

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 103 (1977)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Détermination de la contrainte de frottement moyenne du lit, t? dans un canal alluvionnaire  
**Autor:** Pazis, Georges C. / Graf, Walter H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-73268>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Détermination de la contrainte de frottement moyenne du lit, $\tau_0$ dans un canal alluvionnaire

par GEORGES C. PAZIS et WALTER H. GRAF, Lausanne

### Introduction

La contrainte de frottement représente un paramètre prépondérant pour les hydrauliciens. Comme le débit, la profondeur de l'écoulement, l'uniformité, la rugosité, etc., qui sont d'une importance capitale pour le développement des problèmes hydrauliques, la contrainte de frottement est un paramètre de plus en plus utile. Des phénomènes importants, tels que l'écoulement biphasique liquide-solide, l'érosion et la déposition des lits alluviaux, les ondulations des alluvions des lits, ou d'autres encore, sont souvent analysés à l'aide de la contrainte de frottement.

Cet article est consacré à l'évaluation de la contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0$ , en fonction des paramètres hydrauliques dans un chenal expérimental qui se trouve au LHYDREP (Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL). Ce chenal a deux rugosités différentes : 1) celle des parois, construites en verre transparent et lisse, et 2) celle du lit, formé des différents matériaux granulés ; ces matériaux — un pour chaque série de 4 à 6 essais — ont été collés sur des plaques en PVC fixées sur le fond du canal.

La contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0$ , peut être calculée par plusieurs méthodes. La détermination de  $\tau_0$  s'effectue ici au moyen de deux méthodes différentes, afin de pouvoir comparer et confronter les résultats.

La première méthode de calcul est basée sur la mesure directe de la distribution des vitesses. Elle permet la détermination de la vitesse de frottement,  $u_*$ , tout en vérifiant la distribution logarithmique des vitesses. La contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0$ , est alors donnée par l'expression suivante :

$$\tau_0 = \rho \cdot u_*^2 \quad (1)$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'eau.

La deuxième méthode est basée sur la mesure des paramètres hydrauliques, comme la pente de la surface d'eau,  $S_H$ , et la profondeur  $D_i$  à plusieurs sections transversales,  $i$ , de l'écoulement. Elle permet le calcul de la contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0$ , par l'expression :

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_L \cdot S_E \quad (2)$$

où

$\gamma$  est le poids volumique de l'eau

$R_L$  est le rayon hydraulique affecté au lit

et  $S_E$  est la pente de la ligne d'énergie.

Pour calculer la valeur  $R_L$ , il faut utiliser les hypothèses de la méthode d'Einstein [voir Chow (1959, p. 136)].

Il faut noter que la contrainte de frottement totale du lit,  $\tau_0$ , se divise en deux parties distinctes : celle qui est due aux grains,  $\tau'_0$ , et celle qui se développe par la présence des ondulations (rides, dunes et antidunes) du lit,  $\tau''_0$  ; alors :

$$\tau_0 = \tau'_0 + \tau''_0 \quad (3)$$

Cependant, pour la détermination de  $\tau_0$ , les expériences ont été faites sans la présence des ondulations, et :  $\tau_0 \rightarrow \tau'_0$ .

### Procédure expérimentale

Les données provenant des mesures directes ou de simples calculs sont résumées dans le tableau 1. Les expériences ont été effectuées dans le chenal décrit précédemment, ayant une largeur  $B = 50$  cm [voir Pazis (1976)]. Une gamme de profondeurs,  $D_i$ , variant de 20 à 56 cm environ a été utilisée, le débit,  $Q$ , étant fixé à 80 l/s pour tous les essais ; ainsi s'obtient l'élimination d'un paramètre.

Les paramètres les plus importants déterminant les conditions hydrauliques des essais sont représentés dans le tableau 1 :

1. *Le N° d'essai* : le premier chiffre représente le numéro du matériau utilisé. Le deuxième (chiffre romain), donne le numéro d'essai avec le même matériau.

2. *La profondeur*,  $D$ , en cm, de l'écoulement de chaque essai a été mesurée avec une jauge électrique, après que l'écoulement uniforme a été établi. Des intervalles distants de 50 cm ont été choisis le long de la ligne centrale pour mesurer la profondeur  $D$  à chaque section. Les profils de la surface d'écoulement, ainsi obtenus, permettent de montrer, à l'aide du test de l'uniformité, que l'écoulement reste suffisamment uniforme (avec une erreur inférieure à 3 ‰) le long du tronçon d'étude (entre  $x = 5,0$  m et  $x = 9,0$  m), pour tous les essais. La profondeur,  $D$ , de la section représentative à  $x = 7,0$  m a été retenue comme profondeur de l'écoulement uniforme (voir fig. 1).

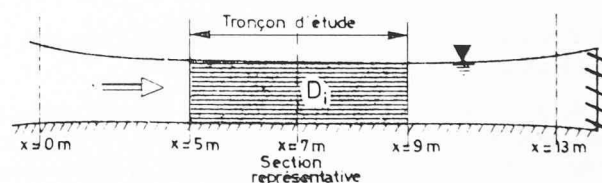


Fig. 1. — Détermination du tronçon d'étude

Un calcul de l'épaisseur,  $\delta$ , de la couche limite turbulente, a permis de constater qu'à cette section l'écoulement est suffisamment développé [voir Pazis (1976, p. 47a)].

3. *La vitesse moyenne*,  $V$ , en cm/s de l'écoulement considérée à la section représentative, distance de l'amont  $x = 7,0$  m, est donnée par la relation :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B \cdot D} \quad (5)$$

4. *La température*,  $T$ , en °C, de l'eau a été mesurée par deux thermomètres. Le premier a été placé dans le réservoir de l'installation et le deuxième à l'aval du chenal expérimental.

TABLEAU I  
Sommaire des données expérimentales et des matériaux du lit

ESSAI N°	D [cm]	V [cm/s]	T [°C]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [mm <sup>2</sup> /s]	Fr	Re	$S_L$ [°/°°]	$S_H$ [°/°°]	$S_E$ [°/°°]	$d_{50}$ [mm]	$\frac{d_{90}}{d_{50}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1/I	39,36	40,65	19,5	1017,53	,997	,207	60350,	,200	,175	,176	2,970	1,027
1/II	34,65	46,18	19,0	1017,64	1,009	,250	64500,	,200	,275	,271	2,970	1,027
1/III	30,40	52,63	19,0	1017,64	1,009	,305	69430,	,500	,400	,409	2,970	1,027
1/IV	27,10	59,04	19,0	1017,64	1,009	,362	76070,	,700	,575	,591	2,970	1,027
1/V	23,90	66,95	19,0	1017,64	1,009	,437	81080,	,880	,905	,900	2,970	1,027
1/VI	20,28	78,90	19,0	1017,64	1,009	,559	88370,	1,400	1,525	1,405	2,970	1,027
2/I	41,82	38,26	19,0	1017,64	1,009	,189	59340,	,400	,125	,135	2,250	1,053
2/II	36,24	44,15	19,0	1017,64	1,009	,234	64710,	,400	,200	,212	2,250	1,053
2/III	31,32	51,69	19,0	1017,64	1,009	,291	70380,	,500	,325	,341	2,250	1,053
2/IV	26,93	59,41	19,5	1017,53	,997	,366	77230,	,600	,550	,555	2,250	1,053
2/V	23,48	68,14	19,5	1017,53	,997	,449	82770,	1,000	,825	,861	2,250	1,053
3/I	44,08	36,30	21,0	1017,33	,961	,175	58500,	,200	,100	,103	1,310	1,031
3/II	38,07	42,03	21,0	1017,33	,961	,217	64050,	,200	,150	,152	1,310	1,031
3/III	32,48	49,26	21,0	1017,33	,961	,276	70300,	,400	,250	,261	1,310	1,031
3/IV	28,50	56,14	21,0	1017,33	,961	,336	75550,	,500	,375	,389	1,310	1,031
3/V	23,92	66,89	21,0	1017,33	,961	,437	82550,	,800	,700	,719	1,310	1,031
4/I	48,22	33,18	18,0	1017,94	1,034	,153	52830,	,140	,065	,067	,940	1,074
4/II	43,74	36,58	18,0	1017,94	1,034	,177	56280,	,140	,090	,092	,940	1,074
4/III	39,15	40,87	18,0	1017,94	1,034	,209	60310,	,300	,125	,133	,940	1,074
4/IV	35,50	45,07	18,0	1017,94	1,034	,242	63940,	,300	,175	,182	,940	1,074
4/V	30,23	52,93	18,0	1017,94	1,034	,307	70050,	,500	,275	,296	,940	1,074
5/I	55,82	28,66	18,5	1017,79	1,022	,122	48430,	,110	,035	,036	,490	1,082
5/II	50,94	31,41	18,5	1017,79	1,022	,141	51540,	,220	,045	,048	,490	1,082
5/III	46,14	34,68	18,5	1017,79	1,022	,163	55010,	,260	,060	,065	,490	1,082
5/IV	40,78	39,23	18,5	1017,79	1,022	,196	59500,	,290	,090	,098	,490	1,082
5/V	36,18	44,22	18,5	1017,79	1,022	,235	63950,	,330	,130	,141	,490	1,082
6/I	53,82	29,84	18,0	1017,94	1,034	,130	49200,	,140	,065	,066	3,020	1,013
6/II	48,83	32,77	18,0	1017,94	1,034	,150	53390,	,140	,090	,091	3,020	1,013
6/III	43,98	36,38	18,0	1017,94	1,034	,175	56080,	,300	,125	,131	3,020	1,013
6/IV	38,12	41,97	18,0	1017,94	1,034	,217	61290,	,300	,200	,205	3,020	1,013

5. La masse volumique,  $\rho$ , en kg/m<sup>3</sup> est donnée par le rapport du poids volumique de l'eau,  $\gamma$ , et de l'accélération de gravité  $g$ , ou  $\rho g = \gamma$ . Elle a été évaluée à l'aide du tableau de la page F-11 du « Handbook of Chemistry and Physics (1974-75) », en fonction de la température,  $T$ .

6. La viscosité cinématique,  $\nu$ , en mm<sup>2</sup>/s de l'eau de l'écoulement, dépend de la température. Elle a été déterminée à l'aide du tableau de la page F-49 du « Handbook of Chemistry and Physics (1974-75) » en fonction de la température,  $T$ .

7. Le nombre de Froude,  $Fr$ , permet la classification des écoulements en fonction de leur vitesse moyenne. Il est donné par l'expression :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (6)$$

Il faut noter que pour toutes les expériences l'écoulement est tranquille, ou  $Fr < 1$ .

8. Le nombre de Reynolds,  $Re$ , donne la limite séparant les écoulements laminaires ( $Re < 500$ ) et turbulents ( $Re > 500$ ). Dans le cas des écoulements en nappe libre, il est calculé selon :

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} \quad (7)$$

9. La pente du lit,  $S_L$ , suivant l'essai a eu des valeurs faibles variant de 0,11 à 1,4 ‰. Ceci a été rendu possible en horizontalisant le lit, et ensuite en inclinant le fond du chenal.

10. La pente de la surface d'écoulement,  $S_H$ , est déterminée en connaissant la profondeur  $D_i$ , le long de l'écoulement et la pente du lit,  $S_L$ . La valeur moyenne de  $S_H$  est calculée entre les limites du tronçon d'étude. Ce calcul est donné par l'expression :

$$S_H = \frac{D_5 - D_9}{\Delta L} + S_L \quad (8)$$

$D_5$  est la profondeur de l'écoulement à la section amont du tronçon d'étude, distant de  $x = 5$  m de l'amont du chenal.

$D_9$  est la profondeur de l'écoulement à la section aval du tronçon d'étude, distant de  $x = 9$  m de l'amont du chenal.

$\Delta L$  est la longueur du tronçon d'étude ;  $\Delta L = 4,0$  m.

11. La pente de la ligne d'énergie,  $S_E$ , a été évaluée en considérant les profils de la surface d'eau le long de l'écoulement et la pente du lit,  $S_L$ , déterminée par rapport à un plan de référence horizontal. Chaque point de la ligne d'énergie est calculé suivant la ligne centrale de l'écoulement, selon :

$$E_i = D_i + \frac{V_i^2}{2g} \quad (9)$$

La valeur moyenne de la pente  $S_E$ , est calculée en considérant l'énergie de l'écoulement aux sections limites du tronçon d'étude. Ainsi :

$$S_E = \frac{E_5 - E_9}{\Delta L} + S_L \quad (10)$$

où

$E_5$  est l'énergie de l'écoulement à la section amont du tronçon d'étude,

$E_9$  est l'énergie de l'écoulement à la section aval du tronçon d'étude.

12.  $d_{50}$  est le diamètre moyen, en mm, des particules formant le lit de ces essais (50 % en poids des particules sont inférieures à ce diamètre).

13. Le coefficient d'uniformité,  $d_{90}/d_{50}$  représente l'uniformité ou l'étendue de la granulométrie du lit.

Les mesures des vitesses ponctuelles effectuées (120 mesures approximativement pour chaque essai) dans la section représentative ( $x = 7,0$  m) sont données par Pazis (1976, p. 121-130). Ces mesures ont été faites à l'aide d'un micro-moulinet.

## Evaluation de $\tau_0^v$ par la distribution universelle des vitesses en écoulement turbulent

Considérations théoriques :

La loi de distribution de la vitesse [voir Schlichting (1968, p. 553-556)] se base sur l'introduction par Prandtl de la notion de la longueur de mélange pour la détermination de la contrainte de frottement à chaque point d'un écoulement turbulent pleinement développé. Prandtl, en considérant qu'au voisinage de la surface solide il y a proportionnalité entre la longueur de mélange et la distance à partir de la surface, et que la contrainte de frottement,  $\tau$ , reste constante, donne la distribution des vitesses par l'expression :

$$\frac{u_i}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z_i}{z_0} \quad (11)$$

où

$u_i$  est la vitesse ponctuelle à une distance  $z$  de la surface solide,

$u_*$  est la vitesse de frottement liée à la contrainte de frottement par l'équation (1).

$k$  est la constante universelle de von Karman et a en moyenne la valeur 0,4.

$z_0$  est la constante d'intégration caractérisant la surface solide.

Il a été trouvé [voir Chow (1959, p. 200 à 202)], que lorsque la surface solide est lisse, la constante  $z_0$  dépend de la vitesse de frottement  $u_*$  et de la viscosité cinématique  $\nu$  ; lorsque la surface est rugueuse,  $z_0$  dépend seulement de la hauteur des rugosités de la surface solide. Ainsi l'expression (11) de la distribution des vitesses en écoulements turbulents ( $Re > 500$ ), devient :

$$\frac{u_i}{u_*} = 2,5 \cdot \ln 9 \frac{z_i \cdot u_*}{\nu} \text{ pour les écoulements lisses} \quad (12)$$

$$\text{et } \frac{u_i}{u_*} = 2,5 \cdot \ln \frac{30 \cdot z_i}{k_s} \text{ pour les écoulements rugueux} \quad (13)$$

La hauteur des rugosités,  $k_s$ , de l'équation (13) est représentée par le diamètre moyen des particules,  $d_{50}$ , utilisé par Nikuradse pour des expériences effectuées en conduites. L'utilisation des constantes déterminées en conduites circulaires a été considérée possible à des écoulements turbulents en nappe libre.

Détermination de  $\bar{u}_i$  et  $u_i/u_*$  :

Les expériences ont été effectuées, afin de déterminer la distribution des vitesses de l'écoulement, et de calculer la contrainte de frottement du lit,  $\tau_0$ . En principe, la connaissance de la vitesse, à plusieurs points dans la section représentative permet le calcul de la contrainte de frottement locale à chaque point du périmètre mouillé. Cependant, la présence des parois latérales du chenal influence la distribution des vitesses, surtout à leur voisinage, où le gradient des vitesses est assez grand.

Pour déterminer la contrainte de frottement moyenne,  $\tau_0$ , agissant sur le lit, et non influencée par la résistance des parois à l'écoulement, il faut délimiter la section totale de l'écoulement en zones affectées aux parois et au lit (voir fig. 2). Soit la distribution des vitesses le long d'une horizontale,  $z_i$ . Les parties latérales de l'écoulement présentent une grande variation des vitesses ; elles sont affectées aux parois. La partie centrale, où les vitesses restent presque constantes, est affectée au lit ; la largeur de cette partie centrale est indiquée par  $B'_i$ . Pour déterminer  $B'_i$ , la condition suivante est acceptée : le long de  $B'_i$ , sur une horizontale, au niveau  $z_i$ , la variation maximale de la vitesse est :

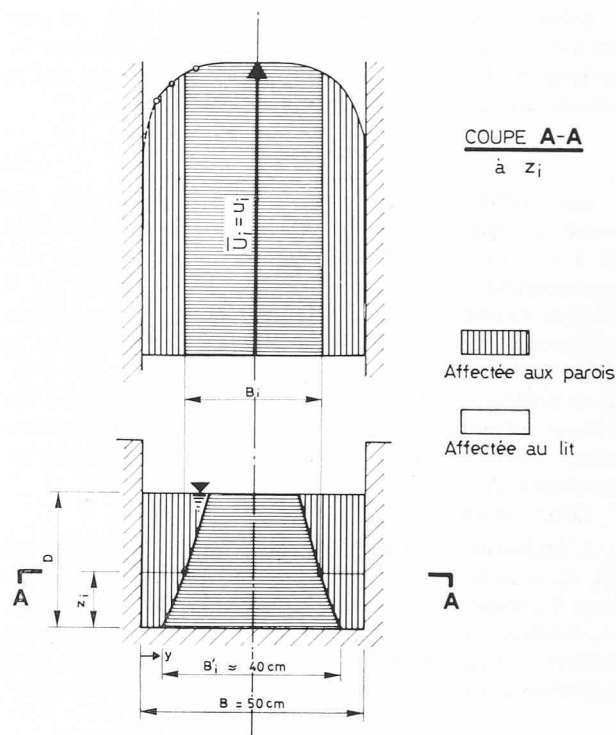


Fig. 2. — Définition.

$$\Delta u_i = 0,05 \cdot u_i \quad (14)$$

où  $u_i$  est la vitesse ponctuelle à chaque niveau de la verticale, selon l'axe du chenal ( $y = B/2$ ).

Autrement dit, la variation de la vitesse le long de  $B'_i$  ne doit pas dépasser 5 % de la vitesse de la ligne centrale, qui est aussi, en général, la vitesse maximum de la distribution horizontale des vitesses. L'évaluation de la largeur  $B'_i$  est faite selon cette condition.

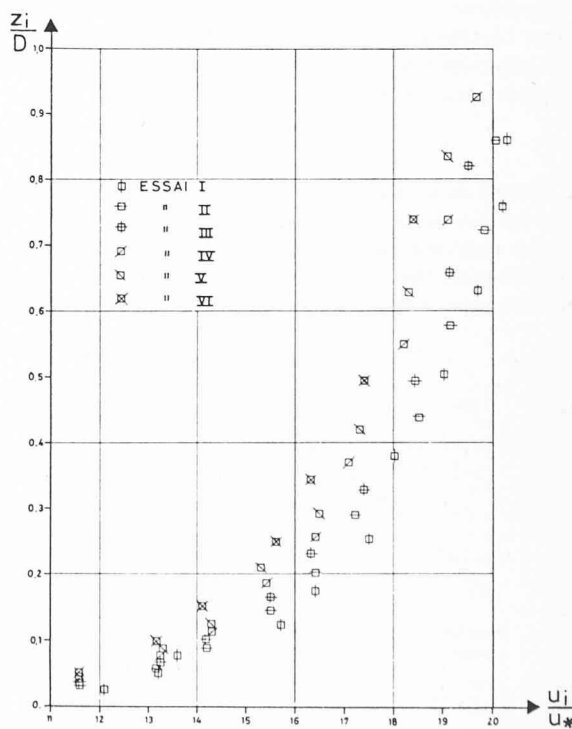


Fig. 3. — Distribution verticale des vitesses adimensionnelles pour le matériau 1 seulement (les autres sont semblables).

Selon l'expression donnée par l'équation (14), on peut considérer qu'à chaque niveau  $z_i$ , la vitesse moyenne  $\bar{u}_i$ , le long de  $B'_i$ , affectée au lit, est bien représentée par la vitesse dans la ligne centrale, au même niveau :

$$\bar{u}_i \simeq u_i \quad (15)$$

Les distributions des vitesses sont mesurées lors des essais à plusieurs points de la section représentative (à  $x = 7,0$  m). Les profondeurs  $z_i$ , les profondeurs adimensionnelles,  $z_i/D$ , les largeurs affectées au lit,  $B'_i$ , à chaque niveau  $z_i$ , ainsi que les vitesses,  $u_i$ , et les vitesses adimensionnelles  $u_i/u_*$ , mesurées aux profondeurs  $z_i$ , se trouvent indiquées en détail dans Pazis (1976, p. 131-140). Il est suffisant de donner ici (voir fig. 3) la distribution des vitesses adimensionnelles,  $u_i/u_*$ , en fonction des profondeurs adimensionnelles,  $z_i/D$ , pour un matériau du lit (matériau 1).

Détermination de  $\tau_0^v$  et  $k_s$  :

L'évaluation de la contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0^v$ , et de la hauteur des rugosités,  $k_s$ , se fait en considérant à chaque niveau de l'écoulement la vitesse moyenne,  $\bar{u}_i$ , correspondant à la largeur  $B'_i$ , affectée au lit. La distribution verticale de la vitesse  $\bar{u}_i$ , ou de la vitesse  $u_i$ , est exprimée par la loi logarithmique, donnée par l'équation :

$$\frac{u_i}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z_i}{z_0} \quad (11)$$

La corrélation des vitesses mesurées,  $(u_i)_{\text{mes}}$ , à chaque niveau  $z_i$ , et théoriques,  $(u_i)_{\text{th}}$ , calculées selon l'équation (11), permet d'obtenir un ajustement de ces valeurs et d'évaluer la vitesse de frottement,  $u_*$ , et la constante de la surface du lit,  $z_0$ . Les droites de régression de tous les essais sont déterminées par l'équation (11) qui peut s'écrire différemment :

$$u_i = 2,5 \cdot u_* \cdot \ln z_i - 2,5 \cdot u_* \cdot \ln z_0$$

L'intersection des droites avec l'axe des ordonnées donne le logarithme de la constante  $z_0$ . La pente des droites permet l'évaluation de la vitesse de frottement,  $u_*$ .

La contrainte de frottement,  $\tau_0^v$ , est liée à la vitesse de frottement,  $u_*$ , par l'expression

$$\tau_0^v = \rho \cdot u_*^2 \quad (1)$$

Les valeurs de  $u_*$  étant connues, elles permettent le calcul de la contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0^v$ . Les données expérimentales sont assez bien représentées par la distribution théorique donnée par l'équation (13), ça veut dire que nos écoulements peuvent être considérés

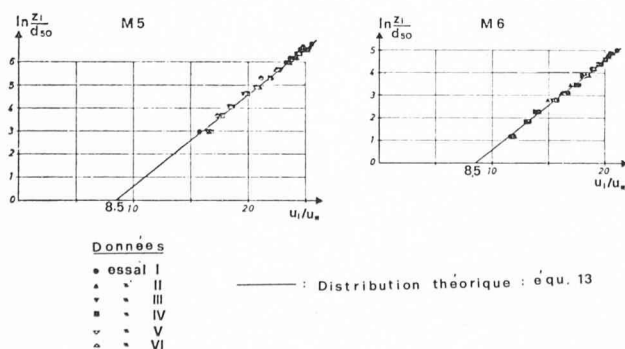


Fig. 4. — Distribution verticale des vitesses adimensionnelles pour les matériaux 5 et 6.

rugueux (voir fig. 4). La hauteur des rugosités,  $k_s$ , en considérant que l'écoulement est turbulent rugueux, est déterminée par l'expression :

$$k_s = 30 \cdot z_0 \quad (16)$$

Les valeurs de  $\tau_0^v$  sont données pour chaque essai dans le tableau 2.

### Evaluation de $\tau_0^E$ par le gradient de la ligne d'énergie de l'écoulement

Détermination de  $\tau_0^E$  :

La contrainte de frottement moyenne  $\tau_0$  pour un chenal ayant une faible pente du lit ( $\sin \alpha = S$ ), est

$$\tau_0 = \gamma \cdot \frac{A}{P} \cdot S = \gamma \cdot R \cdot S \quad (2a)$$

où

$A$  est l'aire de la section transversale

$P$  est le périmètre mouillé de la section

$R$  est le rayon hydraulique :  $A/P$ .

Dans le cas d'un écoulement uniforme, en considérant que les pentes du lit,  $S_L$ , de la surface de l'eau,  $S_H$ , et de la ligne d'énergie,  $S_E$ , sont égales, la contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0$ , est

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_L \cdot S_E \quad (2)$$

où

$R_L$  est le rayon hydraulique affecté au lit.

L'évaluation de celui-ci se fait en considérant que l'aire de la section transversale,  $A$ , est divisée en deux parties (voir fig. 2) :

— l'une avec référence aux parois,  $A_P$ , et

— l'autre avec référence au lit,  $A_L$  (la connaissance de  $B'_i$  — voir première méthode — permet le calcul de  $A_L$ ).

Le rayon hydraulique du lit est le rapport de la section,  $A_L$ , et du périmètre mouillé du lit,  $P_L$ ,

$$R_L = \frac{A_L}{P_L} \quad (17)$$

Le périmètre mouillé,  $P_L$ , est défini par la largeur affectée au lit  $B'_i$  pour  $z_i = 0$ . La valeur de  $B'_i = P_L$ , pour  $z_i = 0$  est en moyenne égale à 40 cm.

La contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0^E$ , se calcule en connaissant la pente de la ligne d'énergie :

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_L \cdot S_E \quad (2)$$

Les valeurs de la pente,  $S_E$ , sont calculées à l'aide de l'expression (10) et figurent dans le tableau 1. La connaissance des trois paramètres  $S_E$ ,  $R_L$  et  $\gamma$ , permet, à l'aide de l'équation (2), le calcul de la contrainte de frottement,  $\tau_0^E$  (voir tableau 2).

Détermination de  $K_{\text{str}}$  :

Un autre paramètre permettant la détermination de la rugosité de la surface du lit, est le coefficient de Strickler,  $K_{\text{str}}$ . Il se calcule selon l'équation [voir Graf (1971, p. 139)] :

$$K_{\text{str}} = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad (18)$$

La connaissance du diamètre,  $d_{90}$ , de la granulométrie, permet le calcul du coefficient,  $K_{\text{str}}$ .



## Résultats et comparaisons de $\tau_0$

TABLEAU 2  
Récapitulation des principaux résultats

ESSAI N°	$\tau_0^V$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\tau_0^E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\tau_0^H$ [N/m <sup>2</sup> ]	$D_i$ [cm]
1/I	.584	.578	.588	39.36
1/II	.776	.782	.789	34.65
1/III	1.037	1.031	1.046	30.40
1/IV	1.348	1.322	1.345	27.10
1/V	1.767	1.792	1.771	23.90
1/VI	2.582	2.520	2.547	20.23
2/I	.472	.472	.488	41.82
2/II	.650	.638	.663	36.24
2/III	.889	.891	.909	31.32
2/IV	1.248	1.246	1.262	26.93
2/V	1.697	1.680	1.704	23.48
3/I	.364	.377	.371	44.08
3/II	.501	.506	.506	38.07
3/III	.712	.719	.711	32.48
3/IV	.959	.931	.943	28.50
3/V	1.398	1.375	1.379	23.92
4/I	.276	.272	.283	48.22
4/II	.337	.336	.347	43.74
4/III	.437	.435	.439	39.15
4/IV	.578	.534	.541	35.50
4/V	.764	.749	.763	30.23
5/I	.171	.165	.174	55.82
5/II	.204	.204	.210	50.94
5/III	.260	.252	.259	46.14
5/IV	.329	.334	.335	40.78
5/V	.430	.427	.431	36.18
6/I	.298	.299	.310	53.62
6/II	.364	.372	.378	48.83
6/III	.454	.478	.472	43.98
6/IV	.631	.652	.642	38.12

Les valeurs de la contrainte de frottement moyenne du lit,  $\tau_0$ , calculées d'après la méthode de la distribution des vitesses, ( $\tau_0^V$ ), et celle du gradient de la ligne d'énergie, ( $\tau_0^E$ ), sont données au tableau récapitulatif 2. Dans le même tableau se trouvent aussi les valeurs  $\tau_0^H$  obtenues à l'aide d'une troisième méthode<sup>1</sup>, la méthode d'Einstein<sup>2</sup> [voir Chow (1959, p. 136)].

Comme conclusion on peut dire qu'avec le canal expérimental, et un écoulement turbulent rugueux, la contrainte de frottement du lit,  $\tau_0$ , peut être obtenue selon l'une des trois méthodes suivantes, c'est-à-dire : (a) celle de la distribution des vitesses, (b) celle du gradient de la ligne d'énergie et (c) celle d'Einstein. Cela est mis en évidence au tableau 2.

Cependant il faut être attentif au fait qu'une généralisation peut être considérée une fois que des recherches complémentaires permettront sa confirmation.

<sup>1</sup> Cette troisième méthode ne se trouve pas ici, car on a considéré que deux méthodes assez semblables étaient suffisantes. Néanmoins, les calculs sont faits et indiqués par Pazis (1976).

<sup>2</sup> Le concept de base de la méthode d'Einstein est qu'une section transversale peut être subdivisée en deux sous-sections, l'une influencée par les parois et l'autre par le lit, ayant deux rayons hydrauliques différents :  $R_P$ , pour les parois et,  $R_L$ , pour le lit. L'hypothèse de la méthode est que la vitesse moyenne,  $V$ , et la pente,  $S_E$ , de la section sont considérées constantes pour les parois et le lit. La résistance offerte à l'écoulement est considérée égale à la somme des résistances dues aux parois et au lit.

## Bibliographie

**Adsorption**, par Joseph Tarradellas, Dr sc. techn. — Publication IGE n° 2, 47 pages, 8 tableaux, 31 figures, bibliographie. Prix : Fr. 15.—.

Le but de cette publication est d'offrir un panorama exhaustif de l'état actuel des connaissances, autant théoriques que pratiques, sur le phénomène d'adsorption. On sait que ce phénomène d'interaction physique entre particules joue un rôle important dans différents problèmes d'environnement : concentration des polluants des milieux liquides et gazeux, épuration des effluents. Cette dernière

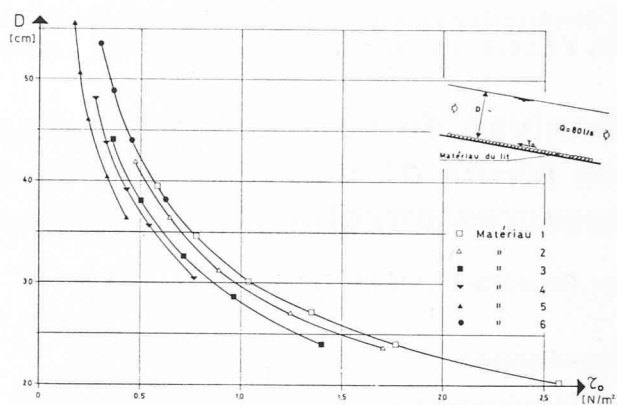


Fig. 5. — Variation de la contrainte de frottement,  $\tau_0^V$ , en fonction de la profondeur,  $D$ .

## RÉFÉRENCES

1. CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1959.
2. GRAF, W. H. *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill, New York, 1971.
3. PAZIS, G. *Faible transport des sédiments par érosion et déposition dans des canaux alluvionnaires*, Thèse présentée au Département de génie civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1976.
4. SCHLICHTING, H. *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, New York, 1968.

## ANNEXE

La recherche décrite ici a été effectuée pour la détermination de la contrainte de frottement,  $\tau_0$ , utilisée pour évaluer les phénomènes d'érosion et de déposition [voir Pazis (1976)]. Dans cette étude, nous avons considéré utile d'exprimer la variation de la contrainte de frottement du lit,  $\tau_0$ , en fonction de la profondeur de l'écoulement,  $D$ , pour les six matériaux utilisés (le débit étant constant,  $Q = 80$  l/s). La famille des courbes est donnée à la figure 5; chaque matériau du lit (c'est-à-dire rugosité) est représenté par une courbe distincte. Cela peut être expliqué : pour un débit,  $Q$ , et une profondeur,  $D$ , donnés, une augmentation de la rugosité du lit provoque une augmentation de la contrainte de frottement du lit,  $\tau_0$ ; ainsi, lorsqu'un écoulement peu rugueux devient très rugueux, le gradient de la distribution verticale des vitesses augmente.

Les courbes  $\tau_0 = f(D)$  de la figure 5 permettent d'obtenir la contrainte de frottement du lit,  $\tau_0$ , en fonction de la profondeur de l'écoulement,  $D$ , pour le chenal du LHYDREP.

Adresse des auteurs :

Georges C. Pazis  
Walter H. Graf  
Laboratoire d'hydraulique de  
l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
Rue de Genève 67  
1004 Lausanne

application de l'adsorption suscite depuis quelques années un grand intérêt et, dans un certain nombre de cas, peut offrir des solutions intéressantes pour l'épuration, en particulier, des effluents industriels. Une place importante a été accordée à l'exposé des plus récentes théories sur l'adsorption statique et sur l'application dynamique du procédé. De nombreux exemples pratiques d'utilisation de l'adsorption pour la séparation ou l'élimination de polluants sont présentés (composés phénoliques, solvants, corps gras). Les différents types d'adsorbants (tamis moléculaires, charbons actifs, etc.) sont analysés comme aussi les problèmes suscités par la régénération de ceux-ci.