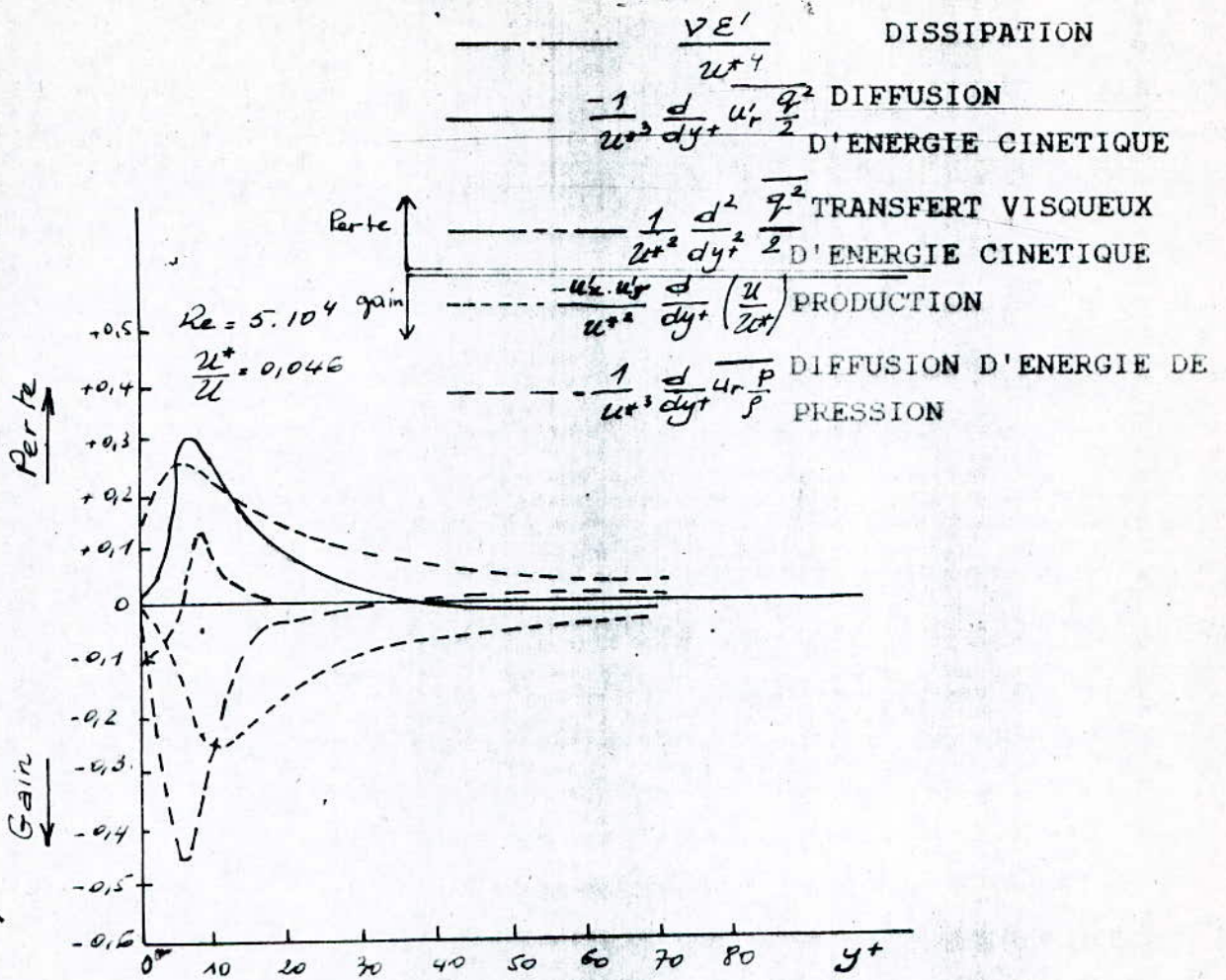
terme V : Transfert d'énergie cinétique par interaction visqueuse des tourbillons. Travail des tensions visqueuses.

terme IV : Dissipation visqueuse d'énergie cinétique sous forme de chaleur par les petites structures.

Les termes III et V sont les plus significatifs pour la réduction de frottement.

Dans une conduite la figure (II-2) montre un exemple de la contribution des différents termes à l'énergie totale.

Dans les tentatives de résolution de ce type d'écoulement on peut distinguer les théories statistiques et les tentatives de résolution des équations du mouvement par introduction de la



D'APRES LAUFER [7]

FIGURE 11-2 PRODUCTION, DIFFUSION ET DISSIPATION D'ENERGIE DANS UN ECOULEMENT TURBULENT PRES DE LA PAROI.

notion de parcours de mélange et de viscosité turbulente.

c) THEORIE DU PARCOURS DE MELANGE ET DE LA VISCOSITE TURBULENTE :

Boussinesq a émis l'hypothèse que la relation de Newton pour l'écoulement laminaire pouvait être étendue à l'écoulement turbulent.

Prandtl a repris cette idée et détermine un coefficient:

$$\mu_t = \frac{\tau}{du/dy} = \text{viscosité turbulente} \quad (\text{II-18})$$

cette viscosité est formée par le produit d'une longueur et d'une vitesse liée à la turbulence :

$$\mu_t = \rho l v_t \quad (\text{II-19})$$

avec v_t = vitesse turbulente

Cette viscosité n'est pas une viscosité proprement dite.

Cette hypothèse de viscosité turbulente revient à remplacer $\tau = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ par $\mu_t du/dx_j$, hypothèse conforme à celle de Boussinesq. Cette viscosité turbulente n'est pas une propriété du fluide, mais varie d'un point à un autre en fonction de la structure de la turbulence.

Prandtl émit l'hypothèse que les fluctuations longitudinales et transversales sont proportionnelles entre elles et au déplacement d'un élément fluide et au gradient de vitesse :

$$\tau = \mu_t \frac{du}{dy} = \rho l \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{du}{dy} \quad (\text{II-20})$$

$$\text{et } \mu_t = \rho \sqrt{\tau/\rho} l \quad (\text{II-21})$$

Partant de l'échange de quantité de mouvement dû au passage de particules fluides entre couches voisines on établit une relation liant la contrainte tangentielle aux vitesses de fluctuations de l'écoulement :

$$\tau = \rho \overline{u'v'} = \rho l^2 \left[\frac{du}{dy} \right]^2 \quad (II-22)$$

La viscosité turbulente est proportionnelle au carré d'une longueur de mélange qui est la distance parcourue par un élément fluide avant de perdre son individualité. Cette longueur représente effectivement une mesure de l'échelle des tourbillons turbulents, l étant le chemin parcouru par un élément fluide.

La première hypothèse sur la valeur de l a été faite par Von-Karman qui trouve que $l_m = \frac{du/dy}{d^2u/dy^2}$. Cette valeur est valable à proximité d'une paroi.

L'échelle des tourbillons l est liée dans une certaine mesure aux corrélations entre composantes longitudinales et transversales de la vitesse $\rho \overline{u'v'}$.

Dans un écoulement visqueux et turbulent on admet qu'il y a superposition de la viscosité moléculaire et de la viscosité turbulente.

$$\tau = (\mu + \mu_t) \frac{du}{dy} \quad (II-23)$$

D'autres hypothèses quant à la forme de la viscosité turbulente ont été formulées par d'autres auteurs :

II.1.2.2.5 STRUCTURE DE LA TURBULENCE DANS UNE CONDUITE :

Dans un écoulement turbulent en conduite on distingue trois zones de structure différentes : fig (II-3).

- une zone pariétale ou sous-couche visqueuse pour $y^+ = y u^*/\nu < 5$
- une zone intermédiaire, ou zone tampon pour $5 < y^+ < 30$
- une zone centrale ou noyau turbulent pour $y^+ > 30$

a) noyau turbulent :

Dans le noyau turbulent les tourbillons ont un diamètre voisin du rayon de la conduite. Ils sont allongés dans le sens de l'écoulement. Ils sont une cause de dissipation d'énergie par captage de petits tourbillons provenant de la paroi. Dans cette

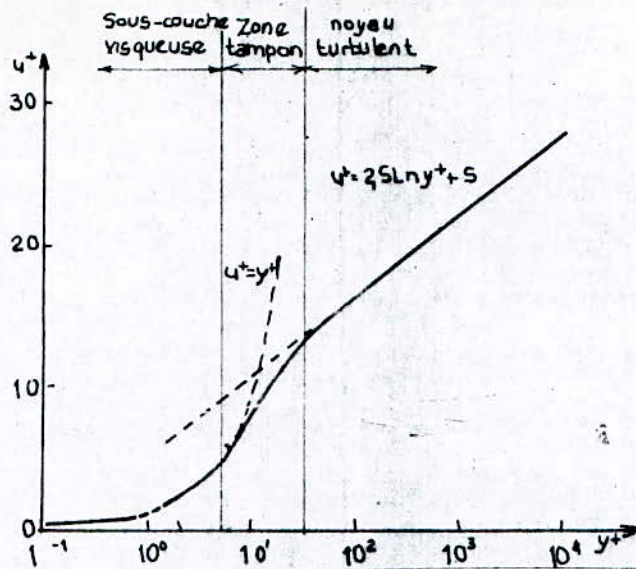


Figure : Structure de l'écoulement turbulent dans une conduite

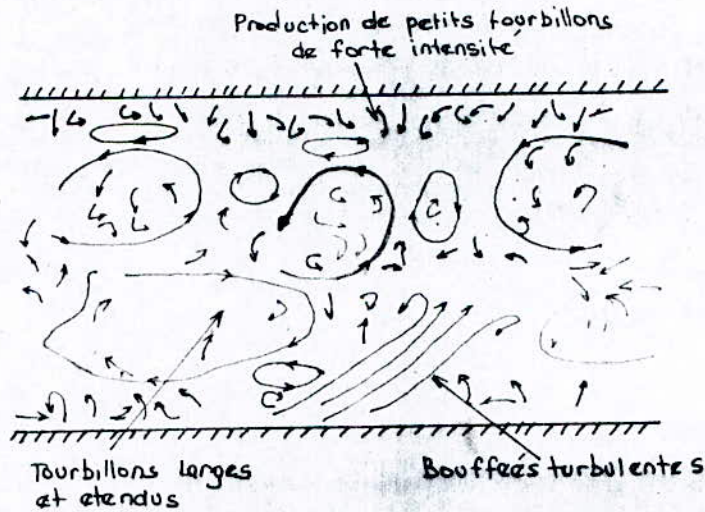


FIGURE II-3 STRUCTURE DE LA TURBULENCE DANS UNE CONDUITE

zone l'effet de la viscosité est négligeable, le liquide est considéré comme parfait.

La distribution des vitesses peut-être représentée par la loi logarithmique :

$$u^+ = A \log y^+ + B \qquad A = 5.75 \qquad (II-24)$$

$$B = 5.50$$

b) Sous-couche visqueuse :

Dans cette zone la viscosité cinématique joue un rôle prépondérant. Cette zone est caractérisée par la production de petits tourbillons de grande intensité. Les fluctuations de vitesse ne contribuent que peu aux contraintes dominées par les effets de la viscosité. L'analyse de Kolmogorof montre que pour les faibles valeurs de y^+ la turbulence ne peut se maintenir sans apport extérieur d'énergie. En effet il y a perte d'énergie dans la région pariétale sous forme d'une diffusion d'énergie cinétique de la paroi vers le noyau.

Le profil de vitesses réduit est généralement représenté par la relation :

$$u^+ = y^+ \qquad (II-25)$$

c) La zone tampon :

C'est cette dernière région qui a suscité le plus grand intérêt au cours des dernières années. Des mesures intéressantes concernant le mécanisme turbulent, en particulier le phénomène de production de turbulence ont été effectuées, soit par visualisation [1,2], soit par anémométrie à fil chaud [3,4] et plus récemment par des méthodes optiques [5]. Ces observations montrent que les phases responsables du mécanisme de génération de la turbulence sont les phases "d'éjection" et de "sweep". Ces éjections d'éléments fluides sont des phases locales qui se produisent aléatoirement dans le temps et l'espace et sont dirigées vers l'extérieur de la paroi dans des régions de vitesses plus élevées, c'est à dire que l'interaction éventuelle de ces éjections avec l'écoulement de vitesse supérieure crée un désordre dans la région pariétale. La phase d'éjection prend fin,

lorsqu'arrive une masse de fluide, ayant une vitesse supérieure à la vitesse locale, qui "balaye" les éjections.

Il est à noter qu'environ 70% des tensions de Reynolds (pour $Re = 20000$) sont dues aux éjections intermittentes [6] et que la production de turbulence, donnée par l'expression de l'équation (II-17).

$$- \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' (\partial \bar{u}_i' / \partial x_j) \quad \text{(II-26)}$$

est produite pendant le processus de "bursting".

Laufer [7] a montré quantitativement que dans cette région le terme de production citée plus haut était égal au terme de dissipation, c'est-à-dire :

$$- \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \partial \bar{u}_i' / \partial x_j + \nu \left[\partial \bar{u}_i' / \partial x_j \right]^2 = 0 \quad \text{(II-27)}$$

d'autre part, que la production est complètement dissipée dans la zone $y^+ > 30$, ce qui permet de penser que le transfert d'énergie des grands tourbillons aux petits tourbillons se fait à travers plusieurs stades jusqu'à ce que les petits tourbillons soient si petits qu'ils perdent leur énergie par dissipation visqueuse figure II-4.

Il existe donc un échange continu entre le fluide très voisin de la paroi et celui de la région centrale d'écoulement.

Le profil des vitesses dans la zone tampon doit y satisfaire à la fois au profil de la région pariétale et à la loi logarithmique il est représenté par l'équation logarithmique suivante :

$$u^+ = A' \log y^+ + B' \quad \begin{array}{l} A' = 11.5 \\ B' = 3.05 \end{array} \quad \text{(II-28)}$$

Un autre profil a été proposé par Churchill et Usagi [8] qui correspond assez bien aux résultats expérimentaux :

$$y^+ / u^+ = \left[1 + \left[y^+ / (A + B \ln y^+) \right]^n \right]^{1/n} \quad \text{(II-29)}$$

$$A = 5.5 ; B = 2.5 ; n = 2$$

En général les lois de profils de vitesse sont déduit en

faisant appel aux hypothèses sur le parcours de mélange et la viscosité turbulente.

II.1.2.2.6 LOIS DE FROTTEMENT POUR LES CONDUITES CIRCULAIRES :

Une conduite à caractéristiques uniques peut se comporter comme hydrauliquement lisse, semi-rugueuse ou rugueuse, selon la structure de la turbulence établie dans la conduite. L'épaisseur du film laminaire étant donné par $y u^*/\nu$, il suffit de considérer ε la valeur moyenne des aspérités et on aura:

-si $\varepsilon u^*/\nu < 5$ il y a une zone d'écoulement laminaire, la conduite est dite lisse et les lois de frottements sont fonctions seulement du régime d'écoulement.

En général dans cette zone on adopte la formule de PRANDTL-VON KARMAN.

$$1/\sqrt{\lambda} = 2.00 \text{ Log Re} \sqrt{\lambda} - 0.80 \quad (\text{II-30})$$

λ , n'étant pas explicité dans cette formule, celle-ci est d'un usage difficile et ne peut être résolue que par voie graphique ou par itérations. Pour simplifier l'utilisation de la loi de frottement plusieurs auteurs ont proposés des formules facile à exploiter:

L'allemand BLASIUS a ainsi proposé en (1913) [9] la formule:

$$\lambda = 0.3164 / \text{Re}^{0.25} \quad (\text{II-31})$$

qui est confondue avec la courbe de PRANDTL-VON KARMAN pour $\text{Re} < 10^5$

Pour $\text{Re} > 10^5$ plusieurs auteurs ont proposés des formules de types binôme :

$$\text{SHILLER \& HERMAN} \quad \lambda = 0.054 + 0.396 / \text{Re}^{0.30} \quad (\text{II-32})$$

$$\text{NIKURADZE (1932)} \quad \lambda = 0.0032 + 0.221 / \text{Re}^{0.297} \quad (\text{II-33})$$

$$\text{R. LAZARD (1935)} \quad \lambda = 0.00372 + 0.247 / \text{Re}^{0.25} \quad (\text{II-34})$$

Ces formules et surtout celle de NIKURADZE se confondent sensiblement avec la formule théorique établit par PRANDTL-VON

KARMAN , pour les valeurs de Re allant jusqu'a 3.10^5 .

FILONENKO & ALTSCHOUL [10] proposent la formule suivante:

$$\lambda = \left[1.8 \text{ Log Re} - 1.64 \right]^{-2} \quad (\text{II-35})$$

qui se confond avec la formule (II-30) jusqu'à $Re = 3.10^5$.

Dans le cas des parois lisses la loi de frottement est indépendante de la nature des parois, et n'est fonction que des caractéristiques du fluide.

-si $5 < \varepsilon u^*/\nu < 30$ il n' y a plus de zone laminaire, mais il y a une zone de transition et une zone turbulente, la conduite est considérée comme semi-rugueuse, et la fonction de frottement dépend du régime d'écoulement et de la rugosité relative. Des formules complexes ont été proposées pour ce type de conduite, COLEBROOK & WHITE [10], en se basant sur une rugosité moyenne déduite des observations des tuyaux usuels ont établi la formule :

$$1 / \sqrt{\lambda} = \text{Log} \left[\varepsilon / (3.7 D) + 2.51 / \text{Re} \sqrt{\lambda} \right]^{-2} \quad (\text{II-36})$$

Pour palier à l'inconvénient de la relation de COLEBROOK, qui est implicite en λ et nécessite donc un processus itératif ou graphique, certains auteurs ont proposés des formules empiriques équivalente .

CHURCHILL [11] a proposé la relation suivante :

$$\lambda = 8 \cdot \left[\left(8 / \text{Re} \right)^{1/2} + \left(A + B \right)^{-3/2} \right]^{1/12} \quad (\text{II-37})$$

$$\text{Avec } A = \left[2.457 \cdot \text{Ln} \left[(7/\text{Re})^{0.9} + 0.27 \cdot (\varepsilon/D) \right]^{-1} \right]^{16}$$

Et

$$B = \left[37530/\text{Re} \right]^{16}$$

J.NACKAB [12], propose pour exploiter la formule (II-36), de trouver la valeur de λ , correspondant au régime lisse (D/k très grand), cette valeur est aussi donnée par une formule implicite, mais l'approximation ci-dessous est excellente

$$\lambda_0 = 0.4 \operatorname{Re}^{-0.25} + 0.0053$$

La formule (II-36) devient alors :

$$\lambda = \left[2 \log_{10} \left[\frac{0.27}{D/\varepsilon} + \frac{2.51}{\operatorname{Re}} \left(0.4 \operatorname{Re}^{-0.25} + 0.0053 \right) \right]^{-1/2} \right]^2 \quad (\text{II-38})$$

qui est fonction de D/ε et Re

ALTSCHOUL [10] propose pour la zone de transition la relation suivante :

$$\lambda = 0.11 \left[(\varepsilon/D) + 68/\operatorname{Re} \right]^{0.25} \quad (\text{II-39})$$

et toutes les autres lois proviennent du lissage des différents points donnant l'abaque de Moody.

-si $\varepsilon u^*/\nu > 30$ l'écoulement est parfaitement turbulent, la conduite est rugueuse, dans ce cas la fonction λ dépend seulement des caractéristiques de la conduite (ε/D).

FRITSCH [10] a montré que la loi de la vitesse déficitaire pour les tuyaux rugueux est égale à :

$$U / U^* = 5.75 \operatorname{Log} (y / D) + 8.5 \quad (\text{II-40})$$

l'intégration de cette loi logarithmique permet d'obtenir la relation dite de PRANDTL-VON KARMAN pour les tuyaux rugueux.

$$1 / \sqrt{\lambda} = 2 \operatorname{Log} (D / 2 \varepsilon) + 1.74 \quad (\text{II-41})$$

Experimentalement avec une rugosité artificielle NIKURADZE [11] est parvenu à une formule similaire.

En conclusion :

quelle que soit la méthode employée pour le calcul des pertes de charge linéaires par les formules faisant intervenir un coefficient expérimental (C, n, k, \dots) ou les formules rationnelles, cette perte de charge est fonction des paramètres hydrauliques.

ques et physiques du fluide et de la conduite. Elle est proportionnelle à la vitesse moyenne d'écoulement ou au débit d'un exposant m , qui prend les valeurs en régime turbulent lorsque $1 < m < 2$. Peut-on réduire cette perte de charge en faisant varier les caractéristiques physiques du fluide, qui ont pour influence de réduire l'effet de la turbulence. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous essayons de répondre à cette question.

DEUXIEME PARTIE

II-2 CAS DE LA REDUCTION DE PERTE DE CHARGE

Avant de donner une rétrospective des différentes études faites sur la réduction des pertes de charge par adduction de polymère, il est nécessaire de souligner que toutes ces études sont caractérisées par des réductions effectives de pertes de charge et dépendent des caractéristiques des installations utilisées.

En d'autres termes il ne sont valables que dans les conditions dans lesquelles ont été établies.

II.2.1 HISTORIQUE

Les premiers travaux systématiques sur la réduction de traînée par polymères et d'autres additifs ont débuté aux ETATS-UNIS D'AMERIQUE à la fin de la seconde guerre mondiale .

Les premiers résultats publiés remontent à 1948 et sont dus à B.A.TOMS [13], ce qui justifie parfois la dénomination d'effet attribué au phénomène de réduction de pertes de charge (réduction de frottement), par effet de TOMS .

En 1946, TOMS en étudiant la dégradation des hauts polymères, remarque que le gradient de pression le long d'une conduite circulaire où s'écoulait du monochlorobenzène était réduit de 50 % lorsqu'on ajoutait au liquide 0.25 % (en poids) de polyméthyl-méthacrylate (polymère)

MYSELS [14] dans la même période que TOMS, en étudiant les caractéristiques d'écoulement d'essence épaissie, par des savons d'alumine dans des conduites capillaires a constaté le même effet.

Depuis, personne ne s'est penché sur ce domaine, jusqu'au début des années 60 quand il fût redécouvert accidentellement par les pétroliers . A leur grande surprise, l'énergie nécessaire au pompage des boues de forage se trouvait considérablement réduite par l'addition de polymères solubles à haut poids moléculaire.

Depuis, un puissant courant de recherche orienté et fondamentale s'est ouvert. En effet, pour la première il s'agissait de

prévoir des domaines d'application et de participer à l'effort d'innovation qui semblait prévisible; tandis que pour la dernière il était question de fournir des informations concernant la caractérisation rhéologique des solutions diluées de polymères et de permettre une interprétation, tout au moins phénoménologique du processus de réduction de résistance de frottement.

Ce phénomène a été très exploité, avant même que des explications cohérentes ne soient données, il existe un certain nombre d'applications de la réduction de frottement où les résultats de laboratoires ont été transposés pour résoudre des problèmes à grandeurs réelle.

L'emploi des polymères les rend intéressants par les faibles concentrations auxquelles ils agissent et se justifie surtout, soit par les économies d'énergie qui en résultent, soit par l'amélioration des caractéristiques, notamment le débit ou la vitesse relative fluide-paroi.

C'est actuellement dans le domaine de la lutte contre les incendies que les résultats sont les plus spectaculaires. Le principe en est de nos jours utilisé par les pompiers de la ville de New-York et devrait se généraliser peu à peu. L'injection de polymère permet d'augmenter d'environ 50 % la portée du jet avec une augmentation de 10 % du débit pour une concentration de 200 ppmw (partie par million par poids) de polyéthylène oxyde et une vitesse de pompage constante. On peut également réduire ainsi le diamètre des buses de sortie du jet. Un autre avantage, lié à l'emploi des polymères dans ce domaine, est que le liquide, une fois éjecté, conserve une bien meilleure cohésion que l'eau sans additif, le jet sera moins dispersé par le vent et peut être mieux concentré sur le foyer.

La deuxième application est celle de pompage du pétrole et son transport par oleoduc. Les études réalisées indiquent des taux de réduction de traînée notables, même dans des conduites de large diamètre où l'effet est cependant moins important. Cette addition permettrait soit une réduction de la puissance utilisée dans les stations de repompage, soit une diminution du nombre de ces stations.

II.2.2 MISE EN EVIDENCE

Le phénomène de réduction de frottement a été mis en évidence aussi bien dans les écoulements autour des corps immergés (hydrodynamique externe) [15,16] que dans les écoulements en conduites (hydrodynamique interne) [17,18].

Pour le cas des écoulements externes peu d'expériences ont été faites. Dans le cas d'une plaque plane, des expériences ont été effectuées et elles ont conduit à des résultats remarquables. Néanmoins, ces résultats sont incomplets puisqu'ils recouvrent un domaine de concentrations et de nombre de Reynolds élevés.

Les premiers résultats expérimentaux publiés concernant la réduction de frottement sur les plaques planes sont ceux de LEVY & DAVIS [15]. Ces auteurs ont utilisé une installation d'essai en rotation où il est possible d'atteindre des nombres de Reynolds variant de $4 \cdot 10^5$ et 10^7 , avec des Longueurs de plaque importantes ($L = 0.915 \text{ m}$).

Dans une installation similaire mais de dimensions réduites FRUMAN & P.SULMONT [16] ont pu balayer une plage de nombre de Reynolds comprise entre $5 \cdot 10^5$ et $2 \cdot 10^6$. Dans ces deux travaux une concentration de 0.125 ppm de polyéthylène oxyde a suffi pour mettre en évidence le phénomène de réduction de frottement.

Dans le cas des écoulements en conduites, plusieurs expériences ont été faites sur des conduites de géométries différentes circulaires, rectangulaires et carrées..

En cherchant plus d'information sur le comportement dynamique des solutions reductrices de frottement, les expérimentateurs ont été conduit à introduire et développer des méthodes et techniques de mesures nouvelles, les techniques les plus couramment utilisées sont:

- L'anémométrie laser à effet Doppler ALD
- La chronophotographie
- La technique électrochimique

II.2.3 DEGRADATION ET PROPRIETES DES SOLUTIONS DE POLYMERES :

La plupart des solutions de polymères, réductrices de frottements, perdent de leur efficacité du fait de la dégradation des polymères, On distingue deux sortes de dégradation :

-Une dégradation naturelle: elle est due au vieillissement des solutions par actions chimique (oxydation, bacterienne, rayons ultra-violet), qui se manifeste par une baisse de la viscosité. On peut l'éviter en injectant quelques gouttes de Formol dans la solution au moment de sa préparation. GADD [19] a montré que les solutions d'actigum se dégradent très rapidement si on les expose à la lumière du soleil.

Une dégradation d'origine mécanique: elle se produit lors du recyclage des solutions et mixtures polymériques par la pompe, de la préparation (agitations par hélices, ou manuelle) ou de la déformation résultant du gradient de vitesse. Ce phénomène de dégradation est dû essentiellement à une rupture de la chaîne macromoléculaire et constitue un véritable obstacle à l'extension de ce mode de réduction de frottement.

Le degré de dégradation dépend de la nature du polymère, du poids et de la distribution moléculaire, de la concentration, des contraintes extérieures (les forces de cisaillements, les pompes, longueur de la conduite etc...) et de l'environnement (solvant). Les résultats expérimentaux indiquent que le degré dépend beaucoup du poids moléculaire, en effet BRIECHE [20] montre que cette dégradation est proportionnelle au carré du poids moléculaire.

II.2.4 LA REDUCTION DE FROTTEMENT

La réduction de frottement ou réduction de perte de charge est définie par SAVINS [21] comme étant:

$$DR(\%) = \frac{\Delta P_o - \Delta P_p}{\Delta P_o} \times 100 \quad (II-42)$$

ΔP_o et ΔP_p sont respectivement la perte de pression du solvant et celle de la solution à régime égal.

Plus récemment RAMU & TULLIS [22] ont déterminé une relation permettant de calculer le pourcentage de réduction de frottement

$$DR(\%) = 62 \text{ Log } \Delta B - 11.0 \quad (\text{II-43})$$

ΔB est le glissement effectif du profil de vitesse dans le modèle à trois zones, tel que défini par VIRK [40] où ΔB est fonction de U^* de l et ν ou U^* est la vitesse de frottement, l une dimension caractéristique du polymère et ν la viscosité cinématique de la solution.

Dans un écoulement laminaire il y a augmentation de la perte de charge, bien que théoriquement la réduction soit possible.

Diverses études et explications ont été proposées dans la littérature, DODGE & METZNER [23], ASTARITA [24] et d'autres. Mais l'étude expérimentale la plus complète est certainement celle de VIRK et al [25], dans laquelle ont constaté que la réduction de frottement n'apparaît qu'à partir d'un certain régime turbulent critique (fig II-5a) indépendant de la concentration en polymères. D'autre part HOYT [26] montre, que quelque soit le régime au delà du régime critique, il existe une concentration critique au delà de laquelle la réduction de la perte de charge reste constante ou même diminue (fig II-5b).

Des différences sensibles ont été relevées quant au maximum de réduction que l'on peut espérer obtenir.

Les facteurs à mettre en cause sont multiples:

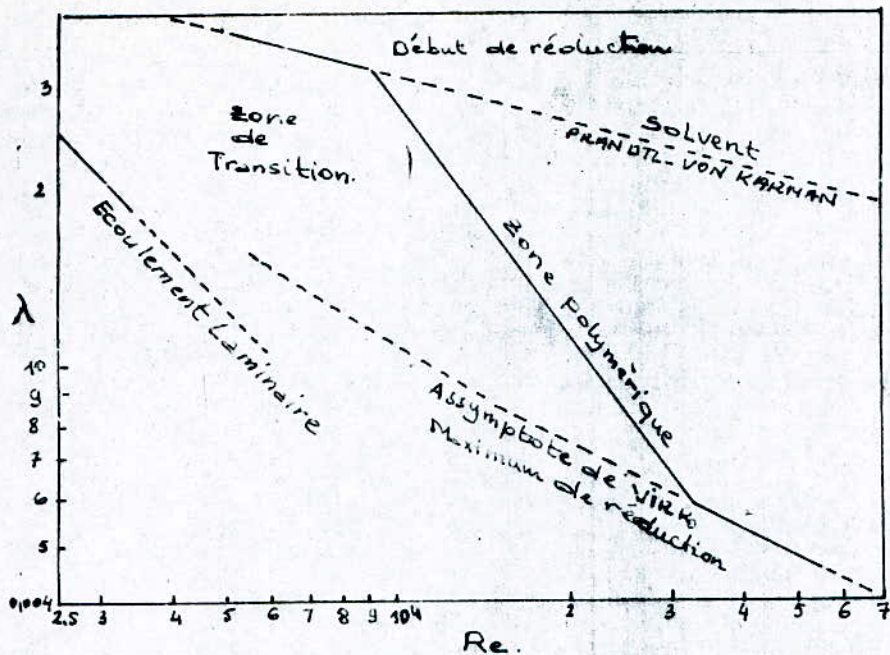
- la nature des polymères: un polymère à chaîne linéaire, tel que le Polyox 301, est plus efficace qu'un polymère à chaîne ramifiée.

- La masse moléculaire du polymère: Pour des polymères de même composition, le plus efficace a la masse moléculaire la plus forte.

- la nature du solvant

- Le diamètre de la conduite: qui intervient en particulier sur l'échelle des grands tourbillons dont la dimension est voisine du rayon de la conduite [27]. Le phénomène de réduction se produisant dans la zone pariétale celle-ci étant plus grande pour une conduite de faible diamètre, est plus importante et plus précoce.

- La forme de la molécule en solution et ses dimensions, cette



II-5b REDUCTION DE FROTTEMENT EN CONDUITE. DEFINITION

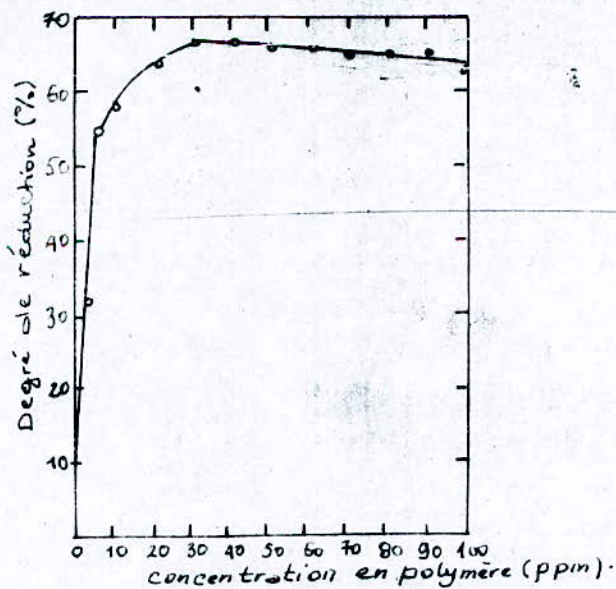


FIGURE II-5a CONCENTRATION OPTIMALE DE REDUCTION DE FROTTEMENT

forme est liée au PH de la solution dans certains cas. Suivant le Ph la molécule peut être étendue, en pelote ou en baton.

Le maximum de réduction de frottement (fig II-6a) qui peut être obtenu apparaît limité par une asymptote unique dont l'équation, proposée par VIRK [28] est donnée par:

$$1/\sqrt{f} = 19.0 \text{ Log Re} \cdot \sqrt{f} - 32.4 \quad (\text{II-44a})$$

ou encore

$$1/\sqrt{\lambda} = 9.5 \text{ Log Re} \cdot \sqrt{\lambda} - 16.35 \quad (\text{II-44b})$$

Ce maximum de réduction de frottement est indépendant de la nature du polymère et des caractéristiques de la solution ainsi que du diamètre de la conduite. PRUITT & CRAWFORD [29] ont vérifié expérimentalement qu'il ne peut dépasser 80 % (fig II-6b).

II.2.5 DEBUT DE LA REDUCTION DE FROTTEMENT " ONSET "

L'existence d'un effet de seuil (de cisaillement) (fig II-5a), plus connu sous le nom "d'onset", a été observé par GADD [30] et ELATA & TIROSH [31] ont constaté que ce seuil varie en fonction du diamètre de la conduite (figure II-7).

VIRK [32] a émis l'hypothèse que l'onset ne se produit que pour une valeur constante.

$$C = D_m \cdot K_d \quad (\text{II-45})$$

avec $D_m = 2 \cdot R_g$ dimension de la macromolécule dans la solution

R_g est le rayon de giration en Å^0
 $K_d = \sqrt{\tau_v}$ nombre d'onde caractéristique dans un écoulement turbulent.

D'après VIRK, $R_g^2 \cdot \tau_v = \text{constante} = 45 \cdot 10^{-10}$ dynes.

Enfin, on voit qu'une réduction de frottement peut exister en écoulement laminaire au dessus d'un seuil de cisaillement.

D'autre part, l'onset varie suivant la nature du polymère utilisé, par exemple, le seuil du polyoxéthylène est plus bas que celui du polyacrylamide, qui lui-même a un seuil plus bas que

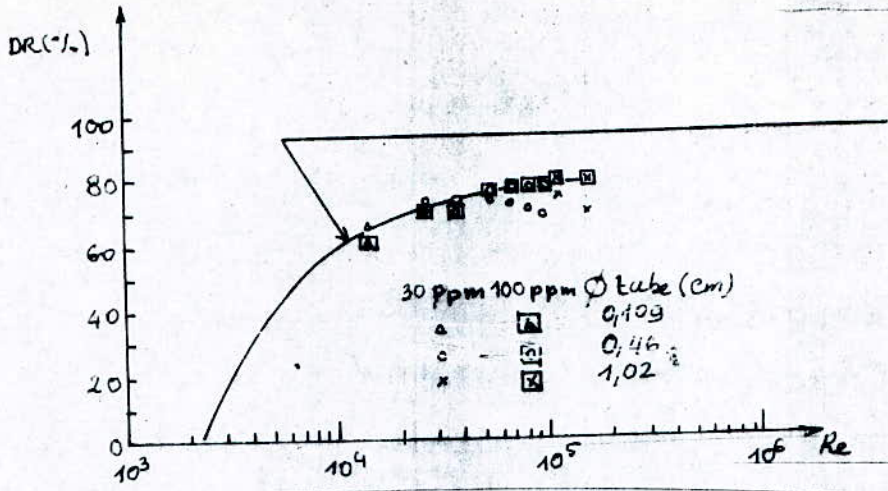


FIGURE II-6a EXISTANCE D'UN MAXIMUM DE REDUCTION DE FROTTEMENT INDEPENDANT DU DIAMETRE DE LA CONDUITE ET DE LA CONCENTRATION

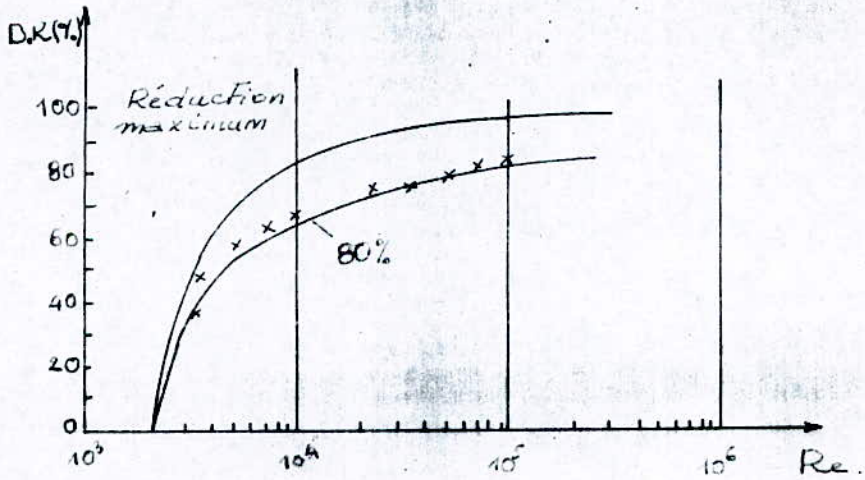
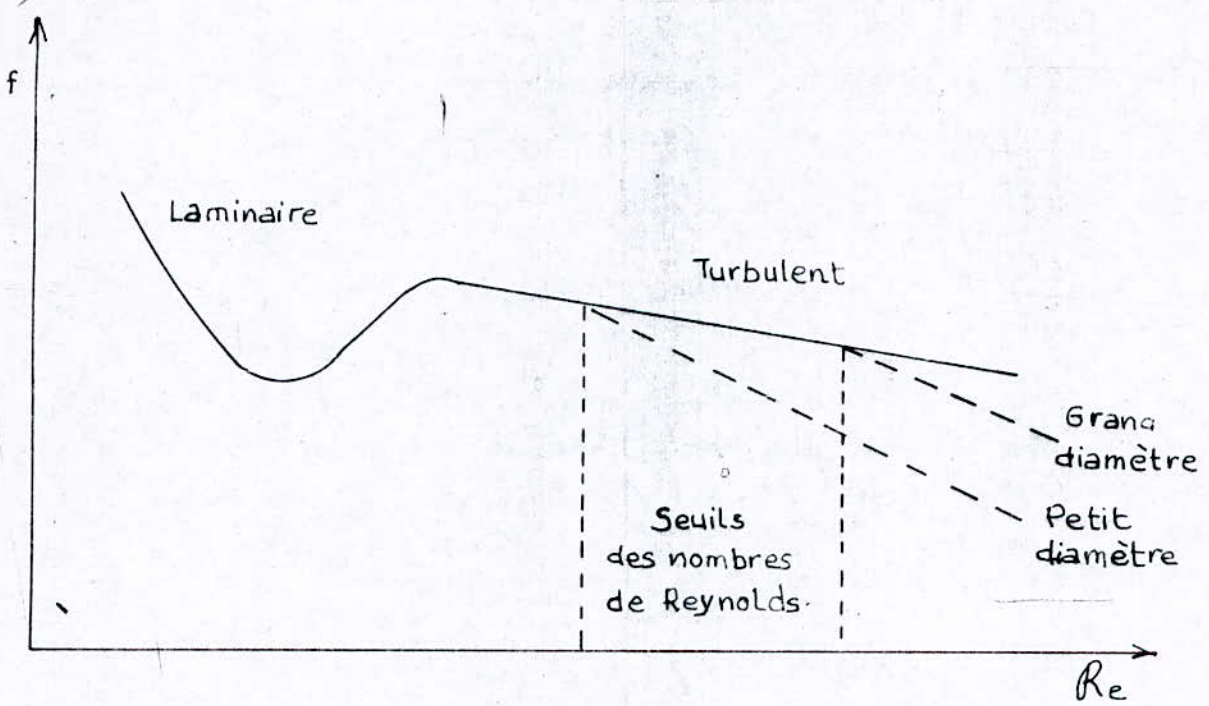


FIGURE II-6b MAXIMUM DE REDUCTION THEORIQUEMENT POSSIBLE SI L'ECOULEMENT EST LAMINAIRE ET REDUCTION MAXIMUM EFFECTIVEMENT ATTEINTE



d'après GADD [30]

FIGURE II-7 EFFET DU DIAMETRE, DE LA CONDUITE SUR LA REDUCTION DE FROTTEMENT

celui de la gomme de guar. WHITE [33] et par la suite VLEGAAR [34] ont montré que le point d'onset dans une conduite de diamètre D est proportionnel à $D^{8/7}$. Ceci est confirmé par les données d'ELATA et al [31], mais contredit par VIRK [32] et WHITSITT [35].

II.2.6 INFLUENCE DES POLYMERES SUR LA STRUCTURE DE LA TURBULENCE

On sait que la structure de la turbulence est modifiée par la présence des polymères. Parmi les résultats obtenus dans ce sens, il existe ceux qui concernent l'intensité de la turbulence (composante longitudinale). Cette intensité était sensible à la présence des macromolécules dans l'écoulement. On note que cette action se situe surtout dans la région pariétale et dans le noyau turbulent [36,37], d'autre part, l'augmentation de l'intensité passe par un maximum pour des valeurs de y^+ voisine de 12 [27]. La mesure des tensions de Reynolds par fil-chaud dans une conduite circulaire a montré que le produit ($u'v'$) des solutions polymères décroît près de la paroi à partir d'une valeur $10 < y^+ < 20$ et que la corrélation entre u' et v' devient très faible [38]. LOGAN [39] qui a entrepris des mesures par anémométrie laser dans un écoulement de section carrée, en présence d'une concentration de 50 ppm de polyox. Par comparaison à l'eau, à même vitesse de frottement u^* , il trouve que $\langle u'v' \rangle$ décroît près de la paroi, mais ne constate aucune différence pour l'écoulement dans le noyau. Ce qui expliquerait l'existence de très petits tourbillons visqueux et celle de grande structures dans les fluctuations radiales. L'analyse spectrale confirme l'action des macromolécules sur les petits tourbillons dans la sous-couche et la zone tampon. De même le profil de vitesse est influencé par la présence des macromolécules. Les différents travaux [28,29 & All], ont montré les résultats suivant:

- Les profils de vitesse en présence de polymères sont plus aplatis dans le noyau turbulent et la vitesse plus élevée au centre de l'écoulement.

- les vitesses plus faibles près de la paroi comparées au cas de l'eau à même nombre de Reynolds.

- les profils tendent vers un profil laminaire lorsque la concentration augmente.

- les profils de vitesse sont influencés par la nature du

polymère utilisé.

II.2.7 MODELES PROPOSES

Suite aux nombreux résultats expérimentaux, différents modèles théoriques représentant l'influence des polymères sur la turbulence, montrent que le domaine des profils de vitesse a été celui pour lequel le plus grand nombre de modèles a été proposé.

Par une représentation sous forme adimensionnelle, VIRK [40] (fig II-8) a proposé un modèle à trois zones. Dans le noyau turbulent, les profils sont traduits d'une quantité ΔB .

-une zone intermédiaire ou élastique, se place entre le noyau turbulent et la zone pariétale .

-dans cette dernière le profil n'est pas affecté par la présence de polymères. Une asymptote de réduction de frottement a été déterminée par VIRK . BERMAN [41] a montré que ΔB est lié aux paramètres moléculaires des solutions de l'écoulement.

METZNER [42] est le premier , à avoir étudié ces solutions considérées comme des fluides non-Newtoniens. Il a proposé la définition d'un nombre de Reynolds généralisé Re_n . Il montra alors que les résultats obtenus en régime laminaire pour des conduites cylindriques pouvaient être corrélés par les expressions suivantes:

$$\lambda = 64/Re_n \quad (II-46)$$

$$\text{Avec } Re_n = 8^{1-n} \left[4 \cdot n / (3n+1) \right]^n \cdot \rho U_m^{2-n} \cdot D^n / k$$

n indice de fluidité, et k consistance du fluide dans la loi d'Ostwald.

DODGE & METZNER [23] étendirent ce résultat à la région turbulente. Il ont déterminé une distribution de vitesse sur la section de la conduite de la forme .

$$U^+ = A_n \cdot \text{Log } y^+ + B_n \quad (II-47)$$

$$\text{Avec } y^+ = y^n \cdot (U^+)^{2-n} / k \quad \text{et } U^+ = U/U^*$$

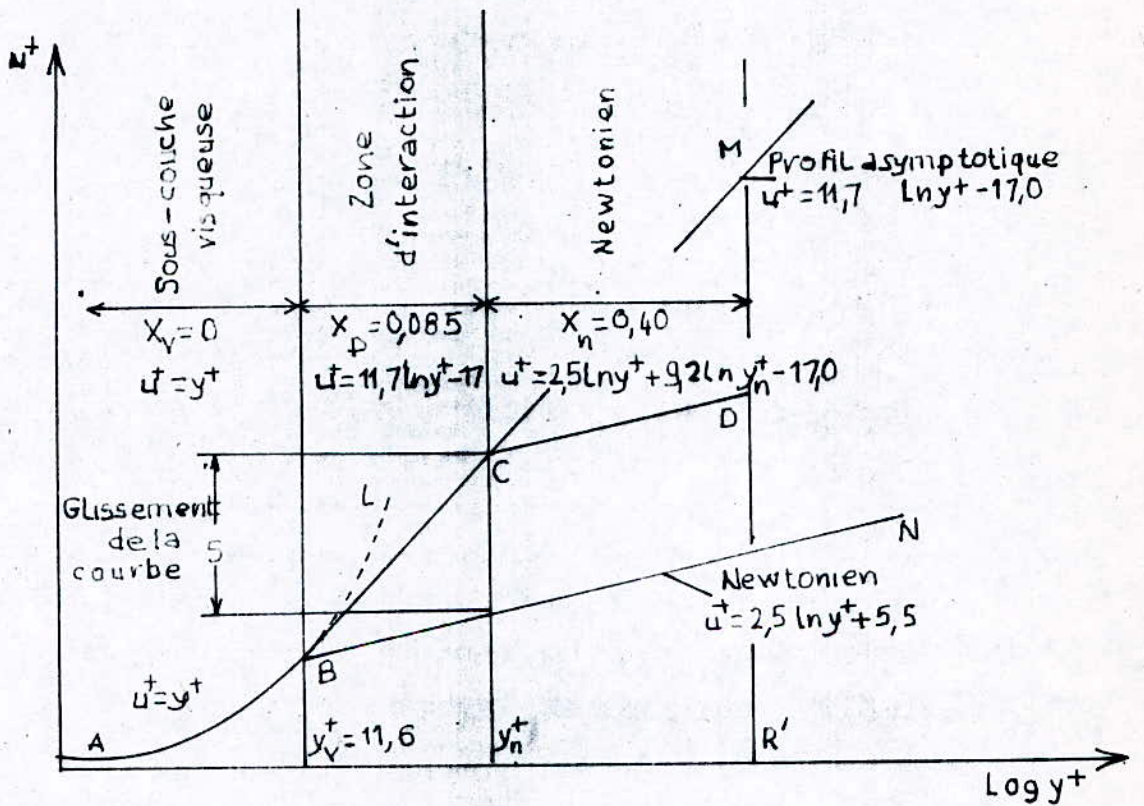


FIGURE II-8 DISTRIBUTION DES VITESSES POUR UN ECOULEMENT DE SOLUTION DE POLYMERES DANS UNE CONDUITE

Les coefficients A_n et B_n sont à déterminer expérimentalement et dépendent de n . L'inconvénient de ce modèle est de ne pas tenir compte de l'écoulement dans la zone pariétale et la zone tampon. En effet, DODGE & METZNER considèrent que la sous couche est suffisamment mince pour que la tension de cisaillement peut être considérée comme une constante, et que la vitesse varie avec y .

$$\tau = \tau_s = k \left[\frac{dU}{dr} \right]_{\text{paroi}}^n = k \left[\frac{U}{y} \right]^n$$

Son intégration sur toute la section de la conduite nous donne la loi de perte de charge pour les fluides d'Ostwald de-Waele (qui obéissent à la loi de puissance).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A'_n \cdot \text{Log} \left[\text{Re}_n \cdot \lambda^{1-n/2} \right] + B'_n \quad (\text{II-48})$$

$$A'_n = 2/n^{0.75} \text{ et } B'_n = (0.602n^{1.45} - 1.2n^{0.45} - 0.2) \cdot n^{-1.20}$$

PRUITT & AL [43] proposent une relation qui tient compte des caractéristiques du polymère utilisé.

$$\frac{f_s - f_{s,L}}{f_s - f_{s,L}} = 0.73 \left[\text{Ca} \left[\left(\frac{L}{d_m} \right) - 1 \right]^{1/2} \left[\frac{L}{D} \right]^{1/2} \right]^{0.8} \quad (\text{II-49})$$

Où Ca : Concentration en polymère en ppm.

L : Longueur de la molécule.

d_m : Diamètre de la molécule spiralee.

d : Diamètre de la conduite.

f_s : Facteur de frottement du solvant seul.

$f_{s,L}$: Facteur de frottement en régime laminaire pour la même vitesse de fluide ($f_{s,L} = 16/\text{Re}$).

Cette relation montre que plus la molécule sera flexible, plus l'effet réducteur sera important.

VIRK [44] a constaté l'existence de trois régimes turbulents dans l'écoulement des solutions diluées de polymères (fig II-9):

Un premier régime : Caractérisé par un faible débit pour lequel il n'y a pas de réduction de frottement, la solution

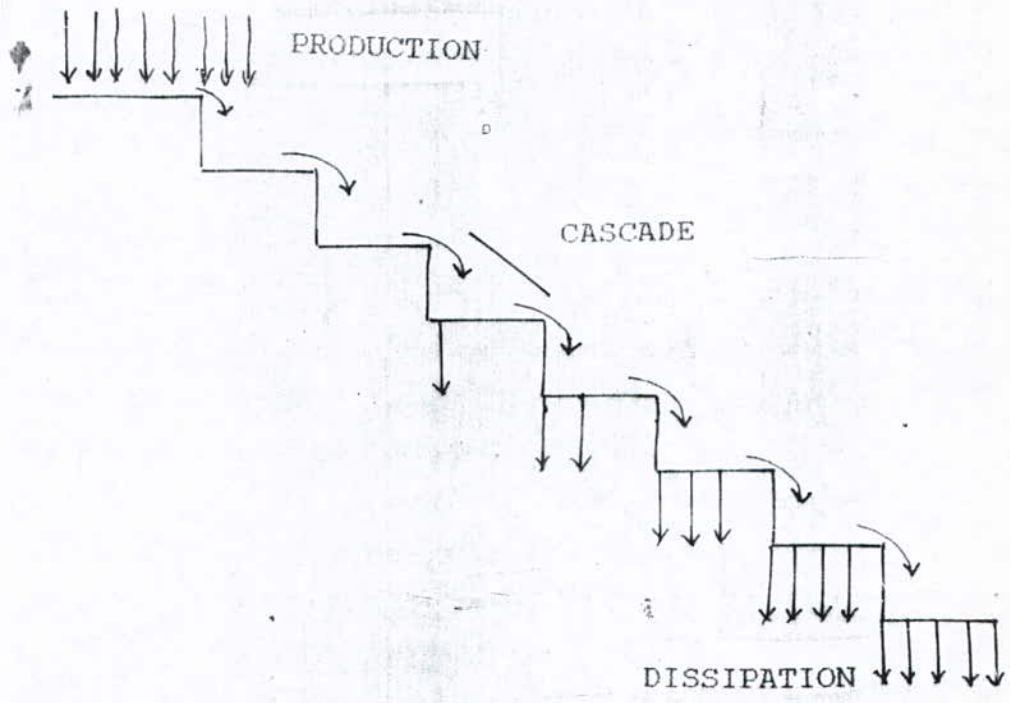


FIGURE II-4 DISSIPATION D'ENERGIE

suit la même loi que le solvant seul .

$$1/\sqrt{f} = 4. \text{Log } \text{Re}\sqrt{f} - 0.4 \quad (\text{II-50})$$

Un deuxième régime : Ayant des réductions qui dépendent du couple (solvant-polymère), de la concentration et du poids moléculaire . La solution obéit à la loi

$$f = 0.042 \text{Re}^{-0.25} \quad (\text{II-51})$$

Un troisième régime : Où la réduction de frottement est indépendante du polymère (pour une concentration donnée), qui correspond à la réduction maximale . La solution obéit à la loi asymptotique :

$$1/\sqrt{f} = 19.0 \text{Log } \text{Re}\sqrt{f} - 32.4 \quad (\text{II-52})$$

D'après l'ensemble des résultats, on remarque que le mécanisme de réduction de frottement se présente suivant deux aspects bien différents :

- il s'agit d'un phénomène local situé dans la zone dite "buffer-layer" et se traduisant par un épaississement de la sous-couche visqueuse. qui a été confirmé par les travaux de SCRIVENER [30].

- il se traduit par un déséquilibre dans la balance d'énergie, plus particulièrement dans la zone où se situe le maximum d'échanges énergétiques (production -dissipation d'énergie turbulente)

II.2.8 INTERPRETATIONS DU MECANISME DE REDUCTION DE FROTTEMENT

Le but de toutes les études sur la réduction de frottement est d'en connaître le mécanisme, donc de comprendre les interactions des macromolécules avec l'écoulement. Ces théories sont basées sur des effets de paroi (diminution du taux de cisaillement), sur l'existence de contraintes normales, sur des gradients "élongationnels" dans l'écoulement ou encore sur la

diminution de production de turbulence.

La première explication fût celle donnée par TOMS [13], qui postule que ce fluide était Non-Newtonien, c'est à dire que son coefficient de viscosité variait en fonction de la vitesse du fluide. A certaines vitesses, le coefficient de viscosité aurait pu atteindre des valeurs inférieures à celles liées au solvant pur. Mais la détermination des rhéogrammes pour les solutions des polymères réducteurs ont montré que le taux de cisaillement n'était pas réduit.

EL' PERIN et' AL [45] ont tenté d'expliquer le mécanisme en faisant intervenir le phénomène "d'adsorption". Ces chaînes de polymères seraient fixées par un certain nombre de points, et comprendraient des boucles qui s'étendraient de façon lâche dans l'écoulement et qui pourraient interagir avec ce dernier, soit en créant un effet de glissement à la paroi, soit en amortissant directement le champ tourbillonnaire, soit en empêchant la formation des vortex à la paroi. L'hypothèse de la couche de glissement a été écartée car la viscosité d'une solution, même moyennement concentrée en polymère, ne saurait devenir inférieure à la viscosité de départ. En ce qui concerne les autres possibilités, les mesures d'impédance électrochimique ont montré, dans le cas du polyoxyde d'éthylène par exemple que le nombre de points d'attache à la paroi reste très faible, ce qui limite l'importance réelle des phénomènes d'adsorption. Par ailleurs, pour éliminer définitivement cette hypothèse, on a essayé différents substrats présentant des qualités adsorbantes très différentes, sans avoir de réduction de frottement.

Par l'introduction d'une viscosité anisotrope, TOMS propose une nouvelle explication du mécanisme. Cette viscosité serait faible dans la direction de l'écoulement, mais suffisamment élevée dans les directions radiales de manière à amortir les fluctuations de vitesse. Un tel mécanisme ne peut être produit que par l'existence d'une différence importante des contraintes normales. Néanmoins aucune différence significative entre les contraintes n'a été observée par les mesures effectuées par GADD [20].

ASTARITA [24], suppose que la turbulence n'est pas supprimée par les fluides visco-élastiques, mais plus faiblement dissipée

que dans les fluides visqueux. GADD [46], ne parle pas de dissipation de turbulence, mais de diminution de production de turbulence.

WALSH [47], fût le premier à associer structure de turbulence et propriété élastiques des macromolécules. Il considère que la macromolécule est capable d'emmagasiner une certaine énergie lorsqu'elle est soumise à une instabilité violente, puis cède cette énergie à l'écoulement au-delà de la paroi. L'idée fondamentale de cette théorie est que les perturbations responsables des tensions de Reynolds naissent au voisinage de la zone ($U^+ = y^+$) et que le rôle premier de la turbulence dans la zone pariétale est de provoquer une instabilité dans la sous couche visqueuse. L'éclatement de cette instabilité provoque des perturbations de petites dimensions. Ces petites structures ont tendance à augmenter par l'adsorption locale d'énergie prise à la vitesse moyenne par le transfert de moment. Simultanément les structures perdent de l'énergie sous forme de dissipation en chaleur et par stockage d'énergie dans les molécules de polymères. Si cette petite structure extrait plus d'énergie localement qu'elle n'en perd, elle a tendance à croître. Au début de cet accroissement, les polymères modifient très lentement le bilan énergétique, mais emmagasinent l'énergie dissipée qui détruit les petites structures. Par diminution du nombre de petites structures croissant par unité de surface et de temps et éjectée au-delà de la paroi, les molécules de polymères modifient la structure de turbulence pariétale, par diminution de la production d'énergie.

JHONSON & BARCH [48], ont été les premiers à montrer expérimentalement la diminution des petites structures productrices d'énergie dans un écoulement pariétale en présence de polymères.

D'autres explications du mécanisme ont été proposées par des théories faisant intervenir des elongations de macromolécules tels que LUMLEY [49], PFENNINGER [50] et PETERLIN [51] ou des elongations de vortex par GADD [19] et GYR [52], aux concentrations d'aditifs très faibles (correspondant à l'effet optimal de réduction de frottement), la viscosité du milieu, où les molécules de polymères seraient sous forme de pelote, est identique à celle du solvant utilisé. La réduction de frottement n'est donc pas due à une modification de la viscosité moyenne. En

revanche, la viscosité elongationnelle du polymère résultant de sa résistance à l'allongement est très grande. Les deux mécanismes proposés sont fondés sur l'extension des pelotes macromoléculaires, parfois jusqu'à ce qu'elles soient totalement déroulées, dans des champs de vitesse locaux correspondant à différents niveaux de la turbulence.

Dans le premier mécanisme possible, l'extension de la macromolécule interfère directement vers les tourbillons responsables des contraintes de Reynolds : la macromolécule s'allonge dans la direction imposée localement par les tourbillons et peut alors absorber puis dissiper de l'énergie par augmentation de la viscosité à l'élongation des polymères. L'augmentation substantielle de la viscosité d'élongation conduit donc à une augmentation des phénomènes de dissipation visqueuse. L'effet se résumerait à un épaississement de la sous couche visqueuse, ce qui conduirait à une augmentation de l'épaisseur de la zone de dissipation visqueuse.

TROISIEME PARTIE

II.3 TRANSPORT DE LA VASE DANS LES CONDUITES CIRCULAIRES.

II.3.1 DEFINITION ET CARACTERISTIQUES DES MIXTURES EAU-VASE- POLYMERES

On désigne habituellement sous le nom de vase, la grande variété de matériaux fins, plus ou moins cohésifs et argileux mélangés à l'eau dans des proportions très variables. On trouve ces vases principalement dans les lits de rivières et surtout les estuaires, au fond des lacs et des océans.

Ces mixtures se composent de deux phases:

a) PHASE LIQUIDE

Cette phase est continue et représente le fluide transporteur, dans notre cas c'est l'eau. Celle-ci est caractérisée par sa masse volumique ρ_v et sa viscosité dynamique μ qui est Newtonienne

b) PHASE SOLIDE

Cette phase est discontinue et représente la vase transportée. Cette vase est caractérisée par:

- la masse spécifique ρ_s des particules solides
- la taille des particules et leur répartition granulométriques

II.3.2 CLASSIFICATIONS ET REGIMES D'ECOULEMENT

II.3.2.1 CLASSIFICATION DES SOLIDES

BAIN & BONNINGTON [53] donnent une classification d'après les dimensions des particules.

- $d < 40 \mu m$	Transporté en suspension homogène
- $40 \mu m < d < 0.15 mm$	Transporté en cas d'écoulement turbulent.
- $0.15 mm < d < 1.5 mm$	Transporté en suspension et saltation
- $d > 1.5 mm$	Transporté par saltation

Cette classification a été faite pour un matériaux de densité 2.65

GOVIER & AZIZ [54] donnent une classification basée sur la distribution de la concentration .

- Particules dont la distribution est homogène
- Particules dont la distribution est pseudo-homogène
- Particules dont la distribution est hétérogène

PARZONKA [55] donne une classification en divisant les mixtures en deux grandes classes:

a) Mixtures homogènes ou pseudo-homogènes à distribution de concentration uniforme ou presque uniforme, à régime de dépôt des grains laminaire ($Res < 1$), dont le comportement est non-Newtonien aux concentrations élevées.

- o suspensions (sans dépôt au repos).
- o suspensions dynamiques non-Newtoniennes (vitesses de chute très faibles)
- o suspensions dynamiques Newtoniennes (vitesses de chute faibles)

Notons que Res est le nombre de Reynolds des particules ($Res = w.d/\nu$ où w est la vitesse de chute de la particule en eau calme, d son diamètre et ν la viscosité cinématique du liquide)

b) Mixtures hétérogènes à répartition de concentration hétérogène, à régime de dépôt de grains turbulent ou de transition ($Res > 1$), sans apparition de propriétés non-Newtoniennes.

- o suspensions hétérogènes avec absence de régime de fond.
- o courant avec mouvement des grains à saltation ou par charriage et à fond mobile.
- o courant à fond stable.

II. 3. 2. 2 REGIMES D'ÉCOULEMENTS

Le mode d'écoulement joue un grand rôle sur le comportement de la perte de charge, nous distinguons trois régimes d'écoulements:

- écoulement homogène.
- écoulement hétérogène avec dépôt.
- écoulement hétérogène sans dépôt.

Écoulement homogène

C'est l'écoulement des particules très fines, en général dont les dimensions sont inférieures à 30 μm . Ces suspensions se comportent comme un fluide homogène. Cet écoulement est atteint aux grandes vitesses d'écoulement, telle que les forces de turbulence l'emportent sur les forces de gravité. Ces suspensions montrent des propriétés non-newtoniennes à partir d'une concentration seuil.

Écoulement hétérogène

a) Écoulement hétérogène sans dépôt:

Cet écoulement est caractérisée par un gradient de concentration. C'est l'écoulement le plus utilisé sur les grandes distances. L'aspect physique et hydrodynamique d'un point à un autre est très variables. De ce fait découle un grand nombre de paramètres régissant l'écoulement qu'on ne peut contrôler ni ponctuellement ni globalement. La prédiction des pertes de charge est difficile: c'est pour cela qu'on ne rencontre dans la littérature que les modèles empiriques et parfois semi-empirique pouvant être appliqués à ces cas d'écoulement.

b) Écoulement hétérogène avec dépôt

Il englobe tous les écoulements hétérogènes avec dépôt. C'est un écoulement économique pour les fortes concentrations, mais le risque de colmatage des conduites est assez élevé. Cet écoulement est surtout utilisé pour des transports sur petites distances.

Suivant la concentration et la vitesse, le régime par saltation peut se comporter en :

- lit stable avec écoulement superficiel pour les faibles vitesses.
- lit mobile pour les vitesses moyennes à grandes

concentrations.

-formation de dunes pour faibles vitesses et faibles concentrations

II.3.3 PERTE DE CHARGE DES MIXTURES:

En ce qui concerne les mixtures, en plus des paramètres du liquide et de la conduite, la perte de charge dépend aussi des paramètres des particules et du mélange dont: Les dimensions des particules, la densité, la vitesse limite de chute, la vitesse moyenne du mélange et sa viscosité.

$$\Delta P = \lambda_m \rho_m \frac{L}{D} \frac{U_m^2}{2} \quad (\text{II-53})$$

λ_m , est le coefficient de perte de charge unitaire du mélange.

ρ_m , est la masse volumique du mélange.

U_m , est la vitesse moyenne d'écoulement.

Dans la formule (II-53), La majorité des auteurs n'utilisent la masse volumique de la mixture que lorsqu'il s'agit d'un mélange homogène. Pour les mixtures hétérogène, ils utilisent la masse volumique du fluide transporteur, c'est à dire :

$$\Delta P = \lambda_m \rho_v \frac{L}{D} \frac{U_m^2}{2} \quad (\text{II-54})$$

CONDOLIOS & TERRIER [56], considèrent que presque tous les fluides homogènes dont le diamètre est inférieur à 40 μm et la concentration supérieure à la concentration limite ont un comportement non-newtonien visco-plastique (BINGHAM). Le coefficient de perte de charge pour le régime laminaire est donnée par:

$$\lambda_m = \frac{64}{\text{Re}_m^*} \quad \text{Avec } \text{Re}_m^* = \left[\frac{\tau_0}{6D} + \frac{\eta_p U_m}{D^2} \right] \quad (\text{II-55})$$

En écoulement turbulent le coefficient de perte de charge est donnée par la relation:

$$\lambda_m = 0.316 \left[\frac{\mu}{\mu_p} \right]^{0.48} \left[\frac{D U_m \rho_m}{\mu_p} \right]^{0.25 (\mu/\mu_p)} \quad (\text{II-56})$$

Avec $\mu_p/\mu = \exp (2.5 + 14 \alpha / \sqrt{d}) C_v$ (II-57)

- où μ_p/μ : la viscosité relative
- α : le facteur de forme
- d : le diamètre des particules
- C_v : la concentration volumique de transport

Nous remarquons que cette relation est du même type que celle de BLASIUS.

$$\lambda = \beta Re^{-b} \quad (II-58)$$

METZNER & REED [42], en partant du modèle de BINGHAM trouvent qu'en écoulement laminaire:

$$\lambda = 64/Re_m^* \quad (II-59)$$

En écoulement turbulent:

$$\lambda = 0.0056 + 0.5 \cdot Re_m^{*-0.32} \quad (II-60)$$

avec $Re_m^* = D n' U_m^{(2-n)} \cdot \rho_m / \gamma$ et $\gamma = g K' 8^{n-1}$.

Relation qu'il confirme pour 16 solides dans différentes conduites.

D'après certains auteurs [54,57], les pertes de charge en écoulement turbulent des mixtures homogènes exprimée en hauteur de mélange sont identiques à celles du fluide porteur. le gradient de perte de charge s'exprime dans ce cas de la façon suivante:

$$J_m = J_v \rho_m / \rho_v \quad (II-61)$$

Plusieurs chercheurs ont démontré que l'influence du seuil de cisaillement τ_0 est négligeable en régime turbulent, cette hypothèse est valable pour des nombres de Reynolds supérieurs à environs 4000. L'erreur due à cette simplification ne dépasse pas 1% [58].

Différents auteurs ont étudiés le comportement des particules solides (argile, vase, lysier) dans des conduites de diamètres

différents [59,60], ils ont remarqué que tous les points expérimentaux de λ (R_{em}^*) pour ces mélanges sont situées au dessous de la courbe de Blasius.

CHAPITRE 3

**DISPOSITIFS
EXPERIMENTAUX
ET METHODES DE
MESURES**

III.1 DISPOSITIFS EXPERIMENTALS

III.1.1 PARAMETRES D'ECOULEMENTS:

L'étude des caractéristiques de l'écoulement des différentes mixtures étudiées dans cette thèse a été faite sur une installation conçue spécialement pour l'étude du transport solide en conduites horizontales (fig III-1).

La mixture est préparée dans le bac de mélange (1). Un malaxeur (2) entraîné par un moteur électrique permet d'obtenir un mélange homogène. Une fois la mixture préparée, la pompe centrifuge (3) entraînée par un moteur diesel aspire le mélange du bac (1) et le refoule à travers un collecteur (4) vers l'une des conduites cylindriques (5), (6) ou (7), de diamètres respectivement égales à :

$D_1 = 36$ mm, $D_2 = 53$ mm et $D_3 = 84$ mm et de longueurs totales respectifs égales à $L_1 = 12.24$ m, $L_2 = 18.52$ m et $L_3 = 26.30$ m.

La différence des diamètres des conduites permet l'étude de l'effet de dimension de la conduite sur la perte de charge et le coefficient de perte de charge unitaire.

Sur chaque conduite sont installées des prises de pressions (8), des fenêtres d'observations (a), (b) et (c) afin de visualiser l'écoulement et des vannes (9), (10) et (11) qui permettent de diriger l'écoulement selon notre choix.

Le mélange sort des conduites et se verse dans le réservoir de mesure (12). Celui-ci est divisé en deux parties l'une est ouverte à la base qui permet le déversement du mélange dans le bac de mélange (1) assurant ainsi un circuit fermé, et l'autre partie, qui fermée à sa base, est étalonnée et permet la mesure d'un volume donné pendant un temps t .

Lors de la mesure du débit, l'écoulement est dévié à l'aide d'une manivelle (13) qui commande une plaquette afin qu'on puisse collecter la totalité de l'écoulement vers le bac de mesure. Après la levée de la mesure, le volume recueilli est vidangé dans le bac de mélange (1) à l'aide de la vanne (14).

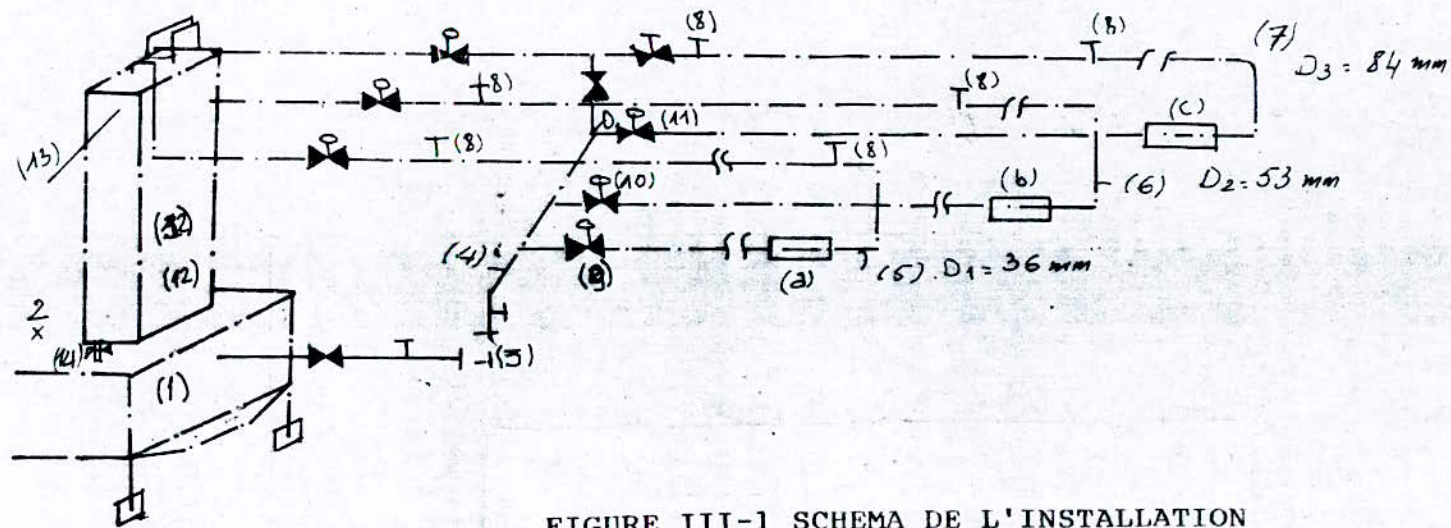


FIGURE III-1 SCHEMA DE L'INSTALLATION

La perte de charge est mesurée à l'aide de manomètres en "U" (15). Pour les petites dénivellations on se sert d'un manomètre en "U" renversé à eau, tandis-que pour les grandes dénivellations on utilise un manomètre en "U" en mercure. Ces manomètres sont raccordés aux prises de pressions par des tuyaux flexibles et tansparents (16).

Sur chaque conduite, les prises de pression sont distantes respectivement de :

$$l_1 = 3.727 \text{ m} ; l_2 = 6.31 \text{ m} \text{ et } l_3 = 8.00 \text{ m}$$

Dans une première phase, nous avons pris des mesures de l'eau claire. La perte de charge linéaire dans les deux conduites a été représentée en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement $U_m = Q/S$ (S est la section de la conduite).

Les points représentant les pertes de charge (figure III-2a) mesurées dans les deux conduites ont une forme parabolique de la forme :

$$J = \frac{\lambda U^2}{2gD} \quad (\text{III-1})$$

la figure III-2b, montre que les deux conduites se comportent comme des conduites lisses pour le domaine de nombre de Reynolds utilisée dans notre étude. Plusieurs essais ont été fait afin d'assurer la répétitivité des mesures dans les mêmes conditions d'écoulement.

Les conduites utilisées étant rugueuses, nous avons procédé à la détermination de la rugosité équivalente de chaque conduite. Pour cela, il suffit de faire passer l'eau dans chaque conduite en régime d'écoulement hydrauliquement rugueux. Connaissant le débit qui passe à travers les conduites et la perte de charge mesurée à l'aide des piézomètres, on peut déduire le nombre de Reynolds et le coefficient de perte de charge unitaire λ correspondant; En s'assurant que le régime hydrauliquement ruqueux est établi on peut déduire la rugosité relative à partir du diagramme de Moody:

Conduite	Rugosité relative ϵ/D	ϵ (mm)
D1	0.005	0.181
D2	0.001	0.053

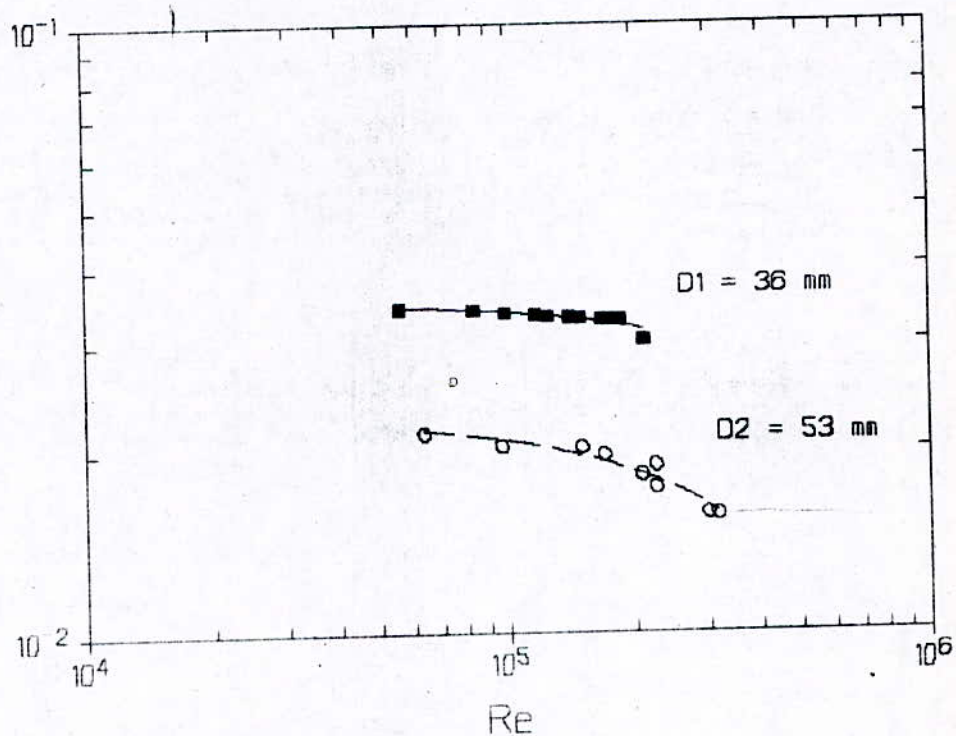
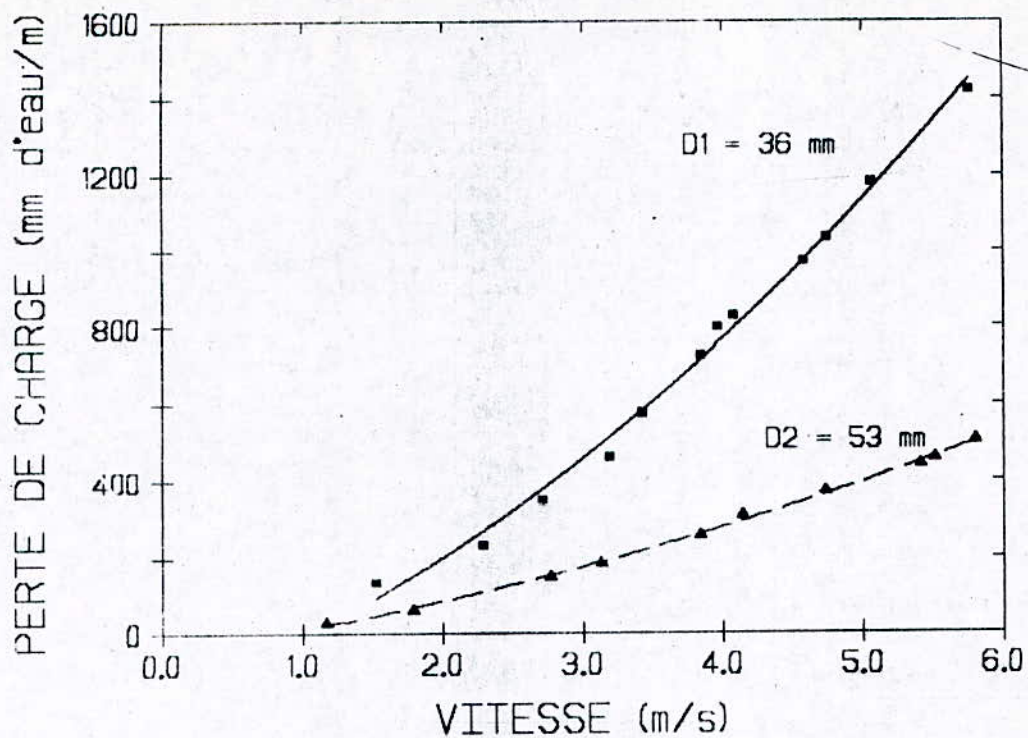


FIGURE III-2 CARACTERISATION DE L'INSTALLATION

- a- PERTE DE CHARGE EN FONCTION DE LA VITESSE MOYENNE D'ECOULEMENT
- b- COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE UNITAIRE EN FONCTION DU REGIME D'ECOULEMENT

Les tronçons d'essai sont disposés suffisamment à l'aval de l'entrée des conduites. Pour la conduite D1 le tronçon d'essai est à 4.30m de l'entrée, pour le deuxième, il est à 6.30 m de l'entrée.

Compte tenu des conditions d'établissement de l'écoulement, on peut estimer que dans le cas d'un fluide Newtonien, le régime turbulent est parfaitement établi.

En effet, pour un écoulement laminaire, le parcours d'entrée L_e est plus long que dans le cas d'un écoulement turbulent et qu'il peut être calculé par la relation de BOGUE [61].

$$L_e/D = 0.006 Re \quad (\text{III-2})$$

Dans un écoulement turbulent le parcours d'entrée est plus court les transferts de quantités de mouvement étant plus importants. La relation

$$L_e/D = 14.3 \log Re - 46 \quad (\text{III-3})$$

est généralement employée pour calculer le parcours d'entrée d'un fluide Newtonien. Une bonne vérification expérimentale en a été donnée par BOWLUS et BRIGHTON [62]. Les travaux de HINZ [63] montrent que le parcours d'entrée est prolongé dans le cas d'un fluide Non-Newtonien. Sa valeur peut être calculée par la relation:

$$L_e/D = 30 \log Re - 75 \quad (\text{III-4})$$

qui donne pour notre installation et dans les conditions de nos essais un parcours d'entrée maximal de 3.7 m pour la conduite de diamètre 36 mm et 5.56 m pour la conduite de 53 mm, ce qui est acceptable.

Les essais de SEYER et CATANIA [64] sur des solutions de séparan montrent que ce parcours d'entrée peut atteindre 150 diamètres pour les fortes concentrations en polymères à des nombre de Reynolds proche de 10^4 . SCRIVENER [27] montre que le parcours d'entrée n'excède pas 60 diamètres pour des solutions de polyox d'une concentration maximale de 0.01% et un nombre de Reynolds

maximum de $5 \cdot 10^4$ (fig III-3).

III.1.2 PARAMETRES RHEOLOGIQUES.

Deux types de viscosimètre ont été utilisés dans notre étude pour déterminer les paramètres rhéologiques des mixtures et solutions étudiées: le premier est du type rotatif, le deuxième est du type capillaire:

Viscosimètre rotatif:

Les mesures des caractéristiques des solutions polymériques et mixtures étudiées sont effectuées à l'aide d'un viscosimètre FANN représenté par la figure (III-4). Il est constitué de deux cylindres coaxiaux. Le fluide, contenu dans l'entrefer entre le cylindre intérieur (rotor) est mis en mouvement par un moteur à vitesse variable et le cylindre extérieur stator immobile n°2). Le gradient de vitesse est donné par la vitesse de rotation du rotor et le taux de cisaillement par la résistance à l'écoulement produit entre les deux cylindres. Cette résistance est transformée en lecture directe par l'intermédiaire d'un cadran gradué. Quatre vitesses rotationnelles sont données par ce viscosimètre. Elles sont utilisées dans l'ordre croissant. A chaque vitesse, on note la déviation correspondante sur le cadran gradué.

Les lectures obtenues et les vitesses de rotation du viscosimètre ont été transformées à partir des formules ci-dessous :

-Contrainte de cisaillement :

$$\tau = 0.511 k \theta \quad (III-5)$$

θ valeur lue sur le cadran gradué

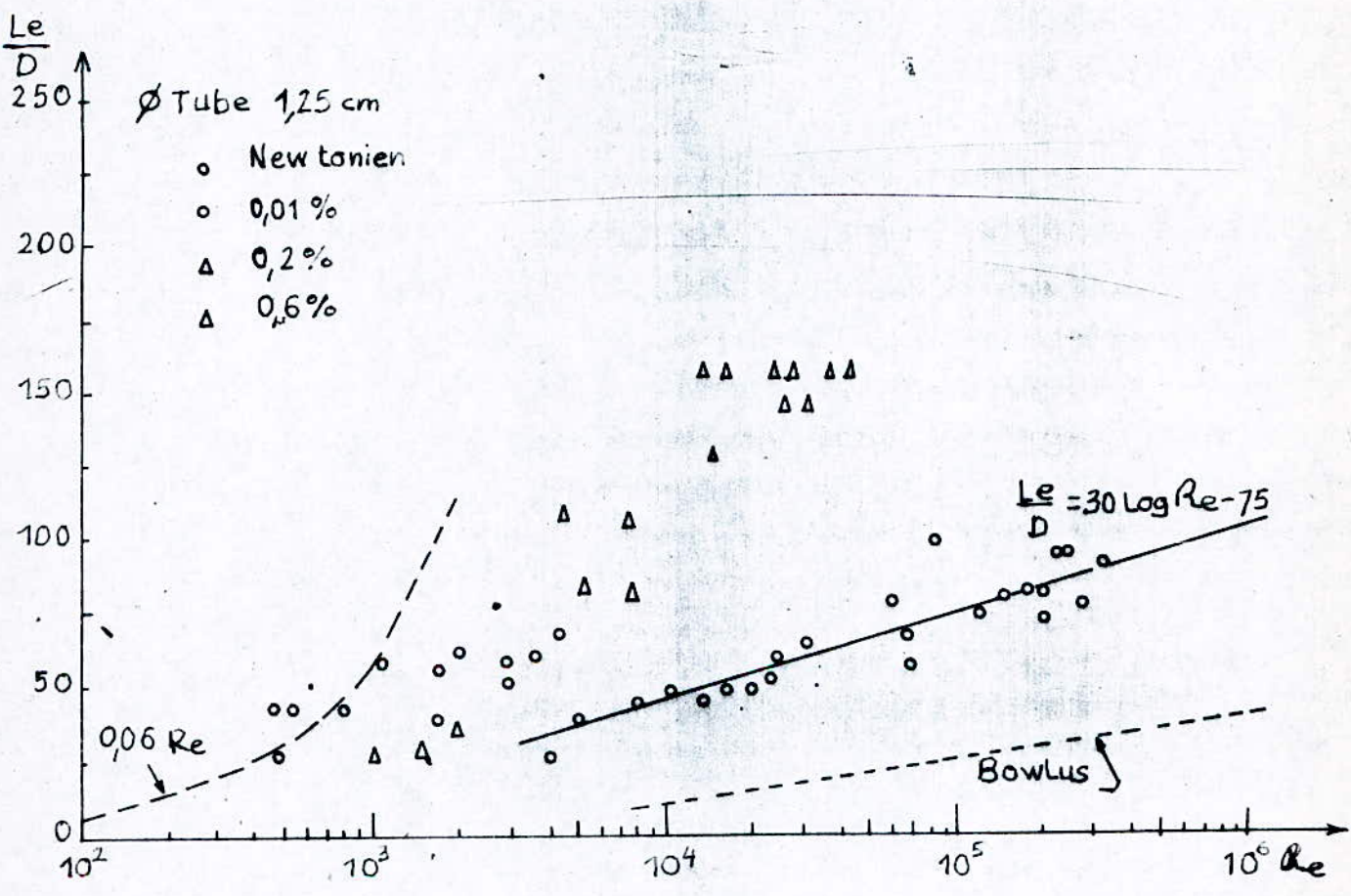
$k = 1$ pour un modèle standard (constante de ressort)

Cette formule n'est valable que pour un espace annulaire égal à 0.1170 cm .

-Vitesse de déformation :

$$\dot{\gamma} = 1.7034 \times N \quad (\text{s}^{-1}) \quad (III-6)$$

avec



d'après SEYER [64]

FIGURE III-3 PARCOURS D'ENTREE DANS UNE CONDUITE EN ECOULEMENT NEWTONIEN ET NON NEWTONIEN

N vitesse de rotation en tr/mn.

Il faut noter, que pour les fluides de Bingham, ce viscosimètre fournit seulement la pseudo-courbe de fluage. Ceci est dû principalement au cisaillement partiel auquel sera soumis le fluide pour les faibles gradients de vitesse. Un exemple est donné dans la figure III-5, pour déduire la courbe de fluage (rhéogramme).

Étalonnage du viscosimètre rotatif :

Le fluide utilisé est la glycérine (50%), celui-ci étant un fluide Newtonien, la courbe d'étalonnage est une droite (fig III-6) passant par l'origine, sa pente nous donne la viscosité dynamique.

$$\begin{aligned}\mu_{\text{exp}} &= 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s} \\ \mu_{\text{thé}} &= 7.6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}\end{aligned}$$

Viscosimètre " ENGLER " .

Pour les mixtures et solutions dont le comportement est Newtonien la viscosité dynamique a été déterminée à l'aide de ce viscosimètre. La détermination classique de la viscosité dynamique μ repose sur la mesure du temps nécessaire à l'écoulement de 200 cm³ liquide à étudier à travers un orifice calibré, comparé au temps nécessaire à l'écoulement de 200 cm³ d'eau à 20 °C à travers le même orifice. La viscosité dynamique est donnée par la formule empirique suivante:

$$\mu = (7.32E - 6.31/E) \cdot 10^{-2} \cdot \rho_m \quad (\text{III-7})$$

où

$$E = \frac{\text{temps d'écoulement de } 200 \text{ cm}^3 \text{ du liquide}}{\text{temps d'écoulement de } 200 \text{ cm}^3 \text{ d'eau à } 20 \text{ c}^\circ}$$

et

ρ_m masse volumique de la solution étudiée.

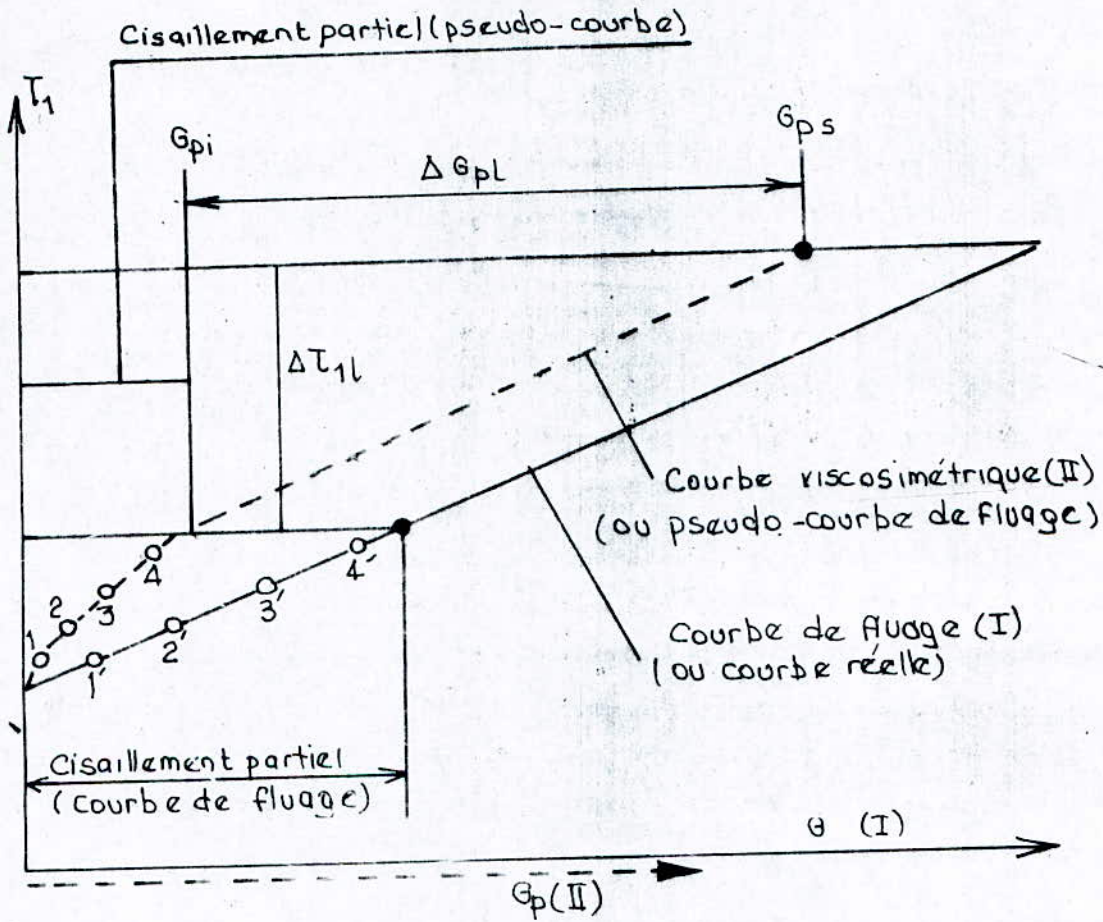


FIGURE III-5 COURBES DE FLUAGE POUR UN CORPS DE BINGHAM

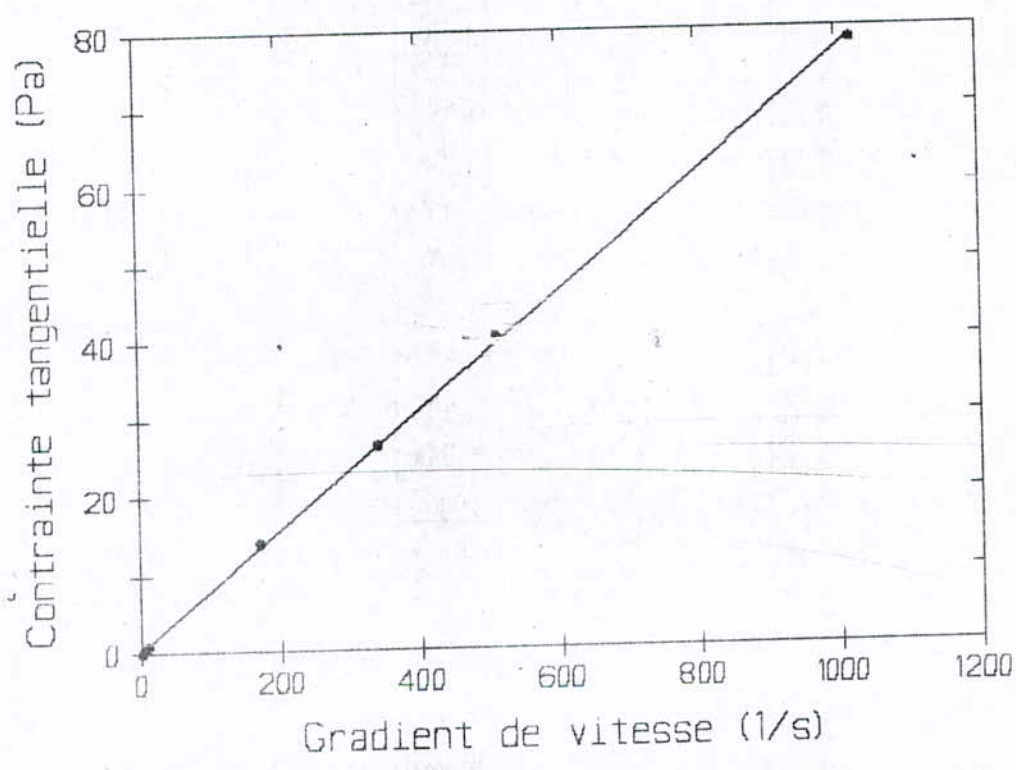


FIGURE III-6 ETALONNAGE DU VISCOSIMETRE ROTATIF FANN

III.2 METHODES DE MESURE.

III.2.1 PREPARATION DES MIXTURES ET SOLUTIONS ETUDIEES

Nous préparons d'abord une solution fortement concentrée de polymère, dite solution mère, en dispersant une très faible quantité de polymères dans l'eau. Après quelques minutes (20 minutes), une mince pellicule se forme. En agitant très lentement, la pellicule disparaît et le liquide devient homogène. On recommence l'opération plusieurs fois jusqu'à épuisement de la quantité de polymères prévue à cet effet. La solution devient à la fin homogène et transparente. Cette solution doit-être conservée à l'abri de l'air et de la lumière. Au moment de son utilisation, on dissout le volume nécessaire dans le solvant en circulation (eau+polymère ou eau +vase + polymère). La concentration de la solution mère étant connue, on peut connaître celle de la solution ou mixture étudiée.

En ajoutant de la CMC dans les mixtures, nous avons remarqué que ce polymère maintient la suspension des particules solides en solution et empêche la décantation. Tandis-que les Polyacrylamides et le Polyéthylène-oxyde 301 flocculent les particules solides et les rends de diamètre plus grand.

III.2.2 MESURE DU DEBIT :

Pendant un temps t , on dévie l'écoulement à l'extrémité de la conduite vers le bac de mesure (12). On mesure le volume récupéré pendant ce temps, le débit sera égale à:

$$Q = \frac{U_m}{T} \text{ (m}^3 \text{ / s)} \quad \text{(III-8)}$$

d'où la vitesse moyenne de l'écoulement.

$$U_m = Q/S \quad \text{Avec } S = \pi \cdot D^2 / 4$$

L'erreur relative sur le débit est estimée à 3.06%

III.2.3 MESURE DE LA CONCENTRATION EN PARTICULES SOLIDES ET POLYMERE

Lors de la mesure du debit, on prend un volume V_m de la mixture qui est pesé sur une balance électronique. A l'aide du volume V_m et de sa masse M_m , nous determinons la concentration de transport de la façon suivante.

$$M_m = M_v + M_s \quad (1)$$

$$\Rightarrow M_m = V_v \cdot \rho_v + V_s \cdot \rho_s \quad (3)$$

$$V_m = V_v + V_s \quad (2)$$

Sachant que:

$$M_m = \rho_m \cdot V_m \quad (4)$$

et

$$M_s = \rho_s \cdot V_s \quad (5)$$

Les équations (1 à 5) nous permettent de trouver la relation entre la masse spécifique de mélange et la concentration volumique de transport $Cv = Vs/Vm$.

$$\rho_m = \rho_s Cv + \rho_v (1-Cv) \quad (III-9)$$

Cette concentration donne la fraction volumique des particules solides par rapport au volume du mélange transporté. Dans tout ce qui suit, Cv désignera la concentration volumique de transport.

En déterminant la masse de la mixture ou de la solution étudiée on peut déduire facilement la concentration de polymère à partir de la relation suivante:

$$Cp = \frac{M_p}{M_m} \times 10^6 \text{ (ppmp)}. \quad (III-10)$$

Cette concentration donne la fraction massique du polymère utilisé par rapport à la masse du mélange transporté. Dans tout ce qui suit Cp désignera la concentration massique du polymère dissout dans le mélange.

III.2.4 MESURE DE LA PERTE DE CHARGE:

La différence de pression au niveau de chaque tronçon d'essai est mesurée à l'aide de deux manomètres différentielles l'un de mercure et l'autre en eau (U renversé), le premier est utilisé pour la mesure des faibles différences de pression et le deuxième pour les grandes.

Pour les mixtures, la perte de charge mesurée est exprimée en

hauteur d'eau et en hauteur de mélange, tandis-que pour les solutions polymériques elle est exprimée en hauteur d'eau car la masse spécifique varie peu.

L'erreur relative maximale sur la valeur de la perte de charge est de 2 % .

Les lois de l'hydrostatique ont été utilisées pour déduire la valeur de la perte de pression à partir de la mesure de la perte de charge ΔH .

CHAPITRE 4



RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

IV.1 MATERIAUX UTILISES

IV.1.1 VASE

Les apports des crues transportants des débits solides arrachés au bassin versant et au lit de rivière se déposent et envasent à la longue la retenue d'eau. Cette vase est constituée d'éléments de tailles et caractéristiques physiques, physico-chimique et géotechnique différentes. Les propriétés physiques, physico-chimiques et géotechniques des éléments constituant cette vase à savoir la granulométrie, la forme, la densité et les propriétés géotechniques, différent d'un bassin à un autre.

Granulométrie :

La granulométrie est un facteur essentiel et doit être étudiée aussi bien à l'état floculé que défloculé (taille des particules élémentaires).

Pour définir la répartition des grains par rapport à leur taille, on construit la courbe granulométrique en fonction du logarithme décimale du diamètre des particules solides. Le d_{50} n'étant pas suffisant pour caractériser la granulométrie d'un échantillon. On définit deux coefficients C_u et C_c appelés respectivement d'uniformité et de conformité ainsi définis :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad ; \quad C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (IV-1)$$

Nous avons déterminé la courbe granulométrique de la vase prélevée au niveau de la digue du barrage de Fergoug à l'état floculé et défloculé, pour cela un densimètre classique basée sur la loi de Stokes a été utilisé. Les résultats sont présentés sur la figure IV-1.

Pour améliorer les résultats obtenus précédemment il était nécessaire de connaître le pourcentage des grains inférieurs à 75 μm pour savoir le type de vase qu'on a (fine ou grosse).

Matériaux	Etat du matériaux	d50	Cu	Cc	% Diamètre < 75µm
Vase	Naturelle	6	8		97
	Défloculée	1.4	10	40	100

Ces résultats coïncident avec ceux trouvés par PARZONKA [65], KORSO [66], BELHADRI [67] et ZIANI [68] pour la même retenue.

AUTEURS	Lieu de prélèvement / au barrage	d50 µm	
		floculé	dflocul
PARZONKA [65]	0	6	4
	2300 m	18	6
BELHADRI [67]	5300 m	30	12
	pres de la vidange de fond	6	2
KORSO [66]	2500 m	70	24
ZIANI [68]	3000 m	65	22

Forme :

L'analyse granulométrique ne permet pas d'étudier la forme des grains qui a une importance primordiale pour les propriétés mécaniques et hydrauliques (il n'existe aucun essai simple pour déterminer ce paramètre). L'observation au microscope électronique montre particulièrement que la vase du barrage de Fergoug est composée de particules fines de formes irrégulières allongées KORSO [66].

Dans la bibliographie on utilise souvent d'autres paramètres, comme le facteur de sphéricité, lorsque les particules solides ne sont pas des sphères. On décrit la forme de particule par un facteur qu'on appelle habituellement "facteur de forme".

Densité :

La densité des grains solide est le rapport de la masse spécifique à la masse d'un volume égal d'eau à la température +4°C

D'après les travaux antérieurs [66,67,68], la densité des particules solides de la vase de la retenue de FERGOUG est comprise entre 2.5 et 2.7. Pour notre cas, nous avons trouvé une densité égale à 2,7.

Propriétés géotechniques :

En plus de la granulométrie les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité sont les caractéristiques sur lesquelles repose la classification HBR (HIGHWAY BORD RESEARCH) pour la classification des sols.

Materiaux	W _L %	W _p %	I _p %
Vase	63.8	34.5	29.3

D'après les résultats trouvés on peut dire qu'on a une vase fine argileuse de forte plasticité.

IV.1.2 POLYMERES UTILISES :

On sait que les macromolécules sont formées à partir de l'assemblage d'un certain nombre de monomères. La chaîne résultante peut être soit linéaire, soit complexe dans une configuration qui peut être celle d'une chaîne avec chaînons latéraux, d'une chaîne en étoile etc... Cette chaîne possède un caractère d'élasticité plus ou moins marqué, dépendant à la fois des interactions et des liaisons entre chaînons; et du solvant. Différents types de modélisation des macromolécules ont été proposés, soit un modèle d'haltère (DUMBEL) reliés par un ressort pourvu d'une élasticité linéaire ou non. Soit une pelote pourvue d'une porosité plus ou moins importante. Il est généralement admis qu'au repos, en l'absence d'écoulement, les macromolécules ont une forme de pelote statistique dont le diamètre est une fonction de la qualité du solvant. Les polymères réducteurs de frottement sont caractérisés par :

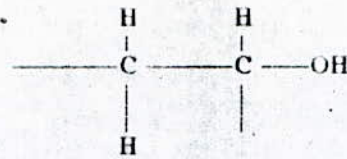
- La linéarité des chaînes macromoléculaires
- La solubilité dans le solvant
- Le haut poids moléculaire

En fonction de ces critères notre choix s'est porté sur le Polyox, le Polyacrylamide, l'Antisol et la CMC technique.

P O E WSR 301

La chaîne de polyox WSR-301 est linéaire, composée de

monomères de formule C_2H_3OH , est représentée par le schéma suivant

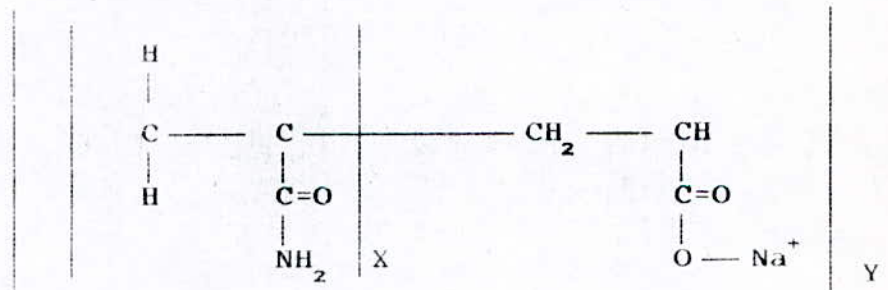


Sa masse moléculaire est de l'ordre de $5 \cdot 10^6$ et la masse d'un monomère est de 44 unités. Il y a donc 115×10^3 monomères par polymère. La longueur statique de sa chaîne étendue est de $8.8 \cdot 10^2$ A°.

Dans les conditions expérimentales optimales (diamètre de la conduite, vitesse de frottement, concentration) le taux de réduction peut atteindre 80% pour une concentration voisine de 20 ppm.

polyacrylamides (separan) :

Les polymères Separan sont des polymères synthétiques soluble dans l'eau à très haut poids moléculaires, utilisés comme flocculants. IL sont formés par la polymérisation d'un acrylamide. Ce polyacrylamide est essentiellement non ionique en solution. Cependant, par hydrolyse de quelques groupes amides, le produit peut aussi avoir un caractère anionique, faible ou fort, dépendant uniquement du degré d'hydrolyse. La formule développée d'un acrylamide est donnée par :



Bien que les polyacrylamides soient principalement utilisés comme agents coagulant, leurs propriétés variées les rendent aussi utilisable dans bien d'autres types d'opérations. Par exemple comme agents épaississants, lubrifiants, filmogènes ou adhésifs.

Dans notre étude nous avons utilisé le AP-302, AP-273 et AP-45 qui ont respectivement une masse moléculaire de l'ordre de (5 à 7 millions), (4 à 6 millions) et (5 à 7 millions). En plus nous avons utilisé l'antisol qui n'est pas aussi efficace que les séparans.

CARBOXYMETHYLCELLULOSE

On trouve plusieurs types de ce polymères de masses moléculaires différentes. On peut citer les travaux de DODGE & METZNER [23], SHAVER & MERILL [69]. Ce produit n'a pas de grandes performances en réduction. Après l'étude des propriétés physiques et physico-chimiques des matériaux utilisés, on détermine leurs comportement rhéologiques dans les mixtures.

IV.2 COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES DIFFERENTES MIXTURES ET SOLUTIONS ETUDIEES

IV.2.1 GENERALITES

Les fluides à comportement newtonien sont caractérisés par des rhéogrammes (contraintes tangentiels en fonction des gradients de vitesse) linéaires en coordonnées cartésiennes et passant par l'origine. Un seul paramètre rhéologique suffit alors pour décrire leur comportement. C'est par exemple la viscosité dynamique $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ (figure IV-2) qui est telle que :

$$\tau = \mu \, du/dy \quad (IV-2)$$

Tous les fluides n'obéissant pas à cette loi de simple proportionnalité sont dits non-newtoniens.

Ils peuvent être plastiques lorsqu'il est nécessaire d'atteindre une contrainte tangentielle minimale τ_0 pour qu'il y ait mise en mouvement du liquide. La relation rhéologique la plus simple employable est alors la relation de BINGHAM :

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \, du/dy \quad (IV-3)$$

dans laquelle μ_p est appelé coefficient de rigidité du milieu ou viscosité plastique et τ_0 est le seuil de contrainte. Mais cette

loi s'avère elle aussi parfois insuffisante lorsque le rhéogramme n'est pas rectilinéaire et l'emploi d'autres modèles à plus de deux paramètres, tels que celui de VOCADLO, EYRING, est nécessaire.

Lorsque τ_0 est nul (ou non décelable) et que le rhéogramme n'est pas rectilinéaire, on est en présence de corps inélastiques non plastiques qui peuvent être soit pseudo-plastiques lorsqu'il y a diminution de la viscosité apparente avec un accroissement de gradient de vitesse (concavité du rhéogramme tournée vers les contraintes négatives), soit dilatants dans le cas contraire rarement rencontré (figure IV-2). Parmi les modèles de comportements non plastiques et inélastiques utilisés, les uns sont d'origine expérimentale ou empirique, les autres sont d'origine semi-théorique issue en général de la théorie moléculaire d'EYRING.

Il arrive parfois que la viscosité apparente d'un fluide dépend non seulement du niveau des sollicitations, mais aussi de la durée de leur application. Ces fluides sont dits thixotropes lorsque la viscosité apparente décroît avec le temps à du/dy fixé et rhéopectiques dans le cas contraire.

IV.2.2 SOLUTIONS ET MIXTURES ETUDIÉES:

IV.2.2.1 MIXTURES VASE-EAU ET VASE-POLYMERES.

Les vases à l'état liquide, donc aux concentrations inférieures à la limite de liquidité d'Atterberg W_L , peuvent être considérées, comme des mixtures homogènes ou pseudo-homogènes sol-eau, et du point de vue rhéologique comme des fluides newtoniens (aux $C_v < C_{vlim}$) et des fluides non-newtoniens (aux $C_v > C_{vlim}$). La concentration volumique de vase qui délimite le domaine newtonien et non newtonien (C_{vlim}) est déterminée à partir de la figure (IV-3), cette concentration est égale à 3.12%. En effet les travaux effectués par PARZONKA [65] sur plusieurs échantillons récupérées à différentes distances à l'amont du barrage de Ferguson montrent que les concentrations limites trouvées sont comprises entre 3 et 14 %.

Les paramètres rhéologiques des différentes solutions et mixtures polymériques ou non peuvent être déterminées à l'aide des

viscosimètres rotatifs et capillaires basées sur le principe du cisaillement simple $\tau = f(G)$, où τ est la contrainte de cisaillement tangentiel et G la vitesse de déformation. Ces corps peuvent être décrits d'après des modèles rhéologiques généralisés des substances rhéostables.

Pour les différentes mixtures et solutions polymériques dont la concentration en vase et en polymère sont inférieures aux concentrations limites (C_{vlim} et C_{plim}) correspondant à la zone newtonienne, les valeurs de la viscosité dynamique sont déterminées à l'aide de l'appareil classique d'Engler et comparées avec les valeurs obtenues au viscosimètre rotatif Fann. Dans cette zone on utilise la formule classique de Newton équation IV-2.

Le comportement non-newtonien des mixtures polymériques est obtenu lorsque l'une de ces concentrations C_v ou C_p dépasse respectivement C_{vlim} ou C_{plim} . Les différents rhéogrammes obtenus pour les mixtures dont la concentration volumique de vase est de $C_v = 10\%$, montrent que celles-ci ont un comportement non-newtonien (fig IV-4c et 5b). Le modèle utilisé pour ajuster les résultats est celui de Bingham. D'après PARZONKA [65] ce modèle est suffisamment précis pour les concentrations volumiques très inférieures à celle de la limite de liquidité. Pour les fortes concentrations proches de la limite de liquidité, les résultats montrent souvent un comportement plus compliqué, exigeant l'application d'un modèle à trois paramètres comme celui de VOCADLO.

$$\tau = \left(\tau_{lim}^{1/n} + k_v \cdot \frac{du}{dy} \right) \quad (IV-4)$$

L'étude des rhéogrammes des mixtures à $C_v = 2.3\%$ (figures IV-4b, 5a et 6) montre qu'ils ont un comportement newtonien.

Les résultats représentés par les figures IV-4 à 6, montrent que l'addition de concentrations polymériques C_p , telle que C_p soient inférieures à C_{plim} à une mixture à concentration de vase donnée, a pour effet de changer les caractéristiques physiques de la mixture caractérisée par sa viscosité, sans changer son comportement rhéologique. On remarque une augmentation de la viscosité lorsqu'on ajoute des polymère dans la mixture de vase.

Cette augmentation est plus grande dans le cas du polyox.

IV.2.2.2 SOLUTIONS DILUEE DE POLYMERES

En solution concentrée, le caractère visco-élastique des solutions de macromolécules à haut poids moléculaire est fortement marqué. Elles se comportent rhéologiquement comme des fluides non-newtoniens, ce comportement étant du type pseudo-plastique d'ostwald. La contrainte de frottement, obéit à une loi du type :

$$\tau = k \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]^n \quad (IV-5)$$

Avec $n < 1$ pour ces solutions

n est l'indice de fluidité

k la consistance

$\frac{\partial u}{\partial y}$ gradient de vitesse

TRIBOLET [70] a étudié ces propriétés pour les solutions de polyox de concentrations différentes. Il en ressort que lorsque la concentration est inférieure à 1000 ppmp (partie par million poids), l'indice " n " tend vers l'unité et la consistance " k " tend vers la viscosité dynamique η ; le fluide peut alors être considéré comme newtonien.

O.SCRIVENER [271], a constaté qu'en deça de 1500 ppmp pour une solution de polyox la viscosité est une fonction linéaire de la concentration à gradient constant.

Pour les très faibles gradients on considère la viscosité comme indépendante du gradient de vitesse et de la concentration. Sa valeur est différente de celle du solvant. La représentation de PETERLIN [51] de la viscosité par un développement en série

$$\mu = \mu_0 \left[1 + (\mu) C_p + K' (\mu)^2 C_p^2 + \dots \right] \quad (IV-6)$$

montre que pour les faibles concentrations en polymères on peut considérer la viscosité de la solution comme étant celle du solvant.

La concentration limite du polymère $C_{p_{lim}}$ qui est définie comme la concentration limitant le domaine newtonien ($C_p < C_{p_{lim}}$) au domaine non newtonien ($C_p > C_{p_{lim}}$) est différente pour les autres polymères. Les concentrations étudiées étant inférieures à ces limites, les solutions sont supposées newtoniennes.

Dans notre étude, les concentrations utilisées des différentes solutions polymériques étant inférieures à ces limites, les solutions sont supposées newtoniennes. Leur viscosité est calculée en utilisant le viscosimètre classique d'Engler.

Par conséquent les mixtures étudiées peuvent se comporter comme des fluides newtoniens et non-newtoniens (plastique de Bingham), selon la concentration en polymère et en vase.

IV.3 INFLUENCE DES MATERIAUX UTILISES SUR LA PERTE DE CHARGE

IV.3.1 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE LA VASE SUR LA PERTE DE CHARGE

En premier lieu, nous avons effectué des essais sur des mélanges sol-eau, afin de déterminer l'influence de la vase sur la perte de charge linéaire.

Le gradient de pression est défini par :

$$J_m = \Delta H / L \quad \text{avec} \quad \Delta H = \Delta P / \rho_m g \quad (IV-7)$$

Pour chaque concentration de vase (10 et 2.3%), nous avons étudié la variation de la perte de charge linéaire en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement, représentée par les figures IV-7 et 8.

La représentation du gradient de pression exprimé en hauteur d'eau par mètre de conduite en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement pour différentes concentrations de vase, montre que les points expérimentaux d'iso-concentration pour le cas des mixtures étudiées se trouvent légèrement au dessus de celle de l'eau claire (fig IV-7), et qui divergent de celle de l'eau claire lorsque la vitesse augmente. Cette allure est typique des particules fines dont l'écoulement est homogène d'après NEWITT [71]. Cette divergence pour les grandes vitesses, est due au fait que ces mixtures se comportent comme des fluides homogènes de masse volumique ρ_m . En effet d'après la majorité des auteurs, la perte de charge pour ces suspensions est le produit de la perte de

charge de l'eau et de la masse volumique du mélange rapportée à celle de l'eau.

$$J_m = J_v \cdot \frac{\rho_m}{\rho_v} \quad (\text{IV-8})$$

La différence $J_m - J_v = J_v \left[\frac{\rho_m}{\rho_v} - 1 \right]$ augmente lorsque J_v augmente. Comme J_v augmente avec la vitesse, les courbes d'iso-concentration divergent de celles de l'eau claire, lorsque la vitesse augmente.

La figure IV-8, représente la perte de charge en hauteur de mélange. Nous remarquons que les courbes d'iso-concentration sont situées au dessous de celle de l'eau claire pour le cas de la conduite de diamètre 36 mm. Cet effet de réduction de la perte de charge est absent dans le cas de la conduite de diamètre 53 mm. Ce phénomène peut être attribué à l'effet de diamètre. L'effet de réduction obtenu dépend de la concentration des sédiments et de la vitesse d'écoulement comme le montre la figure.

IV.3.2 INFLUENCE DES POLYMERES SUR LA PERTE DE CHARGE:

Les polymères utilisés dans le cas des mixtures vase-eau sont, la CMC, le Polyox WSR 301, et le Separan AP-302. Les concentrations de la vase utilisées sont 10% et 2.3%. L'efficacité de ces polymères a été testée en utilisant de l'eau claire. Les résultats obtenus (fig IV- 13,18,21 et 22) prouvent d'une part l'efficacité des polymères utilisés et d'autre part la qualification de l'installation utilisée pour déceler une éventuelle réduction de perte de charge.

Pour les différentes concentrations de polymère utilisés dans les mixtures vase-eau et l'eau seule, nous avons représenté la perte de charge en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement (figures IV-9 à 22).

IV.3.2.1 INFLUENCE DES POLYMERES SUR L'ÉCOULEMENT DE L'EAU CLAIRE :

L'évolution du gradient de perte de charge en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement des différentes solutions diluées de polymères, représentée par les figures IV-13,18,21 et 22, montre que pour les faibles vitesses d'écoulement la perte de charge des solutions de polymères diluées est identique à celle de l'eau claire, et montre aussi que l'effet de réduction n'apparaît qu'à partir d'une certaine concentration de polymère et vitesse moyenne d'écoulement données. Ces deux paramètres dépendent de l'efficacité du polymère et du diamètre de la conduite utilisées. Pour la CMC la concentration seuil trouvée est de 500 ppmp et la vitesse moyenne est presque égale à 2 m/s. Pour une concentration de polymère donnée, aux plus fortes vitesses d'écoulement, cette réduction augmente. L'écoulement des différentes solutions polymériques dans les deux conduites utilisées a montré que le gradient de perte de charge obtenu dépend du polymère, de sa concentration et du diamètre de la conduite. Les résultats trouvés sont en bon accord avec ceux trouvés par d'autres auteurs [13,40,44].

IV.3.2.2 INFLUENCE DES POLYMERES SUR LES MIXTURES DE VASE :

a) INFLUENCE DE LA CMC TECHNIQUE :

Nous avons trouvé que la concentration seuil pour que l'effet de réduction apparait dans le cas de l'eau pure avec de la CMC est de 500 ppmp.

Quand aux mixtures polymériques, les figures IV-9 à 12 représentent les résultats obtenus pour différentes concentrations de CMC dans les mixtures vase-eau.

Pour la concentration de vase $C_v = 10\%$, l'effet de réduction de la perte de charge observé est négligeable pour les concentrations de CMC utilisées dans le cas de la conduite de diamètre 36 mm (figure IV-12). Une augmentation de la perte de charge est observée dans le cas de la conduite de 53 mm (fig IV-5). Les phénomènes observés dans le cas de cette mixture sont du principalement à l'importante et rapide dégradation mécanique qu'a subi le polymère pendant son écoulement provoquée par :

-Les forces de cisaillement importantes auxquelles sont soumises les mixtures polymériques majorées par la présence des particules solides.

-La pompe centrifuge qui a une grande influence sur la dégradation des polymères.

-La longueur de la conduite qui est importante dans notre cas ce paramètre détermine le mode d'injection de polymère à choisir.

Ce phénomène de dégradation mécanique est dû essentiellement à une rupture de la chaîne macromoléculaire, qui se traduit par une augmentation de la viscosité moléculaire. De même il se pourrait que le phénomène d'enchevêtrement des molécules en est la cause. En effet les travaux de P.GRAMAIN & P.PHILLIPIDES [73], montrent que l'enchevêtrement des molécules réduit considérablement l'efficacité des polymères réducteurs de frottement. Cet inefficacité des polymères dégradables se traduit par une augmentation de la perte de charge.

Par contre, l'addition de 2000 ppmp de CMC dans une mixture de concentration de vase 2.3% dans la conduite de 36 mm de diamètre, a permis d'obtenir une réduction de la perte de charge (figure IV-10). Ce phénomène est dû probablement à la diminution de la concentration en particules solides ce qui a pour effet de provoquer une réduction de la dégradation mécanique causé par les particules solides et par conséquent il diminue le phénomène d'enchevêtrement des molécules. L'absence du phénomène de réduction dans la conduite de diamètre 53 mm peut être attribué à l'effet de diamètre.

b) INFLUENCE DE LA POLYETHYLENE OXYDE (POLYOX) :

Dans le cas du polyox, nous avons choisi les faibles concentrations 30, 50, 60 et 100 ppmp, car dans certaines installations [47,48] une concentration de 0.125 ppmp de polyox a suffit pour avoir un effet de réduction de la perte de charge qui devient maximum aux environs de 25 ppmp.

Les concentrations utilisées de polyox ne donnent aucun effet de réduction dans les mixtures étudiées (10% et 2.3%) (figures IV-14 et 15). Mais un effet inverse est observé pour ces mixtures

polymériques, ce qu'il faut souligner, c'est que cette mixture est la même qui a été utilisée pour la CMC, ce qui permet de donner une hypothèse sur l'augmentation de la perte de charge est que l'addition en grandes quantités de polymères dégradés a pu augmenter la viscosité du milieu provoquant ainsi une augmentation de la perte de charge.

L'absence de l'effet de réduction pour les mixtures étudiées en ajoutant du polyox est due au fait que le polyox est plus dégradé que la CMC. En effet BRIECHE [20], montre que plus le poids moléculaire est grand, plus la dégradation est rapide. D'autre part, il y a le phénomène d'enchevêtrement des molécules. D'après O.SCRIVENER [27], pour le polyox il y a 6×10^{22} molécules pour une mole de polymère, soit 1.2×10^{16} molécules par gramme de polymère. Pour une partie par million il y aura donc environ de 1.2×10^{10} molécules pour 1 cm^3 de solution. Chaque molécule occupera un volume maximum de $(3 \times 10^3)^3 \text{ \AA}^3$ soit encore $3 \times 10^{-14} \text{ cm}^3$. On pourra considérer que les molécules se toucheront lorsque leur nombre dépassera $1/3 \times 10^{14}$ par cm^3 , soit 3×10^{13} molécules par cm^3 . Il y aura donc un début d'enchevêtrement des molécules si la concentration atteint une valeur d'environ 2000 à 2500 ppm. quoique les concentrations de polyox utilisées sont loin de provoquer l'enchevêtrement, il est possible que les particules solides favorisent l'enchevêtrement sans oublier que cette mixture est celle utilisée pour la CMC dans le cas de $C_v = 10 \%$

c) INFLUENCE DES POLYACRYLAMIDES (SEPARAN) :

Nous avons étudié l'effet de AP-302 dans une mixture de concentration volumique égale à 2.2%, l'effet de réduction de la perte de charge obtenu dans les deux conduites est négligeable (fig IV-19 et 20). les raisons de l'absence de l'effet de réduction sont les mêmes que celles données ci-dessus pour la CMC et le Polyox.

IV.4 INFLUENCE DES MATERIAUX UTILISES SUR LE COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE UNITAIRE λ :

Sur les figures IV-23 à 27, le coefficient de perte de charge λ_m des mixtures est calculé à partir de la relation de DARCY-WEISBACH en utilisant la masse volumique du mélange.

$$\Delta P_m = \lambda_m \rho_m \frac{L}{D} \frac{U_m^2}{2} \quad (IV-9)$$

La viscosité étant un facteur important dans le cas d'écoulement homogène et pseudo-homogène. Lorsque le comportement est newtonien le nombre de Reynolds Re_m est calculé en utilisant la viscosité du mélange calculé à l'aide du viscosimètre Engler.

$$Re_m = \frac{U_m D}{\nu_m} \quad (IV-10)$$

Pour les autres mixtures dont le comportement est non newtonien (Bingham), on utilise le nombre de Reynolds généralisé Re_m^* défini par:

$$Re_m^* = \frac{\rho_m U_m D}{\mu_p + \frac{\tau_0 D}{8 U_m}} \quad (IV-11)$$

Pour chaque matériaux utilisé nous avons représenté le coefficient de perte de charge unitaire en fonction du nombre de Reynolds généralisé, celui-ci se réduit à Re_m pour le cas des mixtures et solutions dont le comportement rhéologique est Newtonien.

La figure IV-23, montre que les courbes représentatives de λ en fonction de Re_m^* pour les mixtures vases-eau sont situées au dessous de celle de l'eau claire. En effet l'addition d'une certaine concentration de vase dans de l'eau réduit le coefficient de perte de charge unitaire λ , ceci s'explique par le fait que lorsqu'on ajoute de la vase dans l'eau les forces de viscosité augmentent ce qui entraîne l'augmentation de la dissipation visqueuse et amortit les forces de turbulences. Donc il y aura modification de l'écoulement.

En ajoutant les différents polymères PEO et de la CMC dans les mixtures de vase le coefficient de perte de charge unitaire est légèrement réduit dans le cas de la conduite de diamètre 36 mm. Pour la deuxième conduite il est supérieur à celui de l'eau comme le montre les figures IV-24 à 27. Par contre pour le cas de la CMC dans la conduite $D_1 = 36$ mm, on trouve une réduction du coefficient de perte de charge (figure IV-25). De ce qui précède on en déduit pour ce dernier cas qu'il y a influence de la CMC sur l'écoulement, qui a pour effet de provoquer une réduction supplémentaire de la dissipation turbulente.

Dans le cas des solutions de polymère dilué, le coefficient de perte de charge unitaire λ_p de la solution est calculé à partir de la relation de DARCY-WEISBACH en utilisant la masse volumique de l'eau. En effet certains auteurs [27,51] utilisent dans le calcul du coefficient de perte de charge et du nombre de Reynolds des solutions de polymère dilué respectivement la masse volumique et la viscosité liées au solvant.

$$\Delta P_p = \lambda_p \rho_v \frac{L}{2} \frac{U_m^2}{D} \quad \text{et} \quad Re = \frac{U_p D}{\nu} \quad (\text{IV-12})$$

Les figures IV-28 à 32, représentent les résultats obtenus avec les différentes solutions de polymères dilués étudiées. Nous remarquons que toutes les courbes polymériques sont situées entre la courbe de l'eau claire et celle de Virk représentant le maximum de réduction de frottement définie par l'équation II-44b qui est indépendante de la nature du polymère et des caractéristiques de la solution ainsi que du diamètre de la conduite. Ces courbes polymériques ont tendance à joindre celle de l'eau pour les grandes vitesses avec le temps, du fait de la dégradation des solutions polymériques.

Les paramètres, déjà cités, dont dépend la réduction de frottement figurent dans la fonction de SELLIN [74].

$$\lambda_p = \lambda_p (Re, D/\sqrt{\epsilon}, C_p, P, \epsilon/D). \quad (\text{IV-13})$$

où Re est le nombre de Reynolds, ϵ/D la rugosité relative de la conduite, C_p la concentration du polymère, d'un paramètre

additionnel $D/\sqrt{t\nu}$ (où D est le diamètre de la conduite, ν la viscosité de la solution et t le temps de relaxation du polymère) et P est un paramètre qui définit l'état du polymère dans la solution à savoir la distribution du poids dans la solution et le degré de dissolution.

IV.5 ALLURES ET VALEURS DU DEGRE DE REDUCTION DE LA PERTE DE CHARGE

La mesure de la perte de charge ΔH nous permet de déterminer la valeur de la vitesse de frottement U^* , qui est calculée par la relation:

$$U^* = U_m \sqrt{\lambda/8} \quad (IV-14)$$

déduite de sa définition : $U^* = \sqrt{\tau/\rho}$
cette relation reste valable pour les solutions de polymère.

Le taux de réduction de frottement peut être calculé à partir de la valeur de la perte de pression par la relation:

$$DR (\%) = \frac{\Delta P_o - \Delta P_p}{\Delta P_o} \times 100 \quad (IV-15)$$

ΔP_o la perte de pression pour l'eau seule

ΔP_p la perte de pression de la solution ou la mixture polymérique.

La représentation du degré de réduction de la perte de charge en fonction de la vitesse de frottement donnée par les figures IV-33 à 35 pour les différents polymères utilisés dans les deux conduites, permet de remarquer que la réduction de la perte de charge pour un polymère donné dépend à la fois de la concentration du polymère et du diamètre de la conduite utilisée et de la vitesse de frottement U^* auquel est soumis le fluide en écoulement.

Cette réduction dépend aussi de l'efficacité du polymère utilisé, et de certains facteurs intrinsèques de la solution macromoléculaire qui sont au nombre de quatre d'après SCRIVENER [75]:

-Le volume hydrodynamique des macromolécules; c'est à dire le volume occupé par la macromolécule gonflée de solvant.

- La présence d'agrégats ou de molécules enchevêtrées.
- La déformabilité des macromolécules.
- Leur dégradabilité dans l'écoulement.

La fig IV-35, montre que pour la conduite de diamètre 53 mm, la réduction de frottement dans le cas du Separan AP-45 dans l'eau claire n'est que de 42.17 % , alors que pour la conduite de diamètre égal à 36 mm, elle est de 50.37 % pour la même vitesse moyenne d'écoulement. D'autre part, aucune réduction de frottement n'apparaît pour la conduite D2 avant d'avoir atteint des nombres de Reynolds de l'ordre de 60 000, bien supérieurs aux seuils mis en évidence dans la conduite D1. Ce type de comportement est directement lié à l'existence d'une vitesse de frottement critique U^* , en deçà de laquelle les macromolécules ne sont pas efficaces.

D'autre part, l'influence du nombre de Reynolds sur le degré de réduction représentée par la figure (IV-33) pour la mixture $C_v=2.3\%$ et $C_p = 2000$ ppmp de CMC, montre qu'il existe un optimum au delà duquel il y a diminution du taux de réduction.

En comparant les différentes figures représentant le degré de réduction des polymères dans les deux conduites on peut confirmer que l'efficacité des solutions de polymères diminue quand le diamètre de la conduite augmente.

IV.6 EFFET DU DIAMETRE DE LA CONDUITE SUR LA PERTE DE CHARGE:

La représentation des différentes courbes de la perte de charge dans les deux conduites dans un même système d'axe montre l'effet du diamètre de la conduite sur la perte de charge, il peut être expliqué par la relation de DARCY-WEISBACH:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{U_m^2}{2} \quad (IV-16)$$

En effet la perte de charge d'un fluide donné est inversement proportionnelle au diamètre de la conduite, comme le montre la relation IV-14.

Les figures IV-36 et 37, montrent que le diamètre de la conduite a une grande influence sur le taux de réduction de la perte de charge pour le cas des solutions et mixtures polymériques. En effet HOYT [76] et WHITE [77], montrent à partir

de la loi du profil de vitesse que le degré de réduction du coefficient de perte de charge est inversement proportionnel au diamètre de la conduite. L'addition de polymère en régime turbulent occasionne un déplacement du profil de vitesse d'une quantité égale à ΔB , qui est fonction de la vitesse de frottement U_* et d'une longueur caractéristique du polymère l .

$$\Delta B = f (U_*^* l / \nu) \quad (IV-17)$$

Maintenant:
$$\frac{U_*^* l}{\nu} = U \sqrt{\lambda/8} l/\nu = Re \sqrt{\lambda} l \left[\sqrt{8} D \right]^{-1}$$

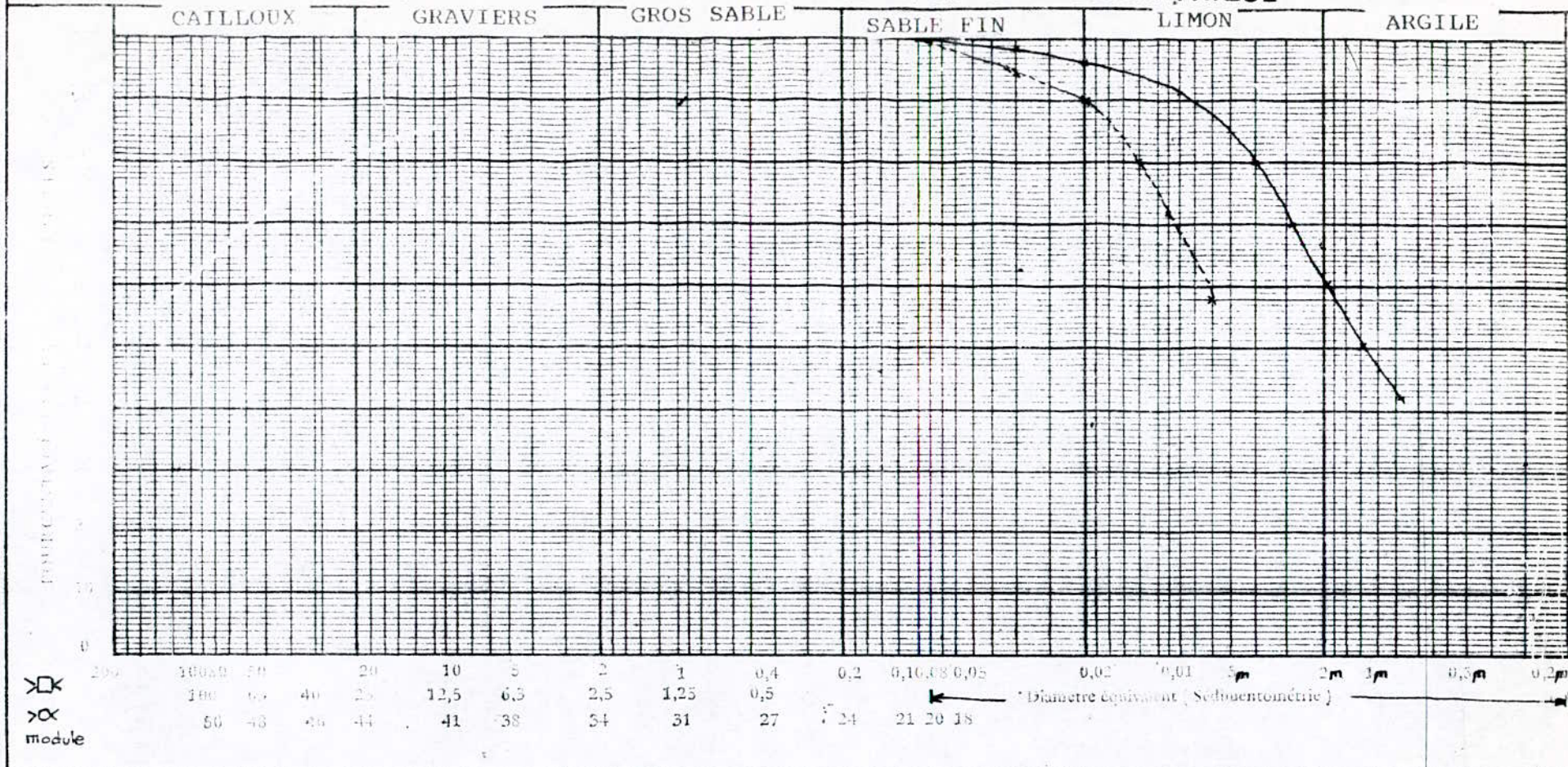
Pour un même polymère et la même valeur de $(U_*^* l/\nu)$ on aura:

$$\left[Re \sqrt{\lambda} \right]_2 = \left[Re \sqrt{\lambda} \right]_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \quad (IV-18)$$

En réalité l'effet de diamètre intervient en particulier sur l'échelle des grands tourbillons dont la dimension est voisine du rayon de la conduite [27,3,4], car le phénomène de réduction se produit dans la zone pariétale, l'importance de celle-ci étant plus grande pour une conduite de faible diamètre, est plus importante et plus précoce.

En ajoutant une concentration de 2.3% de vase dans de l'eau claire, une réduction du gradient de perte de charge est obtenue, ce phénomène est observé par d'autres auteurs [54,59,60]. Dans ce type d'écoulement, les particules jouent le rôle de lubrifiant. Ce phénomène de réduction dépend aussi de la concentration en particules fines et du diamètre de la conduite.

S.6 FT S 7. ANALYSE GRANULOMETRIQUE



200	100	50	20	10	5	2	1	0,4	0,2	0,10	0,08	0,05	0,02	0,01	5µ	2µ	1µ	0,5µ	0,2µ
100	60	40	25	12,5	6,3	2,5	1,25	0,5											
50	43	26	14	41	38	54	31	27	24	21	20	18							

Ech. _____ Ech. _____ Ech. _____	M	S. 6			S. 20	
		LETTRES MATTERBERG				E. S.
		LL (%)	LP (%)	IR (%)		
		63,8	34,5	29,3		

————— ETAT DEFLOULÉ
 - - - - - ETAT FLOULÉ

FIGURE IV-1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE LA VASE ETUDIEE

$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$: viscosité apparente.

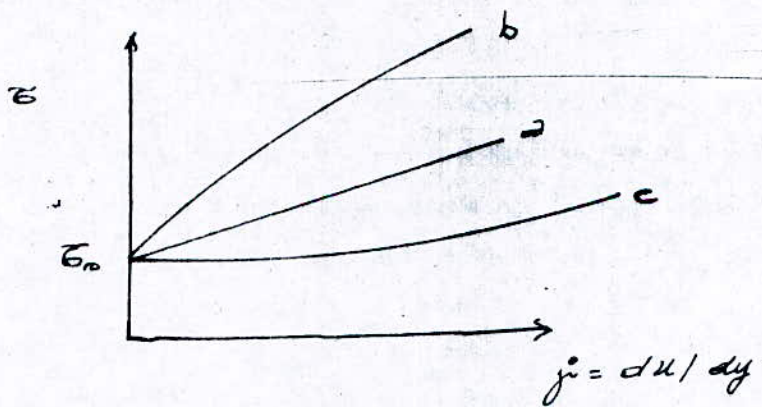
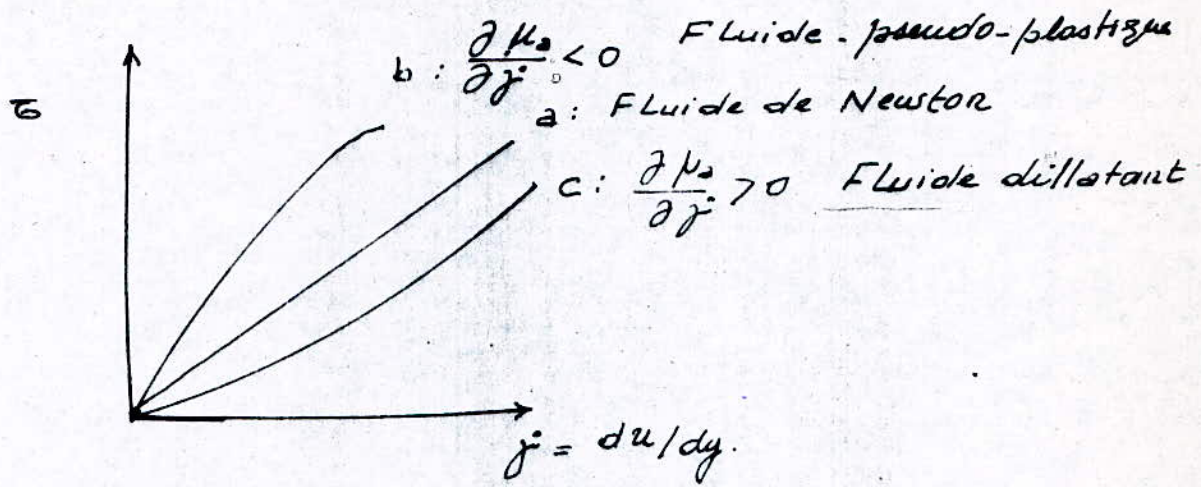


FIGURE IV-2 : Classification des fluides

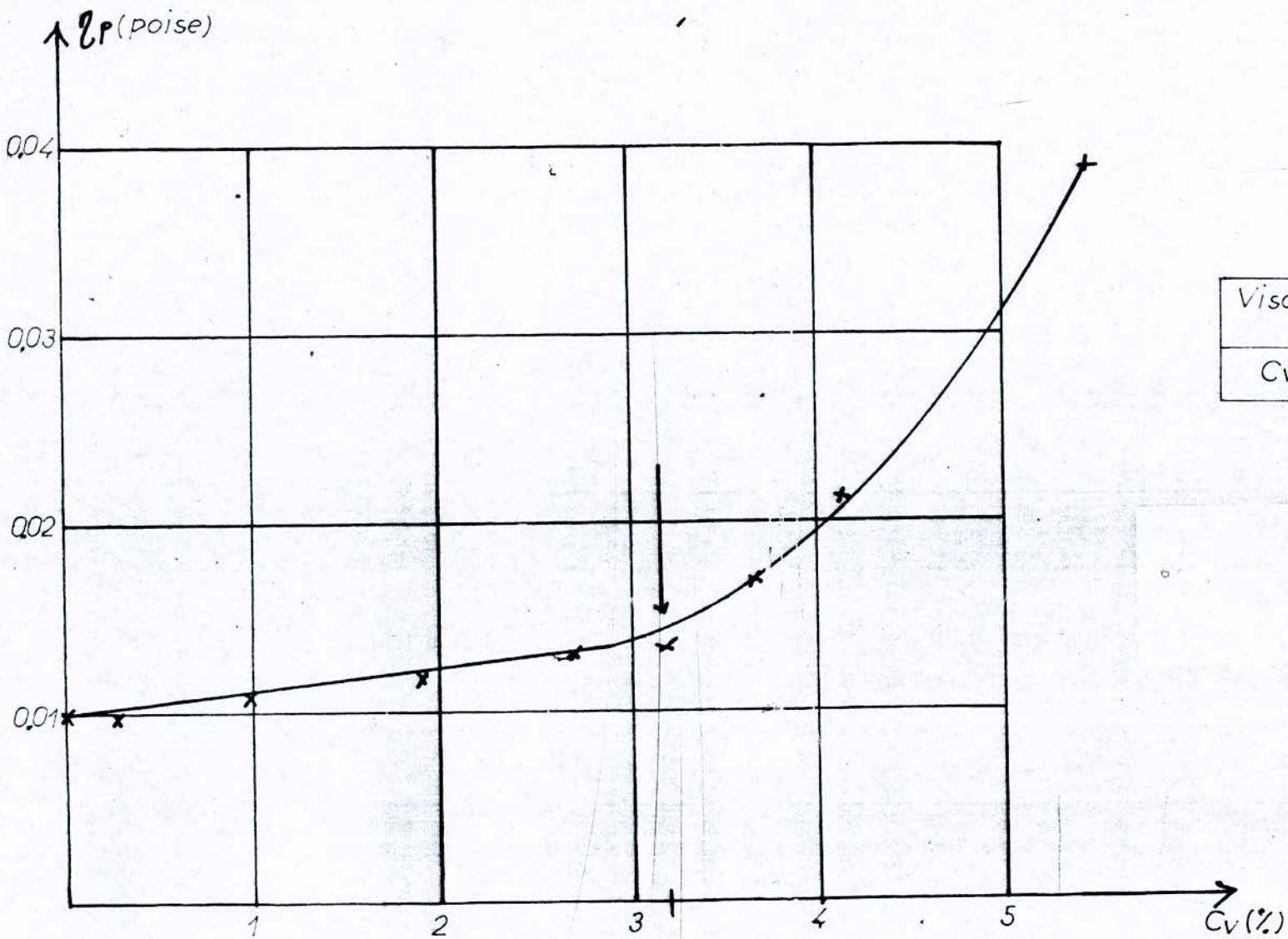


FIGURE IV-3 CONCENTRATION VOLUMIQUE LIMITE

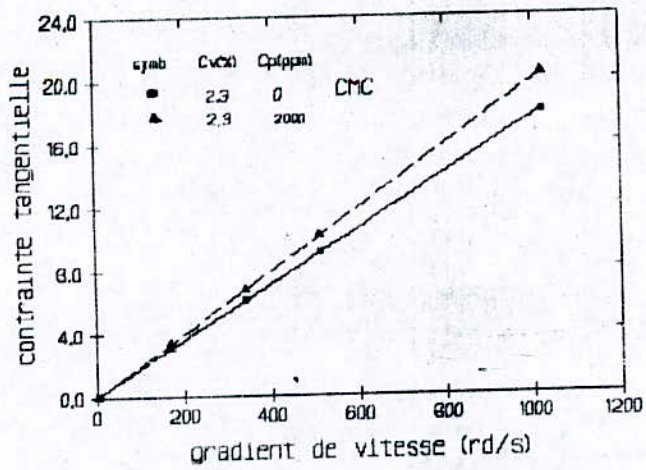
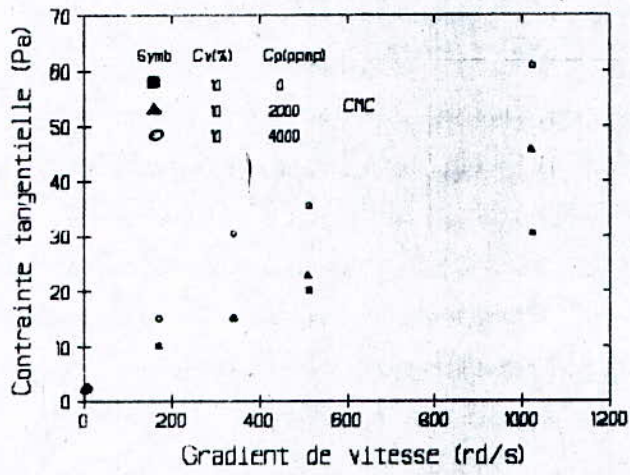
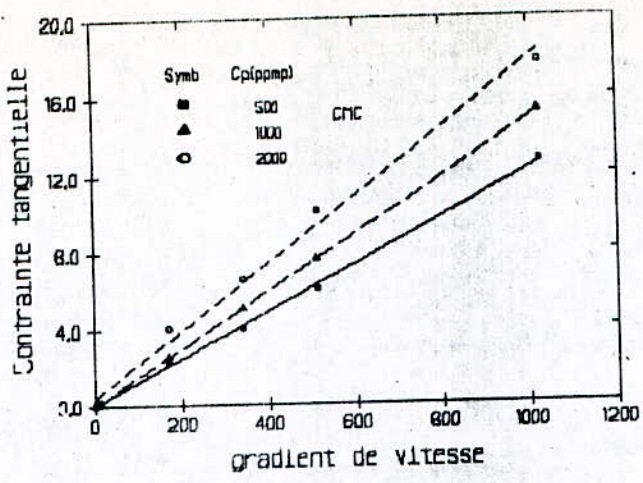


FIGURE IV-4 EFFET DE LA CMC SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES MIXTURES ETUDIEES

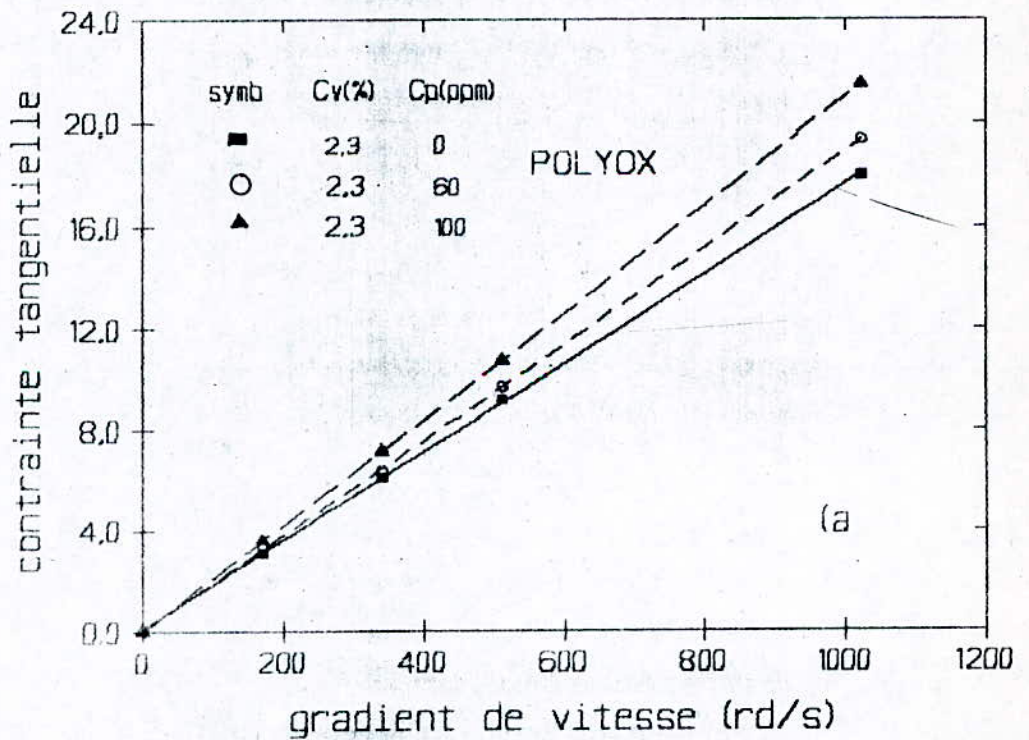
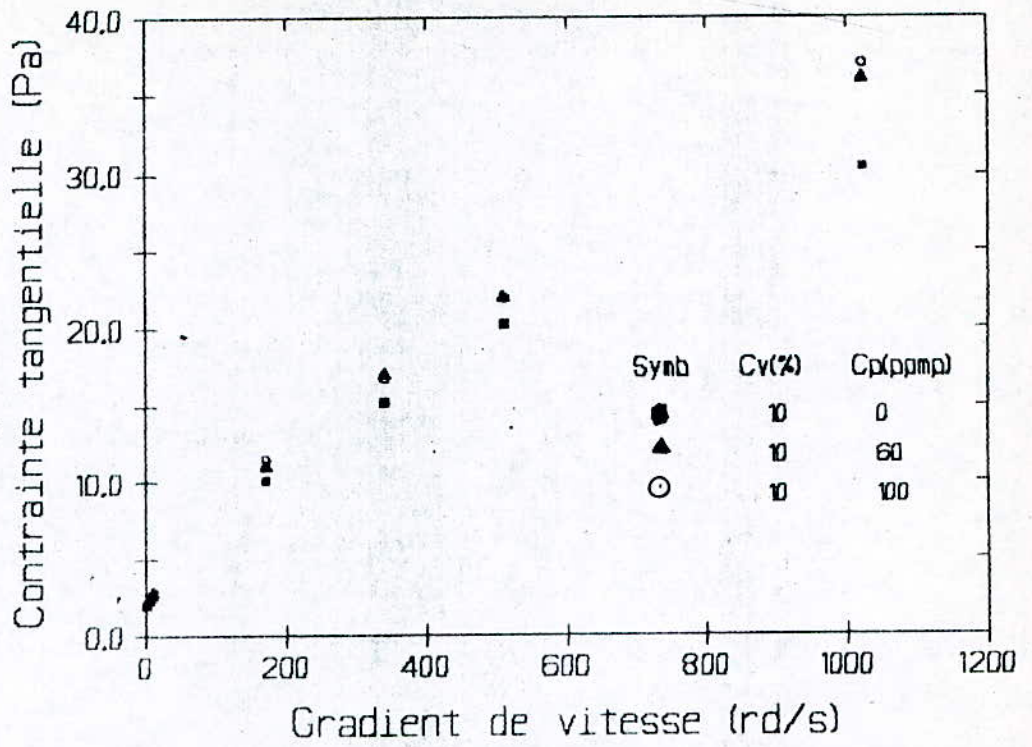


FIGURE IV-5 EFFET DU POLYOX SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES MIXTURES ETUDIEES

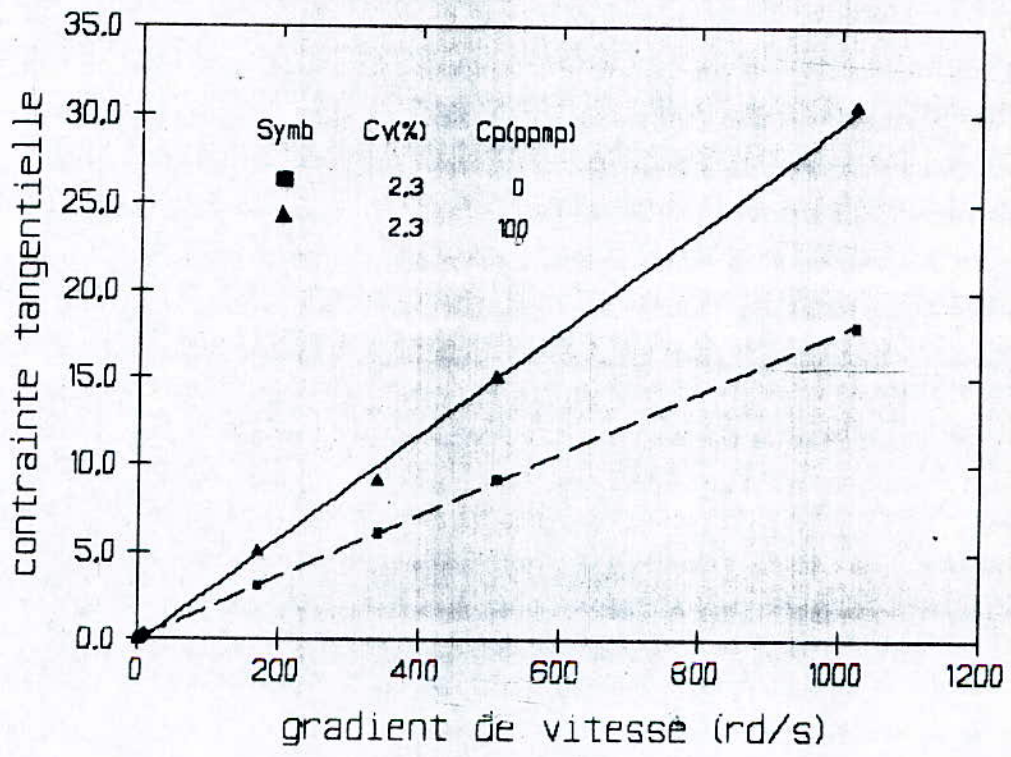


FIGURE IV-6 EFFET DU SEPARAN AP-302 SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES D LA MIXTURE ETUDIEE

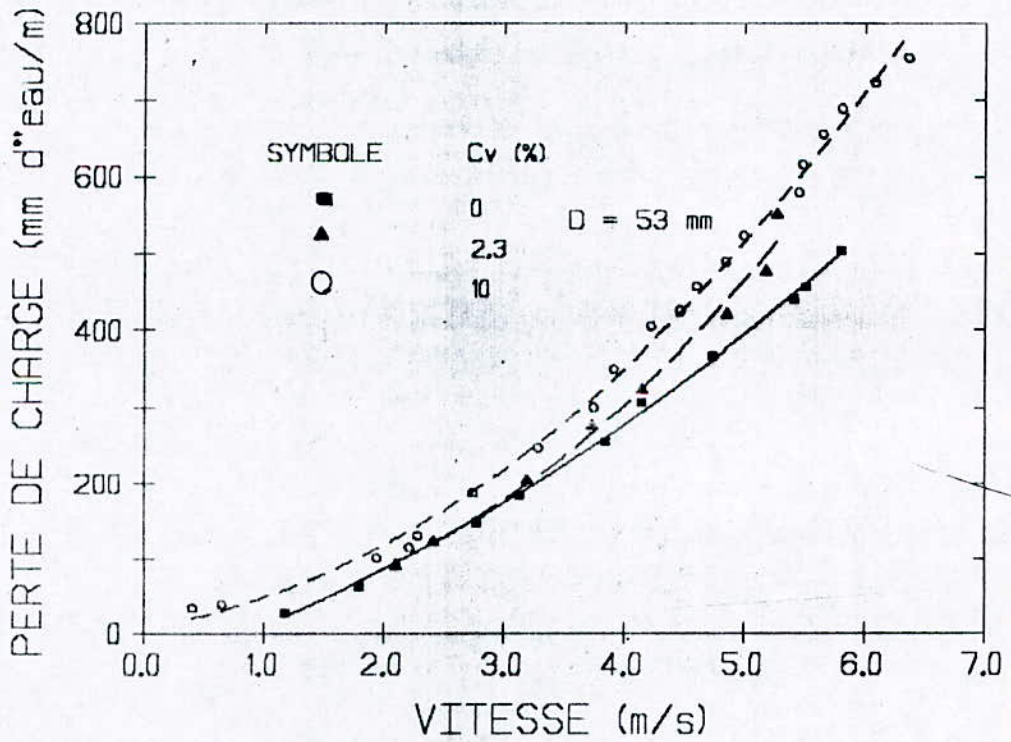
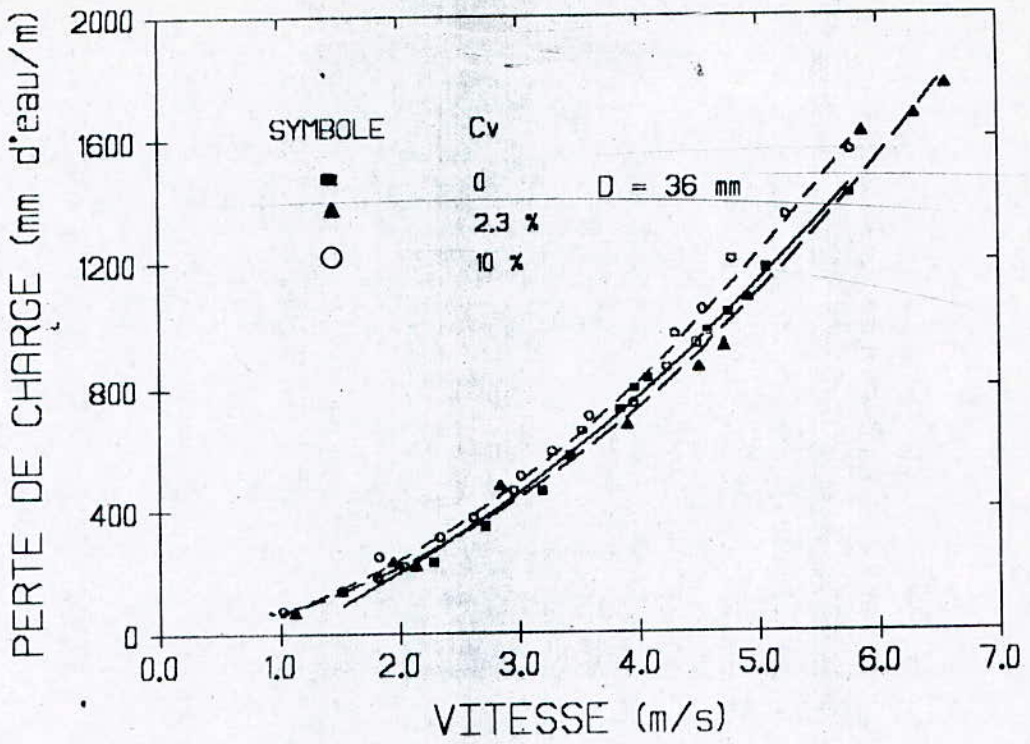


FIGURE IV-7 PERTE DE CHARGE EN HAUTEUR D'EAU EN FONCTION DE LA VITESSE MOYENNE D'ECOULEMENT POUR LES MIXTURES DE VASE

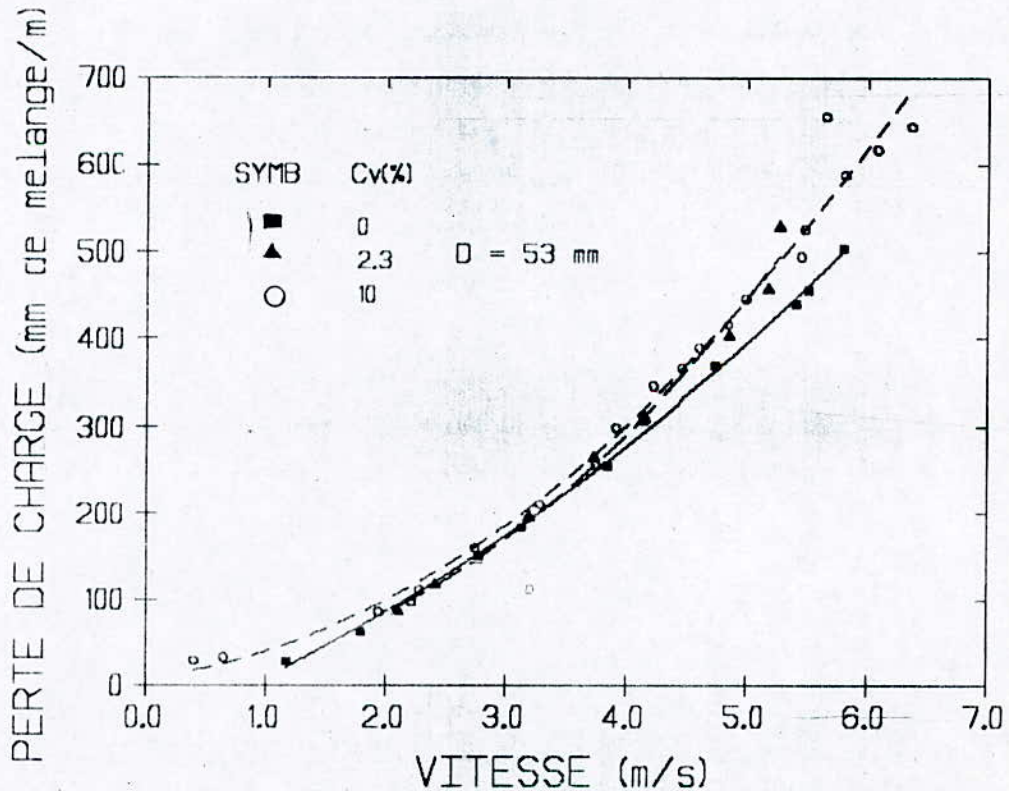
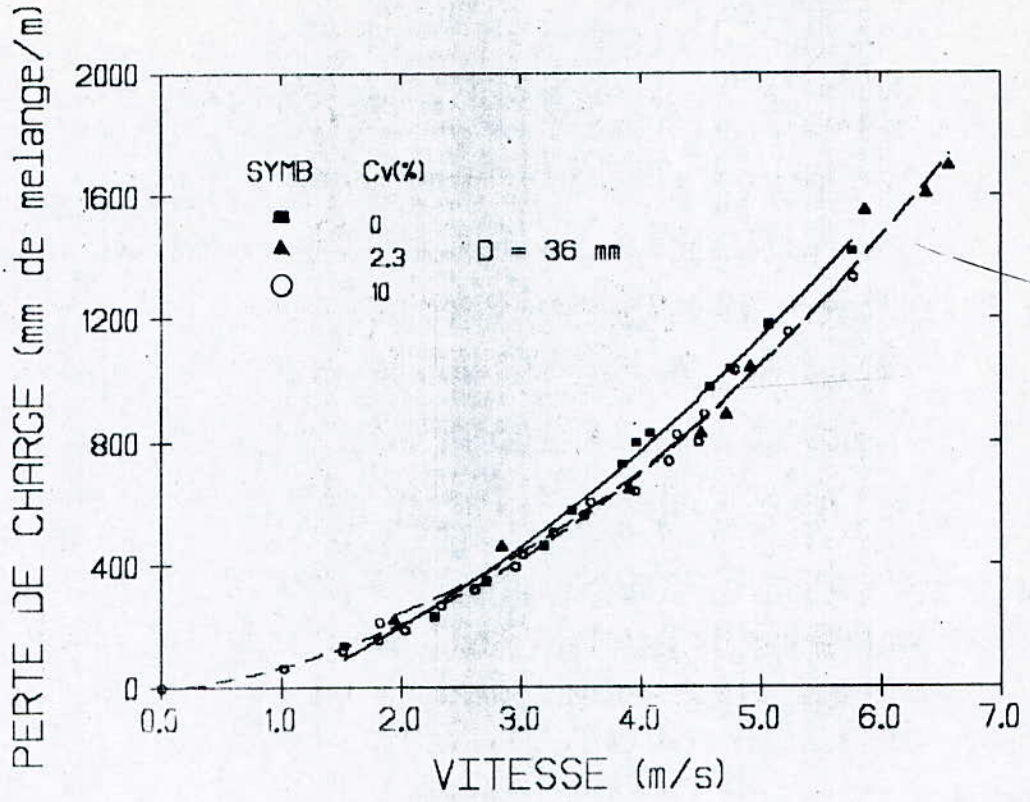


FIGURE IV-8 PERTE DE CHARGE EN HAUTEUR DE MELANGE EN FONCTION DE LA VITESSE MOYENNE D'ECOULEMENT POUR LES MIXTURES DE VASE

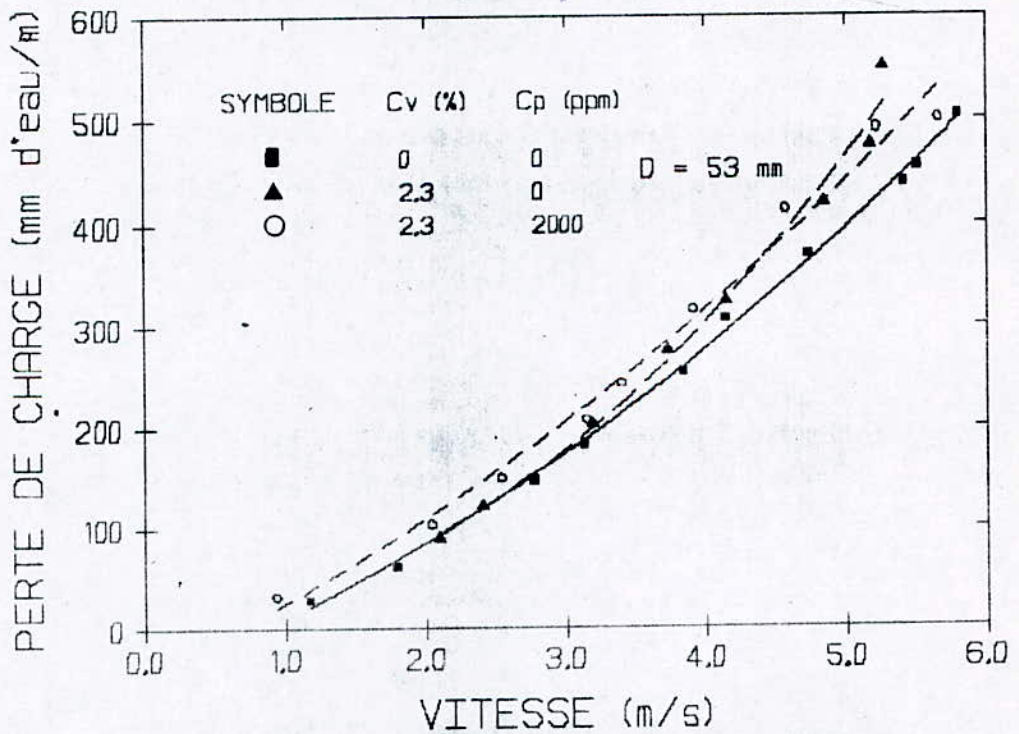
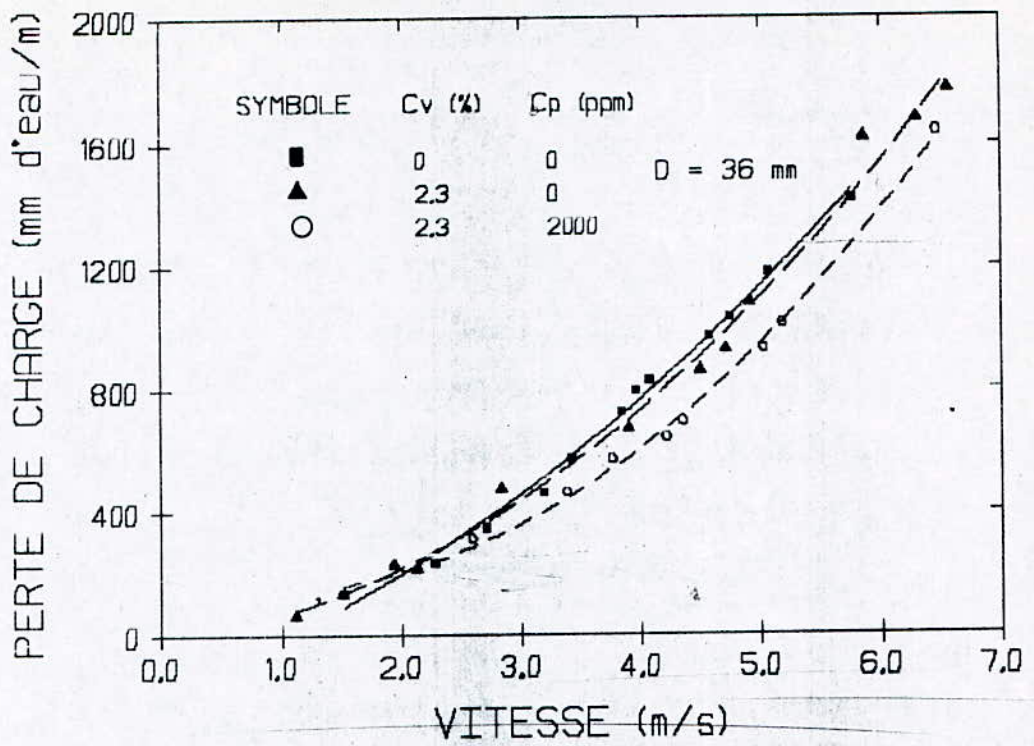


FIGURE IV-9 EFFET DE LA CMC SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DES MIXTURES DE VASE $C_v = 2.3\%$

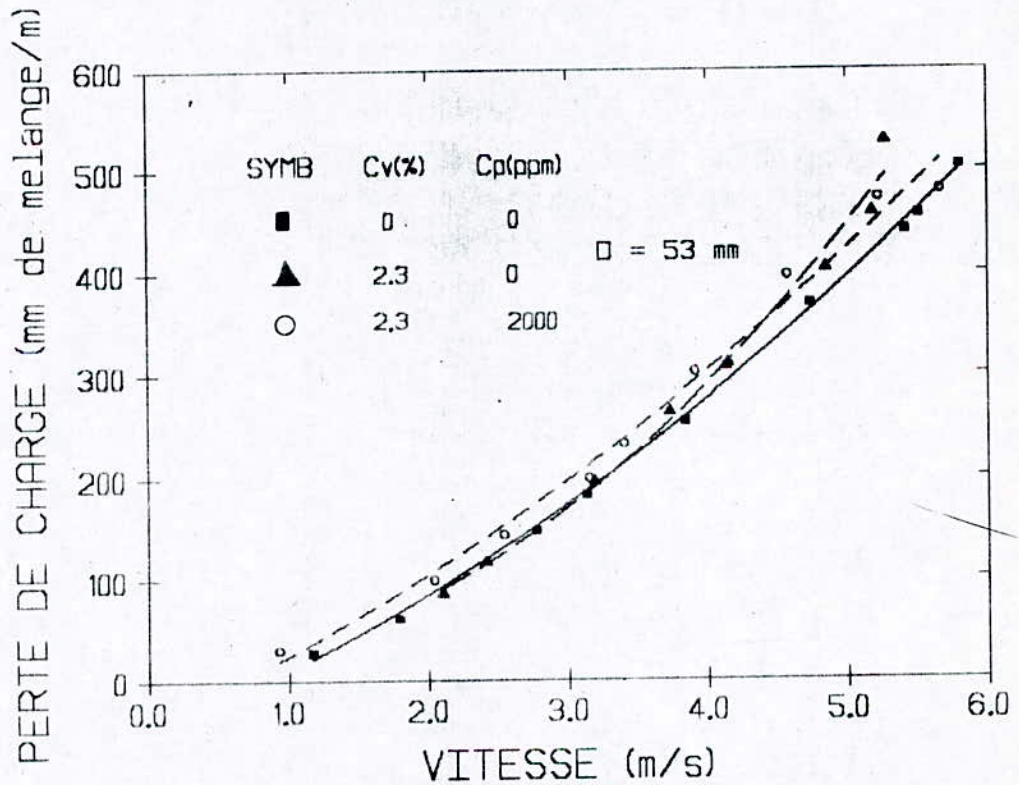
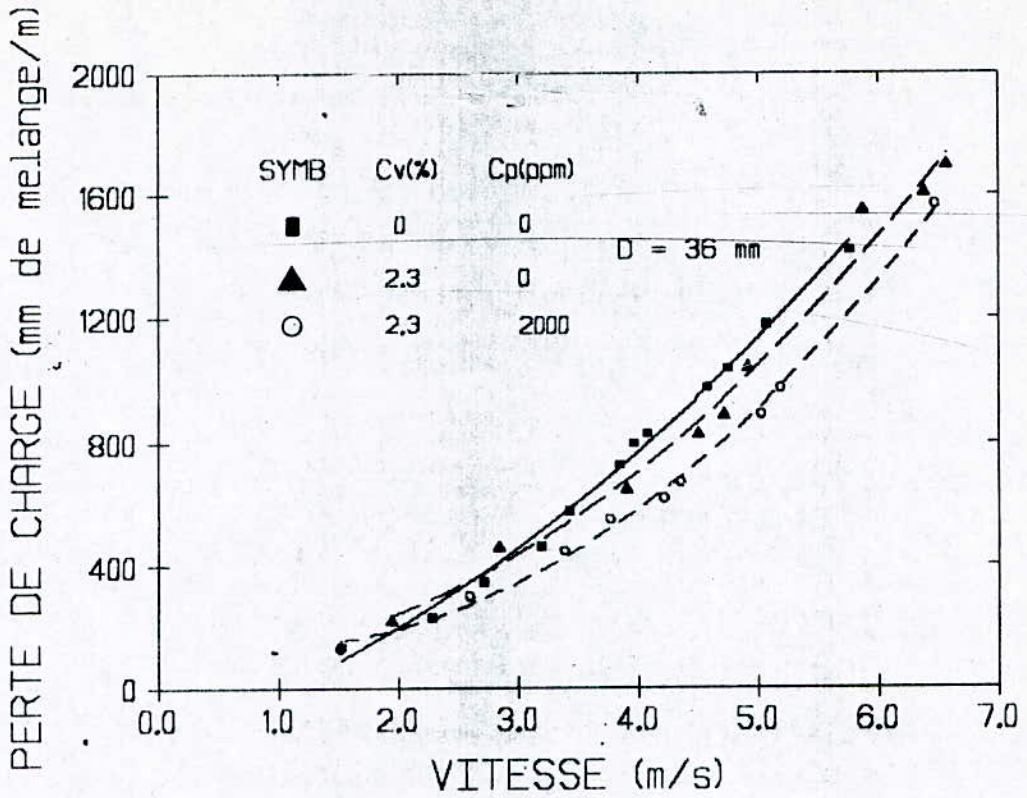
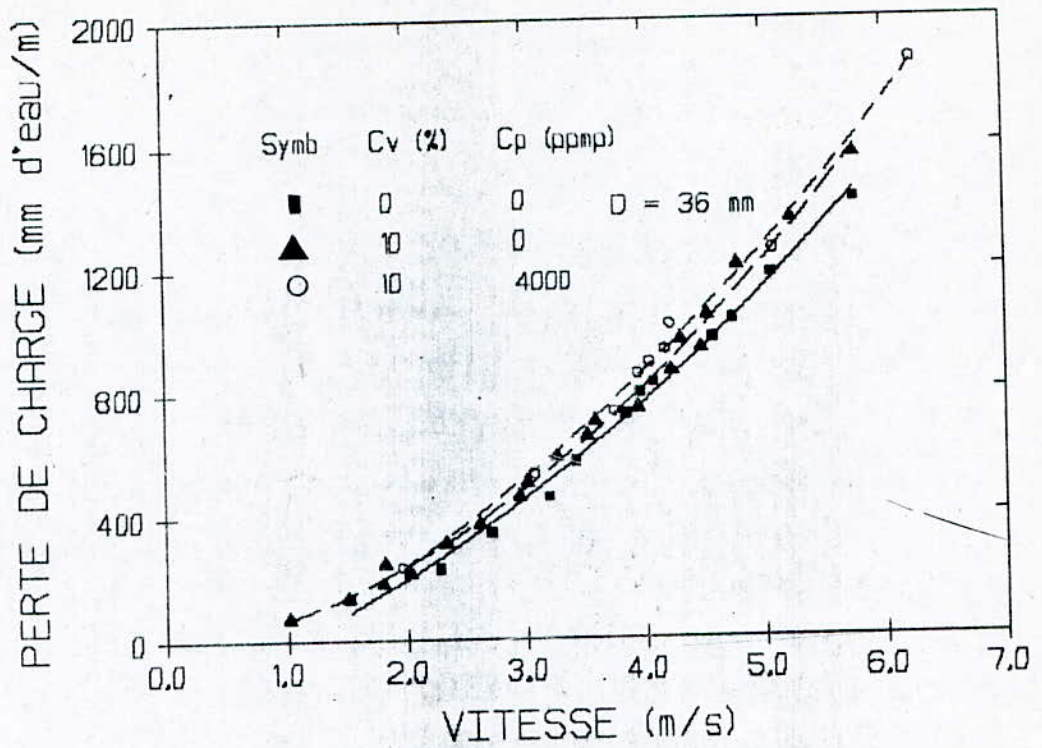


FIGURE IV-10 EFFET DE LA CMC SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR DE MELANGE) DES MIXTURES DE VASE $C_v = 2.3\%$



EFFET DE LA CMC DANS LES MIXTURES VASE-EAU DANS LA CONDUITE D2

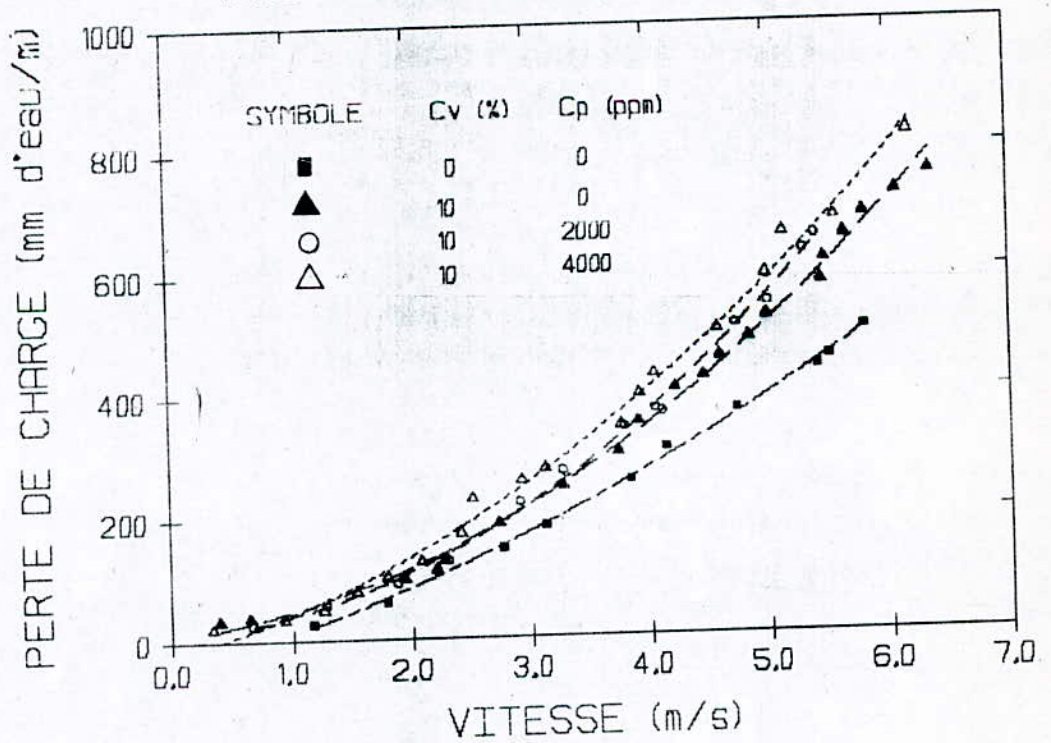


FIGURE IV-11 EFFET DE LA CMC SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DES MIXTURES DE VASE Cv = 10%

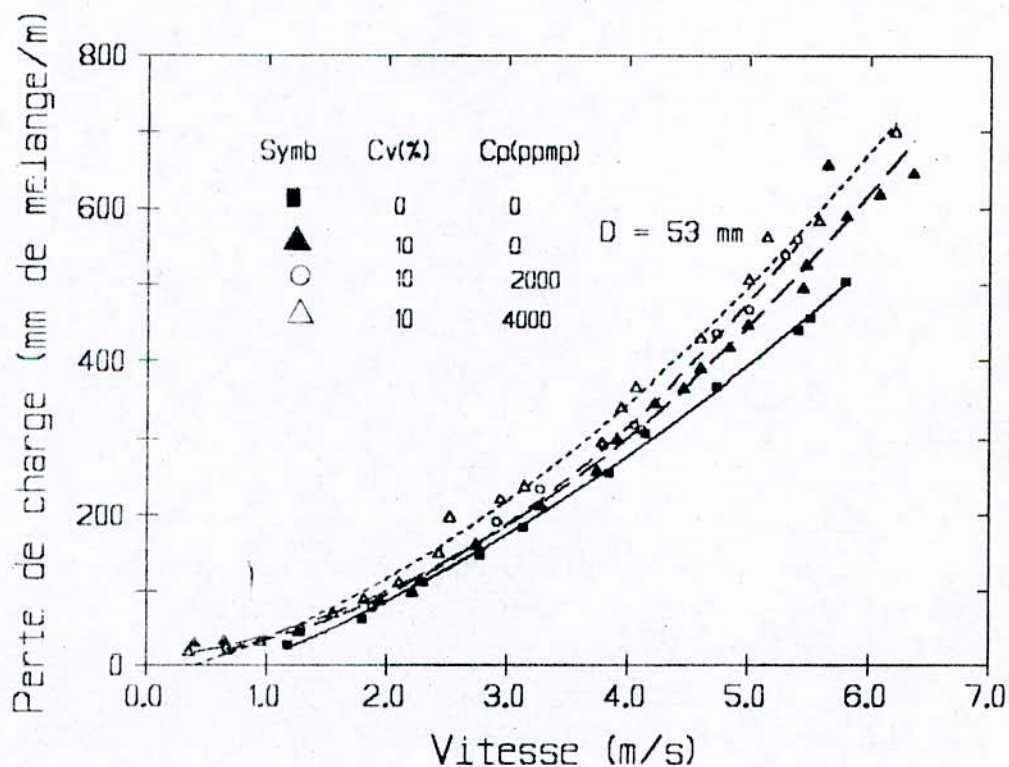
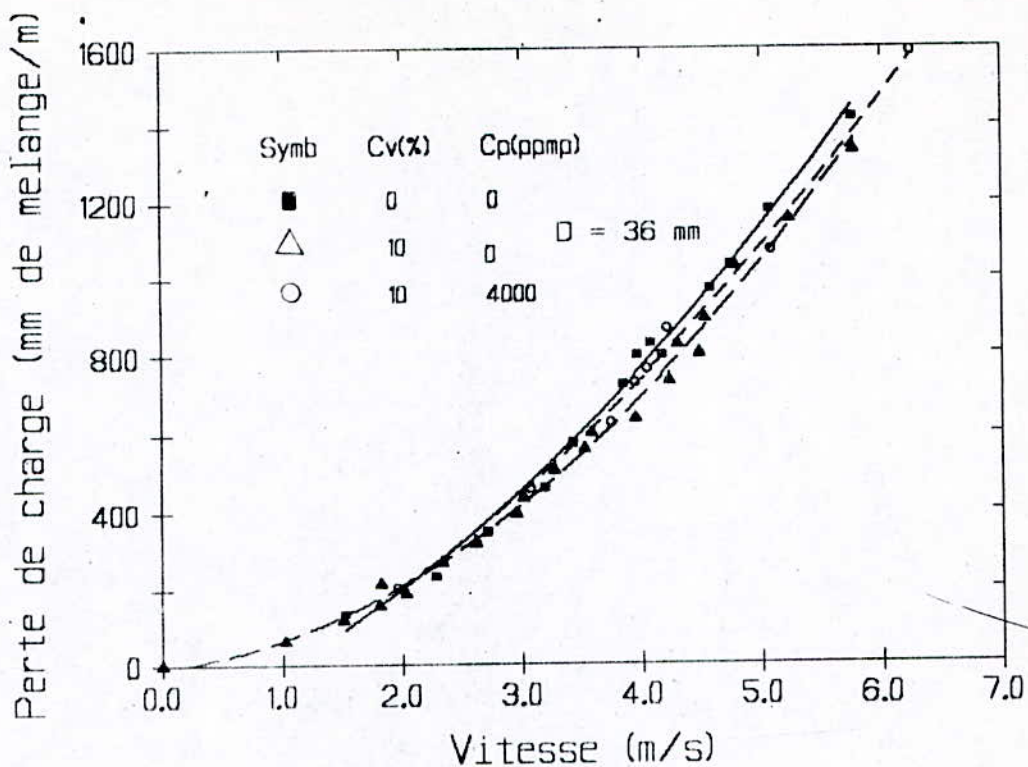


FIGURE IV-12 EFFET DE LA CMC SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR DE MELANGE) DES MIXTURES DE VASE $C_v = 10\%$

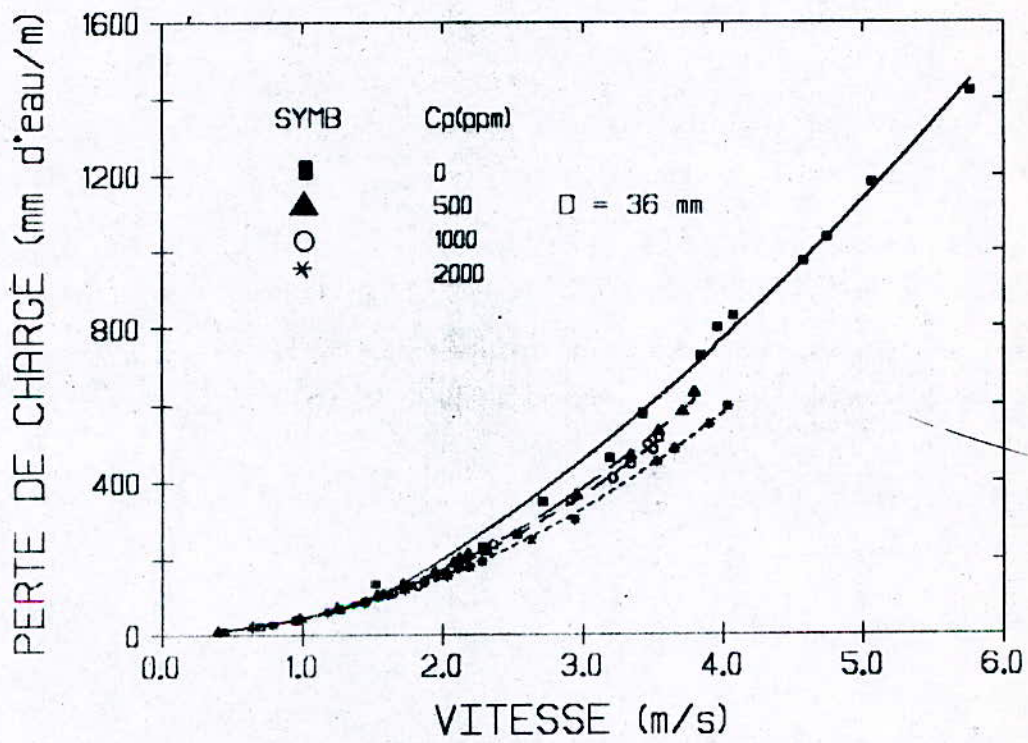


FIGURE IV-13 EFFET DE LA CMC SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DANS LE CAS DE L'EAU CLAIRE

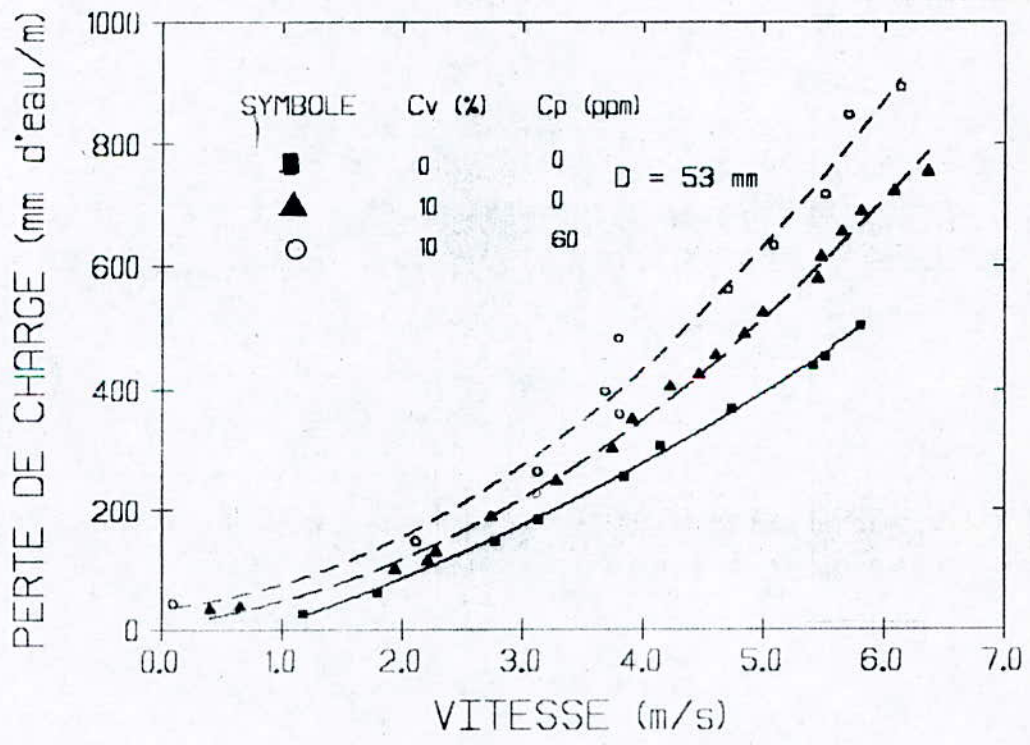
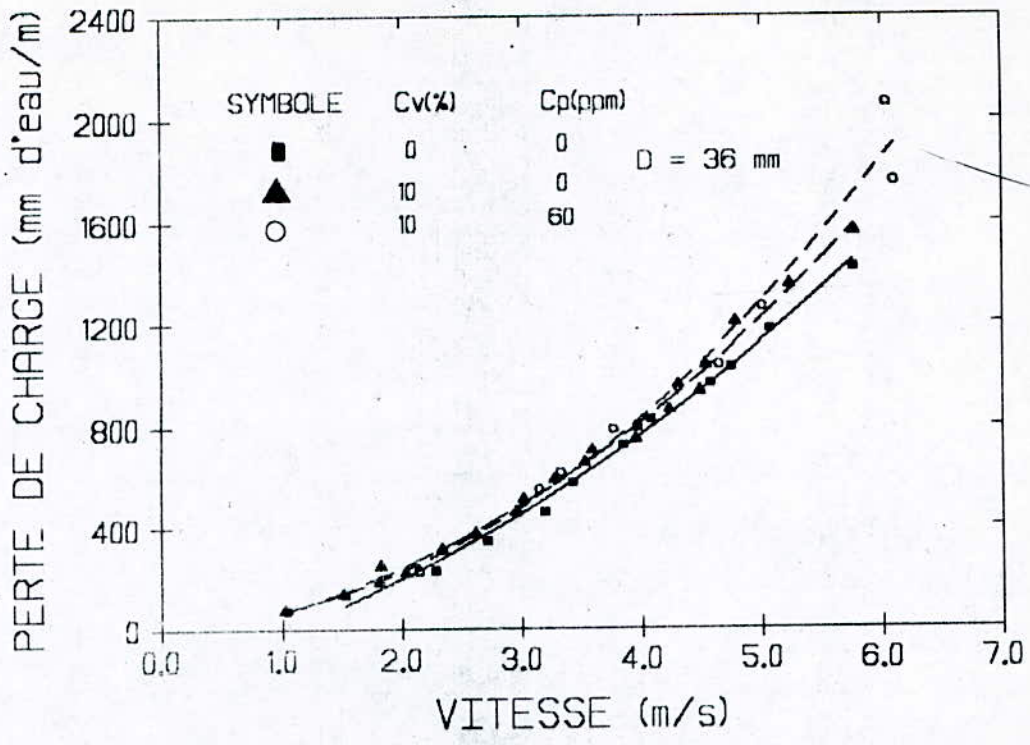


FIGURE IV-14 EFFET DU POLYOX WSR-301 SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DES MIXTURES DE VASE Cv = 10%

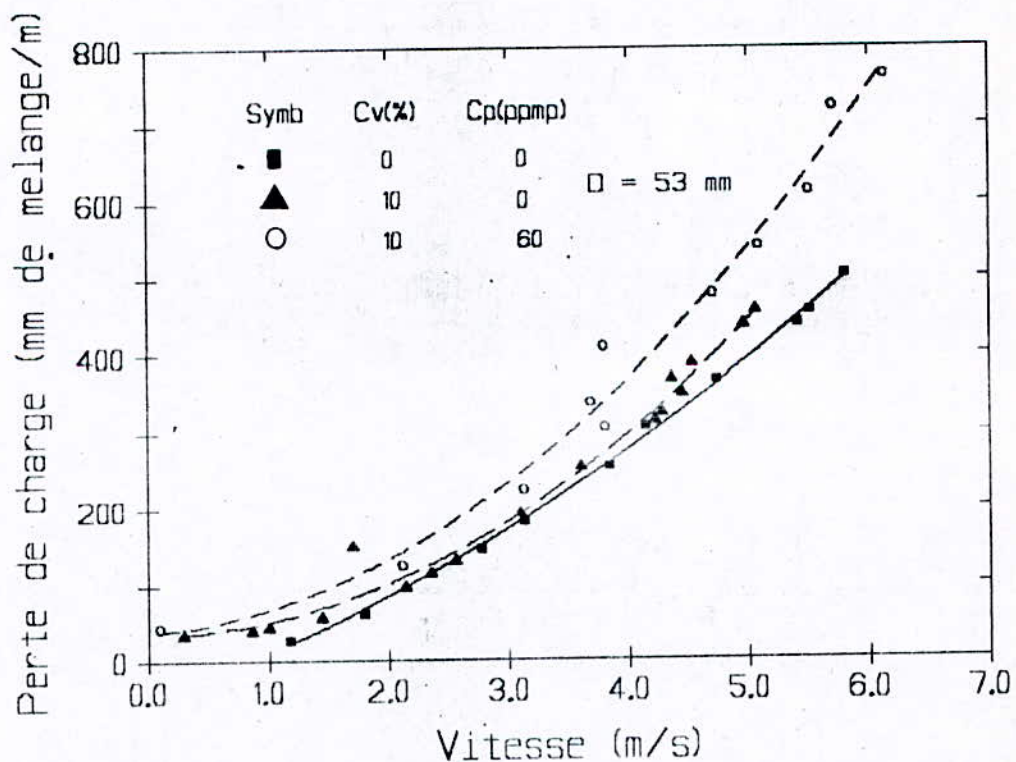
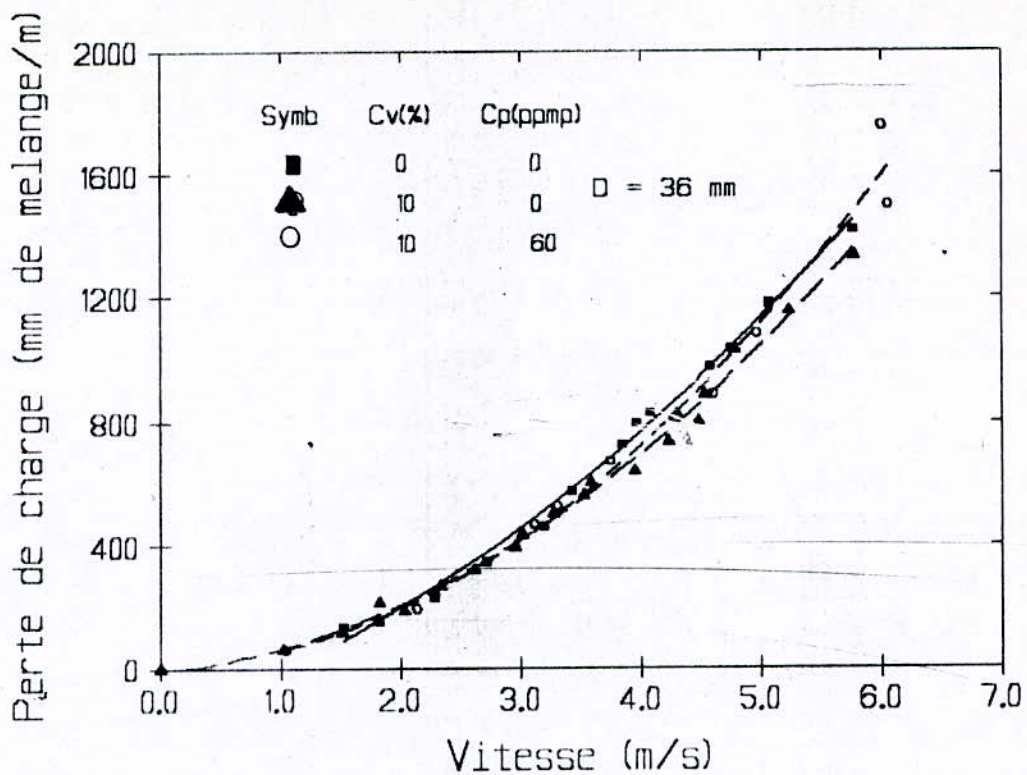


FIGURE IV-15 EFFET DU POLYOX WSR-301 SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR DE MELANGE) DES MIXTURES DE VASE $C_v = 10\%$

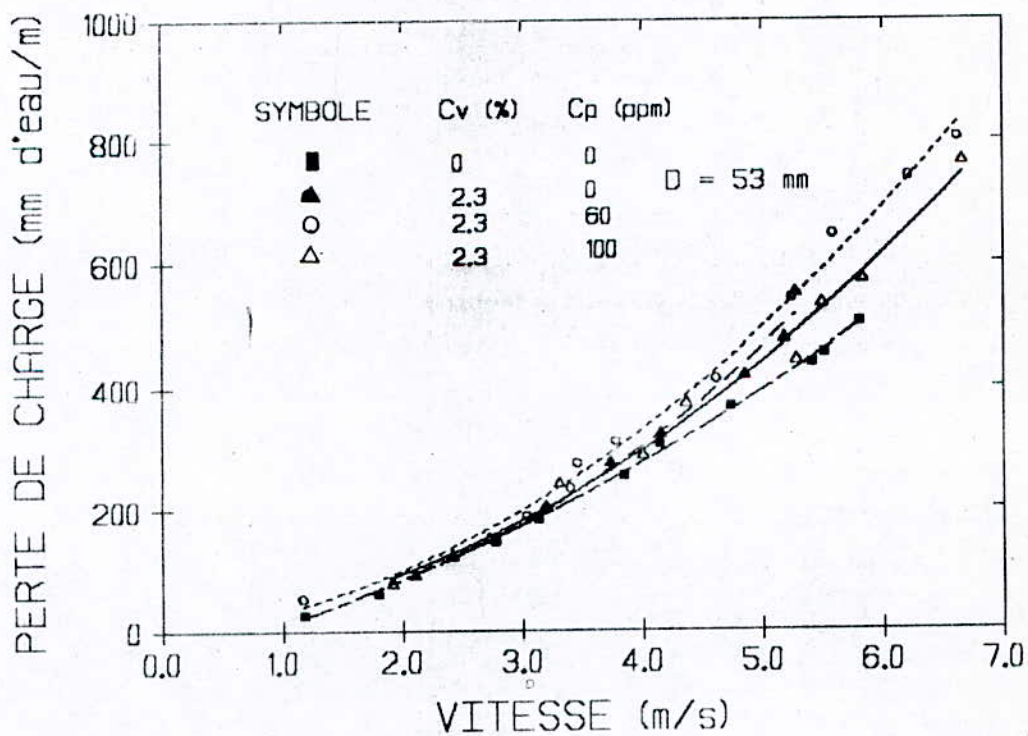
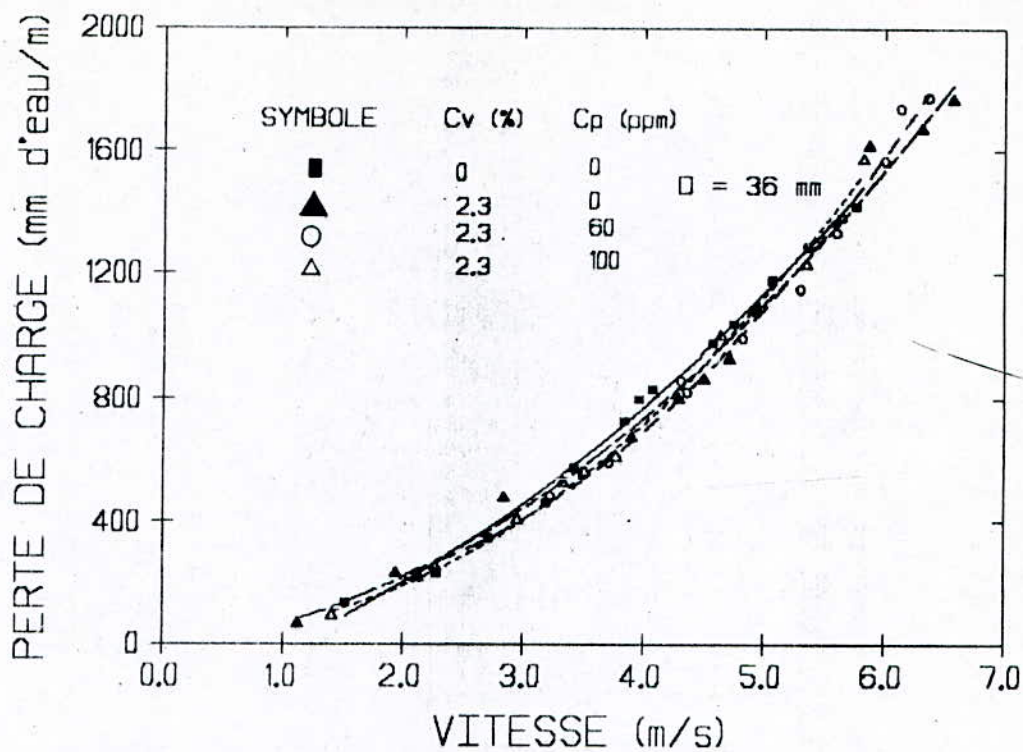


FIGURE IV-16 EFFET DU POLYOX WSR-301 SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DES MIXTURES DE VASE $C_v = 2.3\%$

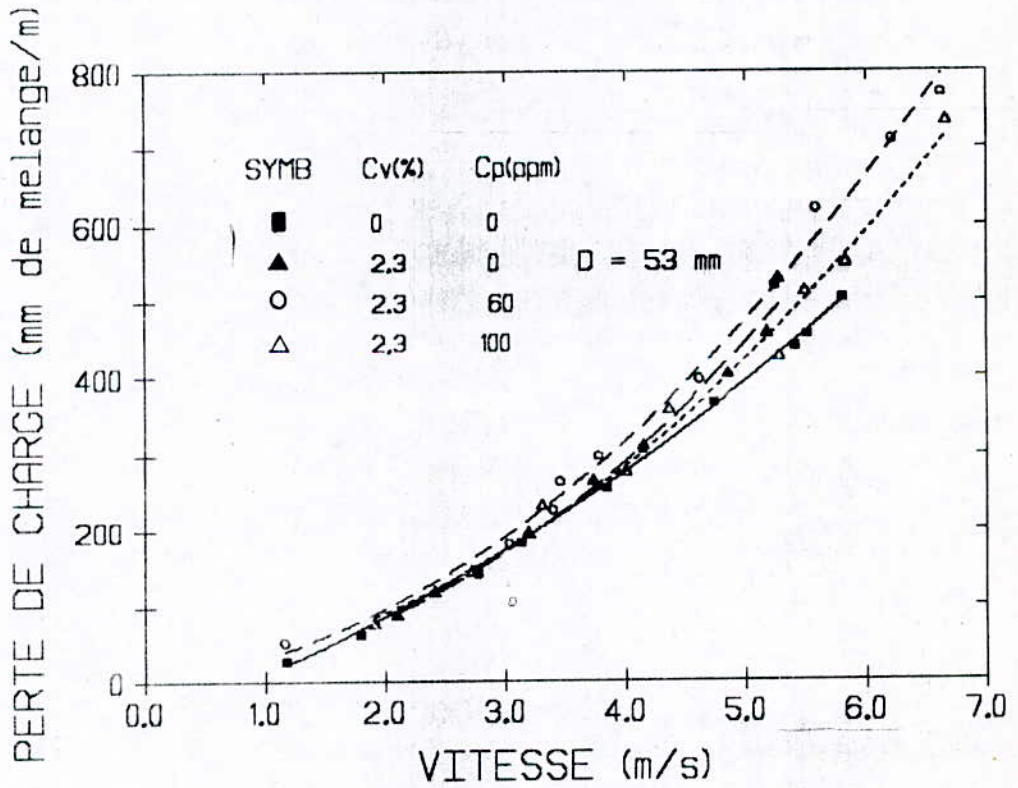
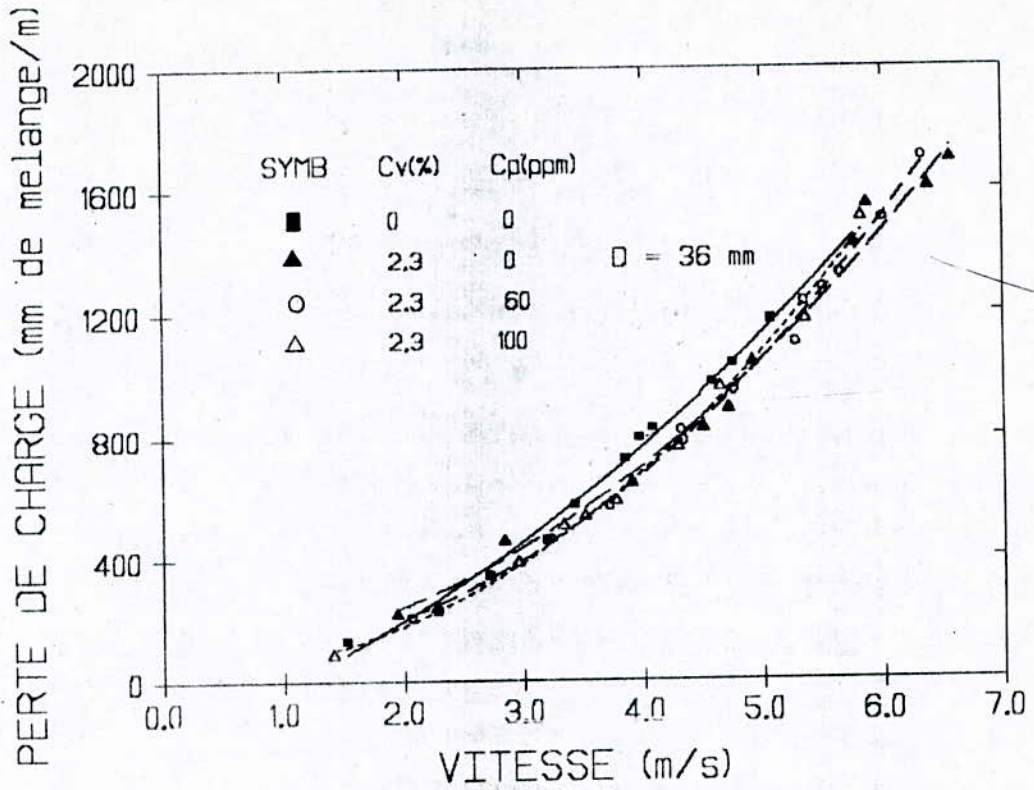


FIGURE IV-17 EFFET DU POLYOX WSR-301 SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR DE MELANGE) DES MIXTURES DE VASE $C_v = 2.3\%$

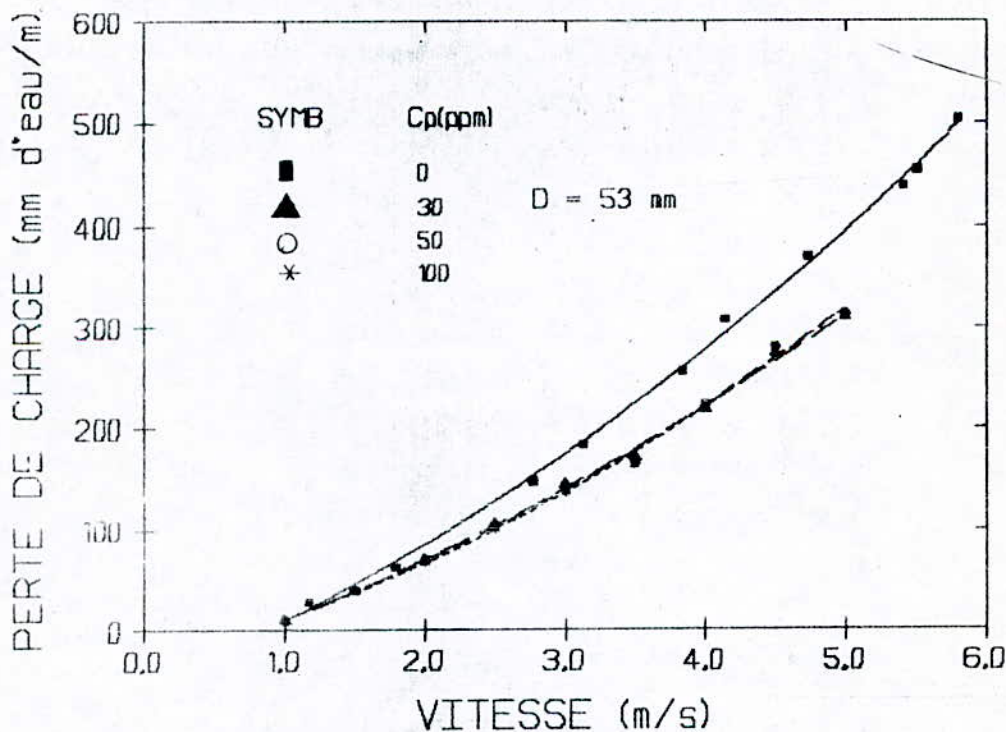
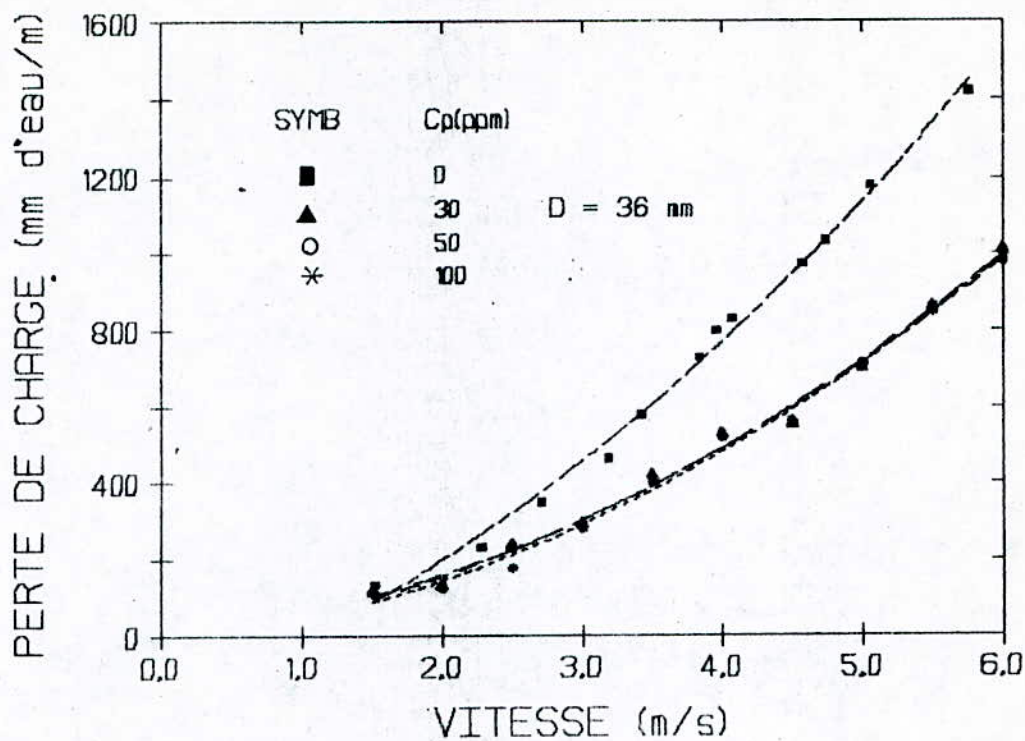


FIGURE IV-18 EFFET DU POLYOX WSR-301 SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DANS LE CAS DE L'EAU CLAIRE

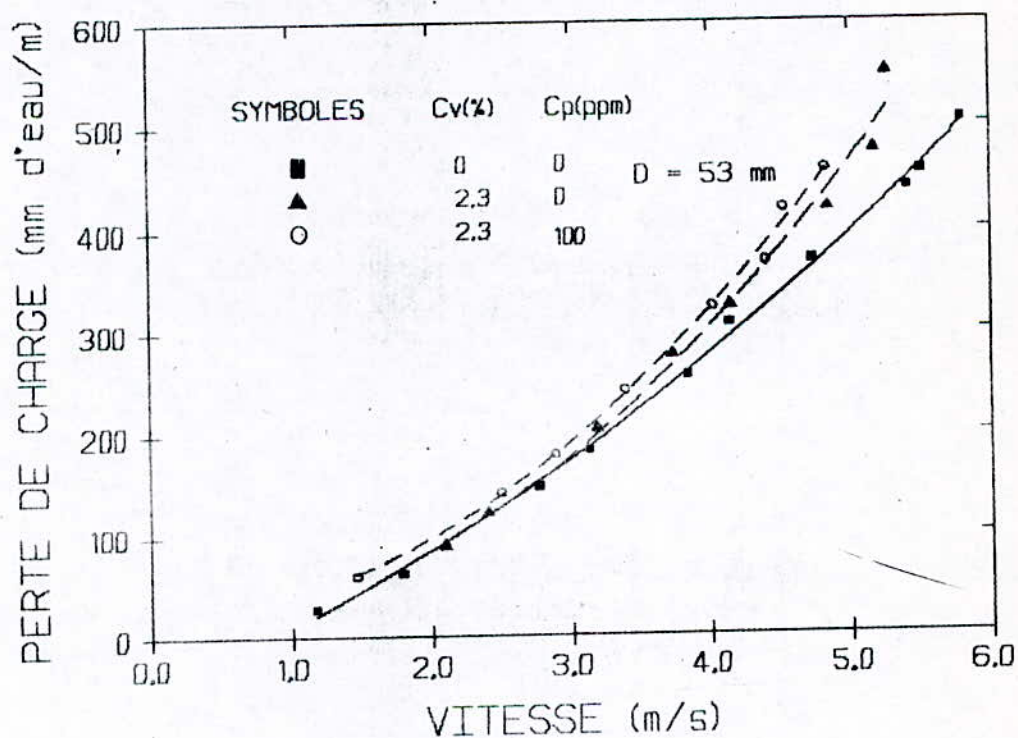
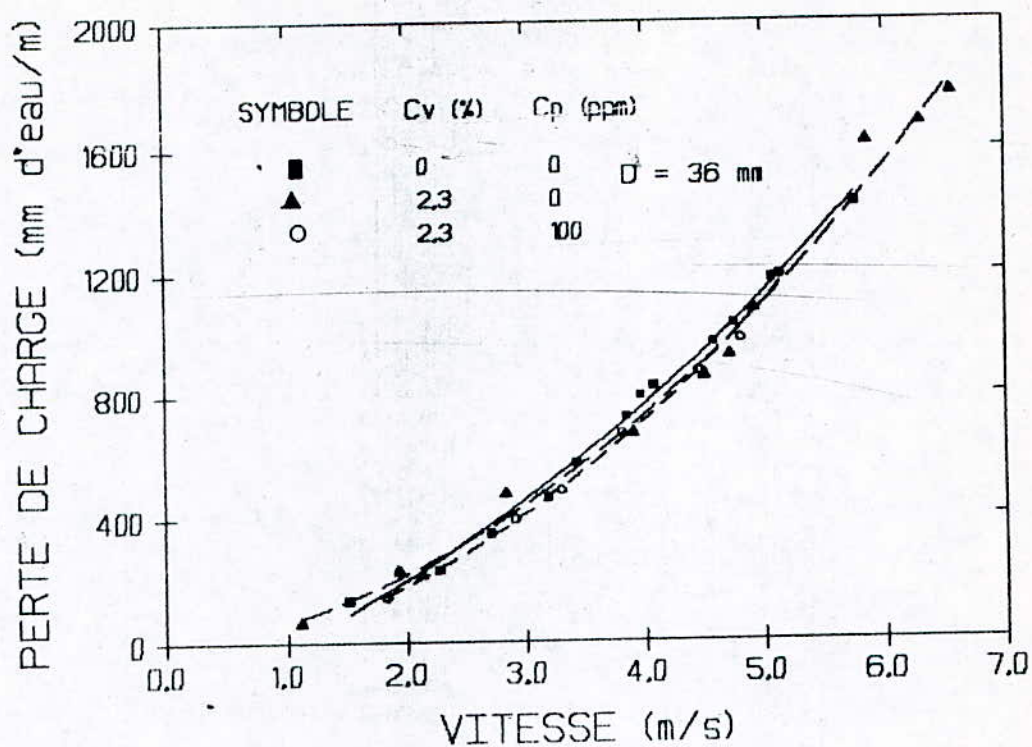


FIGURE IV-19 EFFET DU SEPARAN AP-302 (PAM) SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DES MIXTURES DE VASE Cv = 2.3%

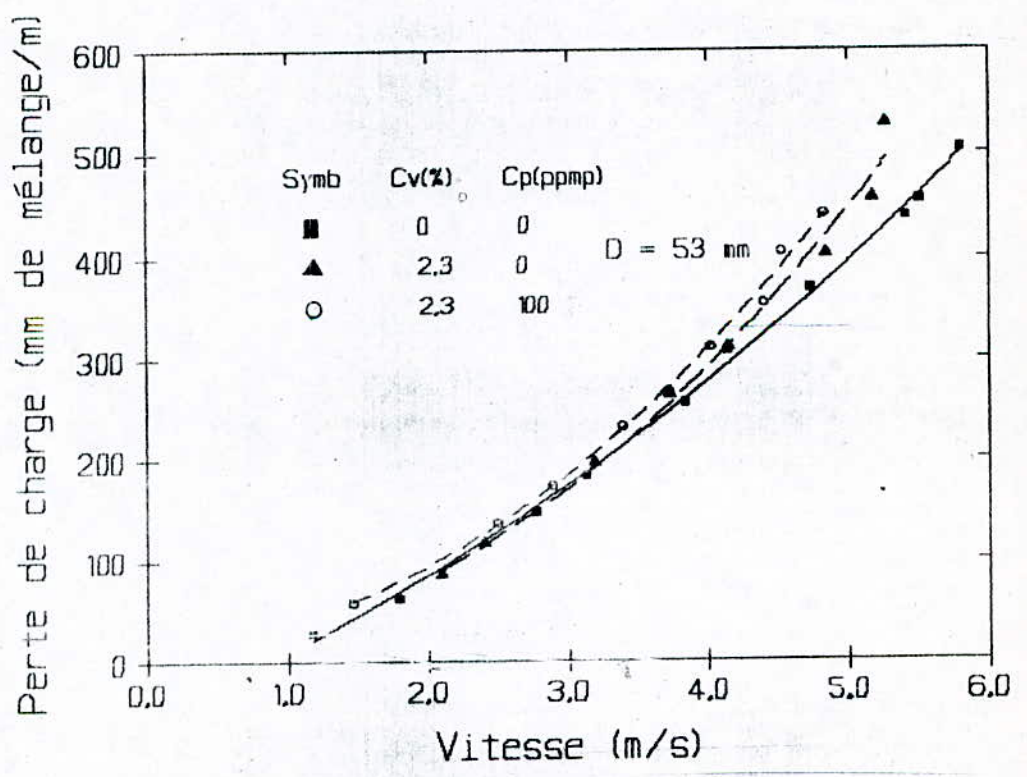
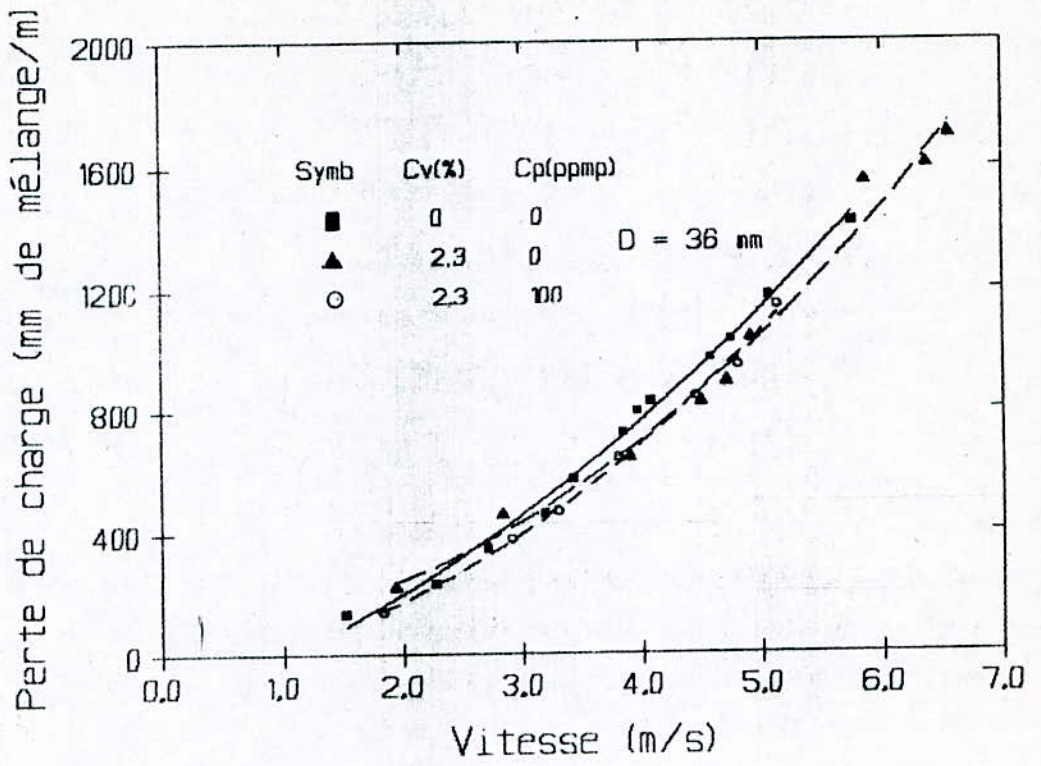


FIGURE IV-20 EFFET DU SEPARAN AP-302 (PAM) SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR DE MELANGE) DES MIXTURES DE VASE Cv = 2.3%

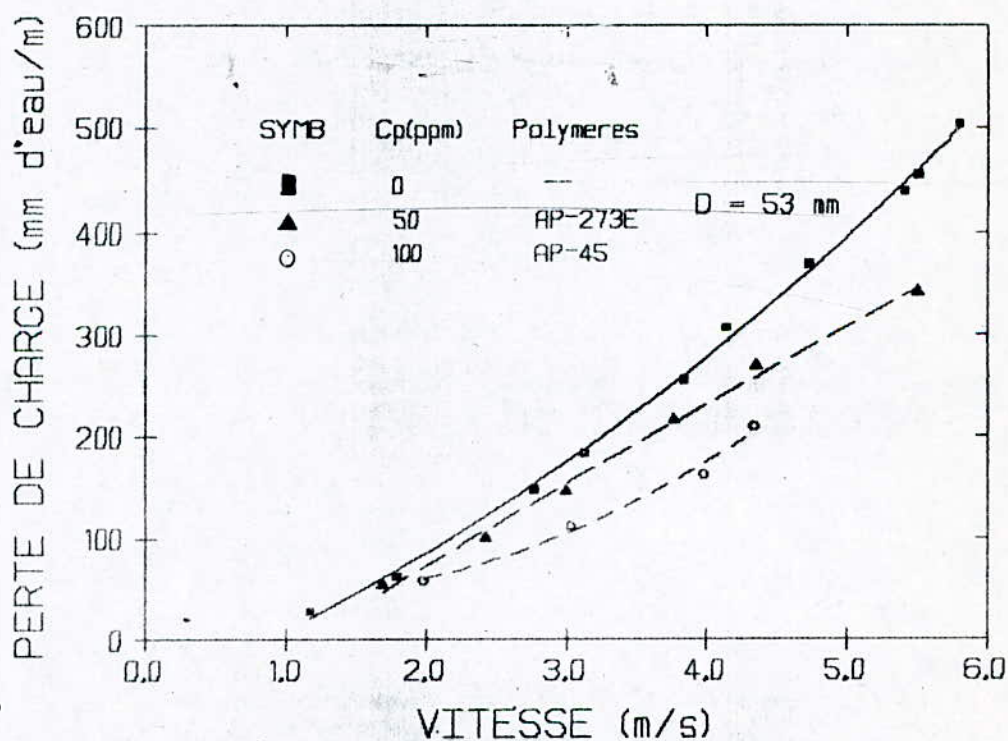
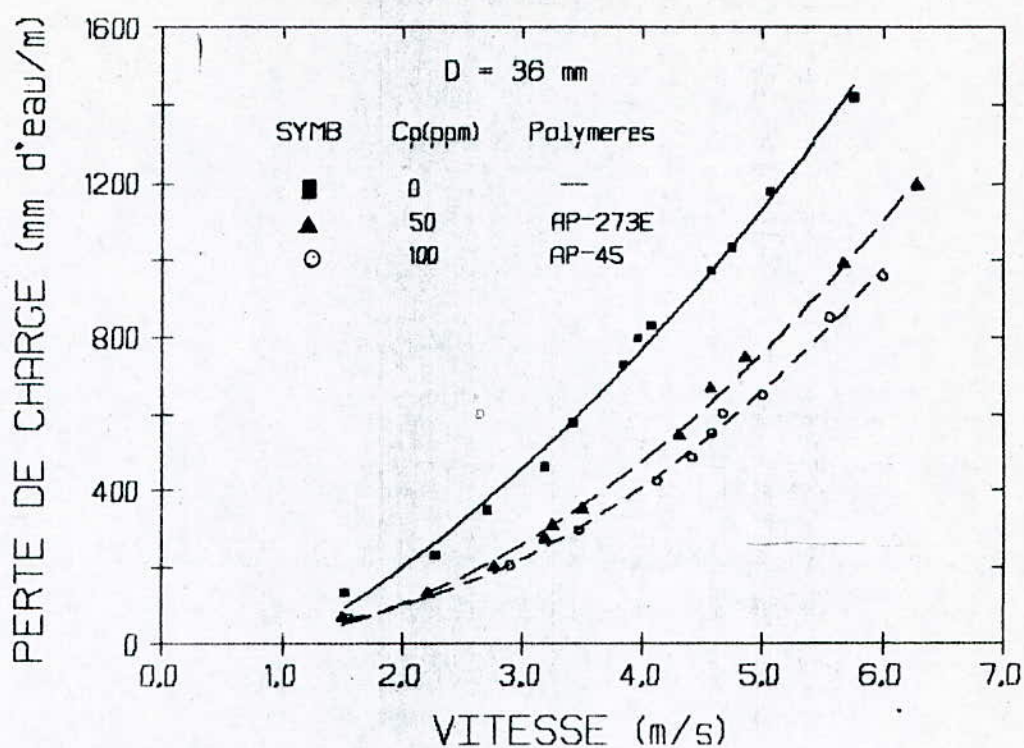


FIGURE IV-21 EFFET DES POLYACRYLAMIDES SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DANS DE L'EAU CLAIRE

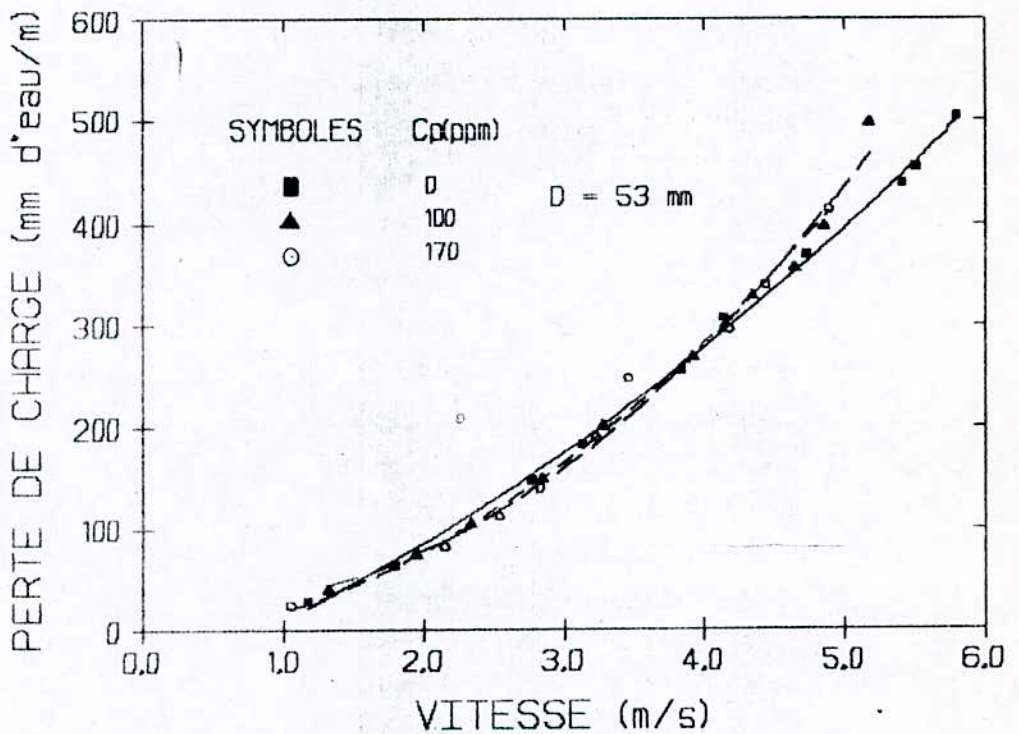
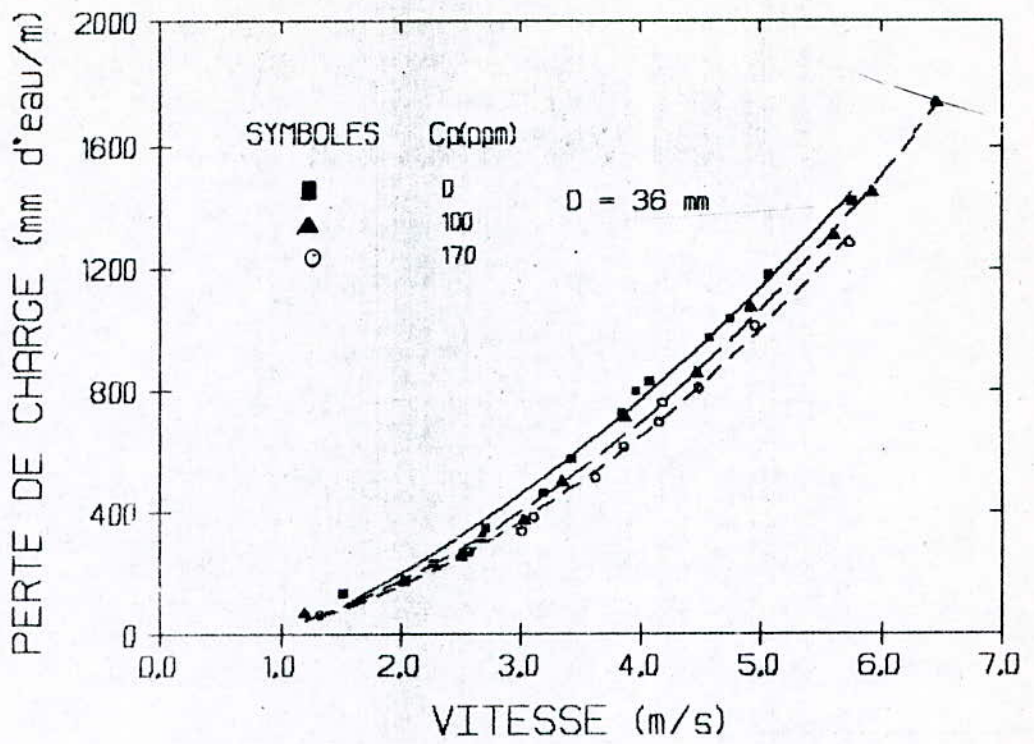


FIGURE IV-22 EFFET DE L'ANTISOL SUR LA PERTE DE CHARGE (EXPRIMEE EN HAUTEUR D'EAU) DANS DE L'EAU CLAIRE

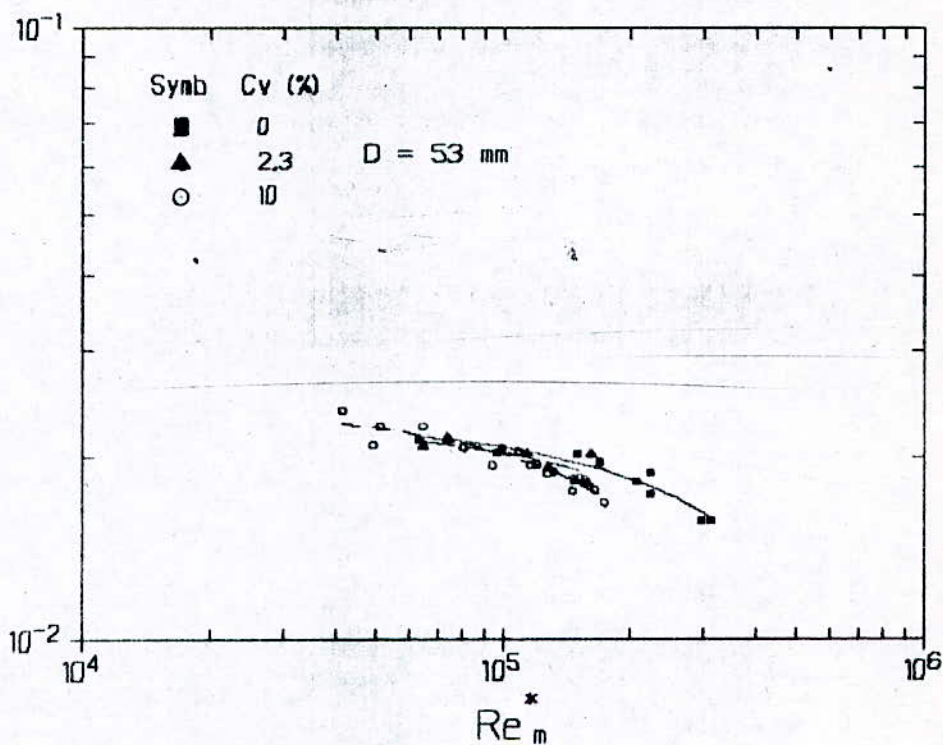
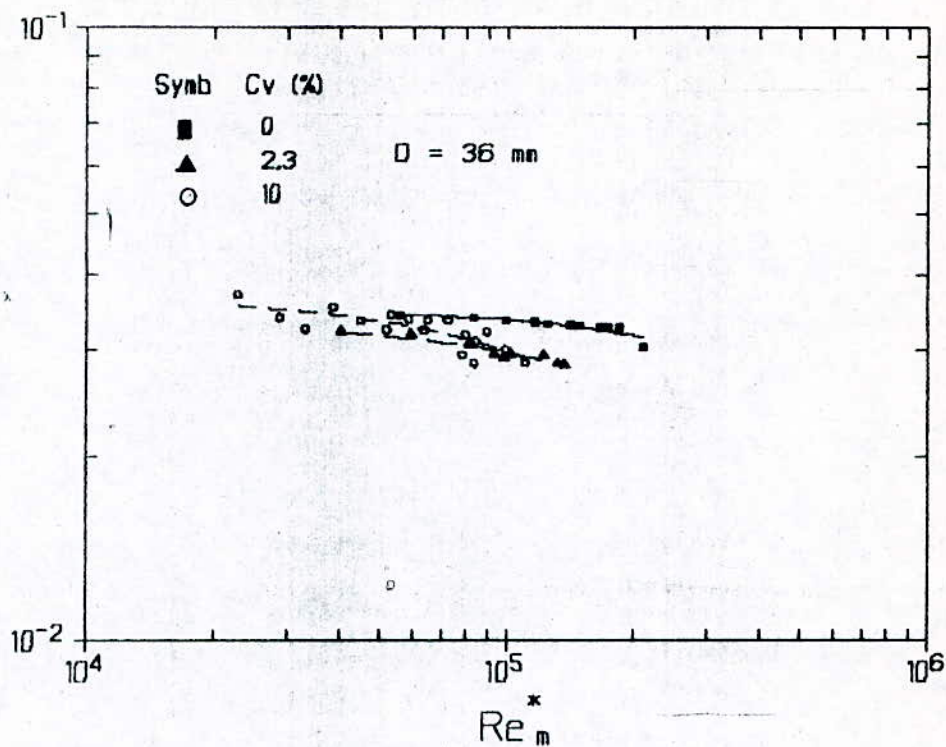


FIGURE IV-23 EFFET DE LA CONCENTRATION DE LA VASE SUR LE COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE UNITAIRE λ

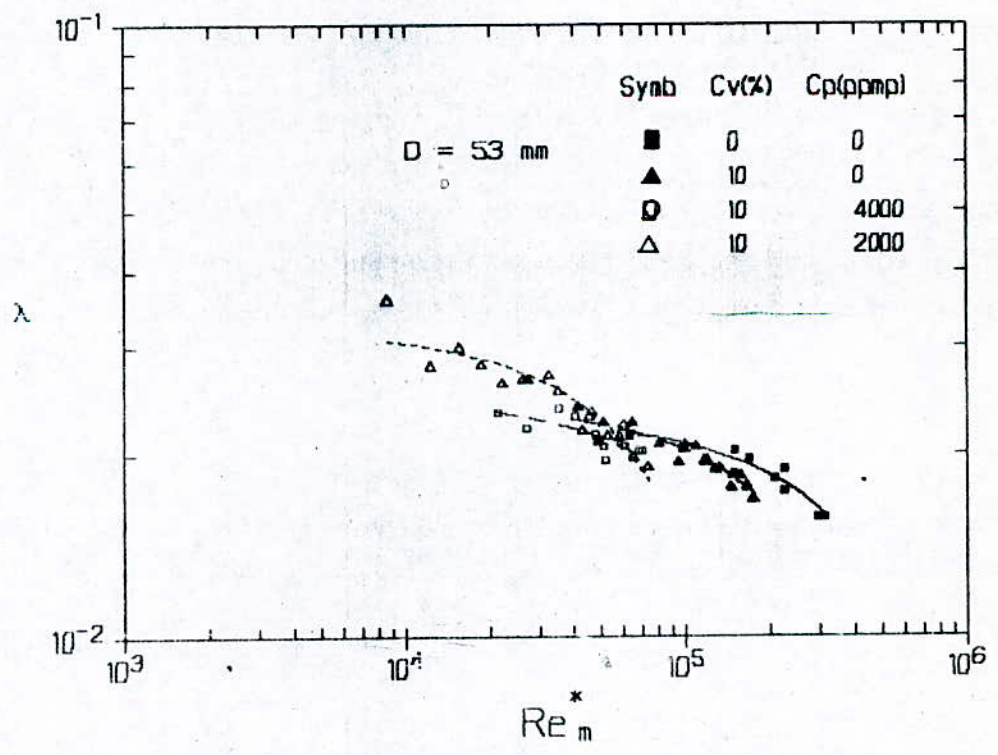
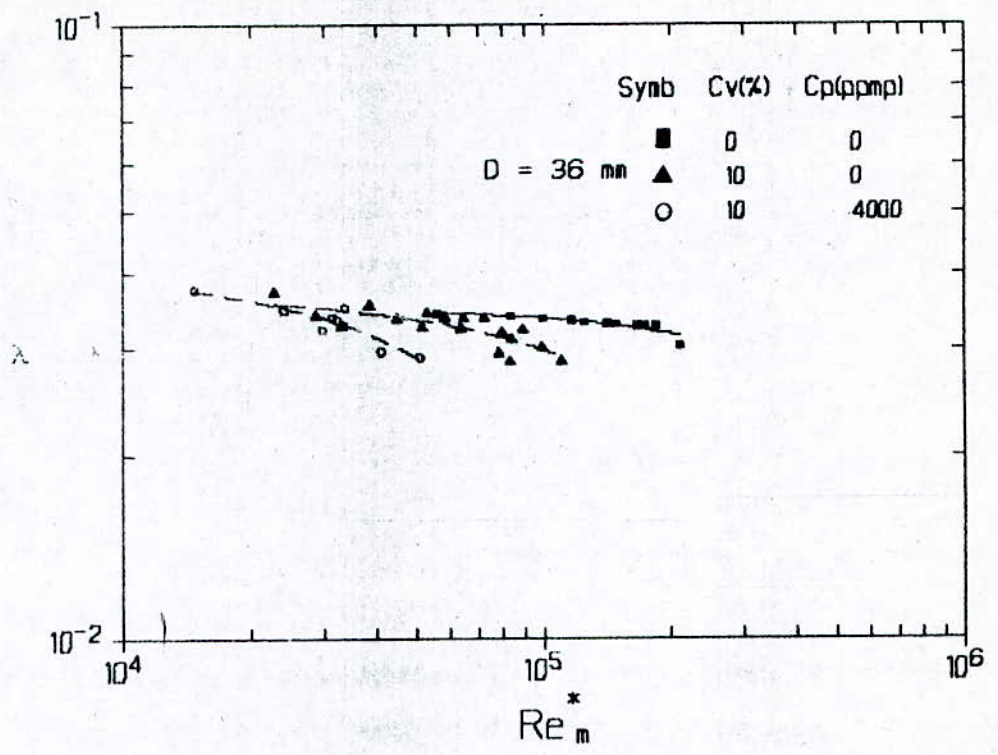


FIGURE IV-24 INFLUENCE DE LA CMC SUR LE COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE λ DE LA MIXTURE CV = 10 %

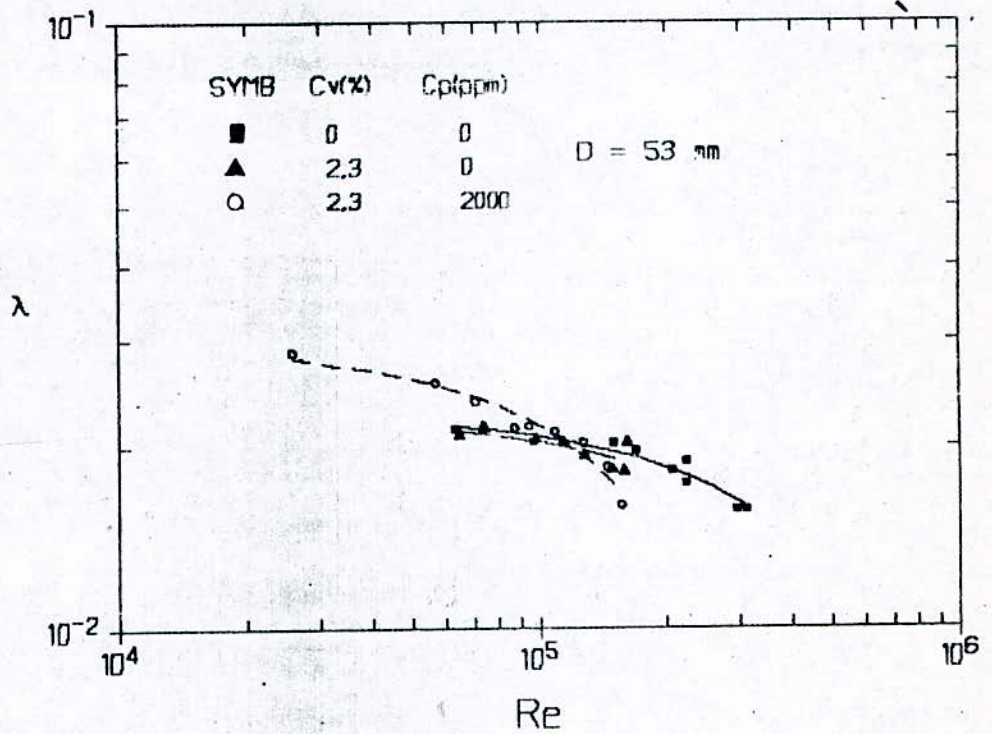
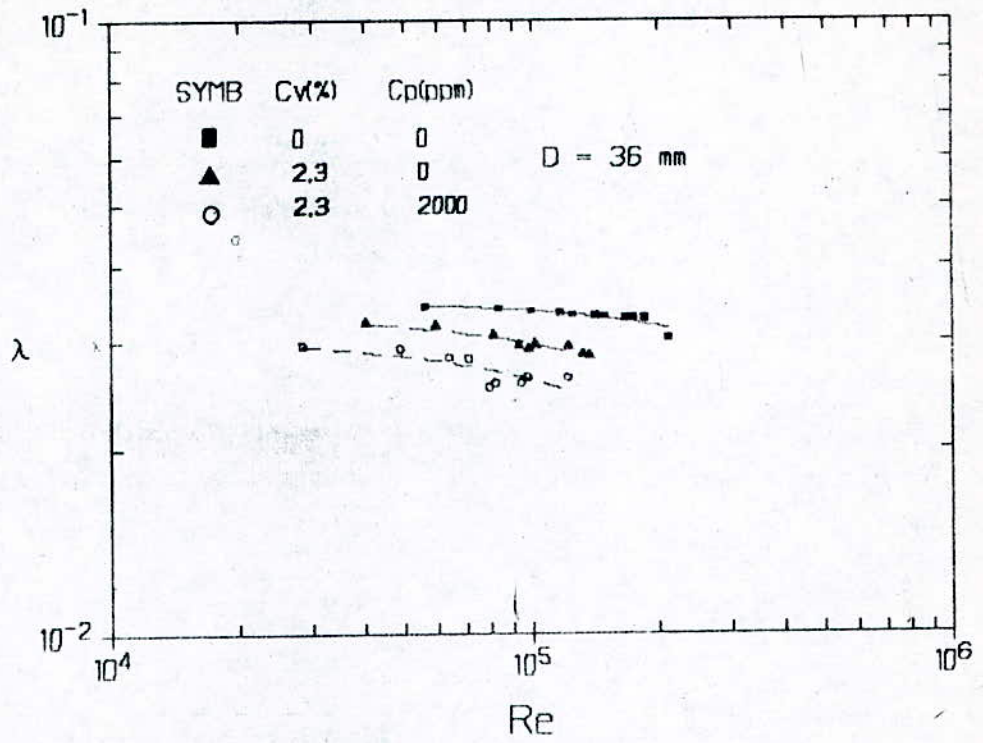


FIGURE IV-25 EFFET DE LA CMC SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE λ DES MIXTURES DE VASE $C_v = 2.3\%$

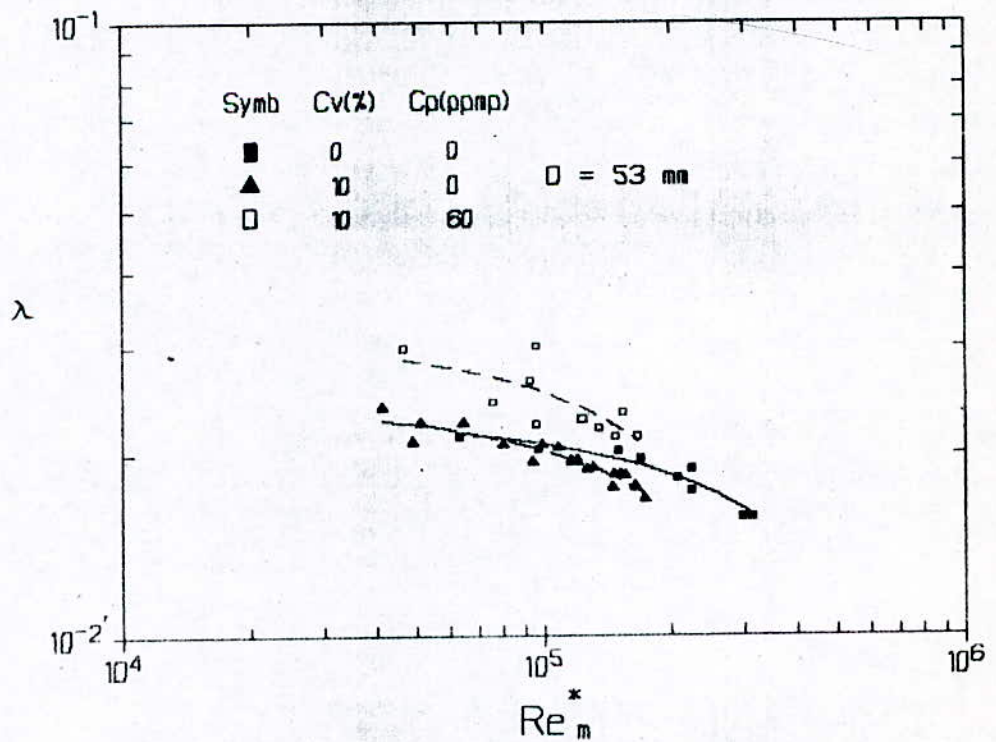
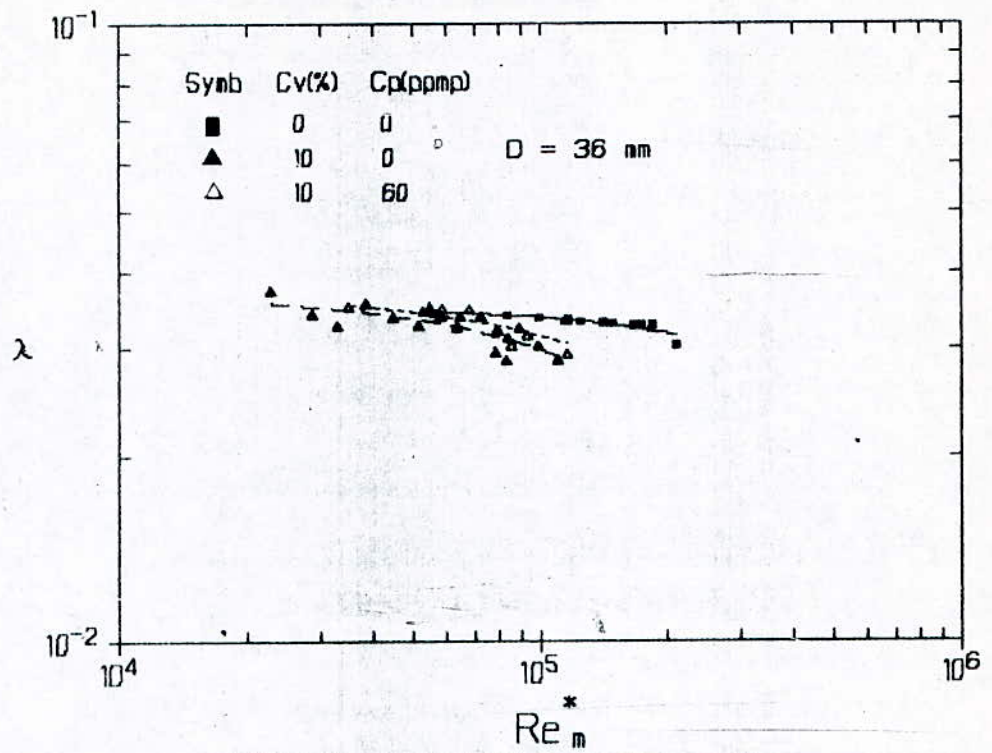


FIGURE IV-26 EFFET DU POLYOX SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE λ DES MIXTURES DE VASE $C_v = 10\%$

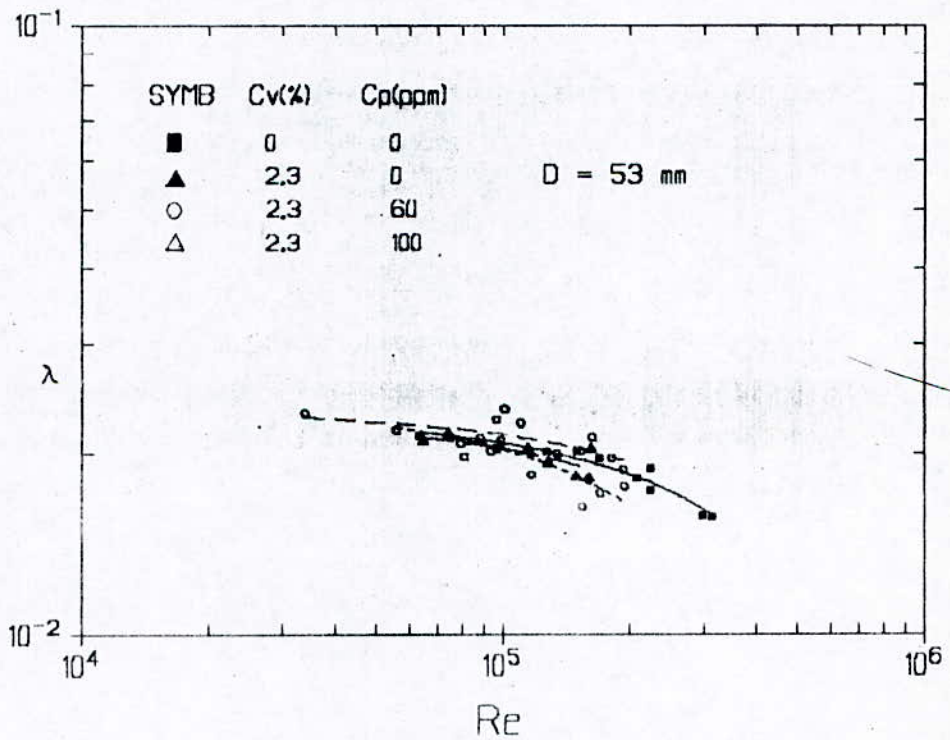
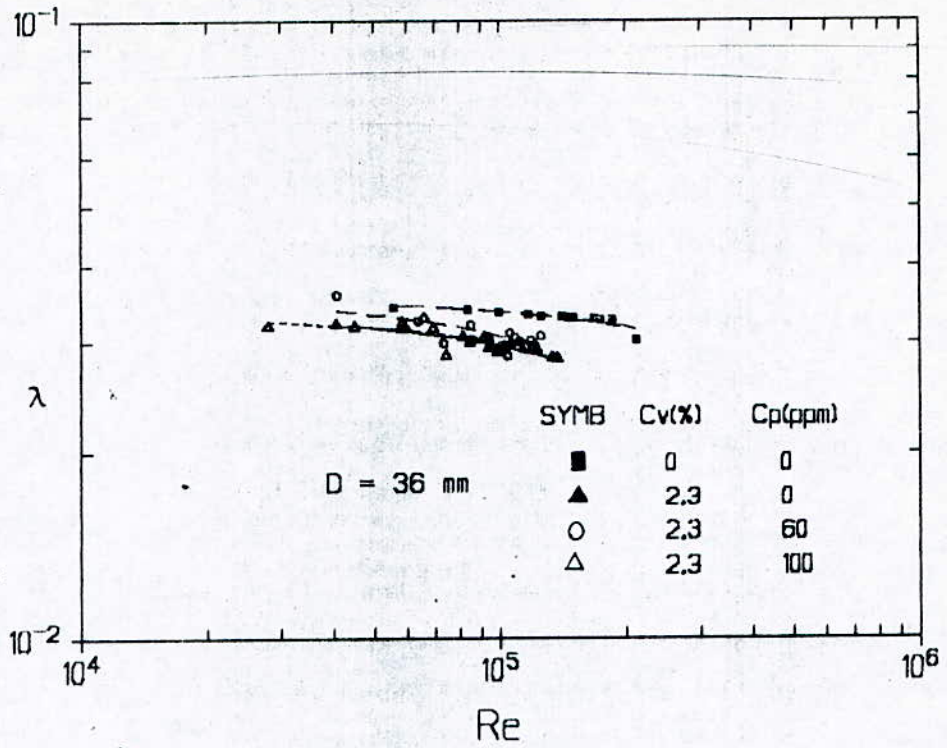


FIGURE IV-27 EFFET DU POLYOX SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE λ DES MIXTURES DE VASE $C_v = 2.3\%$

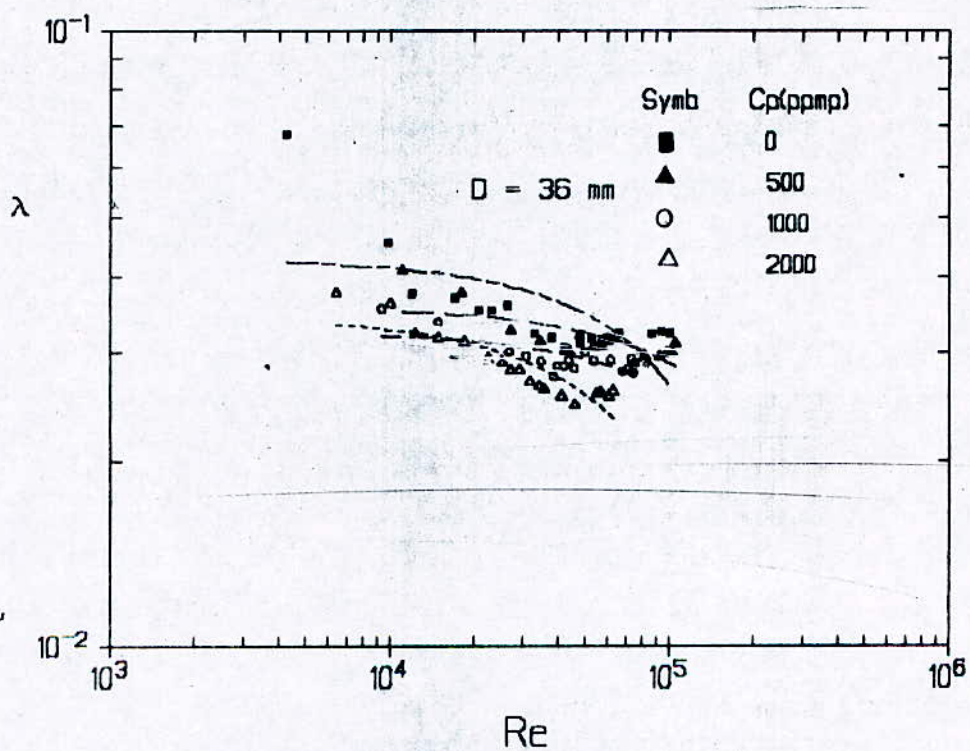


FIGURE IV-28 EFFET DE LA CMC SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE λ DANS LE CAS DE L'EAU CLAIRE

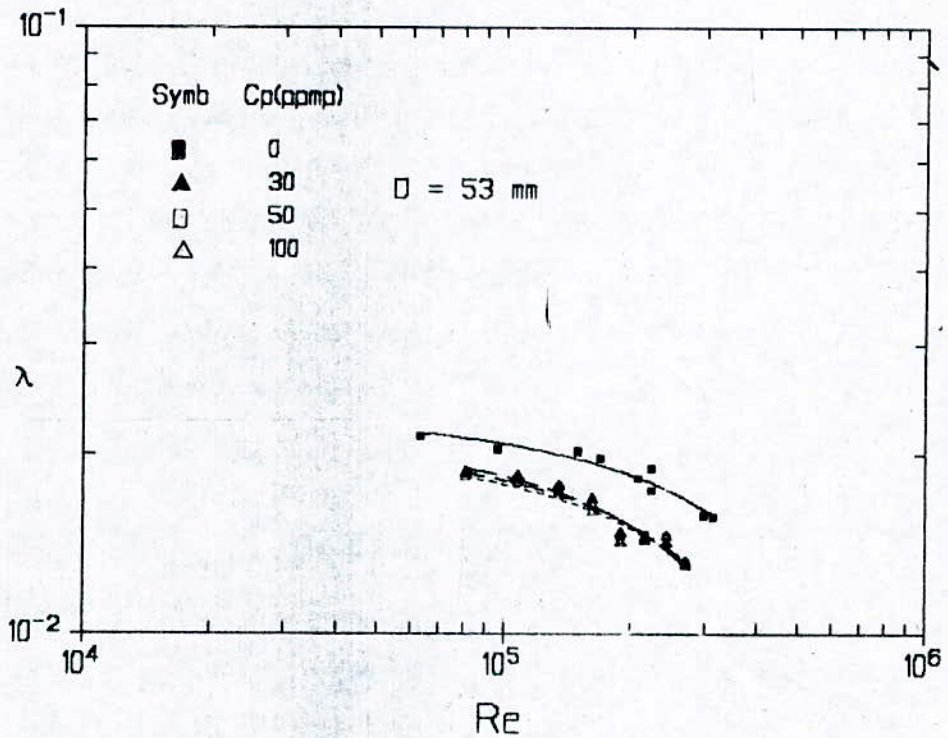
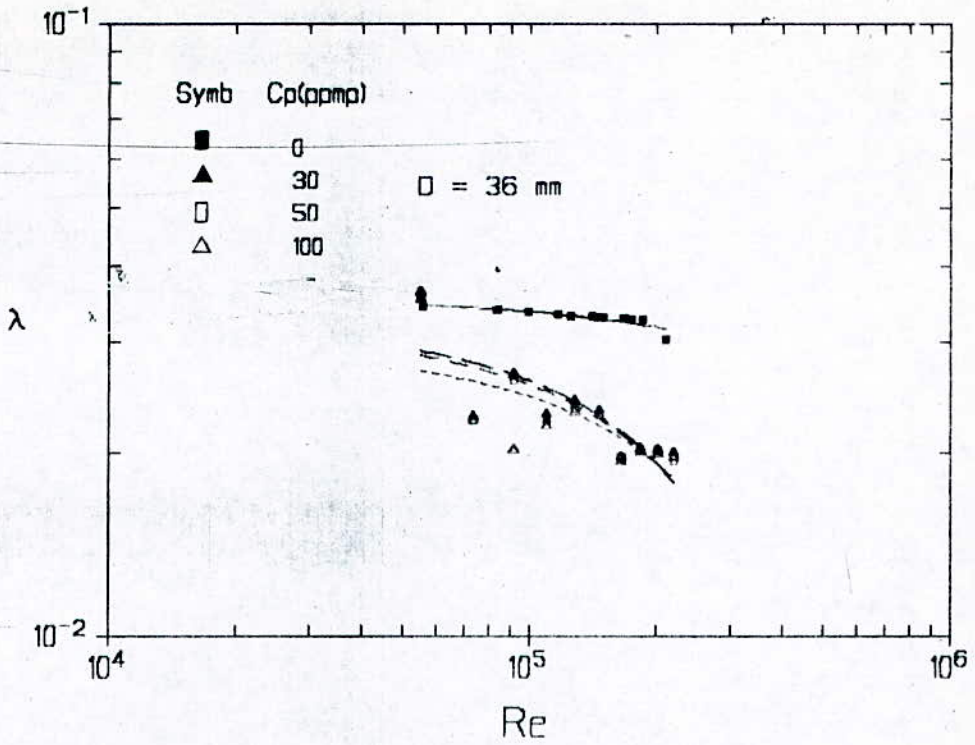


FIGURE IV-29 EFFET DU POLYOX WSR-301 SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE λ DANS LE CAS DE L'EAU CLAIRE

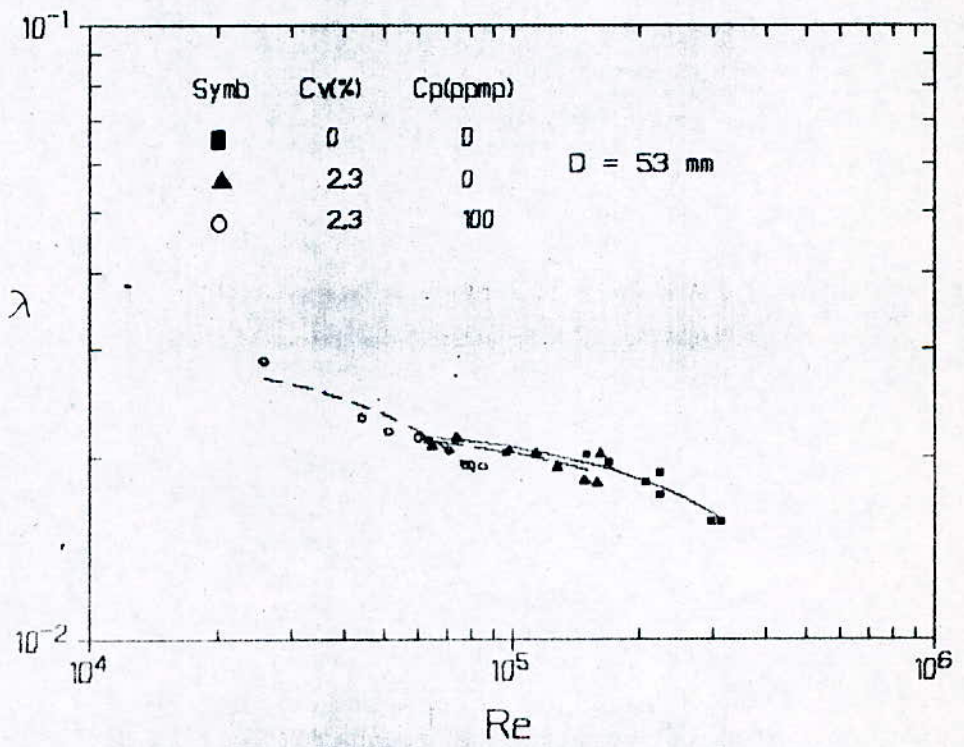
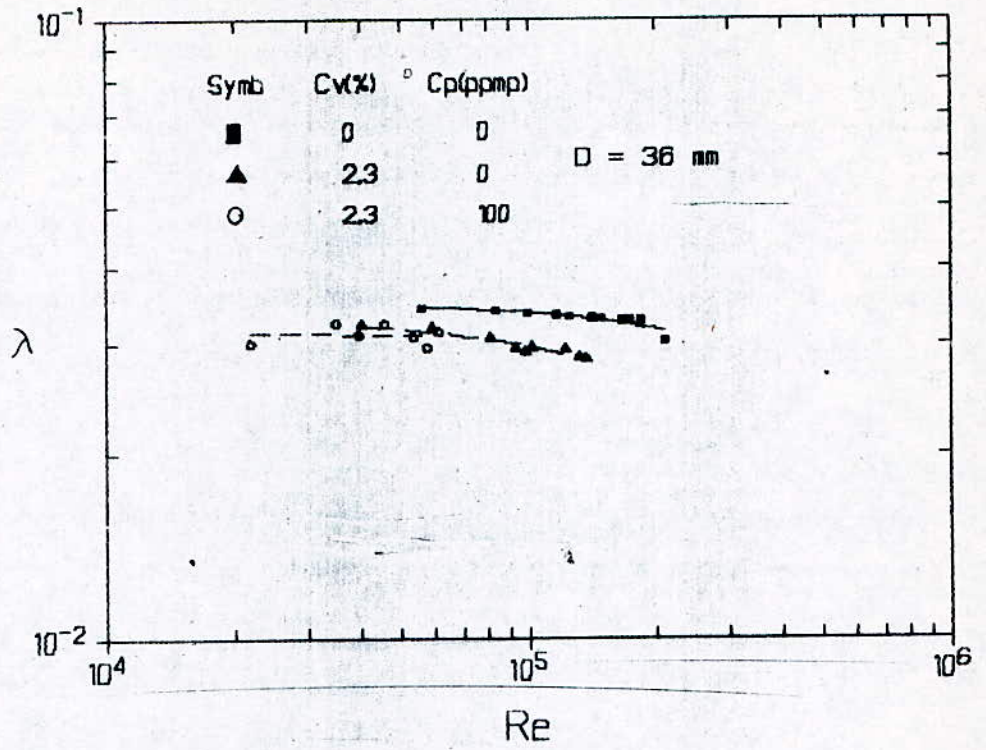


FIGURE IV-30 EFFET DU SEPARAN AP-302 SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE λ DE LA MIXTURE DE VASE $Cv = 2.3\%$

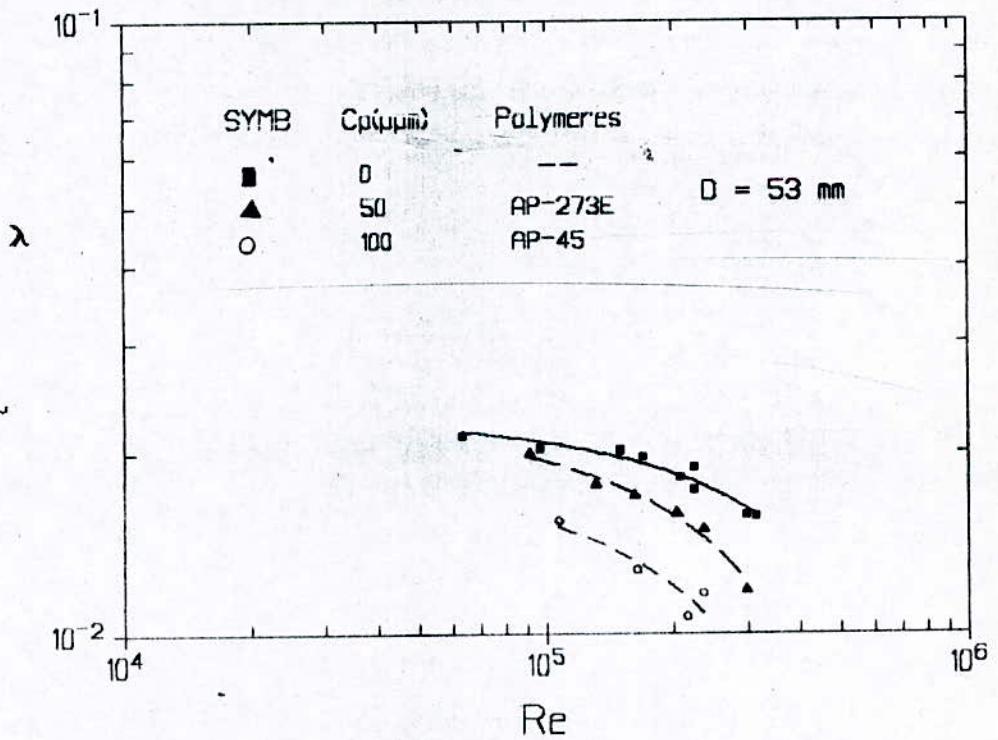
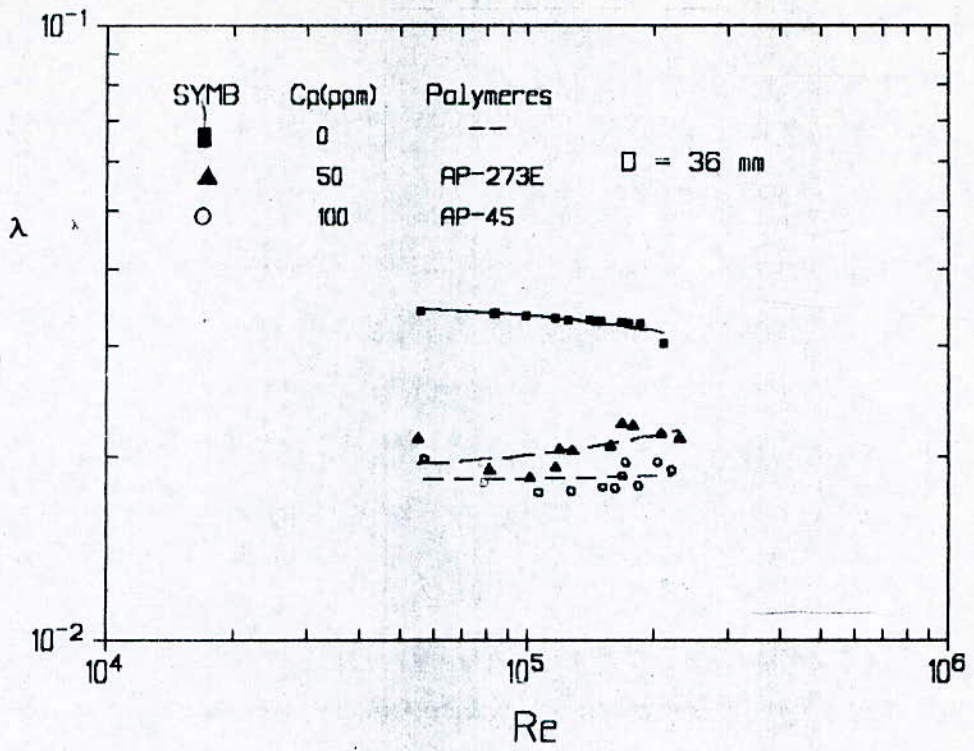


FIGURE IV-31 EFFET DES POLYACRYLAMIDES SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE UNITAIRE λ DANS DE L'EAU CLAIRE

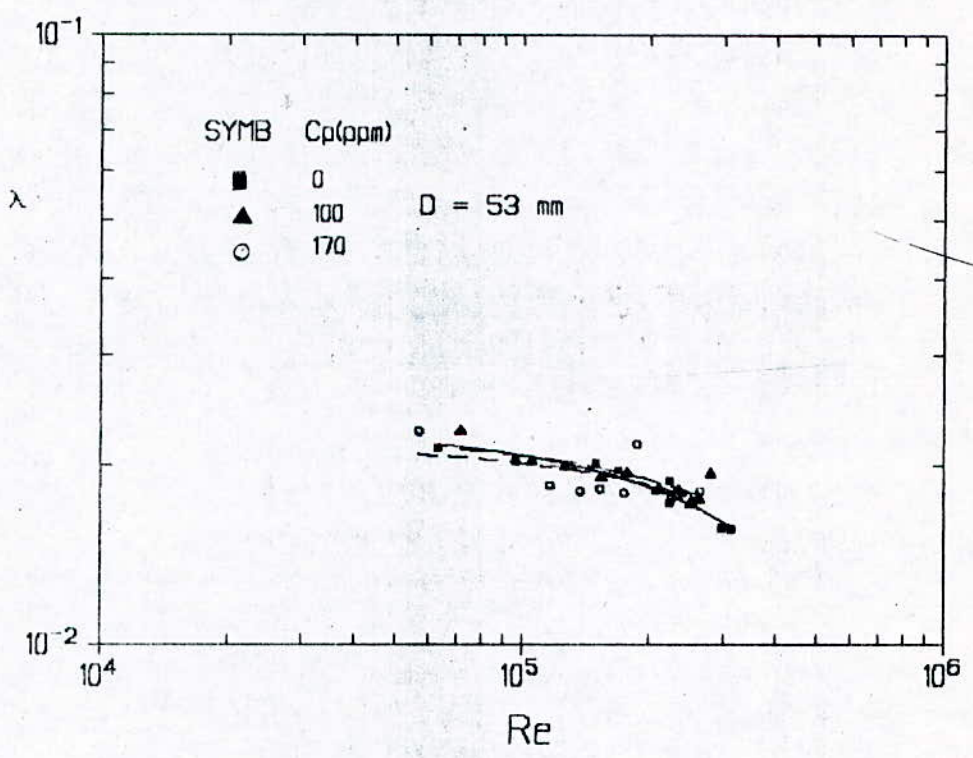
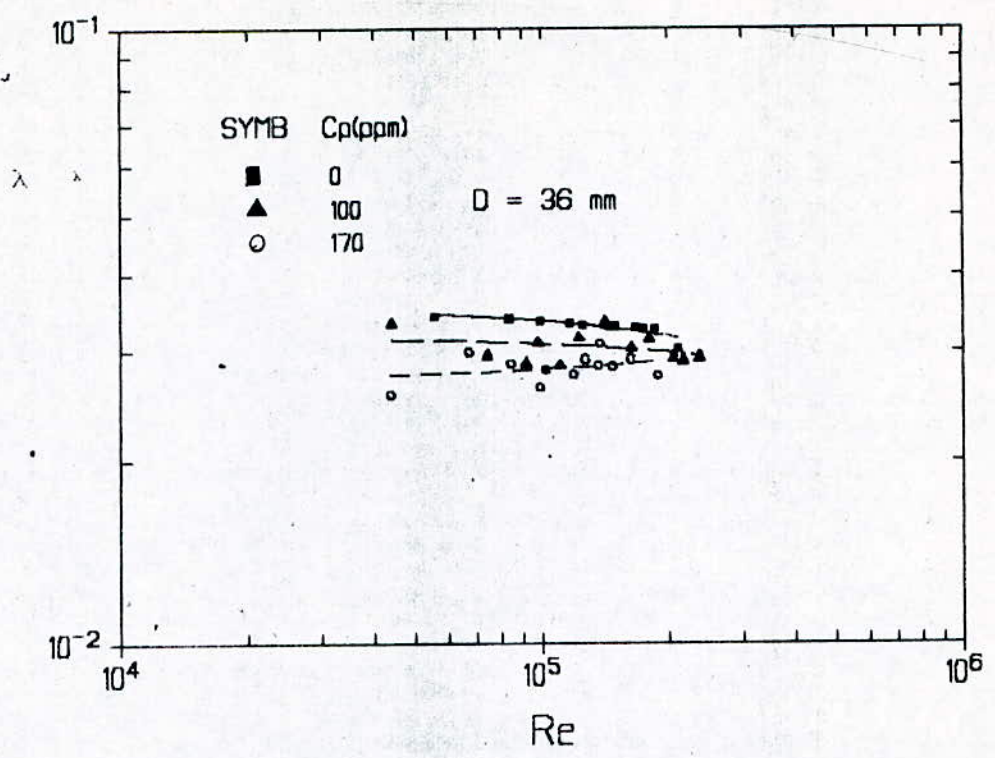


FIGURE IV-32 EFFET DE L'ANTISOL SUR LA VARIATION DU COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE UNITAIRE λ DANS DE L'EAU CLAIRE

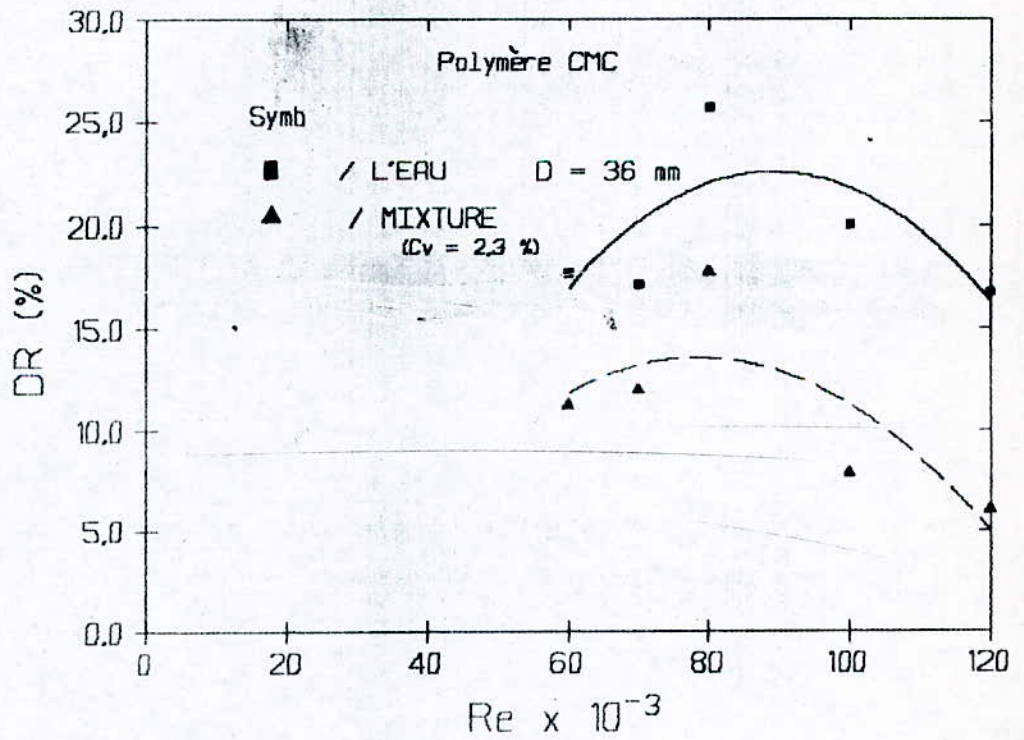
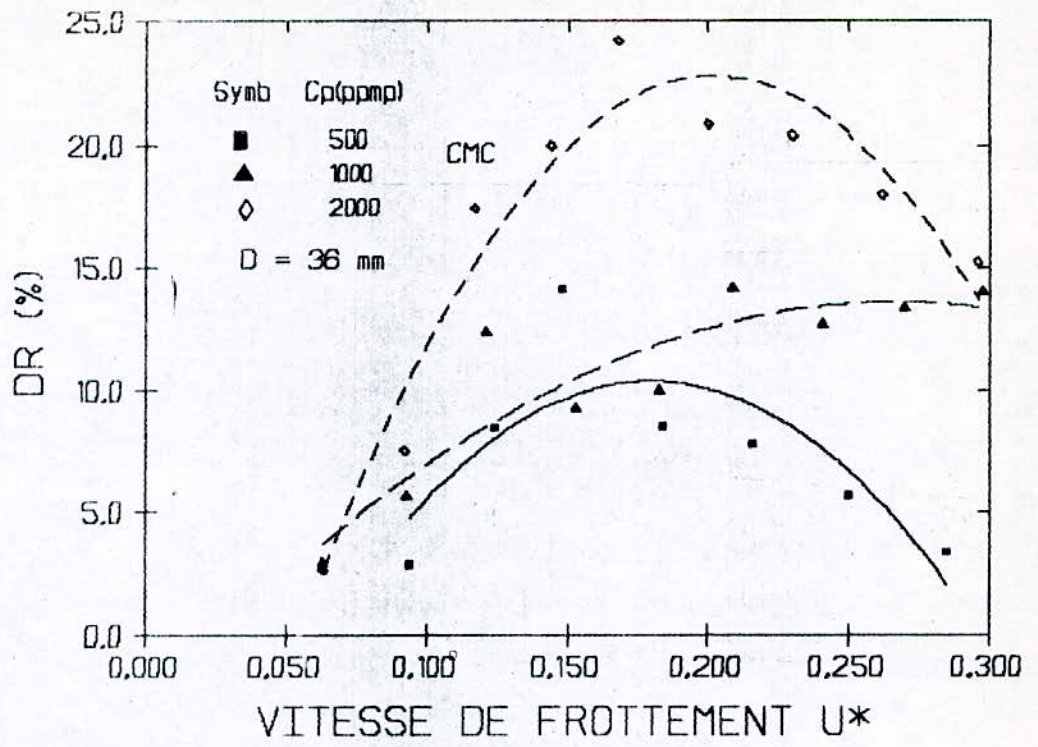


FIGURE IV-33 L'INFLUENCE DE LA CMC SUR LE DEGRE DE REDUCTION

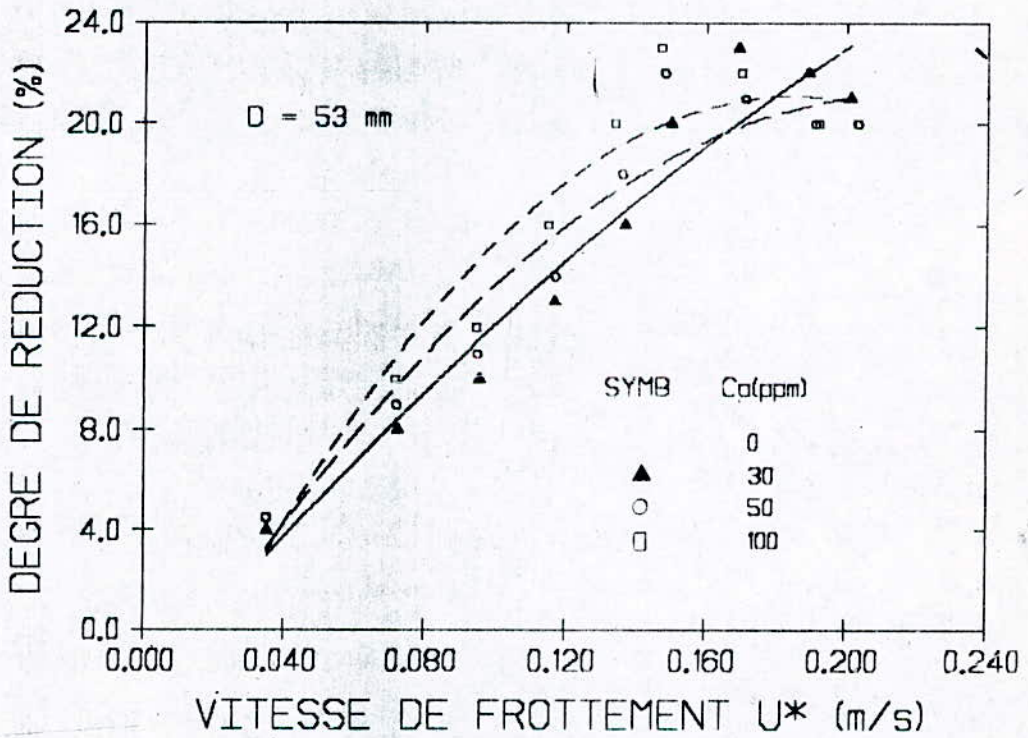
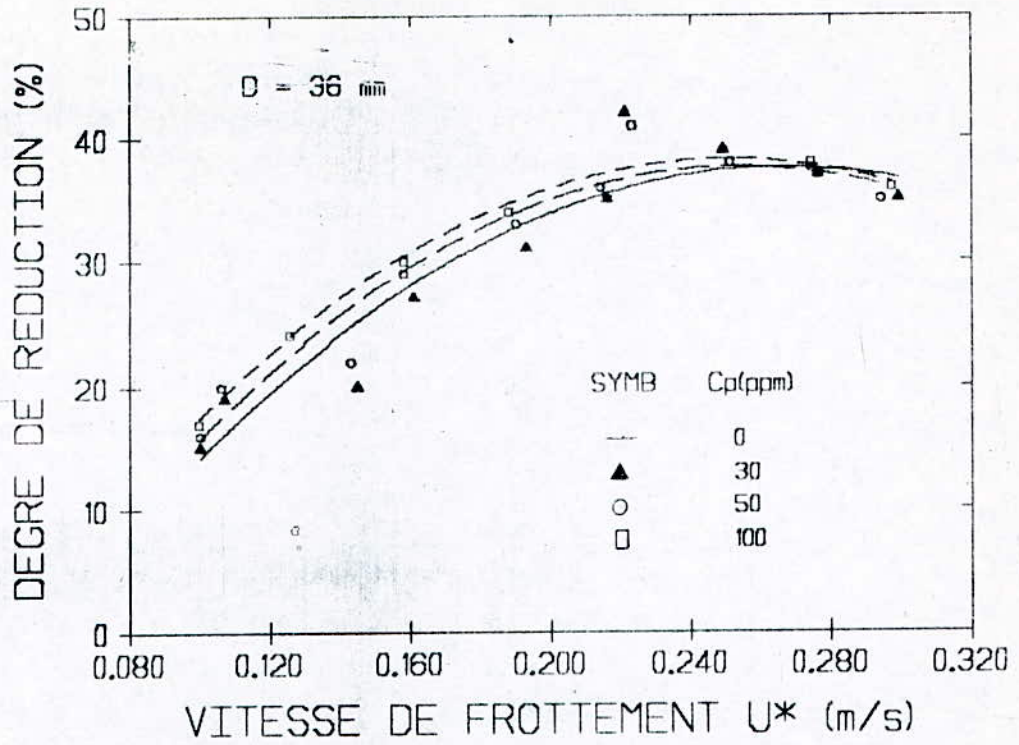


FIGURE IV-34 LE TAUX DE REDUCTION OBTENU AVEC DU POLYOX WSR-301 DANS DE L'EAU CLAIRE

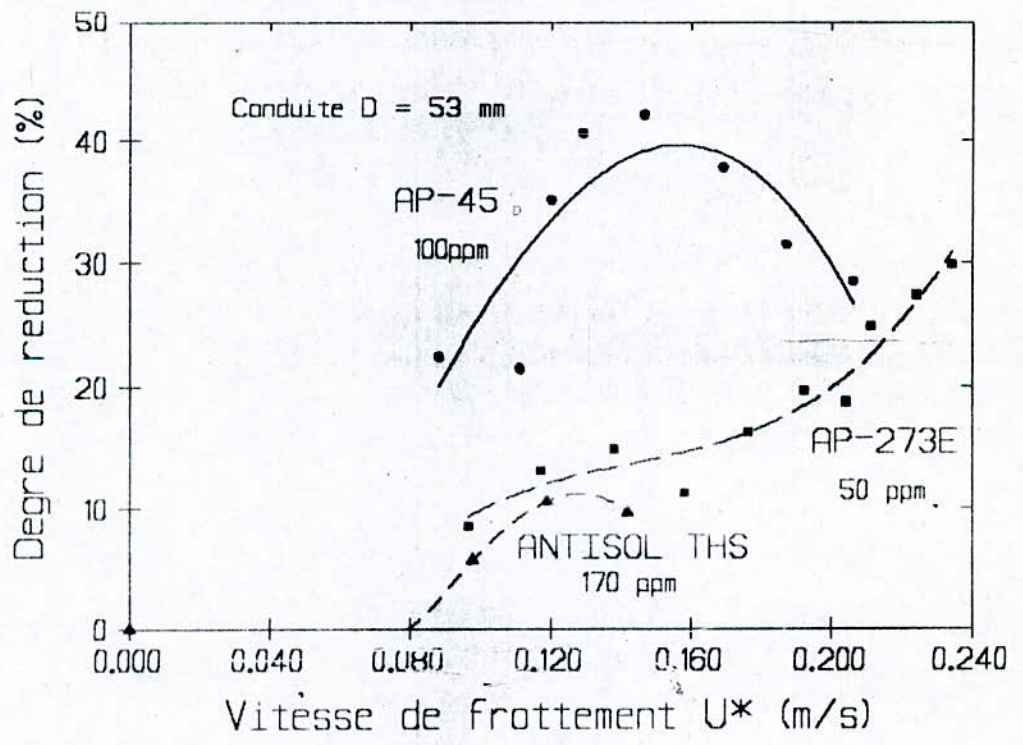
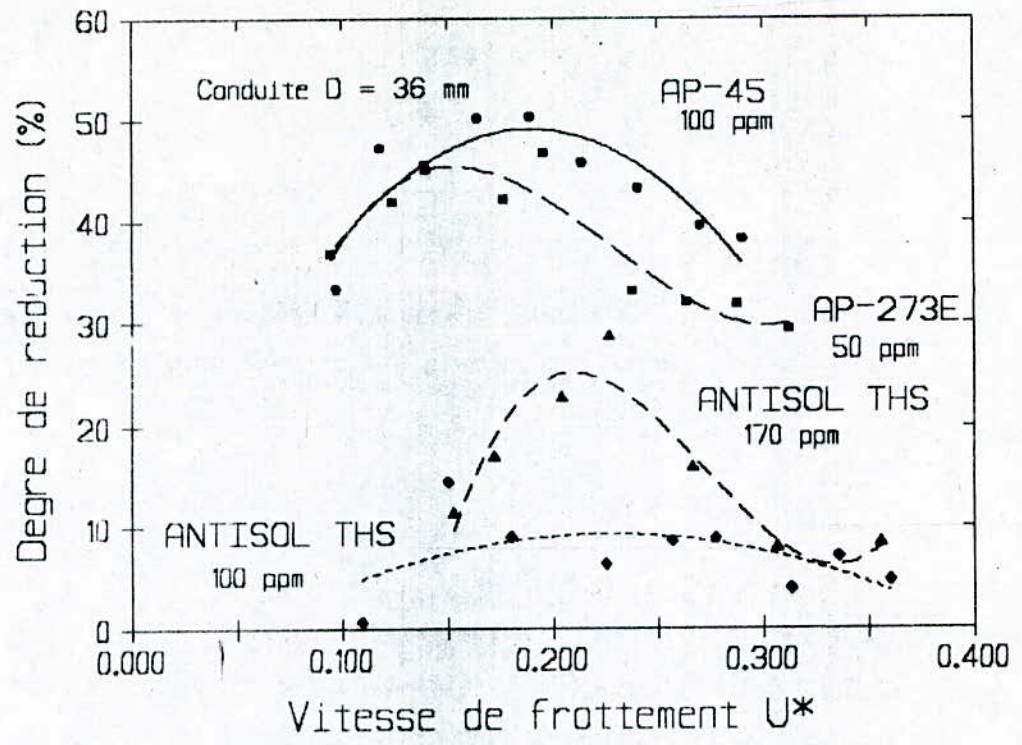


FIGURE IV-35 LE TAUX DE REDUCTION OBTENU AVEC LES POLYACRYLAMIDES DANS DE L'EAU CLAIRE

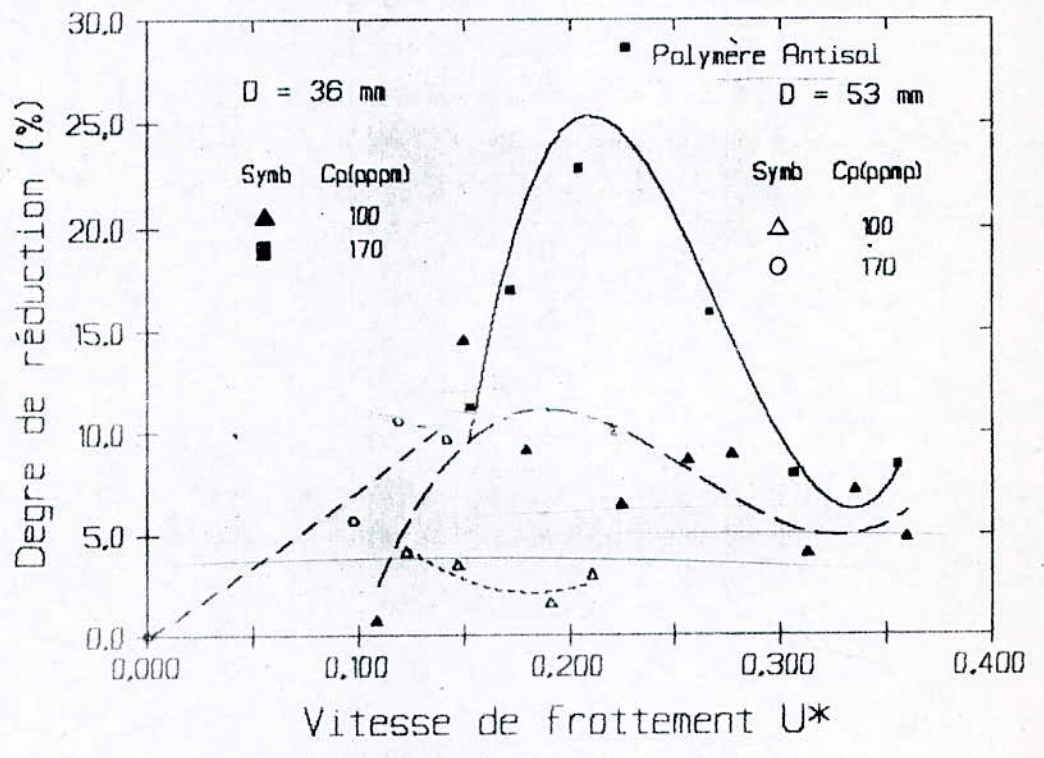
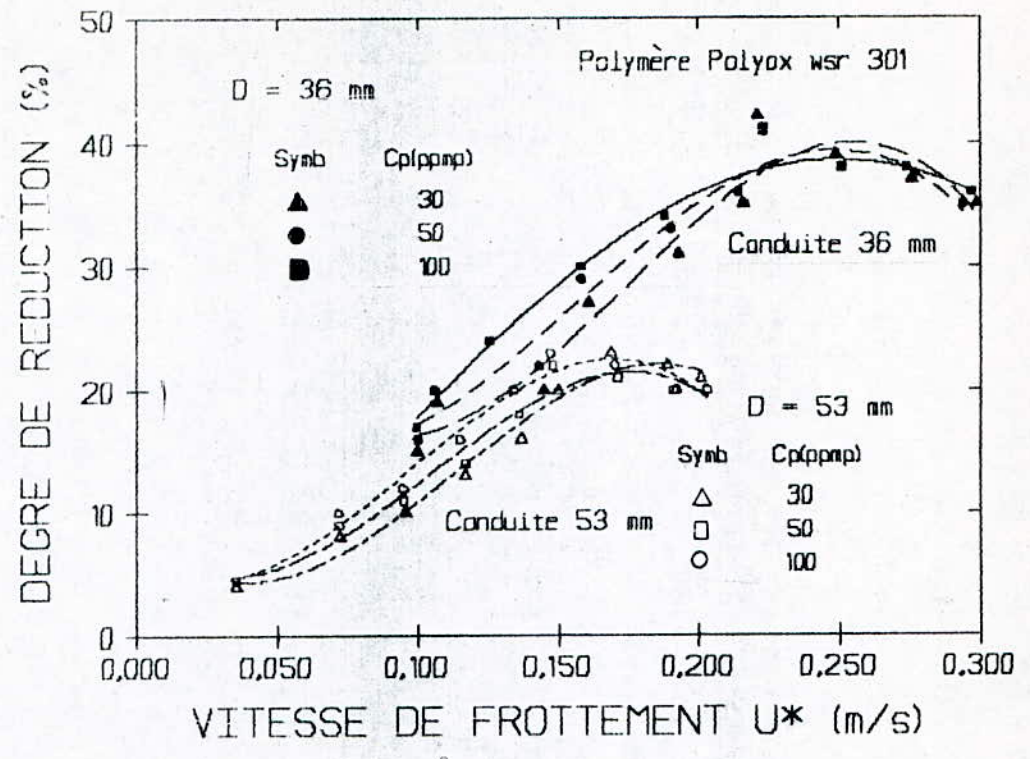


FIGURE IV-36 INFLUENCE DU DIAMETRE DE LA CONDUITE SUR LE TAUX DE REDUCTION DANS LE CAS DU POLYOX WSR-301 ET L'ANTISOL

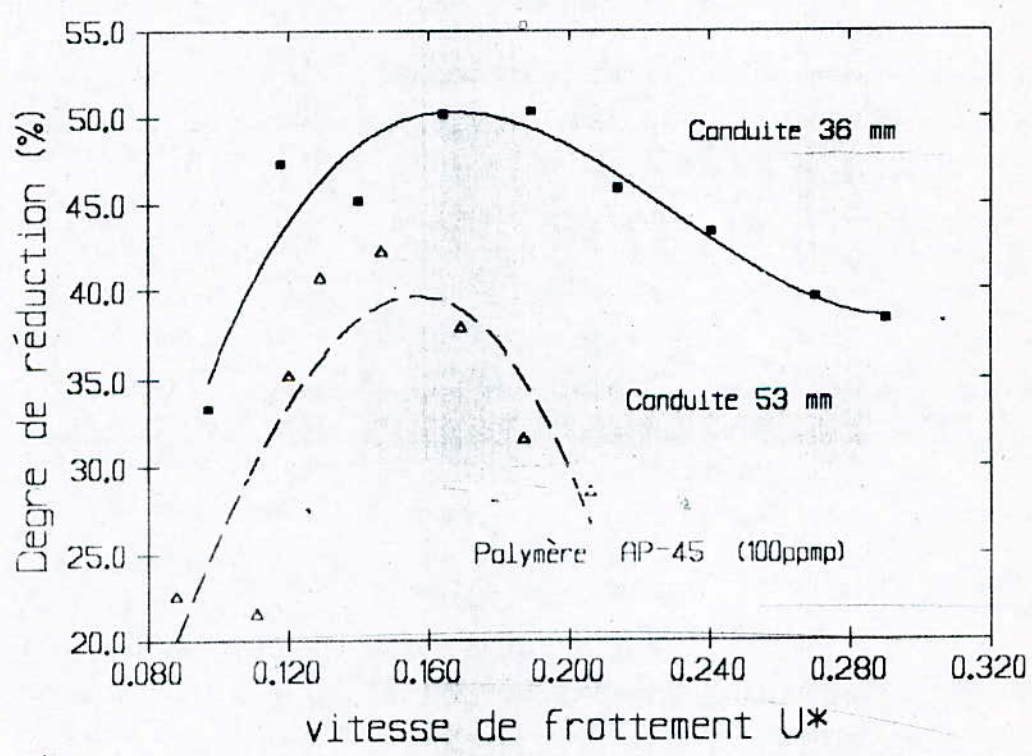
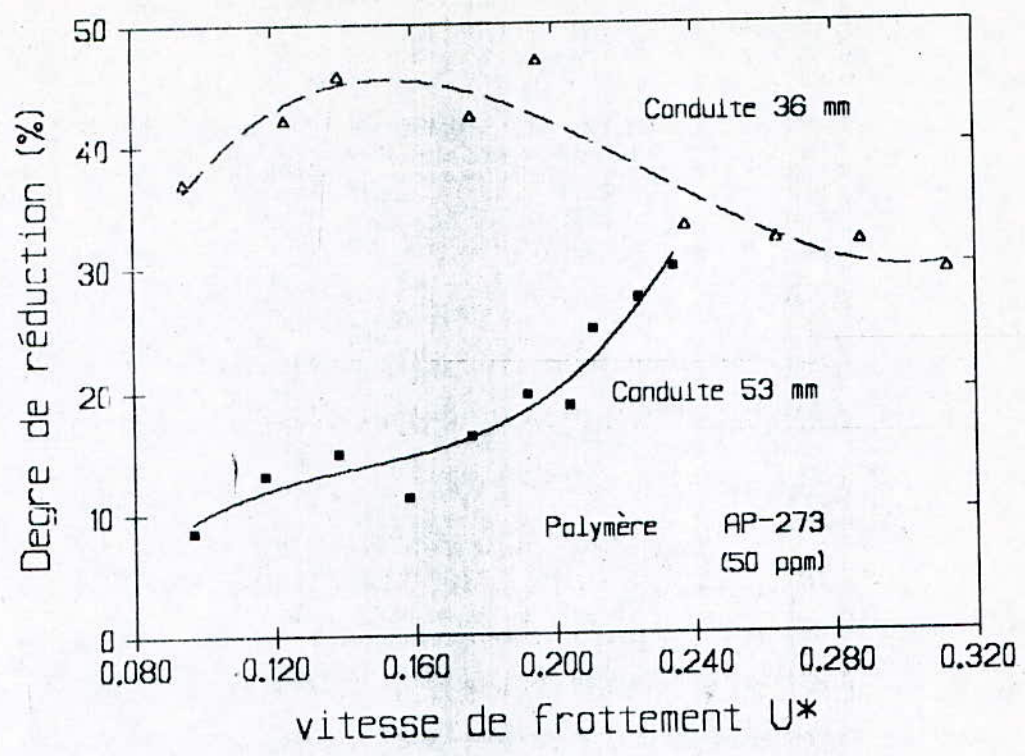


FIGURE IV-37 INFLUENCE DU DIAMETRE DE LA CONDUITE SUR LE TAUX DE REDUCTION DANS LE CAS DES POLYACRYLAMIDES

CONCLUSION

i
V CONCLUSIONS :

Les travaux effectués concernent l'écoulement des mixtures polymériques en variant les paramètres suivants : la concentration en sédiment (C_v) et en polymère (C_p), la nature de ce dernier, la vitesse moyenne d'écoulement U_m et le diamètre de la conduite. A cet effet l'utilisation des particules solides récupérées au niveau de la digue du barrage de Fergoug a permis dans la première phase de notre étude à mettre en évidence les caractéristiques de cette vase à l'état floculé et défloculé. Le comportement de cette vase aux concentrations faibles ($C_v < C_{vum}$) est newtonien. Au delà de cette limite elle se comporte comme des fluides non-newtoniens (Bingham), L'addition à une mixture à concentration de vase donnée de différentes concentrations de polymères C_p telle que $C_p < C_{pum}$ a pour effet de changer les caractéristiques physiques de la mixture caractérisée par sa viscosité, sans changer son comportement rhéologique.

L'écoulement de cette mixture fait intervenir des forces de frottement visqueux et turbulent, qui ont pour effet la dégradation de l'énergie sous forme de perte de charge. La réduction de cette perte de charge est obtenue dans le cas des mixtures vase-eau dans la conduite de 36 mm de diamètre. Par contre, pour la conduite de diamètre égal à 53 mm, cet effet disparaît. Le même effet de la non réduction est constaté lorsqu'on ajoute plusieurs types de polymères à différentes concentrations à la mixture $C_v=10\%$. En diminuant la concentration des particules solides à 2.3%, un effet de réduction est obtenu lorsqu'on ajoute 2000 ppm de CMC dans la conduite de 36 mm de diamètre. La fragilité des chaînes polymériques du Polyox et du PAM et la présence de particules solides constituent un véritable obstacle pour l'apparition de l'effet de réduction dans le cas de notre installation. En utilisant ces polymères dans de l'eau claire, on trouve des résultats similaires à ceux trouvés par d'autres auteurs. L'effet de réduction apparaît mieux lorsqu'on représente λ en fonction du nombre de Reynolds. La nature du polymère, le diamètre de la conduite et la nature du solvant ont une grande influence sur l'Onset (début de réduction) et le degré de réduction. A partir d'une concentration limite, le taux de réduction reste constant et même diminue.

30

Perspectives :

Cette étude peut avoir un prolongement. En particulier, il semble intéressant d'étudier

- la modélisation rhéologiques des mixtures polymériques.
- l'influence des mixtures polymérique sur la structure de l'écoulement turbulent.
- la dégradation des mixtures (vase) polymériques.
- la formulation des pertes de charge de ce type de mixture.
- l'influence des polymères sur les mixtures hétérogènes.

BIBLIOGRAPHIE

i

BIBLIOGRAPHIE

[1] KLINE S.J, REYNOLDS W.C & AL
 "The structure of turbulent boundary layer".
 J.F.M, 30, 741, 1967.

[2] NYCHAS S.G, HERSHEY H.C, BRODKEY R.S.
 "A visual study of turbulent shear flow".
 J.F.M, 61, 513, 1973.

[3] GUPTA A.K, LAUFER J, KAPLAN R.E
 "spatial structure in the viscous sublayer".
 J.F.M, 50, 493, 1971.

[4] WILLMARTH W.W, LU S.S
 "Structure of the Reynolds stress near the wall"
 J.F.M, 55, 65, 1972.

[5] DONOHUE G.L, Mc LAUGHLIN D.K & TIEDERMAN W.G
 "Turbulence measurements with a laser anemometer measuring
 individual realization". Phys.Fluids, 15, 1920, 1972.

[6] CORINO E.R, BRODKEY R.S.
 "A visual investigation of the wall region in turbulent flow"
 J.F.M, 37, 1, 1969.

[7] LAUFER J.
 "Investigation of turbulent flow in a two dimensional channel"
 N.A.C.A.T.R, 1053, 1951.

[8] CHURCHILL S.W, USAGI R.
 A.I.C.H.E, J, 48, 1121, (1972).

[9] BLASIUS.H,
 "das ähnlichkeitgesetz bei reibungsvorgängen in
 flussigkeiten forschg"
 MITT FORSCHUNGARB.ARB.Ing.West, n° 134, 1913.

[10] CARLIER M.
 "Hydraulique generale et appliquee".
 ed Eyrolles (1980).

[11] CHURCHILL S.W,
 "Friction factor equation spans all fluid flow regimes "
 Chem.Eng. Vol 84, n° 24, p 91, 1977.

[12] NACKAB .J

"Calcul direct, sans itération, de la perte de charge en conduite par la formule de Colebrook"

La HOUILLE BLANCHE N°1-1988

[13] TOMS B.A,

"Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at low high Reynolds numbers"

Proc.Int.Congress.Rheologie, sheveningen, Holland 1948.

[14] MYSELS.J.G,

U.S.Patent, n°2, 492, 173, 1949.

[15] LEVY J & DAVIS S.

"Drag-measurements on a thin plate in dilute polymer solutions."

International.Shipbulding.Progress, Vol 14, n° 152, 1967.

[16] FRUMAN D & SULMONT P.

"Réduction de la résistance d'une plaque plane dans les solutions de polymères"

C.R.Acad de Paris, t 268, pp 1493-96, 1969.

[17] ELATA C, LEHRER J.

Frictional drag-reduction"

Israel.J of.Tech, 3, p 1, 1965.

[18] GADD G.

"Reduction of turbulent friction in liquids by dissolved additives".

[19] GADD G E.

"Turbulence damping and drag reduction produced by certain additives in water"

nature, 206, p 463, 1965.

[20] BRIECHE.F

"Mechanical degradation of high polymer."

Journal.Applied.Polymer science. 4, 10, pp 101-106, 1960.

[21] SAVINS J.G.

"Some comments on pumping requirements for non newtonien fluids."

J. of the institute of petroleum, 47, 329, (1961).

[22] RAMU K.L.V, TULLIŠ J.P.

"Velocity profils with polymer injection in developing flow."

Communication privée (1974).

- [23] DODGE D.W and METZNER
 "Turbulent flow of non-Newtonian systems"
 A.I.C.H.E journal , 5, 2, pp 189-204, June 1959.
- [24] ASTARITA G.
 "Possible interpretation of the mechanism of drag reduction
 in viscoelastic liquids".
 I.E.C.Fund, 4, pp 354-356, 1965.
- [25] VIRK P.S.
 "Drag reduction fundamentals."
 A.I.C.H.E, J, 21, pp 625-656, (1975).
- [26] HOYT J.W.
 "The effect of additives on fluid friction "
 J.of Basic.Eng, Tr, Asme, pp 258-285, 1972.
- [27] SCRIVENER O.
 "Etude de l'influence des solutions de polymères sur la
 structure de l'écoulement turbulent dans une conduite lisse"
 Thèse de Docteur es-sciences Université de Louis Pasteur
 Strasbourg 1975
- [28] VIRK P.S.
 "Turbulent kinetic energy profiles during drag-reduction"
 Physics of Fluids, 18, pp 415-419, 1975.
- [29] PRUITT G.T, CRAWFORD H.R.
 Investigation for the use additives for the reduction of
 pressure losses"
 Final Rapport. Western CO. Res.Div.Rep, p 68, 1965.
- [30] GADD G.E.
 "Turbulence suppression "
 N.P.L.Ship Div.T.M, 228, 1968.
- [31] ELATA, LEHREN and KAHANOVITZ
 "Turbulent shear flow of polymer solutions"
 Journal.technology, 4, 1/2, pp 87-95, fev 1966.
- [32] VIRK P.S & Al.
 "The Toms phenomenon turbulent pipe flow of dilute polymer
 solutions".
 J.F.M, 30, pp 305-328, 1967.
- [33] WHITE A.
 "Turbulent drag-reduction with polymer additives"
 J.of Mech.Eng.Science, 8, 452, 1966.

[34] VLEGAAR J, DAMMERS W.R, TELS M.
 "The diameter effect in drag-reduction"
 Chem.Eng.Science, 23, 1152, 1968.

[35] WHITSITT N.F, HARRINGTON L.J, CRAWFORD H.R.
 "Effect of wall shear stress on drag-reduction of visco-elastic fluids"
 Ed.Viscous Drag-reduction. Plenum Press, N, V, 265, 1968.

[36] BERNER C.
 "Etude statistique de la structure de turbulence dans les fluides non-newtoniens"
 "Thèse de docteur DE 3e cycle Université Louis Pasteur Strasbourg 1980.

[37] RUDD J.M.
 "Velocity measurements made with a laser doppler-meter on the turbulent pipe flow of a dilute polymer solution."
 J.F.M., 51, pp 673-685, 1972.

[38] PATTERSON G.K, CHOSNEK J, ZAKIN J.L.
 "Turbulence structure in drag reducing polymer solution"
 Proc.Int.Symposium on structure of turbulence and drag-reduction".
 Physics.of.Fluids, 20, 10, 1977.

[39] LOGAN S.E.
 "Laser velocimeter measurement of Reynolds stress and turbulence in dilute polymer solutions"
 A.I.A.A.J, 10, pp 962-964, 1972.

[40] VIRK P.S.
 "Drag-reduction in rough pipes"
 J.F.M, 45, pp 225-246, 1971.

[41] BERMAN N.S.
 "Drag-reduction by polymers".
 Anual. Review. Fluid Mech, 10, pp 47-64 (1978).

[42] METZNER and REID
 "Flow of non-newtonian fluids correlation of the laminar, transition and turbulent flow regions"
 A.I.CH.E journal, 1, 4, pp 434-440, Dec 1955.

[43] FRUIT & AL
 Turbulent heat transfer to dilute polymer solutions
 Cawford.Western.CO.DALLAS.TEXAS, Report n° DTMB-2, 1966.

[44] VIRK and MERILL

"The onset of dilute polymer solution phenomena"
"Viscous drag-reduction" Ed.C.S.Wells plenum press 1969.
J.F.M.43,4.

[45] EL PERIN I.T & al.

"Decreasing the hydrodynamics resistance of pipelines"
Int Chem Eng, 7, 276, 1967.

[46] GADD.G,

"differences in normal stress in aqueous solutions of
turbulent drag-reducing additives"
Nature, 212, pp 1348-1352, 1968.

[47] WALSH M.

"Theory of drag reduction in dilute high polymer flows".
Inst.shipuilding.progress, 14, f34, 1967.

[48] JOHNSON B, BARCH R.H.

"Effect of drag-reducing additives on boundary layer
turbulence".
J of hydronautics, 2, 108, 1968.

[49] LUMLEY J L .

"The toms phenomenon anomalous effects in turbulent flow in
dilute solutions of high molecular weight linear polymers
Applied.Mech Devew, 20, 1139, 1967.

[50] PFENNINGER W.

"A hypotesis of the reduction of the tubulent friction drag
in fluid flows by means of additives"
Nothrop.corp.norair.division.report, 179, 1967.

[51] PETERLIN A.

"Molecular model of drag-reduction by polymer solutes "
Nature, 227,pp 598-599, 1970

[52] GYR A.

"Burst cycle and drag-reduction"
J of Applied.Mathematics and Physics, 27,

[53] A.G.BAIN, S.T.BONNINGTON.

"The hydraulic transport of solid by pipeline".
Pergamon press, 1970.

[54] GOVIER.G.W, AZIZ.K.

"The flow of complex mixtures in pipes".
Van Nostrand Rheinold company, New york 1972.

- [55] PARZONKA.W.
 "Transport de solide en conduite. Caractéristiques globales et locales son application industrielle".
 Note interne, Université de Toulouse, 1972.
- [56] CONDOLIOS.E, TERRIER.A.
 "Evolution des connaissances sur le transport en conduite des solides par saltation."
 S.H.F, 12^{eme} journée de l'hydraulique, Rapport 1, Paris 1972.
- [57] DURAND R.
 "Basic relationships of transportation of solids in pipes experimental research."
 Proc.Intern.Association for hydraulic research, Mineapolis 1953
- [58] PARZONKA W, SCRIVENER O.
 "Modèles rhéologiques appliqués au transport solides en conduites"
 C.R. 21^o colloque du groupe français de rhéologie
 "Rhéologie des Fluides Hétérogènes", Strasbourg 1986.
- [59] CZABAN S.
 Détermination numérique de paramètres du transport des mélanges rhéostables sol-eau en conduites.
 Dissertation Dr d'état, Acad d'agriculture de Wroclaw (Pologne) 1986.
- [60] PARZONKA W, KEMPINSKI J.
 "Etude du transport des matériaux organiques en conduites"
 Archiwum Hydraurtechniki, Acad, Polon, des sciences, 1983, pp 361-376.
- [61] BOGUE D.G.
 I. et Ec Fundament, 51, p 874, (1959).
- [62] BOWLUS D.A BRIGHTON J.A.
 J. Basic. Eng, Sept, p 431, 1968.
- [63] HINZE J.O.
 "Turbulence"
 Mc Graw Hill, Ed 1959.
- [64] SEYER F.A, CATANIA P.J.
 Can. J. of Chem. Eng, 50, p 31, (1972).

[65] PARZONKA.W
 "Caractéristiques rhéologiques des vases des barrages-retenues".
 Rhéologie des Fluides Hétérogènes-C.R.21^{ème} Colloque GFR,1986.

[66] KORSO.K
 "Contribution à l'analyse du processus de la sédimentation dans le barrage retenue de Fergoug."
 Dissertation Post-graduation , U.S.T.O, 1987.

[67] BELHADRI.M
 Etude des pertes de charge pendant le transport de vase en conduite horizontales".
 Thèse de Magister, U.S.T.O, Mars 1988.

[68] ZIANI.N
 "Rhéologie et tassement des superficielles du barrage retenue de Fergoug."
 Dissertation de Post-graduation U.S.T.O, 1987.

[69] SHAVER R.G, MERILL E.W.
 A.I.C.H.E, J, 5, p 181, (1959).

[70] TRIBOLET.B
 Thèse de Doctorat es-sciences. Paris VI.

[71] NEWITT.D.M, RICHARDSON.J.F, GLIDDON.B.J
 "Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes."
 TRANS.Inst.Chem.Eng, vol 39, p 93, 1961.

[72] YU J.F.S, ZAKIN J.L & PATTERSON G.K
 "Mechanical degradation of high molecular weight polymers in dilute solution"
 J.Ap.Polymer.sci, 23, pp 2493-2512, 1979

[73] GRAMAÏN .P, PHILIPPIDES .P
 "Principaux facteurs physico-chimiques caractérisant l'efficacité des solutions de polymères en réduction de frottement hydrodynamique".
 Colloques Internationaux du CNRS, N°231, Polymères et lubrification.

[74] SELLIN R.H.J & OLLIS M.
 "Effect of pipe diameter on polymer drag-reduction"
 Ind.Eng.Chem.Prod.Res.Dev. 22, pp 445-452, 1983.

30

[75] SCRIVENER O.

Champ des vitesses dans un écoulement turbulent interne en présence d'additifs réducteurs de frottement.

Colloques Internationaux du CNRS N°233 POLYMERES ET LUBRIFICATION

[76] HOYT.J.W

Trans, ASME, 1972, 94, ser, D2, 258.

[77] WHITE & HEMMING.J.A.G

"Drag-reduction by additives".

a review and bibliographie.

British.Hydromechanics.Research.Assocition, p 182, 1976.