

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Departement Hydraulique

THESE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Pour l'Obtention
DU DIPLOME DE MAGISTER

Par :

Wahiba MOKRANE
Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Sujet

**ETUDE DU COMPORTEMENT DU COEFFICIENT
DE FROTTEMENT DANS DES CANAUX LISSES
ET RUGUEUX**

Soutenue en Janvier 1996
Devant la commission d'examen :

Président	M ^r A.KETTAB	Maître de Conférence	ENP
Examineurs	M ^r M.BERKANI	Chargé de Cours	ENP
	M ^r M.CHERARED	Thèse d'Etat	ENP
Rapporteurs	M ^r A.BILEK	Chargé de Cours	ENP
	M ^r Y. MOULOUDI	Chargé de Cours	ENP
	M ^{elle} S.BENMAMAR	Chargé de Cours	ENP

ملخص

هدف هذه الدراسة هو تعيين معامل الاحتكاك عن طريق منهج تجريبي يهتم بتأثير الخشونة ونوع الجريان في نوعين من القنوات المفتوحة. تحليل النتائج التجريبية بين بان قوانين القنوات المفتوحة الملساء يمكن ان توحد بعكس الخشنة التي يتغير فيها شكل القوانين من حالة خشونة الى اخرى .

RESUME

Cette étude a pour objet l'évaluation du coefficient de frottement par voie expérimentale , en considérant l'influence de la rugosité et du régime d'écoulement , pour deux types de canaux . L'analyse des résultats expérimentaux a montré que pour les canaux lisses la formulation du coefficient de frottement f , peut être considérée comme unique , au contraire des canaux rugueux , ou elle varie d'un état de rugosité à un autre .

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate ,experimentaly ,the friction factor with the consideration of the roughness and the flow regime influence , for two types of channel .The analysis of the experimental results has chown that , for the smooth case , the loys will be regarded as single contrary to the rought case where the their form changes from a roughness to another .

D E D I C A C E S

A mon père

ma mère

A toute ma famille et mes amis

R E M E R C I E M E N T S

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à l'ensemble du personnel du département d'hydraulique et en particulier à :

- Mes promoteurs M^r Mouloudi et M^{elle} BENMAMAR, qui ont bien voulu assurer la direction de mon travail.
- Mr A.KETTAB, Maître de conférence, qui a bien voulu accepter d'assurer la présidence du jury.
- M^r M.CHERARED, Docteur d'Etat à l'ENP, qui a accepté d'être membre de jury.
- M^r A.BILEK, Charge de Cours à l'ENP, d'avoir également accepté d'être membre de jury.
- M^r M.BERKANI, Chargé de Cours à l'ENP, d'avoir accepté d'être membre de jury.

J'adresse également l'expression de toute ma gratitude à :

- M^r Bouache, chargé de cours à l'ENSH, pour son aide
- M^r MEDJEJ, du Service de Métrologie de la SNVI pour son aide
- M^r W.Hager, Professeur à l'école polytechnique de LAUSANE pour son aide et ses conseils.

AVANT PROPOS

Le problème du mouvement d'un liquide dans les canaux découverts est en réalité, beaucoup plus complexe que celui de l'écoulement à l'intérieur des systèmes en charge.

Les canaux découverts et en particulier les cours d'eau naturels présentent les formes et les rugosités les plus diverses, et font par conséquent appel, à un plus grand nombre de variables.

Ce problème, présenté dans l'évaluation de l'expression de la vitesse a fait la raison de plusieurs recherches depuis le 18^{ème} siècle. Des formules empiriques et semiempiriques ont été suggérés.

Les premières recherches ont abouti à des expressions empiriques, telles que celle de Bazin, de Ganquillet-Kutter et de Manning-Strikler, dont la précision est liée au choix du coefficient de rugosité, jugé caractéristique du type de paroi du canal considéré. Ce choix est souvent délicat, vu, la disproportion qui existe entre le nombre de coefficients proposé et la variété considérable des types de parois.

En 1938 Keulegan a tenté l'idée d'appliquer les résultats obtenus pour les conduites forcées à l'écoulement à surface libre. Ceci a été suivi par d'autres investigations jusqu'au temps actuel telles que celles de : Graf, Bray, Jin Jin Wang...ect qui ne sont pas arrivés à une formulation unique ayant un caractère universel pour le dimensionnement des canaux.

Les formules anciennes sont le plus souvent utilisées malgré le peu de précision qu'elles peuvent donner.

Il est donc important d'ouvrir ce sujet aux chercheurs afin de pouvoir aboutir à des résultats satisfaisants.

La présente étude est une partie intégrante de ce problème.

Dans ce cadre nous avons établi une étude théorique basée sur le concept de la couche limite et comprenant une comparaison graphique des formules anciennes, cette partie est suivie d'une étude expérimentale qui consiste à l'évaluation du coefficient de frottement, f , pour deux types de canaux, le premier étant un canal bidimensionnel et le second un canal rectangulaire, pour différents états de rugosité.

INTRODUCTION

Page

GENERALITES

I - Etude bibliographique	6
1/ Historique	7
2/ Représentation graphique du coefficient de Chezy ,C,	23
3/ Représentation graphique du coefficient de frottement, f,	27
4/ Comparaison graphique entre les formules anciennes et celle de Nikuradsé.	30
5/ Définition de la problematique	32
II- Détermination du coefficient de frottement dans les canaux	33
1/ Développement d'un écoulement	34
1-1 Définition de la couche limite	
1-2 Zones d'écoulement	
1-3 Hypothèses de la couche limite	
1-4 Shéma de base des équations du mouvement	
2/ Ecoulement Uniforme	40
2-1 Expression de force de frottement	
2-2 Répartition de la vitesse	
3/ Ecoulement nonuniforme	45
3-1 Expression de la force de frottement	
3-2 Répartition de la vitesse	
4/ Le coefficient de frottement	47
5/ Classification de l'écoulement	48
6/ Equation de Chezy	50
III - Etude expérimentale	53
1 - Appareillage expérimental	54
1-1 Installation "I"	54
1-2 Installation "II"	58
1-3 Hypothèses de calcul	62
1-4 Procédé de calcul	62
IV - analyse des résultats expérimentaux	65
1 - Résultats expérimentaux	66
2 - Interprétation	67
3 - Conclusion	86

CONCLUSION GENERALE

Annexe I : Tableau 1 à 10

Annexe II : Méthode des moindres carrés

NOTATIONS

Symboles	Définition	Dimension
B	Largeur du canal	L
C	Coefficient de Chezy	$L^{1/2} \cdot T^{-1}$
Cd	Coefficient du débit	$L^{5/2} \cdot T^{-1}$
Cdr	Coefficient de drag des éléments rugueux	
Cf	Coefficient de frottement	
Dh	Diamètre hydraulique	L
Dx	Diamètre dont x % des grains sont plus fins	L
f	Coefficient de frottement	
Fr	Nombre de froude	
g	Accélération de la pesanteur	LT^{-2}
h	Profondeur de l'écoulement	L
hd	Hauteur de la lame deversante	L
I	Pente du canal	
J	Pente de la ligne d'énergie	
K	Dimension des aspérités	L
n	Coefficient de manning	
P	Pression statique	$ML^{-1}T^{-2}$
Q	Débit de l'écoulement	$L^3 T^{-1}$
Re	Nombre de Reynolds	
Ref	Nombre de Reynolds de frottement	
Rh	Rayon hydraulique	L
Rh/K	Poli relatif	
K/Rh	Rugosité relative	
S	Section mouillée	L^2
U	Vitesse moyenne	LT^{-1}
Uf	Vitesse de frottement	LT^{-1}
Pe	Périmètre mouillé	L
Ui	Vitesse instantanée	LT^{-1}
u	Echelle de la vitesse	LT^{-1}
P*	Pression motrice	$ML^{-1}T^{-2}$
l	Echelle de longueur	L
r	Coefficient de corrélation	
δ	Epaisseur de la couche limitée	L
μ	Viscosité dynamique	$M L^{-1} T^{-1}$
ρ	Masse volumique	ML^{-3}
ν	Viscosité cinématique	$L^2 \cdot T^{-1}$
γ	Coefficient de Bazin	
Υ	Une fonction	
α	Coefficient de correction de la vitesse	
λ	Espacement entre les éléments rugueux	
β	Constante d'intégration	

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1 : Section transversale du canal	02
Figure 2 : Evolution de f , en fonction de Re pour des surfaces lisses	10
Figure 3 : Evolution de f , en fonction de Re pour des surfaces rugueuses.	12
Figure 4 : Evolution de f , en fonction de Re et Rh/k . suivant COLEBROOCK-WHITE.	17
Figure 5 : Evolution de f , en fonction de Re pour les canaux rectangulaires, suivant Zegjda	17
Figure 6 : Variation de C en fonction de h/K	21
Figure 7 : Variation de C en fonction de Dh suivant Bazin	24
Figure 8 : Variation de C en fonction de Dh suivant Guanguillet-Kutter	25
Figure 9 : Variation de C en fonction de Dh suivant Manning	26
Figure 10: Comparaison graphique des formules exprimants, C	27
Figure 11: Evolution de C , en fonction de Dh suivant Nikuradsé.	27'
Figure 12: Installation "I"	55
Figure 12a : Etat de rugosité en P220	55'
Figure 12b : Etat de rugosité en P 80	55'
Figure 13: Courbe granulométrique du P220.	57
Figure 14: Courbe granulométrique du P80.	57
Figure 15: Installation "II"	59
Figure 16: Schéma de principe du venturimètre	60
Figure 17: Courbe d'étalonnage du venturimètre	60'
Figure 18a : Forme ondulatoire de la rugosité	62
Figure 18b : Forme de galets nonuniforme de la rugosité	62
Figure 19 : Shéma des calculs des paramètres hydrauliques	63
Figure 20 : Variation de U/U_f en fonction de $\ln RhU_f/\Delta$ Cas du plexi-glass.	67
Figure 21 : Evolution de f , en fonction de Re : cas du plexi-glass	68
Figure 22 : Variation de U/U_f en fonction de $\ln RhU_f/\Delta$ Cas de P220.	69
Figure 23 : Evolution de f , en fonction de Re : cas de P220	71
Figure 24 : Variation de U/U_f en fonction de $\ln RhU_f/\Delta$ Cas de P80.	72
Figure 25 : Evolution de f , en fonction de Re : cas de P80.	73
Figure 26 : Variation de U/U_f en fonction de $\ln RhU_f/\Delta$ Cas du PVC.	76

Figure 27	: Evolution de f , en fonction de Re : cas du PVC.	78
Figure 28	: Evolution de f , en fonction de Re : cas de rugosité ondulatoire ($K = 0,9\text{cm}$)	79
Figure 29	: Evolution de f , en fonction de Re : cas de rugosité à galets nonuniformes ($K = 1,275\text{cm}$)	81
Figure 30	: Evolution de C , en fonction de Rh/K pour : $K = 0,9\text{cm}$ et $K = 1,275\text{cm}$	83
Figure 31	: Comparaison graphique des données expérimentales pour la région complètement rugueuse avec les formules anciennes et celle de Nikuradsé.	84

LISTES DES TABLEAUX EN ANNEXE I

- Tableau 1 : Exposants a,b dans : $U = CR^a h. I^b$
- Tableau 2 : Valeurs moyennes des coefficients de rugosité
- Tableau 3 : Désignation des tamis et distribution pondérale des macrograins P220 et P80
- Tableau 4 : Etalonnage de venturimètre
- Tableau 5 : Résultats expérimentaux
Cas du plexi-glass (K=0,00006cm)
- Tableau 6 : Résultats expérimentaux
Cas du papier abrasif P220 (K=0,01cm)
- Tableau 7 : Résultats expérimentaux
Cas du papier abrasif p80 (K=0,02cm)
- Tableau 8 : Résultats expérimentaux.
Cas du PVC (K=0,0065cm)
- Tableau 9 : Résultats expérimentaux
Cas de la rugosité ondulatoire (K=0,9cm)
- Tableau 10 : Résultat expérimentaux
Cas de galets de forme nonuniforme (K=1,275cm)
- Tableau 11 : Tableau récapitulatif

La présente thèse résume l'ensemble des résultats obtenus, dans le cadre d'une étude expérimentale, portant sur le problème de dimensionnement des canaux à ciel ouvert, présenté dans la détermination du coefficient de frottement pour différents cas de rugosité sur deux types de canaux ; rectangulaire et bidimensionnel.

Le but de notre travail est d'étudier le comportement du coefficient de frottement en considérant l'effet de la rugosité et du régime d'écoulement simultanément.

GENERALITES

A/ ECOULEMENT A SURFACE LIBRE

Écoulement caractérisé par une surface limitée, à laquelle la pression est égale à la pression atmosphérique. C'est le cas des écoulements dans les canaux artificiels (drains, égouts...), des cours d'eau naturels, des rivières, des estuaires ...etc.

En considérant la variation des paramètres hydrauliques dans le temps, on distingue :

- écoulement permanent
- écoulement non permanent

La variation des paramètres hydrauliques dans l'espace, fait apparaître trois types d'écoulement :

a. écoulement uniforme

Caractérisé par une constance des paramètres d'une section à une autre.

b. écoulement graduellement varié

La variation des paramètres de l'écoulement est progressive.

c. écoulement brusquement varié

Caractérisé par une évolution rapide des paramètres hydrauliques.

B/ PARAMETRES HYDRAULIQUES

1- La section transversale

C'est la section plane normale à la direction générale de l'écoulement

2- La section mouillée

C'est la portion de la section transversale occupée par le liquide

3- Le périmètre mouillé

C'est la longueur de la ligne de contact entre le liquide et les parois.

Voir Fig 1 ci-dessous

avec : B : largeur au miroir [m]
h : distance entre la surface libre et le point le plus bas [m]
S : Surface mouillée [m²]
Pe: Périmètre mouillé [m]

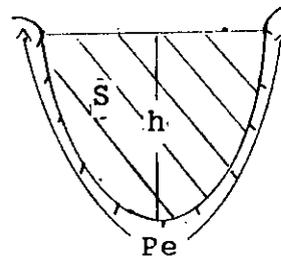


Figure 1

4- Le rayon hydraulique

Désigné par Rh il exprime le rapport de la section mouillée au périmètre mouillée.

$$Rh = \frac{S}{Pe}$$

5- Le diamètre hydraulique

Il est donnée par : $Dh = 4Rh$

C/ PARAMETRES PHYSIQUES AGISSANT SUR L'ECOULEMENT A SURFACE LIBRE

1- Effet de la viscosité

Les forces de frottement engendrées par la viscosité, comparées aux forces d'inertie, constituent un critère de classification de l'écoulement. Ceci est exprimé par le nombre de Reynolds Re :

Si $Re < Re_{cr}$	écoulement laminaire
Si $Re = Re_{cr}$	écoulement critique
Si $Re > Re_{cr}$	écoulement turbulent

Avec Re_{cr} : Valeur critique de Re . Egale à 2300 environ, pour l'écoulement en charge et il est plus faible pour l'écoulement à surface libre. Elle dépend de la rugosité.

2- Effet de la gravité

Représenté par le rapport des forces d'inertie aux forces de gravité, dit "Nombre de Froude", et est exprimé par :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$

Si $Fr < 1$	Régime fluvial
Si $Fr = 1$	Régime critique
Si $Fr > 1$	Régime torrentiel

3- Effet des paramètres géométriques :

a. La forme de la section transversale :

L'effet de ce paramètre est présenté en général par le rayon hydraulique. Des études effectuées par l'American Society of Civil Engineers [13], ont montré que l'effet de la forme de la section transversale est faible.

b. Largeur du canal :

La largeur du canal fait intervenir la notion de canal large, ou encore écoulement bidimensionnel, dans le cas où le rapport de la largeur du canal à la profondeur de l'eau est supérieur à "5" [11].

c. Effet de la pente du fond

La pente longitudinale du fond du canal a un rôle considérable dans l'allure physique de l'écoulement, ainsi que dans son calcul hydraulique. Si elle est assez importante, il peut s'installer une instabilité à la surface de l'eau, se manifestant par l'apparition d'une série d'ondes, dites "Ondes de gravité" ou "ondes en cascade" et par un déferlement qui provoque un entrainement d'air.

4. Effet de la rugosité

Par définition, la rugosité, K , considérée est la hauteur moyenne des aspérités, recouvrant la surface des parois, en contact avec le liquide. Chaque type de matériau présente un état de rugosité différent, caractérisé par :

- La forme des aspérités
- Leur dimension
- Leur distribution

Ce paramètre a un effet similaire à celui de la viscosité. Mais la diversité des états de rugosité d'un matériau à un autre, rend son domaine d'étude plus vaste.

5/ Effet de la Turbulence :

En turbulence, les processus physiques de base, c'est à dire les transferts locaux de quantité de mouvement et de chaleur ne sont pas étudiés. En conséquence, le rôle de l'expérience pour l'étude des problèmes se rapportant aux écoulements turbulents est très important.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1/ HISTORIQUE

La vitesse moyenne de l'écoulement à surface libre est donnée par l'expression [7] :

$$U = C (RhI)^{\frac{1}{2}}$$

Dite expression de Chezy et C le coefficient de Chezy. Plusieurs propositions ont été faites depuis le dix-huitième siècle.

Ganquillet et Kutter (1869) [7] ont donné une expression du coefficient de Chezy en fonction de la pente du fond, de la nature de la paroi (n) et du rayon hydraulique.

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{I} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{Rh}} \left(23 + \frac{0,00155}{I} \right)} \quad (1)$$

En 1897 Bazin [7] a considéré que C dépend du rayon hydraulique et d'un coefficient caractéristique de la paroi, γ , et lui a attribué l'expression suivante :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{(Rh)^{\frac{1}{2}}}} \quad (2)$$

A partir de ces deux expressions nous pouvons déduire que la vitesse n'a pas une forme bien déterminée. D'autres chercheurs ont suggéré une forme unique du type puissance pour la vitesse comme suit [8] :

$$U = CRh^a \cdot I^b \quad (3)$$

Les exposants a et b sont donnés dans le tableau 1 Annexe I

En 1891 Manning [23] a établi l'expression suivante :

$$C = \frac{1}{n} Rh^{1/6} \quad (4)$$

Où n est le coefficient de rugosité de Manning.
 Cette formule est valable pour les fleuves, canaux et profils fermés, et dans les conditions suivantes :

$0,004\% < I < 2,5\%$ et $0,037 < Rh < 7m$
 et dans le cas d'un régime d'écoulement complètement rugueux

En 1904 [6] la théorie de la couche limite et le concept de la longueur de mélange a fait un important bouleversement dans l'évolution et le développement de l'hydraulique.

En 1925 PAVLOVSKIE [5] a proposé la formule suivante

$$C = \frac{1}{n} Rh^y \quad (5)$$

avec, $y = 2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{Rh} (\sqrt{n} - 0,1)$

qui est valable pour : $0,1 < Rh (m) < 3$
 et $0,011 < n < 0,04$

En 1932 [6] Nihuradsé a effectué ses fameuses expériences, sur les conduites dans le but d'étudier la distribution de la vitesse, le coefficient de frottement, f , et la classification de la rugosité. Ses résultats ont constitué une référence de base dans le domaine hydrotechnique.

En 1938 [18] une première tentative d'appliquer la théorie de Prandtl Von Karman à l'écoulement dans les canaux découverts a été introduite par Keulegan en se basant sur les données de Bazin pour des cas rugueux, et a proposé pour des canaux très larges :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,02 \text{ Log } \frac{Rh}{K} + 2,12 \quad (6)$$

En 1948 Muller [23], en tenant compte du transport solide avec un taux de 10%, a proposé :

$$\frac{1}{n} = 26 D^{0,90}$$

avec :

D90 est le diamètre des grains dont 90% des grains sont plus fins.

En 1959 [5] Chow a présenté les résultats expérimentaux de l'Université d'Illionis et de l'Université de Minnessota pour des canaux lisses et ceux de Varwich pour les canaux rugueux.

a/ Ecoulement turbulent hydrauliquement lisse :

La figure 2 page 10 représente la variation du coefficient de frottement f en fonction du nombre de Reynolds, Re , pour des canaux de forme rectangulaire et triangulaire avec des surfaces lisses. Sachant que :

l'équation de Blasius est donnée par :

$$f = \frac{0,223}{Re^{0,25}} \quad (8)$$

et l'équation de Prandtl Von Karman est donnée par :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \text{ Log } Re \sqrt{f} + 0,4 \quad (9)$$

$$\text{ou } \left(\frac{8}{f}\right)^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{k} \text{ Ln } \frac{Rh Uf}{\nu} + 3,5 \quad (10)$$

Les données dans la région turbulente, ($10^3 < Re < 10^5$), correspondent à la courbe de Blasius Prandtl Von Karman, la loi de l'écoulement en charge est donc représentative d'un écoulement à surface libre dans le cas d'un régime hydrauliquement lisse. Nous remarquons que l'influence de la forme du canal est faible.

UNIVERSITE D'ILLINOIS

* CANAL RECTANGULAIRE, 427cm DE LARGE EN VERRE

* CANAL TRIANGULAIRE, 90°, EN BOIS LISSE

UNIVERSITE DE MINNESOTA

* CANAL RECTANGULAIRE 50,82 DE LARGE EN ACIER

* CANAL TRIANGULAIRE, 30° A 130° EN ACIER

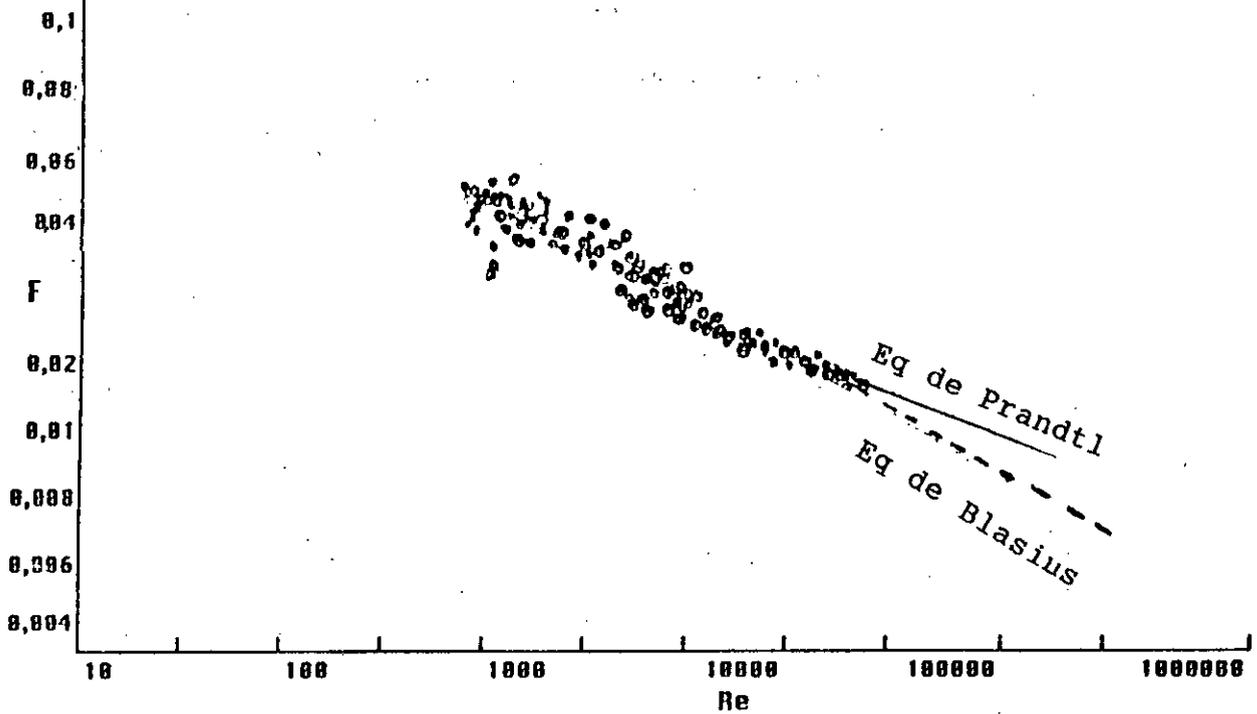


Fig - 2 -

Evolution du coefficient f ,
en fonction du nombre de Reynolds Re ,
pour des surfaces lisses

b/ Ecoulement turbulent rugueux :

La figure 3 page 12 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de Reynolds Re , pour deux types de canaux et pour deux cas de rugosité.

b-1- Canal Trapezoïdal :

b-1-1- Cas de rugosité absolue : $K = 0,04\text{cm}$

Pour des nombres de Reynolds compris entre $2 \cdot 10^3$ et 10^5 (région turbulente) et des rayons hydrauliques variant entre 1 et 7,2cm, nous constatons que les données expérimentales s'alignent sur une courbe, parallèlement à la courbe de Prandtl Von Karman, zone dite hydrauliquement lisse qui s'étend jusqu'à une valeur limite de Re d'environ 10^4 . Au delà de cette valeur, les points expérimentaux forment des courbes parallèles, qui représentent des fonctions croissantes du nombre de Reynolds Re , et décroissantes du rayon hydraulique R_h .

A une certaine valeur de Re , qui dépend de R_h , ces courbes deviennent des droites horizontales. Cette zone est dite "zone quadratique" ou "zone rugueuse". La zone intermédiaire entre cette dernière et la zone hydrauliquement lisse est appelée "zone de transition".

b-1-2- Cas de rugosité absolue : $K = 0,2\text{cm}$

Dans ce cas, la zone hydrauliquement lisse n'apparaît pas, vu l'importance dimensionnelle de la rugosité. Les données expérimentales forment des courbes parallèles décroissantes en fonction du rayon hydraulique R_h et croissantes en fonction du nombre de Reynolds Re . A une certaine valeur de ce dernier variant d'une courbe à une autre, les points expérimentaux forment des droites horizontales. Ce qui signifie que le coefficient de frottement f ne dépend plus de Re ; c'est la zone complètement rugueuse.

Remarque :

La zone complètement rugueuse de l'écoulement apparaît mieux dans le cas de rugosité, $K = 0,2\text{cm}$

b-2/ Canal triangulaire :

b-2-1- Cas de rugosité absolue : $K = 0,04\text{cm}$

Pour ce cas de rugosité, les points expérimentaux décrivent une allure de courbes, généralement, similaire à celle obtenue pour le canal trapezoïdal, sauf que la zone hydrauliquement lisse est moins importante. Ces courbes demeurent parallèles et ceci à partir d'une valeur du nombre de Reynolds, Re , d'environ $2 \cdot 10^3$

b-2-2-/ Cas de rugosité : $K = 0,2\text{cm}$

Les données expérimentales dans ce cas, se positionnent de manière analogue à celle du canal trapezoïdal, dans le même cas de rugosité.

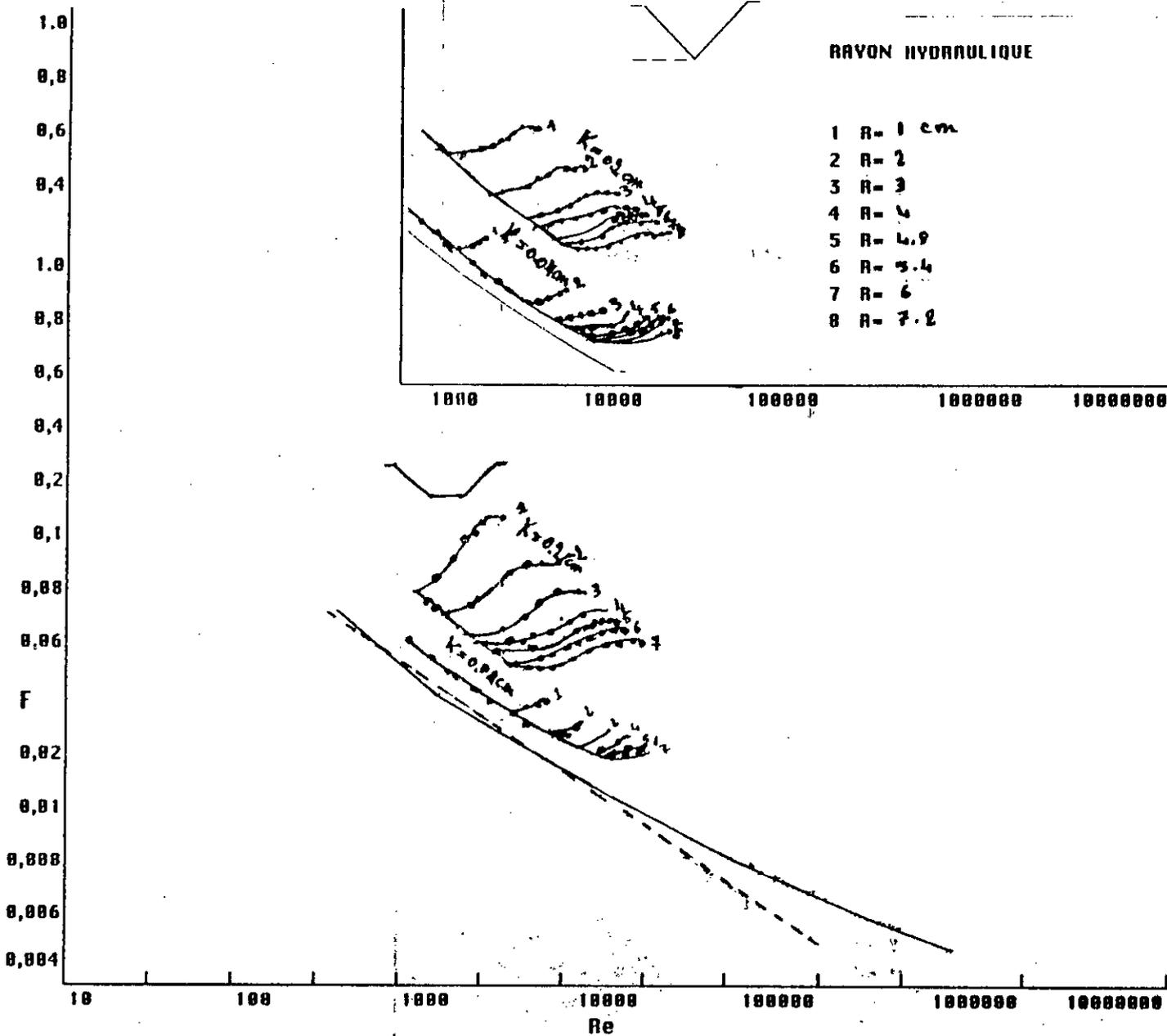


Fig - 3 -

Evolu tion du coefficient ,f,
en fonction du nombre de Reynolds ,Re,
pour des surfaces rugueuses

En 1966 [13] Henderson a constaté que l'idée d'utiliser l'équation de Colebrook White pour les écoulements à surface libre est applicable dans le cas des canaux de petites dimensions avec des surfaces vraiment lisse. Pour les canaux larges et rugueux, il est préférable de faire ses propres observations.

Kamphuis (1974) [23] a trouvé que le rapport Rh/D_{90} , est très variable entre 0,75 et 2,5, il propose pour les lits des cours d'eau naturels, dont la rugosité K ne dépasse pas la profondeur de l'eau, c'est à dire $K < h$, la relation suivante pour K :

$$K = 2 D_{90}$$

En 1979 [9]; pour un lit de galets, un nombre de Froude, Fr , inférieur à 1 et dans le cas de débits appréciables les formules suggérées par plusieurs auteurs sont comme suit :

Leopold Wolman et Miller, en utilisant les données de Brandywine ont introduit la relation suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \text{ Log } \frac{h}{D_{84}} + 1 \quad (12)$$

- Strickler et Müller ont proposé :

$$n = a D_{x\%}^{1/m} \quad (13)$$

où, a et m sont des constantes et :

$D_{x\%}$ diamètre des grains dont $x\%$ sont plus fins

- Chow et Seintürk ont suggéré, pour les cours d'eau naturels l'utilisation de la formule suivante, exprimant le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse de frottement :

$$\frac{U}{U_f} = 8,12 \left(\frac{Rh}{D_{90}} \right)^{1/6} \quad (14)$$

- En considérant l'effet de l'espacement, entre les éléments de la rugosité Judd et Peterson ont introduit la relation suivante [10]:

$$\left(\frac{8}{f} \right)^{\frac{1}{2}} = f_n(\lambda) \left(\frac{h}{B} \right)^{0,08} \left(\frac{h}{D_{90}} \right) \quad (15)$$

Où f_n est une fonction de λ , λ étant un coefficient caractéristique de l'espacement donné par :

$$\lambda = \frac{\sum_{z=1}^z A f}{A \text{ lit}} \quad (16)$$

Où AF : Section horizontale frontale des éléments rugueux

z : nombre de ses éléments

A lit : Section totale du lit

Puis ils ont proposé :

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \left(\frac{R_h}{0,365}\right)^{2,34} \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^{7(\lambda - 0,08)} \quad (17)$$

Dans la même année [10] une étude a été établie par Donald Wknight pour des débits compris entre 0 et 180 l/s, pour une pente constante et une rugosité de 3mm, a amené aux relations suivantes:

- Pour un écoulement semi lisse ($\frac{\lambda}{K} = 333$ à 13,9)

$$f = f_w \left(1 + 67,2 \cdot C_{Dr} \cdot \frac{B}{f} \cdot \frac{K}{\lambda}\right) \quad (18)$$

Avec,

f_w : Coefficient de frottement correspondant à un canal lisse

B : Largeur du canal [m]

: Espacement entre les éléments de la rugosité

C_{Dr} : Coefficient de drag des éléments rugueux, il est égal à 1,9 pour des éléments rectangulaires.

- pour un écoulement hyperturbulent ($\frac{\lambda}{K} = 10,4$)

$$\frac{1}{\sqrt{4f}} = 2 \log \left(\frac{2Re}{\sqrt{2} C_{Dr}} \right) + 1,75 + \frac{\sqrt{2} C_{Dr}}{4h} \left(2,5 - \psi \right) \quad (19)$$

avec,

$$\psi = 1 + \frac{Re \sqrt{4f}}{1,55 \cdot 10^5 h}$$

En 1979 5 [3] Bray a publié aussi une étude comparative entre des formules des écoulements dans les canaux, basé sur les données de 67 lits de rivière d'Alberta (USA) et au Canada dans les conditions suivantes :

- Lits de rivières graveleux
- Transport solide négligé
- Effet de la forme du lit négligé
- Ecoulement turbulent

1/ Equation de Manning

$$C = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

a) methode de strickler

$$n = a Dx^{1/6}$$

(20)

b) methode de Limerinos

$$n = \frac{0,113 h^{1/6} Rh}{1,16 + 2 \log \frac{Rh}{D84}}$$

(21)

2/ Equation de Keulegan

$$\frac{U}{Uf} = 6,25 + 5,75 \log \left(\frac{h}{K} \right)$$

(22)

Einstein a adopté $K = D65$
 et Kelleral's a adopté $K = D90$

3/ Equation de lacey

$$U = 10,8 \cdot h^{2/3} \cdot I^{1/3}$$

(23)

$$U = 10,8 \cdot h^{2/3} \cdot I^{1/3} \quad (23)$$

D'après l'étude critique de Bray, les meilleures résultats sont donnés par l'équation de Manning associée à celle de Limerinos.

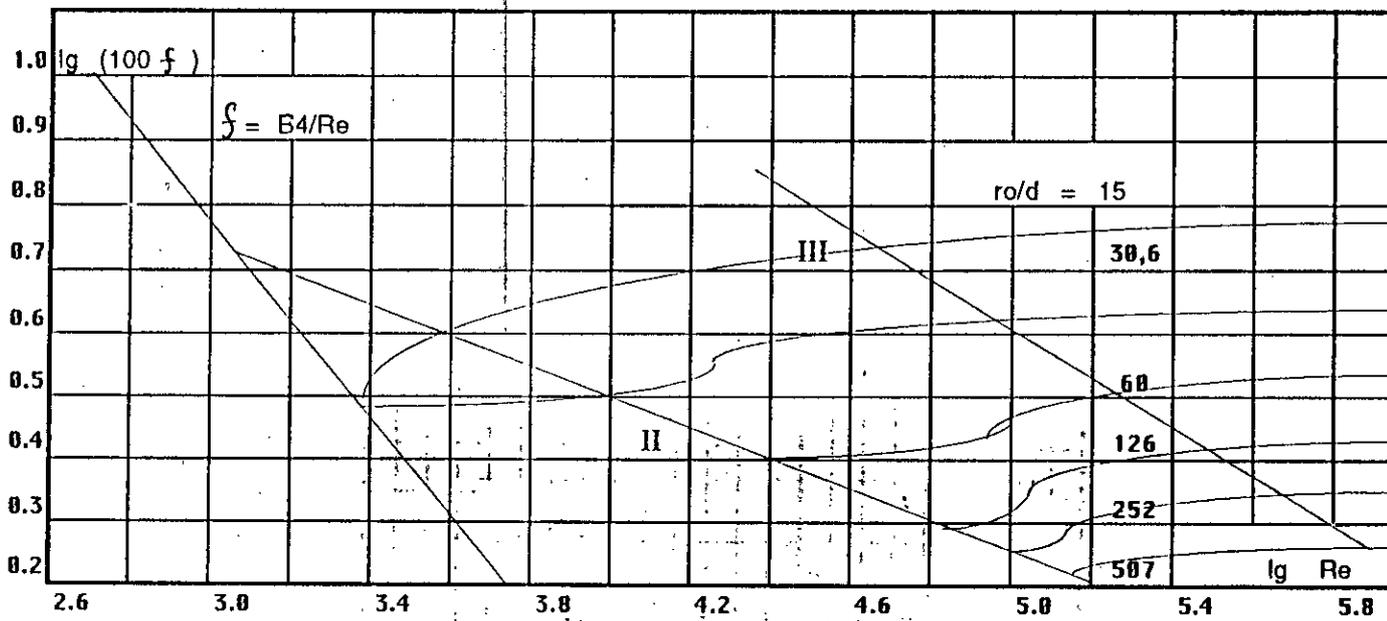
En 1980. [15]. Les expériences en canaux de laboratoire, réalisées par Zegjda ont acquis une importance particulière pour les hydrotechniciens. Il a trouvé que pour les canaux rectangulaires [18], on observe les mêmes zones de résistance que pour les conduites. D'après les données de Zegjda, les lois établies par Nikuradsé sont applicables pour les écoulements à surface libre. Pour la zone quadratique et pour une rugosité de forme uniforme, il propose [15].

$$f = \frac{1}{[2 \log (11,55 Rh)/K]^2} \quad (24)$$

ou

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{Rh}{K} + 2,13$$

Les figures 4 et 5 page 17 représentent, respectivement, l'évolution du coefficient de frottement f en fonction du nombre de Reynolds Re pour les conduites et les canaux rectangulaires. Nous remarquons que la limite de la zone laminaire pour les canaux est bien plus faible ($Re_{cr} \approx 10^3$) que pour les conduites ($Re \approx 2300$)



21

Fig -4-
 Evolution du coefficient de frottement ,f,
 en fonction du nombre de Reynolds ,Re,
 et du poli relatif ,Rh/k, suivant Colebrook. White

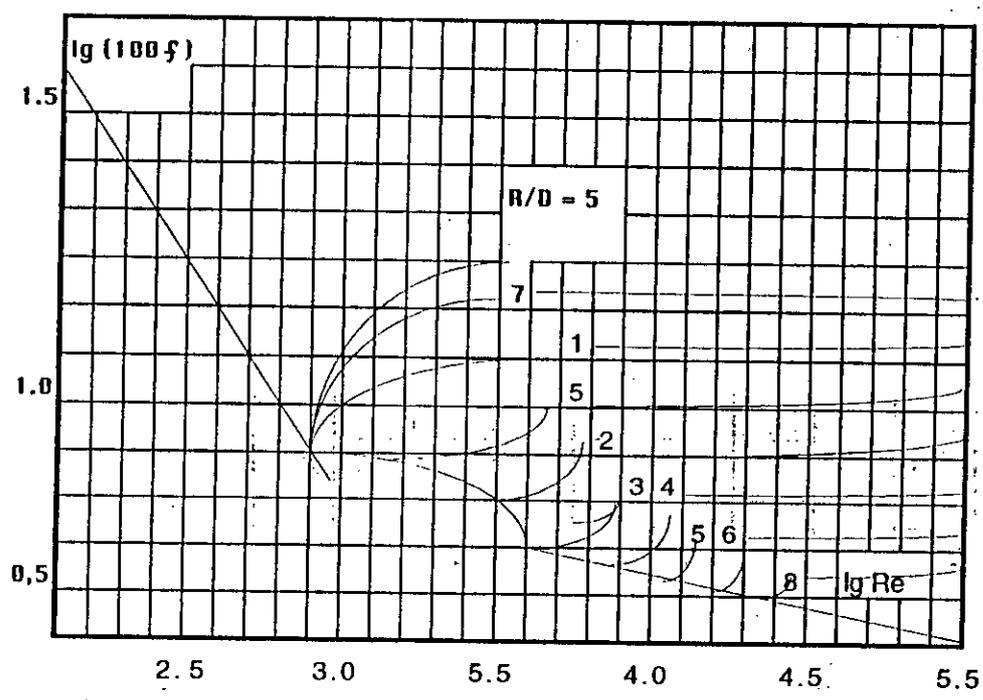


Fig -5-
 Evolution du coefficient de frottement ,f,
 en fonction du nombre de Reynolds ,Re, et
 du poli relatif ,Rh/k, pour les
 canaux rectangulaire, suivant Zegjda

En 1981 [23] Griffiths a fait l'analyse de plus de 200 données pour aboutir à l'équation de Limerinos :

$$\frac{U}{U_f} = 2\sqrt{2} (1,16 + 2,03 \log \frac{R_h}{D_{84}}) \quad (25)$$

ceci pour : $1 < \frac{R_h}{D_{50}} < 200$

et en négligeant le transport solide.

En 1984 [23] pour des rivières des montagnes, et en utilisant le D64 comme dimension caractéristique de la rugosité, Marchand et Col ont constaté que l'utilisation de la loi logarithmique suivante:

$$\frac{U}{U_f} = 5,62 \log \frac{R_h}{D_{84}} + 4 \quad (26)$$

peut sous-estimer ($\frac{U}{U_f}$) et par conséquent sur-estimer f Ceci peut être mieux observé pour un lit de galets non-uniforme.

En 1987 plusieurs études ont été menés :

Bray et Davers [23] ont proposé la relation suivante :

$$U = 2,4 \sqrt{2g} \cdot (I^{1/3} \cdot R_h^{2/3}) \quad (27)$$

qui, combinée à celle de lacey donne :

$$U = 3,8 \sqrt{2g} \cdot \left(\frac{R_h^{1/4}}{D_{84}}\right) \cdot (I R_h)^{1/2} \quad (28)$$

Ceci, en considérant les conditions cidessous :

- Lit graveleux $8\text{mm} < D_{50} < 250\text{mm}$
- et
- $h/k < 3$

Ils ont déduit pour le Coefficient de Chezy l'expression :

$$C = 3,8 \cdot \sqrt{2g} \cdot \left(\frac{R_h^{1/4}}{D_{84}}\right) \quad (29)$$

pour un fleuve de :

$$D50 > 64\text{mm} , 3 < h/D50 < 20 \\ \text{et } 0,3 < I\% < 1,5$$

Bray a suggéré une formule empirique pour la vitesse :

$$U = 8,08. I^{0,295}. h^{1,44} \quad (30)$$

Remarque

L'exposant de h est très différent de l'équation (23). Ce qui signifie que l'influence de la rugosité sur la profondeur d'eau est très importante.

Jarett [23] a constaté que l'effet de la rugosité diminue avec l'augmentation de h. Il a proposé :

$$U = 3,81. J^{0,12}. Rh^{0,83} \quad (31)$$

Pour de grands canaux stables dont la pente varie entre 0,2% et 4% , pour : $0,15 < Rh < 2,1\text{m}$, et $Fr < 1$.

Suntürk [20] a effectué une étude sur des canaux, qui a montré que la formule de Manning peut entraîner des erreurs pouvant arriver à 60% .

En 1989, d'autres études ont été établies dans ce domaine: W.H. Graf [12] a proposé l'utilisation de la loi logarithmique de la paroi, pour les canaux lisses:

$$\frac{U}{U_f} = \frac{1}{0,4} \ln \frac{U_f y}{\rho} + 5,1 \quad (32)$$

ceci pour: $Re > 4,1 \cdot 10^5$, $Fr < 1$ et $4,2 < B/h < 7,3$

Maurizio Rosso et Marcello Schiara [16], ont fait intervenir le paramètre d'instabilité de l'écoulement Fr, dans l'étude du coefficient de frottement f.

Sachant que Fr, est une fonction de Re, de h et de α le coefficient correcteur de la vitesse, dans le cas d'un écoulement lisse et rugueux, ils ont suggéré:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,03 \log \left[\frac{3,04}{Re\sqrt{f}} + \frac{K}{12,2 Rh} \right] \left[\frac{Fr^{2/3}}{Frc} \right] \quad (33)$$

et ceci dans les conditions d'un écoulement supercritique.

avec, Frc : nombre de Froude critique.

En 1990 [23] Anguire-Pe et Fuents ont attiré l'attention sur l'origine du profil de vitesse. A une certaine couche du sol de hauteur hb , où la vitesse est constante, la distribution de la vitesse est exprimée par:

$$\frac{U}{Uf} = \frac{1}{0,407} \left[\ln \frac{y}{a} + c + ey^{-1} \right] \quad (34)$$

avec, $a = 6,8$, $c = 2,46$, $e = 0,43$, $\frac{Rh}{D50} = y$ avec, $1/3 < y < 100$

Pour : $0,7 < y < 30$, la formule (34) devient:

$$\frac{U}{Uf} = \sqrt{8} \left[0,75 + 1,7 \log (Rh/D50) \right] \quad (35)$$

En posant $D84 = 1,88 \cdot D50$ et pour $0,4 < Rh/D84 < 16$, la relation (35) devient :

$$U/Uf = \sqrt{8} \left[1,22 + 1,7 \log Rh/D84 \right] \quad (36)$$

D'après l'étude d'Hager [22] la relation la plus adéquate est la relation (36) qui peut être mise sous la forme:

$$\frac{U}{Uf} = 4,8 \log 5,2 (Rh / D84) \quad (37)$$

En 1990 JinJin Wang [21] a étudié l'effet de la rugosité du lit sur le coefficient de Chezy, pour :

$3,10^4 < Re < 8,14 \cdot 10^4$	(écoulement turbulent)
$2,8 < h/k < 6,5$	(écoulement bidimensionnel)
$190 < Ref < 250$	(écoulement rugueux)
et $K = 1cm$ ($K = Dmax$)	

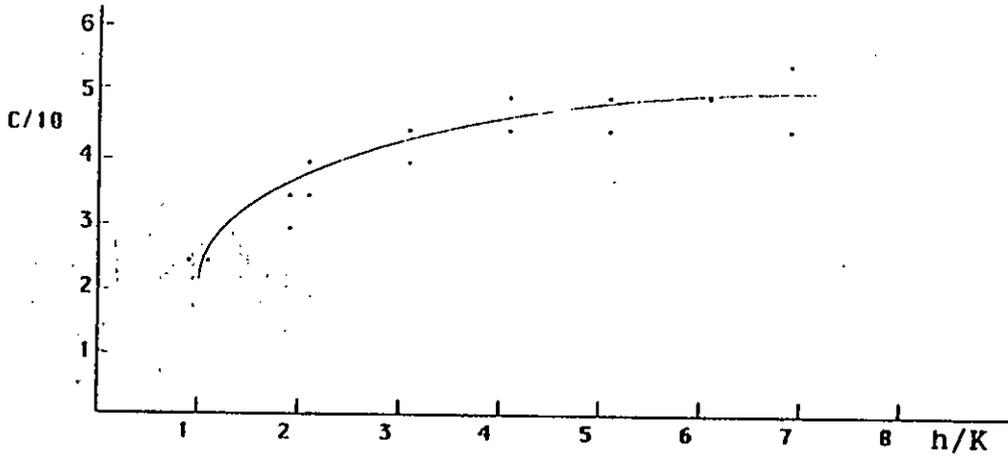


Fig -6-
Variation du coefficient de
Chezy ,C, en fonction de h/K

il a proposé:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,98 \log h/K + 3,01 \quad (38)$$

Notons que la constante 3,01 est différente de celle de Keulegan et de celle de Zegjda.

Le graphe de la figure 6 page 21 montre les résultats obtenus au cours de l'étude représentés par la variation du coefficient de Chezy C en fonction de h/K

Pour un poli relatif $h/K \leq 4$, C peut être exprimé par:

$$C = 15.9 \left[\frac{h^{0.718}}{K} \right]$$

et pour $h/K > 4$, C tend à devenir constant.

2/ Représentation graphique du coefficient de chezy :

Les figures 7 , 8 et 9 page 24 , 25 et 26 représentent respectivement le coefficient de chezy, C , en fonction du diamètre hydraulique, D_h , exprimé par les formules données dans le chapitre I :

- de Bazin
- de Ganguillet -Kutter
- de Manning - Strikler

et ce pour une pente fine de $1/1000$, pour des valeurs théoriques du diamètre hydraulique, D_h , allant de $0,0025$ à $10m$, et dans le cas de cinq types de paroi.

la figure 7 illustre la relation de Bazin, par des courbes parallèles qui tendent vers une limite commune du coefficient de chezy, C , égale à 87 . De même, pour la formule de Kutter montrée dans la figure 8, sauf qu'elle n'est pas limitée. L'expression de Manning est représentée, dans la figure 9, par des droites croissantes et parallèles.

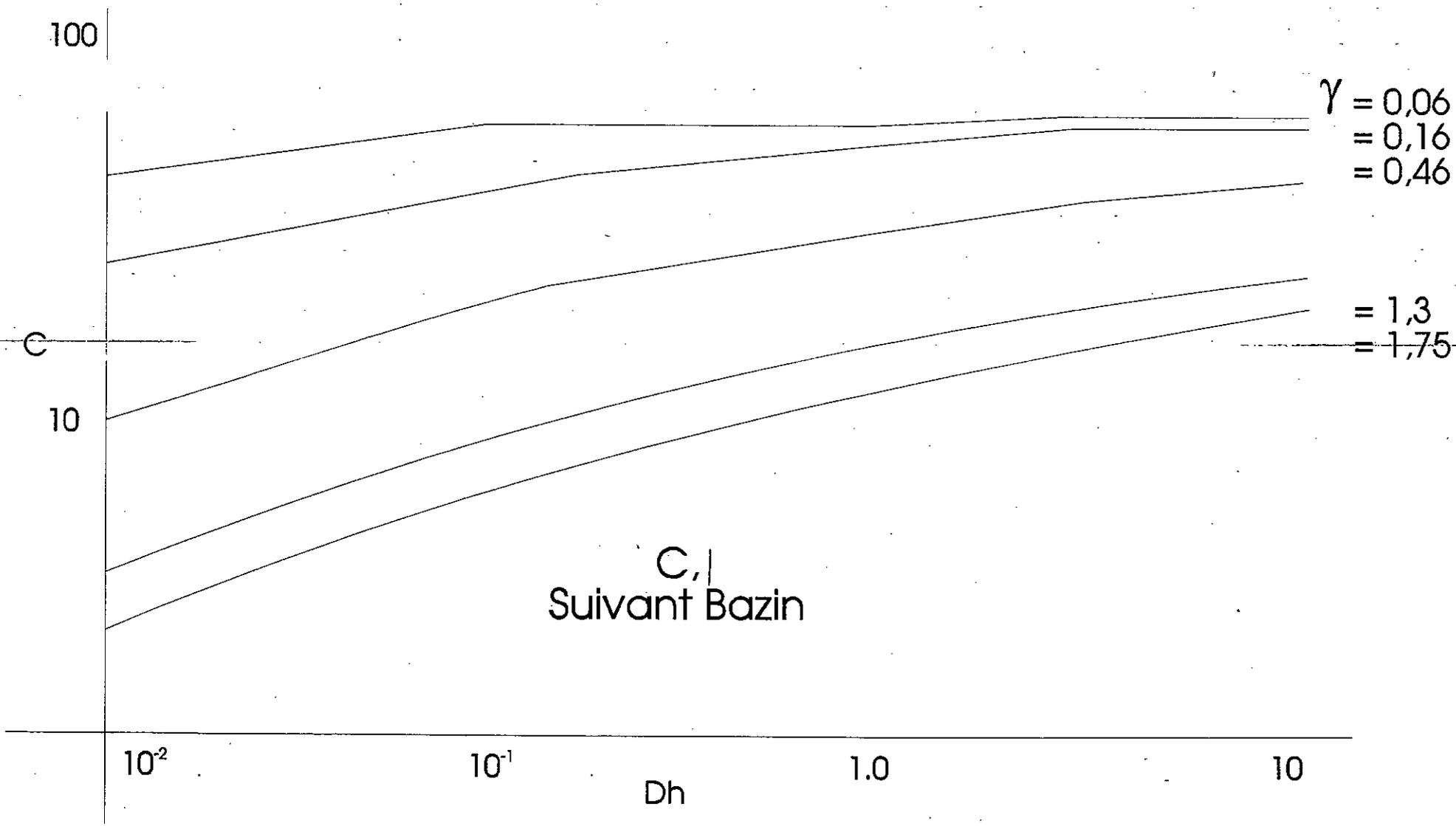


Fig -7-

Variation de C , en fonction de Dh

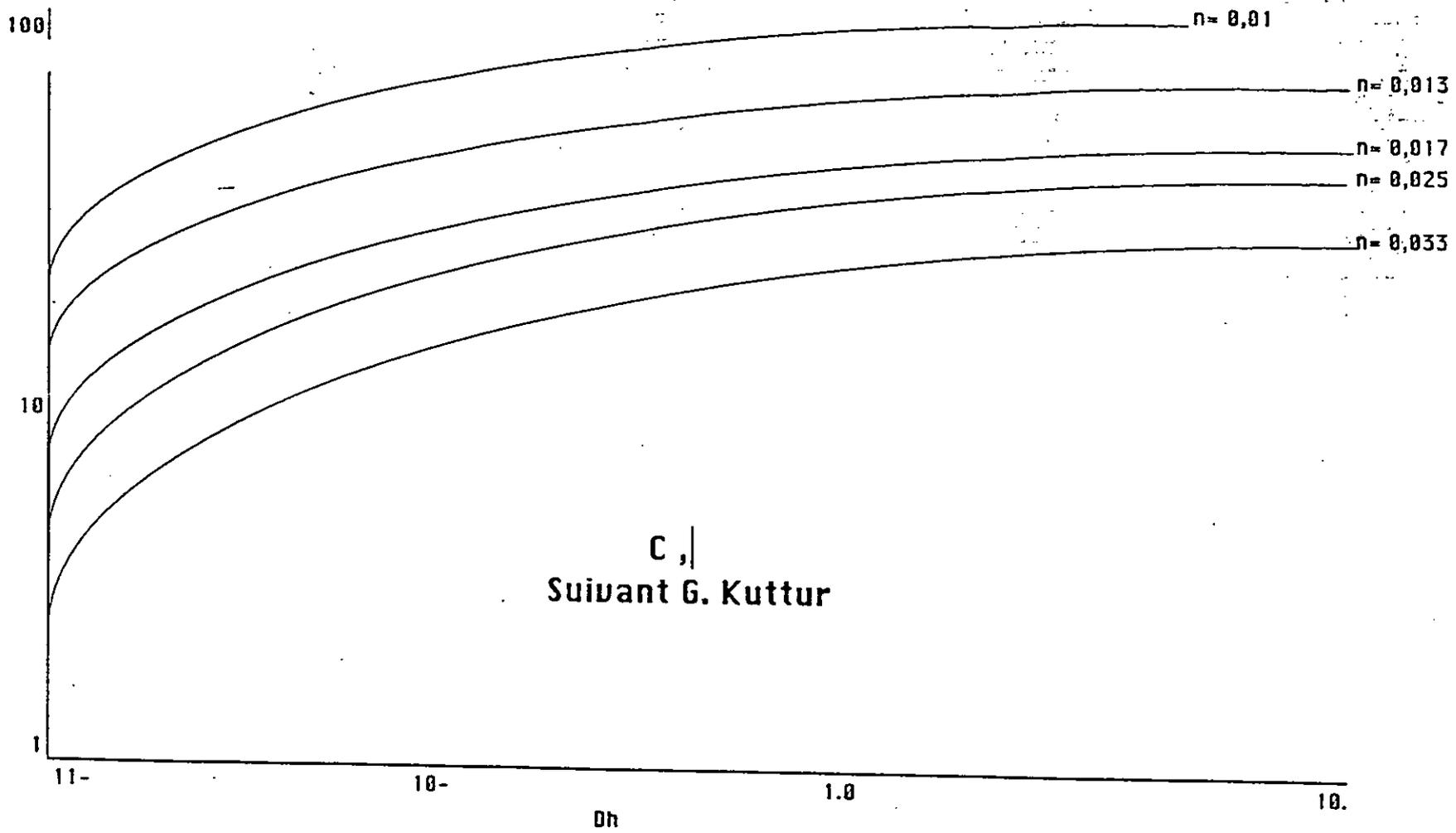


Fig -8-
Variation de C_f , en fonction de Dh

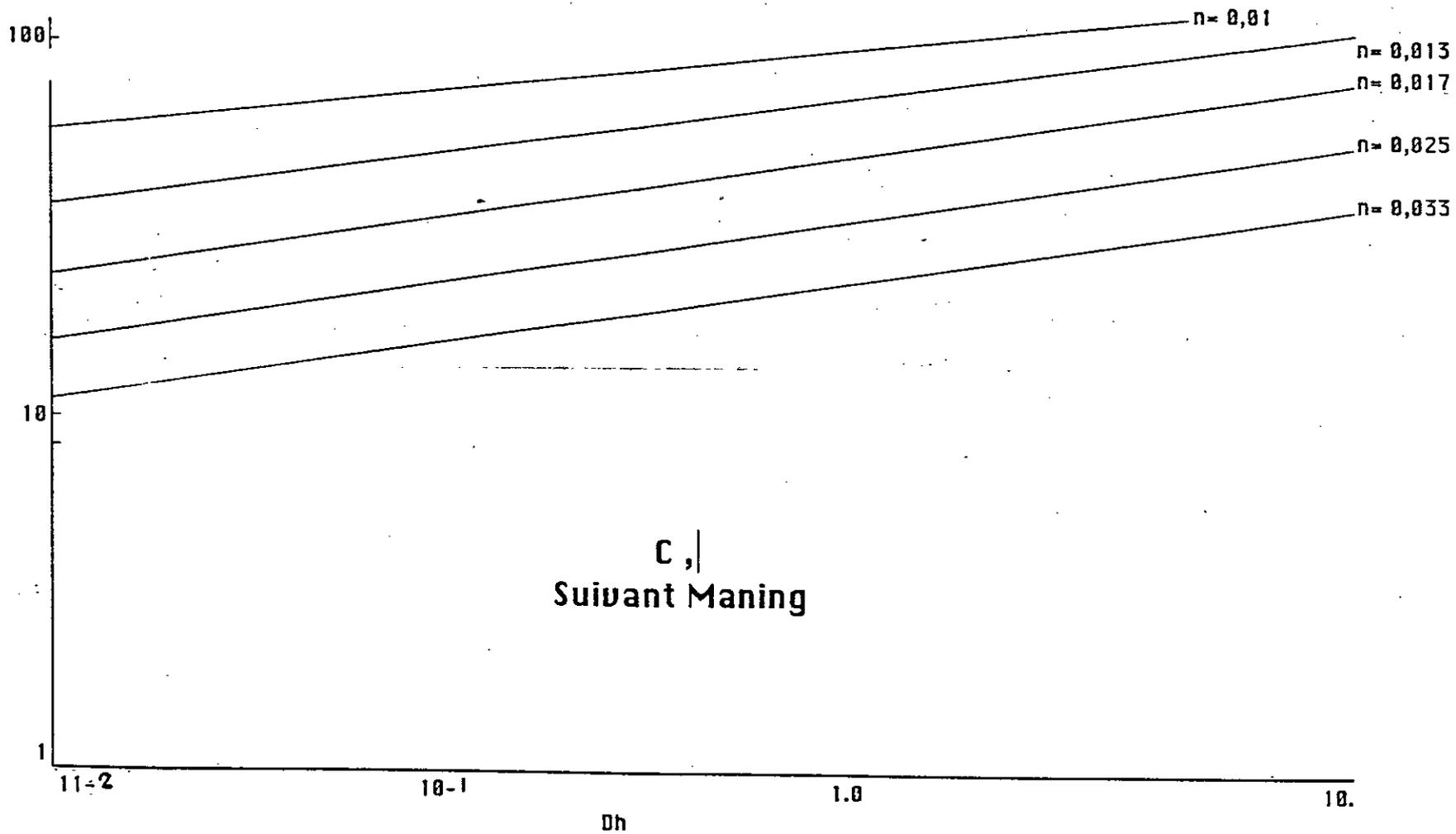


Fig -9-

Variation de ,C, en fonction de Dh

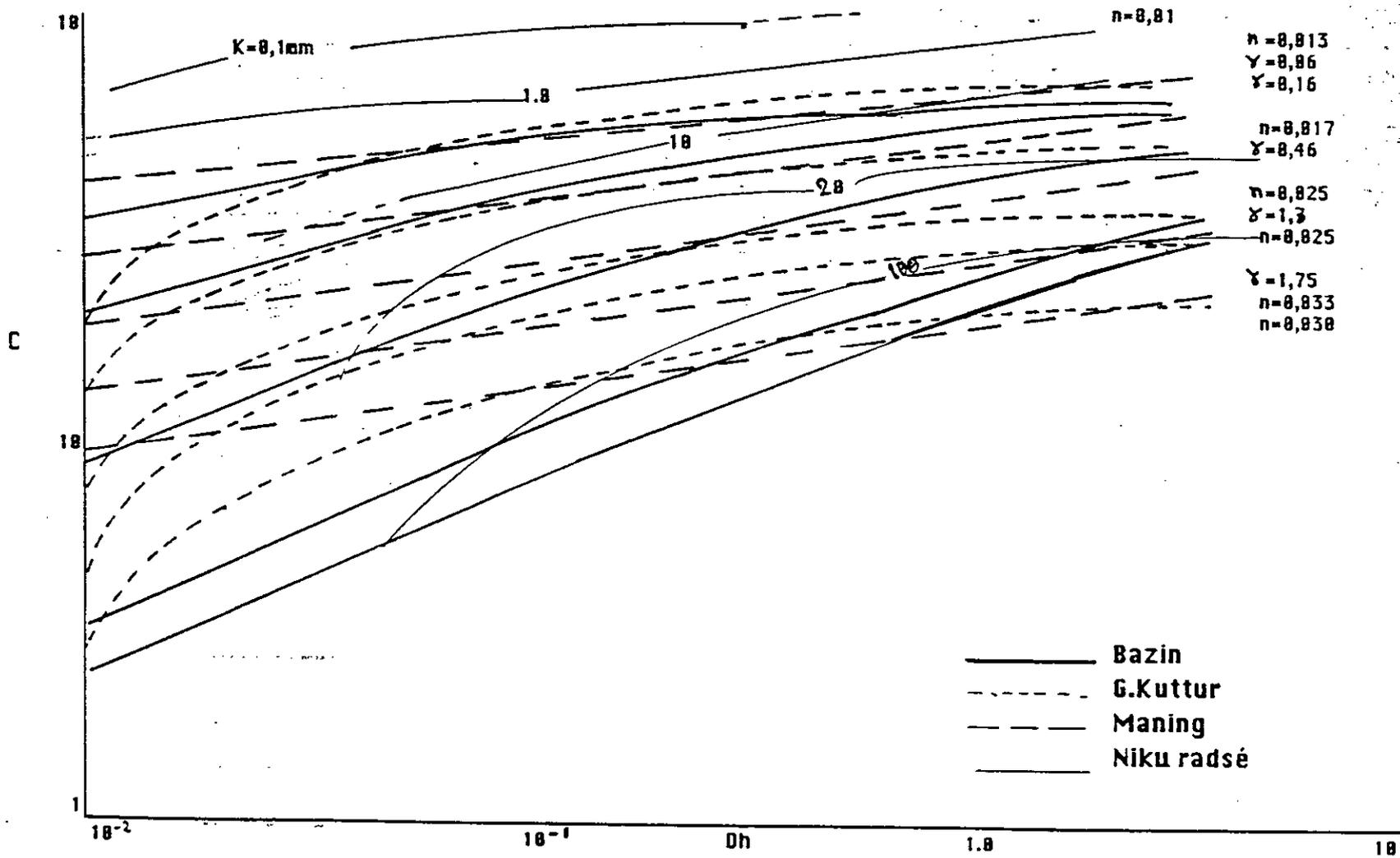


Fig -10-

Comparaison graphique des formules
 exprimant le coefficient de Chezy ,C,

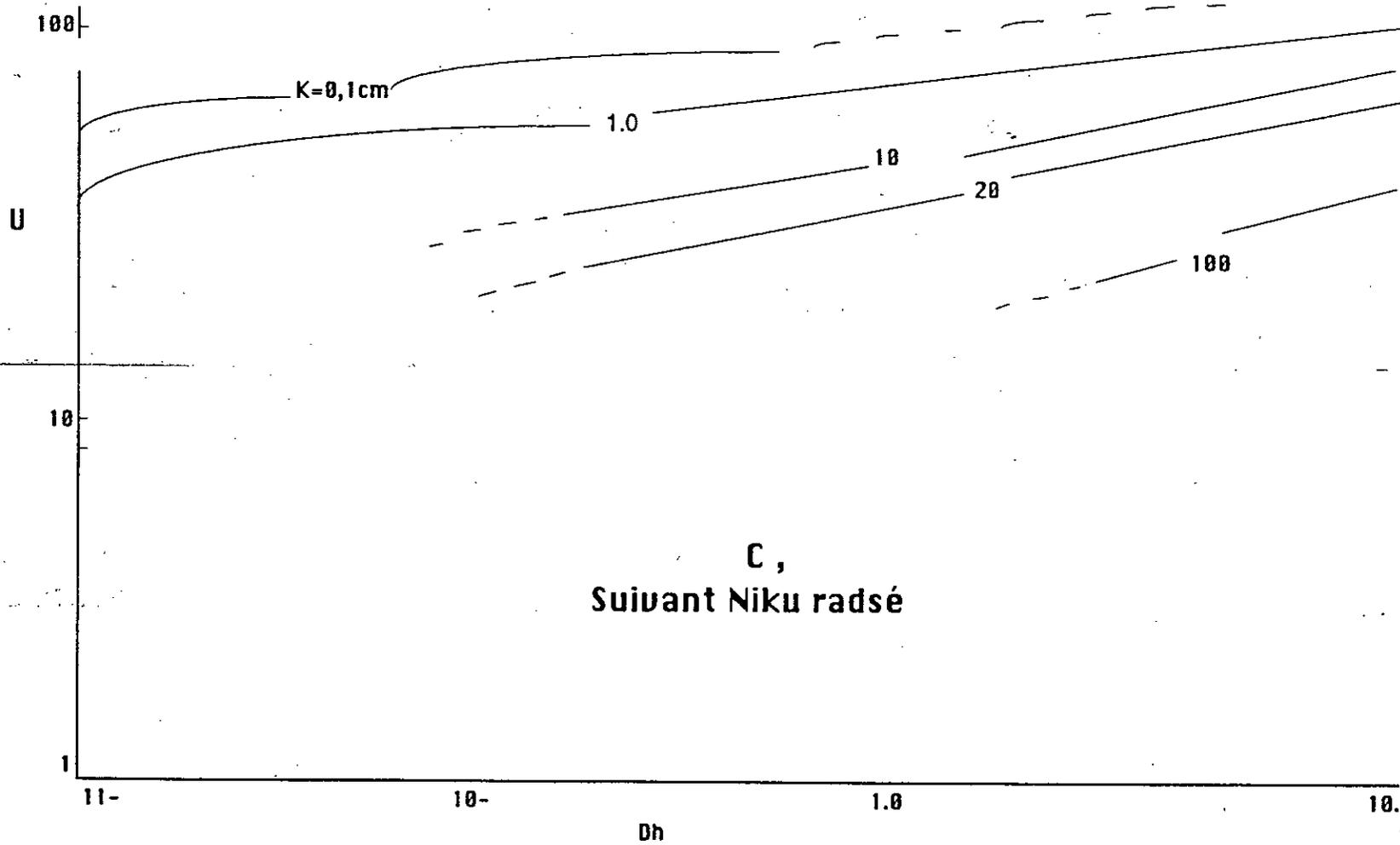


Fig - 11 -

Evolution de ,C, en fonction,
de Dh suivant Nikuradsé

La représentation graphique des trois expressions citées, ci avant, sur le même système d'axe dans la figure 10 page 27 permet de faire les constatations suivantes :

a/ Concernant les coefficients de Bazin et de Kutter :

- Les courbes ($\gamma = 1,75$) de Bazin et ($n = 0,033$) de Kutter (même matériau), se rapprochent, puis s'intersectent au point, $D_h = 3m$. Pour des valeurs de D_h supérieures à $3m$, la courbe de Bazin est plus proche de celle de Kutter, la déviation maximale y est d'environ 2%.

- La courbe de Bazin ($\gamma = 1,3$) et celle de Kutter ($n=0,033$) se coupent à $D_h=0,01m$ et à $D_h = 0,5m$. La zone comprise entre ces deux points est une zone de rapprochement, à l'intérieure de laquelle les courbes s'éloignent l'une de l'autre. La déviation maximale est de 6%.

- L'examen des deux courbes de Bazin ($\gamma = 1,3$) et de Kutter ($n = 0,025$) (même paroi) indique qu'elles convergent au fur et à mesure que D_h augmente avec une déviation maximale d'environ 6%.

- Pour un même type de matériaux ($\gamma = 0,46$) et ($n = 0,017$) les coefficients de Bazin et aussi de Kutter sont en bon accord lorsque, D_h , s'approche de la valeur de $3m$.

- Pour un même type de matériaux ($\gamma = 0,16$) et ($n = 0,013$) les coefficients de Bazin commencent différemment par rapport à ceux de kutter, mais convergent avec l'augmentation de, D_h , vers le point $D_h = 2m$.

- La courbe de Bazin ($\gamma = 0,06$) coupe celle de Kutter ($n = 0,013$) a une valeur de D_h de $6m$ environ et celle qui correspond à ($n = 0,01$) à $D_h = 0,7m$.

b/ Concernant les coefficients de Bazin et de Manning :

- Dans le cas du même type de matériau ($\gamma = 1,75$) et ($n = 0,033$) le coefficient C de Bazin est nettement différent de celui de Manning. Ils se rapprochent dans la zone comprise entre $D_h = 2m$ et $5m$.

- Dans le cas de même nature de la paroi, la courbe de Bazin ($\gamma = 1,3$) converge vers la droite de Manning ($n = 0,025$). Cette convergence devient appréciable à partir de : $D_h = 3m$.

- Pour le matériau caractérisé par: ($\gamma = 0,46$) et ($n = 0,017$), la courbe de Bazin se confond presque avec la droite de Manning à partir de $D_h = 1m$. Ceci commence à $D_h = 0,6m$, où la déviation est d'environ 8%.

- Pour la paroi ($\gamma = 0,16$) et ($n = 0,013$), nous détectons deux points communs à la courbe de Bazin et la droite de Manning à $D_h = 0,07$ et $2m$.

- En considérant le matériau caractérisé par ($\gamma = 0,06$) et ($n = 0,01$), nous constatons que la courbe de Bazin et celle de Manning s'intersectent à $D_h = 1m$, puis divergent.

- La courbe de Bazin ($\gamma = 0,06$) se rapproche de celle de Manning ($n = 0,013$), qui correspond à un matériau différent, à partir de $D_h = 6m$.

c/ Concernant les coefficients de Kutter et de Manning :

- la droite de Manning ($n = 0,033$) se situe entre les deux courbes de Kutter ($n = 0,033$) et ($n = 0,025$) pour : $0,3m < D_h < 3m$

- Pour : $D_h > 3m$: les coefficients de Manning s'approchent de ceux de Kutter ($n = 0,033$), avec une déviation maximale d'environ 5%.

- Pour ($n = 0,025$), les coefficients de Manning et ceux de Kutter sont en bon accord, à partir de $D_h = 1,8m$, avec une déviation maximale d'environ 7%.

- Dans le cas de la paroi caractérisée par $n = 0,017$, les coefficients de Manning concordent avec ceux de Kutter à partir de $D_h = 0,6m$, avec une déviation maximale d'environ 5%.

- Pour ($n = 0,013$), la droite de Manning commence à s'approcher de la courbe de Kutter à partir de $D_h = 3m$.

3/ Représentation graphique du coefficient de frottement, f , :

Le coefficient de frottement, f , pour les écoulements sous pression, est représenté dans la figure 4 page 17, en fonction du nombre de Reynolds, Re , et pour différents cas de rugosité relative. Il est donné comme suit :

L'écoulement hydrauliquement lisse est régi par la formule de Blasius (chapitre I-1), valable pour de faibles valeurs du nombre de Reynolds, Re , et qui doit être, au delà remplacée par la loi de Prandtl. (Voir chapitre I-1).

Pour l'écoulement rugueux et pour des valeurs élevées de, Re, nous avons la formule de Nikuradsé [14] :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 \cdot 2 \log \frac{K}{D_h}$$

ou bien,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{R_h}{K} + 2,34$$

Dans la zone de transition, l'écoulement est régit par la relation de Colebrook - White [14] :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left[\frac{K}{14,84 R_h} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right]$$

4/ Comparaison graphique entre les formules anciennes et celle de Nikuradsé :

La figure 11 page 27 montre la variation du coefficient de chezy, calculé par la formule de Nikuradsé, en fonction du diamètre hydraulique D_h , pour cinq types de rugosité.

La comparaison graphique de cette formule avec les expressions de Bazin, de Ganguillet-Kutter et de Manning, représentées dans la figure 10 page 26 permet de constater que :

- Pour une rugosité absolue K de 10 mm, la courbe de Nikuradsé coupe la courbe de Bazin en deux points : $D_h = 0,09$ et 2 m. Dans la zone comprise entre ces deux points la déviation maximale est d'environ 6%.

- A partir d'une valeur de, D_h , égale à 0,7 m nous remarquons que la droite de Manning ($n = 0,025$) se confond presque avec la courbe de Nikuradsé ($K = 100\text{cm}$).

- La même chose est observée entre la courbe de Nikuradsé ($K = 100\text{cm}$) et celle de Kutter ($n = 0,025$).

- La courbe de Nikuradsé ($K = 2\text{cm}$) se situe entre la courbe de Bazin ($\gamma = 0,46$), la courbe de Kutter ($n = 0,017$) et celle de Manning ($n = 0,013$).

- Pour la valeur de : $K = 1 \text{ cm}$, la courbe de Nikuradsé se trouve entre celle de Bazin ($\epsilon = 0,16$) et ($n = 0,017$), elle se rapproche de la droite de Manning ($n = 0,01$) en convergeant vers les même valeurs de C avec l'augmentation de D_h .

- Pour la rugosité K égale à $0,01 \text{ cm}$, nous constatons que la courbe de Nikuradsé diffère appréciablement des formules dites anciennes.

5/ Définition de la problématique :

Nous constatons une grande divergence entre les coefficients de Chezy C déterminés par les formules, dites anciennes, et qui sont les plus souvent utilisées dans tout le domaine de variation du diamètre hydraulique D_h . Néanmoins nous remarquons quelques convergences dans des domaines très restreints, ce qui rend le choix de C très délicat.

L'idée d'appliquer les formules de l'écoulement forcé à l'écoulement dans les canaux découverts, a été tenté par plusieurs chercheurs dans le but d'aboutir à une formulation unique. Mais le grand nombre de paramètres pouvant affecter et influencer le coefficient de frottement f d'une manière non négligeable fait la raison de la difficulté de l'étude dans ce domaine .

D'après notre étude bibliographique, nous pouvons conclure que l'état de connaissance actuel ne permet toujours pas d'arriver à une expression universelle de f pour les canaux. Delà nous positionnons notre problème d'étude qui consiste à la détermination du coefficient de frottement, pour des canaux à ciel ouvert, par voie expérimentale, et en tenant compte :

- du régime d'écoulement (Re),
- de la stabilité de l'écoulement (Fr),
- de la rugosité (K),
- du type de canal (B/h),

ceci dans le cas d'écoulement turbulent.

CHAPITRE II

DETERMINATION DU COEFFICIENT

DE FROTTEMENT

DANS LES CANAUX

DETERMINATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT DANS LES CANAUX

1/ Développement d'un écoulement :

Tout développement d'un écoulement à travers un canal correspond au développement d'une couche, appelée : "couche limite"

1-1 Définition de la couche limite :

C'est une couche, dont l'épaisseur est définie, conventionnellement par la distance à la paroi, où la vitesse, U , atteint une fraction de la valeur extérieure. Généralement, désignée par, " δ " ; elle représente la valeur de la coordonnée verticale [3] pour laquelle on a :

$$\frac{U(\delta)}{U(Y > \delta)} = 0,99$$

1-1/ Zones d'écoulement :

a- Zone Laminaire :

Dans cette zone, les forces de frottement dues à la viscosité sont prépondérantes, elle est dite "Sous couche laminaire" ou "Visqueuse".

b- Zone de transition :

Dans ce cas le frottement est dû, à la fois, à la viscosité et à la turbulence, due aux fluctuations dans le mouvement des particules fluides.

c- Zone turbulente :

Cette zone est caractérisée par une prédominance des forces dues à la turbulence.

d/ Zone de fluide libre :

Loin de la paroi l'eau se comporte comme un fluide parfait.

1-1-2/ Equation de la couche limite :

Les lois universelles de l'écoulement s'écrivent [14] :

- Loi de conservation de la masse :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

- Loi fondamentale de la dynamique :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k \partial x_k} \quad (3)$$

avec $k = 1, i$

En supposant que l'écoulement turbulent, se décompose en un écoulement moyen et un écoulement fluctuant, la vitesse et la pression instantanées sont exprimées par :

$$U_i = U + U_i' \quad \begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix}, \quad U \begin{matrix} U \\ V \\ W \end{matrix} \quad \text{et} \quad U_i' \begin{matrix} U' \\ V' \\ W' \end{matrix}$$

avec

$$P_i = P + P_i' \quad P_i | P, P_i' | P'$$

Où U et P sont les valeurs moyennes de la vitesse et de la pression respectivement, prises au sens statistique.

U_i' et P_i' représentent les fluctuations de la vitesse et de la pression.

Les équations (2) et (3) ont été réécrites [6], dans un système d'axes, xoy , choisi de sorte que, $W=0$, les dérivées suivant OZ sont nulles. De plus par raison de symétrie statistique par rapport à tout plan (x,y) nous avons :

$$\overline{U'W'} = \overline{V'W'} = 0$$

Ainsi, les équations du mouvement moyen s'écrivent [6]

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U \partial V}{\partial x} + \frac{V \partial U}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \overline{U'^2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\overline{U'V'} - \nu \frac{\partial U}{\partial y} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U \partial V}{\partial x} + \frac{V \partial V}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \overline{U'V'} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\overline{V'V'} - \nu \frac{\partial V}{\partial y} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Où, P^* est la pression motrice ($P + \rho gh$) et $\overline{U'^2}$, $\overline{U'V'}$, $\overline{V'^2}$ sont appelées les tensions turbulentes ou tensions de Reynolds.

1-1-3/ Hypothèses de la couche limite :

Pour la simplification du système d'équation précédent, une notion d'échelle de vitesse, u , et de la longueur, l , est introduite, cette dernière a le même ordre de grandeur que, δ . D'après les résultats expérimentaux il a été constaté [6], que les tensions turbulentes sont toutes du même ordre de grandeur que, u^2 , nous avons alors :

$$\overline{U'V'} \approx u^2$$

$$\overline{U'^2} \approx u^2$$

$$\overline{V'^2} \approx u^2$$

1ère Hypothèse :

Une hypothèse propre à la couche limite consiste à supposer que l'échelle de turbulence, l , est petite devant la longueur de développement de la couche limite :

$$l \ll L$$

Nous admettons ainsi, que l'évolution des tensions turbulentes suivant, x , est lente devant leur évolution suivant y . C'est à dire que les termes $\partial U'^2 / \partial x$ et $\partial U'V' / \partial x$ sont négligeables devant $\partial U'V' / \partial y$ et $\partial V'^2 / \partial x$

Nous admettons aussi que, la pression P , est de l'ordre de u^2 .

2ème Hypothèse :

Elle consiste à admettre que le temps de diffusion par turbulence est égal au temps de convection :

$$\frac{u}{l} \approx \frac{U}{L}$$

Conséquence :

Les hypothèses précédentes se traduisent, pour un écoulement permanent par le système d'équation suivant [6] :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial U'^2}{\partial x} - \frac{\partial U'V'}{\partial y} \quad (7)$$

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial y} - \frac{\partial V'^2}{\partial y} \quad (8)$$

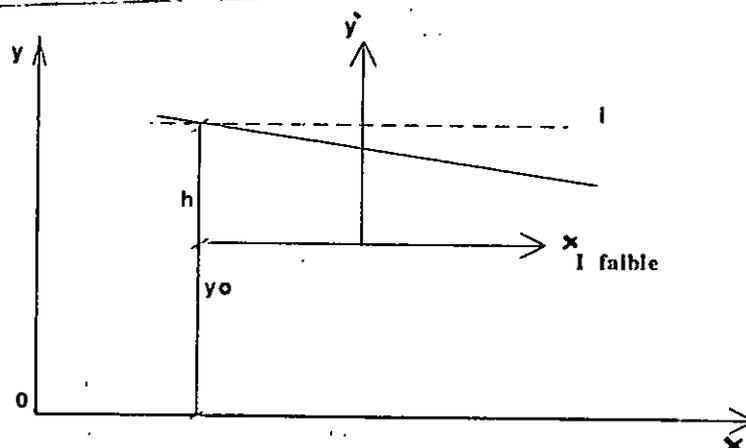
$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

La somme des tensions, turbulente et visqueuse, est appelée tension totale, T, avec :

$$T = - \rho U'V' + \mu \frac{\partial U}{\partial y} \quad (10)$$

1-4/ Schéma de base des équations du mouvement :

IL est donné par la représentation schématique suivante :



En intégrant la 8ème équation entre, "0", et, "Y'", et en prenant en compte la définition de la 1'adhérence, $V'^2 = 0$, elle devient :

$$P = \rho g (h - y') - \rho V'^2 \quad (11)$$

La relation (11) montre que la pression est légèrement modifiée à travers la profondeur, mais il est souvent admis qu'elle est hydrostatique. Le terme V'^2 est négligeable ce qui fait que :

$$p \text{ est de l'ordre de } \rho g (h - y')$$

d'où :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \rho g h}{\partial x} - \frac{\partial \rho g y'}{\partial x} = \rho g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial y'}{\partial x} \right) \quad (12)$$

avec $\frac{\partial y'}{\partial x} = I$ la pente du fond.

Enfin, un écoulement plan à surface libre peut être représenté par le système d'équations suivant [11] :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U \partial V}{\partial x} + \frac{V \partial U}{\partial y} = -g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial y'}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (13)$$

$$P = \rho g (h - y') - \rho v'^2 \quad (14)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

La force resultante pour un écoulement permanent est alors [13] :

$$\Sigma F = -\rho g.S.Dh + T_p .Pe.Dx = 0$$

$$|T_p = \rho g.Rh.I|$$

(16)

2-2/Répartition de la vitesse :

L'évaluation du frottement est liée directement à la repartition de la vitesse.Ceci est donné pour les différentes zones d'écoulement comme suit:

1- Zone intérieure :

L'existence de cette zone est conditionnée par la limite, " $y'/h < 0.2$ ", pour un écoulement uniforme la tension du frottement peut se réduire à [11] : $T = Cte$

Et par conséquent la méthode semi-empirique de la longueur de melange de Prandtl, " $l = ky$ ", permet d'écrire [11].

$$T = \mu \frac{\partial U}{\partial y} + \rho k^2 y'^2 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \quad (17)$$

Où, k , est la constante universelle de Karman

Dans cette zone la tension visqueuse peut être négligée, à l'exception d'une mince zone très près de la paroi. Le frottement total est alors :

$$T = T_p = \int k^2 y'^2 \cdot \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 dy \quad (18)$$

ou

$$\begin{aligned} \left(\frac{T_p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} &= k y' \cdot \left(\frac{dU}{dy} \right) \\ \frac{dU}{dy} &= \left(\frac{T_p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{k y'} \end{aligned} \quad (19)$$

L'intégration de cette équation donne la loi, dite, "loi logarithmique de la paroi [6]:

$$\frac{U}{U_f} = \frac{1}{k} \ln \frac{y' U_f}{\nu} + \beta \quad (20)$$

où, $U_f = \left(\frac{T_p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$ est la vitesse de frottement.

La quantité ν/U_f apparaît comme une échelle de longueur caractéristique de la région interne : elle est liée à la viscosité, on l'appelle "Longueur visqueuse"

- β est une constante d'intégration qui dépend du type de paroi.

- Très près de la paroi:

Dans cette zone la tension visqueuse est prépondérante. Comme le frottement dans la zone intérieure peut être considéré constant dans la direction verticale, la tension à la paroi devient [6]:

$$T_p = \mu \frac{dU}{dy} \quad (21)$$

l'intégration de cette équation nous permet d'écrire :

$$T_p = \mu \frac{U}{y} \quad (22)$$

2-1 b/ Limites de séparation dans la région interne :

L'expérience a permis de mettre en évidence les limites suivantes [6]:

$\frac{y'U_f}{v} > 3$ la loi de vitesse est linéaire

$3 < \frac{y'U_f}{v} < 40$ région tampon

$\frac{y'U_f}{v} > 40$ loi logarithmique de paroi

2-2/ Zone extérieure

y'

Elle est conditionnée par: $0.2 < \frac{y'}{k} < 1$

k

la vitesse $U(y')$, dépend de la vitesse maximale, U_{max} , de la

$\downarrow p^*$

profondeur et du gradient de pression motrice, $\frac{\downarrow p^*}{\downarrow x}$, mais elle ne

$\downarrow x$

dépend ni de la viscosité, ni du type de paroi:

$\downarrow p^*$

$$U(y') = F(U_{max}, h, \frac{\downarrow p^*}{\downarrow x}, T_p, y')$$

$\downarrow x$

La répartition de vitesse est donnée par la loi de Vitesse déficitaire, suivante [11]:

$$\frac{U_{max} - U}{U_f} = F\left(\frac{y'}{h}, \frac{\downarrow p^*}{k T_p}, \frac{\downarrow x}{\downarrow x}\right)$$

$h \quad \downarrow p^*$

ou, $\frac{h}{T_p} \cdot \frac{\downarrow p^*}{\downarrow x}$ est le gradient de pression adimensionnalisé

$T_p \quad \downarrow x$

Différentes relations ont été proposées pour la répartition de la vitesse. Coles a proposé une expression, considérée, souvent comme la plus générale pour les écoulements en charge [11], elle est donnée par:

v

$$\frac{U_{\max} - U}{U_f} = \frac{1}{k} \ln \frac{(\delta)}{(y)} + \frac{\pi}{k} (2 - \tilde{W}) \quad (23)$$

\tilde{W} étant la fonction de sillage défini par [11]:

$$\tilde{W} = 2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y'}{\delta} \right)$$

Si $y' = \delta$ alors $\tilde{W} = 2$.

Remarque :

Le paramètre de sillage de Coles dépend du gradient de pression adimensionnalisé .

Les lois universelles, déjà citées, indépendantes du nombre de Reynolds Re sont complexes. Pour les cas pratiques, il est préférable d'utiliser des lois empiriques.

3/ Ecoulement nonuniforme :

Les équations qui régissent le mouvement sont les équations (13), (14) et (15).

$\downarrow h$

Dans le cas, où les variations, — , sont faibles, l'écoulement

$\downarrow x$

peut être considéré comme unidirectionnel [11].

3-1/ Expression de la force de frottement :

La force de frottement totale est donnée par l'équation (10):

- A la paroi:

Considérons le même élément de volume, utilisé en écoulement uniforme.

- Bilan des forces agissant sur ce volume :

$$\Sigma F = ma$$

$$\text{avec } a = \frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dt} + U \frac{dU}{dx}$$

l'équation du mouvement est alors :

$$- \rho g S \cdot Dh + T_p \cdot Pe \cdot Dx = S \cdot Dx \cdot U \cdot \frac{dU}{dx}$$

$$\boxed{T_p = \rho g Rh J}$$

(24)

$$\text{avec } J = \frac{d}{dx} \left(h + \frac{U^2}{2g} \right), \text{ pente de la ligne d'énergie.}$$

3-2/ Répartition de la vitesse :

1- Zone intérieure

Il a été constaté par voie expérimentale que la loi logarithmique de la paroi reste valable pour des gradients de pression modérés, qu'ils soient positifs ou négatifs.

2- Zone extérieure :

La loi de la vitesse déficitaire est valable pour l'écoulement non uniforme [11].

4/ Le coefficient du frottement :

Il est défini comme le rapport de la contrainte tangentielle de cisaillement à la paroi, T_p , avec l'énergie cinétique.

Il est donné par [6] :

$$C_f = \frac{T_p}{\frac{\rho}{2} U^2} \quad (25)$$

En remplaçant, T_p , par $\frac{1}{2} \rho U_f^2$, l'expression de C_f devient :

$$C_f = 2 \left(\frac{U_f}{U} \right)^2 \quad (26)$$

En pratique C_f est remplacé par un autre coefficient, f , dit "de perte de charge" ou "de frottement". Il est donné par [6]

$$\boxed{f = \frac{C_f}{4}} \quad (27)$$

Nous avons alors :

$$\frac{U}{U_f} = \left(\frac{8}{f}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

avec $U_f = \left(\frac{T_p}{f}\right)^{\frac{1}{2}} = (g R_h j)^{1/2}$

5/ Classification de l'écoulement :

Si l'écoulement est laminaire, l'effet de la rugosité n'intervient pas, et le coefficient de frottement f est une fonction du nombre de Reynolds Re . f est donné par [11] :

$$f = \frac{\alpha_p}{Re} \quad (29)$$

Pour des canaux larges $\alpha_p = 24$

Pour des canaux rectangulaires $14 < \alpha_p < 24$

- Si l'écoulement est turbulent :

Les écoulements dans les canaux sont en général turbulents :

Le nombre de Reynolds de frottement, Re_f , est donné par :

$$Re_f = \frac{K U_f}{\nu} \quad (30)$$

nous permet de distinguer les régimes suivants :

- Regime hydrauliquement lisse : $0 < Re_f < 5$

Dans ce régime toutes les aspérités sont immergées, dans la sous-couche visqueuse, l'effet de la rugosité est ignoré et le coefficient de frottement, f , dépend de Re , uniquement :

$$f = F(Re)$$

- Regime de transition : $5 < Re_f < 70$

Dans ce cas une partie des aspérités dépasse la sous-couche visqueuse. L'effet de la viscosité et de la rugosité interviennent simultanément.

$$f = F\left(\frac{K}{Rh}, Re\right)$$

- Regime complètement rugueux :

Ref > 70

Dans ce regime, l'effet de la rugosité est prédominant. Toutes les aspérités dépassent la soucouche visqueuse.

$$f = F \left(\frac{K}{Rh} \right)$$

6/ Equation de Chezy :

L'analyse dimensionnelle a permis de trouver une relation entre la contrainte de cisaillement tangentielle, à la paroi et la vitesse moyenne de l'écoulement pour les canaux. Cette relation est exprimée par [13] :

$$T_p = a U^2 \quad (31)$$

où a est un nombre adimensionnel.

U est déduite de cette relation comme suit :

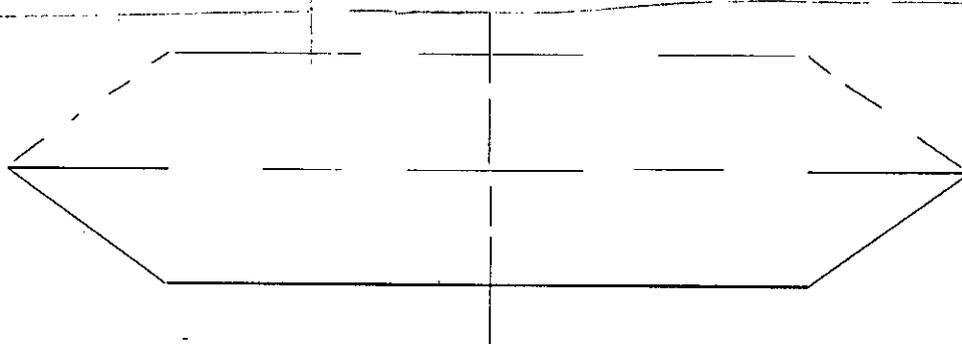
$$U^2 = \frac{T_p}{fa} \quad (32)$$

$$U = \left(\frac{g}{a} \right)^{\frac{1}{2}} (RhJ)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

d'où $C = \left(\frac{g}{a} \right)^{\frac{1}{2}} ;$ le coefficient de Chezy (34)

N.B : La formule de Chezy est valable dans le cas d'un régime complètement rugueux.

En utilisant le concept d'une section fermée équivalente montrée par la figure ci-dessous :



Section fermée équivalente d'un canal Trapezoïdal

L'équation de Chezy peut être simulée à celle de Darcy-Weisbach pour l'écoulement en charge [13] qui est donnée par :

$$Dh = f \cdot \frac{L}{Dh} \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (35)$$

Où Dh représente la perte de charge linéaire sur une longueur, L.

La vitesse moyenne, U, peut être donnée par :

$$U = \left(\frac{8g}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (Rh \cdot j) \quad (36)$$

par analogie avec l'équation de Chezy, l'expression de C, déduite en fonction de f, est :

$$C = \left(\frac{8g}{f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE

ETUDE EXPERIMENTALE

En vue, d'étudier l'influence de la rugosité sur le dimensionnement des canaux, nous avons effectué deux séries d'essais, sur deux installations différentes. La première a été faite au laboratoire d'hydraulique à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP), et la deuxième à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH).

1- Appareillage expérimental :

I- Installation "I" :

La première installation est composée d'un réservoir et d'un canal rectangulaire, figure 12 page 55

a- Reservoir :

L'alimentation en eau se fait au moyen d'un réservoir de forme rectangulaire, ayant un volume de 308,2 litres, et alimenté par le biais d'une conduite reliée au château d'eau du laboratoire.

b- Canal:

L'écoulement s'effectue à travers un canal ouvert, en plexi glass de 4 mètres de longueur, de 15cm de hauteur et de 14cm de largeur.

Le mouvement libre, du canal, dans la direction verticale est transmis par deux variateurs de pente. Ceci permet de fixer la pente du fond ($I = 1/208$).

c- Etat des parois latérales et du fond du canal :

Trois états de rugosité ont été étudiés :

* Etat "1"

Le Fond et les parois latérales sont en plexi-glass, la rugosité absolue de ce dernier est de : $K = 0,0006\text{cm}$

* Etat "2"

Le Fond et les parois latérales du canal sont rugueux, du papier abrasif a été utilisé, constitué de macrograins d'oxyde de l'Aluminium et désigné par P220.(Figure 12-a page 55)

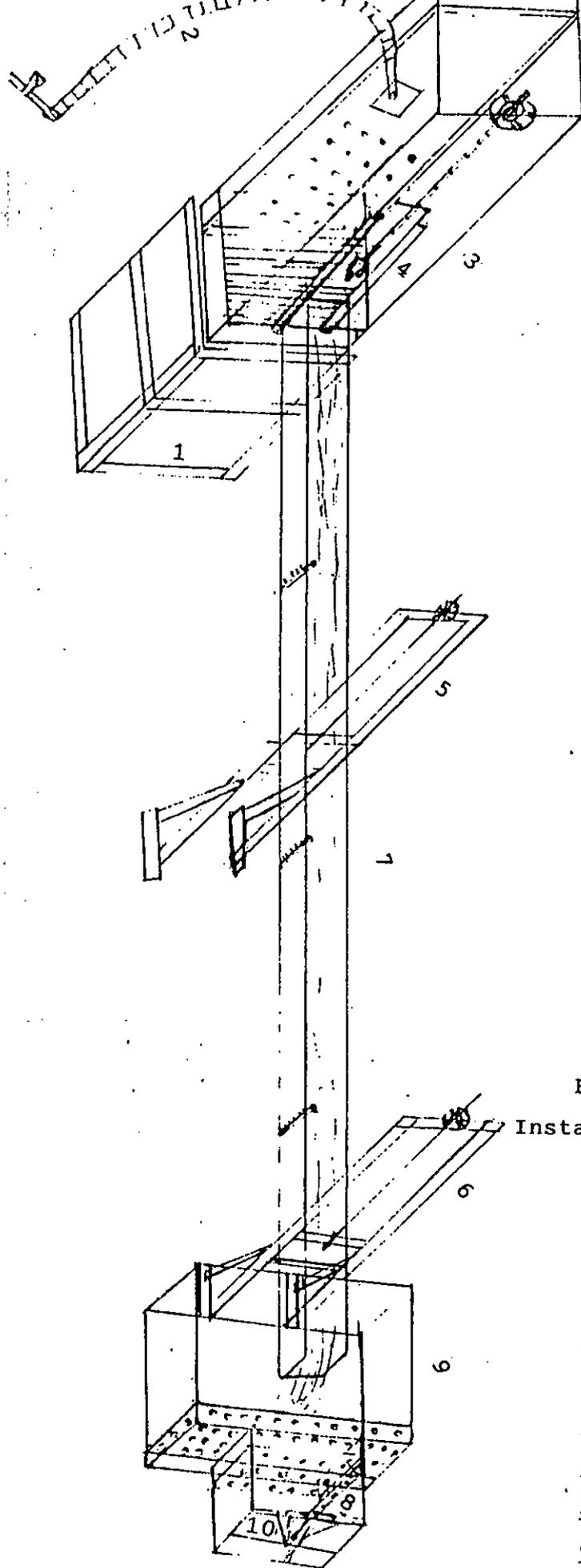


Fig -12-
Installation (I)

- 1 Conduite d'alimentation
- 2 Support
- 3 Réservoir
- 4 Vanne
- 5 Le variateurs de pente
- 6 Canal d'essai
- 7 Bac de récupération
- 8 Limnimètre
- 9 Déversoir triangulaire

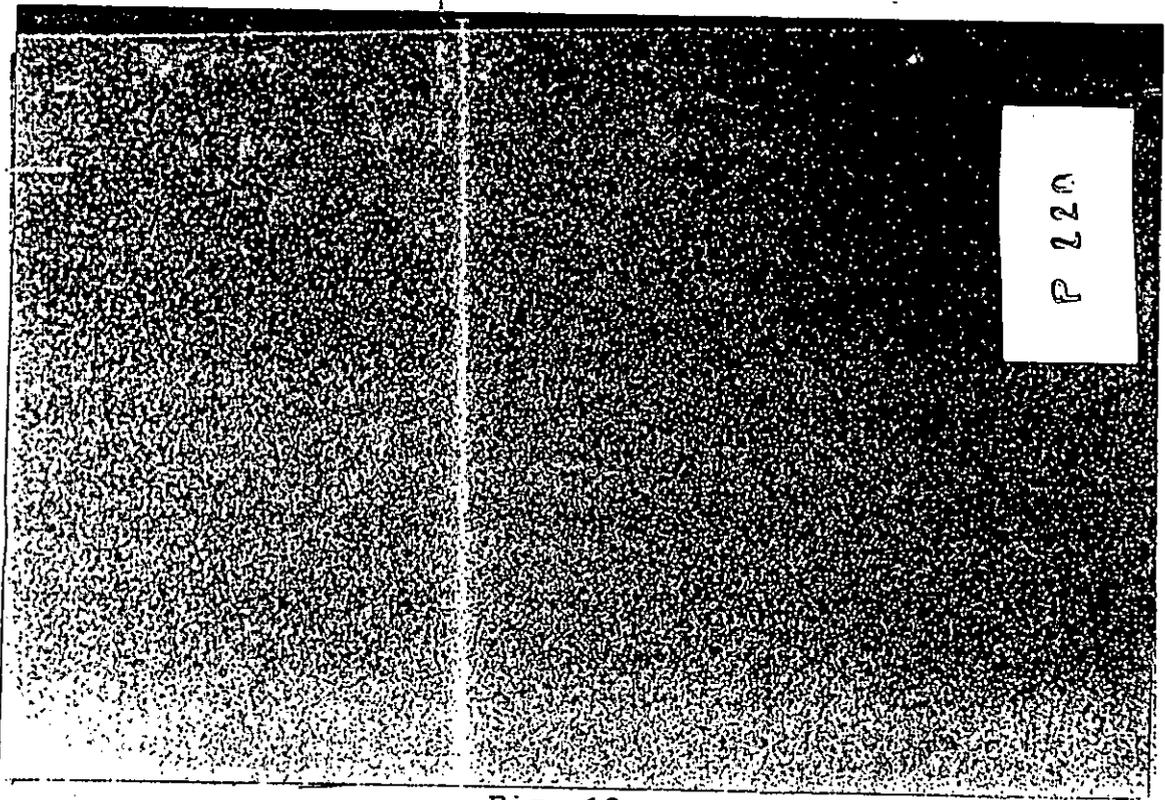


Fig -12.a-

Etat de rugosité en P220

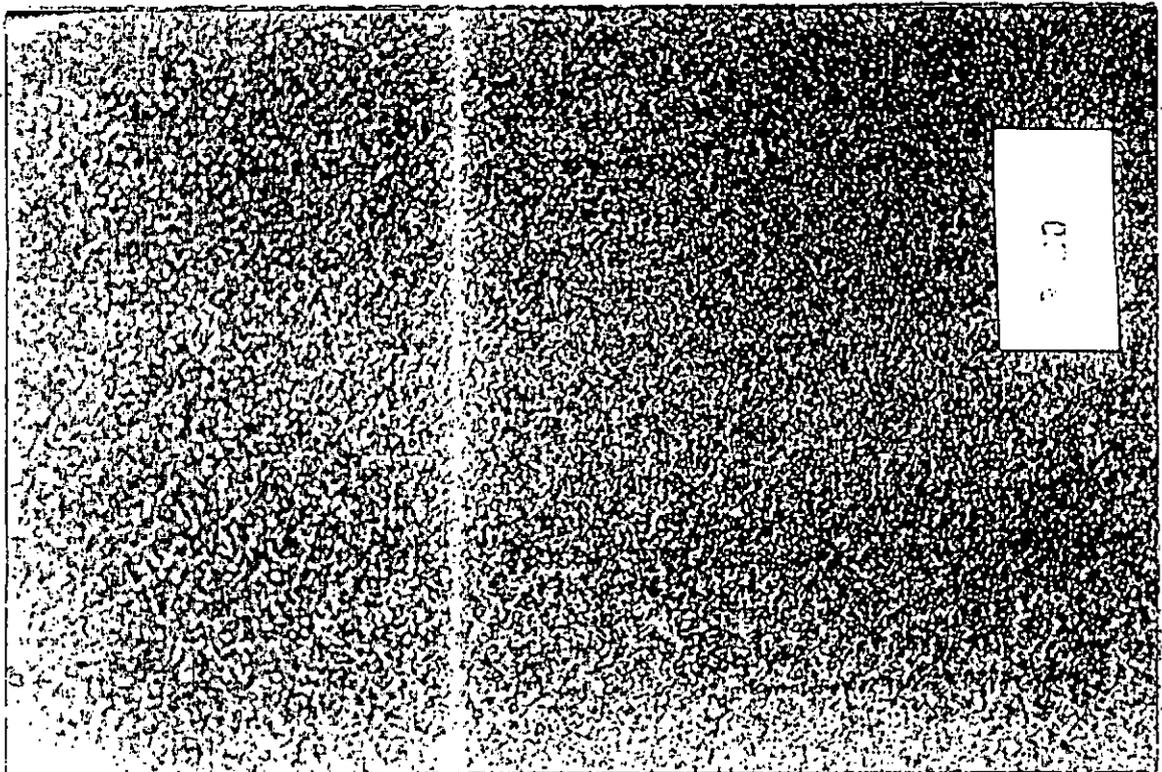


Fig -12.b-

Etat de rugosité en P80

* Etat "3"

Le Fond et les parois latérales sont rugueux. Dans ce cas le papier abrasif utilisé est du p80. (Figure 12-b page 55).

A-1- Appareillage de mesure

a- Mesure du débit :

Les débits sont mesurés, en aval du canal, à l'aide d'un deversoir triangulaire, ayant une hauteur de pèle de 18cm posé sur un bac de récupération. (Fig 12 page 55)

Le débit est calculé par [2] :

$$Q = 0,0172611 \text{ hd}^{2,35} \text{ [l/s]}$$

Où, hd, est la hauteur deversée au dessus du seuil du deversoir.

b- Mesure de niveau :

Un limnimètre à pointe permet de mesurer la lame deversante hd. Le niveau d'eau dans le canal est lu sur trois tubes piezométriques équidistants de 1m.

c- Mesure de la rugosité :

* Connaissant la fourchette de valeur de la rugosité du plexi-glass, qui est comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} mm [17], nous l'avons prise égale à 6.10^{-3} mm.

La mesure de la rugosité du papier abrasif P80 et P220 est effectuée par deux méthodes :

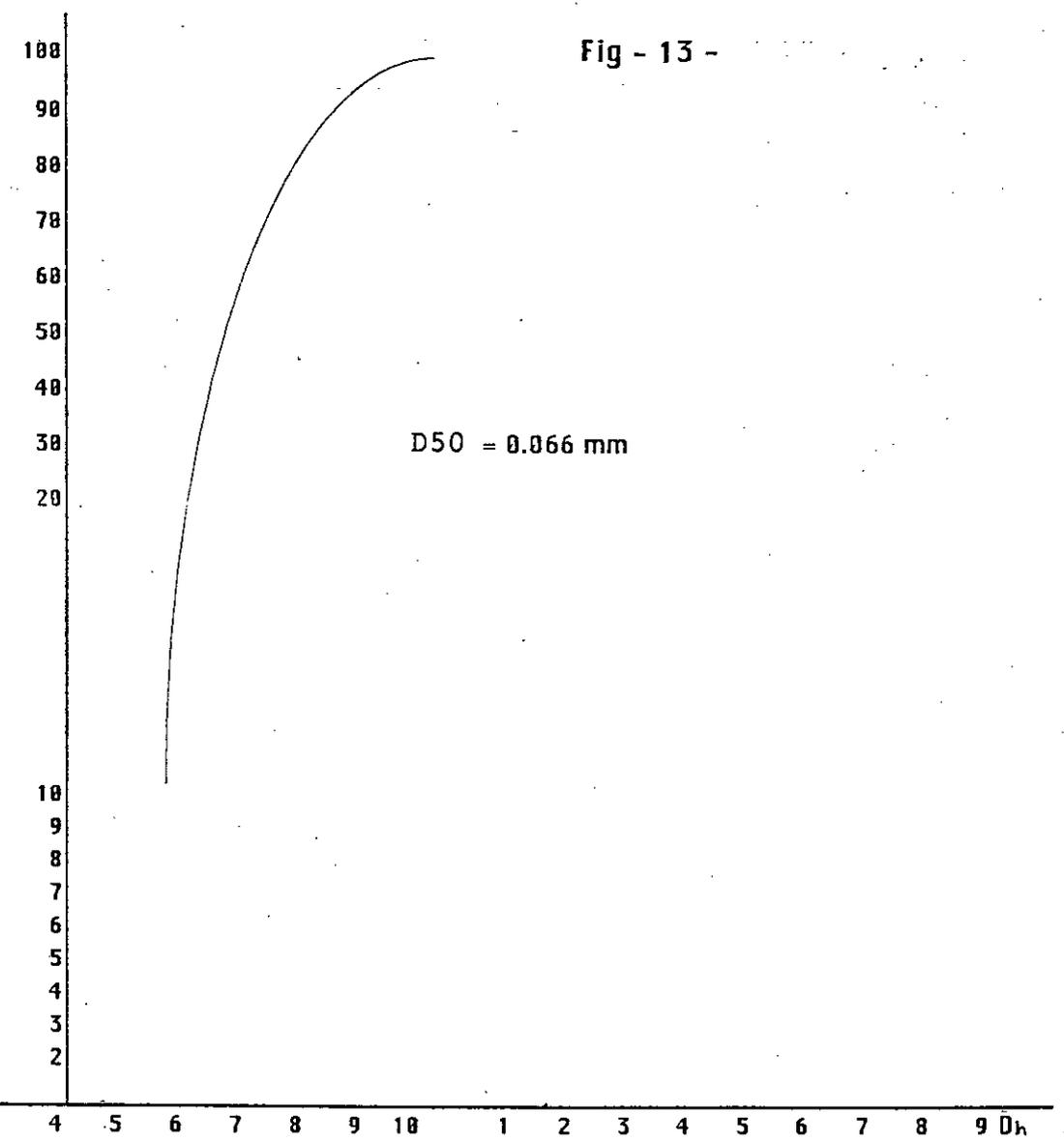
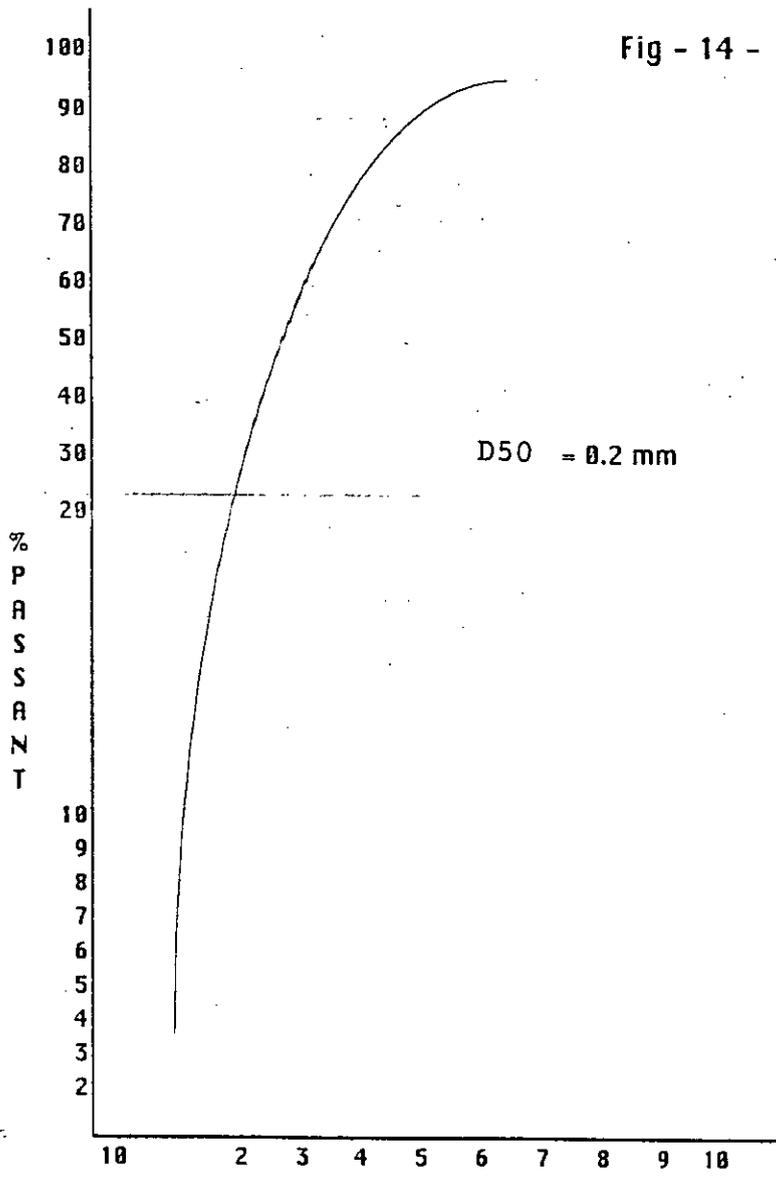
c-1- 1ère méthode :

Les figures 13 et 14 page 57 représentent respectivement les courbes granulométriques du papier abrasif P80 et P220. Elles permettent de déterminer le diamètre dont 50% des grains ont des diamètres plus fins D50.

Pour P80 nous avons : D50 = 0,2mm
et pour P220 nous avons : D50 = 0,0666mm

c-2- 2ème méthode :

La rugosité est mesurée directement par un rugosimètre type "Hobson Taylor" (à la société nationale des véhicules industriels; SNVI), qui permet de détecter la valeur de la hauteur moyenne des aspérités.



Courbe granulometrique du P80

Courbe granulometrique du P220

A-2 Procédé de mesure :

Pour chaque état de paroi du canal, les grandeurs mesurées sont :

- * Le débit d'écoulement, Q [l/s]
- * La hauteur d'eau, h [cm].

- Canevas de mesure :

- * On fixe la pente du fond (I);
- * On alimente le canal avec un débit (Q);
- * On règle le niveau du plan d'eau dans le canal;
- * On lit la hauteur d'eau dans les tubes piezométriques
- * On relève la hauteur de la lame deversante
- * On fait varier la profondeur d'eau
- * On refait les mêmes mesures
- * On augmente le débit et on effectue les mêmes opérations suivant le même canevas.

B/ Installation "II"

La deuxième série de mesure a été effectuée sur un banc d'essai, ce dernier fonctionne en circuit fermé. Une pompe aspire à partir d'un bassin d'accumulation pourvu à sa partie supérieure d'un volet déversant rectangulaire, qui permet le réglage de la profondeur d'eau dans le canal d'essai, et refoule à travers une conduite munie d'un venturimètre, vers un réservoir de transfert. Figure 15 page 59.

Le canal d'essai est de forme rectangulaire de 2,30m de longueur, de 15cm de profondeur, de 61,2cm de largeur et d'une pente fine de 0.2/235.

Dans cette installation, les essais sont effectués en respectant la condition d'un canal large ($B/h > 5$) [11]. Ceci rend l'effet de la rugosité des parois latérales négligeable devant celui du fond du canal.

Un système de plaques rectangulaires amovibles de trois états de rugosité constitue le fond du canal d'essai.

B-1- Mesure du débit :

Le venturimètre permet de mesurer le débit refoulé par la mesure de la différence de pression, lue sur le manomètre différentiel (figure 16 page 60), provoquée par le rétrécissement.

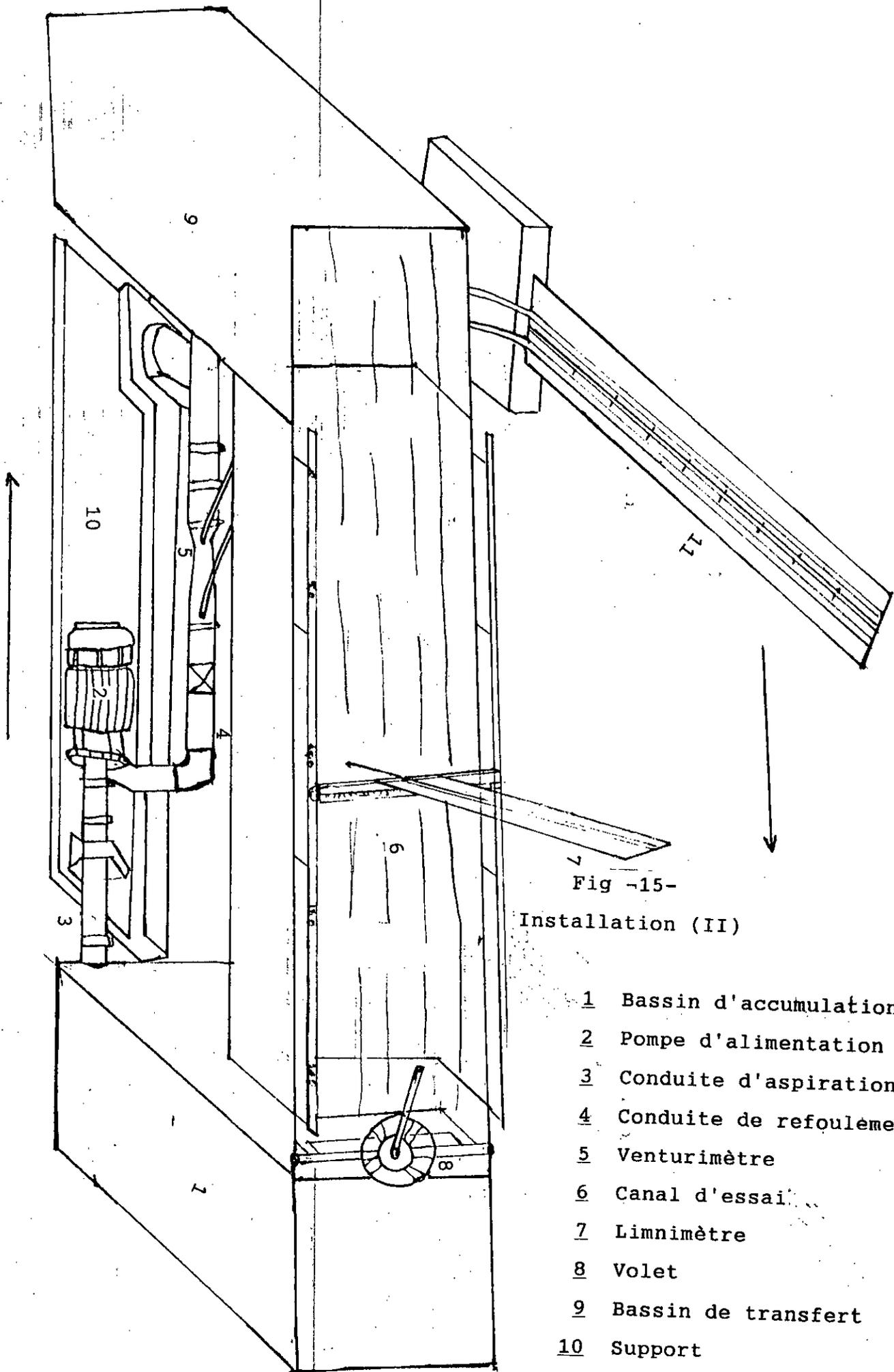


Fig -15-

Installation (II)

- 1 Bassin d'accumulation
- 2 Pompe d'alimentation
- 3 Conduite d'aspiration
- 4 Conduite de refoulement
- 5 Venturimètre
- 6 Canal d'essai
- 7 Limnimètre
- 8 Volet
- 9 Bassin de transfert
- 10 Support
- 11 Manomètre différentiel

- Etalonnage du venturimètre :

L'étalonnage se fait au moyen d'une jauge, munie d'une règle graduée en litre permettant la lecture du volume passant en une période donnée. Les prises de volume sont en coordination avec les prises de différences de pression, (Δh), (tableau n°4 annexe I).

Le schéma de principe de cet appareil est montré par la figure 16.

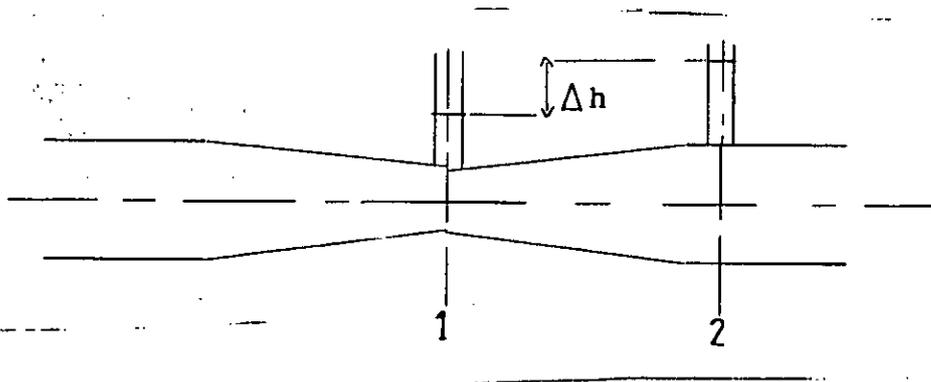


Fig -16-

Shéma de principe du venturimètre

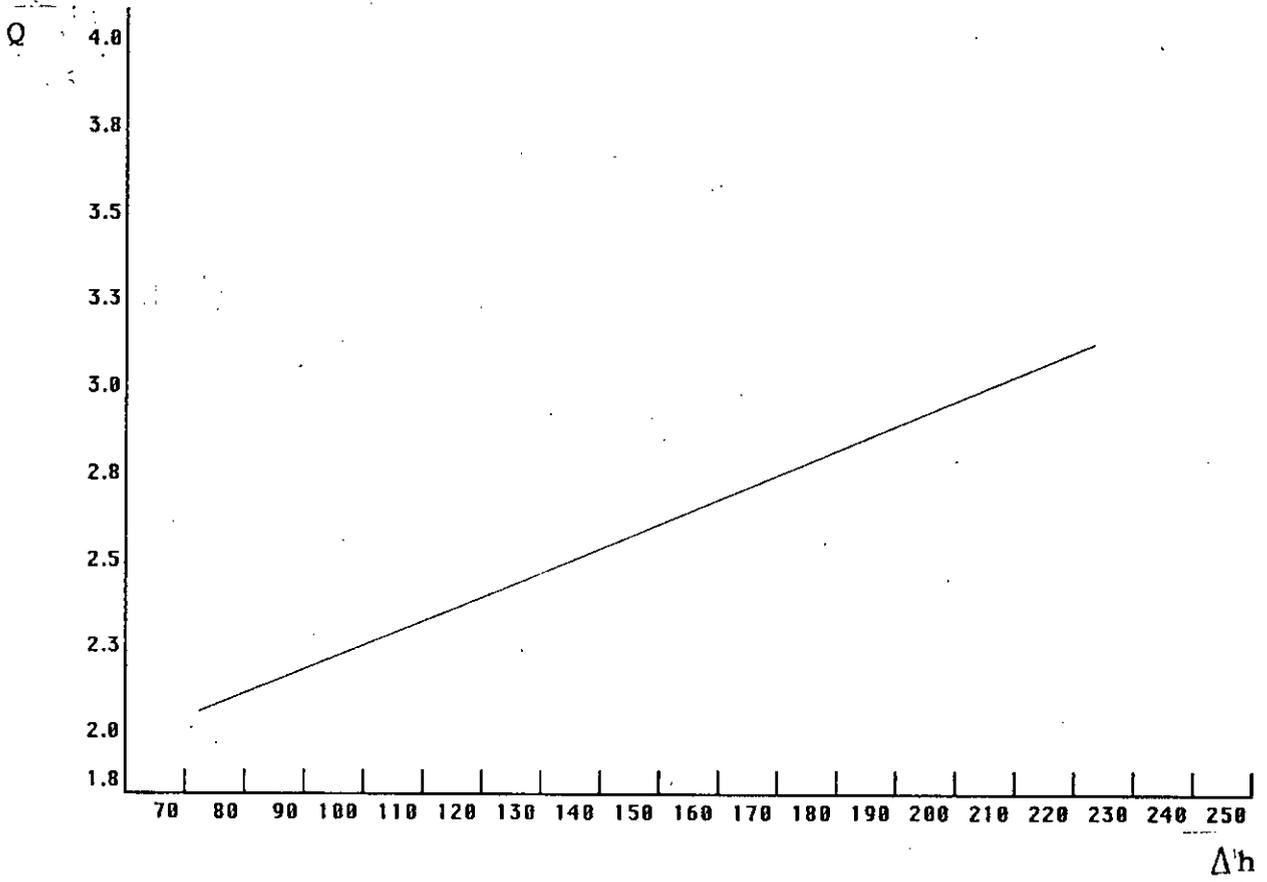


Fig -17-
Courbe d'étalonnage du venturimètre

En appliquant le théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 et en négligeant les pertes de charge nous pouvons écrire :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} = \Delta h$$

D'où:

$$Q = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\Delta h} / \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

nous posons:

$$Cd = \sqrt{2g} / \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

D'où

$$Q = Cd \cdot \Delta h^{0,5}$$

La figure -17- page 60 montre la courbe d'étalonnage Q en fonction de Δh.

Par l'application d'un ajustement puissance, l'expression du débit est donnée par la relation suivante:

$$Q = 0.237132 (\Delta h)^{0,497142} [l/s]$$

avec Δh en mm

et un coefficient de corrélation :

$$r = 0,994$$

B-2- Mesure de la hauteur d'écoulement:

Deux sections de mesure ont été choisies à une distance de 1m et 1.5m de l'amont du canal, sur l'axe central. Un limnimètre placé sur un chariot permet de relever la profondeur de l'écoulement.

- Rugosité du fond:

L'amovibilité du fond a permis d'utiliser trois formes de rugosité différentes:

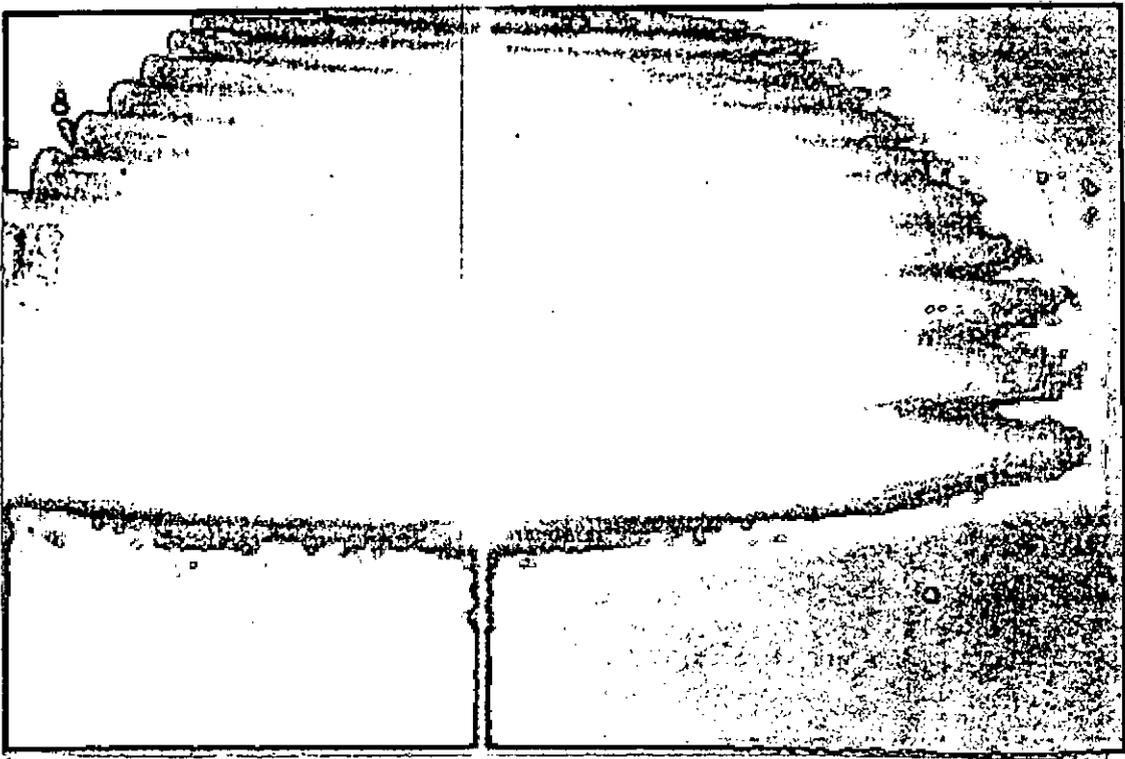


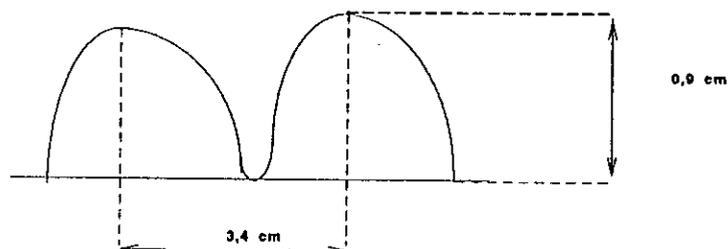
Fig - 18 a -
Forme ondulatoire de rugosité



Fig -18.b-
Forme de galet nonuniforme de rugosité

a- Une forme lisse constituée par une plaque en PVC dure, dont la dimension moyenne caractéristique de la rugosité est de 0,0065cm [14].

b- Une forme ondulatoire en plastique dont les vides sont remplies avec du plâtre. (Figure -18a- page 62). Ses dimension sont montrées sur le shema ci-dessous:



c- Des cailloux de forme nonuniforme, leur hauteur est comprise entre 0.5m et 1,9 cm et d'une valeur moyenne de 1,275 cm .(Figure -18b- page 62).

B-3- Procédé de mesure

Nous répétons les mêmes étapes de procédure de l'installation [I].

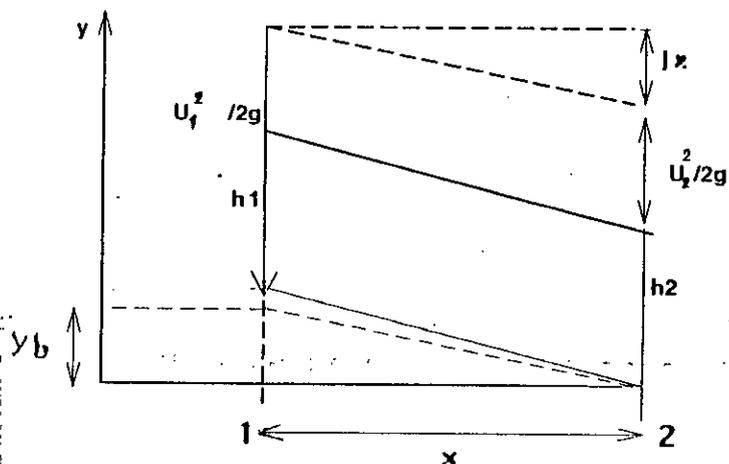
2/ Hypothèses de calcul

Les hypothèses de base de nos calculs sont:

- 1- L'écoulement est permanent. $Q = \text{cte}$
- 2- Le fluide est incompressible. $\rho = \text{cte}$
- 3- Le transport-solide est négligeable
- 4- La distribution de la pression est considérée hydrostatique .

3/ Procédé de calcul :

La figure 19 ci-après montre le Schéma de base des calculs



SCHEMA DE CALCUL

- Calcul de la vitesse moyenne

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad [\text{cm/s}]$$

- Détermination de la pente de la ligne d'énergie:

$$J = \frac{1}{x} \left[\frac{U_1^2}{2g} + y_1 + h_1 - \frac{U_2^2}{2g} - y_2 - h_2 \right]$$

avec, $y_1 - y_2 = Y_b$.

Calcul du:

- Rayon hydraulique moyen

$$R_h = \frac{R_{h1} + R_{h2}}{2} \quad [\text{cm}]$$

- Nombre de Reynolds Re:

$$Re = \frac{4 R_h U}{\nu}$$

avec $\nu = 1,00335 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ à $T = 20^\circ\text{C}$ [13]

Détermination:

- de la vitesse de frottement

$$U_f = (g R_h J)^{1/2} \quad [\text{cm/s}]$$

- du nombre de Reynolds de frottement

$$Re_f = \frac{U_f \cdot K}{\nu}$$

- du coefficient de frottement

$$f = 8 / (U/U_f)^2$$

- du coefficient de Chezy

$$C = (8g / f)^{1/2} \quad [\text{m}^{1/2}/\text{s}]$$

CHAPITRE IV

**ANALYSE DES RESULTATS
EXPERIMENTAUX**

1/ Resultats experimentaux :

Les résultats expérimentaux des deux installations I et II sont donnés dans les tableaux , 5 ÷ 10, en Annexe I. Leur analyse est faite à partir des graphes présentés dans les figures 20 ÷ 34 .

2/ Interprétation des résultats :

A/Installation I:

a) Canal rectangulaire en plexi-glass:

Pour: $5 \cdot 10^4 < Re < 9 \cdot 10^5$

L'écoulement est torrentiel et hydrauliquement lisse.

La figure 20 page 67 représente la variation du rapport, $\frac{U}{U_f}$, en fonction de $\ln \frac{RhU_f}{\rho}$. L'application d'un ajustement linéaire donne la relation suivante :

$$\frac{U}{U_f} = 2,6 \ln \frac{RhU_f}{\rho} + 5,11 \quad (1)$$

La figure 21 page 68 donne l'évolution du coefficient de frottement, f , en fonction du nombre de Reynolds Re_v . Les points expérimentaux, s'alignent sur une droite dont l'équation est obtenue par un ajustement puissance :

$$f = 0,162 \cdot Re^{-0,207} \quad (2)$$

b) Canal rectangulaire en P220 :

Pour : $6 \cdot 10^4 < Re < 9 \cdot 5 \cdot 10^5$

L'écoulement est hydrauliquement lisse et torrentiel.

La figure 22 page 69 montre la variation du rapport $\frac{U}{U_f}$ en fonction de $\ln \frac{RhU_f}{\rho}$. L'allure de la courbe est une droite dont l'équation est déterminée par l'application d'un ajustement linéaire:

Fig 20: Variation de U/U_f en fonction de $\ln(Rh U_f / \varnothing)$ cas du Plexiglass

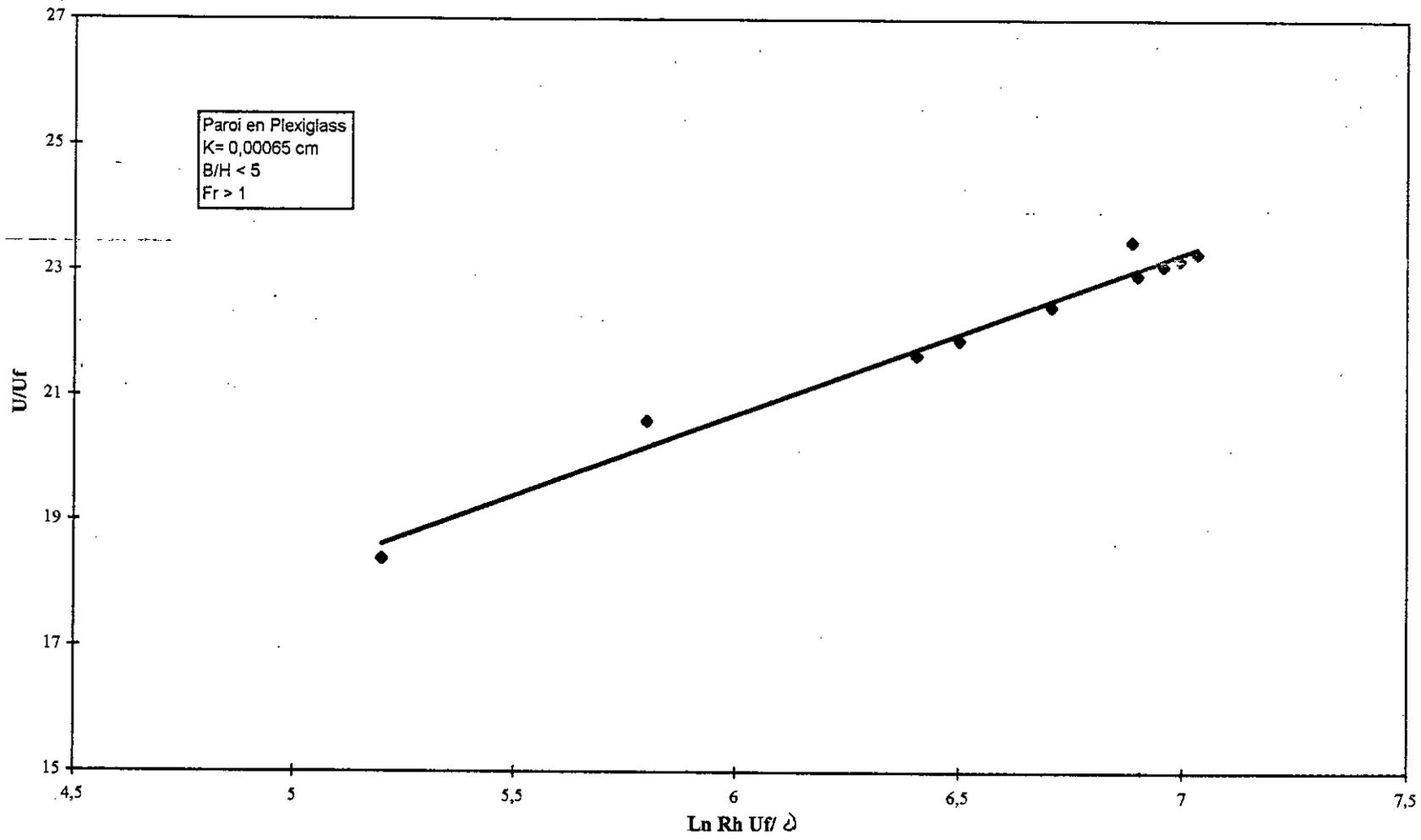


Fig21: Evolution de F en fonction de Re
cas du plexiglass

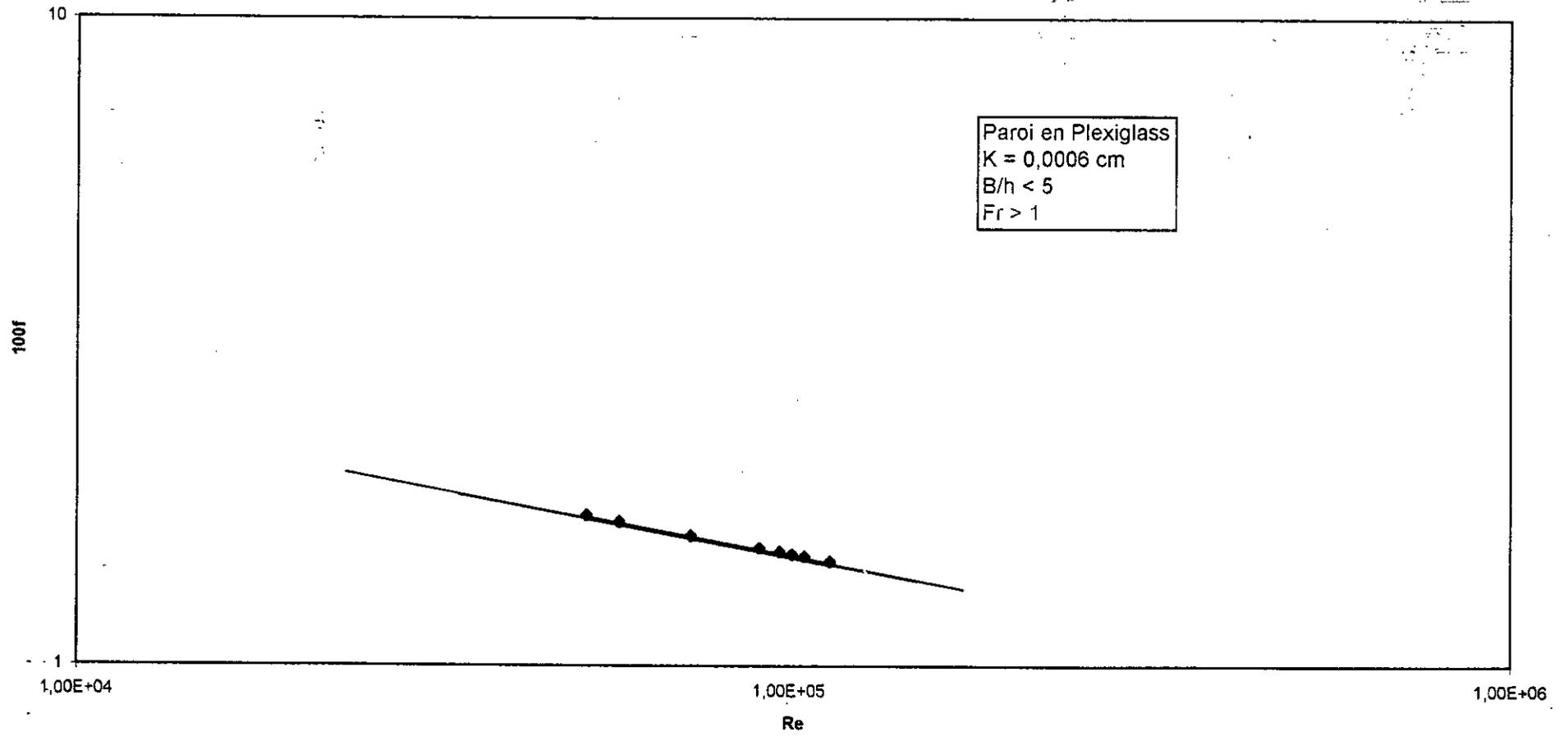
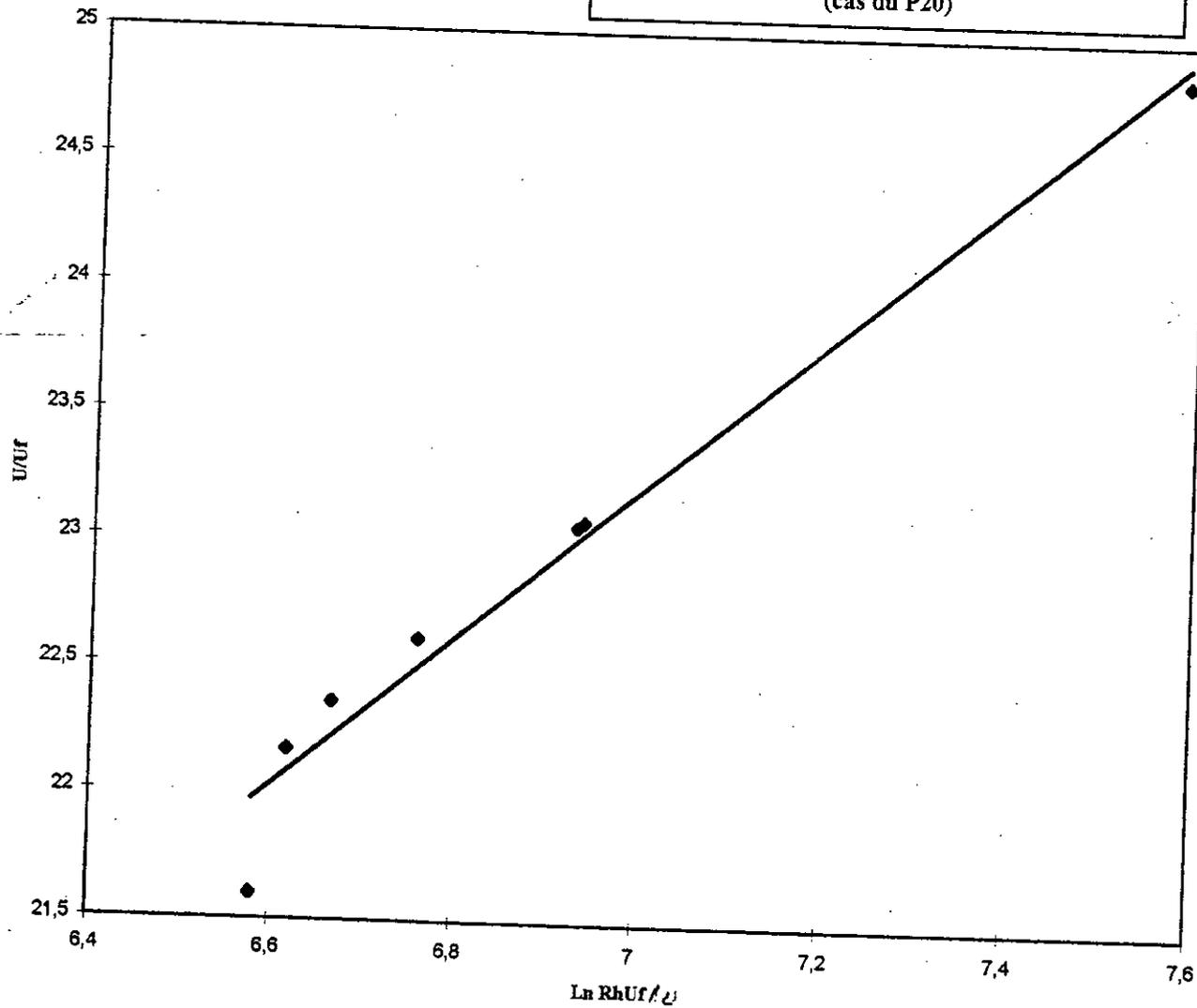


Fig 22: Variation de U/U_f en fonction de $\ln RhU_f/\rho$
(cas du P20)



$K = 0,01 \text{ cm}$
 $B/H < 5$
 $Fr > 1$

$$\frac{U}{U_f} = 2,61 \ln \frac{RhU_f}{\varnothing} + 4,97 \quad (3)$$

La figure 23 page 71 représente l'évolution de f , en fonction de Re . Les données expérimentales s'alignent sur une droite dont l'équation est obtenue par un ajustement puissance:

$$f = 0.162. Re^{-0,201} \quad (4)$$

c) Canal rectangulaire en P80 :

Pour $2.10^4 Re < 3.10^5$

L'écoulement est en grande partie torrentiel. Deux zones d'écoulement sont distinguées:

- Zone hydrauliquement lisse:

Les points expérimentaux sont représentés dans les figures 24 et 25.

La figure 24 page 72 donne la variation du rapport U/U_f en fonction de $\ln \frac{RhU_f}{\varnothing}$. Les points suivent une loi linéaire donnée par

$$\frac{U}{U_f} = 2,59 \ln \frac{RhU_f}{\varnothing} + 5,96 \quad (5)$$

L'évolution de f , en fonction de Re , est montrée dans la figure 25 page 73, en fonction de Re . Nous remarquons que les points expérimentaux de la zone hydrauliquement lisse s'alignent sur une droite ayant pour équation:

$$f = 0.166 Re^{-0,21} \quad (6)$$

- Zone de transition

D'après la figure 25 page 73, nous constatons que le coefficient de frottement, f , décrit au fur et à mesure que Re augmente et augmente avec la diminution du poli relatif Rh/K . Dans cette zone, f , dépend de Re et de Rh/K simultanément.

L'application de la méthode des moindres carrés nous permet d'obtenir pour la zone de transition:

Fig 2.3: Evolution de F en fonction de Re
(cas de P220)

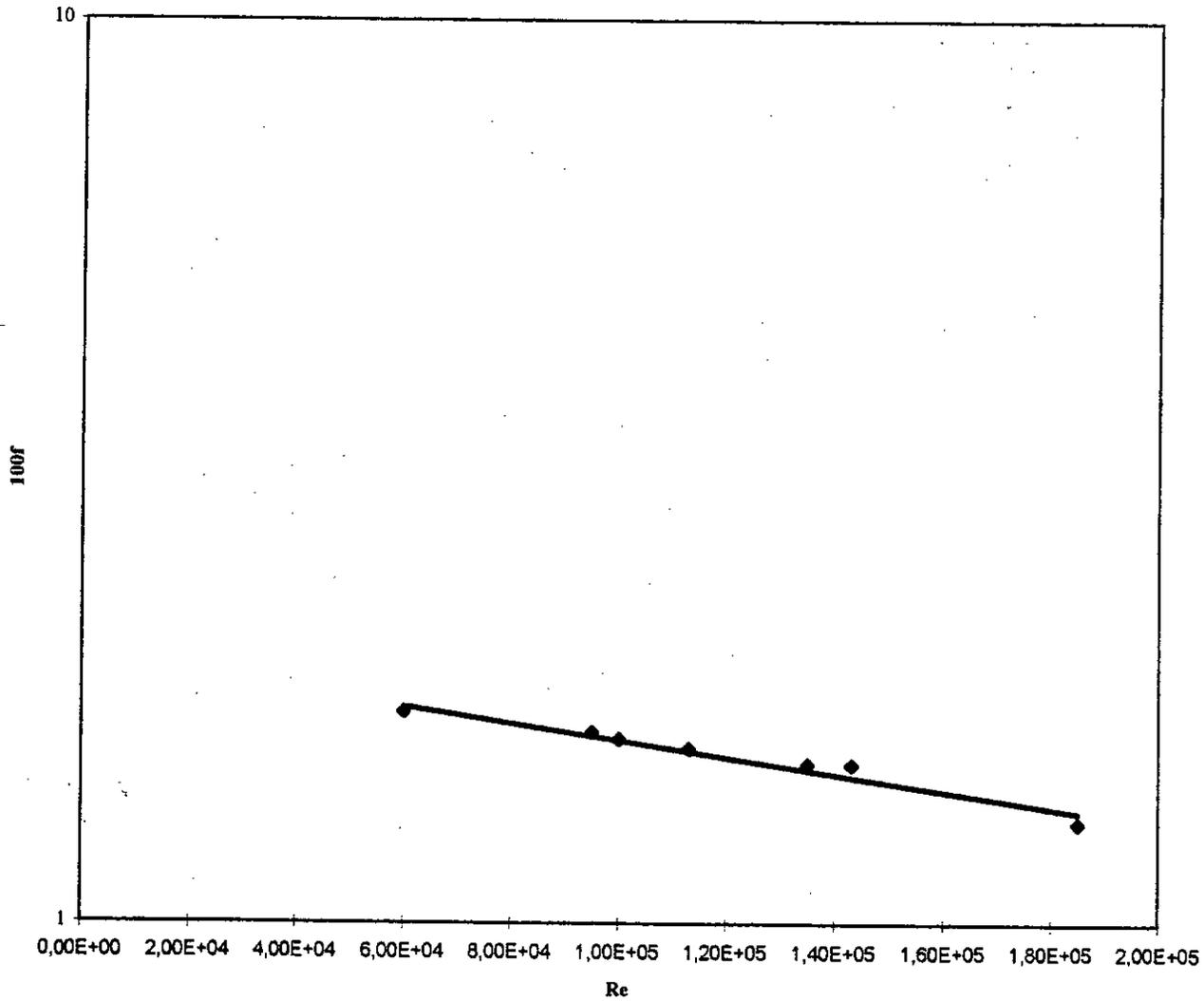


Fig 24: Variation de U/U_f en fonction de $\ln Rh U_f / \rho$
(cas du P80)

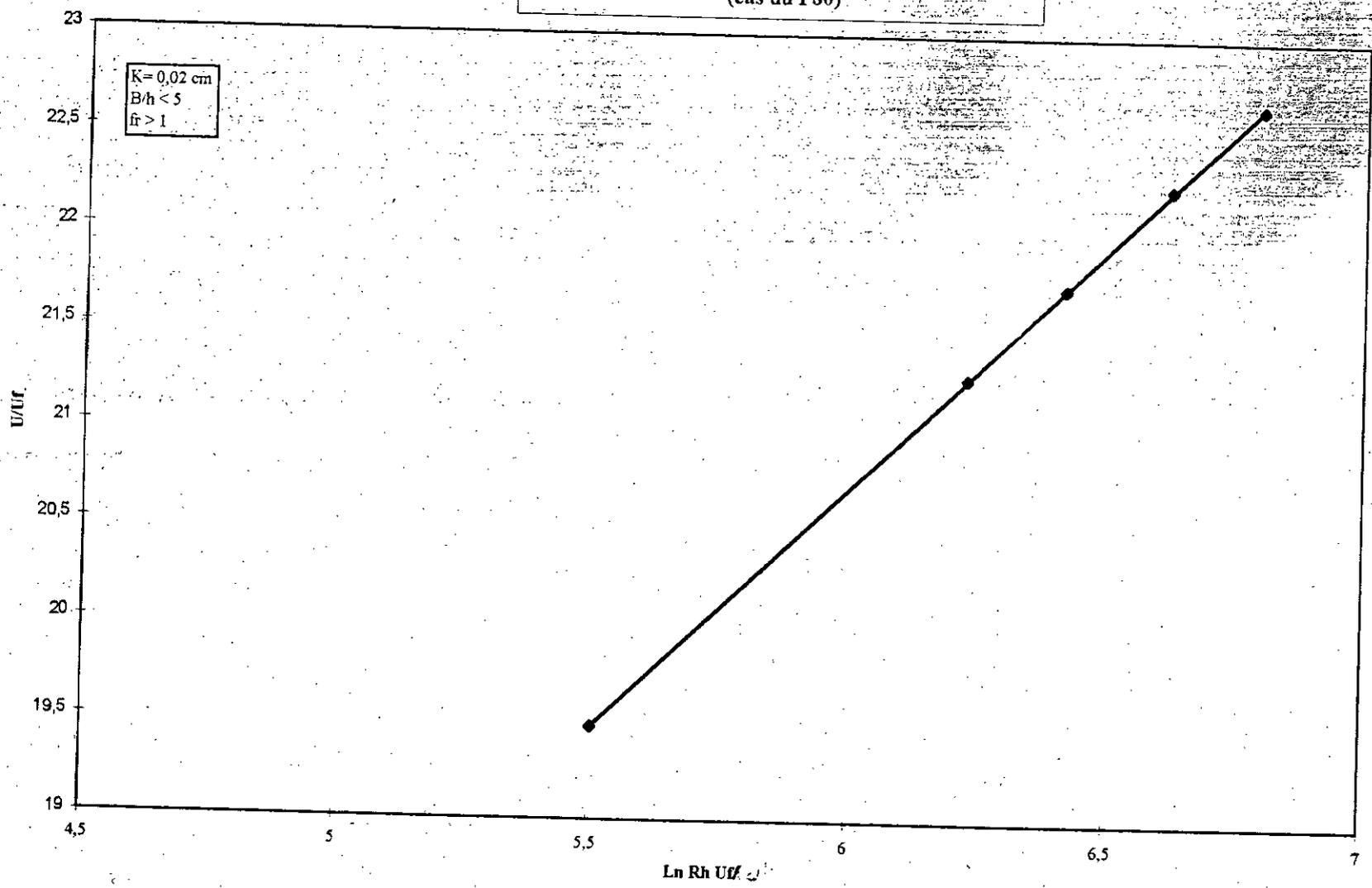
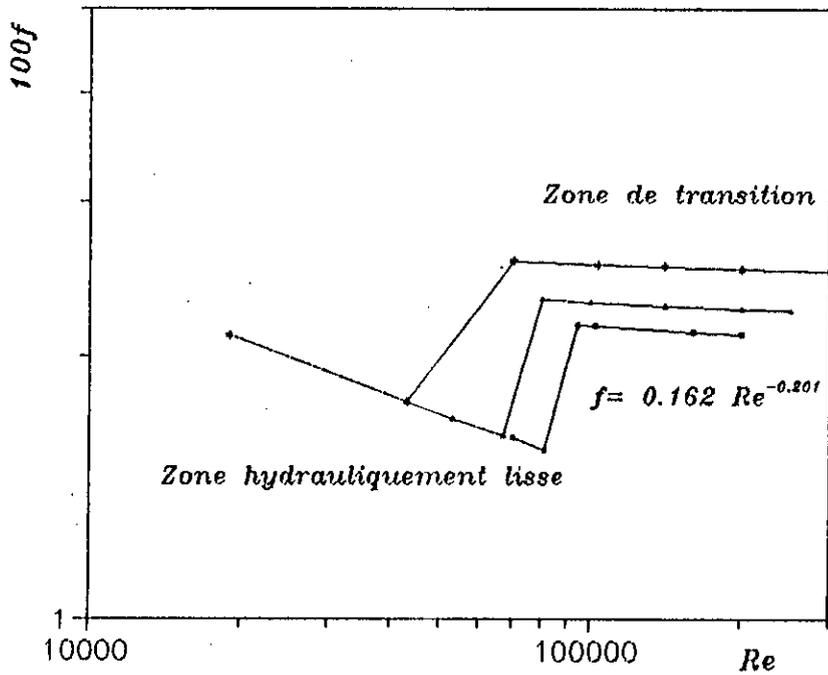


Fig 25 : Evolution de f en fonction de Re
(Cus du P80)



$k = 0.02 \text{ cm}$
 $B/h < 5$
 $Fr > 1$

—•—•—•— $Rh/k = 150$
 —•—•—•— $Rh/k = 100$
 —•—•—•— $Rh/k = 200$

$$f = \left[-2 \log \left[\frac{K/Rh}{14,91} + \frac{1,13}{Re\sqrt{f}} \right] \right]^2 \quad (7)$$

Synthèse :

Les résultats des essais effectués sur l'installation I ont permis d'étudier le comportement du coefficient de frottement ,f, dans deux zones de l'écoulement turbulent:

1- Zône hydrauliquement lisse :

Dans cette zone ,f, se comporte suivant l'équation:

$$\frac{U}{Uf} = \frac{1}{k} \ln \frac{RhUf}{\epsilon} + \beta \quad (8)$$

Les valeurs des constantes k et β sont déterminés par l'application d'un ajustement linéaire pour les trois cas de rugosité comme suit :

- Cas du plexi-glass

$$K = 0,39$$

$$\text{et } \beta = 5,11$$

- Cas du P 220

$$k = 0,38$$

$$\text{et } \beta = 4,97$$

- Cas du P80

$$k = 0,39$$

$$\text{et } \beta = 5,96$$

Les valeurs obtenues de k et β indiquent que :

Les différentes valeurs de k sont proches de la valeur universelle de Von-Karman, qui est d'environ "0,4".

- Pour les valeurs de la constante, β , nous remarquons qu'elles sont proches de celle trouvée par Graf [12] qui est d'environ "5,1", pour les canaux, mais elle diffère considérablement de celle destinée aux conduites forcées lisses et qui est d'environ "3,5".

2- Zone de transition :

Cette zone apparaît lors des essais effectués dans le cas du papier abrasif désigné par P80. Le comportement du coefficient de frottement est régi par l'expression :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = - 2 \log \left[\frac{K/R_h}{af} + \frac{bf}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (9)$$

avec : $12 < af < 15$ et $0 < bf < 6$

Les coefficients obtenus par l'application de la méthode des moindres carrés Annexe II, dans cette étude sont :

$$a = 14,1 \text{ et } b = 0,725$$

3- Installation II :

La série des essais effectués sur l'installation II est particularisée par un régime fluvial dans les trois cas de rugosité :

a- Canal bidimensionnel à fond en PVC :

$$\text{Pour : } 3,14 \cdot 10^3 < Re < 9,99 \cdot 10^4$$

L'écoulement est hydrauliquement lisse.

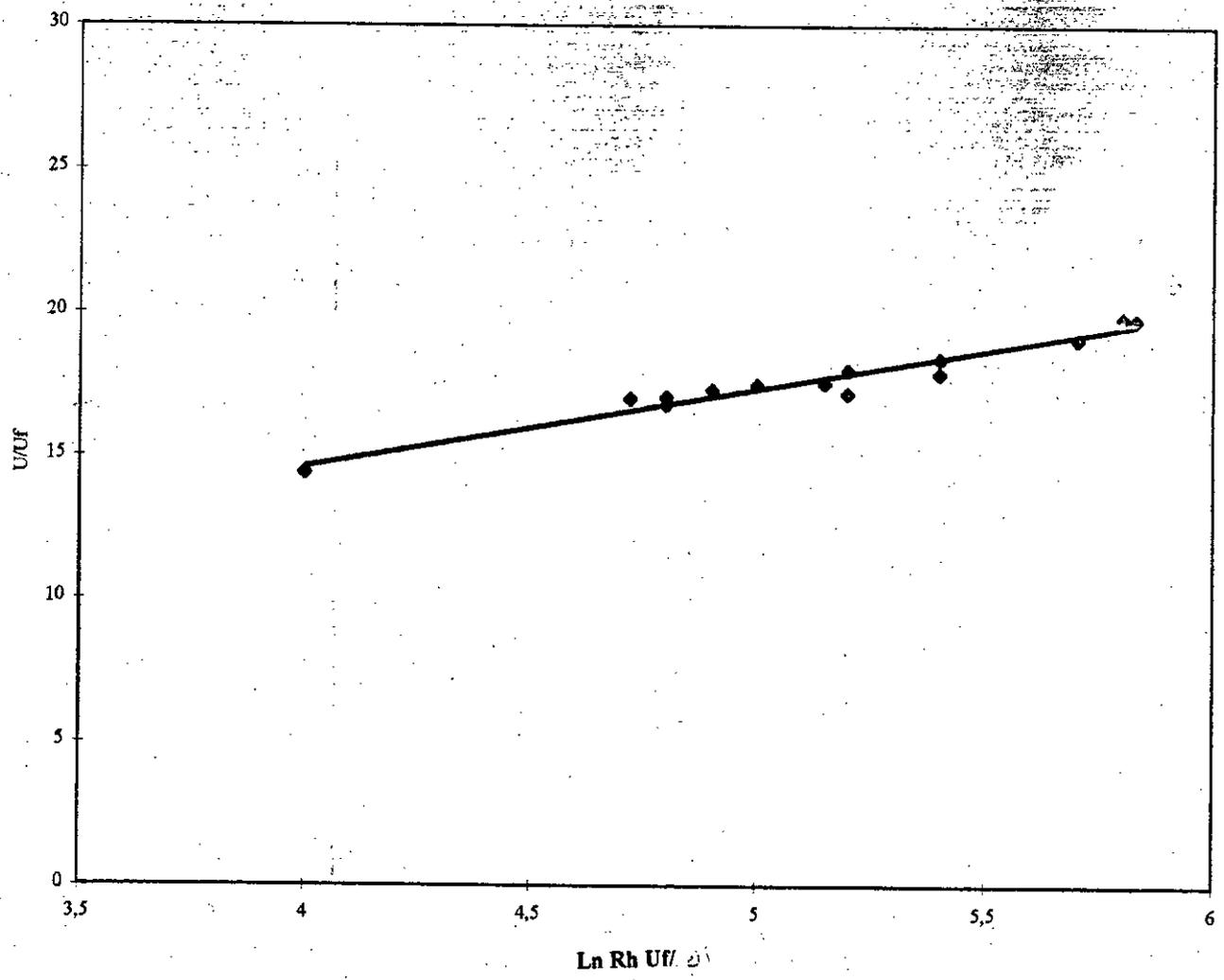
La figure 26 page 76 représente l'évolution du rapport, $\frac{U}{U_f}$, en

fonction de $\ln \frac{Rh \cdot U_f}{\delta}$. Elle montre que les points expérimentaux s'alignent sur une droite dont l'équation est obtenue par ajustement linéaire.

$$\frac{U}{U_f} = 2,71 \ln \frac{RhU_f}{\delta} + 3,72 \quad (10)$$

En observant cette expression, nous remarquons que la valeur de la constante, k , est de "0,37". Cette dernière est proche de la valeur universelle de Von-Karman. La valeur "3,72", est proche de celle obtenue par Keulegan [11], qui est égale à "3,5".

Fig 2 6: Variation de U/U_f en fonction de $\ln Rh U_f / \epsilon$



Paroi en PVC
 $K=0,0065 \text{ cm}$
 $B/h > 5$
 $Fr < 1$

Remarque

La constante β , dépend de la forme du canal et du nombre de Fronde.

La variation du coefficient de frottement f , en fonction du nombre de Reynolds Re , est donnée dans la figure 27 page 78. L'application d'un ajustement puissance aux données expérimentales donné :

$$f = 0,337. (Re)^{-0,27} \quad (11)$$

b- Canal bidimensionnel, à lit, à rugosité ondulatoire :

La variation du coefficient de frottement f , en fonction du nombre de Reynolds, Re , et pour différents polis relatifs Rh/K , est donnée dans la figure 28 page 79. Cette dernière montre, dans nos conditions d'expériences, qu'il existe deux zones distinctes d'écoulement, et que les points expérimentaux se situent sur des courbes parallèles, dont chacune correspond à une valeur du poli relatif Rh/K , différente.

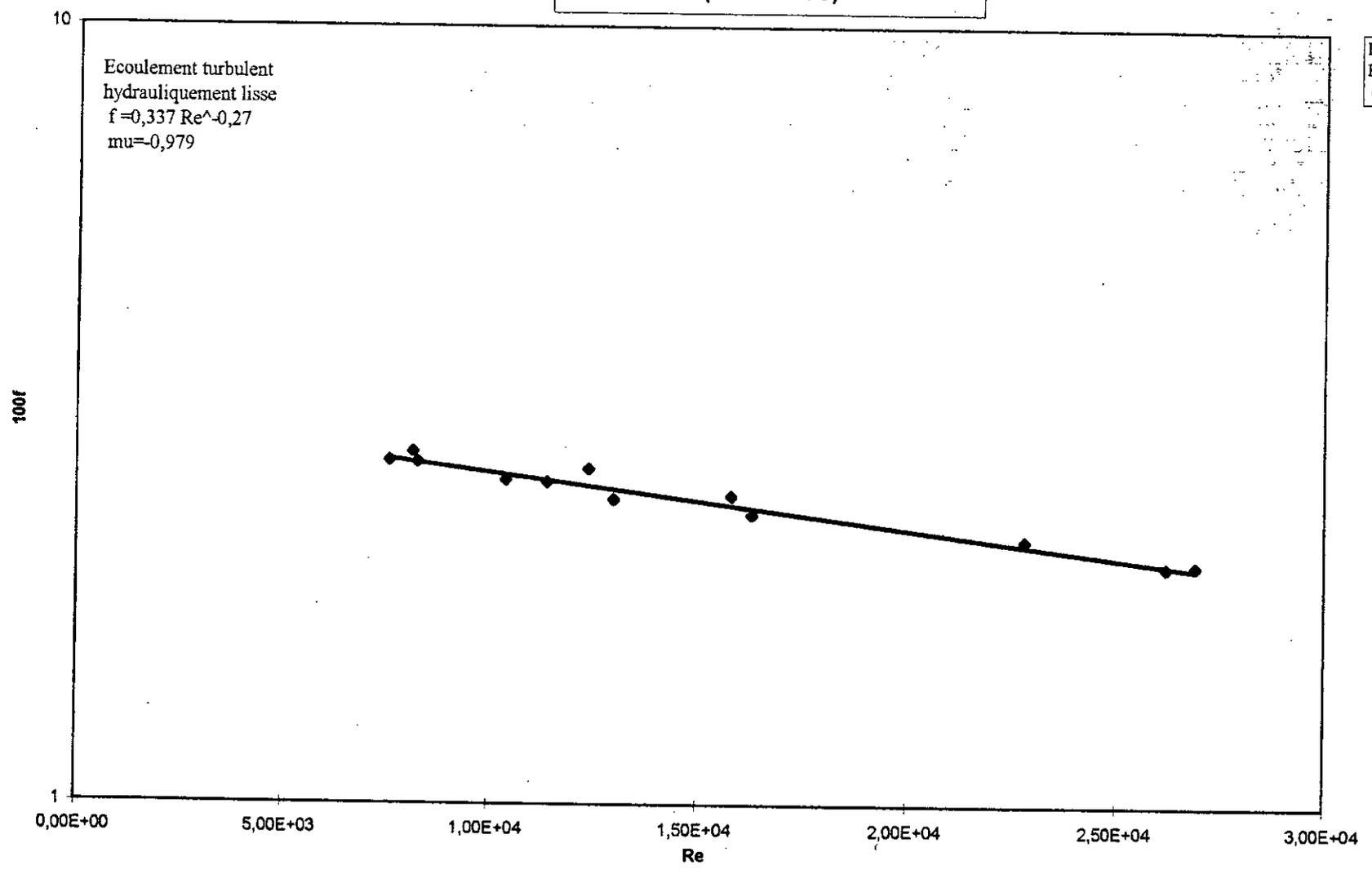
1- zone complètement rugueuse :

Pour : $8 \times 10^3 < Re$
et $Fr < 1$

La figure 28 page 79 indique que f , est représenté par des courbes parallèles pouvant être assimilées à des droites. Cette zone est d'autant plus grande que la valeur du poli, Rh/K , est faible. Le coefficient de frottement, f , ne dépend que du poli relatif, Rh/K . Son comportement en fonction de Re et Rh/K , a une allure, en général, similaire à celle de zeggda [15], et d'une formulation très proche :

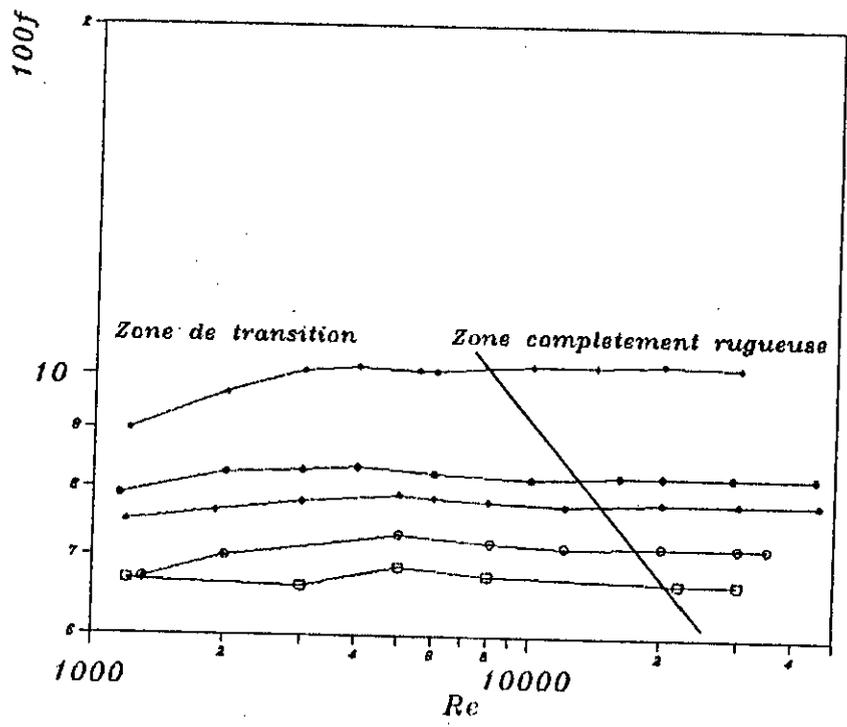
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,03 \log \frac{Rh}{K} + 2,16 \quad (12)$$

Fig 27: Evolution de f en fonction de Re
(cas du PVC)



78

Fig 28: Evolution de f en fonction de Re dans le cas de rugosité ondulatoire ($k=0,9$ cm)



$k=0.900$ cm
 $B/h > 5$
 $Fr < 1$

—●— $R_N/k=3$
 —■— $R_N/k=4.5$
 —○— $R_N/k=5$
 —◇— $R_N/k=6$
 —□— $R_N/k=7$

2- Zone de transition :

Pour : $10^3 < Re < 2.10^3$ et $Fr < 1$

Les points de la formule de zone de transition, commencent par une croissance jusqu'à une limite de Re , qui devient plus importante avec l'augmentation du poli relatif, Rh/K . Or le coefficient de frottement f , dépend du nombre de Reynolds, Re , et de la valeur de Rh/K , à la fois.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{K/Rh}{12,66} + \frac{1,54}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (13)$$

C- Canal bidimensionnel, lit, à rugosité à galets non uniforme :

La figure 29 page 81 représente l'évolution du coefficient de frottement f , en fonction du nombre de Reynolds, Re , pour différents polis relatifs et le cas d'un écoulement fluvial. Les points expérimentaux s'allongent sur des courbes parallèles, nous y distinguons deux zones d'écoulement :

* - Zone complètement rugueuse :

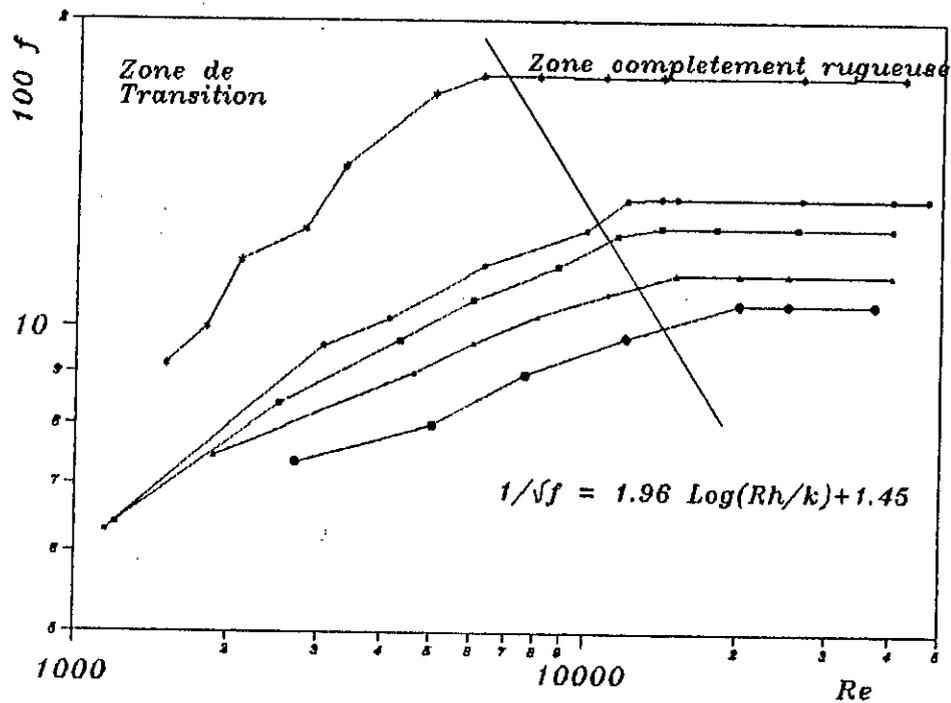
Pour $Re > 6.10^3$ et $Fr < 1$

Les points expérimentaux s'alignent sur des droites parallèles. Le coefficient de frottement, dépend uniquement du poli relatif Rh/K . Il se comporte suivant la loi par la méthode des moindres carrés :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.96 \log \frac{Rh}{K} + 1.45 \quad (14)$$

La valeur du coefficient de $\log Rh/K$, 1.96, est très proche de la valeur Universelle obtenue aussi par Keulegan [11]. Alors que la valeur 1,45 est proche de celle proposée par Miller [9] et qui est égale à 1. Mais elle est inférieure à la valeur obtenue par Wang [21] et qui est de 3,1.

Fig 29: Evolution de f en fonction de Re dans le cas d'une rugosité non uniforme ($k=1.275$)



$k=1.275$
 $B/h > 5$
 $Fr < 1$

- $Rh/k=3$
- ■ ■ ■ ■ $Rh/k=4.5$
- ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ $Rh/k=5$
- ◆ ◆ ◆ ◆ ◆ $Rh/k=6$
- ● ● ● ● $Rh/k=6.75$

* - Zone de transition:

Pour $10^3 < Re < 2.10^4$ et $Fr < 1$ (écoulement fluvial)

Les points expérimentaux commencent par une augmentation de f , suivant Re , et une diminution suivant, Rh/K . L'équation qui régit cette évolution est:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = - 2 \log \left[\frac{K/Rh}{5,5} + \frac{1,54}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (15)$$

Le coefficient 5,5 ne concorde pas avec ceux de Graf [11]. Ceci est dû à la forme des aspérités qui n'est pas régulière.

* - Expression du coefficient de Chezy:

En considérant la zone complètement rugueuse dans les deux cas de rugosité ci avant. La figure 30 page 83 montre que pour la rugosité ondulatoire et la rugosité à galets non uniforme. Le coefficient de Chezy, c , est exprimé par deux relations différentes:

- Rugosité ondulatoire ($K=0.9$ cm)

$$C = 16,2 \left(\frac{Rh}{K} \right)^{0,258} \quad (16)$$

- Rugosité à galets de forme non uniforme ($K=1.275$)

$$C = 14,66 \left(\frac{Rh}{K} \right)^{0,37} \quad (17)$$

L'exposant de, Rh/K , varie donc d'une rugosité à une autre.

Fig 30): Evolution de C en fonction Rh/h pour K= 0,9 cm et K=1,275 cm

83

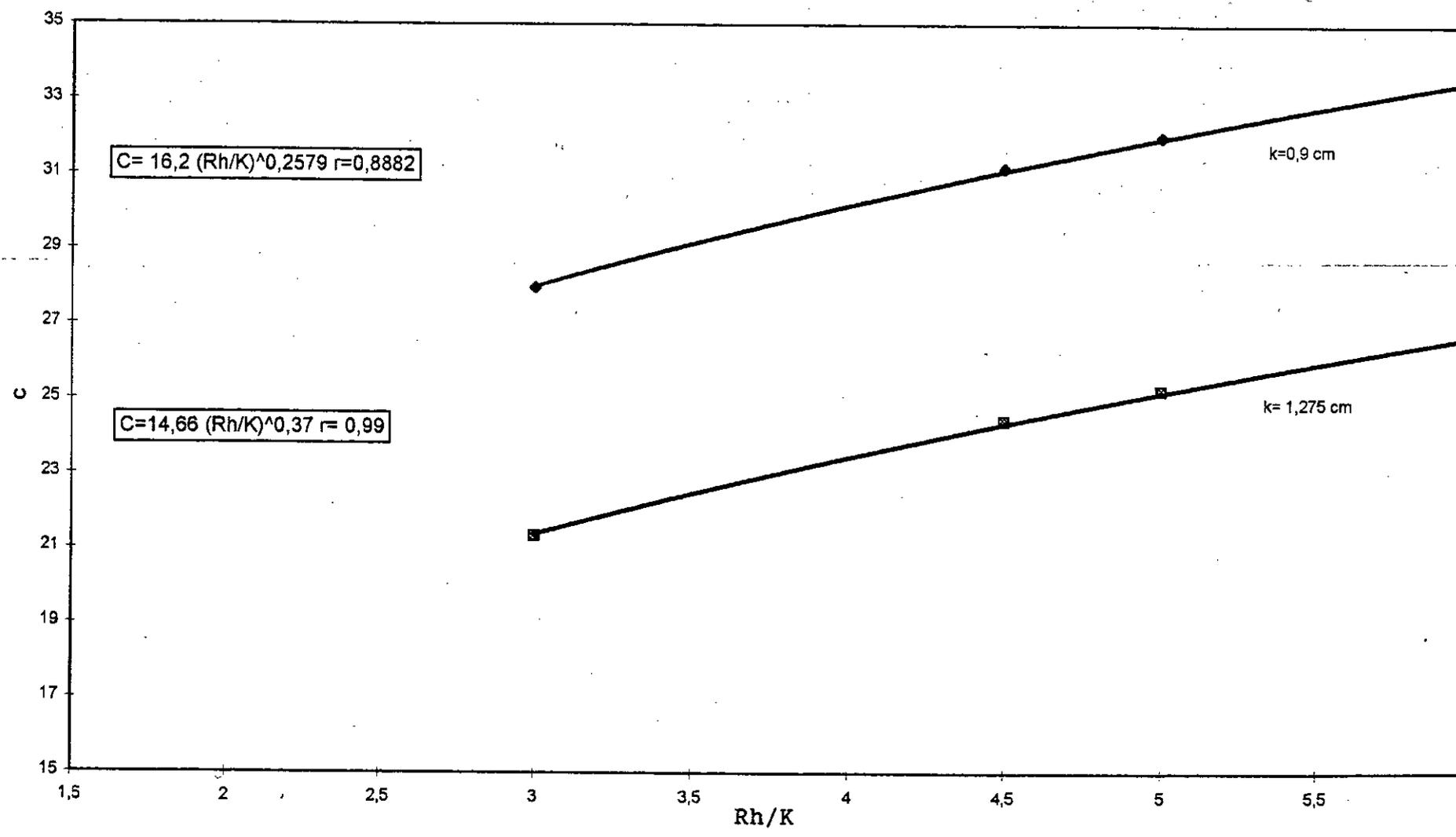
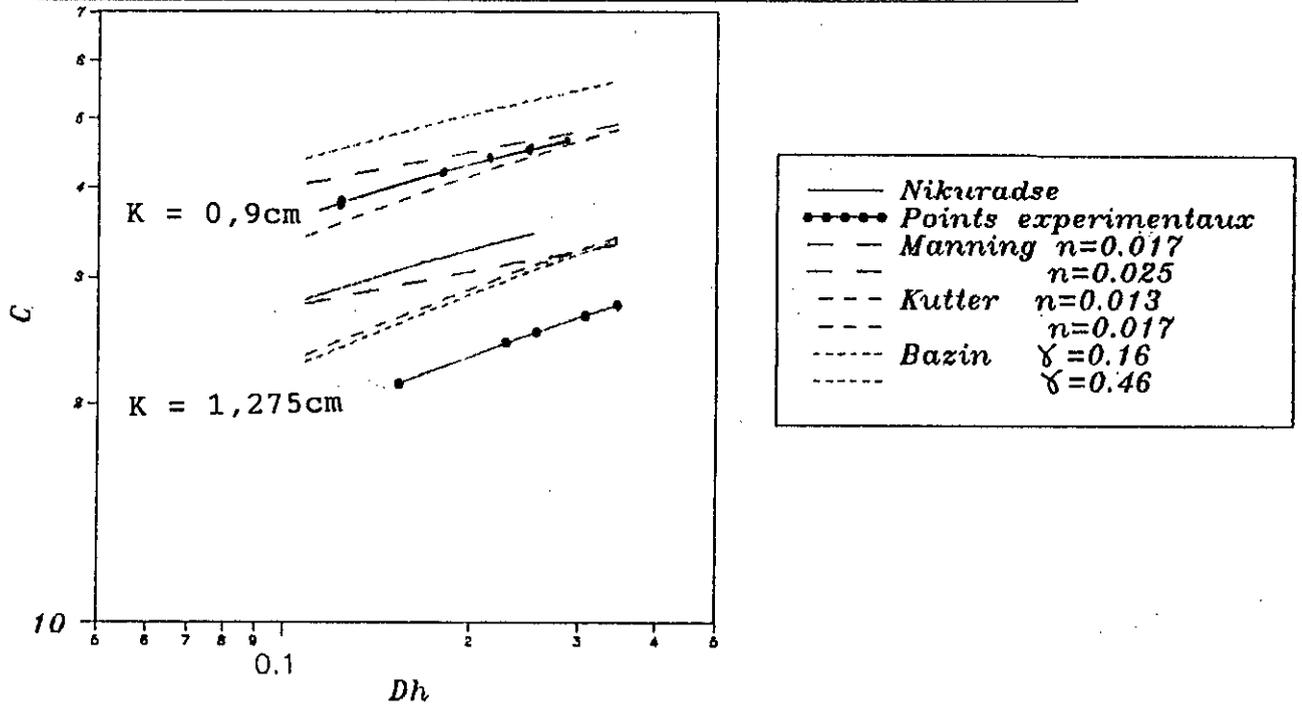


Fig 31: Comparaison graphique des donnees experimentales avec les formules anciennes et celle de Nikuradse pour la region completement rugueuse.



*** , Comparaison graphique entre les résultats expérimentaux et les formules anciennes :**

La figure 31 page 84 représente la variation du coefficient de Chezy d'écoulement complètement rugueux et ceci pour une rugosité ondulatoire et une rugosité à galets de forme non-uniforme.

Cette figure montre que :

- Dans le cas de rugosité ondulatoire :

Les points expérimentaux se trouvent entre la courbe de Kutter ($n=0,013$) et celle de Manning ($n=0,017$), ces points se situent parallèlement à la courbe de Nikuradsé.

- Dans le cas de rugosité à galets non-uniformes :

La courbe des données expérimentales se trouve au dessous de celle de Kutter ($n=0,025$) et celle de Bazin ($\gamma=0.46$).

D'après ces constatations, nous pouvons conclure que la formule de Manning est la mieux appropriée, pour la zone de l'écoulement complètement rugueux. Dans les conditions de nos essais expérimentaux et pour le cas de rugosité de forme uniforme (ondulatoire).

CONCLUSION

La synthèse des constatations faites, durant l'interprétation des résultats expérimentaux est faite en distinguant les trois zones d'écoulement :

- Zone hydrauliquement lisse

La forme de l'équation de Prandtl-Von Karman décrit bien le comportement du coefficient de frottement ,f, dans le cas des surfaces lisses (Plexi-glass, P220, P80 et PVC) avec une variation attribuée à la valeur de la constante ,B, d'un cas à un autre, suivant la forme du canal et du régime de l'écoulement (Fr).

La comparaison entre la formulation du type puissance obtenue dans le cas de l'installation I, où l'écoulement est en grande majorité torrentiel, avec la formule de Blasius (Chapitre I-1), nous permet de constater, qu'il existe une déviation entre l'exposant de ,Re, expérimental et celui de Blasius de 17%.

Dans le cas de l'installation II où l'écoulement est d'un régime fluvial, il existe une déviation de - 8% pour l'exposant de Re.

Ce résultat est en concordance avec la théorie établie par plusieurs auteurs [14], qui indique que la formule de Blasius n'est valable que pour de faibles valeurs du nombre de Reynolds ,Re,.

- Zone complètement rugueuse :

Dans cette zone, le coefficient de frottement ,f, dépend du poli relatif, Rh/k, uniquement . Il se comporte suivant une loi de forme similaire à celle de Nikuradsé [14].

- Zone de transition :

Le coefficient de frottement ,f, se comporte, de manière analogue, à celui des conduites avec une différence dans les coefficients constants de la formulation. Mais ceci est mieux observé pour le cas de la rugosité ondulatoire. Dans cette zone ,f, dépend de Re et de Rh/k. Il est donné par la combinaison des formules :

de l'écoulement hydrauliquement lisse :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \text{ Log } \frac{bf}{Re\sqrt{f}}$$

et de l'écoulement complètement rugueux :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \text{ Log } \frac{K/Rh}{af}$$

CONCLUSION

CONCLUSION

Les formules anciennes de Bazin, de Kutter et de Manning, exprimant le coefficient de Chezy, à travers duquel est représenté le frottement dans les canaux, peuvent bien induire à une sous-estimation ou sur-estimation du débit, et ne sont applicables que dans le cas d'un régime d'écoulement turbulent complètement rugueux.

Notre étude expérimentale a permis de distinguer les mêmes zones d'écoulement que pour les conduites forcées, où, f , le coefficient de frottement se comporte d'une manière analogue à celle de Colebrook White et Nikuradsé avec une légère différence dans la formulation.

Ceci est en bonne concordance pour le cas des surfaces lisses (PLEXIGLASS, P220, P80, PVC) et pour les surfaces rugueuses (P80, Rugosité ondulatoire), à l'exception des galets où le comportement de f , est régi par une équation dont les coefficients diffèrent appréciablement.

Ce travail contribue à une reconsidération du problème de dimensionnement des canaux auquel est affronté quotidiennement l'ingénieur praticien.

Dans le but d'améliorer ce sujet, nous suggérons de prendre en compte d'autres paramètres, pouvant influencer le comportement du coefficient de frottement de manière nonnégligeable tels que : le nombre de Froude, l'espacement entre les éléments rugueux et la forme de ces derniers.

TABLEAU 1 : Exposants a et b dans : $U = CRh^a I^b$

Auteur	a	b	Destination
Chezy	1/2	1/2	rivières
Lahmyes	2/3	2/3	rivières rectilignes
De saint venant	11/21	11/21	rivières
Hagen	1/2	1/5	canaux naturels
Manning	2/3	1/2	canaux

Tableau n°2 : Valeurs moyennes des coefficients de rugosité.

Matériaux	γ	n	K
	Bazin	Manning-Kutter	mm
Parois Très lisses	0,06	0,01	0,3 + 0,2
Parois lisses	0,16	0,013	
Béton rugueux maçonnerie	0,46	0,017	< 3
Rivières avec parois résistante (canaux en terre dans les conditions ordinaires)	1,3	0,025	8 + 16
Rivières avec végétations	1,75	0,033	

TABLEAU N°3
DESIGNATION DES TAMIS ET DISTRIBUTION PONDERALE DES MACROGRAINS
P 80 & P 220.

DESIGNATION DES GRAINS	1ER TAMIS		1er ET 2em TAMIS		1er, 2em, ET 3em TAMIS		1er, 2em, 3em, ET 4em TAMIS		1er, 2em, 3em,4em et 5em TAMIS		5 em TAMIS PASSANT %
	TAMIS 1 um	REFUS CUMULE	TAMIS 2 um	REFUS CUMULE	TAMIS 3 um	REFUS CUMULE	TAMIS 4 um	REFUS CUMULE	TAMIS 5 um	REFUS CUMULE	
P 80	355	0	250	3	212	26	180	75	150	96	4
P 220	125	0	90	2	75	15	63	62	53	90	10

Tableau n° 4: Etallonnage du venturimètre

Volume	Temps	Q	h ₁	h ₂	Dh
l	s	l/s	cm	cm	cm
25	11,7	2,137	255	210	85
25	10,4	2,404	370	260	110
25	9,0	2,778	480	350	130
25	8,7	2,874	340	200	140
25	8,2	3,049	660	480	180
25	7,9	3,125	630	420	210
25	7,3	3,425	570	350	220
25	7,0	3,571	540	310	230
25	6,5	3,846	510	270	240

TABLEAU N° 5 : K = 0,0006 cm

Q l/s	h cm	Rh cm	\bar{U} cm/s	Uf cm/s	Ref	$\frac{Rf \cdot Uf}{\delta}$	Re	Fr	\bar{U}/Uf
2,589	2,85	2,02	64,909	2,996	1,79	605,19	$5,22 \cdot 10^4$	1,22	21,650
2,922	3,00	2,10	69,574	3,177	1,90	664,942	$5,80 \cdot 10^4$	1,27	21,899
3,929	3,67	2,41	76,374	3,404	2,04	817,625	$7,30 \cdot 10^4$	1,26	22,437
5,243	4,50	2,740	83,234	3,629	2,17	990,664	$9,09 \cdot 10^4$	1,24	22,936
5,740	4,8	2,850	85,421	3,7	2,21	1049,873	$9,69 \cdot 10^4$	1,23	23,087
6,077	5,00	2,920	86,810	3,745	2,24	1088,791	$1,01 \cdot 10^4$	1,22	23,181
6,459	5,99	2,99	88,300	3,793	2,27	1131,076	$1,05 \cdot 10^5$	1,23	23,280
5,160	4,45	2,72	82,833	3,616	2,16	979,908	$1,14 \cdot 10^5$	1,24	23,470
8,240	6,00	3,23	98,090	5,004	2,99	330,3	$3,26 \cdot 10^5$	1,27	20,600
3,690	3,15	2,15	83,670	4,547	2,72	181,27	$7,17 \cdot 10^5$	1,49	18,400

TABLEAU N° 6 : K = 0,01 cm (P 220)

Q l/s	h cm	Rh cm	U cm/s	Uf cm/s	Ref	$\frac{Rh \cdot Uf}{\rho}$	Re	Fr	U/Uf
4,681	2,8	2,000	119,00	3,760	3,75	747,5	$9,50 \cdot 10^4$	2,24	22,17
5,258	3,4	2,288	110,00	3,435	3,483	783,3	$1,00 \cdot 10^5$	1,89	22,36
6,166	3,9	2,505	113,00	3,450	3,448	861,3	$1,13 \cdot 10^5$	1,81	22,61
7,823	4,5	2,739	124,00	3,740	3,73	1024,4	$1,35 \cdot 10^5$	1,85	23,06
8,920	5,0	2,917	123,00	3,660	3,64	1033,0	$1,43 \cdot 10^5$	1,74	23,08
3,950	6,0	3,200	47,030	2,160	2,11	720,8	$6,00 \cdot 10^4$	0,61	21,60
13,00	8,9	4,000	116,07	4,670	4,65	1969,4	$1,85 \cdot 10^5$	1,83	24,85

TABLEAU N° 7 : K = 0,02 cm (P 80)

Q l/s	h cm	Rh cm	Rh/ K	Uf cm/s	Ref	U cm/s	RhUf/ρ	Re	Fr	f	U/Uf
2,129	2,85	2,02	100	2,51	5,003	53,361	21,260	4,30.10 ⁴	0,999	0,017700	67,93
0,948	2,85	2,02	100	1,92	2,440	23,755	19,472	1,90.10 ⁴	0,445	0,021100	61,58
3,47	2,85	2,02	100	4,921	9,810	86,924	14,660	7,00.10 ⁴	1,628	0,025650	55,85
5,103	2,85	2,02	100	7,204	14,360	127,902	17,750	1,03.10 ⁴	2,395	0,025380	56,14
6,936	2,85	2,02	100	9,763	19,461	173,848	17,806	1,40.10 ⁵	3,250	0,025300	56,23
9,909	2,85	2,02	100	13,91	27,728	248,354	17,850	2,00.10 ⁵	4,650	0,025100	56,46
14,86	2,85	2,02	100	20,822	41,507	372,53	17,890	3,00.10 ⁵	6,970	0,024990	56,58
3,959	5,95	3,00	150	2,041	4,069	44,340	21,725	5,30.10 ⁴	0,611	0,016950	68,70
4,101	5,95	3,00	150	2,509	5,010	55,796	22,239	6,70.10 ⁴	0,770	0,016180	70,32
4,916	5,95	3,00	150	3,607	7,189	66,890	18,548	8,00.10 ⁴	0,923	0,093953	58,66
6,121	5,95	3,00	150	4,472	8,900	83,278	18,622	9,96.10 ⁴	1,140	0,023070	58,89
2,603	5,95	3,00	150	6,255	12,468	117,058	18,715	1,40.10 ⁵	1,615	0,022840	59,18
12,29	5,95	3,00	150	8,900	17,740	167,225	18,789	2,00.10 ⁵	2,308	0,022660	59,42
15,36	5,95	3,00	150	11,105	22,136	209,037	18,820	2,50.10 ⁵	2,880	0,022580	59,52
3,73	9,3	4,00	200	2,240	4,460	50,758	22,660	8,10.10 ⁴	0,526	0,015580	71,66
3,22	9,3	4,00	200	2,304	4,590	43,800	19,047	7,00.10 ⁴	0,460	0,022050	60,23
7,67	9,3	4,00	200	3,072	6,120	58,950	19,190	9,40.10 ⁴	0,611	0,021700	60,72
2,32	9,3	4,00	200	3,323	6,640	63,960	19,210	1,02.10 ⁵	0,663	0,021670	60,76
13,06	9,3	4,00	200	5,178	10,320	100,330	19,380	1,60.10 ⁵	1,040	0,021310	61,27
15,95	9,3	4,00	200	6,450	12,870	125,490	19,430	2,00.10 ⁵	1,300	0,021190	61,44

TABLEAU N° 8 : K = 0,0065 cm (PVC)

Q l/s	h cm	Rh cm	U cm/s	Uf cm/s	Ref	$\frac{Rh \cdot Uf}{\rho}$	Re	Fr	U/Uf
0,52	2,00	1,88	3,946	0,274	0,178	54,598	$3,14 \cdot 10^3$	0,088	14,400
1,304	3,14	2,85	6,096	0,358	0,232	112,168	$7,60 \cdot 10^3$	0,109	17,001
1,428	3,71	3,31	5,527	0,329	0,213	121,510	$8,17 \cdot 10^3$	0,091	16,801
2,230	4,33	3,79	7,224	0,420	0,272	181,270	$1,24 \cdot 10^4$	0,11	17,201
3,009	5,16	4,42	7,930	0,431	0,279	221,406	$1,63 \cdot 10^4$	0,110	18,400
4,319	5,78	4,86	9,913	0,519	0,336	298,867	$2,28 \cdot 10^4$	0,130	19,100
5,260	6,56	5,40	10,295	0,520	0,337	340,200	$2,69 \cdot 10^4$	0,197	19,798
4,323	2,00	1,88	32,858	1,656	1,073	330,300	$2,62 \cdot 10^4$	0,775	19,842
2,712	3,14	2,85	12,655	0,707	0,453	221,406	$1,58 \cdot 10^4$	0,226	17,899
1,992	3,73	3,32	7,657	0,436	0,282	172,431	$1,14 \cdot 10^4$	0,125	17,561
1,658	4,30	3,77	5,415	0,313	0,203	134,290	$9,99 \cdot 10^4$	0,08	17,300
1,519	5,00	4,30	4,140	0,243	0,157	121,510	$8,28 \cdot 10^3$	0,059	17,041
1,972	5,86	4,92	4,445	0,254	0,165	148,413	$1,04 \cdot 10^4$	0,058	17,500
2,528	6,34	5,25	5,166	0,287	0,186	181,272	$1,30 \cdot 10^4$	0,065	18,000

TABLEAU N°9 K = 0,9 cm

Q (l/s)	h (cm)	Rh (cm)	Rh/K	Uf cm/s	Ref	U cm/s	U/Uf	Re	Fr	f	C
0,201	2,96	2,7	3	0,118	10,59	1,115	9,44	1,2x10 ³	0,021	0,08980	29,85
0,336	2,96	2,7	3	0,204	18,33	1,858	9,04	2,0x10 ³	0,034	0,09670	28,76
0,504	2,96	2,7	3	0,313	28,09	2,787	8,90	3,0x10 ³	0,051	0,101020	28,14
0,673	2,96	2,7	3	0,418	37,45	3,716	8,90	4,010 ³	0,064	0,101800	28,03
0,926	2,96	2,7	3	0,577	51,73	5,11	8,86	5,5.10 ³	0,094	0,101200	29,12
1,009	2,96	2,7	3	0,626	56,18	5,574	8,9	6,0.10 ³	0,102	0,10105	28,14
0,682	2,96	2,7	3	1,05	94,27	9,29	8,84	1,0x10 ⁴	0,171	0,102167	27,98
2,356	2,96	2,7	3	1,47	131,97	13,01	8,94	1,4x10 ⁴	0,239	0,102167	27,98
3,366	2,96	2,7	3	2,101	188,53	18,58	8,84	2,0x10 ⁴	0,341	0,1021666	27,98
5,048	2,96	2,7	3	3,150	282,900	27,87	8,84	3,0x10 ⁴	0,512	0,102167	27,98
0,204	4,7	4,05	4,5	0,070	6,34	0,712	10,06	1,15x10 ³	0,010	0,079000	31,82
0,356	4,7	4,05	4,5	0,116	11,26	1,24	9,88	2,0x10 ³	0,019	0,082000	31,23
0,534	4,7	4,05	4,5	0,189	16,97	1,858	9,82	3,0x10 ³	0,027	0,083000	31,05
0,712	4,7	4,05	4,5	0,253	22,69	2,477	9,79	4,0x10 ³	0,036	0,083500	30,95
1,068	4,7	4,05	4,5	0,377	33,24	3,716	9,85	6,0x10 ³	0,054	0,08252	31,14
1,781	4,7	4,05	4,5	0,626	56,20	6,194	9,89	1,0x10 ⁴	0,090	0,081714	31,24
2,85	4,7	4,05	4,5	1,005	90,15	9,91	9,86	1,6x10 ⁴	0,144	0,082290	31,18
3,563	4,7	4,05	4,5	1,256	112,69	12,387	9,86	2,0x10 ⁴	0,181	0,082290	31,18
5,166	4,7	4,05	4,5	1,820	163,40	17,96	9,86	2,9x10 ⁴	0,262	0,082300	31,18
8,016	4,7	4,05	4,5	2,827	253,55	27,87	9,86	4,5x10 ⁴	0,406	0,082290	31,18
0,213	5,3	4,5	5	0,064	5,70	0,658	10,33	1,18x10 ³	0,009	0,075000	32,66
0,344	5,3	4,5	5	0,103	9,28	1,059	10,23	1,9x10 ³	0,015	0,076500	32,34
0,542	5,3	4,5	5	0,165	14,8	1,671	10,13	3,0x10 ³	0,023	0,078000	32,03
0,904	5,3	4,5	5	0,277	24,85	2,787	10,06	5,0x10 ³	0,038	0,079020	32,82
1,084	5,3	4,5	5	0,331	29,73	3,344	10,09	6,0x10 ³	0,046	0,078600	31,90
1,446	5,3	4,5	5	0,441	39,52	4,459	10,12	8,0x10 ³	0,06	0,078071	31,01

2,169	5,3	4,5	5	0,658	59,06	6,63	10,16	1,2x10 ⁴	0,092	0,077500	32,13
3,616	5,3	4,5	5	1,101	98,80	11,15	10,12	2,0x10 ⁴	0,153	0,078070	32,01
5,424	5,3	4,5	5	1,652	148,22	16,72	10,12	30x10 ³	0,230	0,078070	32,01
8,316	5,3	4,5	5	2,533	227,260	25,64	10,12	4,6x10 ⁴	0,352	0,078070	32,01
0,242	6,56	5,4	6	0,055	4,96	0,604	10,93	1,3x10 ³	0,007	0,067000	34,55
0,373	6,56	5,4	6	0,087	7,79	0,929	10,69	2,0x10 ³	0,015	0,070000	33,81
0,932	6,56	5,4	6	0,232	19,89	2,320	10,47	5x10 ³	0,028	0,073050	33,10
1,510	6,56	5,4	6	0,357	32,00	3,76	10,54	8,1x10 ³	0,046	0,071950	33,34
2,238	6,56	5,4	6	0,526	47,21	5,574	10,59	1,20x10 ⁴	0,069	0,071370	33,48
3,729	6,56	5,4	6	0,878	78,76	9,29	10,58	2,0x10 ⁴	0,115	0,071510	33,45
5,595	6,56	5,4	6	1,317	118,19	13,94	10,58	3x10 ⁴	0,172	0,071500	33,45
6,527	6,56	5,4	6	1,537	137,83	16,258	10,58	3,5x10 ⁴	0,200	0,071500	33,45
0,577	7,9	6,3	7	0,108	9,69	1,19	11,01	3x10 ³	0,013	0,068020	34,81
0,962	7,9	6,3	7	0,184	16,536	1,921	10,80	5x10 ³	0,012	0,068480	34,18
1,539	7,9	6,3	7	0,192	26,21	3,185	10,9	8x10 ³	0,036	0,067380	34,266
2,310	7,9	6,3	7	0,436	39,13	4,777	10,95	1,2x10 ³	0,051	0,066750	34,62
4,235	7,9	6,3	7	0,799	71,69	8,759	10,96	2,2x10 ⁴	0,098	0,066600	34,66
5,775	7,9	6,3	7	1,09	97,76	11,945	10,96	3x10 ⁴	0,134	0,066580	34,66

TABLEAU. N°10 K = 1.275 cm

Q (l/s)	h (cm)	Rh (cm)	Rh/K	Uf cm/s	Ref	U cm/s	U/Uf	Re	Fr	f	C
0,86	4,38	3,83	3	0,475	60,36	3,27	6,88	5,0x10 ³	0,049	0,16900	21,75
0,59	4,38	3,83	3	0,294	37,36	2,19	7,45	3,35x10 ³	0,033	0,14400	23,56
0,49	4,38	3,83	3	0,172	21,85	1,83	8,00	2,80x10 ³	0,028	0,12500	15,81
0,37	4,38	3,83	3	0,166	21,09	1,38	8,29	2,10x10 ³	0,021	0,11650	16,22
0,31	4,38	3,83	3	0,131	16,66	1,17	8,95	1,80x10 ³	0,018	0,09985	28,30
0,26	4,38	3,83	3	0,105	13,34	0,98	9,34	1,50x10 ³	0,016	0,09180	29,54
1,09	4,38	3,83	3	0,601	76,37	4,06	6,75	6,20x10 ³	0,061	0,17589	21,35
1,404	4,38	3,83	3	0,776	98,61	5,24	6,75	8,00x10 ³	0,079	0,17577	21,34
1,89	4,38	3,83	3	1,041	133,06	7,07	6,75	1,08x10 ⁴	0,106	0,17577	21,34
2,46	4,38	3,83	3	1,358	172,57	9,17	6,75	1,40x10 ⁴	0,139	0,17577	21,34
3,33	4,38	3,83	3	1,843	234,20	12,44	6,75	1,90x10 ⁴	0,188	0,17577	21,34
4,65	4,38	3,83	3	2,572	326,84	17,36	6,75	2,65x10 ⁴	0,262	0,17580	21,34
7,37	4,38	3,83	3	4,076	517,95	27,51	6,75	4,10x10 ⁴	0,416	0,17577	21,34
1,19	7,6	5,7	4,5	0,333	42,32	2,77	8,33	6,30x10 ³	0,042	0,11525	26,34
0,77	7,6	5,7	4,5	0,203	25,80	1,80	8,86	4,1x10 ³	0,027	0,10200	28,02
0,57	7,6	5,7	4,5	0,147	18,68	1,34	9,14	3,05x10 ³	0,020	0,09580	28,90
0,22	7,6	5,7	4,5	0,044	5,59	0,51	11,28	1,15x10 ³	0,008	0,06290	35,67
1,88	7,6	5,7	4,5	0,550	69,89	4,40	8,00	1,00x10 ⁴	0,066	0,12490	25,30
2,86	7,6	5,7	4,5	0,683	86,79	5,28	7,73	1,10x10 ⁴	0,080	0,13370	24,44
2,64	7,6	5,7	4,5	0,798	101,41	6,16	7,71	1,40x10 ⁴	0,023	0,13420	24,41
3,39	7,6	5,7	4,5	1,026	130,18	7,91	7,71	1,50x10 ⁴	0,120	0,13415	24,41
5,00	7,6	5,7	4,5	1,510	191,88	11,66	7,71	2,65x10 ⁴	0,176	0,13414	24,41
7,54	7,6	5,7	4,5	2,280	289,73	17,60	7,72	4,00x10 ⁴	0,266	0,13415	24,41
8,86	8,06	5,7	4,5	2,679	340,43	20,68	7,72	4,70x10 ⁴	0,312	0,13415	24,41
1,71	8,06	6,38	5	0,415	52,74	3,46	8,34	8,80x10 ³	0,052	0,11500	26,37
1,16	7,6	5,7	5	0,172	34,56	2,36	8,67	6,00x10 ³	0,036	0,10650	27,42

0,83	8,06	3,83	3	0,186	23,64	1,69	9,08	4,30x10 ³	0,026	0,09700	28,71
0,49	8,06	3,83	3	0,100	12,71	0,98	9,76	2,50x10 ³	0,015	0,08390	30,86
0,23	8,06	3,83	3	0,042	5,34	0,47	11,18	1,20x10 ³	0,007	0,06400	35,35
2,23	8,06	3,83	3	0,561	71,29	4,52	8,05	1,15x10 ⁴	0,068	0,12360	25,46
2,71	8,06	3,83	3	0,689	87,55	5,50	7,98	1,40x10 ⁴	0,083	0,12568	25,23
3,49	8,06	3,83	3	0,897	112,71	7,08	7,98	1,80x10 ⁴	0,107	0,125675	25,23
5,04	8,06	3,83	3	1,280	162,66	10,22	7,98	2,60x10 ⁴	0,154	0,125675	25,23
7,76	8,06	3,83	3	1,971	250,46	15,73	7,98	4,00x10 ⁴	0,238	0,125675	25,23
1,64	10,2	7,65	6	0,297	37,74	2,62	8,83	8,00x10 ³	0,039	0,10250	27,92
1,22	10,2	7,65	6	0,215	27,32	1,96	9,11	6,00x10 ³	0,015	0,096490	28,81
0,94	10,2	7,65	6	0,16	20,33	1,51	9,43	4,60x10 ³	0,045	0,09000	29,82
0,38	10,2	7,65	6	0,059	7,50	0,61	10,36	1,87x10 ³	0,019	0,07449	32,76
2,45	10,2	7,65	6	0,456	57,95	3,93	8,61	1,10x10 ⁴	0,059	0,10800	27,23
3,07	10,2	7,65	6	0,584	74,21	4,92	8,42	1,50x10 ⁴	0,074	0,11297	26,63
4,09	10,2	7,65	6	0,780	99,12	6,56	8,41	2,00x10 ⁴	0,099	0,11300	26,59
5,12	10,2	7,65	6	0,975	123,9	8,2	8,41	2,50x10 ⁴	0,124	0,11297	26,59
8,19	10,2	7,65	6	1,560	198,24	13,12	8,41	4,00x10 ⁴	0,198	0,11297	26,59
0,56	11,96	8,619	6,76	0,075	9,66	0,79	10,43	2,70x10 ³	0,072	0,07350	32,98
1,07	11,96	8,619	6,76	1,146	18,55	1,46	10,00	5,00x10 ³	0,013	0,08000	31,62
1,62	11,96	8,619	6,76	0,234	29,74	2,21	9,44	7,60x10 ³	0,020	0,08980	29,85
2,56	11,96	8,619	6,76	0,336	49,05	3,42	9,04	1,20x10 ⁴	0,032	0,09779	28,60
4,27	11,96	8,619	6,76	0,669	85,01	5,82	8,70	2,00x10 ⁴	0,053	0,10560	27,51
5,34	11,96	8,619	6,76	0,837	106,36	7,28	8,70	2,50x10 ⁴	0,066	0,10560	27,51
7,50	11,96	8,619	6,76	1,238	157,32	10,77	8,7	3,70x10 ⁴	0,098	0,10560	27,51

TABLEAU N° 11 : TABLEAU RECAPITULATIF

Installation	Type de paroi	B/h	Fr	Ref	$U/U_f = (8/f)^{1/2}$	f
I N S T A L L A T I O N -II-	Plexiglas	<5	>1	>1,8	$2,6 \text{ Ln } \frac{Rh}{Uf} + 5,11$ 0	$0,162 \cdot Re^{0,207}$
	K = 0,0006 cm			<3		
	P 220	<5	>1	>3	$2,61 \text{ Ln } \frac{Rh}{Uf} + 4,97$ 0	$0,162 \cdot Re^{-0,201}$
	K = 0,010cm			<3,8		
	P 80	>5	>1	>2	$2,59 \text{ Ln } \frac{Rh}{Uf} + 5,96$ 0	$0,166 \cdot Re^{-0,21}$
K = 0,02cm	<5					
			>5 <50	$\frac{4}{f8} \cdot [-2 \log_{10} \left[\frac{K}{Rh} + 0,725 \right]]$ 14,7 Re/f	$[-2 \text{ Log } \left[\frac{K}{Rh} + 0,725 \right]]^{-2}$ 15 Re/f	
I N S T A L L A T I O N -II-	PVC	>5	<1	>0,2	$2,71 \text{ Ln } \frac{Rh}{Uf} + 3,72$ 0	$0,337 \cdot (Re)^{-0,27}$
	K = 0,0065cm			<2		
	Forme ondulatoire	>5	<1	>5 <70	$f8 [-2 \text{ Log } \left[\frac{K}{Rh} + 1,54 \right]]$ 12,66 Re/f	$[-2 \text{ Log } \left(\frac{K}{Rh} + 1,54 \right)]^{-2}$ 12,66 Re/f
	K = 0,9 cm			>70		
	Forme non uniforme	>5	<1	>38 <70	$f8 [-2 \text{ Log } \frac{K}{Rh} + 1,54]$ 5,41 Re/f	$[-2 \text{ Log } \frac{K}{Rh} + 1,54]^{-2}$ 5,41 Re/f
K = 1,275 cm	>70			$f8 [1,96 \text{ Log } \frac{Rh}{K} + 1,45]$ K		

Application de la méthode des moindres carrés :

- Fonction d'approximation :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \operatorname{Log} \left[\frac{K/Rh}{af} + \frac{bf}{Re\sqrt{f}} \right]$$

Nous avons le triplet

$$\begin{cases} z_i = 10 \frac{1}{2 \sqrt{f}} \\ y_i = 1/Re \sqrt{f} \\ x_i = K/Rh \end{cases}$$

Soit la fonction $g(x,y) = \sum_{i=1}^n a_j \cdot v_i(x_i, y_i)$
 $i = 1, n$
 $j = 1, 2$

Soit E l'erreur quadratique :

$$E = \sum_{i=1}^n [z_i - g(x_i, y_i)]^2$$

En minimisant l'erreur nous obtenons :

$$\frac{\partial E}{\partial A} = \sum - 2 x_i z_i + 2 A x_i^2 + 2 B x_i y_i = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial B} = \sum - 2 y_i z_i + 2 y_i A x_i + 2 B y_i^2 = 0$$

Soit le système à résoudre :

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \end{bmatrix}$$

1

avec : $A = \frac{1}{af}$

$B = bf$

Application de la méthode des moindres carrés à deux variables :

Soit le couple (x_i, y_i)

et $E = \sum [y_i - (a_1 + a_2x_i)]^2$, le carré de l'erreur avec :

$a_1 + a_2x_i$, une fonction ou droite dite des moindres carrés définie à partir des points (x_i, y_i)

En minimisant l'erreur quadratique :

$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0$

et $\frac{\partial E}{\partial a_2} = 0$

Nous obtenons a_1 et a_2

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFNOR .Norme expérimentale "Abrasis appliqués. granulométrie"
E - 75 - 100
(1982)
- [2] BAHIDJ.(B) " Contribution à l'étude des conditions
de formation d'un ressaut"
(1988)
- [3] Bray ." Estimating average velocity in gravel bed rivers"
journal of hydraulic division. pp 1103 - 1122
(1979)
- [4] Brun . "Introduction à l'étude de la couche limitée"
- [5] Chow ." Open Channel Hydraulics"
International student edition.
(1973)
- [6] Cousteix. J."Turbulence et couche limite"
Collection de la Cheveche. EPADUES
(1989)
- [7] Crausse. "Hydraulique des canaux découverts"
EYROLLES
(1951)
- [8] Daniel Vicher. "Strikler formula, a swiss contribution
to hydraulics".
Wasser, energie, Left. eau. ennergie - air
(1987)
- [9] Daryl.B. " Flow résistance in Gobble and boulder river beds"
journal of hydraulics Division. pp 477 - 488
(1979)
- [10] Donald.W." Hydraulic résistance of Artifical Strip. Roughness
journal of hydraulics Division. Vol 105 N°Hy6
(1979)

- [11] Graf et Altinakar. "Hydraulique fluviale". "Tome 1
Presse polytechnique et universitaire Romandes
(1993)
- [12] Graf.Walter" Uniform flow in a smooth open channel"
Journal of hudraulic research. Vol 27 n° 5
(1990)
- [13] Henderson. " Open channel flow".
MC.Millan Publ. CO.PUC
(1966)
- [14] HUG. " Mécanique des fluides appliquée".
EYROLLES.
(1975)
- [15] KRMETSKI. " Hydraulique "
ed MIR. Moscou
(1980)
- [16] Maurizio-Rosso. " Flow stability and friction factor in Rough
channel"
Journal of hydraulic Engineering . Vol 11649.
(1990)
- [17] Mouloudi. (Y). " Etude d'un écoulement permanent à regime
variable dans un profil parabolique "
Thèse de Magister
(1988)
- [18] Richard.D.Hoy. " Flow resistance in gravel bed rivers "
Journal of the hydraulics division Vol 105.
°HY4
(1978)
- [19] Solih.M. " Turbulent Velocity profiles for smooth and
rough open channel "
Journal of hydraulic engineering . Vol 119 n°11
(1989)
- [20] Senturk.Fuat." La résistance à l'écoulement des fonds des
rivières s'écoulant dans leurs alluvions"
Revue internationale des sciences de l'eau .
vol.n°3/4
(1987)
- [21] Wang.JinJin. " Résistance of flow over rough bed"
Journal of hydraudynamics. China océan press
(1991)

- [21] Wang.JinJin. " Résistance of flow over rough bed"
Journal of hydraudynamics. China océan press
(1991)
- [22] Wang. Jin-Jin. " The effects of bed roughness on the
distribution of turbulent intensities in open
channel flow"
(1993)
- [22] Willi. Hager. " Fiebformeln in Rauhgerinsh".
W W T 8/92
(1992)

Résumé:

La présente thèse résume l'ensemble des résultats obtenus, dans le cadre d'une étude expérimentale contribuant à une reconsidération du problème de dimensionnement des canaux découverts en tenant compte de l'influence de la rugosité des parois et du régime d'écoulement.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de constater que le problème concernant les canaux lisses peut être résolu par l'uniformisation de la formulation du coefficient de frottement au contraire des canaux rugueux.

Mots clés:

Rugosité -Poli-Frottement-canal rectangulaire
-canal bidimensionnel.