NOTE SUR L'ENTRAINEMENT DES MATÉRIAUX PAR CHARRIAGE

NOTE ON BED LOAD MOVEMENT

D'APRÈS LES COMMUNICATIONS FAITES AU 2e CONGRÈS DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES POUR TRAVAUX HYDRAULIQUES A STOCKHOLM - 7-9 JUIN 1948

English Synopsis p. 335

par M. André NIZERY
Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées
Chef du Service des Etudes et Recherches Hydrauliques
d'ÉLECTRICITÉ de FRANCE

Nous n'avons pas l'intention, dans ce court exposé, de passer en revue tous les rapports présentés au Congrès de l'Association Internationale de Recherches pour Travaux Hydrauliques. Ces rapports ont été nombreux mais, il faut bien le dire, peu d'entre eux ont répondu d'une manière précise aux questions posées par les organisateurs. Cela est dû, en partie, au caractère très général de ces questions. Mais il est dommage que, de ce fait, il n'y ait pas eu sur certains problèmes encore mal résolus d'exposés systématiques des points de vue des différents chercheurs des deux mondes.

Les questions posées étaient les suivantes :

— Transport de matériaux de fond ;

— Erosion en aval des barrages.

Nous traiterons seulement ici de ce qui a été dit sur la première question. Nous laisserons par conséquent de côté tous les rapports traitant des érosions à l'aval des barrages qui pourront faire utilement l'objet d'une discussion ultérieure.

Voici la liste des rapports effectivement présentés qui ont répondu en principe à la première question :

N° 1 : CHATLEY H. The distorsion of Scales in Models with loose Beds.

N° 8 : NOVAK P. Experimental and Theoretical Investigation of the Stability of Prisms on the Bottom of a Flume.

N° 10 : TISON L.-J. Transport de matériaux de fond, et Erosion à l'aval de barrages.

N° 15 : MEYER-PETER E. et MULLER R. Formulas for Bed-Load Transport.

N° 19 : INGLIS C. Historical Note on Empirical Equations, developed by Engineers in India for Flow of Water and Sand in Alluvial Channels.

N° 20 : MAVIS F.-T. et LAUSHEY L.-M. A reappraisal of the beginnings of bed movement-competent velocity.

N° 30 : DANEL P. L'entraînement des matériaux.

On peut classer ces rapports en quatre catégories :

1° — Les rapports de MM. MEYER-PETER et MULLER - TISON, MAVIS et LAUSHEY, qui traitent de l'entraînement par charriage des matériaux de fond ;

2° — Le rapport de M. NOVAK qui traite de la stabilité des cubes posés sur le fond d'un lit ;

3° — Les rapports de Sir Claude INGLIS et de M. CHATLEY, qui traitent tous les deux des développements que l'on a donnés en Angleterre et aux Indes aux idées de Gerald LACEY sur l'écoulement dans les canaux d'irrigation en régime d'équilibre de transport solide.

4° — Le rapport de M. DANEL sur quelques aspects du transport en suspension.

Nous nous limiterons dans cet exposé aux trois rapports qui traitent directement du charriage de fond.

RAPPORT DE MM. MEYER-PETER ET MULLER

Formulas for bed - load transport

Seul le rapport de MM. MEYER - PETER et MULLER traite de l'ensemble du problème du

3

charriage ; les rapports de M. TISON et celui de MM. MAVIS et LAUSHEY étant limités à l'étude de la force critique d'entraînement.

Le rapport de MM. MEYER-PETER et MULLER présente un intérêt tout particulier :

— d'une part, du fait que le Laboratoire de Zurich travaille cette question depuis 1933 avec une méthode rigoureuse et une opiniâtreté remarquable ;

— d'autre part, du fait de l'évolution des idées de ces chercheurs qui résulte de leurs derniers travaux.

Rappelons d'abord brièvement les recherches effectuées par le Laboratoire de Zurich (1).

Dans une première phase, le laboratoire a étudié expérimentalement la variation du débit solide charrié en fonction des paramètres suivants :

— débit liquide ;

— pente hydraulique ;

— diamètre et poids spécifique des grains ;

en opérant avec un lit de granulométrie très uniforme.

Les expériences étaient faites dans un canal à parois verticales, parallèles et lisses, le débit solide et le débit liquide étant exprimés par unité de largeur du lit.

Les principales difficultés étaient les suivantes:

1° — On ne réussissait pas toujours à obtenir l'égalité entre la pente du lit J_s, la pente superficielle J_w, et la pente de la ligne d'énergie J.

On admettait alors pour J la valeur :

$$J = J_w - \frac{V^2}{gh}(J_w - J_s).$$

2° — La transposition dans la nature des débits solides obtenus dans le modèle exige des précautions du fait de la rugosité plus ou moins grande des parois du canal expérimental. On éliminait cette difficulté en déterminant par une expérience préliminaire le coefficient de STRICKLER correspondant aux parois R_w. On en déduisait alors le coefficient K_s correspondant au lit par la formule :

$$K_s = \frac{.\,K_m\,.K_w\,.B^{2/3}}{\left[B\,h^{2/3} + 2h\,(K_w^{2/3} - K_m^{2/3})\right]^{2/3}} \qquad (1)$$

K_m étant le coefficient de STRICKLER moyen (compte tenu du lit et des parois) ;
B la largeur du lit ;
h le tirant d'eau.

(1) Tout ce qui suit avait déjà été publié en 1943 dans l'ouvrage du Docteur MULLER : Theoretische Grundlagen der Fluss-und Wildbachverbauungen.

Puis Q_s (débit qu'on aurait en éliminant l'action des parois) par la formule :

$$Q_s = q_s\,B = B.Q.\frac{K_w^{3/2}}{2\,h\,K_s^{3/2} + B\,K_w^{3/2}} \qquad (2)$$

Dans ces conditions et avec une granulométrie uniforme, l'expérience a vérifié d'une manière très satisfaisante les formules bien connues : d'abord :

$$\frac{q^{2/3}\,j}{d} = a + b\,\frac{g^{2/3}}{d} \qquad (3)$$

avec des grains de poids spécifique déterminé. puis

$$\frac{q_s^{2/3}\,j}{d\,\gamma_s''^{10/9}} = 9{,}57 + 0{,}462\,\frac{g^{2/3}}{d\,\gamma_s''^{\,7/9}} \qquad (4)$$

en faisant varier le poids spécifique des grains sous l'eau γ_s''.

Les écarts des résultats expérimentaux, par rapport aux formules, étaient faibles : (maximum 6 %, moyenne 3 %).

Les résultats des expériences de GILBERT se plaçaient également convenablement par rapport à la loi empirique résultant des formules, mais avec une précision relative moindre surtout aux faibles débits solides.

Les difficultés réelles ont commencé lorsque le Professeur MEYER-PETER a commencé à travailler sur des mélanges de granulométrie variée.

Une première série d'expériences antérieures à 1938 conduite en prenant comme diamètre des grains, le diamètre moyen $d_m = \dfrac{\Sigma\,d\,\Delta\,p}{100}$ a mis en évidence des divergences importantes par rapport à la loi empirique initiale, comme le montre la figure 1.

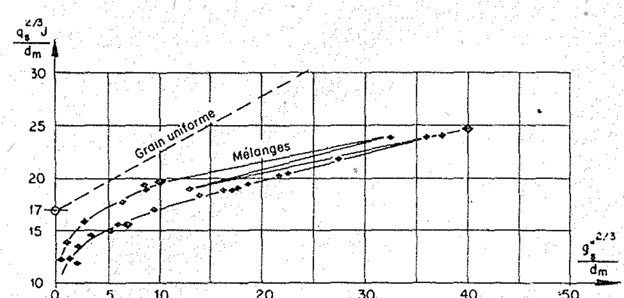

Fig. 1 (d'après Meyer-Peter et Muller).

Les essais ont été poursuivis systématiquement après 1938, avec des pentes variant de 0,4 o/oo à 8 o/oo, allant même jusqu'à 20 o/oo dans une expérience à très petite échelle et avec des diamètres de grains allant de 0,4 à 4,4 mm. On a abouti à un nuage de points qui n'est pas plus satisfaisant. Par contre, une série d'essais portant uniquement sur le début d'entraînement et avec une granulométrie uniforme a montré une relation très nette entre la fonction $\left(\frac{q^{2/3}\ J}{d}\right)$ pour $g = 0$ et la pente J. Les essais ont donné approximativement, comme le montre la fig. 2.

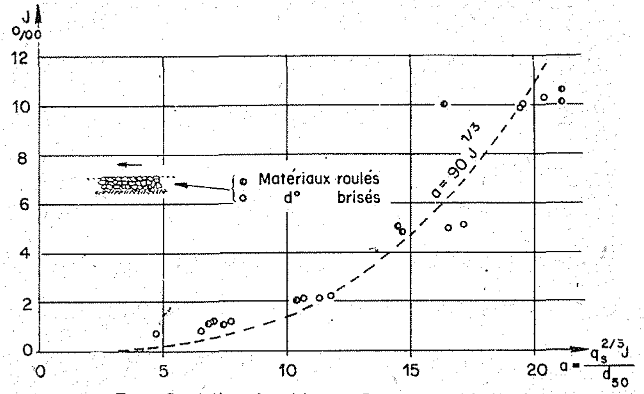

Fig. 2 (d'après Meyer-Peter et Muller).

$$\left(\frac{q^{2/3}\ j}{d}\right)_0 = f\ J^{1/3} \qquad (5)$$

D'où

$$\frac{q^{2/3} J^{2/3}}{d} = f = \text{Cte pour } g = 0 \qquad (6)$$

Partant de là, MM. MEYER-PETER et MULLER ont modifié petit à petit la structure de leurs formules pour tenter de les rapprocher de l'expérience.

1° — Partant du résultat expérimental obtenu sur la force critique d'entraînement et substituant dans l'expression correspondante la valeur du débit résultant de l'application de la formule de STRICKLER :

$$v = c\ \left(\frac{R_s}{d}\right)^{1/6} R_s^{1/2}\ J^{1/2} \qquad (7)$$

ils aboutirent à l'équation :

$$\left(\frac{\gamma_w\ R_s\ J}{d}\right)_{g=0} = K\ \frac{d}{R_s}^{1/9} \qquad (8)$$

qui montre que la force tractrice critique varie avec la rugosité relative, mais dans des proportions très faibles, $\left(\frac{d}{R_s}\right)^{1/9}$ étant pratiquement constant dans les limites naturelles.

2° — Mais alors le commencement d'entraînement étant caractérisé par la force tractrice, les auteurs en vinrent à chercher une relation entre le débit solide g et la force tractrice. Leur formule initiale devint alors :

$$\frac{q_s^{2/3}\ J^{2/3}}{d_m} = C_1 + C_2\ \frac{g_s^{2/3}}{d_m} \qquad (9)$$

ou encore :

$$\gamma_w\ \frac{R_s\ J}{d_m} = C_3 + C_4\ \frac{g_s^{2/3}}{d_m} \qquad (10)$$

Malheureusement, cette expression ne convenait encore pas, comme le montre la figure 3.

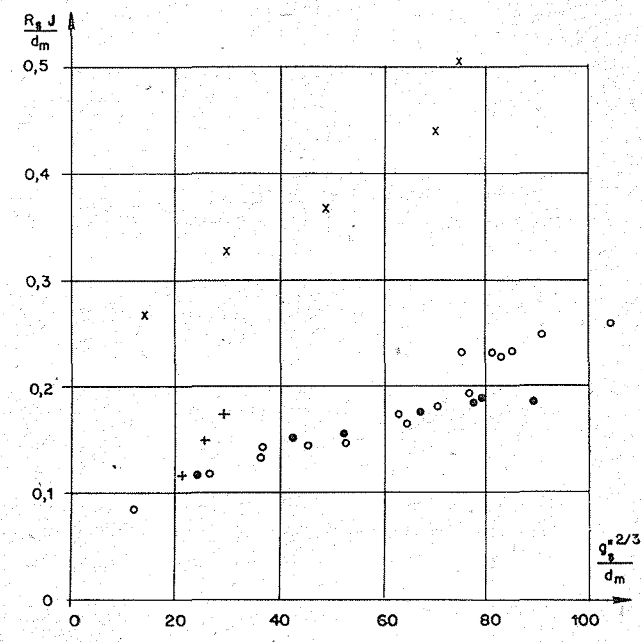

Fig. 3 (d'après Meyer-Peter et Muller).

C'étaient les essais avec des matériaux très fins (0,4 mm.) et comportant des rides qui s'écartaient le plus franchement de la loi générale. Le débit solide correspondant à ces essais était nettement plus faible que ne l'indiquait la formule.

3° — Les auteurs eurent alors l'idée de discriminer dans la pente hydraulique :

— une part correspondant à la rugosité du lit (rugosité de forme) ;

— une part correspondant à l'énergie transformée en tourbillons par le frottement des particules entre elles (rugosité de particules).

Comment déterminer quantitativement ce partage ?

Le raisonnement des auteurs est le suivant :

a) — Si le transport solide dépendait uniquement de l'énergie transformée en tourbillons par le roulement des particules solides sur le fond, c'est la pente hydraulique correspondante qu'il faudrait introduire dans l'expression de base. Cette pente hydraulique que les auteurs appellent

« pente de pur frottement » est donnée par la formule de STRICKLER :

$$J_r = \frac{V^2}{K_r^2 \; R_s^{4/3}} \qquad (11)$$

K_r étant le coefficient de STRICKLER **en supposant le lit lisse ;**

— tandis que la pente hydraulique totale serait donnée par :

$$J = \frac{V^2}{K_s^2 \; R_s^{4/3}} \qquad (12)$$

K_s étant le coefficient de STRICKLER déterminé comme il a été indiqué plus haut.

Il en résulte que :

$$J_r = J \times \left(\frac{K_s}{K_r}\right)^2 \qquad (13)$$

La formule de charriage deviendrait donc, dans cette hypothèse :

$$\gamma_w \left(\frac{K_s}{K_r}\right)^2 \frac{R_s \; J}{d_m} = C_5 + C_6 \frac{g_s^{2/3}}{d_m} \qquad (14)$$

b) — On remarque que, dans la pente J qui intervient dans l'expression de la force tractrice de l'équation (8) il faut distinguer la part $J^{1/3}$ qui est incluse dans le $q^{2/3}$ de l'équation (6).

Si l'on fait l'hypothèse que ce $J^{1/3}$ doit s'entendre en pente totale J tandis que $J^{2/3}$ doit s'entendre en « pente de pur frottement », la formule de charriage conserve une forme analogue, l'exposant de $\left(\frac{K_s}{K_r}\right)$ devenant 4/3 au lieu de 2.

Entre ces deux hypothèses extrêmes, les auteurs ont donc cherché la valeur de cet exposant qui permettait à la formule de rendre compte des résultats expérimentaux, de la meilleure manière et ils ont trouvé que cette valeur était 3/2. Ils donnèrent donc à l'expression la forme suivante :

$$\gamma_w \left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} \frac{R_s \; J}{d_m} = C_7 + C_8 \frac{g_s^{2/3}}{d_m} \qquad (15)$$

Nous ne nous étendrons pas sur les développements que présentent les auteurs pour adapter leur nouvelle formule aux variations du poids spécifique des matériaux et pour déterminer les coefficients de STRICKLER du lit dans le cas où la turbulence n'est pas pleinement développée.

Compte tenu des développements qui précèdent, la formule proposée devient, sous sa forme la plus générale :

$$\gamma_w \left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} h \, . \, J = 0{,}047 \, \gamma_s'' \, d_m + 0{,}25 \left(\frac{\gamma_w}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot g_s''^{\frac{2}{3}} \qquad (16)$$

les conditions critiques d'entraînement étant données par :

$$\left[\gamma_w \, h \, J\right]_0 = 0{,}047 \, \gamma_s'' \, d_m \left(\frac{K_r}{K_s}\right)^{3/2} \cdot \frac{Q}{Q_s} \qquad (17)$$

La condition (17) ne correspond à la condition (16) pour $g = 0$ que si $\frac{Q}{Q_s} = 1$ ce qui n'est vrai que pour des canaux très larges où l'influence des parois est négligeable. Si l'on ajoute l'hypothèse supplémentaire que le lit soit lisse sans bancs de graviers ni rides de sables, $\frac{K_r}{K_s} = 1$, et la formule se simplifie en :

$$(\gamma_w \, h \, J)_{g=0} = 0{,}047 \, \gamma_s'' \, d_m \; ; \qquad (18)$$

Le mémoire précise que pour le «repos absolu» il est nécessaire d'adopter pour la constante une valeur plus petite 0,03.

$$(\gamma_w \, h \, J)_{g=0} \sim 0{,}03 \, \gamma_s'' \, d_m \qquad (19)$$

La figure 4 illustre la confrontation de l'expérience et de la nouvelle formule.

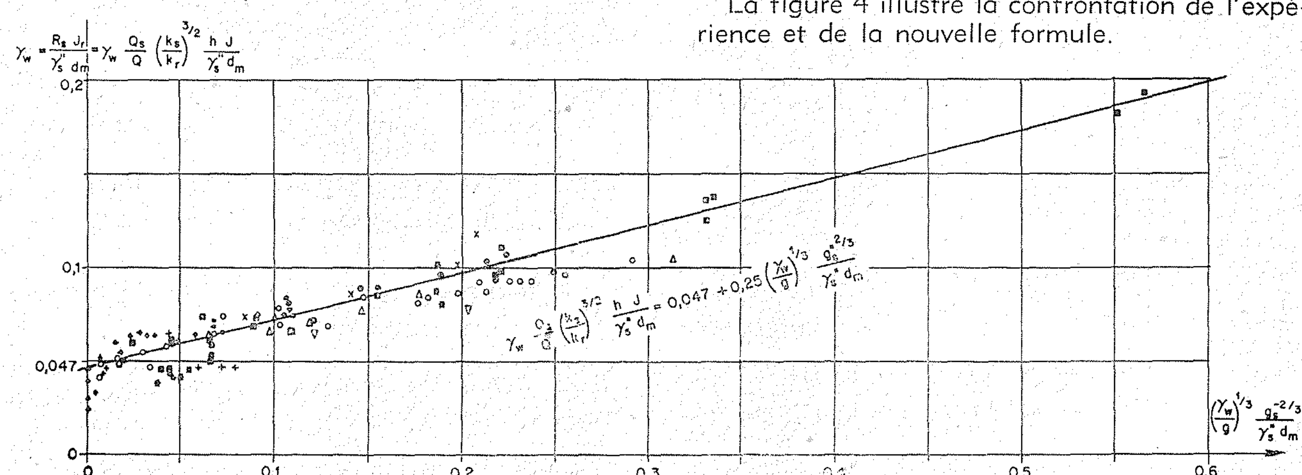

Fig. 4 (d'après Meyer-Peter et Muller).

COMMENTAIRE

1° — Ce qui frappe le plus dans la nouvelle formule proposée par MM. MEYER-PETER et MULLER c'est qu'elle adopte comme groupement déterminant du débit solide la force tractrice. Somme toute, l'expérience a ramené progressivement le Laboratoire de Zurich vers la notion qui a servi de base à la vieille théorie de DU BOYS, notion qui a été reprise après lui par de nombreux auteurs, notamment par les américains.

Ainsi, la nouvelle formule de MEYER-PETER peut s'écrire sous la forme :

$$\left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} (\tau - \tau_0) = 0,25 \left(\frac{\gamma_w}{g}\right)^{1/3} g_s''^{\,2/3} \qquad (20)$$

τ étant la force tractrice ;

τ_0 étant la force tractrice correspondant au début de l'entraînement ;

ou encore :

$$g_s'' = C\,(\tau - \tau_0)^{3/2} \qquad (21)$$

Sous cette forme, l'expression du débit solide est voisine de certains résultats obtenus en Amérique, notamment par la station expérimentale de Vicksburg des U.S. Waterways. Après une série de près de 800 essais, dont 275 seulement ont été sélectionnés, ce laboratoire a conclu en 1936 a l'adoption (1) d'une formule de la forme :

$$W = \frac{1}{n}\left(\frac{T - T_0}{R}\right)^m \qquad (22)$$

où W est le débit solide charrié ;

T la force tractrice ;

T_0 la force tractrice au moment du commencement de l'entraînement ;

R et m deux paramètres dépendant des caractéristiques physiques des matériaux de fond.

Quand on se reporte aux comptes rendus des essais, on constate que l'exposant m a varié en fait entre 1,5 et 1,8, la moyenne générale étant de 1,62, alors que la formule de Zurich ferait ressortir un exposant 3/2.

La nouvelle formule de MEYER-PETER apporte, par rapport à ce qui avait été proposé jusqu'ici, une interprétation beaucoup plus satisfaisante des variations du coefficient C en introduisant la distinction entre l'énergie dissipée par simple frottement sur le fond (rugosité de forme) et l'énergie dissipée dans la mise en mouvement des particules (rugosité de particules).

Il semble que des essais relativement simples permettraient de mettre en évidence cette répartition de l'énergie de l'écoulement. Il suffirait pour cela de mesurer les caractéristiques de l'écoulement dans un canal dont le fond serait tapissé de matériaux qui, dans une première phase, pourraient se mouvoir librement, et dans une seconde seraient fixés artificiellement (par exemple, par un champ magnétique, en utilisant un matériau adéquat).

2° — On a pu remarquer qu'à la fin de son mémoire M. MEYER-PETER suggère, pour déterminer les conditions hydrauliques correspondant au « repos absolu » du fond, de réduire de 0,047 à 0,03 la constante du premier terme de sa formule.

Cette réserve pose le problème de la définition même des conditions critiques d'entraînement. Cette question se raccordant directement aux mémoires de M. TISON et de MM. MAVIS et LAUSHEY, nous en parlerons après avoir rendu compte de ceux-ci.

3° — Enfin, dans sa conclusion, M. MEYER-PETER, désireux de confronter sa formule avec les données naturelles, demande que les mesures dans la nature faites par les spécialistes de ces questions soient conduites suivant une méthode qui permette de les confronter avec sa formule.

Nous souscririons volontiers à ce vœu si M. MEYER-PETER nous indiquait en même temps une méthode de mesure des débits solides charriés suffisamment éprouvée et fidèle pour que tout le monde puisse l'adopter sans réticence. Or, et c'est malheureusement le point faible de toutes ces excellentes théories, si le problème a été étudié et analysé d'une manière systématique en laboratoire, il est loin d'en être de même dans la nature.

Il semble donc que la première chose à faire serait de créer les instruments indispensables à l'étude du phénomène réel. Toutes les variétés de nasses étudiées jusqu'ici n'ont guère donné des résultats très encourageants par leur fidélité. Peut-être la « hotte » que EINSTEIN a utilisée en Amérique constitue-t-elle l'instrument adéquat pour travailler dans des cours d'eau peu importants.

En définitive, le problème est loin d'être résolu.

Avec les deux mémoires suivants, nous nous trouvons maintenant limités à l'étude des conditions critiques d'entraînement.

(1) Studies of River Bed Materials and their movement with special reference to the Lower Mississipi River - War Dept. Corps of Engineers U. S. Army - U. S. Waterways experim. station, Vicksburg, janv. 1936.

Le premier, celui de M. TISON, Professeur à l'Université de Gand, est axé sur la variation de la force tractrice en fonction du nombre de Reynolds.

Le second, celui de MM. MAVIS et LAUSHEY, rappelle une formule que les auteurs proposaient en 1935 et qu'ils confrontent avec un certain nombre de résultats expérimentaux anciens et récents.

RAPPORT DE M. L.-J. TISON

Transport de matériaux de fond

Les travaux de M. TISON, Professeur à l'Université de Gand, ne portent que sur la détermination de la force critique d'entraînement, à l'exclusion du débit solide charrié.

Son exposé se réfère aux travaux de SHIELDS et de WHITE qui ont tenté d'établir une relation entre la force tractrice critique τ_0 et le nombre de Reynolds réduit de l'écoulement au voisinage des grains : $R_{e*} = \dfrac{U_* d}{\nu}$ et sur les discordances qu'il a observées expérimentalement en appliquant les formules de ces auteurs.

Selon SHIELDS $\dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d}$ est d'abord inversement proportionnel à R_e pour les petits nombres de Reynolds, puis il reste constant jusqu'à $R_e = 10$, ensuite il recommence à croître jusqu'à une autre valeur constante 0,06 pour $R_e = 1.000$ et au delà.

Pour WHITE, les variations de $\dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d}$ sont liées au rapport de la tension maximum résultant de la turbulence à la tension qui résulterait de la vitesse moyenne sans fluctuations. Il en déduit que la valeur de $\dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d\ \mathrm{tg}\,\varphi}$ n'est égale à 0,18 qu'en écoulement laminaire mais qu'elle tombe à la moitié de cette expression pour $R \leqslant 3{,}5$ puis au quart de cette expression au fur et à mesure que la turbulence se développe à l'intérieur de l'écoulement.

M. TISON s'est attaché, en utilisant ses propres expériences et celles d'un assez grand nombre d'expérimentateurs à vérifier les discordances qu'il avait constatées.

Sur le graphique (fig. 5) il a porté en ordonnées les valeurs de $\dfrac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d}$ et en abscisses le nombre de Reynolds R_e

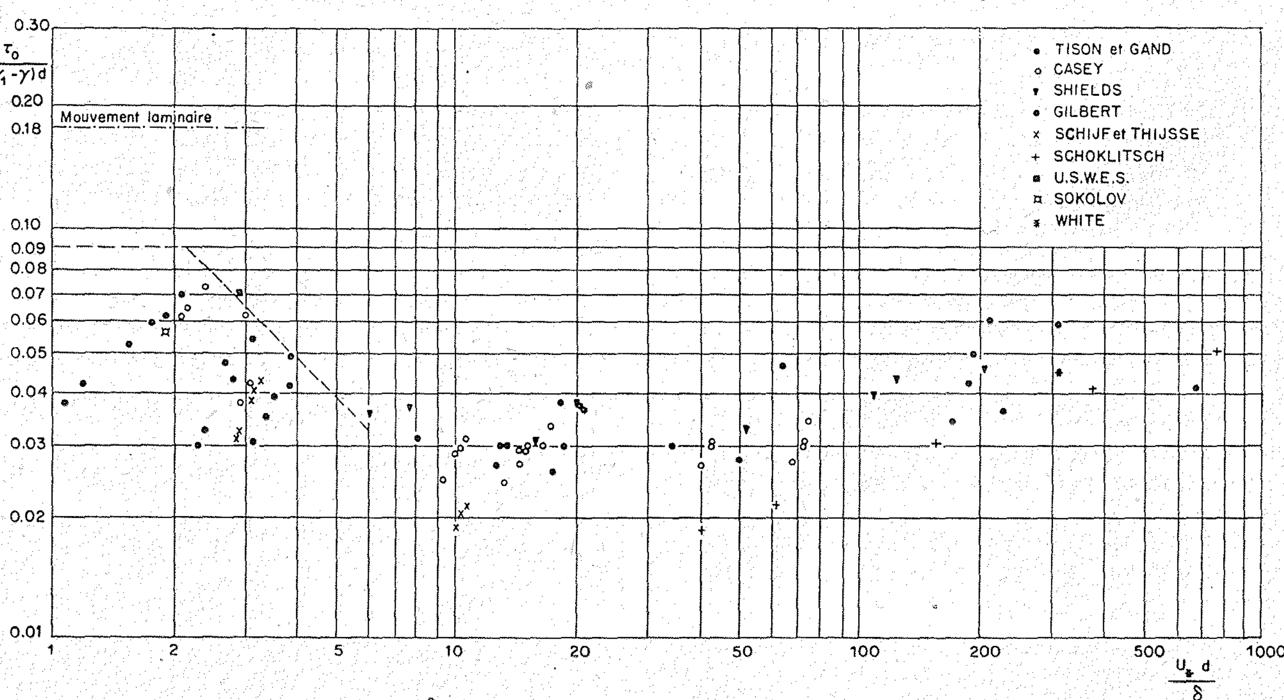

Fig. 5 (d'après Tison).

Il a constaté tout d'abord que, dans les faibles nombres de Reynolds, on ne retrouve ni les conclusions de SHIELDS d'après lesquelles les points expérimentaux devraient être (en coordonnées logarithmiques) sur la droite $\frac{0{,}1}{R_e}$, ni celles de WHITE qui voudraient que les points se placent sur l'horizontale de cote 0,09.

Comme on le voit, les points sont dispersés dans une zone assez large mais tous en dessous de ces deux lignes. Il faut cependant observer que, malgré la dispersion assez grande des points, l'allure de la variation de $\frac{\tau_0}{(\gamma_1 - \gamma)\, d}$ pour les nombres de $R_e > 3{,}5$ est bien conforme en moyenne aux indications de SHIELDS.

Pour vérifier la théorie de WHITE, M. TISON a calculé ce qu'il appelle le coefficient de turbulence K c'est-à-dire le rapport entre le τ_0 résultant de la formule de WHITE 0,18 $(\gamma_1 - \gamma)\, d \operatorname{tg} \varphi$ et le τ_0 réel. Il déduit cette dernière valeur soit de la pente $\tau_0 = \gamma\, h\, i$ soit de la vitesse moyenne en appliquant la formule universelle de répartition des vitesses de Karman.

C'est ce coefficient de turbulence par lequel on devrait multiplier $\gamma\, h\, i$ pour obtenir la valeur de la tension réelle d'entraînement. Ce coefficient varie, comme le montre le graphique, de 4 à 7, les grandes valeurs correspondant plutôt aux faibles nombres de Reynolds.

Les points expérimentaux vérifient bien grossièrement la théorie de WHITE pour les grands nombres de Reynolds où K est de l'ordre de 4, beaucoup moins bien pour les très petits nombres de Reynolds où K ne s'abaisse pas au-dessous de 2,5 et pas du tout pour les nombres intermédiaires. M. TISON explique cette anomalie en faisant remarquer que l'action des fluctuations turbulentes de la vitesse sur le mouvement des matériaux peut ne pas se faire sentir sur les gros matériaux en raison de leur inertie.

RAPPORT DE MM. MAVIS ET LAUSHEY

APPRECIATION DE LA VITESSE DE COMMENCEMENT D'ENTRAINEMENT DU LIT

Après un exposé philosophique sur la méthode de séparation des paramètres qui interviennent dans la question, les auteurs indiquent tout d'abord la formule théorique qui résulterait d'une analyse simplifiée du phénomène d'entraînement :

$$V_b \sim \sqrt{d\,(s-1)} \qquad (23)$$

où V_b = vitesse au fond ;
d = diamètre des grains ;
s = poids spécifique des grains.

En effet, l'effort de traction sur les grains est proportionnel à $\gamma\, V^n\, d^2$ et sa résistance au déplacement est proportionnelle à $\rho\ (s - 1)\ d^3$. L'équilibre entre ces forces contraires exigerait donc que V_b, vitesse critique d'entraînement, soit proportionnel à $\sqrt{d\,(s\text{-}1)}$.

Ensuite, les auteurs rappellent un certain nombre de résultats expérimentaux anciens et nouveaux et ils montrent que ces résultats s'accordent assez bien avec la formule :

$$V_b = \frac{1}{2}\, d^{4/9}\ (s-1)^{1/2} \qquad (24)$$

COMMENTAIRES SUR LES CONDITIONS CRITIQUES D'ENTRAINEMENT

Le problème du commencement d'entraînement des matériaux par charriage a déjà donné lieu à une grande quantité de recherches. M. LABAYE, dans une communication à la Société Hydrotechnique de France, a déjà passé en revue les formules qui ont été suggérées par de nombreux expérimentateurs. Malgré l'intérêt des trois mémoires qui ont abordé le sujet au Congrès de Stockholm, on ne peut affirmer qu'ils lui aient apporté une solution définitive.

Nous nous arrêterons un instant sur deux points :

1° — Les formules donnant les conditions critiques d'entraînement adoptent presque toutes maintenant comme paramètre du phénomène la force tractrice.

C'est ainsi que M. TISON suit en cela le plus grand nombre des formules antérieures (Vicksburg, Indri, Kramer...). Mais ce qui est plus frappant c'est que, parti d'une formule empirique d'une structure différente, le laboratoire de Zurich ait été ramené progressivement par l'expérience à l'adoption de ce paramètre, adopté par la plupart des auteurs en partant de théories a priori comme celle de DU BOYS.

Cependant, quelques chercheurs font encore exception en prenant comme variable soit la vitesse moyenne, soit la vitesse au fond.

MM. MAVIS et LAUSHEY, qui optent pour la vitesse au fond, justifient leur choix par le souci d'utiliser une « cause primaire » de l'entraînement des matériaux. Mais ils négligent les difficultés de la définition même de cette vitesse au fond dans une zone à fort gradient de vitesse, et la quasi-impossibilité de la rattacher correctement aux caractéristiques générales de l'écoulement.

M. ALLEN, Professeur à l'Université d'Aberdeen, a présenté en 1942 (1) une série de formules empiriques établies en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement, qui peuvent se ramener à la forme générale :

$$\bar{v} = K \cdot d^{0,27}\ h^{0,23}\ \gamma_s''^{\,0,27} \qquad (25)$$

Il est possible de transformer ces formules et d'y éliminer la vitesse moyenne, en utilisant une formule d'écoulement reliant la vitesse moyenne à la profondeur et à la pente hydraulique.

Il est alors intéressant de constater que l'on aboutit à un groupement très voisin de la force tractrice.

Ainsi, en prenant la formule de MANNING-STRICKLER :

$$\bar{v} = \frac{c}{d^{1/6}}\ h^{2/3}\ J^{1/2}$$

on trouve :

$$h\ J^{1,16} = K\ d\ \gamma_s''^{\,0,63} \qquad (26)$$

Le groupement $h\ J^{1,16}$ n'est pas exactement l'expression de la force tractrice, mais il en est très voisin. Par ailleurs, on remarque que le groupement $h\ J^{1,16}$ correspondant au commencement d'entraînement est proportionnel à d diamètre des grains, comme dans plusieurs autres formules, telles que celles d'INDRI et de MEYER-PETER.

2° — Un trait commun à la presque totalité des formules et théories sur le charriage est l'imprécision de la définition du commencement d'entraînement. C'est cette imprécision qui explique, selon nous, que l'on arrive difficilement à étayer ou à infirmer expérimentalement les théories échafaudées par divers auteurs. Le danger est d'autant plus grand que certains, comme les auteurs des deux derniers rapports dont nous avons parlé, n'hésitent pas à reporter sur un même graphique des résultats d'origines très diverses. On ne peut guère s'étonner après cela du manque de netteté des conclusions auxquelles on aboutit. Il est assez caractéristique à cet égard de constater la distinction faite par MM. MEYER-PETER et MULLER entre le « repos absolu » et le commencement d'entraînement. Cette distinction met en cause la définition même du début d'entraînement. Bien qu'on retrouve cette distinction dans quelques auteurs, peu d'entre eux se sont attachés jusqu'ici à sortir d'une définition purement qualitative.

Une tentative a été faite en 1936 par le laboratoire américain de Vicksburg en vue d'une définition quantitative du début d'entraînement. Elle consistait à admettre que le commencement de charriage était caractérisé par l'entraînement d'une quantité déterminée de matériaux (1 livre - poids sec - par pied de largeur et par heure). On éliminait ainsi toute hésitation dans l'appréciation par l'observateur du démarrage du phénomène. Mais cette méthode, bien qu'elle constitue en principe un progrès, reporte sur le choix de la quantité minimum charriée l'arbitraire de la définition.

En fait, la notion du début d'entraînement peut différer assez largement suivant le but recherché.

La notion de repos absolu évoquée par le rapport de M. MEYER-PETER peut être surtout utile à l'ingénieur qui cherche les conditions à remplir pour éviter les affouillements en toute certitude, par exemple au pied d'un ouvrage. La nécessité d'une marge de sécurité justifie alors largement l'emploi de la formule :

$$\left[\gamma_m\ h\ J\right]_0 \sim 0,03\ \gamma_s''\ d$$

Par contre, pour l'ingénieur qui cherche, par exemple, à déterminer les conditions d'évolution d'un lit naturel, le « repos absolu » perd de son intérêt car ce sont des débits solides appréciables qui conditionneront seuls le mécanisme du phénomène. Il en est probablement de même pour l'expérimentateur qui cherche à réaliser la similitude des phénomènes d'entraînement. On serait donc tenté d'établir cette similitude en adoptant purement et simplement les conditions critiques résultant de la formule générale du débit solide en y faisant $g = 0$.

Une conclusion dans ce sens nous semble a priori assez logique mais nous pensons qu'elle est prématurée en raison de l'insuffisance de nos connaissances actuelles sur les débits solides dans la nature. Par ailleurs, cette définition pratique ne dispense pas de rechercher par une analyse plus poussée, probablement par la voie statistique, une définition plus satisfaisante des phénomènes observés. Là aussi, nous pensons que les progrès sont à attendre davantage d'observations dans la nature que de nouveaux essais de laboratoire.

---

(1) « An investigation of the stability of bed materials in a stream of water » - Journal of Inst. of C.E. mars 1942.